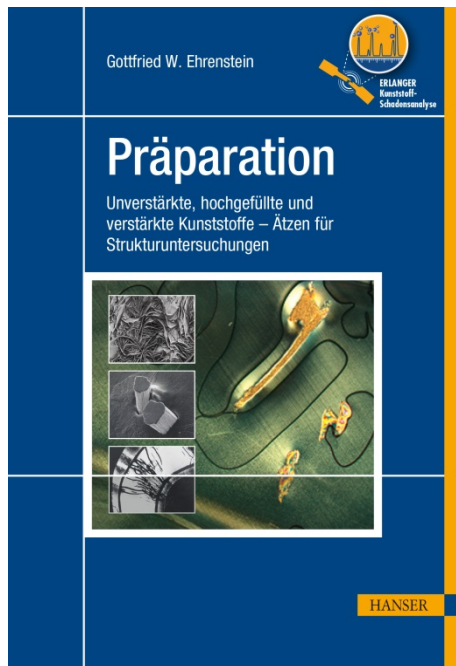


HANSER



Leseprobe

zu

„Präparation“

von Gottfried W. Ehrenstein

Print-ISBN: 978-3-446-40382-6

E-Book-ISBN: 978-3-446-46054-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-40382-6>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort von Prof. Schmachtenberg zur „Erlanger Kunststoff- Schadensanalyse“

Hier wächst sie also: Die Erlanger Schadensanalyse, ein Kompendium aus 10 Büchern, in dem die Methoden und Erkenntnisse dokumentiert sind, die es erlauben, Schadensbilder bei Bauteilen aus Kunststoffen zu verstehen.

Wie so oft in den Technikwissenschaften gelingt ein umfassendes Verständnis erst, wenn die präzise Beschreibung von naturwissenschaftlichen Grundlagen, hier insbesondere aus der Chemie und Physik mit dem Erfahrungswissen des Technischschaffenden eine Verbindung eingeht. Denn das meiste, was die Technik erschafft, funktioniert, ohne dass es umfassend, eindeutig und exakt beschrieben ist. Dies mag verwundern, aber es ist der Kern dessen, was gerne als die Intuition des Ingenieurs beschrieben wird.

Grundsätzlich gesehen, wird immer eine neue Technologie zuerst entwickelt und dann, auf den Erfahrungen mit dieser Technologie aufbauend, werden die naturwissenschaftlichen Grundlagen, auf denen eine solche Technologie beruht, verstanden und wissenschaftlich präzise formuliert. Ein schönes Beispiel hierfür liefert James Watt mit der Erfindung der Dampfmaschine, die er erfand bevor dann die Thermodynamik ihre Hauptsätze zur Energiewandlung überhaupt erst formulieren konnte.

Die Vielfältigkeit von Schadensformen an Kunststoffbauteilen erschließt sich aus der gelebten Anwendung: Wieso entstand der Schaden? War es ein Mangel in der Konstruktion? Wurde die Gestalt des Bauteils ungünstig gewählt? Waren die Pflichtenhefte und die hier vermerkten Anforderungen an das Bauteil unzureichend? War es ein ungeeigneter Werkstoff? Oder war es ein Mangel in der Produktion, der die Bauteileigenschaften ungünstig veränderte? Und schließlich: War der Gebrauch bestimmungsgemäß?

Aus jeder dieser Fragen öffnet sich ein Fächer tiefergehender Fragestellungen, etwa zu den thermischen, mechanischen und chemischen Einwirkungen auf das Bauteil und das hieraus resultierende Alterungsverhalten. Die Schadensanalyse erlaubt es, an einem singulären Bauteil aus dem Feld das Alterungsgeschehen im realen Betrieb zu verfolgen. Dabei geht es in der ersten Linie oft gar nicht um die Aufklärung eines bereits eingetretenen Schadens sondern viel öfter um die Frage,

ob ein neues Produkt im laufenden Einsatz auch tatsächlich die geforderte Zuverlässigkeit bietet.

Es ist dem Autor, Professor Ehrenstein und den vielen Zuarbeitern hoch anzurechnen, sich der Mühsal unterworfen zu haben, die umfassenden Methoden und vielfältigen Erkenntnisse der Schadenanalyse der Kunststoffe in dieser Buchreihe zusammengefasst zu haben. Dabei ist es ein Glücksfall, dass gerade am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität Erlangen über nun schon nahezu 40 Jahre kontinuierlich an diesem Themenbereich gearbeitet wurde und nun diese Kenntnisse so umfassend zusammengetragen wurden. Ein unentbehrlicher Ratgeber, nicht nur für den Schadenssachverständigen, nein auch für alle, die sich mit der Entwicklung hochwertiger Produkte aus Kunststoffen befassen.

Prof. Dr.-Ing. E. Schmachtenberg, im Januar 2019

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg, (geb. 1952) studierte an der RWTH Aachen Maschinenbau und promovierte am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) zum mechanischen Verhalten von Polymerwerkstoffen. Nach verschiedenen Positionen in Wissenschaft und Wirtschaft wurde er 1993 auf den Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität-GH Essen berufen und zugleich als Geschäftsführer der IKM GmbH in Essen bestellt. 2001 wechselte er auf den Lehrstuhl für Kunststoff-Werkstofftechnik der RWTH Aachen University und 2006 den Lehrstuhl für Kunststofftechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Von 2008 bis 2018 war er Rektor der RWTH Aachen University.



(RWTH Aachen)

Er war Präsident der TU9, Vizepräsident des VDI und von CESAER, Vorsitzender des Board of Governors, GÜtech, Oman, im Beirat der Tokyo Institute of Technology und im Vorstand des IGCS, IIT Madras/Chennai und ist Vorsitzender des Hochschulrates der TU Darmstadt.

Ernst Schmachtenberg ist verheiratet und Vater von drei Kindern.

Vorwort von Prof. Ehrenstein zur „Präparation“

Die Schadensanalyse und Qualitätssicherung erfordern in der Kunststofftechnik ungleich differenziertere Analyse-Verfahren als bei den Metallen. Zum einen ergibt sich das aus dem komplizierten Aufbau der organischen Kunststoffe aus die Anisotropie fördernden Makromolekülen mit unterschiedlichen Bindungen, die chemisch, physikalisch und mechanisch sein können, und eine starke Abhängigkeit von der Temperatur und der Höhe der Last haben. Im Gegensatz zu Metallen weisen Kunststoffe zudem drei Zustandsbereiche auf, energie-elastisch, entropie-elastisch und schmelze-/fließförmig statt nur der üblichen Zustände fest und flüssig.

Bauteile aus Kunststoffen werden formgenau hergestellt und integral als Gehäuse-, Verbindungs- und Funktionselemente eingesetzt. Die mechanischen und thermischen Eigenschaften können mit Additiven, Füll- und Verstärkungsstoffen in einem weiten Rahmen variiert werden. Einige werden für spezielle Anwendungen modifiziert. Viele dieser Modifikationen sind dem Anwender nicht bekannt und auch kaum analysierbar.

Für die wichtigsten Kennwerte stehen eine Fülle von Tabellenwerten und Kunststoffdatenbanken zur Verfügung. Trotz dieser Hilfestellung ist für eine kunststoffgerechte Konstruktion eine intensive Auseinandersetzung mit den speziellen Eigenschaften und vielfältigen Erfahrungen im Umgang mit Kunststoffen notwendig.

Inwieweit die Vorgaben durch die Stoffeigenschaften in den einzelnen Prozessstufen den Anforderungen genügen, ist häufig schwer zu beurteilen. Es beginnt mit der Bereitstellung des Materials, der konstruktiven Auslegung, der Fertigung von Werkzeugen unterschiedlicher Konstitution und damit im singulären Entwicklungszustand mit dem Ergebnis von Formteilen in unterschiedlichem prototypischen Zustand. Zeitabhängige Strukturentwicklungen, aber auch Abbaureaktionen können einen erheblichen Einfluss haben.

Nicht übersehen werden darf, dass viele Strukturmerkmale noch nicht ausreichend bekannt sind. Selbst selbstverständliche Annahmen wie eine Fließtemperatur bei amorphen Thermoplasten ist bis heute nicht definiert, obwohl fast alle amorphen Thermoplaste über die fließfähige Phase verarbeitet werden.

Andere Beispiele zeigen, dass die zur Charakterisierung des Temperatur-Steifigkeits-Verhaltens von Kunststoffen üblicherweise herangezogenen Methoden alleine nicht in der Lage sind, dem Konstrukteur zuverlässige Unterlagen für seine Konstruktionsrechnung zu liefern. So stellt der führende Kunststofftechniker, Dr.-Ing. Karl Oberbach fest, dass für ein konditioniertes PA Formbeständigkeiten zwischen 40 und 200 °C je nach angewandter genormter Prüfmethode (Schubmodul; Vicat B; ISO 75A; HDT) gemessen werden können. Besonders kritisch sieht er den Biegeversuch.

Alle Schadensuntersuchungen beginnen mit der Präparation der Prüfkörper und so auch diese Reihe der Bücher der Erlanger Kunststoffschadensanalyse. Ihnen liegen jahrzehntelange Erfahrungen in der Großchemie, in zwei Universitätsinstituten und dem Süddeutschen Kunststoffzentrum zugrunde, die zusammenfassend im Lehrstuhl für Kunststofftechnik in Erlangen unter besonderer Mitwirkung von Frau Dipl.-Ing. (FH) Gabriela, Riedel, der Leiterin der Analytik, und ihrer langjährigen exzellenten Vertreterin Pia Trawiel erfolgten. Mein besonderer Dank gilt den Laborleiterinnen Mikroskopie des LKT in Erlangen, Frau Birgit Kaiser, Frau Dipl.-Ing. (FH) Helen Petukhov und Marion Untheim für Ihre vielfältige, fachkundige Hilfe und Herrn Dr.-Ing. Jörg Trempler, Martin Luther Universität, Halle, für die kritische Durchsicht und konstruktive Bemerkungen und Anregungen.

Gedankt sei besonders den über lange Zeit helfenden sorgfältigen Formatierern der komplexen Texte und Bilder, den Studenten Stefan Michaloudis und Benjamin Klevanski aus Erlangen, Engin Erginoglu aus Kassel und Tobias Mattner aus Bremen sowie der Kasseler Schriftstellerin Nicole Zaspel.

Die Zielgruppe dieser Buchreihe sind die Anwender und Praktiker. Hier tritt der Aspekt des wissenschaftlichen Arbeitens zurück hinter den Aspekt der sicheren Beherrschung des aber oft lückenhaften Standes der Technik. Der Stand der Technik kann sich häufig nur auf einzelne Punkte konzentrieren, wobei auch häufig bei der Schadensanalyse nur einzelne Betrachtungspunkte wichtig sind. Da diese Betrachtungspunkte aber häufig nicht zusammengefasst werden können, unter irgendeinen übergeordneten Gesichtspunkt oder einer Sichtweise wie wissenschaftliche Themen; müssen diese anschaulich und leicht auffindbar dargestellt werden.

In diesem komplexen Umfeld ist die sinnvolle Präparation der Prüfkörper für die einzelnen Kunststoffarten vielfältig und muss material- und schadensgerecht sorgfältig durchgeführt werden. Diesem Thema widmet sich der erste Band der „Erlanger Kunststoff-Schadensanalyse“ mit den Einzelthemen:

- Präparation: Unverstärkte Kunststoffe, Hochgefüllte Kunststoffe, Verstärkte Kunststoffe und Ätzen für Strukturuntersuchungen

Prof. Gottfried W. Ehrenstein, im Januar 2019

Inhalt

Der Herausgeber	VII
Vorwort von Prof. Schmachtenberg zur „Erlanger Kunststoff-Schadensanalyse“	IX
Vorwort von Prof. Ehrenstein zur „Präparation“	XI
1 Präparation unverstärkter Kunststoffe	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Probennahme und Probenvorbereitung	4
1.2.1 Probennahme	4
1.2.2 Probenvorbereitung	4
1.3 Einbetten und Vorbereitung der Proben	7
1.3.1 Einbetten	7
1.3.2 Vorbehandlung	12
1.4 Verschiedene Präparationsverfahren	13
1.4.1 Ganzteilpräparation	13
1.4.2 Anschliff	14
1.4.2.1 Schleifen	15
1.4.2.2 Polieren	17
1.4.2.3 Dünnschliff	19
1.4.2.4 Bruchpräparate	23
1.4.3 Mikrotomie	24
1.4.3.1 Mikrotom	24
1.4.3.2 Mikrotommesser für Dünnschnitte	28
1.4.3.3 Mikrotomschnitte	33
1.4.4 Bruch- und Oberflächenpräparate	61
1.4.5 Filmpräparate	62
1.4.6 Körnerpräparate	65

1.5	Zusammenfassung	65
1.6	Normen	67
2	Präparation hochgefüllter Kunststoffe	69
2.1	Einleitung	69
2.1.1	Besonderheiten bei Reaktionsharzen	70
2.1.2	Ultrafräse	71
2.1.3	Mikroskopie-Methoden	76
2.1.4	Probenpräparation	77
2.1.4.1	Frästechnik	81
2.1.4.2	Ätzen	82
2.1.4.3	Bruch	85
2.1.5	Übersicht Füllstoffe im Verbund	86
2.1.6	Füllstoffarten	94
2.1.6.1	Pulverförmige Füllstoffe	94
2.1.6.2	Kugelförmige Füllstoffe	96
2.1.6.3	Faserförmige Füllstoffe	98
2.1.6.4	Plättchenförmige Füllstoffe	100
2.1.6.5	Grießförmige Füllstoffe	102
2.1.6.6	Sonstige Füllstoffe	104
2.2	Normen	105
3	Präparation verstärkter Kunststoffe	107
3.1	Einleitung	107
3.2	Präparationsmethoden	109
3.2.1	Probenentnahme und Einbettung	109
3.3	Kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste	111
3.3.1	Dünnschnitte	114
3.3.2	Sägetechnik	117
3.3.3	Dünn- und Anschlifftechnik	118
3.3.4	Verschiedene Kurzfasern	126
3.4	Langfaserverstärkte Kunststoffe	129
3.4.1	Einleitung	129
3.4.2	Glasfaserverstärkte Verbundkunststoffe (GFK)	132
3.4.2.1	Anschnitttechnik	135
3.4.2.2	Schlifftechnik	136
3.4.3	SMC-Formmassen – Rissbildung in SMC	139
3.4.3.1	Poren- und Rissbildung	142
3.4.3.2	Schädigung durch Füllstoffe	144
3.4.4	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)	147
3.4.5	Aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK)	153

3.5	Zusammenfassung der Präparationsschritte bei GFK, CFK und AFK . . .	157
3.6	Normen	160
4	Ätzen für Strukturuntersuchungen	
	mit Dr.-Ing. Jürgen Hinrichsen	163
4.1	Grundlagen	163
4.2	Nasschemisches Ätzen und Plasmaätzen	165
4.2.1	Nasschemisches Ätzen	165
4.2.2	Plasmaätzen	167
4.3	Durchführung des nasschemischen Ätzens	168
4.3.1	Ätzen von PE und PP	170
4.3.1.1	Präparation	170
4.3.1.2	Anleitung	171
4.3.2	Ätzen von POM	172
4.3.2.1	Ätzen mit konzentrierter Salzsäure HCl	173
4.3.2.2	Veranschaulichung	173
4.4	Anwendungsbeispiele nasschemisches Ätzen	174
4.4.1	Extrusionsschweißnaht	174
4.4.2	Vibrationsschweißnaht	176
4.4.3	Verstärkte Kunststoffe	178
4.4.4	Kunststoffdichtungsbahn-Schweißung	179
4.4.4.1	Situation	180
4.4.4.2	Morphologische Untersuchung	180
4.4.4.3	Ätzen der Dichtungsbahnen	181
4.4.5	Einschränkungen bei nasschemischem Ätzen	188
4.5	Durchführung des Plasmaätzens	189
4.6	Anwendungsbeispiele Plasmaätzen	190
4.6.1	Probenpräparation	191
4.6.2	Nachbehandlung	191
4.6.3	Optimale Ätzparameter	191
4.6.4	PE und PP	192
4.6.5	POM	195
4.6.6	PA66	196
4.6.7	PA6	198
4.6.8	Plasmaätzen von Polyamid (ungefüllt, gefüllt)	203
4.7	Anhang: Literatur zur Strukturätzung	206
	Index	219

1

Präparation unverstärkter Kunststoffe

■ 1.1 Einleitung

Neben den Präparationsverfahren klassischer metallischer Werkstoffe erfordern polymere Materialien von dem Bearbeiter neue, bisher oft unbekannte Präparationsmethoden. Zusätzlich zu An- und Dünnschliffen können z.B. noch dünne Schnitte, Filme, Fasern und Körner als Präparate untersucht werden.

Die Beurteilung des Gefüges von Kunststoffen in der Mikroskopie hat sich als Mittel zur Qualitätskontrolle und Schadensanalyse etabliert. Voraussetzung für eine richtige Interpretation eines mikroskopischen Bildes ist die artefaktfreie (= keine durch das Mikroskopieverfahren selbst hervorgerufene Erscheinung) und je nach Material und Untersuchungsziel geeignete Auswahl der Präparation. In diesem Beitrag werden die Methoden zur Präparation unverstärkter Kunststoffe und deren Vorgehen zur Erzielung eines aussagekräftigen Ergebnisses beschrieben.

Der hohe Transmissionsgrad der Kunststoffe erlaubt durch das Betrachten dünner Schnitte im Durchlicht Aussagen über die morphologische Struktur. Da einzelne Moleküle mikroskopisch nicht erkennbar sind, können nur übergeordnete makroskopische Strukturen oder Beeinflussungen von größeren Bereichen identifiziert und beurteilt werden. Aufgrund des Aufbaus der Kunststoffe sind mehrphasige Systeme, wie teilkristalline Thermoplaste, gefüllte und verstärkte Kunststoffe aller Art, einer mikroskopischen Beurteilung im Durch- und Auflicht leichter zugänglich als amorphe, ungefüllte Polymere.

Unter diesen Gesichtspunkten ermöglicht die Mikroskopie Aussagen zu:

- Struktur und Abweichungen von dem idealen Zustand durch Verarbeitungsunregelmäßigkeit und unsachgemäße Verarbeitungsparameter
- Fremdeinschlüsse und Verunreinigungen, nicht aufgeschmolzene Materialpartikel
- Thermische Schädigung während der Verarbeitung
- Verteilung von Füllstoffen und Pigmenten

- Lunker, Fehlstellen, Bindenähte
- Molekül- und Verstärkungsmaterialorientierungen
- Eigenspannungszustände durch innere und äußere Kräfte (sowie Deformationen durch den Schadensablauf)
- Schichtdicken bei Oberflächenveredelung
- Crazes, Sphärolithstrukturen

Die Problemstellungen reichen von der reinen Werkstoffbeurteilung über die Sicherung der Qualität einer Fertigung bis hin zur Beurteilung von Schadensursachen. Die Aussagesicherheit hängt von vielen Faktoren ab, häufig auch von parallel durchgeführten Versuchen nach anderen Untersuchungsverfahren.

Tabelle 1.1 zeigt die wichtigsten Präparationsmethoden für lichtmikroskopische Untersuchungen an Kunststoffen.

Tabelle 1.1 Ausgewählte Präparationsmethoden für die Kunststoffmikroskopie (nach *Trempler*)

Präparat	Herstellung	Anwendung
Totalpräparat	unzerstörtes Probenstück aussuchen, meist Makrobetrachtung	zerstörungsfreie Prüfmethode mit schneller Fehlererkennung, für Automatisierung der Prüfung
Anschliffpräparat	Anschliffe manuell oder automatisch herstellen und kontrastieren	Auflichtmikroskopie an Verbunden, harten und spröden Werkstoffen
Dick- und Dünnschliffpräparat	Anschliff aufkitten und auf gewünschte Dicke bringen, Polierabtrag beachten	Durchlichtmikroskopie an Verbunden, harten sowie spröden Stoffen, wichtig für messende Mikroskopie
Dünnschnittpräparat	Mikrotomschnitt mit Diamant-, Glas- oder Metallmessern. Schnittdicke 1 – 30 µm	Durchlichtmikroskopie an weichen, transparenten bis transluzenten Werkstoffen
Bruch- oder Oberflächenpräparat	unbeeinflusste Oberfläche oder definiert hergestellte Bruchfläche	Auflicht- und Elektronenmikroskopie an Verbunden und gefüllten Werkstoffen
Körnerpräparat	Körner in hochviskoses Immersionsmittel einbringen, Korndrehen durch Deckglasverschiebung möglich	Korngrößenverteilung, Morphologie, Rundheitsgrad, Oberfläche, Verwachsungen
Fasereinbettungspräparat	auf Objektträger kleben, teilweise einbetten für Brechzahlmessung	Faseruntersuchungen, Dickenverteilung, Faseroberfläche, Faser-Enden, Messung optischer Daten
Filmpräparat	Lösung der Probe auf Objektträger verdunsten, Schmelze auf Flüssigkeit erstarren lassen	Wachstumsuntersuchungen, optische Daten, Porosität, Größenverteilung

Bedingt durch die Vielzahl der Präparationsmethoden und der sehr unterschiedlichen Probenmaterialien kommt der klaren Definition des Untersuchungszieles und der Einschätzung der gegebenen Möglichkeiten eine wesentliche Bedeutung zu. Die gegenüber den Metallen beträchtlich größere Vielfalt der Strukturaus-

bildungsmöglichkeiten der Kunststoffe erfordert für deren Darstellung eine beträchtlich größere Vielfalt der mikroskopischen Gerätetechnik. Einschränkungen bei der Charakterisierung ergeben sich daher in gerätetechnischer Begrenzung und der stofflichen Vielfalt. Tabelle 1.2 soll helfen, für die gestellte Untersuchungsaufgabe an einer Kunststoffprobe ein optimales Mikroskopieverfahren auszuwählen.

Tabelle 1.2 Lichtmikroskopische Untersuchungsmöglichkeiten an Kunststoffen (nach *Trempler*)

Werkstoff	Untersuchungsmethode	Bewertungskriterien	Untersuchungsziel Fehlercharakterisierung
Homogene Kunststoffe			
amorphe Kunststoffe	Polarisationsdurchlichtmikroskopie	Gangunterschied, Doppelbrechung, Brechungsindex	Fließnähte, Bindefehler, Anisotropieerscheinungen, Inhomogenitäten
teilkristalline Kunststoffe	Polarisationsdurchlichtmikroskopie geätzte Anschliffe	Ausbildung von Überstrukturen	Temperatureinflüsse, Fließnähte, Bindefehler
Elastomere	Polarisationsdurchlichtmikroskopie	Gangunterschied, Doppelbrechung	Dehnungsverhalten
Heterogene Kunststoffe			
Mischungen	Polarisations- und Phasenkontrastdurchlichtmikroskopie, Anschliffe, Bruchpräparate	Art, Größe und Verteilung der Phasen, Brechzahlmessung, Thermooptische Analyse	Temperatureinflüsse, Fehler bei Art und Verteilung der Phasen, Anisotropieerscheinungen
gefüllte Kunststoffe	Auflicht Hell- und Dunkel- feld, Differentieller Interferenzkontrast, alle Methoden der Durchlichtmikroskopie	Art, Größe und Verteilung der Phasen	Fehler bei Art, Größe und Verteilung der Füllstoffe, Agglomeratbildung, Anisotropieerscheinungen

2

Präparation hochgefüllter Kunststoffe

■ 2.1 Einleitung

Die Präparation hochgefüllter Kunststoffe ist im Prinzip immer identisch: Man spricht von der Herstellung eines Anschliffs; geschliffen wird auf Siliziumkarbid-Papier und anschließend mit Tüchern mit Diamantsuspension poliert. Die Körnungen der Schleifpapiere und die Tücher und Suspensionen zum Polieren können auf unterschiedlichste Weise kombiniert werden. Die Vielfältigkeit der unterschiedlichen Kunststoffe, verbunden mit den unterschiedlichen Füllstoffen (Glas, Mineral, Metall usw.) lassen kein allgemeingültiges Rezept zu, da auch Füllgrad sowie Form und deren Haftung Einfluss auf die Präparation nehmen. Aus diesen Gründen werden bei der Vielfalt der Proben keine Vollautomaten eingesetzt. Jede Probe wird „nach Gefühl“ bearbeitet. Leider ist die Präparation bei den hochgefüllten Kunststoffen nicht so einfach wie bei den Metallen [*persönliche Mitteilung: B. Kaiser*].

Die meisten Füllstoffe sind lichtundurchlässig, so dass schon geringe Füllstoffmengen bei Untersuchungen mit der optischen Durchlichtmikroskopie zu wenig brauchbaren Ergebnissen führen. Außerdem ist es wegen der Härte der Füllstoffe und deren geometrisch geringen Verankerungen ähnlich wie bei den Glasfasern kaum möglich, Dünnschnitte herzustellen. Einerseits werden die Füllstoffe innerhalb der Matrix verschoben, andererseits leiden die Messer.

Somit beschränken sich die mikroskopischen Untersuchungsmethoden vor allem auf die Aufricht- und Rasterelektronenmikroskopie. Perspektiven bietet die Computertomographie; allerdings noch nicht bei Füllstoffen im einstelligen μm -Bereich als längster Dimension (die Kennzeichnung der Größe von Füllstoffen erfolgt meistens nach der größten Längenausdehnung).

Für die Präparation der Proben bieten sich daher die Anschliff- und im begrenzten Rahmen bei weichen Füllstoffen die Frästechnik mit einer Ultrafräse an. Ziel der Präparation ist eine plane, reflektierende Oberfläche der Proben. Beim Schleifen und Polieren ist darauf zu achten, dass die Ränder der Füllstoffe nicht gerundet werden. Durch Härteunterschiede zwischen Füllstoffen und Matrix erhält man auch bei sorgfältiger Präparation einen geringen Höhenunterschied. Diesen kann

man dann zur deutlichen Darstellung der Füllstoffe im Differenzial-Interferenz-Kontrast im Auflicht nutzen, (DIK)-Methode (Abschnitt 2.1.3 in Mikroskopie). Soll neben den Füllstoffen auch die Morphologie der Matrix dargestellt werden, kann die Probe geätzt werden (Kapitel 4 „Ätzen für Strukturuntersuchungen“).

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Präparation eines Anschliffes ist in Abschnitt 1.4.2 im Kapitel „Präparation unverstärkter Kunststoffe“ und in diesem Kapitel im Abschnitt 2.1.4 „Probenpräparation“ dargestellt.

2.1.1 Besonderheiten bei Reaktionsharzen

Die Wortwahl „Füllstoffe“ täuscht. Die Zugabe von Füllstoffen – in den meisten Fällen mineralische Stoffe – zur Reaktionsharzmasse macht die Verarbeitung größerer, kompakter Ansätze überhaupt erst möglich. Der Grund hierfür liegt in der Reaktion zwischen den organischen Komponenten – Harz und Härter. Es handelt sich um eine exotherme Reaktion, die unter Wärmeentwicklung stattfindet. Ein Großteil der Wärmeenergie wird von den mineralischen Bestandteilen aufgenommen und die Exothermie auf diese Weise gedämpft.

Des Weiteren ermöglicht der gezielte Einsatz der Zusatzstoffe die Erreichung spezieller Eigenschaften des Formstoffs.

Thermische Eigenschaften:

■ *Wärmedehnzahl (WDZ)*

Mineralische Zuschlagstoffe weisen in der Regel niedrigere Wärmedehnzahlen auf als die organischen Bestandteile des Formstoffes. Bei der Abkühlung des Bauteils von Härtungstemperatur auf Einsatztemperatur werden Abkühlungsspannungen verringert.

■ *Wärmeleitzahl (WLZ)*

Organische Werkstoffe weisen in der Regel niedrige Wärmeleitzahlen auf. Die Erhöhung der Wärmeleitzahl durch die Zugabe von mineralischen Füllstoffen stellt eine deutliche, in vielen Fällen unverzichtbare Verbesserung des Formstoffs dar.

Wärmedehnzahl und Wärmeleitzahl stellen außerdem wichtige Eigenschaften von Isolierstoffen dar. Die WDZ verhindert Schrumpfspannungen z. B. bei der Umhüllung metallischer Leiter. Die Verbesserung der WLZ ermöglicht bessere Abführung der Verlustwärme des Isolierstoffs und verringert so die Entstehung von Wärmedurchschlägen.

Einwirkung der Füllstoffzugabe auf die mechanischen Eigenschaften der Formstoffe – siehe hierzu DIN 16945 Gießharzformstoffe Typen.

Einige Tipps zur Eingangsprüfung an mineralischen Füllstoffen:

In der Praxis findet die Anlieferung von zu verarbeitendem Material häufig unter Zeitdruck statt. Die Lieferanten sind in der Regel nicht in der Lage, einen aufwendigen und langwierigen Prüfprozess ihrer Waren abzuwarten. Ein Tanklaster mit etlichen Tonnen Quarzmehl oder Kreidemehl oder Mikrodol soll möglichst bald entladen werden. Eine Prüfung zu unterlassen kann jedoch schwerwiegende und teure Folgen haben. Unerlässlich ist es daher, die wichtigsten Eigenschaften der Ware zu prüfen:

■ *Die Korngrößenverteilung*

Diese Eigenschaft beeinflusst die Verarbeitungseigenschaften der Mischung unmittelbar. Es gibt natürlich Messverfahren für diesen Wert. Sie erfordern Prüfmuster in der Größenordnung von 0,5 g und Zeit. Hier ist der Praktiker gefragt. Eine schnelle Möglichkeit bietet die Messung der Viskosität eines Gemischs von 1 kg Füllstoff und 1 kg Harz, welches unter definierten Bedingungen hergestellt wurde.

Als Gefahr bei zu hohem Anteil von Feinstpartikeln im Füllstoff kann bei der späteren Reaktionsharzmasse Strukturviskosität auftreten; ein Puddingeffekt. Dieser ist äußerst störend in der Verarbeitung und Erreichung gemischter End-eigenschaften, weil der Entgasungsverlauf durch Blasenbildung gestört wird.

■ *Der Feuchtegehalt*

Auch hier ist die Gefahr gegeben, dass in der gefüllten Reaktionsharzmasse Strukturviskosität auftritt. Eine Menge von ca. 0,5 kg wird entnommen und im Vakuumtrockner nach Ausbreitung einer dünnen Schicht getrocknet.

■ *Verunreinigung des Füllstoffs mit ionogenen Bestandteilen*

Werden ionogene Verunreinigungen in den späteren Formstoff eingeschleppt, besteht die Gefahr, dass es nach Lagerung der Bauteile zu einem nicht akzeptablen Anstieg dielektrischer Verluste kommt. Der Schaden kann beträchtlich sein, weil die Eigenschaftsänderung erst nach einiger Zeit eintritt.

Zwei Verfahren haben sich bewährt:

- Ermittlung des pH-Werts eines wässrigen Auszuges, der unter stets gleichbleibenden Bedingungen hergestellt wurde.
- Elektrische Leitfähigkeit eines ebensolchen Auszuges.

Ein negatives Beispiel: Waschung von Quarzsand vor der Mahlung mit Meerwasser.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass die genannten Methoden – einen vertrauenswürdigen Lieferanten vorausgesetzt – vor größeren Schäden bewahren.

2.1.2 Ultrafräse

Das Ultrafräsen erfolgt mit einer auf ein Schlittenmikrotom aufgesetzten Ultrafräse (Bild 2.1). Die Präparation mittels der Ultrafräse vermindert grundsätzlich das

3

Präparation verstärkter Kunststoffe

■ 3.1 Einleitung

Die Präparation von Faserverbundkunststoffen erweist sich wegen der Kombination zweier Materialien unterschiedlicher Festigkeit und Steifigkeit als problematisch. Es werden die unterschiedlichen Präparationsmethoden sowie die verschiedenen mikroskopischen Methoden an glas-, kohlenstoff- und aramidfaserverstärkten Kunststoffen dargestellt und verglichen. Zu den beschriebenen mikroskopischen Methoden gehören die Lichtmikroskopie im Auflicht und Durchlicht, die Rasterelektronenmikroskopie sowie die Mikroradiographie, zu den Präparationsmethoden die Schliff-, Säge- und Frästechnik sowie die Mikrotomie. Die Mikroradiographie wird zunehmend durch die Computer-Tomographie ersetzt. Außerdem wird auf mögliche Präparationsfehler an Faserverbundkunststoffen eingegangen.

Faserverstärkte Kunststoffe stellen einen Verbund aus einer polymeren Matrix niedriger Festigkeit und Steifigkeit mit Fasern höherer Steifigkeit dar. Aufgrund der daraus resultierenden positiven Eigenschaftskombination, hohe Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte, finden Faserverbundkunststoffe (FVK) viele Anwendungsmöglichkeiten.

Um in der Verarbeitung die Qualität der faserverstärkten Bauteile sicher zu stellen, findet neben mechanischen und thermischen Analysen eine mikroskopische Bewertung der Faserverbundkunststoffe statt. Auch in der Werkstoffentwicklung und in der Schadensanalyse hat die mikroskopische Analyse wegen ihrer zahlreichen Aussagemöglichkeiten einen hohen Stellenwert. Typische Aufgabenfelder der mikroskopischen Bewertung sind:

- die Werkstoffidentifizierung,
- die Kontrolle der Faserorientierung, der Faserverteilung und der Schichtung der Fasern,
- die Bestimmung der Faserquerschnitte und Faserflächenanteile,
- die Detektion von Lunkern und Rissen sowie
- die Untersuchung der Faser-Matrix-Haftung und Grenzflächen.

Zur optischen Analyse von faserverstärkten Kunststoffen stehen verschiedene mikroskopische Methoden zur Verfügung, die Lichtmikroskopie, die Rasterelektronenmikroskopie sowie die Mikroradiographie bzw. Computer-Tomographie.

Als Grundlage der mikroskopischen Analyse von Faserverbundkunststoffen ist eine ordentlich durchgeführte Präparation unabdingbar. Trotz der für die Präparation ungünstigen Kombination einer weichen Matrix mit einer steiferen, harten Faser (Tabelle 3.1) dürfen durch die Präparation keine Veränderungen und Schädigungen, d. h. Ausbrüche, Risse oder Delaminationen am Faserverbundkunststoff entstehen. Diese würden eine Bewertung der tatsächlichen Materialsituation erschweren bzw. unmöglich machen.

Tabelle 3.1 Steifigkeit verschiedener Fasern im Vergleich zu Kunststoffen

Material	Elastizitätsmodul in N/mm ²
Epoxidharz	500 bis 2500
Polyamid	750 bis 3200
Glasfaser	73 000
Kohlenstofffaser	240 000 bis 550 000
Aramidfaser	65 000 bis 130 000

Tabelle 3.2 Überblick Präparations- und Mikroskopiemethoden an FVK

Präparation	Lichtmikroskopie		Rasterelektronenmikroskopie	Computer-Tomographie
	Auflicht	Durchlicht		
Bruch		●		
Anschnitt	●		●	
Anschliff	●		●	
Dünnschliff (ca. 10 µm dick)		●		
Dünnschnitt (ca. 10 µm)		●		
Dünnschnitt (ca. 100 µm)				●

Prinzipiell können die Methoden in zwei Gruppen unterteilt werden. Mit Hilfe der Präparationen Bruch, Anschnitt und Anschliff werden Präparatoberflächen analysiert. Dagegen werden die Dünnschliffe bzw. Dünnschnitte über ihr gesamtes Probenvolumen beobachtet, in dem die Präparate durchleuchtet bzw. durchstrahlt werden.

■ 3.2 Präparationsmethoden

Vor der Präparation ist die Probenentnahmestelle sinnvoll zu wählen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist eine Präparatherstellung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung zur Faser ratsam. Zweckmäßig ist auch, das Bauteil vor Beginn der Präparation in seiner Gesamtheit aufzunehmen. Proben sollten an folgenden Bauteilregionen entnommen werden:

- an einer repräsentativen Stelle, welche Aussagen über das gesamte Bauteil zulässt,
- an Schwachstellen, äußerlich erkennbaren Fehlstellen und belastungsrelevanten Stellen, wie z. B. Bindenähten, Schweißnähten, Grenzflächen oder
- in der Schadensanalyse an der entsprechenden geschädigten Stelle.

Bei der Präparation ist stets Sorge zu tragen, dass die Probe durch die Entnahme aus dem Bauteil oder Halbzeug nicht geschädigt wird. So können zu starke mechanische, thermische oder chemische Beanspruchungen zu Veränderungen an der Faserorientierung, an der Struktur des Kunststoffes oder der Faser-Matrix-Haftung führen. Zum schonenden Teilen von Kunststoffen haben sich kleine Bügel- oder Laubsägen und zur weiteren Trennarbeit eine niedertourige, wenn möglich wassergekühlte Säge mit Diamanttrennscheibe bewährt.

3.2.1 Probenentnahme und Einbettung

Für mikroskopische Untersuchungen müssen Proben an belastungsrelevanten Stellen, wie z. B. Bindenähten, Schweißnähten, Grenzflächen, äußerlich erkennbaren Fehlstellen oder, im Fall von Schadensuntersuchungen, an der beschädigten Stelle des Bauteils entnommen werden. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist eine Präparatherstellung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung zur Hauptfaserorientierung ratsam. Zweckmäßig ist auch, das Bauteil vor Beginn der Präparation in seiner Gesamtheit aufzunehmen und eine eindeutige Kennzeichnung der Präparate vorzunehmen.

Die zunächst notwendigen Materialtrennungen zur Probenentnahme sollten zur Vermeidung von Strukturveränderungen, verursacht durch thermische, chemische oder mechanische Einflüsse, vorsichtig mit einer kleinen Bügel- oder Laubsäge durchgeführt werden. Zum weiteren präzisen Trennen kleiner Teile eignet sich besonders eine Niedertourensäge mit Diamanttrennscheibe und einer speziellen Einspannvorrichtung. Gegebenenfalls kann während der Entnahme Wasser als Kühlmittel und zum Niederschlagen des Schleifstaubs eingesetzt werden.

Mit wenigen Ausnahmen bei der Dünnschnittpräparation ist es bei allen Präparationsverfahren notwendig, die Proben zur weiteren Präparation in einem Zweikom-

4

Ätzen für Strukturuntersuchungen

mit Dr.-Ing. Jürgen Hinrichsen/Technische Universität Braunschweig

Die Dünnschnitttechnik an Kunststoffen stößt in manchen Fällen an ihre Grenzen:

- bei sehr kleinen Sphärolithen unter etwa 5 µm Durchmessern, die nicht mehr scharf abgebildet werden,
- bei undeutlichen Sphärolithgrenzen, wodurch eine exakte Bestimmung des Sphärolithdurchmessers nicht möglich ist,
- wenn die Lamellenanordnung (= Feinstruktur) in den Überstrukturen (Sphärolithe, Zylindrithe, transkristalline Front usw.) nicht zu erkennen ist,
- wenn Pigmente oder andere Füllstoffe die Beurteilung des Werkstoffs im Durchlicht behindern,
- wenn Sphärolithe bzw. andere Überstrukturen in Bruchflächen durch die Schnitt- und Schliffpräparation zerstört werden.

In diesen Fällen bieten das Ätzen der Kunststoffoberfläche und die nachfolgende Untersuchung mit dem Auflichtverfahren eine Alternative.

In der Literatur werden unterschiedliche Behandlungsverfahren unter dem Begriff „Ätzen“ beschrieben, die sich in der Wechselwirkung zwischen dem Medium und dem Kunststoff und damit in den auf molekularer Ebene ablaufenden Prozessen unterscheiden.

Eine zusammenfassende Darstellung enthalten die Literaturstellen [2] [3] [4] und [5].

■ 4.1 Grundlagen

Unter Ätzen versteht man Verfahren, bei denen eine Phase eines Materials mit Hilfe von flüssigen oder gasförmigen Medien (= Ätzmittel) selektiv stärker abgebaut und entfernt wird, d.h. bei Kunststoffen eine Polymerphase. Im Allgemeinen handelt es sich bei teilkristallinen Kunststoffen um die amorphe Phase und bei Blends um ein Polymer. Amorphe Bereiche werden aufgrund der durch die weitere Packung der Makromoleküle erleichterten Diffusion schneller abgebaut als kristalline Bereiche.

Aufgrund des Aggregatzustandes des Ätzmittels (flüssig bzw. plasmaförmig) wird zwischen nasschemischem Ätzen und Plasmaätzen unterschieden. Ein Plasma besteht aus Ionen, Elektronen und ggf. noch vorhandenen elektrisch neutralen Atomen/Molekülen.

Eine Überätzung des Materials, d.h. dessen Degradation, ist eine große Artefaktquelle. Für die Praxis bedeutet dies eine schonende Verarbeitung bei geringen Abbauraten. Zudem ist eine Betrachtung des Polymers bzw. des daraus gefertigten Teils insgesamt als Ganzes zu betrachten, um die richtige Struktur zu erforschen. Dabei unterscheidet sich die Oberflächenstruktur durchaus von der inneren Struktur.

Dabei sind für das Ätzen als Präparationsmethode für nachfolgende mikroskopische Untersuchungen nur solche Methoden geeignet, bei denen deutlich Abbaugeschwindigkeiten zwischen z.B. amorpher und kristalliner Phase vorliegen. Dadurch ergibt sich eine Phasenselektivität und bei Abbruch der Abbaureaktion nach einer geeigneten Zeit ein für eine mikroskopische Untersuchung geeignetes Höhenprofil, das:

- im Lichtmikroskop (DIK = Differentialinterferenzkontrast),
- im Rasterelektronenmikroskop (SE = Sekundärelektronendetektor) oder mittels
- Transmissionselektronenmikroskop (TEM)

dargestellt werden kann (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1 Gegenüberstellung verschiedener Mikroskopieverfahren, nach [5]

	LM Auflicht/ Durchlicht	REM	TEM
Auflösung	3 µm – 300 nm	10 nm	0,2 nm
Vergrößerung ¹⁾	2 – 2000 x	20 – 100 000 x	200 – 2 000 000 x
Tiefenschärfe	1 µm bei 500 x [8]	60 µm bei 500 x [9]	0,1 µm bei 100 000 x
Objekt	Oberfläche/ Querschnitt	Oberfläche	Querschnitt (< 0,2 µm)
Probenumgebung	Umgebungsdruck	Hochvakuum	Hochvakuum
Strahlenschäden	keine	gering	hoch
chemische Analyse möglich	nein	ja (Röntgenstrahlung)	ja (Röntgenstrahlung, Elektronenenergie- verlust)
Nachweis von Molekülorientierung	ja	nein ²⁾	ja

1) technisch möglich, die förderliche Vergrößerung ist z. T. geringer

2) indirekt, z. B. nach Tempern

LM = Lichtmikroskop, REM = Rasterelektronenmikroskop, TEM = Transmissionselektronenmikroskop

Ziel einer Ätzbehandlung von Kunststoffen ist nicht ausschließlich die Strukturdarstellung. Häufig wird die Erzeugung einer Oberflächenrauigkeit oder chemischer Modifikation (ungesättigter Stellen oder polarer Gruppen) auf der Kunststoffoberfläche als Vorbehandlungsschritt für Folgeprozesse eingesetzt. Gängige

Verfahren sind das Ätzen zur Verbesserung der Bedruckbarkeit, Verklebbarkeit und Haftfestigkeit, Erzeugung von Ätzstrukturen zur Verbesserung der Haftung galvanisch aufgebrachtter Schichten, das Dünnen von Materialien für TEM – Untersuchungen sowie der Abtrag von Schutzschichten im Rahmen der photolithographischen Herstellung von elektronischen Schaltungen.

Die genannten Vor- und Nachteile des Plasmaätzens und des nasschemischen Ätzens fasst Tabelle 4.2 zusammen.

Tabelle 4.2 Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile beim Plasma- und nasschemischen Ätzen

	Plasmaätzen	Nasschemisches Ätzen
Apparativer Aufwand	–	+ (–)
Probenvorbereitung	–	+
Anwendbarkeit	+	– (nicht universell)
Ätzzeit	+	–/+ ¹⁾
Zeitaufwand mikroskopische Untersuchung	+	–

+ = Vorteil gegenüber dem anderen Ätzverfahren,

– = Nachteil gegenüber dem anderen Ätzverfahren,

1) von der Kombination Polymer/Ätzmittel abhängig

■ 4.2 Nasschemisches Ätzen und Plasmaätzen

Nach dem Aggregatzustand des Ätzmittels werden nasschemische Methoden und Plasmaätzen unterschieden. Das nasschemische Ätzen (Tabelle 4.3, links) stellt einen Teilbereich des allgemeinen chemischen Angriffs dar (= „selective degradation“ [6]), bei dem sowohl amorphe als auch kristalline Phasen abgebaut werden. Dabei ist allerdings die Abbaugeschwindigkeit in den beiden Phasen unterschiedlich.

4.2.1 Nasschemisches Ätzen

Die einwirkenden Medien werden aufgrund ihrer Wechselwirkung mit dem Polymer in zwei Gruppen eingeteilt

- physikalisch aktive Medien: keine Reaktion mit dem Polymer, aber Quellung bis zur Auflösung
- chemisch aktive Medien: Reaktion mit dem Polymer.

Entsprechend gehören die beim nasschemischen Ätzen eingesetzten Lösungsmittel zu den physikalisch aktiven Medien, d. h. der Abbau erfolgt durch Lösungspro-

Index

A

Abheben 37
ABS 30, 45
Acrylharze 36
Aluflakes 88
Aluminium Flitterfäden 100
Aluminiumoxid 94
Aluminium-Pulver 101
amorphe Kunststoffe 3
Anisotropie 147
Anschliff 1, 14, 78, 119, 149
Anschliffpräparat 2
Anschlifftechnik 129
Aperturblende 53
Aramid 127
Aramidfaser 129, 131
Aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK)
127, 153
Argonplasma 186
Artefaktbildung 118
artefaktfreie 1
ASA 30
Ätzgrübchen 188
Ätzlösungen 182
Ätzmittel 163
– für PA 209
– für PE 206
– für POM 208
– für PP 207
Ätzraten 194
Ätzzeiten 173
Ausbrüche 123
Ausdehnungskoeffizient 143
Aushärtung 78

B

Barium-Pulver 95
Besputterung 94
Bindenähte 2
Blockschliff 15
Bruch 85
Bruchflächenpräparat 2
Buntpigmente 146

C

CFK 150
chemische Ätzverfahren 167, 169
Computer-Tomografie 118
Crazes 2
Cu-Dendriten 88

D

Diamantkorn 124
Diamantmesser 22
Diamantpasten 124
Diamantrennscheibe 109
Diamantsuspension 69
Dickschliffpräparat 2
Differenzial-Interferenz-Kontrast 70
DIK 70
Dispergierung 4
domes, engl. Kuppeln 188
Dünnschliff 1, 15, 19, 118, 122, 125
Dünnschliffpräparat 2
Dünnschnitt 28, 114, 115, 116, 118, 121
Düsenziehverfahren 132

E

echte Ätzung 166
Eigenspannungszustände 2
Einbetten 5, 7
Einbettharze 110
Einbettmittel 6, 8
Einfärben 12
Einmalklingen 22
Einschlussmedien 36
Einschränkungen 204
Einspannen 5
Elastomere 3
Elektrische Leitfähigkeit 71
Epoxidharz 8, 138
Extrusionsschweißnaht 174

F

Faseranschliff 124
Faserausbrüche 149
Faserbrüche 84
Fasereinbettungspräparat 2
Faserförmige Füllstoffe 98
Faser-Matrix-Haftung 133
Faserorientierung 118
Faserschichtung 129
Faserverbundkunststoffe 107
Fehler 6, 17
Fehlerursache 17
Fehlstellen 2
feines Calciumcarbonat 103
Fertigfräser 74, 157
Feuchtegehalt 71
Filmpräparat 2
Flächenpressung 123, 126
Flammschutzmittel 96, 146
Fräskopf 72
Freiwinkel 32
Fremdpartikel 76
Füllgrad 69
Füllstoffarten 69, 94

G

Gasblasen 81
Gefüge 1
Gefügeuntersuchungen 19
gelochtes Poliertuch 124
Gewebestruktur 152
GFK 132
Glas 127
Glasfaserlänge 113
Glasfasern 129, 132
Glaskugeln 81
Glasmesser 22
Graphit 80
Graphitpulver 94, 97
Grobschleifen 123

H

Haftung 107, 109, 115, 138
Handpräparation 125
harte Einschlüsse 19
Hartmetallmesser 22
Heißluftbehandlung 12
HK 1 45, 48, 121
HK-1-Messer 116
HK 2 45, 48
HK-Messer 114
Hochfrequenzplasma 167
Hohlräume 81
Hydrolyse 166

I

Immersionsöl 36
Inklinationswinkels 31
Innenlochsäge 83, 117

K

Kaliumpermanganatätzung 184, 185
Kaliumpermanganatlösung 170
Kältebehandlung 12
Kanadabalsam 36
Kittmittel 20

Kleben 12
– Aufkleben 12
– Zusammenkleben 12
Klebstreifenmethode 12
Kohlefaser 130
Kohlenstoff 127
Kohlenstofffasern 129, 130
kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
126
konzentrierte Salzsäure 173
Körbel 192
Körnerpräparat 2, 65
Korngröße 16
Korngrößenverteilung 71
Körnung 123, 126
Kristallisationsgrad 169
kugelförmige Füllstoffe 72, 96
Kühlzeit 86
Kunststoffdichtungsbahnen 179
Kunststofffasern (PE) 99
Kupferflakes 101
Kupferkugeln 74
Kupferplättchen 87
Kuppeln 188
Kurr 31
Kurzfasern 126
Kurzglasfaserverstärkte 111

L

Lamellare Struktur 184
Lamellen 172, 198
Lamellenstruktur 198, 200
Längenverteilung 113
Laser-Mikrotom 25
Lösungsmittel 166
Low-Profile 141
Low-Shrink-Effekt 142
Luft einschließen 19
Lunker 2

M

Materialabtrag 15
Matrixausbrüche 134

Matrixverformung 111
Messer 157
Metall-Flakes 81
Metallmesser 22
Methacrylatharze 8
Mikrofibrillen 154
Mikroskopieverfahren 3, 164
Mikrotom 135
Mikrotommesser 28
Mikrotom-Schnitttechnik 117
Mikrowellenanregung 202
Molekulargewicht 169
Ms-Fasern 99

N

nasschemische Methoden 167
Nasschemisches Ätzen 164, 165, 168, 188
Neodym-Eisen-Bor 101
Niedertourensäge 109

O

Oberfläche 122
Oberflächenmorphologie 154
Oberflächenpräparat 2, 23
Oberflächenqualität 51
Orientierung 76
Oxidation 166

P

PA 30
PA6 87, 188, 191, 198
PA12 89, 191
PA66 45, 127, 188, 191, 196
PA66-GF 116
PA-GF 115
PBT 45, 86, 88, 191
PE 30, 170
PEEK 56
PE-HD 45, 191
PE-LD 45
PES 47
Physikalische Ätzung 167

PIB 30
pitting, engl. 188
Plasmaätzen 164, 165, 167, 190, 191, 200, 209
Polieren 118, 137
Polierkörnern 17
Polierprozess 16
Poliertuch 119
Poliertucharten 18
Polyamid 203
Polyesterharze 8
POM 30, 82, 170, 172, 191, 195
PP 30, 45, 82, 170, 191, 194
PP-GF30 136
Präparationsebene 112
Präparationsfehler 137
Präparationsmethode 2, 109
Präparationsschritte 157
Präparation von Hand 133
Probenentnahme 109
Probenhalter 20
Probennahme 4
Probenpräparation 77
Probenvorbereitung 4
PS 30
PVC 30
PVC-Körnern 65

Q

Qualitätskontrolle 1
Querriss 130
Querschleif 122

R

Ratterspuren 32
RE-Detektor 77
Reliefoberfläche 131
Reliefschliff 124
REM 78
Risse 76
Rotation 126
Rotationsmikrotom 24
RT gefräst 74

S

Sägeblatt 117
Sägegeschwindigkeit 84
SAN 30
Sauerstoffplasma 187, 194, 196
SB 30
Schaben 12
Schädigungen 115
Schichtdicken 2
Schleifarten 15
Schleifen 15
Schleifkörnern 17
Schleifpapiere 69
Schleif-Poliertuch 126
Schleifprozess 16
Schleifstaub 109
Schlifftechnik 118
Schlittenmikrotom 24, 30, 71
Schmelzenbruch 23
Schneidriefen 57
Schnittdicken 24
Schnittrichtung 32
Schrumpfspannungen 70
Schweißnaht 13, 80
Schwindung 81
SE-Detektor 77
Silikonöl 20
Siliziumcarbid-Papier 69
Sphärolithdurchmesser 42, 198
Sphärolithe 193
Sphärolithstrukturen 2
Spheriglass 98
SrFeO-Pulver 89
Stahlfasern 100
Stauchung 42
Staxx-Cu-Fasern 99
Strontiumferrit 95
Strukturuntersuchungen 167, 209

T

Talkum 96
teilkristalline Kunststoffe 3
Thermische Schädigung 1

thermoplastische Kunststoffe 135
Titandioxid 145
Totalpräparat 2
TPE 36
TPU 36
Tränken 5
Transmissionsgrad 1
Trempler 2, 66
Trennschliff 15
Trocknung 4

U

Ultrafräse 69, 71, 75
Ultraschallbad 100
UP-Harz 140, 141

V

VE-Harze 140
Verfestigen 5
Verstärkte Kunststoffe 178
Verunreinigung 1, 71

Vibrationsschweißnaht 176
Vibrator 25
Vinylesterharzmatrix 130, 137
Vorfräser 73, 157
Vorschubgeschwindigkeit 83, 117, 120

W

Wärmedehnzahl 70
Wärmeentwicklung 70
Wärmeisoliersteg 116
Wärmeleitfähigkeit 70
Weich-PVC 32

X

Xylol 36

Z

Zeitdauer 123, 126
Zerkleinerung 4
zweiphasiges Matrixsystem 142