

2.  
überarbeitete  
Auflage



Ernst Rieder

# Die Nichtmetalle

GRUNDWISSEN FÜR ZAHNTECHNIKER BAND 2



Ernst Rieder

**Die Nichtmetalle**  
Chemische und werkstoffkundliche  
Grundlagen

**2. überarbeitete Auflage**

Verlag Neuer Merkur GmbH

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

© 2018 Verlag Neuer Merkur GmbH  
Verlagsort: Postfach 12 53, DE-81241 Planegg

Alle Urheberrechte vorbehalten. Vervielfältigungen bedürfen der besonderen Genehmigung.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmung und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle in dieser Veröffentlichung enthaltenen Angaben, Ergebnisse usw. wurden vom Autor nach bestem Wissen erstellt und von ihm und dem Verlag mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Gleichwohl sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen. Daher erfolgen alle Angaben ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie des Verlages oder des Autors. Sie garantieren oder haften nicht für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten (Produkthaftungsausschluss). Im Text sind Warennamen, die patent- oder urheberrechtlich geschützt sind, nicht unbedingt als solche gekennzeichnet. Aus dem Fehlen eines besonderen Hinweises oder des Zeichens ® darf nicht geschlossen werden, es bestehe kein Warenschutz.

Ernst Rieder  
Grundwissen für Zahntechniker, Band 2  
Die Nichtmetalle  
2. überarbeitete Auflage 2022  
ISBN 978-3-95409-072-3

Konzeption, Umschlaggestaltung und Layout: Dagmar Papić  
Lektorat: Ulrich Bartel, Dr. Martina Kliem  
Druck: CPI Clausen & Boss GmbH, Leck

Der Autor freut sich über Korrekturen und Verbesserungsvorschläge:  
[ernst\\_rieder@t-online.de](mailto:ernst_rieder@t-online.de)

# Vorwort

Es ist ein gewisses Wagnis, in einer Zeit, in der die Zahntechnik in einem totalen Umbruch steht, ein Lehrbuch zur Werkstoffkunde zu verfassen. Auf der einen Seite haben herkömmliche Verfahren und damit die dafür erforderlichen Werkstoffe und Verarbeitungstechniken durchaus noch ihre Berechtigung. Sie werden angewendet, gelehrt, geübt und geprüft. Auf der anderen Seite ist dem Tempo, in dem neue Verfahren und Werkstoffe auf den Markt und in die Labors kommen, kaum mehr zu folgen. Und welche dieser Verfahren und Werkstoffe schon in relativ wenigen Jahren im zahn-technischen Labor eine Rolle spielen werden, ist schwer vorherzusagen. Ein weiteres Problem stellt schon immer die enorme Vielzahl der im zahn-technischen Bereich verwendeten Verfahren sowie der dafür erforderlichen Werk- und Hilfsstoffe dar. Und durch die digitale Technik sind die Verfahren und Werkstoffe nicht weniger geworden.

Was müssen Sie in dieser Situation als angehende Zahntechnikerin oder angehender Zahntechniker lernen, um in den nächsten Jahrzehnten diesen Veränderungen und Entwicklungen folgen zu können und in Ihrem Beruf erfolgreich zu sein? Was müssen Ihnen Ausbilderinnen und Ausbilder im Betrieb und Lehrerinnen und Lehrer in der Schule zeigen, damit Sie sich auch noch in zwanzig Jahren zwischen Materialien und Techniken zurechtfinden, die heute noch gar nicht bekannt sind?

Wenn ich mich auf unbekanntere zukünftige Herausforderungen vorbereiten will, kann ich nur von den Techniken ausgehen, die heute möglich sind. Dazu muss ich aber die Abläufe und Hintergründe meiner Arbeit verstehen. Nur wenn ich einen Vorgang begriffen habe, kann ich richtig damit umgehen und ihn gegebenenfalls weiterentwickeln. Gebrauchsanleitungen befolgen ist zwar wichtig, reicht aber nicht aus.

Mit diesem Buch will ich Sie dazu anregen, hinter die Kulissen zu schauen, zu fragen: Wie funktioniert das? Und warum funktioniert das? Das geht allerdings nicht ganz ohne ein paar chemische und physikalische Grundlagen. Die ersten Kapitel bieten daher die Möglichkeit, sich mit der chemischen Formelsprache und der Nomenklatur vertraut zu machen. Die Eigenschaften und das Verhalten der Werkstoffe lassen sich mit einigen wenigen chemischen Grundkenntnissen sehr viel besser erklären und verstehen. Schließlich sind die Eigenschaften der Stoffe durch ihren inneren Aufbau bestimmt.

In den weiteren Kapiteln, die sich mit den einzelnen Stoffgruppen befassen, werden die physikalischen und technischen Grundlagen erläutert, die für das Verständnis und den sachgemäßen Umgang mit diesen Werkstoffen

erforderlich sind. Dabei geht es nicht darum, Merksätze oder nicht begriffene Formeln auswendig zu lernen, sondern um den intelligenten Umgang mit hochentwickelten Materialien und die Fähigkeit, selbstständig für Sie neue Verfahren und Materialien zu entdecken und für Ihre Arbeit nutzbar zu machen. Es ist auch keineswegs daran gedacht, alle beschriebenen Verfahren als abfragbares Wissen zu lehren und zu lernen. Es geht vielmehr darum herauszufinden, was es alles gibt und was alles geht.

Viele Informationen und Details sind heute aus dem Internet abrufbar. Wikipedia steht als Lexikon ständig zur Verfügung. Firmen und Institutionen bieten ausführliche Informationen, Kataloge und wissenschaftliches Hintergrundmaterial an. Das Online-Lehrbuch Wikidental von Markus Lensing stellt neben umfangreichen Informationen Aufgabenstellungen und Übungen zur Verfügung. Und auch Bücher und Fachzeitschriften, die man in die Hand nehmen kann, liefern Beschreibungen und Erklärungen und informieren aktuell über neue Verfahren und Materialien. Nutzen Sie sie!

Dieses Buch wäre nicht zustande gekommen, wenn ich nicht immer wieder die Gelegenheit gehabt hätte, mit Kolleginnen und Kollegen, Freundinnen und Freunden aus dem Ausbildungsbereich und der Industrie in vielen interessanten Gesprächen Neues zu lernen und Fragen zu diskutieren. Und auch viele meiner Schülerinnen und Schüler in der Berufs- und Meisterschule haben mich mit ihren Fragen und kreativen Ideen angeregt, mir Modelle und Erklärungen einfallen zu lassen. Ihnen allen sei an dieser Stelle gedankt. Mein Dank gilt auch den Firmen, die mir zahlreiche Fotos zur Verfügung gestellt haben, um Sachverhalte zu veranschaulichen.

Bedanken möchte ich mich auch beim Verlag Neuer Merkur und insbesondere bei Herrn Ulrich Bartel, der mich bei der Entwicklung des neuen Formats unterstützt und geduldig über drei Jahre gewartet hat, bis ich die Arbeit abgeschlossen hatte. Großer Dank gilt auch Frau Dagmar Papić für das gelungene neue Layout. Schließlich möchte ich mich bei meiner Frau bedanken, die mich geduldig und liebevoll unterstützt hat, wenn ich viel Zeit mit Lektüre und Arbeit am Computer verbracht habe.

Man kann alles besser machen. Ideen und Vorschläge für die zweite Auflage sind jederzeit willkommen. Meine Mailadresse finden Sie im Impressum.

*Ernst Rieder*  
*Frankfurt am Main im Dezember 2017*

## Vorwort zur 2. Auflage

An Hochschulen und in der Industrie arbeiten weltweit tausende Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker jeglichen Geschlechts permanent daran, Techniken und Werkstoffe zu entwickeln und zu produzieren, die es ermöglichen, Patientinnen und Patienten mit funktionell und ästhetisch immer vollkommenerem Zahnersatz zu versorgen. Gleichzeitig soll die Herstellung mit immer rationelleren Methoden zu einem wirtschaftlichen Vorteil sowohl für das Labor als auch für die Patienten bzw. deren Kasse beitragen.

Die Folge: Auch Zahntechnikerinnen und Zahntechniker müssen sich fortlaufend mit der technischen Entwicklung beschäftigen, um alle Möglichkeiten für die rationelle Fertigung einer optimalen prothetischen oder orthopädischen Versorgung wahrnehmen zu können. Und die Ausbildung muss ebenso fortwährend an die Forschung angepasst werden.

So war es bereits nach vier Jahren an der Zeit, das vorliegende Lehrbuch zu überarbeiten und zu aktualisieren, da auf einigen Gebieten wie insbesondere der monolithischen Keramik und der additiven Fertigung eine Reihe wichtiger Neuigkeiten in die zahntechnischen Labors eingezogen ist. Für Gips hat sich die Normung verändert. Und selbst an ganz elementaren wissenschaftlichen Grundlagen der Werkstoffkunde ist die Entwicklung nicht spurlos vorübergegangen. So war die Referenz für die Einheit der Masse bis ins Jahr 2019 das berühmte Urkilogramm. Seit diesem Jahr wird die Masse nun mit der sogenannten Wattwaage auf elektrische Größen bezogen, was das Verständnis nicht unbedingt einfacher macht.

An einigen Stellen habe ich Erklärungen eingefügt, die sich aus Fragen meines Meisterschülerkurses ergeben haben. Ein paar mehr oder minder große Fehler konnten korrigiert werden. Änderungen gibt es damit in den Kapiteln 1, 7, 8, 9, 10, 12, 13 und 16. Durch all das hat der Umfang des Buches etwas zugenommen. Die aktuell verwendete Literatur wurde in einer gesonderten Literaturliste angehängt.

Frau Dagmar Papić gilt mein besonderer Dank. Sie hat sich der großen Mühe unterzogen, die zahlreichen Änderungen in den vorhandenen Text einzubauen. Ebenso danke ich Frau Dr. Martina Kliem für das sorgfältige Lektorat.

*Frankfurt am Main im Oktober 2022*

<b>VORWORT</b>	<b>4</b>
<b>KAPITEL 1</b>	
<b>WOMIT BESCHÄFTIGT SICH EIGENTLICH DIE CHEMIE?</b>	<b>19</b>
1.1 Stoffeigenschaften	19
1.1.1 Dichte	21
1.1.2 Aggregatzustand, Schmelz- und Siedetemperatur	24
1.1.2.1 Verhalten beim Abkühlen	24
1.1.2.2 Verhalten beim Erwärmen	25
1.1.2.3 Zwei Sonderfälle: Schmelz- und Siedeintervall und thermoplastisches Verhalten	28
1.1.2.3.1 Stoffe mit einem Schmelz- bzw. Siedeintervall	28
1.1.2.3.2 Thermoplastische Stoffe	29
1.1.3 Reine Stoffe und Gemische	30
1.1.4 Mechanische Eigenschaften	33
1.1.4.1 Festigkeit	33
1.1.4.2 Härte	34
1.1.4.2.1 Ritzhärte nach Mohs	35
1.1.4.2.2 Härtemessung nach Brinell	35
1.1.4.2.3 Härtemessung nach Vickers	35
1.1.4.2.4 Härtemessung nach Shore	35
1.1.4.3 Elastizität, Plastizität, Sprödigkeit	36
1.1.5 Gefüge fester Stoffe	36
1.1.5.1 Kristalline und amorphe Stoffe	36
1.1.5.2 Kompakte und poröse Stoffe	36
1.1.6 Fließverhalten von Flüssigkeiten	36
1.1.6.1 Viskosität	36
1.1.6.2 Strukturviskosität	37
1.1.7 Komprimierbarkeit von Gasen	37
1.1.8 Wärmeeigenschaften	38
1.1.8.1 Schmelz- und Verdampfungswärme	38
1.1.8.2 Wärmekapazität	38
1.1.8.3 Wärmeleitfähigkeit	39
1.1.8.4 Wärmeausdehnung	39
1.1.8.5 Expansion und Kontraktion beim Übergang zwischen den Aggregatzuständen	40
1.1.9 Elektrische und magnetische Eigenschaften	40
1.1.9.1 Elektrische Leitfähigkeit	40
1.1.9.2 Magnetische Eigenschaften	40
1.1.10 Optische Eigenschaften	41
1.1.10.1 Farbe	41

1.1.10.2	Farbsättigung	41
1.1.10.3	Transparenz	41
1.1.10.4	Brechkraft	41
1.1.10.5	Fluoreszenz	41
1.1.10.6	Glanz	41
1.1.11	Chemische Eigenschaften	42
1.1.11.1	Brennbarkeit	42
1.1.11.2	Explosivstoffe	42
1.1.11.3	Reaktionsfähigkeit	42
1.1.11.4	Verhalten gegenüber Wasser und anderen Lösemitteln	42
1.1.11.5	Saure und alkalische Stoffe	43
1.1.12	Wirkung auf den menschlichen Körper	43
1.1.12.1	Giftige und gesunde Stoffe	43
1.1.12.2	Wirkung auf die Haut	44
1.1.12.3	Nahrungsmittel	45
1.1.12.4	Berauschend wirkende Stoffe	45
1.1.12.5	Stoffe, die sensibilisierend oder allergisierend wirken	45
1.1.13	Wirkung auf die Umwelt	45
1.1.13.1	Schadstoffe	45
1.1.13.2	Recyclbare und verrottende Stoffe	46
1.1.14	Radioaktivität	46

## **KAPITEL 2**

<b>VON DER ALCHEMIE ZUR WISSENSCHAFTLICHEN CHEMIE</b>	<b>47</b>
2.1 Eine gewagte Hypothese: die Existenz von Elementen	47
2.2 Nachweis gasförmiger Elemente und der Satz von der Erhaltung der Masse	48
2.3 Die Entwicklung der Teilchenvorstellung	49
2.4 Der Bau der Atome	54

## **KAPITEL 3**

<b>DIE ELEMENTE UND DER BAU IHRER ATOME</b>	<b>59</b>
3.1 Die Elementsymbole	59
3.2 Die Elemente	59
3.2.1 Wasserstoff	59
3.2.2 Helium	60
3.2.3 Lithium	60
3.2.3.1 Isotope	61
3.2.4 Beryllium	62
3.2.5 Bor	62



3.2.6 Kohlenstoff	62
3.2.7 Stickstoff	63
3.2.8 Sauerstoff	63
3.2.9 Fluor	64
3.2.10 Neon	64
3.3 Das Periodensystem der Elemente	65
3.3.1 Das Periodensystem richtig lesen	66
3.3.1.1 Die Zahl der Valenzelektronen	67
3.3.1.2 Die Eigenschaften	68
3.3.1.3 Die Massezahl	69
<b>KAPITEL 4</b>	
<b>DIE CHEMISCHE BINDUNG</b>	<b>71</b>
4.1 Bindungsarten innerhalb von Elementen und Verbindungen	71
4.1.1 Elektronenpaarbindung	71
4.1.2 Ionenbindung	77
4.1.3 Polarisierte Elektronenpaarbindung	80
4.1.4 Metallbindung	81
4.2 Bindungsarten zwischen Molekülen und zwischen Edelgasatomen	83
4.2.1 Wasserstoffbrückenbindung	83
4.2.1.1 Die Bindung beim Wasser und der Einfluss auf die Eigenschaften	84
4.2.2 Van-der-Waals-Bindung	86
4.2.3 Kohäsion und Adhäsion	87
<b>KAPITEL 5</b>	
<b>DREI WICHTIGE STOFFGRUPPEN: SÄUREN, BASEN, SALZE</b>	<b>89</b>
5.1 Säuren	89
5.1.1 Schwefelsäure	89
5.1.2 Amidosulfonsäure	91
5.1.3 Flusssäure	91
5.1.4 Phosphorsäure	91
5.1.5 Salzsäure	92
5.1.6 Salpetersäure	92
5.1.7 Blausäure	92
5.1.8 Kohlensäure	92
5.1.9 Kieselsäure	93
5.1.10 Borsäure	93
5.2 Dissoziation	93

5.3 Basen	94
5.4 Der pH-Wert	95
5.5 Neutralisation	96
5.5.1 Saure und alkalische Salze	97
5.5.2 Bezeichnung von Salzen	98
5.6 Formeln richtig lesen und schreiben	98
<b>KAPITEL 6</b>	
<b>OXIDATION UND REDUKTION: ZWEI REAKTIONEN, DIE NICHT OHNE EINANDER AUSKOMMEN</b>	<b>101</b>
<b>KAPITEL 7</b>	
<b>GIPS, EIN SALZ, DAS ES IN SICH HAT</b>	<b>105</b>
7.1 Eigenschaften und Herkunft	105
7.2 Chemischer Aufbau und Verhalten beim Erhitzen	105
7.3 Die Gippsorten und ihre Eigenschaften	110
7.4 Vorgänge beim Abbinden	112
7.5 Vom richtigen Umgang mit Gips	115
7.6 Die Eigenschaften des Gipsmodells	118
7.7 Auflösen und Entsorgen von Gips	119
7.8 Hautschutz	119
7.9 Alternativen	120
<b>KAPITEL 8</b>	
<b>SILICIUMDIOXID, EIN VIELSEITIGER ROHSTOFF</b>	<b>121</b>
8.1 Eigenschaften und Herkunft	121
8.2 Gläser	125
8.2.1 Eigenschaften	125
8.2.2 Herstellung und chemische Zusammensetzung	127
8.3 Porzellan	128
8.4 Dentalkeramik	130
8.4.1 Keramikzähne	130
<b>KAPITEL 9</b>	
<b>METALLKERAMIK</b>	<b>135</b>
9.1 Das Geheimnis des Leucits	135
9.2 Der WAK – eine wichtige Größe und wie man damit rechnet	139
9.3 Die Rolle des WAK bei der Verblendung mit Keramik	141
9.4 Wie die Keramik auf dem Gerüstmetall haftet	144

9.5 Mechanische Eigenschaften von Metall und Keramik und wie man sie misst	147
9.6 Schichten und Brennen	153
9.7 Alternativen zur konventionellen Feldspatkeramik	156
9.7.1 Hydrothermale Gläser	157
9.7.2 Verblendkeramiken auf Basis hydrothermaler Gläser	158
9.7.3 Fluorapatit-Glaskeramik	159
9.7.4 Metallkeramik mit Oxyapatit	160

## KAPITEL 10

<b>VOLLKERAMIKEN</b>	<b>163</b>
10.1 Mechanische Eigenschaften von Keramiken	164
10.1.1 Vollkeramik unter Biegebelastung	164
10.1.2 Der Weibull-Modul	166
10.1.3 Die Risszähigkeit/Bruchzähigkeit	168
10.1.4 Bruchfestigkeit	169
10.2 Glaskeramiken	170
10.2.1 Was ist eigentlich eine Glaskeramik?	170
10.2.2 Möglichkeiten der Herstellung vollkeramischer Restaurationen aus Feldspatkeramik	171
10.2.2.1 Schichttechnik	171
10.2.2.2 Presstechnik	171
10.2.2.2.1. Digitale Presstechnologie	173
10.2.2.3 CAD/CAM-Technik	173
10.2.3 Lithiumdisilikat-Keramik	174
10.2.4 Zirkonoxidverstärktes Lithiumsilikat (ZLS)	176
10.3 Oxidkeramiken	178
10.3.1 Aluminiumoxid	178
10.3.2 Zirkonoxid	179
10.3.2.1 Voll- und teilstabilisiertes Zirkonoxid und die richtigen Bezeichnungen	181
10.3.2.2 Vom Pulver zum Rohling	182
10.3.2.3 Dichtsintern nach oder vor dem Schleifen	184
10.3.2.4 Nachbearbeiten von Zirkonoxidgerüsten	187
10.3.2.5 Einfärben von Zirkonoxid	188
10.3.2.6 Verblenden von Zirkonoxidgerüsten	189
10.3.2.7 Monolithische Zirkonoxidgerüste	191
10.3.2.8 Druckbares Zirkonoxid	195
10.3.3 Kombination aus Zirkoniumdioxid und Aluminiumoxid	195
10.3.4 Glaslote	196

10.3.5 Lithiumsilikat-Glasurspray	196
10.4 Hydrolysebeständigkeit	197
10.5 Sicherheit beim Umgang mit dentalkeramischen Materialien	198
<b>KAPITEL 11</b>	
<b>GRUNDLAGEN ORGANISCHE CHEMIE</b>	<b>199</b>
11.1 Die Ausnahmen	199
11.1.1 Die Oxide des Kohlenstoffs	199
11.1.2 Kohlensäure und Carbonate	200
11.1.3 Carbide	200
11.2 Organische Verbindungen	201
11.2.1 Kohlenwasserstoffe	201
11.2.1.1 Methan	201
11.2.1.1.1 Verbrennung von Methan	202
11.2.1.2 Gesättigte Kettenkohlenwasserstoffe, Paraffine, Alkane	204
11.2.1.3 Verzweigte Alkane, Isomerie	209
11.2.1.4 Ungesättigte Kettenkohlenwasserstoffe	211
11.2.1.5 Ringförmige Kettenkohlenwasserstoffe	213
11.2.1.6 Benzol	213
11.2.2 Verbindungen mit funktionellen Gruppen	215
11.2.2.1 Alkohole	216
11.2.2.2 Carbonsäuren	220
11.2.2.2.1 Salze von Carbonsäuren, Seifen, Tenside	223
11.2.2.3 Ester	226
11.2.2.4 Weitere Verbindungsarten	228
11.3 Siliciumorganische Verbindungen	229
<b>KAPITEL 12</b>	
<b>KUNSTSTOFFE</b>	<b>233</b>
12.1 Polyreaktionen	238
12.1.1 Polymerisation	239
12.1.2 Polyaddition und Polykondensation	240
12.2 Nomenklatur der Polymere	241
12.3 Polymerisationsgrad	241
12.4 Verarbeitungsverfahren	242
12.4.1 Thermoplastische Verfahren	242
12.4.1.1 Vakuum-Tiefzieh-/Druckform-Verfahren	242
12.4.1.2 Spritzgussverfahren	243
12.4.2 Das chemoplastische Verfahren	245

12.4.2.1	Ablauf der Radikalkettenpolymerisation	247
12.4.2.1.1	Radikalbildung	248
12.4.2.1.2	Startreaktion	248
12.4.2.1.3	Wachstumsreaktionen	249
12.4.2.1.4	Abbruchreaktionen	249
12.4.2.2	Drei Möglichkeiten, die Polymerisation in Gang zu setzen	250
12.4.2.2.1	Heißpolymerisation	251
12.4.2.2.2	Kaltpolymerisation, Autopolymerisation	251
12.4.2.2.3	Auslösen der Polymerisation durch Licht	253
12.4.2.3	MMA: das Monomer für den Prothesenkunststoff	255
12.4.2.4	Fertigstellungsmethoden nach dem chemoplastischen Verfahren	258
12.4.2.4.1	Allgemeine Vorbereitungsarbeiten	258
12.4.2.4.2	Vorwalltechnik	261
12.4.2.4.2.1	Die Funktion der Bedingungen im Drucktopf	261
12.4.2.4.3	Küvettentchnik	262
12.4.2.4.4	Injektionsverfahren	265
12.4.2.4.5	Gießverfahren	268
12.4.2.4.6	Streutechnik/Sprühtechnik	269
12.4.3	Kunstharze	269
12.4.3.1	Druckverfahren	271
12.4.3.1.1	Thermoplastische Druckverfahren	271
12.4.3.1.2	Stereolithografische Verfahren (SL, STL)	273
12.4.3.1.2.1	Low Force Stereolithography (LFS)	276
12.4.3.1.2.2	Digital Light Processing (DLP)	276
12.4.3.1.2.3	LCD-Drucker	277
12.4.3.1.2.4	CLIP-Drucker	278
12.4.3.1.3	Polyjet-/Multijetverfahren	279
12.5	Vernetzte Kunststoffe	280
12.6	Interpenetrierende Netzwerke	284
12.7	Komposite	285
12.7.1	Silanisierung	286
12.7.2	Hybridwerkstoffe für die Frästechnik	288
12.8	Polyaryletherketone	290
12.8.1	Kompositverblendungen auf Polyaryletherketonen	293
12.9	Weichbleibende Kunststoffe	295
12.9.1	Innere und äußere Weichmacher	295
12.9.2	Silikone als weichbleibende Kunststoffe	297
12.10	Hypoallergene Kunststoffe	298
12.11	Biokunststoffe	299

<b>KAPITEL 13</b>	
<b>VERBINDUNGSTECHNIKEN</b>	<b>303</b>
13.1 Formschluss	303
13.2 Kraftschluss	303
13.3 Stoffschluss	303
13.3.1 Schweißen	304
13.3.2 Löten	304
13.3.3 Kleben	305
13.3.3.1 Die Oberfläche des Werkstücks und ihre Behandlung	306
13.3.3.1.1 Der Metall-Kunststoff-Verbund	308
13.3.3.1.1.1 Silikatisierung – Silanisierung	308
13.3.3.1.1.2 Metall-/Zirkoniumdioxid-Kunststoff-Primer	309
13.3.3.1.2 Verbund zwischen Komposit und Kompositkleber	310
13.3.3.2 Die Geometrie der Klebeflächen	310
13.3.3.3 Klebstoffe	310
13.3.3.3.1 Schmelzkleber, Klebewachse	311
13.3.3.3.2 Wachskleber	312
13.3.3.3.3 Cyanoacrylat-Klebstoffe	312
13.3.3.3.4 Kompositkleber	313
13.3.4 Befestigung von Zahnersatz	314
13.3.4.1 Die Befestigungsmaterialien	315
13.3.4.1.1 Befestigungszemente	315
13.3.4.1.1.1 Phosphatzement	315
13.3.4.1.1.2 Glasionomezement	316
13.3.4.1.2 Kompositkleber	318
<b>KAPITEL 14</b>	
<b>WACHSE</b>	<b>321</b>
14.1 Wachsrohstoffe	321
14.2 Chemische Zusammensetzung der Wachse	321
14.3 Physikalische Eigenschaften der Wachse	323
14.3.1 Thermische Schrumpfung, Erstarrungsschrumpfung	323
14.3.2 Plasto-elastisches Verhalten	326
14.3.3 Optische Eigenschaften	329
14.3.4 Gusswachse beim Vorwärmen	329
14.4 „Wachsentspanner“	330
14.5 Dentalwachse	331
14.5.1 Gusswachse für die Kronen- und Brückentechnik	331
14.5.2 Gusswachse für die Modellgusstechnik	333
14.5.3 Basisplattenwachs, Modellierwachs, Aufstellwachs für die Prothetik	333

14.5.4	Spezialwachse	334
--------	---------------	-----

## KAPITEL 15

<b>ABFORM- UND DOUBLIERMATERIALIEN</b>		<b>337</b>
15.1	Materialeigenschaften	337
15.2	Die Abformmaterialien	342
15.2.1	Abformmassen auf hydrokolloider Sol-Gel-Basis	342
15.2.1.1	Hydrokolloide Abformmassen	343
15.2.1.2	Alginat	344
15.2.2	Abformmassen auf Kunststoffbasis	347
15.2.2.1	Silikone	347
15.2.2.1.1	Kondensationsvernetzende Silikone	348
15.2.2.1.2	Additionsvernetzende Silikone	349
15.2.2.2	Polyether	349
15.2.2.3	Polysulfide	351
15.2.3	Thermoplastische Abformmassen	351
15.2.3.1	Kompositionsabformmassen	352
15.2.3.2	Thermoplastische Abformmassen auf Kunststoffbasis	353
15.2.4	Zementähnliche Abformmassen	353
15.2.4.1	Abformgips	353
15.2.4.2	Zinkoxid-Eugenol-Pasten	354
15.3	Abformverfahren	354
15.3.1	Einzeitige, einphasige Abformung	355
15.3.2	Einzeitige, zweiphasige Abformung	355
15.3.3	Zweizeitige, zweiphasige Abformung	355
15.4	Die Doubliermaterialien	356
15.4.1	Doubliergel	357
15.4.2	Doubliersilikon	358

## KAPITEL 16

<b>EINBETTMASSEN</b>		<b>361</b>
16.1	Zusammensetzung der Einbettmassen	363
16.1.1	Formstoffe	363
16.1.1.1	Die Umwandlungsexpansion	364
16.1.2	Die Binder	365
16.1.2.1	Phosphatgebundene Einbettmassen	365
16.1.2.1.1	Die Einbettmasseflüssigkeit	366
16.1.2.1.2	Die Abbindeexpansion	368
16.1.2.2	Gipsgebundene Einbettmassen	371

16.1.2.3 Silikatgebundene Einbettmassen	372
16.2 Was beim Vorwärmen geschieht	373
16.2.1 Wie kommt die Wärme in die Muffel?	374
16.2.2 Die Wärmeübertragung in der Muffel und das Porenwasser	375
16.2.3 Chemische Reaktionen oberhalb 100 °C	377
16.2.3.1 Chemische Reaktionen beim Aufheizen phosphatgebundener Massen	377
16.2.3.2 Chemische Reaktionen beim Aufheizen gipsgebundener Massen	381
16.2.3.3 Chemische Reaktionen beim Aufheizen von Bindereinbettmassen	382
16.2.4 Die Gase im Ofen	382
16.2.5 Die Wanderung der Umwandlungszonen	383
16.3 Vorgänge beim Gießen	384
16.4 Vorgänge beim Abkühlen	385
16.5 Sicherheit beim Anmischen und Ausbetten	386
16.6 Oberflächenrauigkeit	387
16.7 Einbettmassen für besondere Zwecke	389
16.7.1 Feineinbettmassen	389
16.7.2 Löteinbettmassen	390
16.7.3 Einbettmassen für Presskeramik	390
16.7.4 Grafithaltige Einbettmassen	390

## **KAPITEL 17**

<b>SPANENDE VERFAHREN UND OBERFLÄCHENBEARBEITUNG</b>	<b>393</b>
17.1 Spanende Verfahren	393
17.1.1 Schleifen und Trennen	393
17.1.1.1 Werkstoff	394
17.1.1.2 Schleifmittel	395
17.1.1.2.1 Korund	397
17.1.1.2.2 Siliciumcarbid	397
17.1.1.2.3 Diamant	398
17.1.1.3 Körnung	399
17.1.1.4 Bindung	399
17.1.1.5 Belegungsdichte und Spanraum	402
17.1.1.6 Laufrichtung	403
17.1.1.7 Schleifwerkzeuge	403
17.1.1.7.1 Schleifscheiben – Schleifstifte – Trenn- und Separierscheiben	403
17.1.1.7.2 Sinterdiamanten	404



17.1.1.7.3 Galvanisch gebundene Diamantinstrumente und Diamantscheiben	404
17.1.1.7.4 Schleifbänder	405
17.1.2 Fräsen – Sägen – Bohren	405
17.1.2.1 Werkstoffe	405
17.1.2.2 Schneidstoffe	406
17.1.2.2.1 Werkzeugstahl	406
17.1.2.2.2 Schnellarbeitsstahl	406
17.1.2.2.3 Hartmetall	406
17.1.2.2.4 Beschichtetes Hartmetall	407
17.1.2.2.5 Oxidkeramik	407
17.1.2.3 Aufbau von Fräsern	408
17.1.2.3.1 Schneidengeometrie	408
17.1.2.3.2 Verzahnungsarten	409
17.1.2.4 Laufrichtung	411
17.1.2.5 Bohren und Sägen	412
17.1.3 Arbeitsparameter	414
17.1.3.1 Schnittgeschwindigkeit	414
17.1.3.2 Standzeit	415
17.1.3.3 Anpresskraft	416
17.1.3.4 Der Werkzeugschaft	417
17.1.3.5 Rundlauf	418
17.1.4 Strahlspanen	419
17.2 Oberflächenbearbeitung	421
17.2.1 Glanzstrahlen	421
17.2.2 Polieren	421
17.2.2.1 Poliermittel	422
17.2.3 Elektrolytisches Glänzen	423
17.3 Sicherheit	425
<b>LITERATUR</b>	<b>429</b>
<b>INDEX</b>	<b>449</b>

# Vollkeramiken

# Kapitel 10

Umbruch vermeiden: 10 mm in eine Zeile schreiben  
Vollkeramische Restaurationen decken einen großen Indikationsbereich ab. Angefangen von Inlays, Onlays, Veneers und Teilkronen bis hin zu umfangreichen Brückenkonstruktionen im Front- und Seitenzahnbereich kann nahezu jede Form von festsitzendem Zahnersatz vollkeramisch hergestellt werden. Je nach Belastung und ästhetischen Anforderungen kommen dafür verschiedene Materialien und Verarbeitungsverfahren infrage.

Die Materialien lassen sich in zwei Gruppen einteilen:  
**Silikatkeramiken** und **Oxidkeramiken**.

Zu den Silikatkeramiken zählen:

- Feldspatkeramik
- Lithiumdisilikat-Keramik
- Zirkonverstärkte Lithiummetasilikatglaskeramik

Als Oxidkeramiken werden verwendet:

- Aluminiumoxid
- Zirkoniumdioxid
- Cer-stabilisiertes Aluminiumoxid/Zirkonoxid-Nanokomposit (NANOZR)

Für die Formgebung kommen folgende Verfahren in Betracht:

- Schichten
- Pressen
- Fräsen bzw. Schleifen.

Die Tabelle auf der folgenden Seite gibt einen Überblick über die Vielzahl der verschiedenen Keramiken und der zugehörigen Verarbeitungsverfahren.

		Beispiele	Schichten	Pressen	Fräsen	Schleifen
<b>Glas-keramiken</b>	Feldspatkeramik	VITA VM9, Duceram Kiss	x			
	Lithiumdisilikat	e-max		x	x	x
	mit Zirkoniumdioxid verstärktes Lithiummetasilikat	Celtra, Suprinity				x
	Co-Kristallisation von Lithiumdisilikat und Lithiumalumosilikat	N!ce				x
<b>Oxidkeramik</b>	teilstabilisiertes Zirkoniumdioxid	Zenostar MO			x	x
	voll stabilisiertes Zirkoniumdioxid	in allen Multilayer Zirkonen			x	x
	Cer-stabilisiertes nanokristallverstärktes Zirkoniumoxid-Aluminiumoxid-Gemisch	NANOZR			x	x
gehipt	Zirkoniumdioxid				x	

Tab. 10.1 Übersicht Dentalkeramiken

## 10.1 Mechanische Eigenschaften von Keramiken

### 10.1.1 Vollkeramik unter Biegebelastung

Im Gegensatz zur Verblendkeramik, bei der Biegekräfte vom Metallgerüst aufgefangen werden, muss die Vollkeramik ohne Metallunterstützung auch Biegekräfte, wie sie nicht nur bei Brücken auftreten, allein auffangen können. Doch im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen haben keramische Werkstoffe zwar eine hohe Härte und

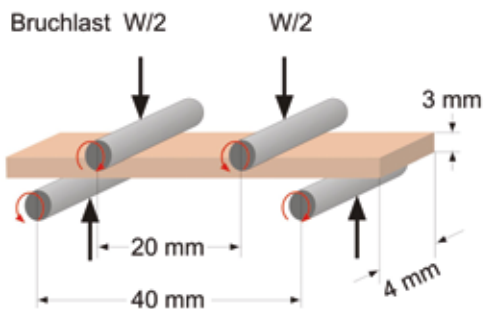


Abb. 10.1 Anordnung zur Durchführung des 4-Punkt-Biegeversuchs

Steifigkeit, sind aber gegen Zug- bzw. Biegekräfte ausgesprochen empfindlich. Das ist der Grund dafür, dass noch vor relativ kurzer Zeit gar nicht an vollkeramische Brückenkonstruktionen zu denken war.

Im Folgenden soll daher zunächst das Verhalten von keramischen Werkstoffen unter Biegebelastung untersucht werden. Die Biegefestigkeit wird mit dem

4-Punkt-Biegeversuch nach der europäischen Norm EN 843-1 bestimmt (Abb. 10.1).

Der Probekörper mit den Abmessungen  $3 \times 4 \times 45 \text{ mm}^3$  liegt wie beim 3-Punkt-Versuch auf zwei Rollen mit der Spannweite  $L = 40 \text{ mm}$  auf. Die Belastung (Bruchlast)  $W$  erfolgt über zwei weitere Rollen mit einem Abstand von  $l = 20 \text{ mm}$  von oben. Man erhält dadurch im Bereich zwischen den beiden oberen Rollen eine relativ gleichmäßige Verteilung der Zugspannung über den gesamten Probenquerschnitt (Abb. 10.2 und 10.3).

Der Druck auf die Probekörper wird bis zum Bruch gesteigert. Die Biegespannung  $\sigma_f$  wird aus der Maximalkraft beim Bruch und der Geometrie der Messanordnung berechnet.

Führt man solche Messungen mit mehreren genau gleich hergestellten Probekörpern durch, so stellt man fest, dass die für die Biegespannung gemessenen Werte von Probe zu Probe teilweise recht unterschiedlich sind. Der Bruch in dem keramischen Probekörper geht von der schwächsten Stelle aus. Dabei handelt es sich um herstellungsbedingte Fehlstellen sowohl im Inneren der Probekörper als auch an deren Oberfläche, die sich auch bei sorgfältigster Fabrikation nicht vermeiden lassen. Die Zahl und Größe dieser Fehlstellen ist entscheidend für die Streuung der gemessenen Biegespannungen. Eine interessante Folge dieses Zusammenhangs ist, dass die gemessene Biegespannung kleiner wird, wenn man größere Probekörper verwendet. Je größer der Probekörper, desto mehr Fehlstellen sind darin verteilt und umso größer ist die Wahrscheinlichkeit für einen Bruch.

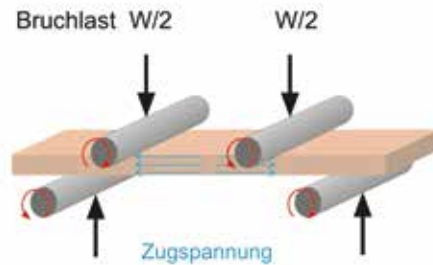


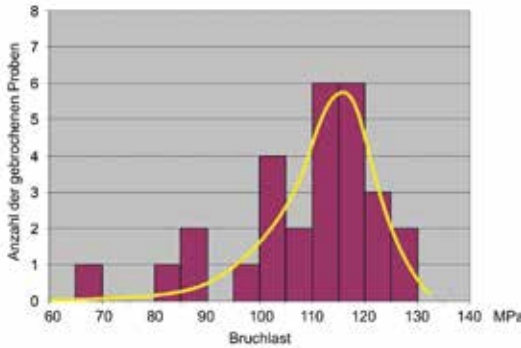
Abb. 10.2 Verteilung der Zugspannung im Probekörper beim 4-Punkt-Biegeversuch



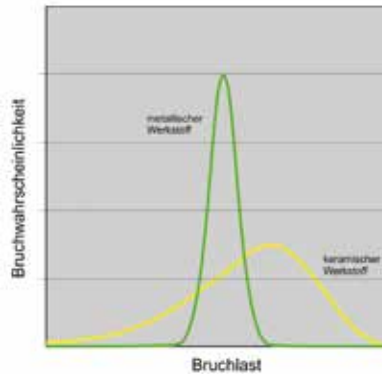
Abb. 10.3 So sieht der 4-Punkt-Biegeversuch in der Praxis aus (Foto: WZR ceramic solutions GmbH)

### 10.1.2 Der Weibull-Modul

Abb. 10.4 zeigt die Anzahl der bei einer Messung gebrochenen Proben in Abhängigkeit von der Bruchlast. Man sieht, dass einige der 28 gemessenen Proben schon bei sehr niedrigen Bruchlasten ausgefallen sind. Die meisten Proben haben bei einer Last zwischen 110 und 120



**Abb. 10.4** Ausgefallene Proben beim 4-Punkt-Biegeversuch in Abhängigkeit von der Bruchlast. Die gelbe Kurve stellt die errechnete Wahrscheinlichkeit eines Bruchs in Abhängigkeit von der Last dar.



**Abb. 10.5** Vergleich der Ausfallwahrscheinlichkeit eines metallischen Werkstoffs mit der eines keramischen Werkstoffs

Megapascal versagt. Bei 130 Megapascal sind sämtliche Proben gebrochen. Die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, dass eine Probe bei einer bestimmten Belastung bricht, lässt sich mathematisch berechnen und ist durch die gelbe Kurve dargestellt. Sie steigt zunächst relativ flach an, erreicht dann ein Maximum, um am Ende steil abzufallen. Die Formel für diese Berechnung hat der schwedische Mathematiker Waloddi Weibull entwickelt. Sie wird als Weibull-Verteilung bezeichnet.

Auch bei der Festigkeitsmessung von metallischen Werkstoffen, wie sie in Kapitel 9.3 beschrieben wurde, kann man bei mehrfacher Wiederholung der Messung mit gleichen Probekörpern materialbedingte Abweichungen bei der Zugfestigkeit feststellen. Diese Abweichungen sind aber viel geringer als die bei keramischen Werkstoffen festgestellten. In der Abbildung 10.5 sieht man, dass bei einem metallischen Werkstoff alle Probekörper bei einer sehr ähnlichen Bruchlast reißen.

Die Kurve der Ausfallwahrscheinlichkeiten ist außerdem symmetrisch. Es handelt sich um eine sogenannte Normalverteilung nach dem Göttinger Mathematiker und Physiker Carl Friedrich Gauß. Die Kurven besagen also, dass man sich bei einem Metallseil darauf verlassen kann, dass es eine Last, die nur relativ geringfügig unterhalb

der Bruchlast liegt, trägt, ohne zu reißen. Bei einer Platte aus einem keramischen Material hingegen muss gegebenenfalls ein wesentlich höherer Sicherheitsabstand von der maximalen Biegefestigkeit eingehalten werden, wenn man sichergehen will, dass sie nicht bricht.

In Abb. 10.6 sind die Proben aus Abb. 10.4, die bei einer bestimmten Last versagt haben, aufaddiert. Bei 130 MPa sind alle Proben gebrochen. Die gelbe Durchschnittskurve steigt nun leicht geschwungen von 0–100 % in Abhängigkeit einer Bruchlast von 65 bis 130 MPa an.

Mit dieser Kurve kann man allerdings wenig anfangen. Weibull hat nun die beiden Achsen des Koordinatensystems so umgerechnet, dass aus der Kurve eine Gerade wird (Abb. 10.7). Das gelingt durch eine sogenannte logarithmische Darstellung. Logarithmen sind Ex-

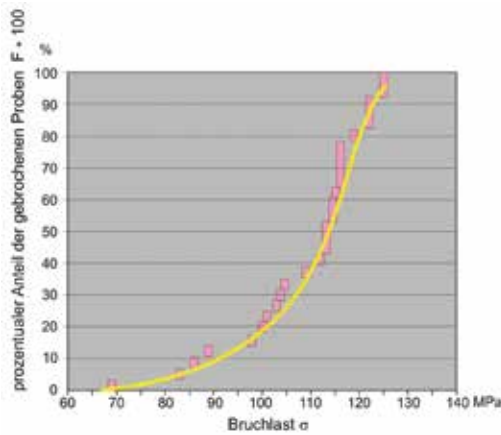


Abb. 10.6 Prozentualer Anteil der gebrochenen Proben in Abhängigkeit von der Bruchlast

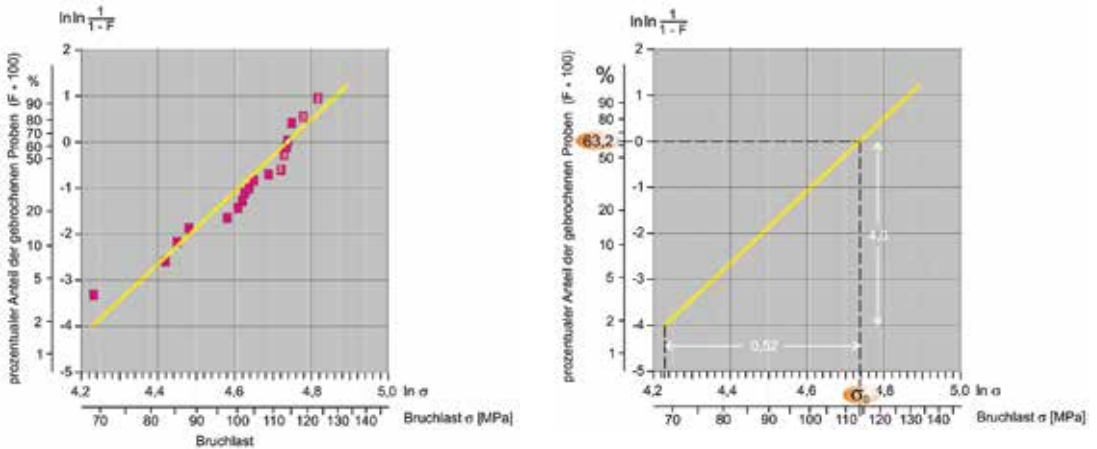


Abb. 10.7 (o. links) Bildung der Weibull-Geraden durch logarithmische Umformung der Bruchlast und des prozentualen Anteils der gebrochenen Proben. Die Zahlen in den roten Feldern bedeuten, dass bei dieser Bruchlast mehrere Proben gebrochen sind.

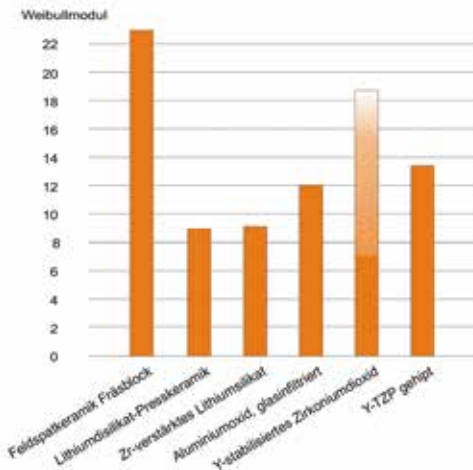
Abb. 10.8 (o. rechts) Ermittlung des Weibull-Moduls: Die Gerade steigt im Bereich von 0,52 Einheiten auf der waagerechten  $\ln$ -Achse um 4 Einheiten auf der senkrechten Achse an. Die Steigung ist dann  $m = 4/0,52 = 7,7$  Bei der Bruchlast  $\sigma_0$ , der sogenannten Weibull-Festigkeit, sind 63,2 % der Proben gebrochen.

ponenten zu einer bestimmten Basis, in diesem Falle 2,71. (2,71... ist die Basis des sogenannten natürlichen Logarithmus.) Wenn also bei der Bruchlast auf der Skala  $\ln 4,6$  steht, so ist die Bruchlast  $2,71^{4,6} = 100$  MPa.

Die Umrechnung der Prozentskala ist etwas komplizierter. Aber auch hier erhält man im (doppelt) logarithmischen Maßstab eine Skala, in der die Zahlen den gleichen Abstand haben. Nun kann man mit den neuen Koordinaten die Steigung der Geraden berechnen. Im vorliegenden Fall ist die Steigung  $m = 4/0,52 = 7,7$ . Diese Zahl wird als Weibull-Modul  $m$  bezeichnet (Abb. 10.8). Aus der Grafik kann man sehen, dass die Gerade umso steiler wird, je näher die Bruchlastwerte beieinanderliegen. Je größer also die Steigung der Geraden, das heißt, je größer der Weibull-Modul ist, desto zuverlässiger kann man sagen, dass das Material erst bei einer bestimmten Kraft bricht.

### 10.1.3 Die Risszähigkeit/Bruchzähigkeit

Selbst der kleinste Riss in einem Glas oder einer Keramik ist ein möglicher Ausgangspunkt für den Bruch eines Werkstücks. Bei Gläsern breitet sich ein Riss bei Biegebelastung im Allgemeinen ungehindert bis zum Bruch aus. Bei Glaskeramiken, die ja aus kristallinen



Bereichen bestehen, die durch eine Glasmatrix zusammengehalten werden, wird der Riss an den Kristallen umgeleitet oder gestoppt (Abb. 10.10 oben). Die Risszähigkeit nimmt dadurch erheblich zu, und zwar umso mehr, je feiner verteilt die kristallinen Bereiche sind. Der Riss kann sich auch verästeln. Die Risse werden dadurch immer kleiner, sodass sie schließlich nicht mehr weiterwachsen.

Infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnung können sich um Kristalle in einer Keramik auch Mikrorisse bilden (Abb. 10.10 unten). Trifft ein Riss auf einen solchen Kristall, so wird er auf die Mikrorisse verteilt und läuft sich somit tot.

**Abb. 10.9 Beispiele für Weibull-Module verschiedener Keramiktypen. Oberhalb eines Weibull-Moduls von 8 gilt eine Keramik als ausreichend zuverlässig. Die Werte verschiedener Fabrikate derselben Werkstoffgruppe können stark voneinander abweichen.**

Ein weiterer Mechanismus, der die Rissbildung verhindern kann, ist die sogenannte spannungsinduzierte Phasenumwandlung. Dabei wandeln sich durch die mechanische Spannung im Riss Kristalle in eine andere Modifikation mit einem größeren Volumen um. Der Riss wird dadurch geschlossen. Dieser Mechanismus ist typisch für Zirkoniumdioxid und wird dort genauer erläutert.

Die Messung der Risszähigkeit erfolgt mit dem oben beschriebenen 4-Punkt-Biegeversuch (Abb. 10.11). Um definierte Ausgangsbedingungen zu erzielen, wird in die Unterseite des Probekörpers mit einer Rasierklinge und Diamantpaste ein 300–400  $\mu\text{m}$  breiter Spalt eingesägt. Die Proben werden bis zum Bruch belastet. Die Auswertung der Messungen erfolgt nach der Weibull-Statistik. Die gemessene Größe wird als kritischer Spannungsintensitätsfaktor KIC bezeichnet. KIC wird in der wenig anschaulichen Einheit  $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$  angegeben. Sie ergibt sich dadurch, dass in die Formel für die Auswertung der Messungen neben der Bruchlast die Geometrie des Probekörpers und der Messanordnung eingeht.

Die Messung mit dem 4-Punkt-Biegeversuch (SEVNB-Methode) hat sich leider noch nicht überall als Standardverfahren durchgesetzt, sodass sowohl bei Bestimmung der Biegefestigkeit als auch der Risszähigkeit häufig verschiedene Messmethoden wie der 3-Punkt-Biegeversuch, der biaxiale Biegetest mit 3 oder 4 Kugeln oder die Ausbreitung von Rissen bei der Vickers-Härteprüfung (IF-Methode) eingesetzt werden. Die Messungen führen dann zu teilweise erheblich unterschiedlichen Ergebnissen!

Will man die technischen Daten für bestimmte Keramiken vergleichen (Abb. 10.12), so muss man in jedem Fall darauf achten, dass nur Werte herangezogen werden, die mit derselben Messanordnung bestimmt und mit denselben Gleichungen berechnet worden sind. Gegebenenfalls müssen die Daten vom Hersteller erfragt werden.

#### 10.1.4 Bruchfestigkeit

Die Bruchfestigkeit wird mit fertigen Werkstücken gemessen. Auf einem Stahlsockel wird zum Beispiel eine dreigliedrige Brücke hergestellt. Die Pressvorrichtung besteht aus einer Stahlkugel, die in das

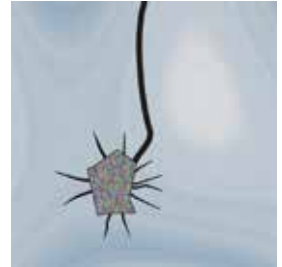
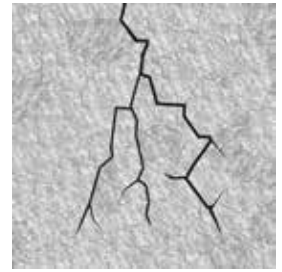


Abb. 10.10 Möglichkeiten, die Rissausbreitung zu unterbrechen: links (oben) durch Umleitung und Verzweigung, rechts (unten) durch Mikrorissbildung an eingelagerten Partikeln

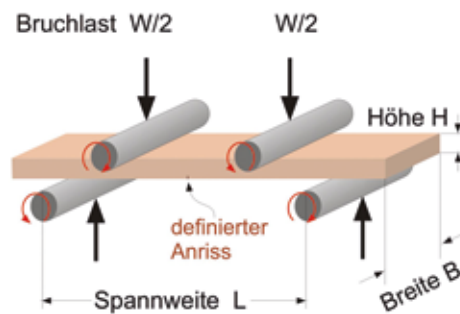
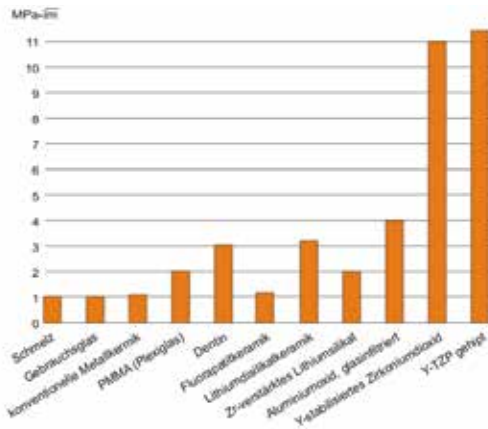
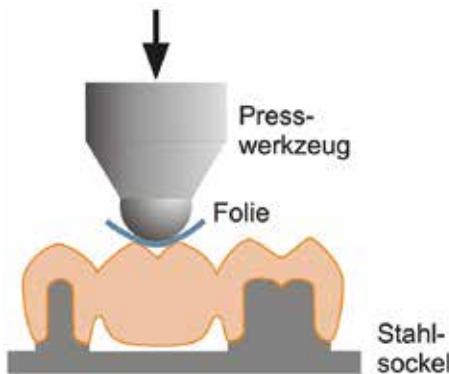


Abb. 10.11 Anordnung zur Messung der Risszähigkeit mit dem 4-Punkt-Biegeversuch





**Abb. 10.12** Beispiele für die Riss­zähigkeit verschiedener Stoffe. Je nach Messmethode werden in verschiedenen Veröffentlichungen Werte angegeben, die stark voneinander abweichen können.



Presswerkzeug eingespannt ist. Zwischen Kugel und Testbrücke wird eine Folie aus Metall oder Kunststoff eingelegt, die bewirkt, dass die Kraft gleichmäßig auf die Unterlage verteilt wird (Abb. 10.13).

Die Brücke wird bis zum Bruch belastet und die Kraft gemessen. Damit die Messung aussagekräftig ist, muss sie mehrfach wiederholt und mit einer Weibull-Statistik ausgewertet werden.

Die gemessene Kraft hängt hier nicht nur vom Werkstoff ab, sondern auch von der Gestaltung und den Abmessungen des Prüfkörpers. Entsprechend gelten die gemessenen Werte nur für diese Messanordnung und diesen Prüfkörper. Eine Aussage zur Qualität des Werkstoffs sowie ein Vergleich mit anderen Messergebnissen sind nicht möglich.

**Abb. 10.13** Schema einer Anordnung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit einer dreigliedrigen Brücke

## 10.2 Glaskeramiken

### 10.2.1 Was ist eigentlich eine Glaskeramik?

Glaskeramiken sind Werkstoffe, bei denen Kristalle in eine Glasmatrix eingelagert sind. Das besondere daran ist, dass bei der Herstellung des Werkstoffs aus einer homogenen Schmelze zunächst nur ein Glas entsteht, das Kristallisationskeime enthält. Erst durch Erhitzen über eine bestimmte Temperatur entstehen zu einem späteren Zeitpunkt aus diesen Keimen Kristalle. Je nach Art und Menge der Kristalle

ändert das Material dabei seine optischen Eigenschaften wie Farbe und Transluzenz sowie seine mechanischen Eigenschaften wie Härte, Elastizitätsmodul und Bruchfestigkeit. Aus Lithium-Aluminium-Silikat-Glaskeramik bestehen zum Beispiel die Ceran-Kochfelder, die sich durch hohe Transparenz, große Härte und einen extrem niedrigen WAK auszeichnen.

Bei Dentalkeramiken lässt sich die Bezeichnung Glaskeramik auf praktisch alle Silikatkeramiken anwenden, da sie alle irgendwann aus einer Silikatglasschmelze entstanden sind, die entweder schon beim Hersteller oder bei der Verarbeitung im Labor Kristalle bilden. Glaskeramik ist also ein Oberbegriff, der etwas über die Struktur des Materials aussagt

### ***10.2.2 Möglichkeiten der Herstellung vollkeramischer Restaurationen aus Feldspatkeramik***

#### *10.2.2.1 Schichttechnik*

Zahnersatz aus Vollkeramik ist keineswegs neu. Eine aus keramischem Material hergestellte Mantelkrone wurde 1895 erstmals von dem amerikanischen Zahnarzt Charles H. Land hergestellt. Diese Kronenart ist bis heute unter dem Namen Jacketkrone bekannt. Ihre Verbreitung in Deutschland begann 1925/26. Ästhetisch wirklich befriedigende Ergebnisse konnten aber erst mit der Erfindung des Vakuum-Brennverfahrens 1949 erzielt werden. Zu ihrer Herstellung wurde auf die Stumpfmodelle ein Hütchen aus einer dünnen Platinfolie aufgebracht, auf die zunächst eine Schicht einer festen Kernmasse aufgebracht wurde. Darauf wurden dann die verschiedenen Keramikmassen geschichtet. Nach dem Brennen wurde die Platinfolie aus der Krone entfernt. Die Jacketkronen wurden mit Zement befestigt. Jacketkronen werden heute in dieser Form nicht mehr gefertigt. Stattdessen erfolgt die Verarbeitung von Aufbrennkeramiken durch Schichten auf speziellen feuerfesten Einbettmassenstümpfen, auf denen die Arbeiten anschließend gebrannt werden. Auf diese Weise können Inlays, Onlays, Kronen und Veneers im Prinzip mit sämtlichen Keramiktypen hergestellt werden, die für die Schichttechnik geeignet sind. Platinfolie wird nur noch für Spezialfälle verwendet, etwa bei der Herstellung von Veneers.

#### *10.2.2.2 Presstechnik*

Seit Mitte der 1990er-Jahre werden Keramikrestaurationen im Pressverfahren hergestellt. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass die



*Abb. 10.14 Keramikpellets für die Presstechnik*



*Abb. 10.15 Die Modellation wird direkt auf die Muffelbasis aufgewachst*

Werkstücke eins zu eins in Wachs modelliert oder gefräst werden können, da die Rohlinge, die auch als Pellets (Abb. 10.14) oder Ingots bezeichnet werden, bereits gesintert sind und entsprechend nicht mehr schrumpfen. Den WAK der Keramikmasse gleicht die Einbettmasse aus.

Für die Herstellung wird die Modellation aus einem Wachs, das keinesfalls Trübungsmittel enthalten darf, auf die Muffelbasis aufgewachst (Abb. 10.15). Das Anstiften erfolgt in Fließrichtung an der dicksten Stelle, damit die zähflüssige Keramikmasse störungsfrei einfließen kann.

Mit einem speziellen Muffelformer wird die Modellation in eine phosphatgebundene Einbettmasse eingebettet. Wegen des hohen Drucks beim Pressen ist eine Wandstärke von mindestens 10 mm erforderlich. Der Zylinder auf der Muffelbasis hält oberhalb des Rohlings einen Kanal frei, in den nach dem Vorwärmen auf 700–800 °C ein oder zwei Pellets sowie der Pressstempel aus Aluminiumoxid kalt eingeführt werden.

Die heiße Muffel wird nun in den Pressofen (Abb. 10.16) gestellt und auf die Presstemperatur vorgewärmt, die je nach Keramik bei 900–1200 °C liegt. Nach einer Haltezeit, die benötigt wird, damit das Keramikmaterial vollständig durchschmelzen kann, wird der Pressvorgang ausgelöst. Der Pressvorgang dauert etwa 10 Minuten, da zum einen die geschmolzene Keramikmasse recht hochviskos ist und zum anderen die in der Muffel enthaltenen Luftreste im Gegensatz zum Metallguss nur durch die Poren der Einbettmasse entweichen können. Nach dem Abkühlen wird die Muffel auf der Höhe der Unterseite des Pressstempels mit einer großen Trennscheibe tief eingeschnitten und in zwei Teile getrennt. Danach wird das Pressstück mit Glanzstrahl-Perlen ausgebetet.

### 12.4.3.1 Druckverfahren

Der 3-D-Druck von Kunststoffen gehört zu den sogenannten generativen oder additiven Verfahren. Der Kunststoff kann dabei sowohl thermoplastisch als auch chemoplastisch verarbeitet werden.

Ein Verfahren zur Herstellung von Hilfsteilen oder gar Zahnerstatz muss allerdings eine Reihe Bedingungen erfüllen:

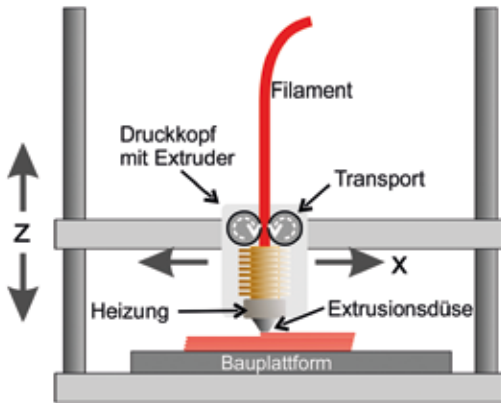
1. Der gedruckte Kunststoff muss für die jeweilige Verwendung geeignet und zugelassen sein. Für kurzzeitige Einsätze im Mund wie etwa für Bohrschablonen oder individuelle Löffel ist die biologische Verträglichkeit nach Klasse I der Medizinprodukte-Klassifizierung gewährleistet. Dauerhaft getragener Zahnersatz für permanente Versorgung hingegen muss die Anforderungen der Klasse II a erfüllen.
2. Ein für den 3D-Druck verwendbarer Kunststoff muss die für das jeweilige Druckverfahren erforderlichen Fließeigenschaften besitzen, die sich auch im Gebrauch nicht verändern dürfen.
3. Die Herstellung der Werkstücke erfolgt in Schichten. Die Dicke dieser Schichten muss so gering sein, dass eine Stufung auf der Oberfläche nicht stört. Je nach Verfahren und Anwendung können Schichtdicken bis unter 20  $\mu\text{m}$  erreicht werden.
4. Die Druckgeschwindigkeit muss ausreichend hoch sein, um wirtschaftlich arbeiten zu können.

#### 12.4.3.1.1. Thermoplastische Druckverfahren

Für die Herstellung von Bauteilen im thermoplastischen 3-D-Druck Verfahren kommen zwei Möglichkeiten in Frage: die Fused Filament Fabrication und das Laser-Sinter-Verfahren. Nur das erstere kann derzeit für die Herstellung zahntechnischer Produkte im Labor eingesetzt werden.

Bei der Fused Filament Fabrication, abgekürzt FFF, auch unter der Bezeichnung Fused Deposition Modeling (FDM) – deutsch: Schmelzschichtung – bekannt, liegt der Kunststoff in Form eines auf einer Spule aufgerollten Drahtes (Filament) vor. Im Prinzip kann fast jeder thermoplastische Kunststoff nach diesem Verfahren verarbeitet werden. Dabei sind allerdings aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Kunststoffe eine Reihe von Einstellmöglichkeiten des Druckers und deren Verwendung zu beachten.

Der Drucker (Abb. 12.37) besteht aus der Bauplattform und einer Mechanik, die den Druckkopf in drei Dimensionen bewegen kann.



*Abb. 12.37 Schematischer Aufbau eines 3-D-Druckers nach dem FFF-Verfahren*

In der X-Richtung wird der Druckkopf auf einer Schiene hin und her bewegt. In Y-Richtung wird entweder das ganze Gestell oder die Bauplattform nach vorne und hinten bewegt. In Z-Richtung wird die Schiene mit dem Druckkopf nach oben und unten bewegt. Bei manchen Konstruktionen wird die Bauplattform angehoben oder abgesenkt.

Der Druckkopf enthält einen kleinen Extruder, der aus dem Heizblock und der Transportmechanik besteht. Im unteren Teil des Heizblocks befindet sich eine Heizung, die den Kunststoff

auf die für die Extrusion erforderliche Temperatur erwärmt. Hier befindet sich auch ein Sensor für die elektronische Temperaturregelung. Als Pressstempel für den Extruder dient das Filament. Die Transportrollen bewegen das Filament elektronisch gesteuert nach unten, wenn aus der Extrusionsdüse Material austreten soll.

Um den erforderlichen Druck präzise aufbauen zu können und damit es steif bleibt, muss das Filament im oberen Teil des Extruders gekühlt werden. Der Heizblock enthält deswegen Kühlrippen. Bei manchen Druckern ist an den Druckkopf ein kleines Gebläse angebaut, um die Kühlung noch zu verstärken.

Der bis zum zähflüssigen Zustand geschmolzene Kunststoff wird zunächst auf die Bauplattform und dann Schicht für Schicht auf das entstehende Werkstück aufgetragen. Die Schichtstärke kann bis 20  $\mu\text{m}$  dünn eingestellt werden. Das bedeutet 50 Schichten für einen Millimeter Bauhöhe. Je nach Umfang und Füllichte des Bauteils sowie der verwendeten Düsenöffnung kann es zu ziemlich langen Bauzeiten kommen.

Die Temperatur, mit der die Kunststoffschmelze aus der Extruderdüse austritt, spielt für den Druck eine entscheidende Rolle. Der ausgetretene Kunststoff darf nicht zu heiß sein, denn er muss in den glasartig spröden Zustand abgekühlt sein, wenn die nächste Schicht aufgedruckt wird. Er darf aber auch nicht zu kalt sein, damit er homogen mit der darunterliegenden Schicht verschmilzt. Dieses Temperaturfenster ist von Kunststoff zu Kunststoff sehr unterschiedlich und muss genau eingehalten werden.

Eine wichtige Rolle für ein befriedigendes Druckergebnis spielt die Schrumpfung des gedruckten Kunststoffs im festen Zustand. Sie hängt zum einen vom verwendeten Material ab, zum anderen von der Temperaturdifferenz zwischen Erstarrung und Umgebungstemperatur.

Für manche Kunststoffe ist es daher erforderlich, auf einer geheizten Bauplattform und in einer abgeschlossenen Druckkammer bei gleichmäßiger Temperatur zu arbeiten, um thermische Spannungen im Bauteil möglichst gering zu halten. Auch ein fester Halt auf der Bauplattform ist zwingend erforderlich. Sie ist ja das Fundament für das Bauteil und die Grundlage für Formstabilität und Maßhaltigkeit. Es sind also eine ganze Reihe von Bedingungen einzuhalten, um einen Materialverzug – englisch: Warping – durch Temperaturunterschiede im Bauteil zu vermeiden. Besonders leicht gelingt das beim Drucken mit Polylactiden (PLA). Polylactide (s. S. 300) haben eine relativ geringe thermische Schrumpfung. Die Erweichung beginnt schon oberhalb 60 °C. Das hat zwar in der Verwendung den Nachteil, dass zum Beispiel Becher aus PLA für Heißgetränke nicht verwendet werden können. Der Vorteil beim Drucken besteht aber darin, dass sich Spannungen im Bauteil oberhalb dieser Temperatur rasch ausgleichen. Auch die Schmelztemperatur von ca. 200 °C liegt vergleichsweise niedrig, sodass es beim Drucken zu keinen allzu großen Temperaturdifferenzen kommt.

#### 12.4.3.1.2 Stereolithografische Verfahren (SL, STL)

Ein Gerät für die stereolithografische Herstellung von Werkstücken ist eigentlich nicht das, was man sich unter einem „Drucker“ vorstellt (Abb. 12.38). In einer Wanne befindet sich das lichtempfindliche Harz. Eine Arbeitsplattform kann darin in sehr genauen Schritten auf- und abwärts bewegt werden.

Sie wird zunächst in das Bad eingetaucht und knapp über die Flüssigkeitsoberfläche angehoben. Ein Wischer verteilt die verbliebene Flüssigkeit, sodass ein dünner Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche entsteht. Nun wird ein Laserstrahl mithilfe eines Spiegels, der in die beiden horizontalen Richtungen gekippt werden kann, auf die Stellen gelenkt, die ausgehärtet werden sollen. Beim Übergang zwischen getrennten Stellen schaltet der Laser aus. Der Laser sowie die Steuerung für den Spiegel und die Arbeitsplattform erhalten ihre Informationen von einem Computer.

Ist die erste Schicht auf diese Weise aufgebracht, taucht die Arbeitsplattform wieder kurz in das Harz ein, um die Oberfläche erneut zu benetzen. Der Wischer sorgt für eine definierte Schichtstärke und die Optik härtet die nächste Schicht aus. Auf diese Weise entsteht Schicht um Schicht das Bauteil.

Am Ende wird das Bauteil aus dem Bad gefahren. Nach dem Abtropfen wird das überschüssige Harz mit einem Lösemittel von

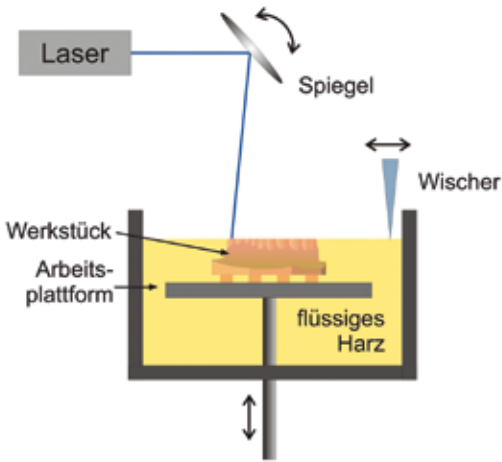


Abb. 12.38 Schematischer Aufbau eines Geräts für Stereolithografie

der Oberfläche beseitigt. Eventuell erforderliche Stützstrukturen werden manuell entfernt. In der Regel muss das Bauteil nun noch einmal mit Licht nachpolymerisiert werden, um seine endgültige Festigkeit zu erhalten. Der Nachteil dieser Anordnung liegt in der Harzversorgung.

Für die Füllung des Harzbehälters ist eine relativ große Menge Harz erforderlich. Das spielt bei großen Geräten, die ständig laufen und nur ein Material verarbeiten, keine Rolle. Für kleine Laborgeräte, die verschiedene Materialien in kleinen Mengen drucken sollen, hat man deshalb

das Gerät auf den Kopf gestellt (Abb. 12.39). Das Harz befindet sich in einem auswechselbaren Behälter mit einem Glasboden. Um zu vermeiden, dass das Glas mit dem polymerisierenden Kunststoff verklebt, ist der Glasboden beispielsweise mit einer Teflonfolie oder Silikonschicht abgedeckt. Die Arbeitsplattform wird von oben in die Wanne gesenkt. Die Belichtung erfolgt von unten mit einem UV-Laser, dessen Strahl durch ein Spiegelsystem über die Arbeitsfläche bewegt wird.

Die Ausrichtung der Bauteile auf der Arbeitsplattform kann für die Rauigkeit der Werkstückoberfläche eine Rolle spielen. Die unterschiedliche Form der Bauteile und die Möglichkeit, Stützstrukturen anzubringen, lassen allerdings allgemeingültige Aussagen nicht zu. Die senkrechte Anordnung hat den Vorteil, dass viele Bauteile gleichzeitig zum Beispiel über Nacht gedruckt werden können. Nach jeder Belichtung wird das Bauteil von der leicht gekippten Wanne abgezogen, damit Harz nachfließen kann. Die Arbeitsplattform wird um eine Schichtstärke nach oben gezogen. Die Wanne wird wieder horizontal ausgerichtet. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jeder Belichtung so lange, bis das Bauteil komplett fertiggestellt ist.

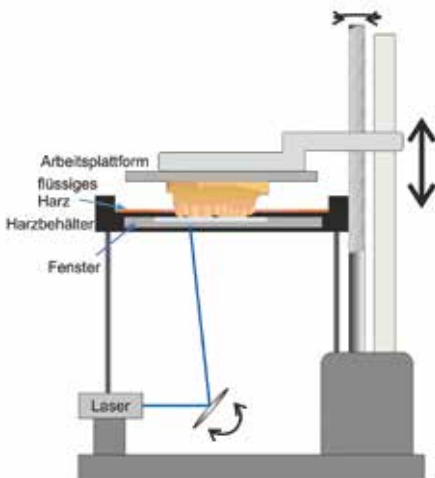


Abb. 12.39 Schematischer Aufbau eines SLA-Druckers: Stereolithografie „upside down“

Die fertigen Bauteile werden von der Bauplattform getrennt und mit einem Lösemittel wie Isopropylalkohol von anhängendem Harz gereinigt. Die Arbeitsbedingungen wie Zeit, Temperatur, Ultraschall müssen dabei genau eingehalten werden, da anderenfalls die Kunststoffoberfläche angegriffen wird.

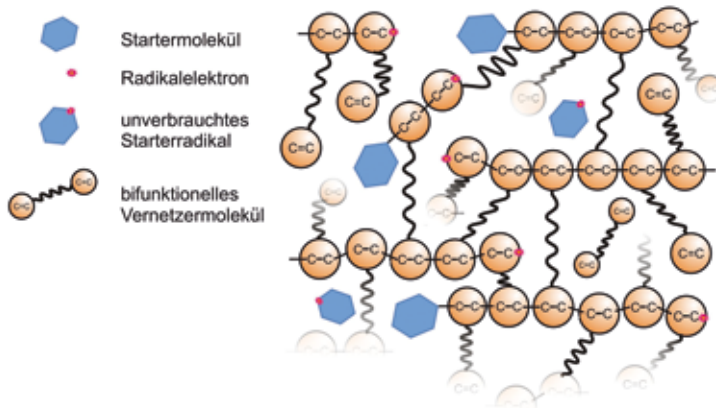


Abb. 12.40 Oberfläche von belichtetem Kunstharz

Danach wird mit einem geeigneten Lichthärtegerät nachgehärtet. Um die Bildung einer Dispersionsschicht zu vermeiden, geschieht dies zweckmäßig in einem Wasserbad, das den Luftsauerstoff abhält. Das Lichthärtegerät muss die für die Reaktion des Fotoinitiators erforderliche Wellenlänge erzeugen. Sie decken bei den meisten Geräten einen Bereich zwischen 300 und 550 nm ab. Die empfohlene Belichtungszeit soll nicht überschritten werden, da der Kunststoff sonst versprödet.

Das Kunstharz darf nur genau an den Stellen aushärten, an denen es von Licht getroffen wird. Das funktioniert mit Monomeren, deren Moleküle zwei oder mehr reaktionsfähige Doppelbindungen besitzen, sogenannten Vernetzern (s. dazu Kap. 12.5). Die Moleküle solcher Vernetzer sind relativ groß und unbeweglich. Hat eine der Doppelbindungen reagiert, so sind sie an ihrem Platz gefesselt und können sich nicht mehr weiter bewegen (Abb. 12.40). Die Wahrscheinlichkeit, einen Reaktionspartner für die zweite oder dritte Doppelbindung zu finden, nimmt ab. Damit der Druckvorgang schnell genug abläuft, muss die Harzflüssigkeit relativ viel Starter enthalten.

Im Kunststoff bleiben nach der Belichtung noch eine Menge Doppelbindungen, die nicht reagiert haben, sowie Kettenenden mit einem Radikalelektron und Starterradikale übrig. Das hat einen Vorteil: Wenn die nächste Schicht gedruckt wird, befinden sich an der darunterliegenden Oberfläche reichlich Doppelbindungen und Kettenenden, an die die Moleküle der neuen Schicht andocken können.

Die meisten Vernetzermomere sind ziemlich zähflüssig. Die Harzflüssigkeit muss deswegen mit dünnflüssigen Monomeren auf die richtige Viskosität eingestellt werden. Insgesamt ist so eine Harz-



flüssigkeit also ein recht komplexes Gemisch aus Monomeren und Reaktionschemikalien.

Sowohl die Belichtung als auch die Wannebewegung bei jedem Takt benötigen beim SLA-Verfahren eine Menge Mechanik und Zeit. Durch das Abziehen vom Fenster der Wanne werden zudem feine Strukturen an den Bauteilen stark belastet. Es wurden daher eine ganze Reihe von Verfahren entwickelt, um die damit verbundenen Probleme auszuschließen.