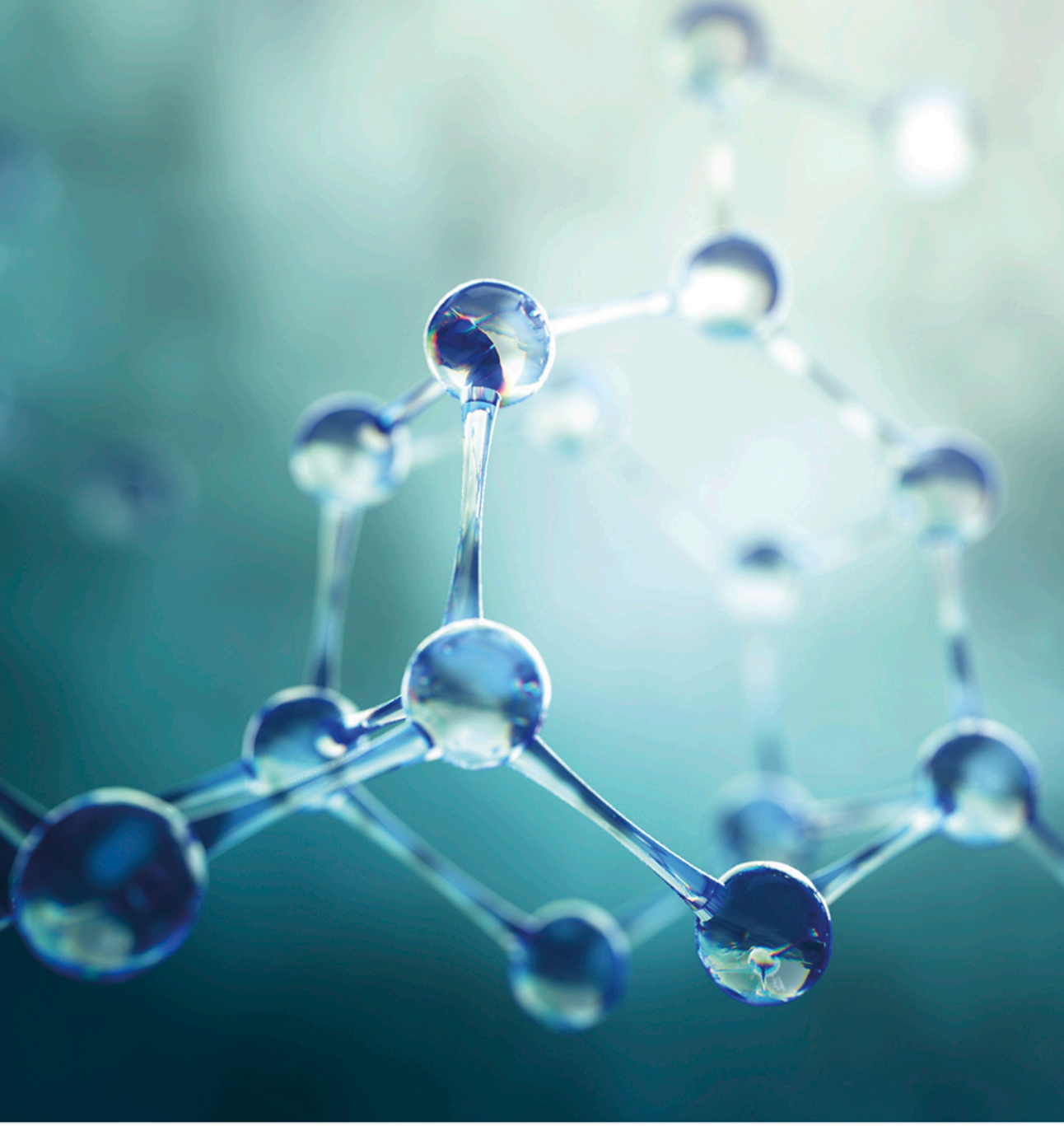


Ernst Rieder

Die Nichtmetalle

GRUNDWISSEN FÜR ZAHNTECHNIKER BAND 2

Inhalt

KAPITEL 1
WOMIT BESCHÄFTIGT SICH EIGENTLICH DIE CHEMIE? 19
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 26
1.1.2.3.1 Stoffe mit einem Schmelz- bzw. Siedeintervall 26
1.1.2.3.2 Thermoplastische Stoffe 28
1.1.3 Reine Stoffe und Gemische 29
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 Recycelbare und verrottende Stoffe 46
1.1.14 Radioaktivität 46

KAPITEL 2
VON DER ALCHEMIE ZUR WISSENSCHAFTLICHEN CHEMIE 47
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
DIE ELEMENTE UND DER BAU IHRER ATOME 59
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 64
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

KAPITEL 4
DIE CHEMISCHE BINDUNG 71
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

KAPITEL 5
DREI WICHTIGE STOFFGRUPPEN: SÄUREN, BASEN, SALZE 89
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

KAPITEL 6
OXIDATION UND REDUKTION: ZWEI REAKTIONEN, DIE NICHT OHNE EINANDER AUSKOMMEN 101

KAPITEL 7
GIPS, EIN SALZ, DAS ES IN SICH HAT 105
7.1 Eigenschaften und Herkunft 105
7.2 Chemischer Aufbau und Verhalten beim Erhitzen 105
7.3 Die Gipssorten 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 120
7.9 Alternativen 120

KAPITEL 8
SILICIUMDIOXID, EIN VIELSEITIGER ROHSTOFF 121
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

KAPITEL 9
METALLKERAMIK 135
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 156
9.7.2 Verblendkeramiken auf Basis hydrothermaler Gläser 158
9.7.3 Fluorapatit-Glaskeramik 158
9.7.4 Metallkeramik mit Oxyapatit 159

KAPITEL 10
VOLLKERAMIKEN 163
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
10.2.2.3 CAD/CAM-Technik 173
10.2.3 Lithiumdisilikat-Keramik 173
10.2.4 Zirkonoxidverstärktes Lithiumsilikat (ZLS) 176
10.3 Oxidkeramiken 178
10.3.1 Aluminiumoxid 178
10.3.2 Zirkoniumdioxid 179
10.3.2.1 Voll- und teilstabilisiertes Zirkoniumdioxid 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 Zirkoniumdioxidgerüsten 186
10.3.2.5 Einfärben von Zirkoniumdioxidgerüsten 187
10.3.2.6 Verblenden von Zirkoniumdioxidgerüsten 188
10.3.2.7 Monolithisches Zirkononiumdioxidgerüste 191
10.3.3 Kombination aus Zirkoniumdioxid und Aluminiumoxid 194
10.3.4 Zweiphasige Vollglaskeramik 195
10.3.5 Glaslote 195
10.3.6 Lithiumsilikat-Glasurspray 196

10.4 Hydrolysebeständigkeit 196
10.5 Sicherheit beim Umgang mit dentalkeramischen Materialien 197

KAPITEL 11
GRUNDLAGEN ORGANISCHE CHEMIE 199
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

KAPITEL 12
KUNSTSTOFFE 233
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 259
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 Küvettentechnik 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 Stereolithografie 271
12.4.3.1.2 Polyjet-/Multijetverfahren 274
12.5 Vernetzte Kunststoffe 274
12.6 Interpenetrierende Netzwerke 278
12.7 Komposite 279
12.7.1 Silanisierung 281
12.7.2 Hybridwerkstoffe für die Frästechnik 283
12.8 Polyaryletherketone 284
12.8.1 Kompositverblendungen auf Polyaryletherketonen 288
12.9 Weichbleibende Kunststoffe 289
12.9.1 Innere und äußere Weichmacher 290
12.9.2 Silikone als weichbleibende Kunststoffe 291
12.10 Hypoallergene Kunststoffe 293

KAPITEL 13
VERBINDUNGSTECHNIKEN 295
13.1 Formschluss 295
13.2 Kraftschluss 295
13.3 Stoffschluss 295
13.3.1 Schweißen 296

13.3.2 Löten 296
13.3.3 Kleben 297
13.3.3.1 Die Oberfläche des Werkstücks und ihre Behandlung 298
13.3.3.1.1 Der Metall-Kunststoff-Verbund 300
13.3.3.1.1.1 Silikatisierung – Silanisierung 300
13.3.3.1.1.2 Metall-/Zirkoniumdioxid-Kunststoff-Primer 300
13.3.3.1.2 Verbund zwischen Komposit und Kompositkleber 301
13.3.3.2 Die Geometrie der Klebeflächen 302
13.3.3.3 Klebstoffe 302
13.3.3.3.1 Schmelzkleber, Klebewachse 303
13.3.3.3.2 Wachskleber 303
13.3.3.3.3 Cyanoacrylat-Klebstoffe 304
13.3.3.3.4 Kompositkleber 305
13.3.4 Befestigung von Zahnersatz 305
13.3.4.1 Die Befestigungsmaterialien 306
13.3.4.1.1 Befestigungszemente 306
13.3.4.1.1.1 Phosphatzement 307
13.3.4.1.1.2 Glasionomerzement 308
13.3.4.1.2 Kompositkleber 310

KAPITEL 14
WACHSE 311
14.1 Wachsrohstoffe 311
14.2 Chemische Zusammensetzung der Wachse 311
14.3 Physikalische Eigenschaften der Wachse 313
14.3.1 Thermische Schrumpfung, Erstarrungsschrumpfung 313
14.3.2 Plasto-elastisches Verhalten 316
14.3.3 Optische Eigenschaften 319
14.3.4 Gusswachse beim Vorwärmen 319
14.4 „Wachsentspanner“ 320
14.5 Dentalwachse 321
14.5.1 Gusswachse für die Kronen- und Brückentechnik 321
14.5.2 Gusswachse für die Modellgusstechnik 323
14.5.3 Basisplattenwachs, Modellierwachs, Aufstellwachs für die Prothetik 323
14.5.4 Spezialwachse 324

KAPITEL 15
ABFORM- UND DOUBLIERMATERIALIEN 327
15.1 Materialeigenschaften 327
15.2 Die Abformmaterialien 332

15.2.1 Abformmassen auf hydrokolloider Sol-Gel-Basis 332
15.2.1.1 Hydrokolloide Abformmassen 333
15.2.1.2 Alginat 334
15.2.2 Abformmassen auf Kunststoffbasis 337
15.2.2.1 Silikone 337
15.2.2.1.1 Kondensationsvernetzende Silikone 338
15.2.2.1.2 Additionsvernetzende Silikone 339
15.2.2.2 Polyether 339
15.2.2.3 Polysulfide 341
15.2.3 Thermoplastische Abformmassen 341
15.2.3.1 Kompositionsabformmassen 342
15.2.3.2 Thermoplastische Abformmassen auf Kunststoffbasis 343
15.2.4 Zementähnliche Abformmassen 343
15.2.4.1 Abformgips 343
15.2.4.2 Zinkoxid-Eugenol-Pasten 344
15.3 Abformverfahren 344
15.3.1 Einzeitige, einphasige Abformung 345
15.3.2 Einzeitige, zweiphasige Abformung 345
15.3.3 Zweizeitige, zweiphasige Abformung 345
15.4 Die Doubliermaterialien 346
15.4.1 Doubliergel 347
15.4.2 Doubliersilikon 348

KAPITEL 16
EINBETTMASSEN 351
16.1 Zusammensetzung der Einbettmassen 353
16.1.1 Formstoffe 353
16.1.1.1 Die Umwandlungsexpansion 354
16.1.2 Die Binder 355
16.1.2.1 Phosphatgebundene Einbettmassen 355
16.1.2.1.1 Die Einbettmasseflüssigkeit 356
16.1.2.1.2 Die Abbindeexpansion 358
16.1.2.2 Gipsgebundene Einbettmassen 361
16.1.2.3 Silikatgebundene Einbettmassen 362
16.2 Was beim Vorwärmen geschieht 363
16.2.1 Wie kommt die Wärme in die Muffel? 364
16.2.2 Die Wärmeübertragung in der Muffel und das Porenwasser 365
16.2.3 Chemische Reaktionen oberhalb 100 °C 367
16.2.3.1 Chemische Reaktionen beim Aufheizen phosphatgebundener Massen 367

16.2.3.2 Chemische Reaktionen beim Aufheizen gipsgebundener Massen 370
16.2.3.3 Chemische Reaktionen beim Aufheizen von Bindereinbettmassen 371
16.2.4 Die Gase im Ofen 372
16.2.5 Die Wanderung der Umwandlungszonen 372
16.3 Vorgänge beim Abkühlen 373
16.4 Sicherheit beim Anmischen und Ausbetten 374
16.5 Oberflächenrauigkeit 375
16.6 Einbettmassen für besondere Zwecke 378
16.6.1 Feineinbettmassen 378
16.6.2 Löteinbettmassen 378
16.6.3 Einbettmassen für Presskeramik 379
16.6.4 Grafithaltige Einbettmassen 379

KAPITEL 17
SPANENDE VERFAHREN UND OBERFLÄCHENBEARBEITUNG 381
17.1 Spanende Verfahren 381
17.1.1 Schleifen und Trennen 381
17.1.1.1 Werkstoff 382
17.1.1.2 Schleifmittel 383
17.1.1.2.1 Korund 385
17.1.1.2.2 Siliciumcarbid 385
17.1.1.2.3 Diamant 386
17.1.1.3 Körnung 387
17.1.1.4 Bindung 387
17.1.1.5 Belegungsdichte und Spanraum 390
17.1.1.6 Laufrichtung 391
17.1.1.7 Schleifwerkzeuge 391
17.1.1.7.1 Schleifscheiben – Schleifstifte – Trenn- und Separierscheiben 391
17.1.1.7.2 Sinterdiamanten 392
17.1.1.7.3 Galvanisch gebundene Diamantinstrumente und Diamantscheiben 392
17.1.1.7.4 Schleifbänder 393
17.1.2 Fräsen – Sägen – Bohren 393
17.1.2.1 Werkstoffe 393
17.1.2.2 Schneidstoffe 394
17.1.2.2.2 Schnellarbeitsstahl 394
17.1.2.2.3 Hartmetall 394
17.1.2.2.4 Beschichtetes Hartmetall 395

17.1.2.2.5 Oxidkeramik 395
17.1.2.3 Aufbau von Fräsern 396
17.1.2.3.1 Schneidengeometrie 396
17.1.2.3.2 Verzahnungsarten 397
17.1.2.4 Laufrichtung 399
17.1.2.5 Bohren und Sägen 400
17.1.3 Arbeitsparameter 402
17.1.3.1 Schnittgeschwindigkeit 402
17.1.3.2 Standzeit 403
17.1.3.3 Anpresskraft 404
17.1.3.4 Der Werkzeugschaft 405
17.1.3.5 Rundlauf 406
17.1.4 Strahlspanen 407
17.2 Oberflächenbearbeitung 409
17.2.1 Glanzstrahlen 409
17.2.2 Polieren 409
17.2.2.1 Poliermittel 410
17.2.3 Elektrolytisches Glänzen 411
17.3 Laser-Milling 413
17.4 Sicherheit 414

LITERATUR 417

INDEX 435

Vollkeramiken

Kapitel 10

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
- ein- oder zweiphasige Vollglas-Verblendkeramik
- Lithiumdisilikat-Keramik
- Zirkonverstärkte Lithiumsilikat-Glaskeramik

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
Glas-keramiken	Feldspatkeramik	VITA VM9, Duceram Kiss	x	x		x
	Lithiumdisilikat	e-max		x	x	x
	mit Zirkoniumdioxid verstärktes Lithiumsilikat	Celtra, Suprinity				x
	Ein- oder zweiphasige Vollglas-Verblendkeramik	VITA VM7	x			
Oxidkeramik	Zirkoniumdioxid TZP	Cercon, VITA YZ HT, cara Zr			x	x
	Zirkoniumdioxid FSZ	Zenostar, inCoris TZI C				
	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 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.

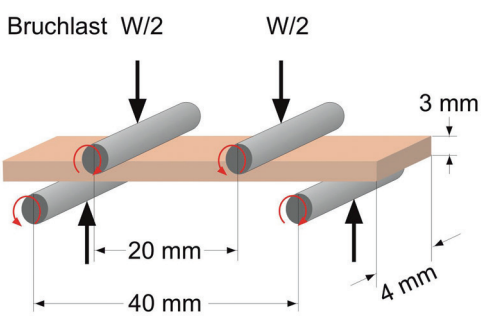


Abb. 10.1 Anordnung zur Durchführung des 4-Punkt-Biegeversuchs

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 x 4 x 45 mm^3 liegt wie beim 3-Punkt-Versuch auf zwei Rollen mit der Spannweite L = 40 mm auf. Die Belastung (Bruchlast) W erfolgt über zwei weitere Rollen mit einem Abstand von l = 20 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).

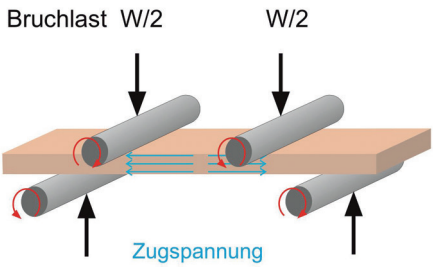


Abb. 10.2 Verteilung der Zugspannung im Probekörper beim 4-Punkt-Biegeversuch

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

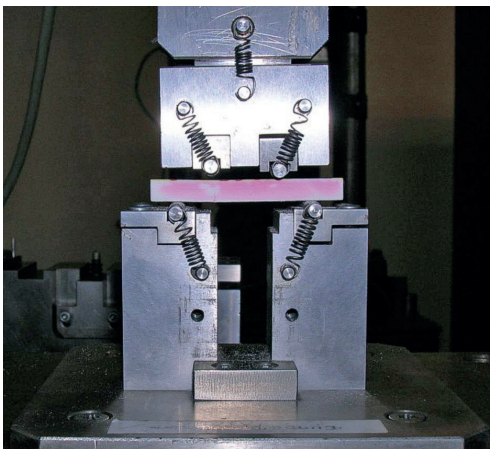


Abb. 10.3 So sieht der 4-Punkt-Biegeversuch in der Praxis aus *(Foto: WZR ceramic solutions GmbH)*

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.

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 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.

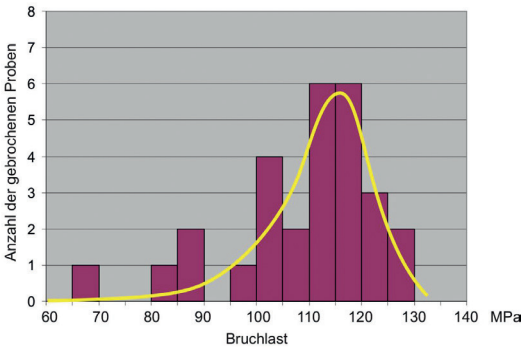


Abb. 10.4 Ausgefallene Proben beim 4-Punkt-Biegeversuch in Abhängigkeit von der Bruchlast. Die gelbe Kurve stellt die errechnete Wahrscheinlichkeit eines Bruchs in Abhängigkeit von der Last dar.

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.

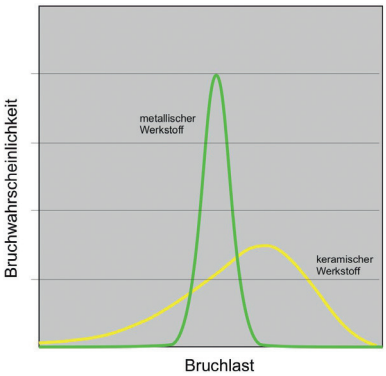


Abb. 10.5 Vergleich der Ausfallwahrscheinlichkeit eines metallischen Werkstoffs mit der eines keramischen Werkstoffs

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.

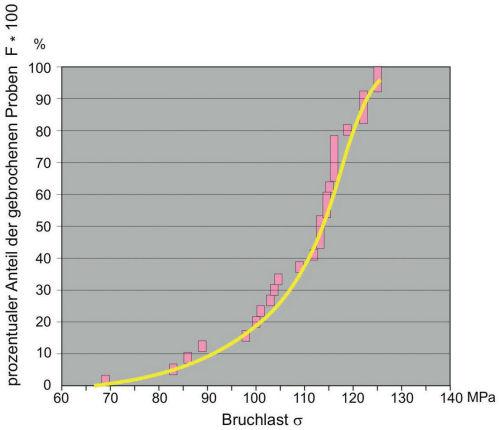
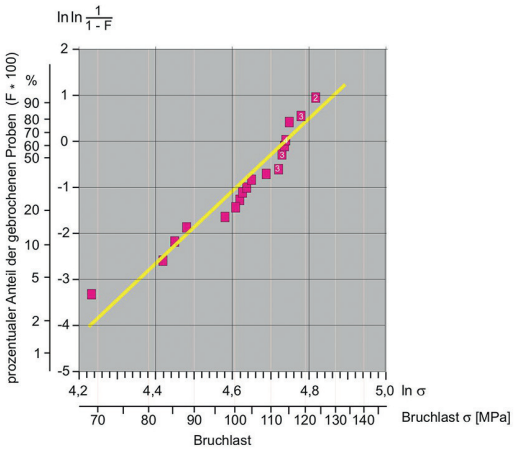


Abb. 10.6 Prozentualer Anteil der gebrochenen Proben in Abhängigkeit von der Bruchlast

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 soge-



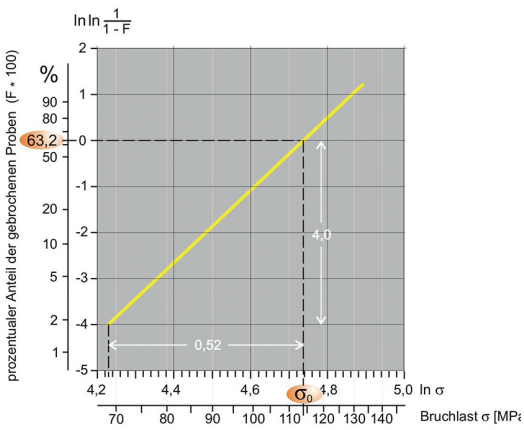


Abb. 10.7 (o. links) Bildung der Weibull-Geraden durch logarithmische Umformung der Bruchlast und des prozentualen Anteils der gebrochenen Proben. Die Zahlen in den roten Feldern bedeuten, dass bei dieser Bruchlast mehrere Proben gebrochen sind.

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 = 7,7Bei der Bruchlast σ_0, der sogenannten Weibull-Festigkeit, sind 63,2 % der Proben gebrochen.

nannte logarithmische Darstellung. Logarithmen sind Exponenten 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.

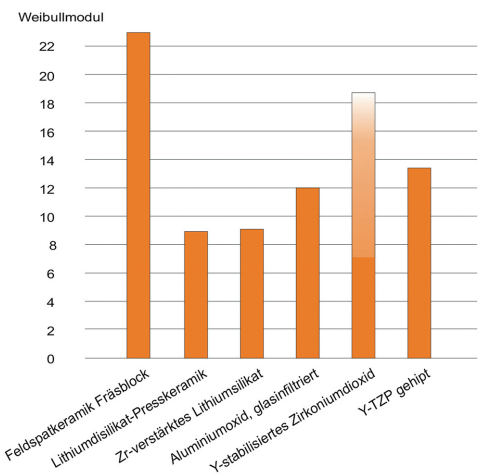


Abb. 10.9 Beispiele für Weibull-Module verschiedener Keramiktypen. Oberhalb eines Weibull-Moduls von 8 gilt eine Keramik als ausreichend zuverlässig. Die Werte verschiedener Fabrikate derselben Werkstoffgruppe können stark voneinander abweichen.

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 µm 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 MPa • √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 eingehen.

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.

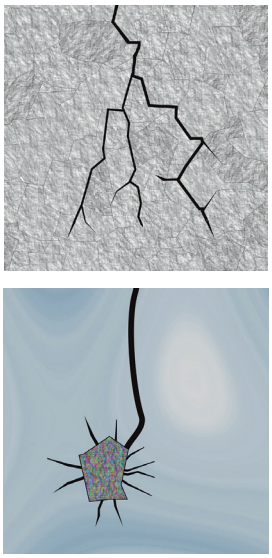


Abb. 10.10 Möglichkeiten, die Rissausbreitung zu unterbrechen: links (oben) durch Umleitung und Verzweigung, rechts (unten) durch Mikrorissbildung an eingelagerten Partikeln

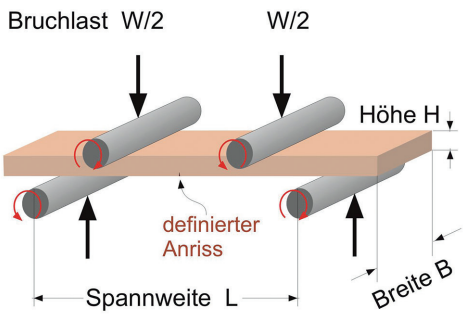


Abb. 10.11 Anordnung zur Messung der Risszähigkeit mit dem 4-Punkt-Biegeversuch

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

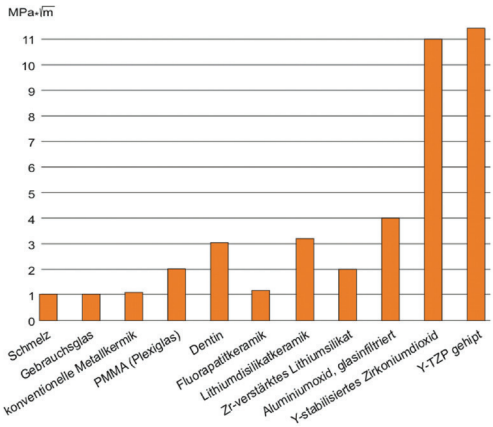


Abb. 10.12 Beispiele für die Risszähigkeit verschiedener Stoffe. Je nach Messmethode werden in verschiedenen Veröffentlichungen Werte angegeben, die stark voneinander abweichen können.

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.

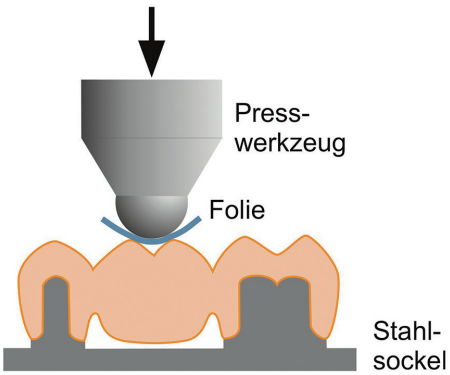


Abb. 10.13 Schema einer Anordnung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit einer dreigliedrigen Brücke

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 dünne Platinfolie aufgebracht, auf die zunächst eine Schicht einer festen Kernmasse aufgebrannt 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 Einbettmassestümpfen, 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 90er-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 den Keramikrohling 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 einen geeigneten Rohling aufgewachst (Abb. 10.15) und mit einem speziellen Muffelformer in eine phosphatgebundene Einbettmasse eingebettet. Der zugehörige Trichterformer hält oberhalb des Rohlings einen Kanal frei, in den nach dem Vorwärmen ein oder zwei Pellets sowie der mehrfach verwendbare Pressstempel aus Aluminiumoxid (Aluminiumoxid hat einen Schmelzpunkt von 2.050 °C.) oder ein Einmalstempel aus Einbettmasse eingeführt werden.

Die Muffel wird nun in den Pressofen (Abb 10.16) gestellt und auf die Presstemperatur vorgewärmt, die je nach Keramik bei 900–1.200 °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 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 Glanzstrahlperlen ausgebettet.