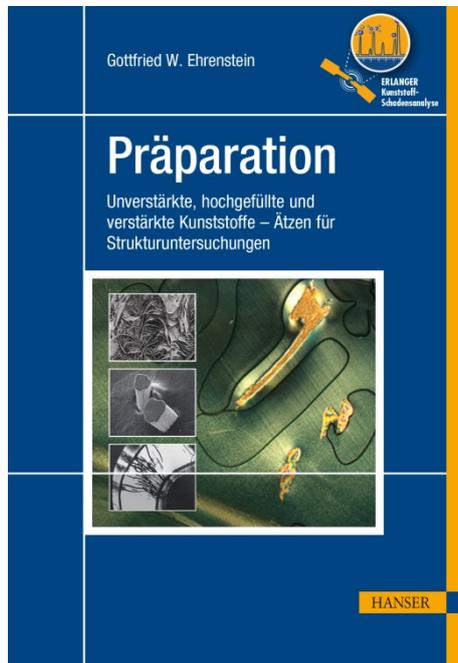


# HANSER



## 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

<b>Der Herausgeber</b> .....	<b>VII</b>
<b>Vorwort von Prof. Schmachtenberg zur „Erlanger Kunststoff-Schadensanalyse“</b> .....	<b>IX</b>
<b>Vorwort von Prof. Ehrenstein zur „Präparation“</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Präparation unverstärkter Kunststoffe</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Präparation hochgefüllter Kunststoffe .....</b>	<b>69</b>
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
<b>3</b>	<b>Präparation verstärkter Kunststoffe .....</b>	<b>107</b>
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
<b>4</b>	<b>Ätzen für Strukturuntersuchungen</b>	
	mit Dr.-Ing. Jürgen Hinrichsen . . . . .	<b>163</b>
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
	<b>Index . . . . .</b>	<b>219</b>

# 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
<b>Homogene Kunststoffe</b>			
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
<b>Heterogene Kunststoffe</b>			
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  $\mu\text{m}$ -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 Tanklastler 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 <sup>2</sup>
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  $\mu\text{m}$  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 <sup>1)</sup>	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 <sup>2)</sup>	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	+	– / + <sup>1)</sup>
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  
Ätzzraten 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