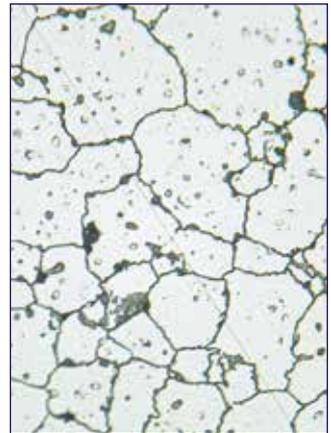


Roland Strietzel

# Werkstoffkunde der zahntechnischen Materialien

# 1



Verlag Neuer Merkur

<b>Vorwort des Autors</b>	3
<b>Verwendete Abkürzungen</b>	4
<b>1. Einführung</b>	15
1.1 Die Zähne und das Gebiss	17
1.2 Arten von Zahnersatz	21
1.3 Im Mund herrschende Einflüsse auf die Werkstoffe	30
1.4 Werkstoffe in der Zahntechnik	30
1.5 Herstellung von Zahnersatz	31
1.6 Vergleich von konventioneller und CAD/CAM-Produktion	32
Literatur	34
<b>2. Physikalisches Verhalten</b>	37
2.1 Darstellung physikalischer Grössen	39
2.2 Kurze Einführung in die Statistik	43
2.2.1 Beschreibende Statistik	46
2.2.2 Vergleichende Statistik	48
2.3 Notwendigkeit von in-vitro-Prüfungen	49
2.4 Auf Werkstoffe wirkende Kräfte	51
2.4.1 Kaukräfte	53
2.4.1.1 Verformung	54
Elastische und plastische Verformung	55
2.4.1.2 Einfluss der Struktur der Materialien auf die Festigkeit	56
2.4.2 Festigkeit	57
2.5 Mechanische Prüfverfahren	58
2.5.1 Zugversuch	58
2.5.1.1 Elastizitätsmodul	61
2.5.1.2 0,2-%-Dehngrenze	63
2.5.1.3 Zugfestigkeit	65
2.5.1.4 Bruchdehnung	66
Kenngrößen aus dem Zugversuch	67
2.5.2 Druckversuch	67
2.5.2.1 Druckversuch für Modellwerkstoffe und Einbettmassen	68
2.5.2.2 Druckverformungsrest	68
2.5.3 Biegeversuche	70
2.5.3.1 Vergleichbarkeit der mechanischen Eigenschaften von Keramiken und Metallen	71

## 6 Werkstoffkunde der zahntechnischen Materialien

2.5.3.2	Drei- und Vierpunkt-Biegeversuche	71
2.5.3.3	Statische und zyklische Biegeversuche	73
2.5.3.4	Künstlicher Alterungsprozess und mechanische Eigenschaften	73
	Belastung durch Licht	73
	Thermische Belastung	74
	Chemische Belastung	74
2.5.3.5	Kenngößen aus dem Biegeversuch	76
	Risswachstum	76
	Biegefestigkeit	79
	Risszähigkeit	79
	Weibull-Modul	80
2.5.4	Torsionsversuch	81
2.5.5	Abscherversuch	81
2.6	Verschleiss	82
2.7	Konzentration	82
2.8	Dichte	83
2.9	Temperatur	84
2.9.1	Wärmeenergie und Wärmeleitfähigkeit	86
2.9.1.1	Glühfarben	88
2.9.2	Schmelzpunkt, Schmelzintervall und Erweichungstemperatur	89
2.9.2.1	Schmelzpunkt	89
2.9.2.2	Schmelzintervall	90
2.9.2.3	Erweichungstemperatur von Gläsern	91
2.9.2.4	Erweichungstemperatur von Polymeren	92
2.9.2.5	Schmelzbereich	93
2.9.2.6	Azeotrope Gemische	93
2.9.3	Zustandsdiagramm	93
2.9.3.1	Mischbare Systeme	94
	Aushärten, Weichglühen und Spannungsarmglühen	96
2.9.3.2	Nicht mischbare Systeme	97
2.9.4	Kongruentes und inkongruentes Schmelzverhalten	100
2.9.5	Erstarren von Schmelzen	101
2.9.5.1	Gerichtete Erstarrung	102
2.9.5.2	Globulare und dendritische Kornformen	103
2.9.6	Hitzebeständigkeit und Warmfestigkeit	104
2.9.7	Bildsamkeit und Standfestigkeit	105
2.10	Wärmeausdehnungskoeffizient	105
2.11	Licht	110

2.11.1	LASER	112
2.11.2	Farbe	113
2.11.2.1	Farbbestimmung bei natürlichen und künstlichen Zähnen	113
2.11.2.2	Einflüsse auf die Farbbestimmung	114
2.11.3	Wechselwirkung von Licht mit Materie	116
2.11.3.1	Reflexion	117
2.11.3.2	Absorption	117
2.11.3.3	Brechung	117
2.11.3.4	Transparenz/Opazität	117
2.11.3.5	Lumineszenz	118
	Phosphoreszenz	118
	Fluoreszenz	118
2.11.3.6	Opaleszenz	118
2.11.3.7	Optische Aktivität	118
2.12	Oberflächeneigenschaften	119
2.12.1	Rauheit	119
2.12.2	Härte	121
2.12.2.1	Bestimmung der Härte	122
2.12.2.2	Härteprüfung in der zahnärztlichen Werkstoffkunde	124
	Verfahren nach BRINELL	124
	Verfahren nach ROCKWELL	124
	Verfahren nach VICKERS	125
	Verfahren nach KNOOP	125
	Vergleichbarkeit der verschiedenen Verfahren	126
	Verfahren nach SHORE	126
2.12.3	Spanbarkeit	127
2.12.4	Benetzbarkeit von Oberflächen	128
2.13	Rheologie	130
2.13.1	Thixotropie	131
2.14	Formfüllung	131
2.15	Verbundprüfung	132
2.15.1	Prüfverfahren	134
2.15.1.1	Abschlagversuch	134
2.15.1.2	Biegeversuch	135
2.15.1.3	Zugversuch	137
2.15.1.4	Abscherversuch	139
2.15.1.5	Temperaturwechsellast-Versuch	142
2.15.1.6	Kausimulator	144
2.15.1.7	Klinische Untersuchung	144
2.16	Dosieren und Mischen	145
2.17	Lagerung und Haltbarkeit	146

## 8 Werkstoffkunde der zahntechnischen Materialien

2.17.1	Lagerbedingungen	147
2.17.2	Haltbarkeit	148
2.18	Passung	149
2.18.1	Prüfung der Passung	149
2.18.1.1	Werkstoffkundlich (in vitro)	149
2.18.1.2	Zahntechnisch (extraoral)	150
2.18.1.3	Zahnmedizinisch (intraoral)	150
	Literatur	151
<b>3.</b>	<b>Chemisches Verhalten</b>	<b>159</b>
3.1	Aufbau der Materie	161
3.1.1	Aggregatzustände	161
3.1.1.1	Rauch, Staub, Dampf	162
3.1.1.2	Sole und Gele	163
3.1.2	Atome, Moleküle, Ionen und Radikale	164
3.1.3	Chemische Bindungen	168
3.1.3.1	Kovalente Bindung	168
3.1.3.2	Ionenbindung	168
	Dissoziation	169
	Säuren	169
	pH-Wert	171
	Basen und Laugen	173
	Salze	173
	Puffersysteme	174
3.1.3.3	Metallische Bindung	174
3.1.4	Zwischenmolekulare Bindungen (VAN-DER-WAALS-Kräfte)	175
3.1.4.1	Bedeutung	176
3.1.5	Kohäsion und Adhäsion	176
3.1.6	Radioaktivität	177
3.1.6.1	Strahlungsarten	179
	Radioaktive Dentallegierungen	180
	Radioaktive Dentalkeramiken	181
	Radiaktive Dentalkunststoffe	181
3.1.7	Magnetismus	182
3.1.7.1	MRT-Beeinflussung	183
3.2	Allgemeine Bestandteile von Dentalwerkstoffen	184
3.2.1	Angabe der Zusammensetzung	184
3.2.2	Dentallegierungen	184
3.2.3	Dentalkunststoffe	185
3.2.4	Dentalkeramiken	186
3.2.5	Weitere Dentalmaterialien	186

3.2.6	Verunreinigungen	187
3.3	Anorganische Werkstoffe	187
3.3.1	Metalle	187
3.3.2	Nichtmetalle	188
3.3.2.1	Kohlenstoff	188
3.3.2.2	Silizium	188
3.3.2.3	Bor	189
3.3.2.4	Stickstoff	189
3.3.2.5	Edelgase	189
3.4	Organische Werkstoffe	190
3.4.1	Alkane, Alkene und Alkine	190
3.4.2	Funktionelle Gruppen	193
3.4.3	Alkohole	194
3.4.4	Ether	195
3.4.5	Aldehyde und Ketone	195
3.4.6	Carbonsäuren	195
3.4.7	Ester	195
3.4.7.1	Wachse	196
3.4.8	Anhydride	196
3.4.9	Organische Verbindungen mit den Heteroatomen	197
3.4.10	Silane	197
3.4.11	Komplexe	198
3.4.11.1	Chelatbildner als Komplexmierungsmittel	199
3.5	Chemische Reaktionen	199
3.6	Elektrochemie	202
	Zeta-Potentiale	203
3.6.1	Potenziale	204
3.6.2	Spannungsreihe der Metalle	205
3.6.3	Elektrische Felder	207
3.7	Struktur und Gefüge von Werkstoffen	208
3.7.1	Gefüge	208
3.7.1.1	Phasen, Kristallite und Körner	210
3.7.1.2	Poren und Lunker	212
3.7.1.3	Elementarzellen	215
3.7.1.4	Mischkristalle	217
	Substitutionsmischkristalle	217
	Einlagerungsmischkristalle	218
	Gleitebenen	219
3.7.2	Werkstoffe	220
3.7.2.1	Gläser	221
3.7.2.2	Keramiken	221
3.8	Diffusion	222

## 10 Werkstoffkunde der zahntechnischen Materialien

3.8.1	Diffusion in Festkörpern	222
3.9	Bedeutung der Oberflächen	223
3.9.1	Unterschied zwischen Oberfläche und eigentlichem Material	224
3.9.2	Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Oberflächen	224
3.9.2.1	Splittertest nach WIRZ	225
3.9.3	Verfärbungen	226
3.9.3.1	Anlauffarben	226
3.9.3.2	Niederschläge	226
3.9.3.3	Stoffliche Veränderungen	227
3.10	Korrosion	227
3.10.1	Definition der Korrosion	228
3.10.2	Passivierungsmechanismen	231
3.10.2.1	Edelmetalllegierungen	231
3.10.2.2	Edelmetallfreie Legierungen und Titan	231
	Passivierung	231
	Repassivierung	235
	Wirksamkeit (PRI)	236
3.10.3	Örtlicher Verlauf der Korrosion	237
3.10.3.1	Lochfraß	237
3.10.3.2	Korngrenzenkorrosion und interkristalline Korrosion	238
3.10.3.3	Transkristalline Korrosion	238
	Spannungsrissskorrosion	238
3.10.3.4	Belüftungselement und Spaltkorrosion	238
3.10.4	Zeitlicher Verlauf der Korrosion	239
3.10.5	Einfluss der Verarbeitung auf Korrosion und Löslichkeit	241
3.10.5.1	Gießen	241
3.10.5.2	Oberflächenbearbeitung	243
3.10.5.3	Keramische Verblendung	243
3.10.5.4	Löten und Schweißen	244
3.10.6	Einfluss der oralen Umgebung auf die Korrosion	245
3.10.6.1	Speichelzusammensetzung	246
	Einfluss des pH-Werts	247
	Anorganische Ionen	248
	Organische Ionen	249
3.10.6.2	Galvanische Elemente und Kontaktkorrosion	250
	Strom- und Spannungsmessung im Mund	254
3.10.7	Messung der Korrosion	255

3.10.7.1	Berechnung der Korrosionsresistenz aus Katalogdaten	257
3.10.7.2	Elektrochemische Messung der Korrosion	257
3.10.7.3	Nasschemische Messung der Korrosion (Immersionstest)	261
	Labortest (Langzeit-Korrosionstest)	264
3.10.8	Vergleich der elektrochemischen und nasschemischen Verfahren	265
3.11	Lösungen und Löslichkeit	266
3.11.1	Solvatation	267
3.11.2	Löslichkeit	269
3.11.3	Bestimmung der Löslichkeit für Dentalmaterialien	270
3.11.4	Einfluss der Löslichkeit auf Verbünde	270
	Literatur	271

<b>4.</b>	<b>Biologisches Verhalten</b>	281
4.1	Kurze Einführung in die Toxikologie	281
4.1.1	Aufnahme (Resorption)	284
4.1.2	Essenzielle und nichtessenzielle Elemente	287
4.1.2.1	Essenzielle Elemente Mangel und Überschuss von essentiellen Elementen	290
4.1.2.2	Nichtessenzielle Elemente	291
4.1.3	Reinheit der Stoffe	293
4.1.4	Ausscheidung (Exkretion)	293
4.2	Unerwünschte biologische Reaktionen	294
4.2.1	Allergische Reaktionen	294
4.2.1.1	Definition	294
4.2.1.2	Einteilung von Allergien	295
4.2.1.3	Testmethoden Wie lese ich einen Allergiepass?	297
4.2.2	Toxische Reaktionen	300
4.2.3	Endokrin wirksame Wechselwirkung (Hormonanaloga)	303
4.2.4	Unverträglichkeiten	304
4.2.5	Psychosomatische Reaktionen	304
4.2.6	Alternative Methoden	304
4.3	Prüfverfahren für die Biokompatibilität (ISO 10993-Serie)	305
4.3.1	Herstellung von Prüfkörpern für biologische Prüfungen	306
4.4	Desinfizieren und Sterilisieren	307

## 12 Werkstoffkunde der zahntechnischen Materialien

4.4.1	Desinfizieren	307
4.4.2	Sterilisieren	308
4.5	Wechselwirkung des Körpers mit Strahlung	309
4.6	Zusammenfassung	309
	Literatur	310
<b>5.</b>	<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>317</b>
5.1	Fertigung von Halbzeugen für die zahntechnische Verarbeitung	321
5.1.1	Produktion von Halbzeugen aus Metall	322
5.1.1.1	Gießverfahren	323
	Kokillenguss	324
	Feinguss	325
	Strangguss	326
	Saugguss	327
	Weiterverarbeitung der Halbzeuge nach dem Guss	327
	Oberflächenbearbeitung	327
	Signierung	328
	Konfektionieren	328
	Endkontrolle des Halbzeuges	329
	Ziehen von Drähten	330
5.1.1.2	Pulverherstellung	330
5.1.1.3	Granulat und Pebble Shot	333
5.1.2	Produktion von Halbzeugen aus Keramik	334
5.1.3	Produktion von Halbzeugen aus Kunststoff	335
5.1.4	Produktion von Halbzeugen aus Wachsen	336
5.1.5	Produktion von Frässscheiben als Halbzeuge	337
5.1.5.1	Frässscheiben aus Metall	339
5.1.5.2	Frässscheiben aus Keramik	342
5.1.5.3	Frässscheiben aus Kunststoff	344
5.1.5.4	Frässscheiben aus Wachs	344
5.1.6	Produktion von Einbettmassen	344
5.1.6.1	Einbettmasse-Pulver	344
5.1.6.2	Einbettmasse-Liquid	346
5.2	Fertigung der Werkstücke (Restaurationen) durch konventionelle/analoge Verfahren	347
5.2.1	Sintern	349
5.2.2	Verwendung von Folien (Captek-Verfahren)	349
5.2.3	Gießprozess	350
5.2.3.1	Gießen von metallischen Werkstoffen in der Dentaltechnik	350
	Tiegel und Tiegeleinsätze	351

	Hilfsmittel für das Gießen	353
	Schmelzpulver	353
	Inertgase	353
	Portionieren der zu gießenden Legierungen	354
	Aufschmelzprozess	355
	Methoden für das Aufschmelzen	356
	Flamme	357
	Widerstand	359
	Induktion	360
	Lichtbogen	361
	Titan-Gießgeräte	361
	Aufschmelzen	361
	Erschwerte Gießzeitpunkterkennung durch Wiedervergießen	364
	Überführung der Schmelze in die Muffel	364
	Das Erstarren der Schmelze in der Muffel	365
	Die Frage nach der richtigen Gießtemperatur	367
	Dauer des Gießvorgangs	368
	Tempers Schritte	369
	Härten und Vergüten	369
	Weichglühen und Homogenisieren	370
	Spannungsarmglühen	370
5.2.4	Galvanotechnik	371
5.2.5	Elektrophorese	374
5.2.6	Pressen	378
5.2.6.1	Pressen und Überpressen von Keramiken	378
5.2.6.2	Pressen von Kunststoffen	382
5.2.7	Polymerisieren	383
5.3	Beschichten	383
5.4	Sintern	385
5.4.1	Einflussgrößen auf den Sinterprozess	387
5.4.1.1	Verdichten von Pulvern oder Schlickern vor dem Sintern	388
5.4.1.2	Sinterprozess	388
5.4.1.3	Grünling – Weißling – Braunling	390
5.4.2	HIP-Prozess (Hippen)	393
5.5	Fertigung der Werkstücke (Restaurationen) durch digitale Verfahren (CAD/CAM)	394
5.5.1	Einteilung von CAD/CAM-Systemen	395
5.5.2	Software für CAD/CAM-Systeme	399
5.5.3	CAD/CAM-Produktionsverfahren für Restaurationen	402

## 14 Werkstoffkunde der zahntechnischen Materialien

5.5.3.1	Rapid Prototyping	403
5.5.3.2	CAD-Cast-Verfahren	403
5.5.3.3	Additive Verfahren	404
	Laminierende Verfahren	
	(Layer Laminated Manufacturing, LLM)	405
	3D-Drucker	405
	Selective Laser Melting (SLM) und	
	Selective Laser Sintering (SLS)	406
	Fused Deposition Modelling (FDM)	407
	Stereolithographie (SLA)	407
	Digital Light Processing (DLP)	409
	Verarbeitung von Metallen mit	
	Selective Laser Melting	410
	Was gibt es für den Zahntechniker zu beachten?	415
	Materialeigenschaften von SLM-gefertigten	
	Restorationen	416
5.5.3.4	Subtraktive Verfahren	418
	Fräsen	419
	Fräsen von Metallen	423
	Was gibt es für den Zahntechniker zu beachten?	426
	Schleifen	427
	Erodieren	429
5.5.3.5	Kombination von Verfahren	430
	Literatur	432

Durch verschiedene Ursachen wie Krankheiten (z. B. Karies, Parodontitis) oder Unfälle müssen gelegentlich Teile von Zähnen oder ganze Zähne ersetzt werden. Dazu werden unterschiedlichste Werkstoffe verarbeitet. Die Restaurationen (Werkstücke), die aus diesen Materialien (Werkstoffen) hergestellt werden, unterliegen den unterschiedlichsten Einflüssen in der Mundhöhle. Es wirken verschiedene physikalische und chemische Kräfte. Diese können die Funktion des Zahnersatzes einschränken oder im ungünstigsten Fall zu dessen völligem Funktionsverlust führen.

Um schon bei der Entwicklung die Haltbarkeit des Zahnersatzes voraussagen zu können, sind In-vitro-Prüfungen nötig. Diese sollen die Materialeigenschaften bestimmen. Die Arbeitsprozesse im Dentallabor oder in industriellen Fertigungszentren müssen betrachtet werden, da diese die Eigenschaften des hergestellten Zahnersatzes beeinflussen.

Die In-vitro-Prüfungen sollen wesentliche Eigenschaften der Werkstoffe erfassen. Sie müssen daher reproduzierbare und richtige Ergebnisse liefern, die mit der klinischen Situation korrelieren müssen. Daher sind klinische Studien mit möglichst langer Laufzeit und einer hohen Anzahl von Patienten nötig. DOLDER schlug hier als Mindestanforderung vor, 50 Patienten über 5 Jahre zu beobachten. Einzelne Fallbeispiele können keine endgültige Beurteilung ermöglichen. Sie liefern aber wichtige Vorabinformationen und dienen als Indiz für die Eignung des beobachteten Materials, Prozesses oder der Behandlungsmethode sowie als Bestätigung der Richtigkeit der bis dahin gesammelten Informationen.

Um das geeignete Material für die richtige Indikation auszuwählen, muss der verschreibende Zahnarzt die Materialeigenschaften kennen. Der Zahntechniker und der Zahnarzt müssen darüber hinaus die Bedeutung der einzelnen Prozessschritte kennen, um den Zahnersatz herstellen zu können.

## 1.1 Die Zähne und das Gebiss

Zähne werden benötigt, um Nahrung zu zerteilen. Die Nahrungsaufnahme bestimmte im Laufe der Evolution die Art der Zähne. Der Mensch als Allesfresser benötigt Reißzähne, um die Beute zu halten. Die Frontzähne dienen dem Zerteilen/Abschneiden der Nahrung. Im Seitenzahnbereich wird die Nahrung zerkleinert und zermahlen. Dadurch unterscheiden sich die Zähne aufgrund ihrer Funktion.

Zähne stellen ein Statussymbol dar. Ein schönes Gebiss symbolisiert i. d. R. Gesundheit und Wohlstand. Ästhetik spielt bei Zahnersatz neben den werkstoffkundlichen Materialeigenschaften und der zahntechnischen Ver- und Bearbeitbarkeit eine überragende Rolle. Sie wird allerdings in verschiedenen Kulturkreisen durchaus unterschiedlich beurteilt. So gelten Goldzähne in manchen Ländern als Zeichen für Wohlstand, den man zur Schau stellen möchte. Manche Patienten wünschen sich strahlendweiße Zähne, während andere ein naturgetreues Aussehen des Zahnersatzes bevorzugen.

Bei großen Restaurationen, besonders im Frontzahnbereich, muss auch auf die Phonetik geachtet werden. Durch eine

fehlerhafte Planung und/oder Ausführung kann es zum Lispeln oder zu Zischlauten kommen.

Ein wesentlicher Punkt für einen Zahnersatz ist die Handhabbarkeit durch den Patienten. Er muss in der Lage sein, die Restauration adäquat zu reinigen. Dies gilt besonders für implantatgetragenen Zahnersatz.

Last but not least spielt auch der Preis eine Rolle. Der Patient soll in der Lage sein, die zahntechnischen und zahnmedizinischen Leistungen zu bezahlen.

Daher muss der Zahnersatz hohen Ansprüchen genügen, und zwar hinsichtlich:

- werkstoffkundlicher und zahntechnischer Eigenschaften
- Funktion
- Ästhetik
- Phonetik
- Handhabbarkeit durch den Patienten
- Preis

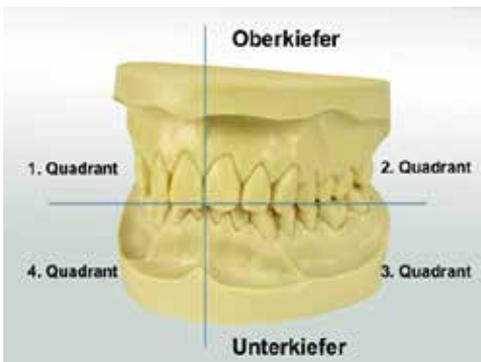


Abb. 1.1 Einteilung des Gebisses in Quadranten, vom Behandler aus auf den Patienten gesehen

Jeder erwachsene Mensch besitzt normalerweise 32 Zähne. Manchmal sind einzelne Zähne genetisch nicht angelegt oder durch Krankheit und Verletzungen

nicht mehr vorhanden. Im vollständigen Gebiss eines Erwachsenen befinden sich je 16 Zähne im Ober- und Unterkiefer. Sie werden in Frontzähne und Seitenzähne unterteilt. Um die einzelnen Zähne eindeutig bezeichnen zu können, gibt es verschiedene Systeme. Es hat sich generell ein Verfahren durchgesetzt, welches das Gebiss in Quadranten unterteilt (FDI-Schema mit FDI = Fédération Dentaire Internationale, eine internationale zahnärztliche Vereinigung, die dieses Zahnschema 1970 etablierte [1]). Im Oberkiefer wird die rechte Hälfte (beginnend in der Mitte zwischen den Frontzähnen) als erster Quadrant definiert. Die acht Zähne, die sich in ihm befinden, werden von der Mitte beginnend von „1“ (Frontzahn) bis „8“ (Weisheitszahn) durchnummeriert. Im Uhrzeigersinn werden die anderen Quadranten durchnummeriert. Damit wird jeder Zahn durch zwei Zahlen eindeutig beschrieben. Die erste Zahl (1-4) gibt den Quadranten an, die zweite Zahl (1-8) beschreibt den Zahn. Die Quadranten 1-4 werden für das Gebiss von Erwachsenen nach dem Zahnwechsel verwendet. Für das Gebiss von Kindern (Milchgebiss) werden die Quadranten mit 5-8 definiert. Im Milchgebiss gibt es nur 20 Zähne. Hier sind die Prämolaren nicht vorhanden.

Die Zähne 1 bis 3 werden als Frontzähne bezeichnet. Zahn „3“ (Laborjargon: „Dreier“) ist der Eckzahn. Im Oberkiefer werden die Zähne 13 und 23 auch als Augenzähne bezeichnet, da ihre Zahnwurzeln auf die Augenhöhle zeigen. Den Seitenzahnbereich bilden die Zähne 4 bis 8. Die Zähne 4 und 5 werden als Prämolaren, die Zähne 6 bis 8 als Molaren bezeichnet.

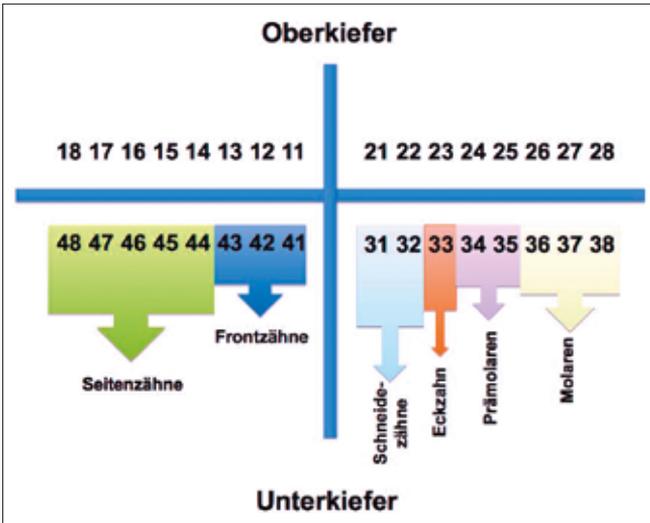


Abb. 1.2  
 Durchnummerierung der Zähne anhand des FDI-Zahnschemas mit Benennung der Zahngruppen (Oberkiefer analog)

Die einzelnen Zähne haben unterschiedliche Funktionen. Der Mensch ist aufgrund seines Nahrungsbedarfes ein Allesfresser, d. h. er verwertet sowohl pflanzliche als auch tierische Nahrung. Diese muss gehalten und zerkleinert werden. Zusammen mit dem Speichel entsteht ein Brei, der verschluckt wird, um dann im Magen-Darm-Trakt verdaut zu werden. Daher kommt dem Gebiss nicht nur eine ästhetische Funktion zu, sondern auch eine physiologische. Je feiner und homogener die Nahrung zerkleinert wird, desto einfacher und vollständiger kann sie verdaut werden.

Die Eckzähne haben stammesgeschichtlich die Funktion, die Beute zu packen und zu halten. Daher besitzen sie lange Wurzeln, um möglichst fest im Kieferknochen verankert zu sein. Mit den Frontzähnen wird die Nahrung abgeschnitten. Daher ist es günstig, hier Schneiden (Inzisalkanten) zu haben. Im Seitenzahnbereich wird die Nahrung zermahlen und zerkleinert. Hier ist eine höckerige Oberfläche günstiger. Im Seitenzahnbereich wirken über die Kau-

muskulatur die höchsten Kaukräfte. Die Funktion entscheidet hier also über die Zahnform.

Jede Zahnform, unabhängig ob Front- oder Seitenzahn, lässt sich anatomisch grob in zwei Bereiche einteilen, in die anatomische Zahnkrone und die Zahnwurzel. In der Mundhöhle sichtbar ist die klinische Krone. Sie endet am Zahnfleischrand (Gingiva). Alters- und krankheitsbedingt kann sich das Zahnfleisch zurückziehen. Dadurch vergrößert sich der sichtbare Bereich des Zahnes, da dann Teile der Wurzel freiliegen.

Die Krone eines Zahnes, egal ob Front- oder Seitenzahn, zeichnet sich immer durch eine gewisse Krümmung der Seitenflächen bzw. Bauchigkeit aus. Dies soll gewährleisten, dass die zerteilte Nahrung beim Kauen nicht zwischen Zahn und Zahnfleisch gedrückt wird, sondern vorbeigleitet. Daher muss beim Modellieren auf diese anatomische Form geachtet werden. Senkrecht abfallende Zahnflächen sind unphysiologisch und können zu schwerwiegenden parodontologischen (das Zahnfleisch betreffende)

Problemen führen. Bedingt durch die Bauchigkeit der Zähne gibt es einen natürlichen Äquator (maximaler Umfang) eines Zahnes, der als anatomischer Äquator bezeichnet wird.

Die Zahnwurzel ist im Kiefer über die Sharpey'schen Fasern in einem Zahnfach (Alveole) elastisch aufgehängt. Diese Aufhängung erfüllt zwei wichtige Aufgaben:

- Kaukräfte werden dadurch gleichmäßig auf eine vergleichsweise große Fläche verteilt
- Der Kieferknochen wird immer auf Zug belastet

Durch die gleichmäßige Belastung wird der Knochen pro Fläche betrachtet weniger belastet. Es ist nicht so, dass die Kraft durch das Abpuffern vernichtet wird. Dies ist physikalisch unmöglich. Sie wird lediglich gleichmäßiger verteilt, damit sinkt die Kraft pro Fläche.

Durch die elastische Aufhängung der Zähne ist es egal, ob dieser auf Zug oder Druck beansprucht wird. Der Kieferknochen wird dadurch im Rahmen physiologischer Krafteinwirkung auf Zug belastet. Dies ist günstig, da Knochen immer in Richtung einer Zugbelastung wachsen. Das macht sich die Kieferorthopädie zunutze. Durch entsprechende Vorrichtungen werden Kräfte auf die zu bewegenden Zähne ausgeübt, die sich dann entsprechend ausrichten. Der Knochen baut sich dann in Richtung der Zugspannung auf. Wo er auf Druck belastet wird, baut er sich ab. Ist die Kraft zu hoch gewählt, erfolgt der Knochenabbau schneller als das Nachwachsen. Dies würde zu einer Lockerung des Zahnes bis zum völligen Verlust führen.

Alle Zähne bestehen aus verschiede-

nen Hart- und Weichgeweben. Zahnkrone und Zahnwurzel umschließen das Zahnmark (Pulpa). In der Pulpa befinden sich der Nerv und die Blutversorgung des Zahnes. Die Nerven- und Blutgefäße treten aus dem Kieferknochen am Ende der Wurzel in den Zahn ein bzw. aus. Der Pulpakanal bildet in der Wurzelspitze eine Art Flussdelta mit zahlreichen Verästelungen.

Die Pulpa wird von Dentin umgeben, das zu einem Teil aus organischem Material besteht, welches sich in den Dentinkanälchen befindet. Der Durchmesser der Dentinkanälchen nimmt von innen nach außen ab, d. h. je näher an der Pulpa desto größer wird der Anteil der Fläche der Dentinkanälchen und somit der organische Anteil. Das die Dentinkanälchen umgebende Gewebe ist anorganisch und besteht hauptsächlich aus Hydroxylapatit. Dentin kann in Richtung der Pulpahöhle Sekundärdentin bilden.

In der Krone bildet der Schmelz die äußere Schicht. Schmelz ist überwiegend anorganischer Natur und besteht ebenso wie das Dentin aus Hydroxylapatit, allerdings zu einem deutlich höheren Anteil. Schmelz ist der härteste Stoff, der im menschlichen Körper gebildet wird. Im Gegensatz zu Dentin wird der Schmelz jedoch nur einmal (während der Zahnentwicklung) gebildet. Er wird nicht nachgebildet.

Die äußere Ummantelung des Zahnwurzelbereiches ist der Zement, welcher ebenfalls überwiegend anorganischer Natur ist.

Die Zahnhartsubstanzen besitzen unterschiedliche Eigenschaften. Neben der Härte und Festigkeit ist es vor allem die chemische Zusammensetzung, die sie unterscheidet.

Bezeichnung	Erklärung
Apikal	zur Wurzel zeigend
Approximal	zum Nachbarzahn (Zahnkrone) zeigend
Bukkal	zur Wange zeigend
Distal	von der Mitte (Mittellinie) weg zeigend (nach hinten)
Fazial (Frontal)	zur Gesichtsseite des Kopfes zeigend
Inzisal	zur Schneidekante von Frontzähnen zeigend
Labial	zur Lippe zeigend
Lingual	zur Zunge zeigend (nur für Unterkieferzähne)
Mesial	zur Mitte (Mittellinie) hin zeigend (nach vorn)
Okklusal	zur Kaufläche von Seitenzähnen zeigend
Oral	zur Mundhöhle zeigend
Palatinal	zum Gaumen zeigend (nur für Oberkieferzähne)
Vestibulär	zum Mundvorhof zeigend (nach außen)
Zervikal	zum Zahnfleischrand zeigend

Tab. 1.1  
Übersicht über die Bezeichnung von Zahnflächen (nach LEHMANN [1])

Um die Flächen eines Zahnes zu beschreiben, gibt es eine Vielzahl von Begriffen, wie in der Tabelle 1.1 aufgeführt.

## 1.2 Arten von Zahnersatz

Je nach Schwere des Verlustes der Zahnhartsubstanz spricht man bei den eingeleiteten zahnärztlichen Arbeitsschritten von restaurativen/konservierenden (Zahn-

erhaltung) oder prothetischen (Zahnersatz) Maßnahmen.

Die zahnärztliche Implantologie hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung zugenommen. Hier werden verloren gegangene Zahnwurzeln durch Implantate ersetzt. Auf diesen werden Kronen, Brücken oder Prothesen verankert.

Zahnersatz lässt sich nach vielen Kriterien einteilen. Neben der Einteilung nach der Zusammensetzung lässt er sich

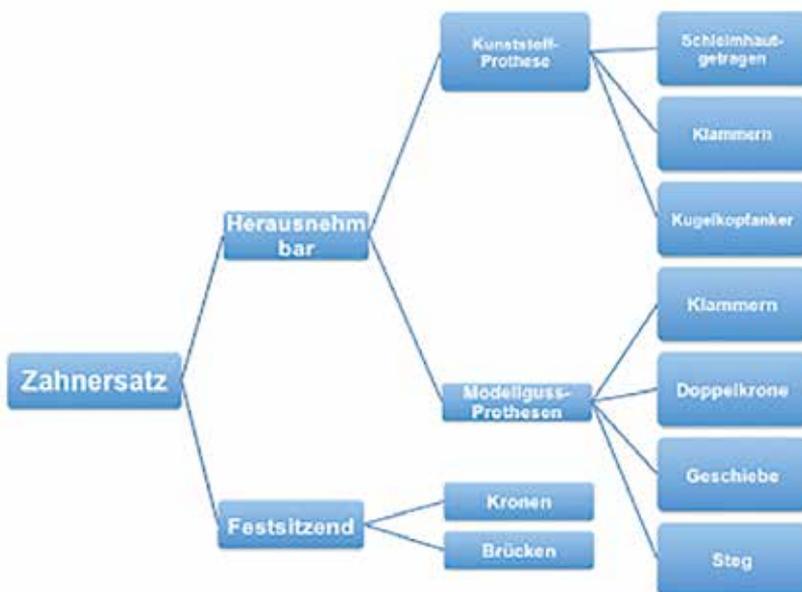


Abb. 1.3  
Schematische Darstellung von Zahnersatz, eingeteilt nach der Möglichkeit, ihn herausnehmbar oder festsitzend zu konservieren

hinsichtlich der Anzahl der einbezogenen Zähne bei der Versorgung einteilen, oder ob die Versorgung festsitzend oder herausnehmbar ist.

Unter festsitzendem Zahnersatz versteht man Kronen und Brücken, die fest im Munde mit den vorhandenen Zähnen bzw. präparierten Stümpfen durch Zementieren oder Verkleben (= adhäsiv befestigt) verbunden werden. Damit werden Zahnlücken geschlossen. Sind nur noch wenige oder gar keine Zähne mehr vorhanden, werden herausnehmbare Prothesen eingesetzt (Teil- oder Totalprothesen, s.a. Abb. 1.3).

In der konservierenden Zahnheilkunde werden Teile von Zähnen ersetzt, die z. B. durch Karies verloren gegangen sind. Die Kavitäten werden mit Füllungsmaterialien gefüllt. Fehlende Anteile der Höcker müssen aufgebaut werden. Zur Herstellung von Füllungen gibt es verschiedene Verfahren und Werkstoffe.

- **Direktes Verfahren:** hier wird ein plastisches Füllungsmaterial (Kunststoffe, Metalle wie z. B. Goldhämmerfüllungen, Amalgame oder Zemente) direkt in die Kavität appliziert. Das Füllungsmaterial härtet dann dort aus. Die Restauration wird vom Zahnarzt direkt im Patientenmund hergestellt.
- **Indirektes Verfahren:** hier wird eine Abformung der Kavität bzw. des Zahnes hergestellt. Mithilfe der Abformung stellt der Zahntechniker ein Modell her, auf dem die Füllung (Inlay oder Onlay) modelliert und anschließend in Metall oder Keramik umgesetzt wird. Die Füllung wird im Dentallabor gefertigt und dann vom Zahnarzt in den Patientenmund eingesetzt.

Amalgame (Quecksilber-Legierungen) wurden frühzeitig als Füllungsmaterial für Kavitäten verwendet. WITZEL schrieb schon 1890 [2] ein ausführliches Werk zu diesem Werkstoff, der aufgrund des Quecksilbers schon damals kontrovers diskutiert wurde. Amalgame werden durch Vermischen (Titruieren) von flüssigem Quecksilber und einem metallischen Pulver, der Feilung, hergestellt. Das dazugegebene Pulver bei Amalgamen besteht vorwiegend aus Silber, Kupfer und Zinn. Nach dem Vermischen erhält man eine Paste, die in die vom Zahnarzt aufbereitete Kavität gestopft wird. Dort härtet sie aus [3]. Der Vorteil ist, dass das Füllungsmaterial direkt im Patientenmund appliziert wird. Man spricht hier von einem direkten Verfahren. Neben der Quecksilber-Problematik haben Amalgame die Eigenschaft, im Mund zu verfärben. Dies kann zu einem mangelhaften ästhetischen Eindruck führen. Auch kann es zu Kantenabbrüchen kommen. Als Alternative zu Amalgamen wurden am Ende des letzten Jahrhunderts Gallium-Legierungen entwickelt, die sich jedoch aufgrund ihrer ungenügenden chemischen, mechanischen und biologischen Eigenschaften nicht durchsetzen konnten [4-12].

Ein anderes Füllungsmaterial ist das reine Gold. Es wurde und wird noch heute in Form von feiner Folie in die Kavität gehämmert [13-23]. Man spricht daher von einer Goldhämmerfüllung, die sich durch eine hohe Randdichtigkeit auszeichnet. HERBST verbesserte die Verarbeitbarkeit von Goldfolie für diese Technologie [24] deutlich. Wie auch die Amalgame weisen Goldhämmerfüllungen kein zahnfarbendes Aussehen auf,

zeichnen sich aber durch eine hohe Randdichtigkeit aus.

Neben metallischen Füllungswerkstoffen gibt es auch nicht metallische. Hierbei handelt es sich um Zemente oder Füllungskunststoffe (Composites). Zemente sind anorganischer Natur und werden vergleichsweise selten als Füllungswerkstoff verwendet. Sie weisen eine ungenügende mechanische Festigkeit auf, was besonders im Seitenzahnbereich, wo hohe Kaukräfte wirken, nachteilig ist.

Die heute am weitesten verbreiteten Füllungsmaterialien für das direkte Verfahren zur Erzeugung von Füllungen sind Kunststoffe. Diese zeichnen sich durch günstige Herstellung und hohe Ästhetik (zahnfarben) aus. Nachteilig sind jedoch nach wie vor die Verfärbbarkeit, die Plaqueanlagerung sowie das Abrasionsverhalten.

Das direkte Verfahren hat den Vorteil, dass sich der Füllungswerkstoff beim Verarbeiten (Füllen) in einem plastischen Zustand befindet und in die Kavität gestopft wird. Damit sind auch Unterschnitte kein Problem. Insgesamt kann sehr schonend präpariert werden, da nur wenig gesunde Zahnhartsubstanz abgetragen werden muss.

Ist der Substanzverlust der Zähne größer, ist die Anwendung von direkten Verfahren nicht mehr möglich und es müssen indirekte Verfahren angewendet werden. Hier nimmt der Zahnarzt nach Beendigung der Präparation eine Abformung vor. Diese Abformung wird i. d. R. in ein Dentallabor gegeben, welches dann die Restauration herstellt.

Es gibt auch Chairside (= am Zahnarztstuhl)-Verfahren. Das sind CAD/

CAM-Verfahren [25, 26], bei denen die orale Situation gescannt wird (intraorales Scannen). Der Scan wird in eine Software überführt und der Zahnersatz dort virtuell konstruiert und auf ein Produktionsgerät (i. d. R. eine Fräse) überführt. Der Zahnersatz wird in der Zahnarztpraxis produziert.

Nach der Produktion werden die Restaurationen vom Zahnarzt beim Patienten eingegliedert. Das Befestigen kann durch Zementieren oder Verkleben (= adhäsives Befestigen) geschehen. Dies ist vom verwendeten Material und den geometrischen Gegebenheiten abhängig. Generell benötigt das Zementieren mehr Fläche als das Verkleben, um eine ausreichende Haftung zu gewährleisten.

Inlays (Einlagefüllungen) werden verwendet, um größere Kavitäten zu versorgen. Klassischerweise werden hierfür hochgoldhaltige Legierungen verwendet.

Aufgrund der Preisentwicklung der Edelmetalle und aus Gründen der Ästhetik werden heutzutage zahnfarbene Inlays hergestellt. Keramik-Inlays stellen den Stand der Technik dar. Inlays aus Kunststoff sind ebenfalls möglich.

Zahnfüllungen werden nach ihrer Größe unterschieden, dies gilt auch für Inlays. Je nach der Ausdehnung der Kavität werden einflächige, zweiflächige und mehrflächige Inlays hergestellt. Die Bezeichnung der Flächen richtet sich nach den Flächen des versorgten Zahnes und wird durch den Anfangsbuchstaben abgekürzt, z. B. einflächiges Inlay o (okklusal), zweiflächig: mo (mesial-okklusal) oder od (okklusal-distal), dreiflächig: mod (mesial-okklusal-distal). Müssen bei der Präparation Zahnhöcker einbezogen und von der Füllung ersetzt werden

spricht man von Onlays. Werden auch noch die Seitenwände des Zahnes ersetzt, bezeichnet man dies als Teilkrone. Dabei sind die Übergänge fließend.

Ist der Verlust der Zahnhartsubstanz größer, muss der Zahn für die Aufnahme einer Krone entsprechend präpariert werden (Vollkrone). Dann befindet man sich im Bereich der prothetischen Zahnheilkunde. Kronen können in anatomischer Form aus Metall hergestellt werden. Verblendkronen benötigen nur ein Käppchen aus Metall oder Gerüst-Keramik und werden mit Keramik verblendet, die in Schichten aufgetragen und im Keramikofen gebrannt wird (Vollverblendung). Bei Kronen aus Metall kann man die Verblendung auch nur vestibulär mit Keramik oder Kunststoff ausführen, man bezeichnet dies als Teilverblendung. Vollkeramische Kronen können ohne Gerüstkeramik in anatomischer Form gepresst oder gefräst und durch das Aufbrennen

von Malfarben individualisiert werden. Verblendeter Zahnersatz wird aus ästhetischen Gründen bevorzugt, da er im Gegensatz zu Metallkronen für den Laien unsichtbar ist (Abb. 1.4).

Muss ein Zahn extrahiert werden, sollte die entstandene Zahnücke geschlossen werden, um die Okklusion und die Stellung der Nachbarzähne zu erhalten. Dies kann durch die Anfertigung einer Brücke erfolgen, der fehlende Zahn wird durch das Brückenglied ersetzt. Dabei müssen die vorhandenen Zähne mesial und distal der Zahnücke zur Aufnahme der Brückenpfeiler (Kronen) präpariert (beschliffen) werden. Der fehlende Zahn wird durch das Brückenglied ersetzt, das mit den Brückenpfeilern verbunden ist. Zwei Brückenpfeiler und ein Brückenglied bezeichnet man als dreigliedrige Brücke. Größere Spannweiten werden als viergliedrig bis 14-gliedrig bezeichnet.



Abb. 1.4 Eine Reihe von mehrflächigen Inlays (Inlay-Strasse)



Abb. 1.5 Teleskopkronen



Abb. 1.6 Vollkeramik-Krone, sowohl das Gerüst als auch die Verblendung bestehen aus Keramik

Bei Freidendbrücken befindet sich das Brückenglied mesial oder distal von mindestens zwei verblockten Kronen und sollte eine Prämolarenbreite nicht überschreiten. Die verwendeten Materialien für Brücken entsprechen denen der Kronen, s. o. (Abb. 1.5, 1.6 und 1.7).

Bei der Planung von festsitzendem Zahnersatz muss die prothetische Wertigkeit der Pfeilerzähne, die in den Zahnersatz mit einbezogen werden, berücksichtigt werden (Tabelle 1.3, nächste Seite). Dabei wird die durchschnittliche Wurzeloberfläche der Zähne in  $\text{mm}^2$  gemessen. Die Größe der Wurzeloberfläche der Pfeilerzähne soll mindestens derjenigen der fehlenden und zu ersetzenden Zähne entsprechen [28]. Weitere Kriterien sind z. B. die Verankerung im Kieferknochen, kariöse Läsionen oder eine endodontische Behandlung. Die prothetische Wertigkeit eines Zahnes ist daher auch vom jeweiligen Zustand abhängig. Es muss das Verhältnis zwischen der klinischen (sichtbaren) Krone und der Wurzellänge beachtet werden.



Abb. 1.7 Fünfgliedrige Seitenzahnbrücke; keramisch verblendetes Metallgerüst