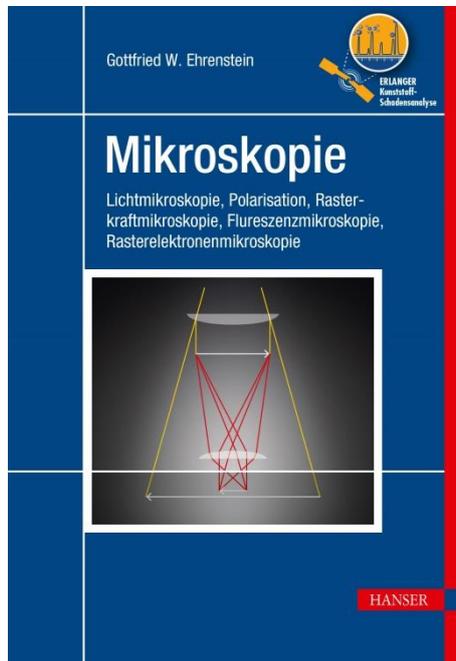


HANSER



Leseprobe

zu

„Mikroskopie“

von Gottfried W. Ehrenstein

Print-ISBN: 978-3-446-46130-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-46201-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446461307>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Der Herausgeber

Prof. em. Dr.-Ing. habil Dr. h. c. Gottfried Wilhelm Ehrenstein wurde 1937 in Danzig geboren und hat nach einem humanistischen Abitur an der Technischen Hochschule Hannover Allgemeinen Maschinenbau studiert. Nach der Promotion (Prof. Matting) arbeitete er 10 Jahre in der Anwendungstechnischen Abteilung Kunststoffe der BASF AG und war gleichzeitig Lehrbeauftragter und nach der Habilitation 1976 Privatdozent der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH, Prof. Macherauch). Von 1977 bis 1989 war er Inhaber des Lehrstuhls für Werkstoffkunde/Kunststoffe der Universität-Gesamthochschule Kassel. Nach Rufen an die TU Harburg, die Montanuniversität Leoben und die TU Berlin war er ab 1989 Professor für Kunststofftechnik des von ihm neu eingerichteten Lehrstuhls der Universität Erlangen-Nürnberg.



(LKT Erlangen)

Von 1987 bis 1992 war er nebenamtlich Leiter des Süddeutschen Kunststoffzentrums in Würzburg. 1992 wurde er Honorarprofessor des Chemischen Instituts der Universität Qingdao, China, und 1996 Ehrendoktor der Technischen Universität Budapest. Prof. Ehrenstein ist vereidigter Sachverständiger der IHK Nürnberg für Kunststoffe und Sonderwerkstoffe auf Kunststoffbasis und des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin.

Vorwort

Mikroskopische Untersuchungsmethoden stellen häufig die direkteste und beste Möglichkeit dar, die strukturellen Merkmale von Kunststoffen zu erfassen und daraus Erkenntnisse für die Entwicklung von Schadenshypothesen abzuleiten. Durch geeignete Präparation entsteht ein Kontrast durch unterschiedliches Reflexions- und Absorptionsvermögen der Materialstruktur in der Abbildung mit dem Mikroskop. Artefaktfreie Präparationstechniken sind für aussagefähige mikroskopische Untersuchungen daher ebenso wie Kenntnisse über die verschiedenen Mikroskopieverfahren eine notwendige Grundvoraussetzung.

Zur lichtmikroskopischen Abbildung werden bei Bedarf Eingriffe in die Beleuchtungsanordnung am Mikroskop vorgenommen. Der Kontrast entsteht bei Durchlichtmikroskopie an Dünnschnitten und Dünnschliffen wahlweise mit Phasenkontrast, Differenzial-Interferenz- und Polarisations-Kontrast.

Bei Auflichtmikroskopie an Anschliffen kann mit Dunkelfeld, schräger Beleuchtung, Differential-Interferenzkontrast und der Fluoreszenzmikroskopie in speziellen Fällen zur Risserkennung der Abbildungskontrast verstärkt werden. Die Auflichtabbildung kann ergänzend mit chemischer und Plasmaätzung zur Reliefbildung auf unterschiedlich angegriffene Präparat-Oberflächen verdeutlicht werden. Nähere Darstellungen hierzu sind im Kapitel 4 „Ätzen für Strukturuntersuchungen“ im Buch „Präparation“ der Reihe „Erlanger Kunststoff-Schadensanalyse“ zu finden. Die mikroskopische Untersuchung von unverstärkten Kunststoffen wird normalerweise am Durchlichtmikroskop mit polarisiertem Licht vorgenommen. Man erkennt in diesem Verfahren:

- das Auftreten und den Verlauf von Rissen
- Lunker und Einschlüsse
- Entmischungen bei mehrphasigen Materialien
- Fließlinien, die z.B. Rückschlüsse auf den Formfüllvorgang und Qualität von Fügevorgängen zulassen
- die Ausbildung von Bindenähten, die als wichtige Anhaltspunkt für den richti-

gen Ort der Angussstelle und die Beurteilung der gewählten Spritzgießparameter dienen

- bei teilkristallinen Thermoplasten die Größe und Form

Weitere Aufnahmetechniken zur Beurteilung von Füll- und Verstärkungsstoffen und deren Anordnung sind mit der Auflichttechnik und der REM gegeben.

Zur mikroskopischen Untersuchung von Oberflächen – insbesondere Bruchflächen – reicht die Tiefenschärfe eines Lichtmikroskops häufig nicht aus. Aus diesem Grund und wegen der hohen Vergrößerungsmöglichkeiten bedient man sich des Rasterelektronenmikroskops (REM), besonders bei:

- Fraktographischen Untersuchungen zur Beschreibung des Bruchverhaltens und Bruchverlaufs mit Aussagen über spröde und duktile Verlaufsmerkmale, Gewalt und Schwingbruch
- Fraktographischen Untersuchungen zur Beschreibung der Bruchmechanismen, besonders bei Füll und Verstärkungsmittel/Matrixkoppelung
- Untersuchungen der Verarbeitung, mit Beurteilung der Polymerisationsgrundstrukturen
- Oberflächenabbildungen zur Kennzeichnung von Kavitation und Tropfenschlag
- Oberflächenabbildungen von Schäden aus äußeren Einwirkungen mit Chemikalien, Temperatur und Strahlung
- Untersuchungen zu Reib- und Verschleißvorgängen, Verschleißrichtungen und Verschleißgrad

Spezialmikroskopieverfahren wie die Rasterkraftmikroskopie und die Fluoreszenzmikroskopie erlauben spezielle Untersuchungen. Die Rasterkraftmikroskopie erlaubt die präzise Messung von Wechselwirkungskräften und somit die Untersuchung von Adhäsion, Reibung, Elastizität, Härte und die molekulare Erkennung von funktionalen Oberflächen.

Die Fluoreszenzmikroskopie ermöglicht eine sehr sensitive und spezifische Analyse mit fluoreszierenden Stoffen.

Wesentliche Unterstützung für dieses Fachbuch gab es durch die Leiterinnen der Mikroskopie des Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität Erlangen Frau Birgit Kaiser, Frau Dipl.-Ing. (FH) Helene Petukhov und Frau Marion Unthelm.

Prof. Gottfried W. Ehrenstein, im Juli 2019

Inhalt

| | |
|--|------------|
| Der Herausgeber | VII |
| Vorwort | IX |
| 1 Lichtmikroskopie | 1 |
| 1.1 Mikroskopie | 1 |
| 1.1.1 Einleitung | 3 |
| 1.1.2 Grundlagen der Lichtmikroskopie | 4 |
| 1.1.2.1 Beleuchtungsoptik | 6 |
| 1.1.2.2 Auflösungsvermögen und Numerische Apertur | 7 |
| 1.1.2.3 Vergrößerung | 8 |
| 1.1.2.4 Kontrast | 9 |
| 1.1.3 Kontrastverfahren der Durch- und Auflichtmikroskopie | 9 |
| 1.1.3.1 Durchlichtmikroskopie | 12 |
| 1.1.3.1.1 Hellfeld | 12 |
| 1.1.3.1.2 Dunkelfeld | 16 |
| 1.1.3.1.3 Polarisationsoptik | 19 |
| 1.1.3.2 Auflichtmikroskopie | 26 |
| 1.1.3.2.1 Differential-Interferenzkontrast | 27 |
| 1.1.3.2.2 Polarisationskontrast | 29 |
| 1.1.3.2.3 Fluoreszenz | 30 |
| 1.1.4 Stereomikroskopie | 31 |
| 1.1.4.1 Technischer Aufbau | 32 |
| 1.1.4.1.1 <i>Greenough</i> -Modell | 32 |
| 1.1.4.1.2 Fernrohr-Modell | 33 |
| 1.1.4.2 Beleuchtung | 34 |
| 1.1.4.3 Aufnahmemöglichkeiten | 35 |
| 1.1.4.3.1 Stereobilder | 35 |
| 1.1.4.3.2 Monobilder | 35 |
| 1.1.4.3.3 Bilder mit erweiterter Tiefenschärfe | 36 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1.1.4.4 | Anwendungsbeispiel | 36 |
| 1.1.4.4.1 | Orientierungen und Eigenspannungen | 37 |
| 1.1.4.4.2 | Kristalline Strukturen – Sphärolithe | 39 |
| 1.2 | Normen | 43 |
| 2 | Polarisation | 45 |
| 2.1 | Analyseverfahren | 45 |
| 2.1.1 | Polarisationsoptik & Mikroskopie | 45 |
| 2.1.1.1 | Grundlagen | 45 |
| 2.1.1.2 | Doppelbrechung | 49 |
| 2.1.1.3 | Spannungsoptische Konstante | 50 |
| 2.1.1.3.1 | Kunststoffart | 54 |
| 2.1.1.3.2 | Viskoelastizität | 55 |
| 2.1.1.3.3 | Aggregatzustand | 55 |
| 2.1.1.4 | Isoklinen und Isochromaten | 57 |
| 2.1.1.5 | Formteile im polarisiertem Licht | 59 |
| 2.1.1.6 | Polarisation in der Durchlichtmikroskopie | 62 |
| 2.1.1.6.1 | Kristalline Überstrukturen | 63 |
| 2.1.1.6.2 | Durchlicht-Hellfeld und Durchlicht- Polarisation | 66 |
| 2.1.1.6.3 | Besondere Erscheinungen im polarisierten Licht | 68 |
| 2.1.1.6.4 | Beispiele für mikroskopische Strukturbilder | 71 |
| 2.1.1.6.5 | Verarbeitungsfehler | 74 |
| 2.1.1.6.6 | Glasfaserverstärkte Teilkristalline | 80 |
| 2.2 | Normen | 83 |
| 3 | Rasterkraftmikroskopie | 85 |
| | <i>Mit Dr. Rolf Peter Baumann</i> | |
| 3.1 | Einleitung | 85 |
| 3.2 | Funktionsprinzip | 85 |
| 3.2.1 | Arbeitsweise des Rasterkraftmikroskops | 87 |
| 3.2.2 | Praktische Beispiele | 88 |
| 3.2.2.1 | Messmöglichkeiten | 88 |
| 3.2.2.2 | Auswertung | 89 |
| 3.2.2.3 | Kalibrierung | 90 |
| 3.2.2.4 | Verschiedene Anwendungen | 91 |
| 3.2.2.5 | Praktische Vorgehensweise | 92 |
| 3.2.2.6 | Spritzgussoberflächen PUR | 93 |
| 3.2.2.7 | Bioabbaubare Blasfolie | 94 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.2.2.8 | Bewitterung von Blend aus PBT und PET | 95 |
| 3.2.2.9 | Struktur einer Schweißnaht | 97 |
| 3.3 | Vor- und Nachteile des Rasterkraftmikroskops | 98 |
| 3.4 | Normen | 99 |
| 4 | Fluoreszenzmikroskopie | 101 |
| | <i>Mit Dr. Markus Rückel</i> | |
| 4.1 | Einleitung | 101 |
| 4.2 | Funktionsprinzip | 101 |
| 4.2.1 | Konfokale Fluoreszenz | 102 |
| 4.2.2 | Fluoreszenzmarkierung | 105 |
| 4.2.3 | Autofluoreszenz | 108 |
| 4.2.4 | Vorteil der Fluoreszenzmarkierung | 111 |
| 4.3 | Normen | 111 |
| 5 | Rasterelektronenmikroskopie REM – FEM – EDX | 113 |
| 5.1 | Überblick | 113 |
| 5.2 | Bildsignale und Kontrastentstehung | 115 |
| 5.3 | Feldemissionsmikroskopie (FEM) | 117 |
| 5.4 | Schäden und Artefakte | 120 |
| 5.4.1 | Aufladungen | 121 |
| 5.4.2 | Kanteneffekt | 122 |
| 5.4.3 | Aufnahmeflächen | 122 |
| 5.5 | Energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX) | 124 |
| 5.6 | Probenvorbereitung | 126 |
| 5.7 | Probenuntersuchung | 128 |
| 5.7.1 | Kunststoff-Schadensbrüche unter dem REM | 128 |
| 5.7.1.1 | Inneres Volumen – Innere Fehler | 128 |
| 5.7.1.2 | Makroskopische Beurteilung von Bruchstücken | 131 |
| 5.8 | Bruchverlauf | 132 |
| 5.8.1 | Gewaltbrüche | 135 |
| 5.8.1.1 | Duktile Gewaltbrüche | 135 |
| 5.8.1.2 | Reißbruch | 138 |
| 5.8.1.3 | Schubbruch | 139 |
| 5.8.1.4 | Crazes | 140 |
| 5.8.1.5 | Spröde Gewaltbrüche | 143 |
| 5.8.1.6 | Schwingungsbrüche | 145 |
| 5.8.1.6.1 | Schwingungsinduzierte Gewaltbrüche | 145 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 5.8.1.6.2 | Echte Schwingungsbrüche | 148 |
| 5.8.1.6.3 | Echte duktile Schwingungsbrüche | 151 |
| 5.8.1.6.4 | Echte spröde Schwingungsbrüche | 152 |
| 5.8.1.7 | Einflüsse von Chemikalien – Spannungsrissbildung | 154 |
| 5.8.2 | Oberflächenschäden unter dem REM | 156 |
| 5.8.2.1 | Strukturen in Kunststoffen | 157 |
| 5.8.2.1.1 | Primäre Grundstrukturen | 157 |
| 5.8.2.1.2 | Verarbeitungsbedingte Oberflächenstrukturen | 158 |
| 5.8.2.2 | Oberflächenschäden durch mechanische Einwirkungen | 159 |
| 5.8.2.2.1 | Gleitverschleiß | 160 |
| 5.8.2.2.2 | Verschleißrate (Abrieb) | 165 |
| 5.8.2.2.3 | Rauigkeit der verschlissenen Oberflächen | 166 |
| 5.8.2.2.4 | Örtlicher Gleitverschleiß (Pittings) | 167 |
| 5.8.2.2.5 | Örtliche mechanische Oberflächenschädigung | 169 |
| 5.8.2.2.6 | Strahlverschleiß | 170 |
| 5.8.2.2.7 | Tropfenschlag | 171 |
| 5.8.2.2.8 | Erosion | 172 |
| 5.8.2.2.9 | Kavitation | 173 |
| 5.8.2.3 | Oberflächenschäden durch physiko-chemische Einwirkungen | 174 |
| 5.8.2.3.1 | Chemikalieneinwirkung | 174 |
| 5.8.2.3.2 | UV-Bestrahlung | 177 |
| 5.8.2.3.3 | Bewitterung | 177 |
| 5.8.2.3.4 | Thermische Wirkung auf Thermoplaste | 178 |
| 5.8.2.3.5 | Oberflächenschäden durch biologische Einwirkung | 180 |
| 5.8.2.4 | REM-Verfahren – Rückstreuelektronen (RE-Detektion) | 181 |
| 5.8.2.5 | Mikroradiografie | 182 |
| 5.8.2.6 | Probenpräparation – RE-Proben | 184 |
| 5.8.2.7 | Probenpräparation – Mikroradiografie | 185 |
| 5.8.2.7.1 | Beispiele | 186 |
| 5.8.2.7.2 | Aufnahmen mit der Mikroradiografie | 189 |
| 5.8.2.7.3 | Vergleich Mikroradiografie und RE-Detektor | 191 |
| 5.8.2.7.4 | Wärmedämmsteg | 192 |
| 5.8.2.7.5 | Gitterelement | 193 |
| 5.8.2.7.6 | SMC (Sheet-Moulding-Compound) | 194 |
| 5.8.2.7.7 | Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe | 195 |
| 5.8.2.8 | Oberflächenanalytik – Überblick | 195 |
| 5.8.2.9 | Zusammenfassung | 196 |

| | |
|---|------------|
| 5.9 Normen | 197 |
| 6 Ausgewählte Fachbegriffe der lichtmikroskopischen Untersuchungen | 199 |
| Index | 205 |

1

Lichtmikroskopie

1.1 Mikroskopie

Mikroskopische Untersuchungsmethoden stellen häufig die direkteste und beste Möglichkeit dar, die inneren strukturellen Merkmale von Kunststoffen zu erfassen und zu beurteilen. Da einzelne Moleküle lichtmikroskopisch nicht auflösbar sind, können nur übergeordnete Strukturen oder Beeinflussungen von größeren Bereichen identifiziert und beurteilt werden. Aufgrund des Aufbaus der Kunststoffe sind mehrphasige Systeme, wie teilkristalline Thermoplaste, Polymermischungen sowie gefüllte und verstärkte Kunststoffe leichter mikroskopisch zu beurteilen als amorphe ungefüllte Kunststoffe.

Durch geeignete Präparation und Eingriffe in die Beleuchtungsanordnung bzw. durch geeignete Wahl eines Detektors kann das unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsvermögen des Materials zur Darstellung genutzt werden. Es können die verschiedensten Aufgabenstellungen untersucht werden.

Die häufigsten Verarbeitungs- und Beanspruchungsschäden von Formteilen, die mit Dünnschnitt- und Dünnschliffverfahren erkennbar sind, sind in Tabelle 1.1 dem im Normalfall geeignetsten Mikroskopieverfahren zugeordnet.

Tabelle 1.1 Mikroskopieverfahren für die Schadensanalyse

| AI-Interferenzkontrast | DL, polarisiert | DL-Phasenkontrast | AL-Dunkelfeld | Durchlicht (DL) | Auflicht (AL) | Mit Mikroskop erkennbar bei Dünnschnitt und Dünnschliff | Untersuchung (Verarbeitungs- und Beanspruchungsfehler) |
|------------------------|-----------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|---|--|
| | • | | | | | | Scherorientierung, teilkristalline Thermoplaste |
| • | | • | | | | | Scherorientierung, amorphe Thermoplaste |
| | | | | • | | | Scherorientierung, Füll- u. Verstärkungsstoffe |

Tabelle 1.1 Mikroskopieverfahren für die Schadensanalyse (Fortsetzung)

| AI-Interferenzkontrast | DL, polarisiert | DL-Phasenkontrast | AL-Dunkelfeld | Durchlicht (DL) | Auflicht (AL) | Mit Mikroskop erkennbar bei Dünnschnitt und Dünnschliff | Untersuchung (Verarbeitungs- und Beanspruchungsfehler) |
|------------------------|-----------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|---|--|
| • | | | | | • | Scherorientierung, treibmittelh. Kunststoffe | |
| | | | • | | • | Pigmentfarben (Regranulat) | |
| | • | | | | | Sphärolithgröße | |
| | | | | • | • | Faserlängen, Pigmentgröße | |
| | | | • | • | • | Fremdmaterial | |
| • | | | • | | | Prägefolien mit Lackaufbau | |
| | • | | | • | | Lunker | |
| | • | • | | | | Mikro- und Gefügerisse | |
| | • | | | | | Druckzeitlinien | |
| | • | | | | | Spärolitharme Randzonen | |
| • | • | • | | | • | Medienangriffe | |
| | • | | | • | | Inhomogene Formmasse | |
| | • | | | | | Kerb- und Spannungszustände | |
| | • | • | • | • | • | Kalte Masseteilchen | |
| | • | | | • | • | Bindenähte | |
| • | • | | | • | | Schweißnähte | |
| | • | | | | • | Dickenmessung | |

Die physikalischen Eigenschaften, wie sie an genormten Probekörpern bestimmt werden und von den Rohstoffherstellern vermittelt werden, differieren oft mit den im Bauteil realisierten, zumal das Verarbeitungsverfahren und die konstruktive Gestaltung einen erheblichen Einfluss auf die Strukturen und Eigenschaften haben. Mittels der Mikroskopieverfahren sind beispielsweise spezielle Aussagen zu folgenden damit verbundenen Effekten möglich:

- Sphärolithstrukturen (Struktur und Abweichungen vom idealen Zustand durch Verarbeitungsunregelmäßigkeiten und unsachgemäße Verarbeitungsparameter bzw. Mehrfachverarbeitung)
- Lunker, Fehlstellen, Bindenähte, Delaminationen
- Anisotropien, Molekülorientierungen und Eigenspannungen
- Verunreinigungen, nicht aufgeschmolzenes Material, kalte Pfropfen, ungleiche Strukturen
- Verteilung und Orientierung von Füll- und Verstärkungsstoffen, Pigmenten

- Verbindung zu Einlegeteilen und anderen Komponenten
- übergeordnete Molekülorientierungen, Eigenspannungen durch innere und äußere Kräfte; Deformationen durch Schadensablauf
- chemische Angriffe, Crazes und übergeordnete Sphärolithstrukturen
- keine Feinstrukturen (Lamellen) oder einzelne Makromoleküle oder direkte Molekülorientierungen
- indirekte Hinweise auf Fehler im Werkzeugaufbau oder Bauteilkonstruktion, Gestalten von Ecken, Radien und Wanddicken, Auswerfermarkierungen
- Schichtaufbauten und -dicken

1.1.1 Einleitung

In der optischen Dokumentation stehen vielfältige Ausrüstungen und Möglichkeiten zur Verfügung, um Objekte von der Übersicht, beispielsweise eines Schadens, bis hin zur detaillierten Aufnahme ihrer Struktur zu erfassen und zu beurteilen. Je nach geforderter Vergrößerung kann die Fotografie, die Makrofotografie, die Makro- oder Mikroskopie angewandt werden, Bild 1.1.

Die Makro- und Mikroskopie siedeln sich dabei in Vergrößerungsbereichen von etwa 5- bis 1000-fach an. Sie dienen dem Menschen im einfachsten Fall als Sehhilfe, um in einem Objekt Details zu erkennen, die mit bloßem Auge nicht mehr „aufgelöst“/erkannt werden können. In der Kunststoffanalyse werden so strukturelle Merkmale erfasst und beurteilt. Meist sind Kunststoffe bei einer lichtmikroskopischen Untersuchung kontrastlos. Durch geeignete Präparation und Eingriffe in den Strahlengang des Mikroskops können das unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsvermögen sowie die optische Dichte und die Doppelberechnung von Kunststoffen zur Kontrastentstehung genutzt werden. So können die verschiedensten Themen untersucht werden.

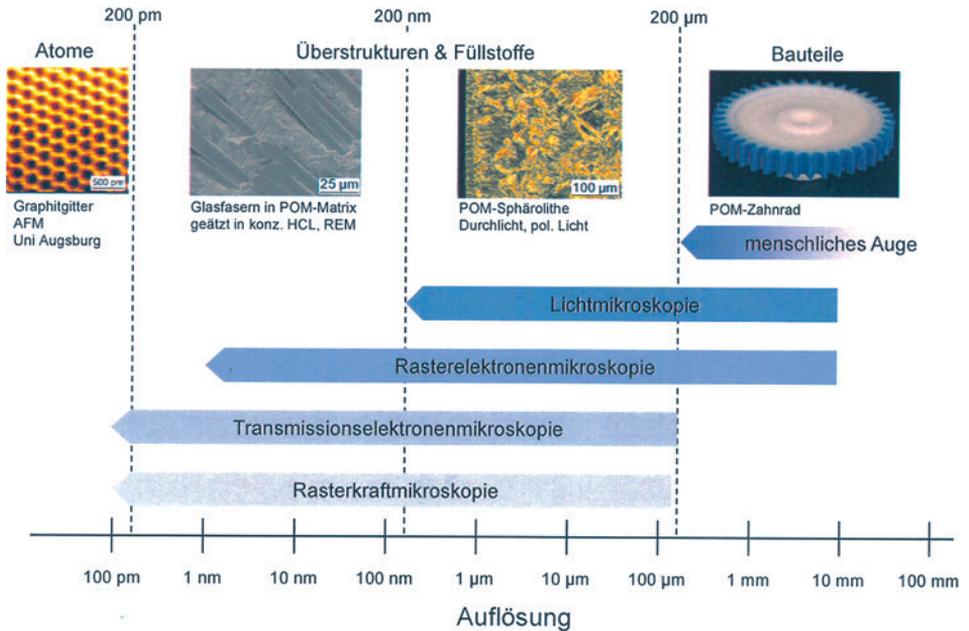
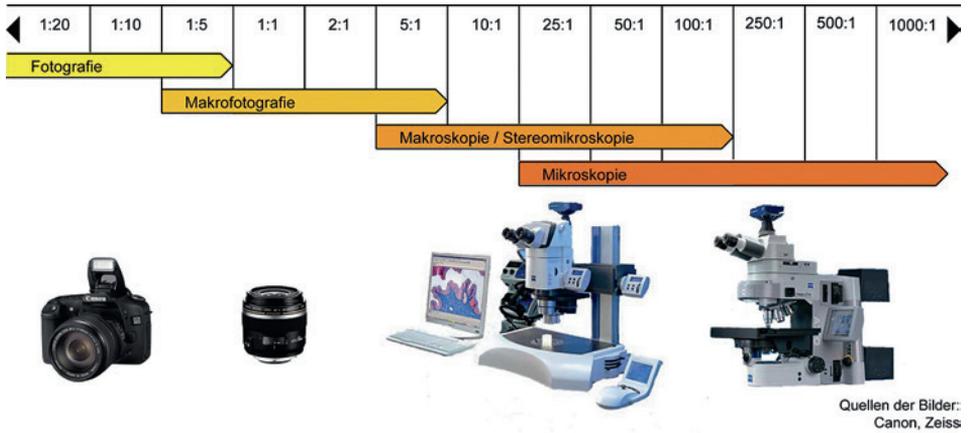


Bild 1.1 Vergrößerungsbereiche der Fotografie, Makro- und Mikroskopie

1.1.2 Grundlagen der Lichtmikroskopie

Um dem Anwender die verschiedenen Kontrastierungsverfahren der Lichtmikroskopie nahezubringen, soll im Folgenden die prinzipielle Funktionsweise eines Mikroskops anhand der dafür erforderlichen Geräte erklärt und durch Beispiel-aufnahmen illustriert werden. In Bild 1.2 ist ein Lichtmikroskop, wie es sowohl im Durch- als auch im Auflichtverfahren eingesetzt wird, abgebildet.

Eigenspannungen und eingefrorene Orientierungen unterscheiden sich in ihrer Entstehung im Prinzip dadurch, dass eingefrorene Orientierungen im schmelzflüssigen und gummi-elastischen Zustand entstehen und im Einfrierbereich fest fixiert sind. Eigenspannungen entstehen durch unterschiedliche Kontraktionen bei der Abkühlung oder auch durch Krafteinwirkungen. Im normalen Gebrauchszustand sind Eigenspannungen und Orientierungen im polarisierten Licht nur dadurch zu unterscheiden, indem man die Eigenspannungen, die die Kräfte hervorrufen, entspannt oder beseitigt.

Flache Plättchen $35 \times 35 \times 0,5$ mm werden aus PC gespritzt. Bei einer Schmelztemperatur von 300°C und einer Werkzeugtemperatur von 100°C ergeben sich gleichmäßige Orientierungen in Fließrichtungen, Bild 2.11 links und mitte. Wird eine identische Probe in einer maximalen, 5 s dauernden Werkzeugtemperatur von 180°C gespritzt werden diese Orientierungen noch während des Fertigungsprozesses wieder aufgehoben, Bild 2.11 rechts.

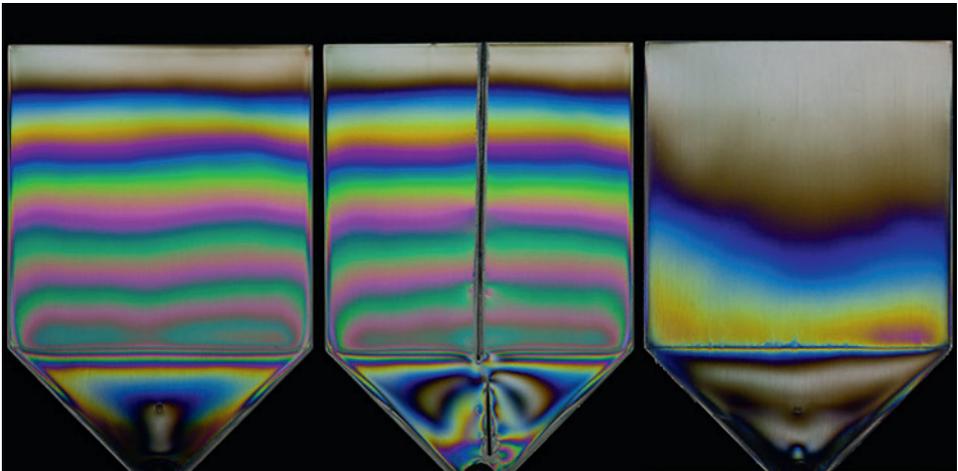


Bild 2.11 Plättchen $35 \times 35 \times 0,5$ mm mit unterschiedlicher Werkzeugtemperatur [Meister]
 links: 100°C
 mitte: $100^\circ\text{C} + (5\text{ s})$
 rechts: 180°C mit Entlastungsschnitt

Um festzustellen, ob es sich um Orientierungen oder Eigenspannungen handelt, bringt man einen mechanischen Schnitt an. Da sich keinerlei Änderung im Isochromatenbild ergibt, sind deren Ursache eingefrorene Orientierungen.

Im polarisierten Licht zeigen unterschiedliche 18 mm dicke zylindrische Scheiben aus PC unterschiedliche Isochromaten im polarisierten Licht, Bild 2.12. Die Ursache liegt in den ganz unterschiedlichen Fertigungsverfahren. Eine Probe ist druckverfestigt (links), eine normal im konventionellen Spritzguss verfestigt durch Abkühlung (rechts).

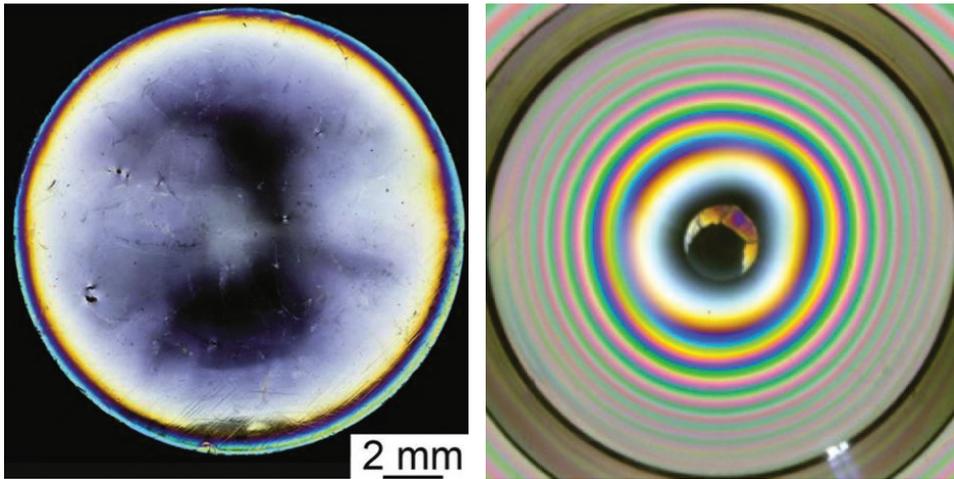


Bild 2.12 Dicke Scheiben (18 mm) aus PC druckverfestigt (*links*) und konventionell (*rechts*) gefertigt [Wildner]

Beide Proben hatten eine Messtemperatur von 270 °C in einem 170 °C warmen Werkzeug. Die druckverfestigte Probe wird mit 800 bar belastet und über den gesamten Querschnitt gleichmäßig verfestigt und danach isobar abgekühlt. Es besteht also nie eine gefertigte Zweiphasigkeit (fest-flüssig). Die normal abgekühlte Probe wird unter 300 bar gleichmäßig abgekühlt mit klarer Zweiphasigkeit mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, die zu Eigenspannungen und eingefrorenen Orientierungen führen, Bild 2.13. Bei der Druckverfestigung erfolgt eine Trennung von Verfestigung und Abkühlung. Die Schmelze wird bis zur Verfestigung komprimiert, anschließend erfolgt die Abkühlung im bereits festen Zustand. Dadurch werden die Eigenspannungen fast vollständig reduziert, die Dimensionsstabilität mit kontrollierter Schwindung erhöht. Es erfolgt eine genauere Abformung der Werkzeugkontur. Wanddickenunterschiede wirken sich nicht aus.

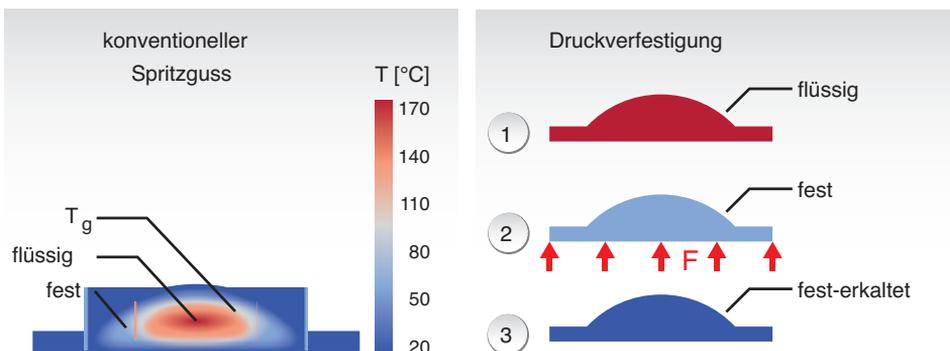


Bild 2.13 Konventioneller Spritzguss (*links*) und Druckverfestigung (*rechts*) [Wildner]

Wegen der unterschiedlichen Ursachen, die zu Isochromaten führen können, kann man zu Bild 2.14 sagen, dass vom Anspritzbereich oben eine Reihe Störungen erkennbar sind, vermutlich starke Orientierungen, hervorgerufen durch die einströmende Schmelze beim Spritzgießen. Rund um das Loch in der Mitte, sind ebenfalls Störungen erkennbar.

Die symmetrischen Farben oberhalb von dem Loch könnten auf eine Bindenaht hindeuten, was bei Kenntnis der Anspritzstelle abgeschätzt werden könnte.

Bei qualitativen Beurteilungen, also wenn keine konkreten Zahlenwerte bestimmt werden sollen, sind solche Verdrehungen durchaus geboten.

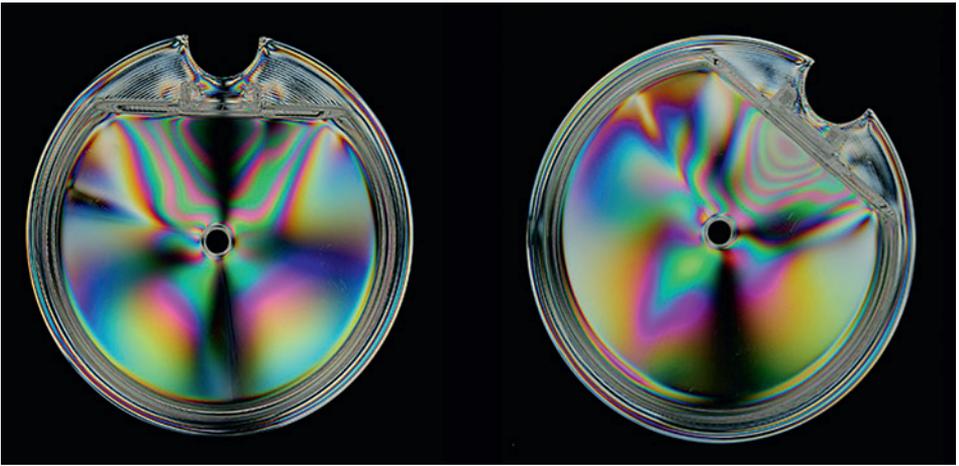


Bild 2.14 Spannungsoptische Darstellung eines fehlerhaften Spritzgussteils

Die schwarzen Isoklinen behalten ihre Lage bei, obwohl das Bauteil gedreht wurde, weil die Richtung von Polarisator und Analysator beibehalten wurde.



Die Spannungsoptik ist die einzige Möglichkeit, Orientierungen und Eigen- oder Lastspannungen in durchsichtigen oder zumindest durchscheinenden Kunststoffen sichtbar zu machen, wenn auch durchaus schwierig.

2.1.1.6 Polarisation in der Durchlichtmikroskopie

In der Durchlichtmikroskopie wird die Doppelbrechung gezielt genutzt, um mit Hilfe von polarisiertem Licht ansonsten kontrastarme Kunststoffproben zu untersuchen. Dadurch werden kristalline Strukturen sowie Molekülorientierungen (und ggf. vorhandene Spannungen) sichtbar.

Die Erfahrungen in der Praxis haben gezeigt, dass das Messgerät und die Messelektronik sehr empfindlich auf Änderungen in der Umgebung reagieren und es deshalb notwendig ist, die Messungen in einer gleichbleibend klimatisierten Umgebung durchzuführen. Weiterhin ist es erforderlich, die Kalibrierung mehrmals täglich zu kontrollieren.



Konstant klimatisierte und erschütterungsfreie Umgebung notwendig, Kalibrierung mehrmals täglich.

3.2.2.5 Praktische Vorgehensweise

Tabelle 3.2 Praktische Vorgehensweise Rasterkraftmikroskopie

| | |
|---------------------------------|--|
| Probenvorbereitung | Die Stelle der Probenentnahme wird problemspezifisch gewählt. Die Probenoberfläche muss glatt (10 µm), möglichst poliert und planparallel sein. |
| Probenpositionierung | Der größtmögliche Scanbereich beträgt 100 × 100 µm. Dieser Bereich kann maximal während eines Scans abgebildet werden. Die Punkte für die lokale thermische Analyse werden nach dem Oberflächenscan gewählt Planparallele und glatte (max. 10 µm) Proben |
| Sensorvorbereitung | Der Sensor muss vor der Messung gereinigt sein. Anhaftende Probenreste verfälschen das Ergebnis. Der Sensor wird mit einer geeigneten Belastung (Andruckkraft) auf die Probenoberfläche aufgebracht. Die dadurch verursachte Ablenkung des Lasers muss überprüft werden. Die Qualität einer Messung hängt auch von der Form und des Winkels der jeweiligen Messspitze ab. |
| Belastung (Andruckkraft) | Die Belastung auf den Sensor wird in nA gewählt und liegt bei der Messung von Kunststoffen zwischen 10 und 50 nA Auslenkung auf dem Fotodetektor. |
| Scanparameter | Der Sensor hat während des Scanvorgangs eine bestimmte konstante Temperatur; diese liegt meist um 50 °C. Zur gezielten Hervorhebung bestimmter Effekte kann diese erhöht werden. Die Aufnahme des Scans liefert Informationen über die Topografie der Probe und über qualitative Wärmeleitfähigkeitsunterschiede. Anhand dieser Bilder werden bestimmte Punkte für die nachfolgende lokale thermische Analyse ausgewählt. |
| Messprogramm | Das Messprogramm muss material- und probenspezifisch mit geeigneten Parametern für Start-/Endtemperatur und Heizrate gewählt werden. |
| Heizrate | Die Heizraten liegen im Vergleich zu den anderen Methoden der Thermischen Analyse sehr hoch. Aufgrund der geringen Probenmenge (Oberflächenbereich) und des kleinen Sensordurchmessers (5 µm) können Heizraten bis zu 100 °C/s erzielt werden. Für die Untersuchung von Kunststoffen sind Heizraten von 5 bis 10 °C/s günstig. Heizraten von 5 bis 10 °C/s |
| Starttemperatur | Die Starttemperatur sollte min. 50 °C unterhalb des ersten erwarteten Effekts liegen. Meist beginnt die Messung bei Raumtemperatur. Es sind aber auch tiefe Starttemperaturen möglich; diese erfordern einen Zusatz, mit Hilfe dessen die komplette Probe gekühlt wird. |

| | |
|-----------------------------------|---|
| Endtemperatur | Um eine sichere Auswertung zu ermöglichen, sollte die Endtemperatur ca. 30 °C oberhalb des zu messenden Effekts liegen. Eine beginnende Zersetzung ist bei dieser Methode nicht so kritisch zu sehen, da in der Regel bei μ TA-Messungen kein definiertes Abkühlen und anschließendes 2. Aufheizen erfolgt. |
| Auswertung/ Interpretation | Nach Durchführung des Scans wird zunächst die Topografie und das Wärmeleitfähigkeitsbild beurteilt. Die Messung der lokalen thermischen Analyse an verschiedenen Stellen wird meist hinsichtlich der Temperaturen ausgewertet. |

3.2.2.6 Spritzgussoberflächen PUR

Die Ether bzw. Ester basierten TPU-Platten zeigen an der Oberfläche (Tabelle links in Bild 3.6) weder in verschiedenen Shorehärte-Messungen noch in Vertiefung oder Härte Unterschiede. Zug-Dehnung oder Dynamisch-Mechanische-Analyse hingegen (Tabelle rechts in Bild 3.6) zeigen deutliche Unterschiede in den Bulk-eigenschaften beider Proben. Mechanische (Indenter = Härteprüfungen) Messungen am Querschnitt (Diagramm Mitte in Bild 3.6) zeigen einen Anstieg im Modul der Ester basierten Proben von der Oberfläche in das Bulk der Spritzgussplatte.

Die Rasterkraftmikroskopie (Materialkontrastbilder) an entsprechenden Stellen des Querschnitts (Bild 3.6 unten) erklärt diese vermeintliche Diskrepanz und zeigt eine deutliche Zunahme in der Kristallinität der Esterprobe im Bulk im Vergleich zur amorphen Oberfläche auf. In der lamellar kristallinen Struktur mit Dimension im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts, liegt nicht nur die verbesserte Makromechanik der Bulkprobe, sondern auch deren milchige Trübung begründet.

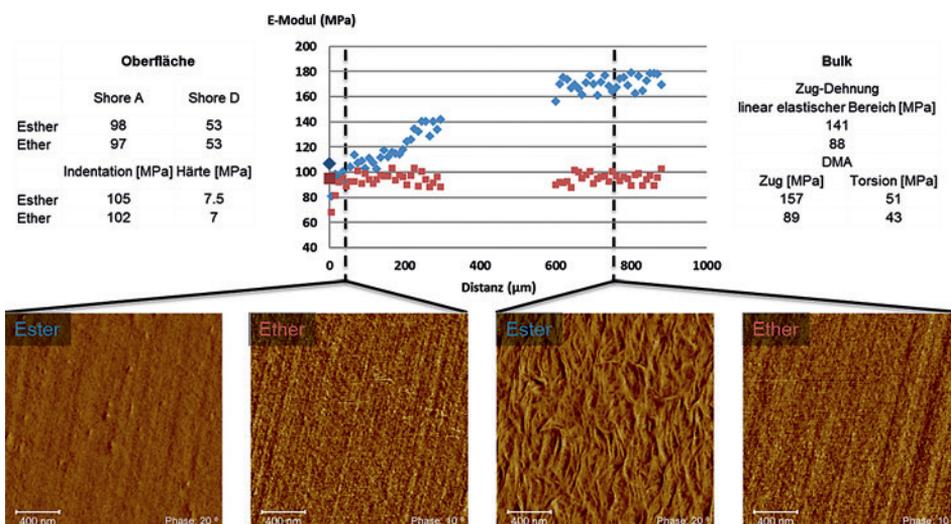


Bild 3.6 Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zweier via Spritzguss hergestellter Polyurethan-Platten

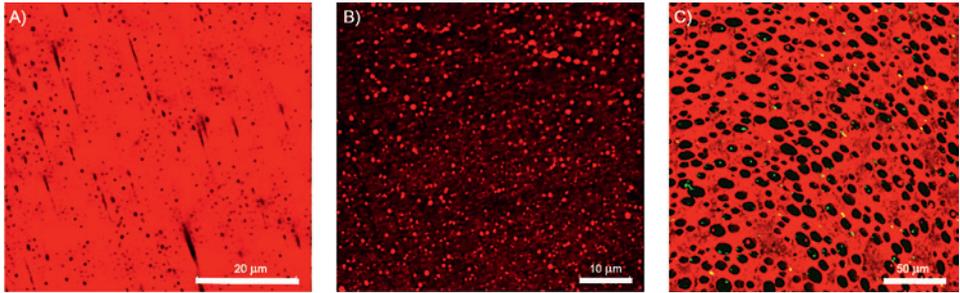


Bild 4.3 Angefärbte Polymerblends von ecovio® und Polyamid/Polyethylen.
 A) Selektive Anfärbung der ecoflex®-Phase eines ecovio®-Blends durch Lumogen Rot, gelöst in Ethanol.
 B) Selektive Anfärbung der Polymilchsäure eines ecovio®-Blends durch Fluorol Yellow, gelöst in Ethanol
 C) Selektive Anfärbung der Polyamidphase in einem Blend mit Polyethylen durch eine Neocarmin®-Lösung

Bild 4.4 zeigt eine weitere Anwendung der PA-Färbung von Polyamid mit Neocarmin®. In einer 90 : 10 PP/PA-Mischung wurde die Oberfläche mit Neocarmin®-Fluoreszenzfarbstoff gefärbt, der nur mit der PA-Komponente wechselwirkt. Die Anregung wurde durch Bestrahlung mit grünem Licht (568 nm) durchgeführt und auf der Emissionsseite eines Langwellenpassfilters (LP590) durchgeführt. Bild 4.4 zeigt das grün fluoreszierende PA in grün und die PP-Matrix in schwarz.

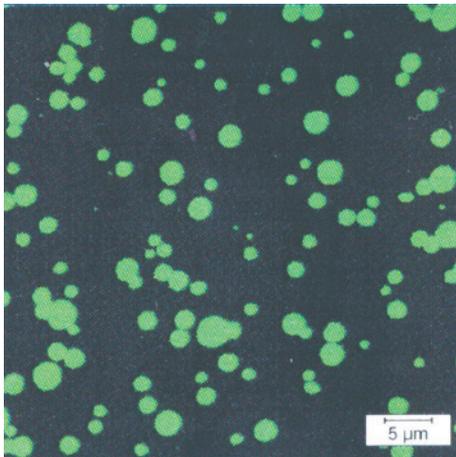


Bild 4.4
 CLSM-Fluoreszenzbilder einer Anschnittfläche eines PP/PA-Blends nach Einfärbung mit Neocarmin®

Eine andere Anwendung für Neocarmin®-Fluoreszenz ist die Mischung von glasfaserverstärktem PES und PA. Kleine Stücke spritzgegossener Pellets wurden vor dem Anfärben mit Neocarmin® angeschliffen und poliert. Im Bild 4.5 sind die PES-Phase und die Glasfasern in grün und die PA-Phase in rot dargestellt. Es wird eine

cokontinuierliche Netzwerkstruktur mit einer Anreicherung von PA um die Glasfasern beobachtet.

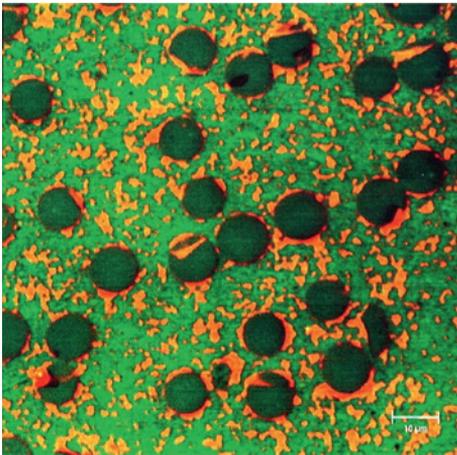


Bild 4.5

Affinität von Polyamid zu Glasfasern nach dem Anfärben mit Neocarmin®; Fluoreszenzbild;
rot: Polyamid; grün: PES mit Glasfasern

Noch deutlich stärker zeigt sich die Affinität vom PA zu den Glasfasern bei einer Mischung von Polyamid mit PPS auf Bild 4.6.

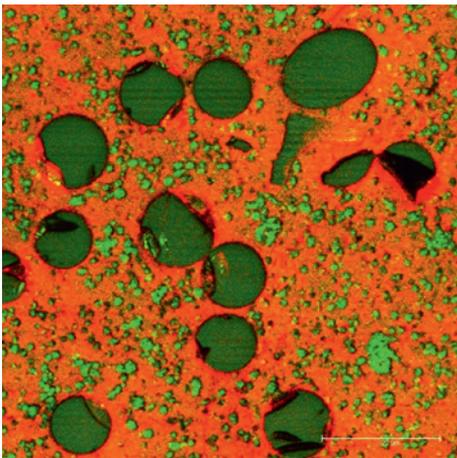


Bild 4.6

Affinität von Polyamid zu Glasfasern
Kombinationsbild Reflexion – Fluoreszenz
rot: Polyamid mittels Neocarmin®
grün: PPS

Als Vergleich mit der Hellfeldmikroskopie zeigt Bild 4.7 den Einschluss eines sogenannten Fischauges aus PE in PA mit dem Vorteil, dass die Materialien in der Fluoreszenzmikroskopie klar erkennbar sind, die Strukturen allerdings weniger deutlich.

Bei nicht oder nur gering leitenden Kunststoffoberflächen akkumulieren die Elektronen an der Oberfläche und können nicht abfließen. Dadurch bilden sich lokale Ladungen, die ihrerseits den Elektronenstrahl negativ im Sinne der Bildbildung beeinflussen.

■ 5.4 Schäden und Artefakte

Kunststoffe erfahren im Rasterelektronenmikroskop nach längerer Belastung mit dem Elektronenstrahl eine thermische Schädigung. Man sollte deshalb versuchen, die Probe nur so kurz wie unbedingt nötig dieser Belastung auszusetzen. Ein Absenken der Beschleunigungsspannung kann auch einen positiven Einfluss haben. Bild 5.6 zeigt durch den Elektronenstrahl hervorgerufene Schädigungen.

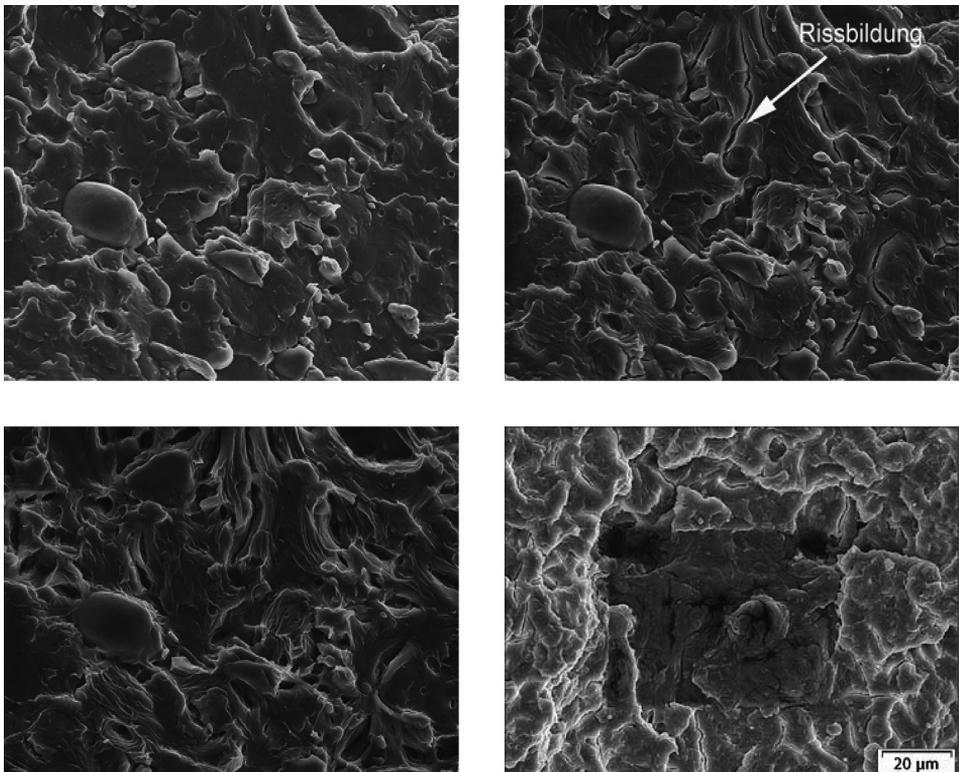


Bild 5.6 POM mit 18% PTFE und 2% Silikon Rasterelektronenmikroskop SE, 10 kV [Mörl]

oben links: 2 min belastet

oben rechts: 10 min belastet

unten links: 30 min belastet

unten rechts: Einbrennen der Messfläche

5.4.1 Aufladungen

Bruchflächen von faserverstärkten Kunststoffen oder poröse Proben wie z.B. Schäume lassen sich oft nur unzureichend besputtern und neigen dann während der Abbildung zu starken Aufladungen. Verbesserung bringen hier eine dickere Sputterschicht, ein Absenken der Beschleunigungsspannung und das Arbeiten mit dem Robinsondetektor. Bei Nutzung des Robinsondetektors kommen die RE-Elektronen nicht direkt aus der Oberfläche, somit wird diese weniger von den Aufladungen beeinflusst.

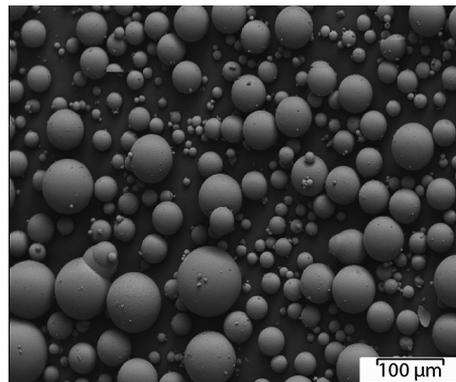
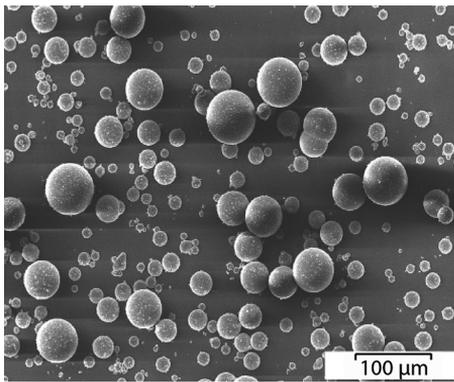


Bild 5.7 Glaskugeln
links: SE-Detektor
rechts: RE-Detektor

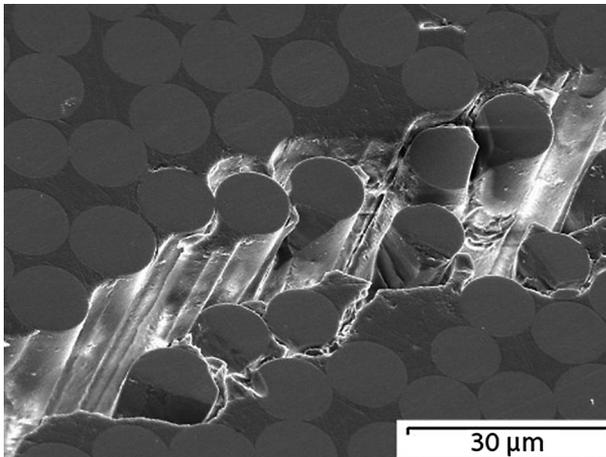
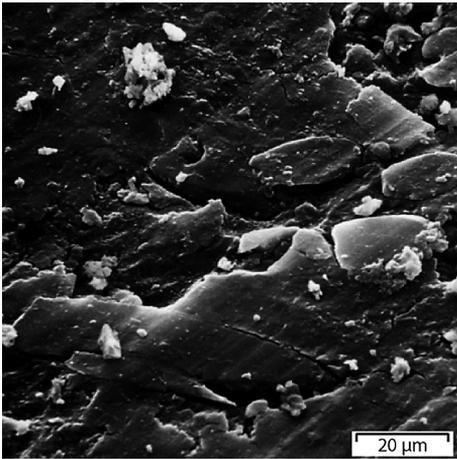
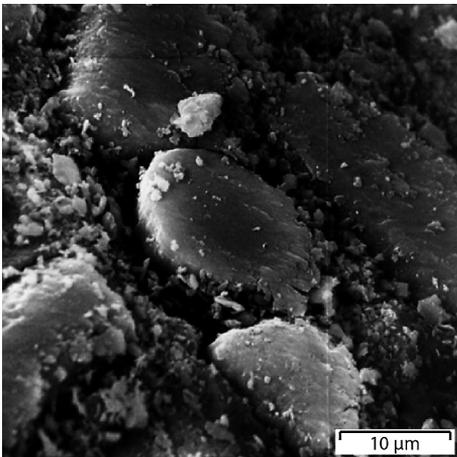


Bild 5.8 VE-Harz+GF, Anschliff, SE-Detektor

**Bild 5.75**

Gleitverschleiß von EP-CF gegenüber Kobalt-Basis-Legierung einer Hüftgelenkprothese mit physiologischer NaCl-Lösung. Verschleißminderung durch C-Fasern, bei denen eine tiefe Verankerung im EP notwendig ist. Parallel zur Verschleißfläche liegende Fasern lösen sich nach kurzer Zeit aus der Oberfläche.

**Bild 5.76**

Verschleiß an der Tasche eines Lagerkäfigs aus PTFE-GF. Verschleiß betrifft Glasoberflächen mit gut anhaftenden PTFE

5.8.2.2.4 Örtlicher Gleitverschleiß (Pittings)

Eine häufige Art der Verschleißform ist die Pitting-Bildung an geschmierten Zahnflanken. Die kleinen Pfeile in Bild 5.78 geben die Richtung der Gleitverschiebung eines getriebenen und eines treibenden Zahnes an. In Richtung dieser Pfeile wird der Werkstoff der Zahnflankenoberfläche verstreckt. Dabei bilden sich stellenweise verstreckte Fahnen von einigen Millimetern Länge und darunter flachliegende Spalten. Von derartigen Spalten können unter der Wechselbelastung Schwingungsbrüche ausgehen, deren Ausbreitungsrichtung in Bild 5.78 durch Schlangenlinien angedeutet ist. Die Hauptrichtung der Bruchausbreitung deckt sich mit der Wanderrichtung W der belasteten Punkte auf den Zahnflanken. Schließlich brechen Teile der vom Schwingungsbruch unterwanderten Schuppen ab und hinterlassen Pittings (Grübchen).

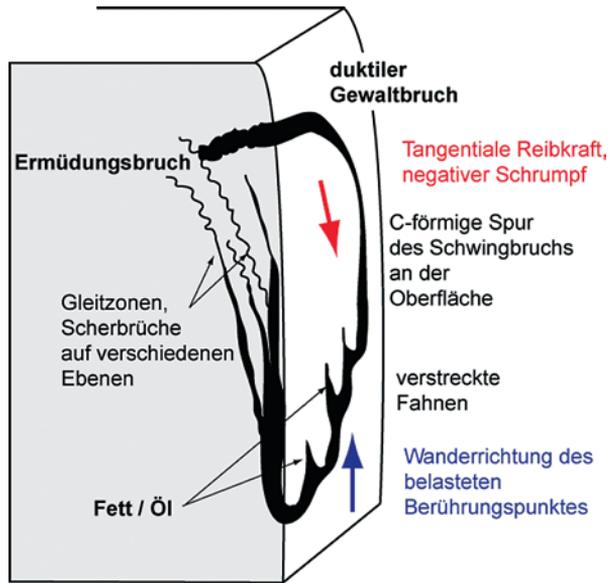
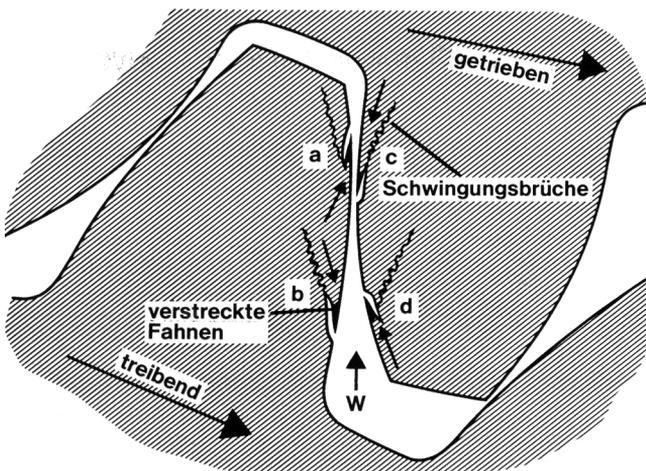


Bild 5.77 Entstehung von Pitting-Bildung auf getriebenen Zahnflanken

Bei gleicher Werkstofffestigkeit der belasteten Zahnflanken treten die Pittings am häufigsten am Fuß des treibenden Rades auf (Stelle **b** in Bild 5.78). Bei geringerer Festigkeit des getriebenen Zahnrads bilden sich die Pittings bevorzugt am Fuß der Zähne dieses Rades. An den Stellen **a** und **d** treten Pittings sehr selten auf. Die vom Schaden bevorzugten Stellen **b** und **c** haben gemein, dass die belasteten Berührungspunkte von den Enden der Fahnen zu deren Wurzeln laufen (negativer Schlupf).



Pittingbildung an Zahnflanken (Polymer-Werkstoff)

Bild 5.78 Pitting-Bildung an Kunststoff-Zahnradern

6

Ausgewählte Fachbegriffe der lichtmikroskopischen Untersuchungen

Analysator (Polarisator): Polarisationsoptische Vorrichtung, welche den Schwingungszustand des linear polarisierten Lichtes nach dem Durchgang durch den Polarisator und die isotrope oder anisotrope Probe analysiert.

Anisotrop (isotrop): Räumliche Verteilung der Eigenschaften von Materialien. In der Mikroskopie werden meist die optischen Eigenschaften, und hier besonders die Brechzahl, zur Bestimmung der Isotropie herangezogen. Ist diese Brechzahlverteilung in allen Raumrichtungen gleich, so liegt ein optisch isotroper Stoff vor. Weist die Verteilung dagegen einen Unterschied auf, so ist das Material optisch anisotrop. Diese Verhältnisse werden durch eine *Indikatrix* verdeutlicht.

Apertur (numerische): Bei Objektiven ein Kennwert für das optische Auflösungsvermögen. Die Apertur von Beleuchtungseinrichtungen ist ein Maß für die mit dieser Beleuchtung zu verwendenden Objektive. Die Apertur ist definiert als der Sinus des halben Öffnungswinkels der betreffenden optischen Komponente multipliziert mit der Brechzahl des Mediums zwischen der Probe und der an die Probe anschließenden Mikroskoplinse.

Aperturblende: Irisblende im Beleuchtungsstrahlengang, welche den Kontrast und die Mikroskopauflösung beeinflusst. Bei großer Blendenöffnung ergeben sich ein geringer Kontrast und eine hohe optische Auflösung, bei kleiner Blendenöffnung umgedreht.

Auflicht: Mikroskopische Methode zur Untersuchung von *opaken Materialien*. Das Bild wird durch Reflexion an der Probenoberfläche erzeugt. Das setzt eine im Allgemeinen aufwändige *Präparation* durch *Schleifen, Polieren* und der abschließenden *Topographieerzeugung* voraus. Wichtigstes Anwendungsgebiet ist die Untersuchung von Metallen im Rahmen der Metallographie.

Auflösung (optische): Wichtigster Kennwert eines optischen Systems. Die optische Auflösung ist definiert als der Abstand zweier objektseitigen Punkte, die in der mikroskopischen Abbildung gerade noch erkennbar sind. Die optische Auflösung hängt von der Wellenlänge des zur Beleuchtung verwendeten Lichtes und von der Apertur des Objektivs ab. Eine hohe Apertur und eine geringe Wellenlänge (blau oder UV) ergeben eine hohe optische Auflösung.

Auslöschung (ondulöse Auslöschung): Verhalten von anisotropen Materialien zwischen gekreuzten Polarisatoren. Liegen die Hauptachsen der Probenindikatrix parallel zu den Polarisatorrichtungen, so tritt Auslöschung auf. Liegen die Strukturelemente, welche die Anisotropie bestimmen makroskopisch in größeren Bereichen ungerichtet auf, kommt es zur fleckigen oder ondulösen Auslöschung.

Beilby-Schicht, s. Verformungsschicht

Beleuchtung: Die Regelung der Beleuchtungsstärke darf nicht durch die Mikroskopblenden oder die Lampenspannung erfolgen. Während die Blenden die mikroskopische Bildwiedergabe beeinflussen, wird mit der Lampenspannung gleichzeitig die spektrale Zusammensetzung des zur Beleuchtung verwendeten Lichtes beeinflusst.

Index

Symbole

$\lambda/4$ -Folien 56
 μ TA 89

A

Abbe, Ernst 32, 34
Abbildungskontrast 101, 105, 111
Abkühlspannungen 52
Abrasion 165f.
abrasiv 159
Abschattungseffekte 122
Absorption 3
ABS-Rezyklat 14
Additive 89, 95
Aluminium 13
Aminogruppe 102
Amplitudenkontrast 12
Analysator 47
Analyse von Fehlern 101
Analyse von Schäden 101
Andruckkraft 92
Anguss 72
anisotrop 45
Anisotropien 2
Anregung 103
Anregungslicht 102
Anregungspfad 103
Anschnitt 191
Anspritzbereich 59
Apertur 6
Aperturgrößen 7
Aramid 74

Argonlaser 103
Artefakte 120
ATR-IR 97
Ätzen 98
Ätzparameter 130
Aufladungen 121
Auflösung 15, 86, 88
Auflösungsvermögen 6f.
Aufnahmeflächen 122
Augerelektronen 115
Ausschwingdauer 97f.
Außenanwendungen 96
außerfokale Fluoreszenz 104
Auswerfermarkierungen 3
Autofluoreszenz 101, 110
Autofluoreszenzeffekt 103

B

Basecoat 14
Beleuchtungsanordnung 1
Beleuchtungsoptik 6
Beschichtungen 91
Beschleunigungsspannung 120
Bewitterung 96
Bindenaht 69
Bindenähte 2, 12
bioabbaubare Blasfolie 94
Bioabbaubarkeit 94
Biologie 32
Blasen 128, 175
Blasenbildung 156, 175
Brechungsindex 6

Brechungszahl 45
Bruch 130
Bruchformen 131
Butadien-Kautschuk 104f.

C

Cantilever 86
Chemikalienversprödung 157
Clearcoat 14
Crazes 3, 140

D

Deckglas 6
Degradationsphänomene 89
Delaminationen 2
Der Brechungsindex 45
Detektion 103
Detektionspfad 103
Detektor 1
Differenzial-Interferenz 10
DIK-Bild 28
DMA, TMA 97
Doppelberechnung 3
doppelbrechend 19
Doppelbrechung 19, 21, 29, 49
DSC 89, 97
duktiler Gewaltbruch 123, 135
duktiler Schwingungsbruch 149
Dunkelfeld 10, 16
Dunkelfeldbeleuchtung 16
Duroplasten 37

E

Ecken 3, 18
ecovio® 106
ecovio®-Blends 105
EDX 116, 124
EDX-Analyse 113, 126
Eigenspannungen 2, 21
Eindringtiefe 114
Einfallstellen 128
Einfrierverfahren 53

Einlegeteilen 3
E-Modul 95
energieelastisch – gummielastisch 53
Enthalpieerhöhung 89
Enthalpieerniedrigung 89
Entlüftung 80
Entmischungen 12
Entmischungsphänomene 89
EPDM 11, 72
EP-GF's 28
EP-Harze 52

F

Faltungen, Sphärolithe 49
Farbpigmente 14
Farbskalierung 95
Farbstoffe 105
Fasern 13
Fehlstellen 2, 89
Feldemissionsmikroskopie 117
FEM 119
Fernrohr-Modell 33
Fischaue 107
Fließlinien 12
Fluorescein 103
Fluoresceinisothiocyanat 102
Fluoreszenzfarbstoff 105
Fluoreszenzfarbstoffe 102
Fluoreszenzmikroskopie 102
Fluoreszenz-Mikroskop 30
Fluoreszenz-Weitfeldmikroskopie 103
Fluorol-Yellow 104
Fluorophoren 103
Fokuskegel 103
Fremdeinschlüsse 14, 18
Füllstoffe 70
Füllstoffverteilung 16

G

Gasabspaltung 179
gefüllte 1
Gewaltbrüche 135
Glas 6

Glasübergangstemperatur 21, 89
Goldüberzug 126
Granulat 82
Grauwerten 13
Greenough 32
Grenzfläche 95
Grenzschichten 91
Größenverteilungen 10
Grübchenbildung 169

H

H₂SO₄ 41
Halogenglühlampen 6
Halogenlampe 5
Hauptspannungsrichtungen 20
HCl 41
Heizrate 90, 92
Hellfeld 10, 74
Hellfeldmikroskop 10
hintere Brennebene 7
HNO₃ 41
Horatio S. Greenough 32
Hystereseffekte 91

I

Immersionsflüssigkeiten 46
Immersionsöl 6
Inhomogenitäten 70, 89
Intensität 12
Interferenz 6
Isochromaten 21, 45
Isoklinen 20, 40, 45
isotrop 45

K

Kalibrierung 92
kalte Pfropfen 2
Kanten 18
Kanteneffekt 122
Klebe- und Fügetechnik 91
KMnO₄ 41
KMnO₄-Lösung 98

Knäuel 37
Kohlenstoff 29
Kohlenstofffasern 195
Köhlersche-Beleuchtung 12
Kollektor 6
Kombinationsbild 110
Kompatibilität 88, 95
Kondensor 7, 13
Kondensor-Aperturblende 12
konfokale Fluoreszenzmikroskopie 102
konfokale Lochblende 104
Kontrast 3, 9, 15
Kontrastwirkung 122
Kriechbruch 149
Kristallinitätsunterschiede 19
Kunststoffanalyse 3

L

Lack 13, 15
Lamellen 3, 63, 159
Lampenspektrum 102
Langwellenpassfilter 106
Laserstrahl 87
laterale Auflösung 88
Leuchtfeldblende 13, 15
Leuchtfleck 6
Leuchtkegel 24
Lichtmenge 8
Lichtzeigermethode 89
Lochfraß 180
Lochkondensorbende 24
Lösungsmittel 89, 105, 175
Luftfeuchte 89
Lumogen Rot 105
Lunker 2, 12, 14, 128

M

Makrofotografie 3
Malteserkreuze 40, 65
Mapping 125
Materialverunreinigungen 14
Mehrfachverarbeitung 2
Mehrkomponentenspritzguss 91

mehrphasige Materialien 12
mehrphasige Systeme 1
Mehrschichtsysteme 91
Messbereiche 88
Messelektronik 92
Messgerät 92
Messpunkte 88
Messsonden 99
Messspitze 86
Migrationsphänomene 89
Mikrometerbereich 86
Mikroradiografie 183
Mischphasen 91
Molekülorientierungen 49
Molekülorientierungsrichtungen 20
Morphologie 89

N

Nachkristallisationsphänomene 89
Nachweisempfindlichkeit 102
Nahfeld 86
nanomechanische Eigenschaften 89
Nanometerbereich 86
Neigungswinkel 191
Neocarmin[®] 106f.
Niedervakuum-Technologie 119
numerische Apertur 7, 102

O

Oberflächen 89
Oberflächenscan 92
Oberflächenschäden 156
Objektiv 6
Okular 8
optische Schnitte 104
Orientierungen 2

P

PA 40, 106
PA 66 18, 72
PB 40

PBT 18, 40, 109
PC/ABS 11, 14
PE 40
PE-HD 42, 72
PE-LD 42
PES 106
PET 40
Phenolharzen 52
Photooxidation 108
Pigmente 2, 13f.
Pilzhyphen 180
plasmageätzt 122
Pol-Achsen 63
Polarisation 10
Polarisationsmikroskop 10
Polarisationsmikroskopie 19
Polarisator 13, 47
Polyamid 102, 106
Polyesterblend 105
Polyesterharz 52
Polyethylen 106
Polymergrundstruktur 158
Polyermischungen 1
POM 40, 72
Poren 128
Porro'sche-Umkehrprismen 33
PP 11, 40, 106
PPE 103
PPS 107
Präparat-Oberfläche 191
Probenentnahme 92
Probenkontaminationen 88
Probenvorbereitung 92
PTFE 29
PTFE-Pulver 15, 18
PUR 103, 110
PVDF 40
pvT 23

Q

Quadrantenphotodetektor 87

R

Radien 3
Rampen 138
Randzone 173
Rauigkeit 88f., 94
Rayleighsches 7
RE-Detektor 116
Reflexion 17
Reißbruch 136
REM 119
Resonanz-Frequenz 85
Rhodamin 103
Ringblende 24
Ringreflektor 16
Risse 12
Rissgrund 148
Robinsondetektors 121
Röntgenstrahlen 116
Röntgenstrahlung 124
Rotationssputtergerät 127
rotverschoben 104
Rückstreuelektronen 115
Ruß 13

S

Scanbereich 92
Scanner 87
Schadensablauf 3
Schmelzefilme 157
Schmelzperlen 156
Schmiermittel 89
Schubbruch 139
Schweißnaht 97f.
Schwindungen 54
Schwingstreifen 147
Schwingungsbrüche 123, 145
Schwingungsebene 48
Schwingungsinduzierter Kriechbruch
146
Schwingungsstreifen 157
SE-Detektor 116
Sehfeld 15
Sehfeldrand 12

Sekundärelektronen 115
selektive Anfärbung 105
Sensitivität 88
Sensor 87, 92
Silikone 88
Silizium 96
Spannungsoptische Konstante 50
Spannungsrisssbildung 155
Sperrfilter 30
Sphärolithe 97
Sphärolithformen 10
Sphärolithstrukturen 2f.
Spitzen 96
Spritzgussverarbeitung 108
Sprödbuchbahnen 144
spröde Gewaltbrüche 143
Sputtergerät 126
Sputterintervalle 184
Sputterschicht 121
Stereomikroskop 35
Stitching 88
Stokes-Verschiebung 101
Strahlengang 6
Strähnenmuster 134
Streuvermögen 17
strukturelle Merkmale 1
Strukturen 101
Styrol-Acrylnitril 105
Szintillator 116

T

Targetmaterial 126
Tastspitze 94
Temperaturkalibrierung 91
thermische Schädigungen 19
Thiolchemie 96
Tiefenschärfe 36, 115
Tip- und Sample-Scanning 88
TMA 89
Topographie 10, 196
topographische 86
transkristalline 97

U

übergeordnete Strukturen 1
UV-Bestrahlung 157

V

Verarbeitungseinflüsse 10
Verarbeitungsprozess 105
Verbindung 3
Verbrennungen 108
Vergrößerung 6, 8, 122
Verrundungen 156
Verschleiß 161
verstärkte Kunststoffe 1
Verunreinigungen 2
Vier-Punkt-Biegeversuch 50
Viertelwellenplättchen 40, 48

W

Wanddicken 3
Wärmeausdehnung 38

Wärmeeinflusszone 76
Wärmeleitung 38
WDX 116
Wechselwirkungskräfte 94
Weichmacher 95
Wellenlängenbereich 102
Welligkeit 89
werkzeugwandnahe Bereiche 38

X

XPS 97

Z

Zeilen 88
Zeiss Carl 34
Zeitstandsbrüche 141
Zipfel 142
Zipfelläuge 135
ZOOM-Systeme 34
zweistufige Abbildung 5
Zwischenoptik 8