



Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie

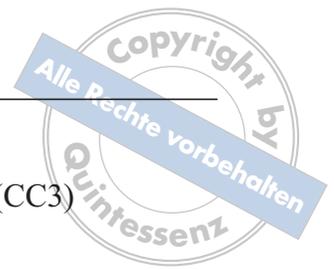
Ralf J. Radlanski



Quintessenz Verlags-GmbH

Berlin, Barcelona, Beijing, Chicago, Istanbul,
Kopenhagen, London, Mailand, Moskau, Neu-Delhi,
Paris, Prag, São Paulo, Seoul, Tokio und Warschau

Prof. Dr. Dr. Ralf J. Radlanski
Charité Centrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (CC3)
Assmannshauser Straße 4–6
14197 Berlin-Wilmersdorf
E-Mail: ralfj.radlanski@charite.de



Bibliografische Informationen der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.
ISBN: 978-3-86867-016-5

Quintessenz Verlags-GmbH
Komturstraße 18, 12099 Berlin
www.quintessenz.de

© 2011 Quintessenz Verlags-GmbH

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der
engen Grenzen des Urheberrechts ist ohne Zustimmung des Verlages un-
zulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Über-
setzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung
in elektronischen Systemen.

Lektorat: Konrad Pracht, Tübingen
Herstellung und Reproduktionen: Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin
Druck: XYZ-Druck

Printed in Germany



Vorwort

Nahezu zehn Jahre sind vergangen, seitdem mich Hubert E. Schroeder, Professor für Orale Strukturbiologie in Zürich und Autor des gleichnamigen Buches von 1976, gebeten hat, das von ihm zusammengetragene Grundwissen in einem neuen Lehrbuch zu bewahren und weiterzuentwickeln. Bei seinem Eintritt in den Ruhestand hat er mir persönlich einen großen Teil seiner Abbildungsvorlagen überlassen, damit sie im neuen Buch erhalten bleiben. Als Student habe ich nach seinem Lehrbuch studiert. Natürlich ahnte ich damals noch nicht, dass ich einmal in die Lage kommen würde, sein Erbe anzutreten.

In der Zwischenzeit hat sich nicht nur unsere morphologische und entwicklungsbiologische Kenntnis im Bereich der orofazialen Region stark erweitert, sondern auch das Lese- und Lernverhalten haben sich erheblich verändert. Dies betrifft sowohl die Struktur der Gedankenführung als auch den Satzbau und die optische Aufbereitung des Textes und der Abbildungen. Aus den Erfahrungen, die ich während meiner langjährigen Vorlesungstätigkeit zu diesen Themen an der Universität Göttingen und der Freien Universität Berlin sowie der University of California at San Francisco und der Universität Turku machen konnte, ist ein neues Buch mit dem Titel „Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie“ entstanden.

Gerade heute, da unser Wissenszuwachs kaum noch zu überblicken ist und die Bedeutung der molekularen Medizin stetig wächst, ist es besonders wichtig, die strukturbiologischen Grundlagen des ärztlichen Handelns in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde zusammengefasst in der Hand halten zu können.

Auch wenn ich als Autor für den Inhalt allein verantwortlich bin, so gibt es doch eine Reihe von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die mir mit großem Einsatz über Jahre hinweg stets hilfreich zur Seite gestanden haben. Allen voran danke ich Herrn Dipl.-Biol. Dr. Herbert Renz für viele tiefgehende Diskussionen, in denen er mich vor manchem Irrtum bewahrt hat. Außerdem hat er viele Präparate hergestellt und diese aufwendig an Licht- und Elektronenmikroskopen fotografiert. Ebenso danke ich Frau PD Dr. Christine Knabe und Frau Prof. Dr. Andrea-Maria Schmidt-Westhausen für die Durchsicht einiger Kapitel. Meiner Sekretärin, Frau Beate Lion, danke ich für ihre Zuarbeit bei der Literaturrecherche und der Pflege der Literaturdatenbank sowie für Vorarbeiten für einige Zeichnungen. Frau MTA Barbara Danielowski, Frau MTA Irene Schwarz und Frau MTA Karin Schulze-Dirksen danke ich für die Anfertigung vieler histologischer Präparate, Fotografien und 3-D-Rekonstruktionen anhand histologischer Schnittserien.

Viele Studentinnen und Studenten haben verschiedene Passagen zur Probe gelesen und mit Anmerkungen versehen. Stellvertretend für alle nenne ich Anne Schöler und Saskia Preisner sowie meine Kinder Jana, Kalinka und Philip Radlanski. Als externe Fachkollegin hat mir Frau Prof. Dr. Birte Steinger, Universität Marburg, zum Kapitel über das immuno-

logische Abwehrsystem viele erläuternde Hinweise gegeben, wofür ich ihr herzlich danke. Herr Prof. Dr. Werner Götz, Universität Bonn, hat große Teile des Manuskriptes intensiv durchgearbeitet und mir wertvolle Hinweise gegeben, wofür ich ihm ganz besonders danke.

Herrn Johannes Wolters, dem Leiter des Quintessenz Verlages in Berlin, danke ich für seine Geduld, die er angesichts der Verzögerungen aufgebracht hat. Er hat auch erkannt, dass dieses einzige deutschsprachige Buch zum Thema der oralen Struktur- und Entwicklungsbiologie zur Verfügung stehen muss. Besonders danke ich ihm für seine Bereitschaft, viele Abbildungen im aufwendigen Farbdruck herzustellen.

Dieses Buch ist vor allem für die Studentinnen und Studenten der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde geschrieben worden. Wer sich im ersten Semester damit beschäftigt, wird zweifellos von der Stofffülle und dem Detailreichtum überwältigt. Wenn sich aber im Laufe des Studiums der Blick erweitert und wenn die klinische Notwendigkeit immer wieder die Kenntnisse der strukturellen Grundlagen erfordert, werden die richtigen Antworten, so hoffe ich, in diesem Buch zu finden sein. Und auch nach dem Studium noch soll es ein hilfreiches Nachschlagewerk dienen können. Außerdem kann dieses Buch die Grundlage für weitergehende Arbeiten in fachverwandten Bereichen, zum Beispiel in der Anthropologie, in der Rechtsmedizin oder in der Veterinärmedizin, darstellen.

Die Arbeit am Text war für mich immer sehr lehrreich, faszinierend und zeitweise spannender als mancher Kriminalfilm im Sonntagabendfernsehprogramm. Diese Erfahrung wünsche ich auch jedem, der dieses Buch durcharbeitet!

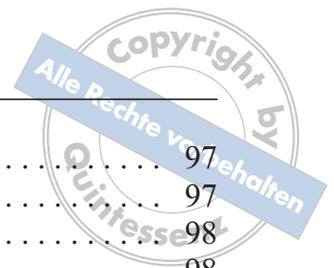
Berlin, im Januar 2011
Ralf J. Radlanski





Inhalt

1	Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie: Definition, Aufgaben, klinische Relevanz.....	1
2	Der Mund und seine Anteile.....	5
2.1	Richtungsbezeichnungen.....	5
2.2	Gesicht und Mund.....	7
2.3	Mundhöhle.....	7
2.3.1	Mundvorhof.....	7
2.3.2	Gaumen.....	8
2.3.3	Wangen.....	11
2.3.4	Zunge.....	12
2.3.5	Mundboden.....	12
2.3.6	Mundschleimhaut.....	12
2.4	Skelett und Kaumuskulatur.....	13
2.4.1	Oberkiefer.....	13
2.4.2	Unterkiefer.....	14
2.5	Zähne.....	15
2.5.1	Milchzähne.....	20
2.5.2	Permanente Zähne.....	22
2.5.3	Okkludierende Zahnreihen.....	35
3	Evolution.....	41
3.1	Evolution der orofazialen Region.....	41
3.2	Evolution der Zähne.....	42
3.3	Evolution, Embryologie und Molekulare Entwicklungsbiologie.....	46
3.4	Erkenntnistheoretische Aspekte.....	47
4	Grundlagen der Gestaltentwicklung. Vom Gen zur Körperform.....	53
4.1	Frühe Theorien zur Morphogenese.....	53
4.2	Genetische Kontrolle der Differenzierungsvorgänge.....	56
5	Entwicklung der Mundhöhle im Zusammenhang mit der Gesichtsentwicklung.....	65
5.1	Vorgeburtliche Entwicklung der orofazialen Region.....	66
5.1.1	Frühembryonale Entwicklung.....	66
5.1.2	Reliefbildungen des frühen Gesichts, Viszeralbögen.....	69
5.1.3	Die oronasale Höhle.....	75
5.1.4	Entstehung der Zunge.....	77
5.1.5	Gaumenbildung.....	78
5.1.6	Abschluss der Embryonalentwicklung, Beginn der Fetalentwicklung.....	80
5.1.7	Bildung des Gesichtsskeletts.....	81
5.1.8	Entstehung der orofazialen Muskulatur und ihre Zuordnung zu den Hirnnerven.....	90
5.1.9	Kiefergelenk.....	96

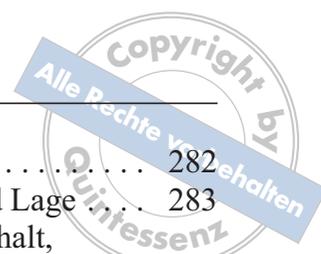


5.1.10	Zahnanlagen.	97
5.1.11	Speicheldrüsen.	97
5.1.12	Tonsillen	98
5.2	Postnatale Entwicklung der orofazialen Region	98
5.2.1	Zustand bei der Geburt	98
5.2.2	Wachstum des Gesichts	99
5.2.3	Wachstumstheorien und funktionelle Matrix.	106
5.2.4	Fehlentwicklungen.	109
5.2.5	Altersveränderungen	110
6	Zahnentwicklung.	121
6.1	Übersicht über die Zahnentwicklung.	121
6.2	Herkunft des dentogenen Mesenchyms	126
6.3	Verdickungen des Mundhöhlenepithels.	127
6.3.1	Ort, Zeitfolge und Morphologie	128
6.3.2	Bedingungen der Epithelverdickungen	128
6.3.3	Epithelial-mesenchymale Interaktionen	129
6.3.4	Molekulare Steuerung der Epithelverdickungen	130
6.4	Zahnleiste und Vestibularleiste	134
6.4.1	Einsenkungsmodus	134
6.4.2	Vestibularleiste und Bildung des Mundvorhofes.	135
6.4.3	Gestalt der Zahnleiste	136
6.4.4	Molekulare Steuerung der Leistenbildung.	138
6.5	Stadium der Zahnknospen	138
6.5.1	Anzahl, Zeitfolge und Morphologie, Gewebedifferenzierung.	138
6.5.2	Die Rolle des Schmelzknosens, molekulare Steuerungsvorgänge.	140
6.6	Stadium der Kappe	145
6.6.1	Veränderungen der Form	145
6.6.2	Veränderungen der Zellmorphologie und Gewebedifferenzierung	147
6.6.3	Molekulare Steuerungsvorgänge im Kappenstadium	147
6.7	Frühes Glockenstadium.	148
6.7.1	Veränderungen der Form	148
6.7.2	Höckerbildung.	149
6.7.3	Lage der Zahnglocken	153
6.7.4	Veränderungen der Zellmorphologie und Gewebedifferenzierung	154
6.7.5	Molekulare Steuerungsvorgänge im frühen Glockenstadium	154
6.8	Spätes Glockenstadium	154
6.8.1	Äußeres Schmelzepithel	154
6.8.2	Stratum reticulare	155
6.8.3	Stratum intermedium.	155
6.8.4	Inneres Schmelzepithel	156
6.8.5	Dentalpapille	156
6.8.6	Zahnsäckchen	157
6.8.7	Blutversorgung der Zahnanlage.	157
6.8.8	Innervation der Zahnanlage.	161
6.8.9	Erste Hartsubstanzbildung, Schmelz-Dentin-Grenze, Formbildung der Zahnkrone	163



6.8.10	Wachstum der Zahnglocke nach Beginn der ersten Hartsubstanzbildung	168
6.8.11	Entstehung des peri- und interdentalen Knochens.	169
6.9	Entstehung und Lage der Zahnanlagen für die zweite Dentition	169
6.9.1	Entwicklung der Zuwachszahnanlagen	169
6.9.2	Entwicklung der Ersatzzahnanlagen	170
6.10	Bildung der Zahnwurzeln	172
6.10.1	Beteiligte Gewebe und Strukturkomponenten.	172
6.10.2	Hertwig-Epithelscheide	172
6.10.3	Eine und mehrere Zahnwurzeln.	175
6.11	Zeitlicher Ablauf der Zahnentwicklung.	177
6.12	Regeneration von Zähnen	184
6.12.1	Das natürliche Regenerationspotenzial der Zähne, Zahngewebe.	184
6.12.2	Künstliche Herstellung von Zähnen durch <i>Tissue engineering</i>	184
7	Zahnschmelz.	199
7.1	Die Bildung des Schmelzmantels	199
7.1.1	Formgebung.	199
7.1.2	Ameloblasten.	200
7.1.3	Beginn der Schmelzbildung.	206
7.1.4	Bewegung der Ameloblasten.	207
7.1.5	Schmelzmatrix	208
7.1.6	Mineralisation der Schmelzmatrix.	212
7.1.7	Präeruptive Schmelzreifung	215
7.1.8	Mineralisationsphasen des Zahnschmelzes	218
7.1.9	Schmelzbildungsrate und Abschluss der Schmelzbildung.	219
7.1.10	Ausgereifter Zahnschmelz.	220
7.2	Struktur des Zahnschmelzes	224
7.2.1	Schmelz-Dentin-Grenze	224
7.2.2	Schmelzspindeln	226
7.2.3	Schmelzbüschel, Schmelzlamellen und präeruptive Schmelzsprünge.	226
7.2.4	Schmelzprismen.	227
7.2.5	Retzius-Linien	237
7.2.6	Perikymatien	239
7.2.7	Hunter-Schreger-Streifung	240
7.2.8	Gnarled Enamel.	240
7.2.9	Prismenfreier Schmelz.	241
7.2.10	Schmelzoberfläche.	242
7.3	Die Bildung des okklusalen Reliefs.	242
8	Dentin	257
8.1	Die Bildung des Dentins	257
8.1.1	Formgebung und Begriffsbestimmung	257
8.1.2	Odontoblasten	261
8.1.3	Dentinmatrix	267
8.1.4	Fixierung der Schmelz-Dentin-Grenze	269
8.1.5	Bildung des Manteldentins	271
8.1.6	Mineralisation der Dentinmatrix	274
8.1.7	Bildung der Dentintubuli.	281

8.2	Ausgereiftes Dentin	282
8.2.1	Variationen des Dentins in Bezug auf Struktur und Lage	283
8.2.2	Chemische Eigenschaften des Dentins: Mineralgehalt, Gehalt an organischem Material	294
8.2.3	Physikalische Eigenschaften des Dentins	297
8.3	Vitalität des Dentins, Sensibilität, Alterung und Abwehr	297
9	Pulpa und Wurzel	309
9.1	Herkunft und Entstehung der Pulpa	309
9.2	Topographie und Variabilität des Pulparaumes	311
9.3	Gewebezonen, zellulärer und struktureller Aufbau der Pulpa	315
9.3.1	Odontoblasten	316
9.3.2	Kernarme oder Weil-Zone	318
9.3.3	Kernreiche oder bipolare Zone	319
9.3.4	Fibroblasten	319
9.3.5	Undifferenzierte Mesenchymzellen	320
9.3.6	Zellen des Immunsystems	320
9.3.7	Extrazelluläre Matrix	323
9.3.8	Blutgefäße	325
9.3.9	Lymphgefäße	328
9.3.10	Innervation der Pulpa	328
9.3.11	Dentikel (Pulpasteine)	333
9.4	Physiologische Aktivität der Pulpa	333
10	Parodont	343
10.1	Aufbau des Parodonts	343
10.2	Entstehung des Parodonts	346
10.3	Biologische Breite	348
11	Wurzelzement	351
11.1	Topographie des Wurzelzementes	351
11.2	Herkunft und Bildung des Wurzelzementes	354
11.2.1	Zementoblasten	354
11.2.2	Zementozyten	356
11.2.3	Fibroblasten	357
11.2.4	Regulation der Zementbildung auf molekularer Ebene	357
11.3	Spezieller Aufbau des Wurzelzementes	358
11.3.1	Entstehung und Lokalisation des azellulär-afibrillären Zementes	359
11.3.2	Entstehung und Lokalisation des azellulären Fremdfaserzementes	360
11.3.3	Entstehung und Lokalisation des zellulären und azellulären Eigenfaserzementes	363
11.3.4	Entstehung und Lokalisation des zellulären Gemischtfaserzementes	364
11.3.5	Zwischenzement	366
11.3.6	Zementoid	366
11.3.7	Hyperplastisches Zement	367
11.3.8	Paraplastisches Zement	368
11.4	Chemische und physikalische Eigenschaften des Wurzelzementes	369
11.5	Altersveränderungen und Regeneration	370





12	Desmodont	381
12.1	Entwicklung	381
12.1.1	Frühe Anordnung der Desmodontalfasern	381
12.1.2	Unterschiede in der Bildung der Faserbündel bei Milch- und Zuwachszähnen und bei Ersatzzähnen	382
12.1.3	Art und Abfolge der Faserbildung	384
12.2	Parodontalspalt, desmodontaler Raum	385
12.3	Strukturelemente des Desmodonts	388
12.3.1	Zellen im Desmodont	388
12.3.2	Fasern im Desmodont	393
12.3.3	Grundsubstanz	399
12.3.4	Gefäße im Desmodont	400
12.3.5	Nerven im Desmodont	402
13	Alveolar- und Kieferknochen	413
13.1	Makroskopische Einteilung	414
13.2	Entstehung von Maxilla und Mandibula, sowie der Alveolarfortsätze	414
13.3	Zelluläre Grundlagen der Knochenbildung	416
13.3.1	Präosteoblasten	416
13.3.2	Osteoblasten	418
13.3.3	Knochenmatrix	419
13.3.4	Osteozyten	421
13.3.5	Knochensaumzellen	423
13.3.6	Osteoklasten	424
13.3.7	Lamina limitans und Zementlinien	427
13.3.8	Knochenmark	427
13.3.9	Einfluss der Wachstumsfaktoren und der Zytokine auf die Knochenzellen	427
13.3.10	Mineralisation der Knochenmatrix	430
13.3.11	Periost und Endost	432
13.4	Umbauvorgänge (<i>remodeling</i>) des Alveolarknochens und Zahnbewegung	432
13.4.1	Knochenumbauvorgänge bei Zahnbewegungen	434
13.4.2	Knochenumbauvorgänge unabhängig von Zahnbewegungen	437
13.5	Topographie und Struktur der Alveolarfortsätze und der Alveolen	438
14	Mundschleimhaut	453
14.1	Topographie der Mundschleimhaut	454
14.2	Vorgeburtliche Entwicklung der Mundschleimhaut	455
14.3	Allgemeiner Aufbau der Mundschleimhaut	456
14.3.1	Epithel	456
14.3.2	Lamina propria	468
14.3.3	Submukosa	469
14.4	Spezielle Regionen der Mundschleimhaut	470
14.4.1	Lippe	470
14.4.2	Zunge	471
14.4.3	Mundboden	484
14.4.4	Wange	485



14.4.5 Harter Gaumen	486
14.4.6 Weicher Gaumen	489
14.4.7 Alveolarschleimhaut	490
14.4.8 Gingiva	492
14.4 Regional unterschiedliche Eigenschaften der Mundschleimhaut und deren Erhaltung	508
14.6 Biofilm	509
15 Speicheldrüsen	521
15.1 Entstehung der Speicheldrüsen	521
15.2 Makroskopische Anatomie	522
15.2.1 Glandula parotidea	522
15.2.2 Glandula submandibularis	523
15.2.3 Glandula sublingualis	523
15.2.4 Kleine Einzeldrüsen	523
15.2.5 Innervation der Speicheldrüsen	524
15.3 Mikroskopische Anatomie	525
15.4 Speichel	528
16 Immunologisches Abwehrsystem	531
16.1 Lymphoepitheliale Organe und Gewebe	532
16.1.1 Tonsillen	532
16.1.2 Speicheldrüsen, Schleimdrüsen und lymphoide Zellen	541
16.2 Lymphbahnen und Lymphknoten	541
16.2.1 Lymphknoten	542
16.2.2 Lymphatische Abflusswege	546
17 Gebissentwicklung und Zahndurchbruch	549
17.1 Gebissentwicklung	549
17.2 Zahndurchbruch der ersten Dentition und der Zuwachszähne	557
17.2.1 Präeruptive Durchbruchsbewegungen	557
17.2.2 Ursachen für die Zahnbewegungen im Zusammenhang mit dem Zahndurchbruch	559
17.2.3 Durchbruch durch die Gingiva	561
17.3 Zahndurchbruch der Ersatzzähne und Resorptionsvorgänge	562
17.4 Abweichungen der Zahnzahl	567
18 Kiefergelenk	575
18.1 Pränatale Entwicklung	575
18.2 Postnatale Entwicklung	580
18.3 Makroskopische Anatomie	582
18.4 Mikroskopische Anatomie	585
18.4.1 Schichtaufbau der Gelenkoberflächen	585
18.4.2 Discus articularis	588
18.4.3 Gelenkkapsel	589
18.5 Remodellierung	590
18.6 Funktion des Kiefergelenks	591



6 Zahnentwicklung

Zusammenfassung

- Zahnschmelz ist ektodermaler Herkunft.
- Dentin, Pulpa und das Desmodont sind ektomesenchymaler Herkunft.
- Verdickungen des Mundhöhlenepithels senken sich in das darunterliegende Mesenchym ein.
- Stadien der Zahnentwicklung sind: Leiste, Knospe, Kappe, Zahnglocke, Kronenbildung, Wurzelbildung. Die Einteilung ist willkürlich, die Übergänge sind fließend.
- Jede dieser epithelialen Zahnglocken gibt die Form der Zahnkrone vor, denn Zahnschmelz wird von Epithelzellen gebildet, die sich an den Innenflächen der Glocken zu Ameloblasten differenzieren.
- Die Mesenchymzellen, die von der Zahnglocke umfasst werden, bilden die Dentalpapille. Die äußersten Zellen der Dentalpapille werden zu Odontoblasten und sind ektomesenchymaler Herkunft.
- Zu Beginn der Hartschichtbildung liegen sich Prä-Ameloblasten und Prä-Odontoblasten gegenüber. Diese Grenzschicht wird als Schmelz-Dentin-Grenze bezeichnet. Der Zahnschmelz wird zur Zahnoberfläche hin aufgeschichtet, das Dentin dagegen nach innen.
- Zahnschmelz kann nach Fertigstellung der Zahnkrone nicht mehr nachgebildet werden.
- Dentin kann zeitlebens weiter gebildet werden, was im Laufe der Zeit zur Verkleinerung der Pulpenhöhle führt.
- Bei der Wurzelbildung wird die Form von der Hertwig-Epithelscheide vorgegeben. Von innen lagert sich Dentin an, von außen Zement, die Hertwig-Epithelscheide wird aufgelöst.
- Bevor die Zähne in die Mundhöhle durchbrechen, bilden sich die meisten weichgeweblichen Anteile der Zahnanlagen zurück. Erst während des Zahndurchbruchs wird das apikale Drittel der Wurzel gebildet.
- An der Steuerung der Zahnentwicklung sind mehrere Signalproteine beteiligt, wobei die gleichen Signale in verschiedenen Stadien mit unterschiedlichen Aufgaben immer wieder aktiv werden (*reiterative signaling*).
- Die Entwicklung der Zähne der zweiten Dentition verläuft prinzipiell gleich, doch unterscheiden sie sich hinsichtlich der Zeitfolge, der Form und der Farbe von den Zähnen der ersten Dentition. Für die Milchzähne 1 bis 5 entstehen Ersatzzahnanlagen lingual/palatal aus der Zahnleiste; die bleibenden Molaren haben als Zuwachszähne keine Milchzahnvorgänger. Ihre Anlagen bilden sich aus einer distalen Verlängerung der Zahnleiste.

Kapitel 6

6.1 Übersicht über die Zahnentwicklung

Die Zahnentwicklung ist ein sehr komplexer Vorgang und wird als ein Beispiel für multifaktorielle Vorgänge der Gewebedifferenzierung und der

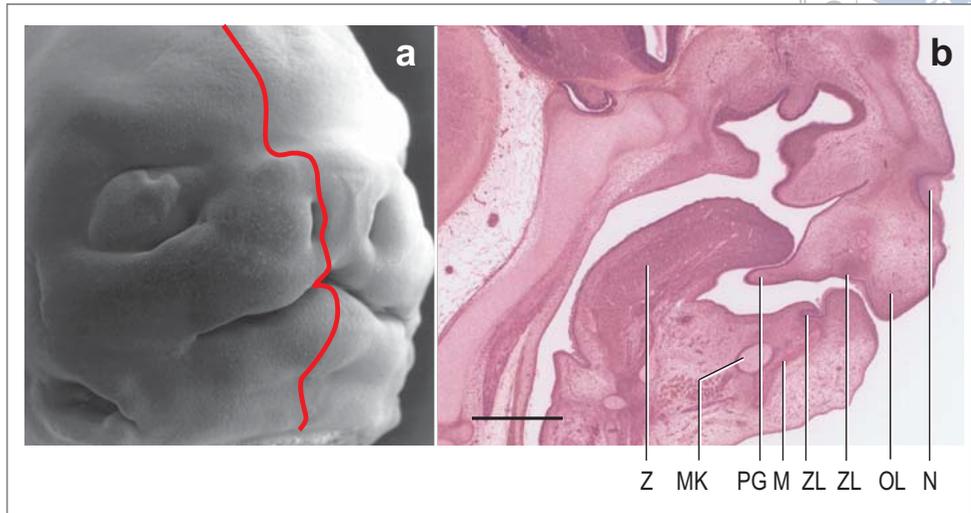


Abb. 6-1a, b

a Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Gesichts eines menschlichen Fetus von 22 mm SSL (ca. 8. Woche). Markiert ist die Lage des Sagittalschnittes von **b**. (Präparat und Fotografie: Prof. Dr. G. Steding, Göttingen, mit freundlicher Genehmigung.)

b Histologischer Schnitt, sagittal, HE-Färbung. Die Verdickung des Mundhöhlenepithels zur Bildung der zunächst noch gemeinsamen Zahnleiste (ZL) und Vestibularleiste ist in den Einsenkungen hinter den Lippen erkennbar. Z = Zunge, MK = Meckel-Knorpel, M = Mandibula, PG = Primärer Gaumen, OL = Oberlippe, N = Nasenplakode. Maßstabmarke = 250 μ m

Kapitel 6

Organentwicklung gesehen. Deshalb ist sie Gegenstand der allgemeinen Grundlagenforschung²¹¹. Als Folge davon ist unser Wissen hierzu außerordentlich umfangreich. In den nachfolgenden Kapitel müssen die Vorgänge unvermeidlicherweise sehr detailliert beschrieben werden. Die hier vorgestellte Übersicht soll dazu dienen, den Zusammenhang der einzelnen Fakten zu erhellen.

Die Entwicklung der Milchzahnkeime **beginnt** etwa in der **6. Woche** nach der Ovulation. Zu Beginn senkt sich eine Leiste von verdichtetem Mundhöhlenepithel in das Mesenchym ein (Abb. 6-1a und b). Die Mesenchymzellen sind größtenteils aus der kranialen Neuralleiste eingewandert. Deshalb wird das Mesenchym hier korrekter als Ektomesenchym bezeichnet (vgl. Abschnitt 5.1.1.2 und 6.2). Diese **Leiste** teilt sich in eine generelle **Zahnleiste*** und in eine **Vestibularleiste** (Abb. 6-2a). Für jede Zahnanlage verdickt sich das Epithel der Zahnleiste weiter und bildet zunächst eine **Zahnknospe** (Abb. 6-2b), dann eine **Zahnkappe**** (Abb. 6-2c) und schließlich eine **Zahnglocke** (Abb. 6-2d und e). Die Form der weichgeweblichen Zahnglocke bestimmt später die Form der Zahnkrone. Die

* Die hier verwendeten Begriffe werden zwar im wissenschaftlichen Sprachgebrauch so verwendet, sind aber missverständlich. Mit „Zahnleiste“ ist nicht eine Leiste von Zähnen gemeint, sondern ein Epithel, aus dem sich später Zähne bilden können.

** Eine „Zahnanlage“ und eine „Zahnknospe“ sind noch selbsterklärend, aber Begriffe wie „Zahnkappe“, „Zahnglocke“, „Zahnpapille“, „Dentalpapille“ oder „Schmelzknoten“ sind nur durch erläuternden Text verständlich. Jedenfalls ist nicht gemeint, was das Wort bedeutet, denn es handelt sich nicht um eine Kappe des Zahnes, sondern um die Zahnanlage im Kappenstadium, ein Entwicklungsstadium, in dem die Zahnanlage die Form einer Kappe aufweist.



Zellen, welche die Innenfläche der Zahnglocke bilden, differenzieren sich zu **Ameloblasten** und produzieren den Zahnschmelz. Zugleich mit der Entwicklung des epithelialen Anteils verdichtet sich das Mesenchym in der direkten Nachbarschaft, und mit Erreichen des Glockenstadiums wird daraus die von der Zahnglocke umschlossene **Dentalpapille** (auch: Zahnpapille). Aus den Mesenchymzellen der Zahnpapille entwickelt sich die Pulpa, und die peripheren Zellen der Dentalpapille können sich zu **Odontoblasten** differenzieren und sorgen für die Bildung des Dentins. Auf diese Weise entstehen die Zähne aus einem für die Schmelzbildung verantwortlichen epithelialen Anteil der Zahnanlage (den man auch als Schmelzorgan bezeichnet) und aus einem Anteil ektomesenchymalen Ursprungs, aus dem das Dentin und die Pulpa entstehen. Die genannten Anteile werden von einem stark verdichteten und später faserig durchwirktem Mesenchym umschlossen, dem **Zahnsäckchen** (auch: Follikel; engl.: *dental follicle*, *dental sack*). Der **Zahnkeim** besteht somit aus dem Schmelzorgan, der Zahnpapille und dem Zahnsäckchen (Abb. 6-2e).

Bis zum Erreichen des Glockenstadiums sind die Zahnanlagen noch mit der Zahnleiste verbunden, doch die Verbindung reißt ab, weil sich die Zahnleiste durch Zelltod (Apoptose) zunehmend löcherig zersetzt. Große Teile der Zahnleiste wandeln sich auch durch epithelial-mesenchymale Transformation zu Mesenchymzellen um*. Zu dieser Zeit löst sich auch die Vestibularleiste von der Mundhöhlenseite her auf und es entsteht der **Mundvorhof**.

Die Anlagen für die **Ersatzzähne** entwickeln sich prinzipiell auf die gleiche Weise. Lingual (bzw. palatinal) von den Milchzahnkeimen bildet sich für jeden einzelnen zu ersetzenden Zahn jeweils eine eigene Ersatzzahnleiste. Der Beginn ihrer Entwicklung und die Zeitfolge bis hin zu ihrem späteren Durchbruch erfolgt allerdings entsprechend ihrer Eigenschaft als Ersatzzähne später. Die Zuwachszähne (erster bis dritter Molar) entstehen aus einer Fortsetzung der Zahnleiste distal vom zweiten Milchmolaren.

Etwa im 6. Monat beginnt die **Zahnhartsubstanzbildung** im Bereich der Frontzähne der ersten Dentition. Hierzu differenziert sich die periphere Zellschicht der mesenchymalen Zahnpapille in Odontoblasten, die Dentin ablagern. Auf die erste Dentinschicht folgt die Ablagerung von Zahnschmelz, produziert von den Ameloblasten, die sich aus Zellen des inneren Schmelzepithels der Zahnglocke differenziert haben. Die Zahnanlage ist schon in ihr Knochenfach eingebettet und es strahlen bereits Nerven- und Gefäßbündel in die Dentalpapille ein.

Die Bildung des **Dentins** beginnt in der Region der Schneidekanten bzw. den Höckerspitzen an der Schmelz-Dentin-Grenze und schreitet schichtweise nach innen fort (Abb. 6-2f und g).

Die Bildung des **Zahnschmelzes** beginnt direkt gegenüber der ersten Dentinschicht und schreitet ebenfalls schichtweise, aber nach außen fort. Dabei wird das Schmelzorgan entsprechend größer. Die Schmelzproduktion wird im Bereich der Schneidekanten bzw. des okklusalen Reliefs beendet, wenn dort die maximale Schmelzdicke erreicht ist (Abb. 6-2h). Dort beenden die Ameloblasten ihre Sekretionstätigkeit. Im Bereich des Zahnhalses

*Persönliche Mitteilung: M. Buchtova, Brno, CZ.

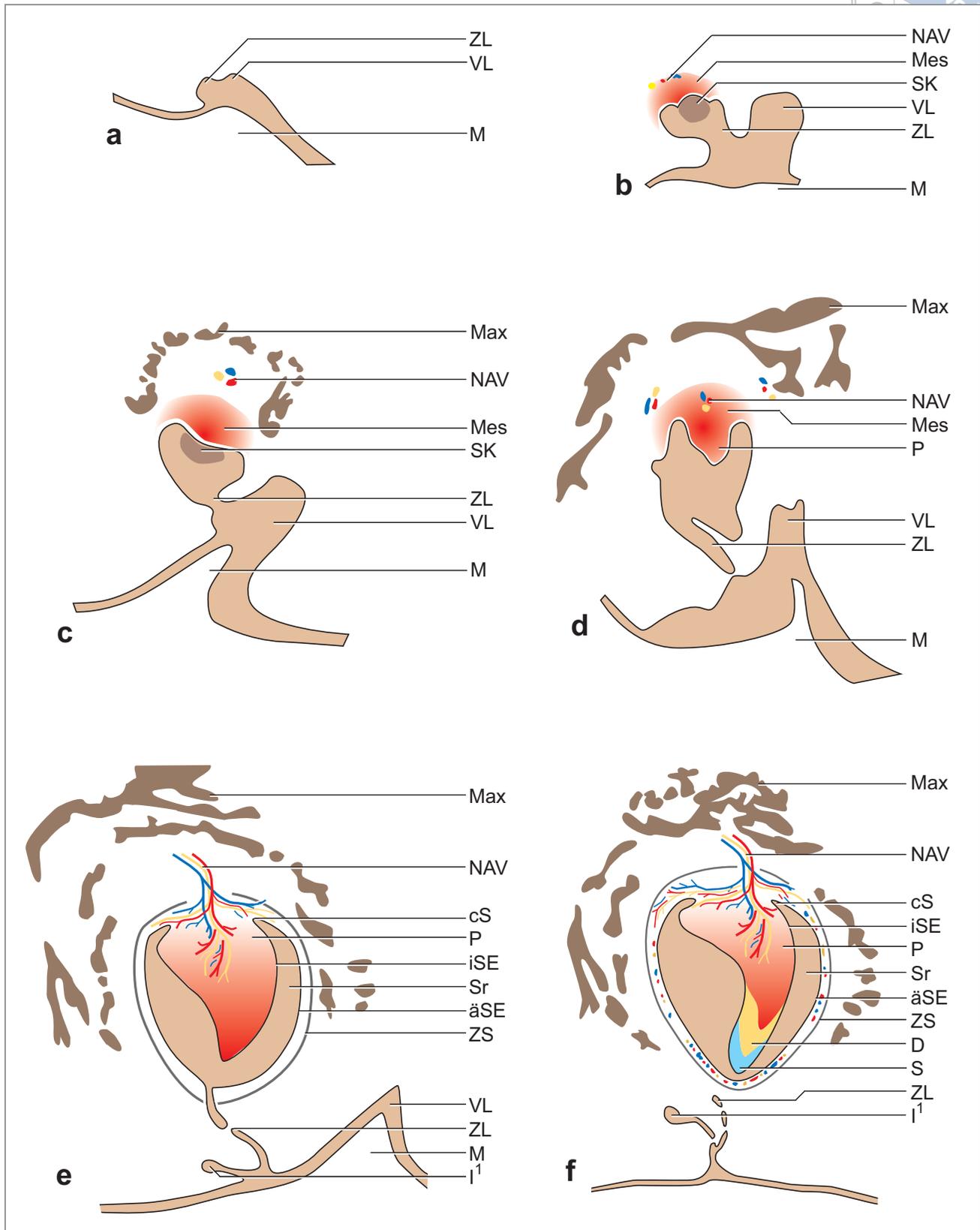
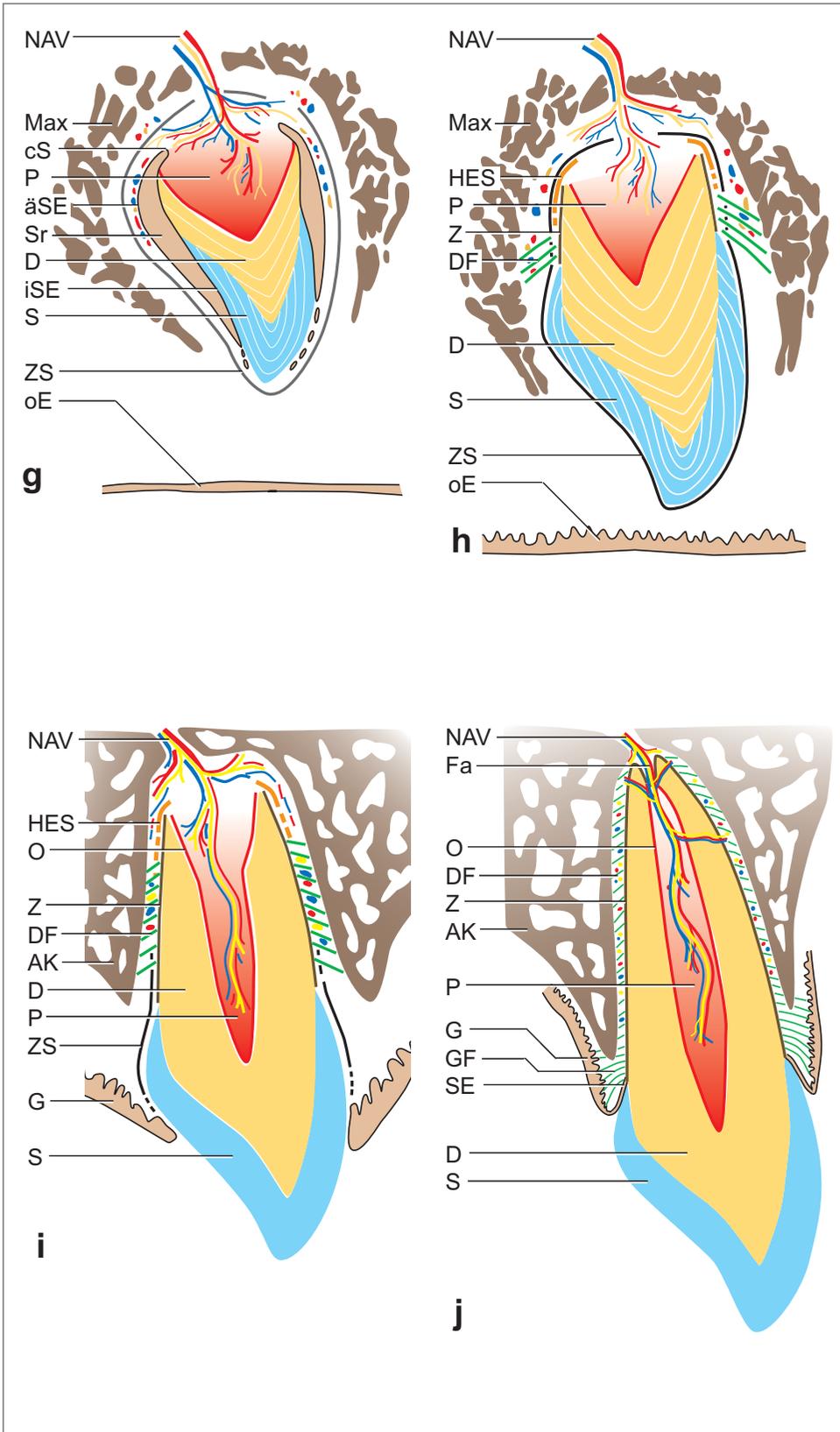


Abb. 6-2a-f Schematische Darstellung der Zahnentwicklung im Sagittalschnitt anhand eines oberen Schneidezahnes. *äSE* = äußeres Schmelzepithel, *cS* = zervikale Schlinge, *I¹* = Anlage des bleibenden Zahnes, *iSE* = inneres Schmelzepithel, *M* = Mundhöhle, *Max* = Maxilla, *Mes* = Mesenchymverdichtung, *NAV* = Nerv, Arterie und Vene, *P* = Papille bzw. Pulpa, *S* = Schmelz, *Sr* = Stratum reticulare, *VL* = Vestibularleiste, *ZL* = Zahnleiste, *ZS* = Zahnsäckchen.



Kapitel 6

Abb. 6-2g-j Schematische Darstellung der Zahnentwicklung im Sagittalschnitt anhand eines oberen Schneidezahnes. *AK* = Alveolarknochen, *äSE* = äußeres Schmelzepithel, *cS* = zervikale Schlinge, *D* = Dentin, *DF* = Desmodontalfasern, *Fa* = Foramen apicale, *G* = Gingiva, *GF* = dentogingivale Fasern, *HES* = Hertwig-Epithelscheide, *iSE* = inneres Schmelzepithel, *Max* = Maxilla, *NAV* = Nerv, Arterie und Vene, *O* = Odontoblasten, *oE* = orales Epithel, *P* = Papille bzw. Pulpa, *S* = Schmelz, *SE* = Saume epithel, *Sr* = Stratum reticulare, *Z* = Zement, *ZS* = Zahnsäckchen.



lagern sie aber noch einige Schichten Zahnschmelz ab. Ameloblasten, die ihre Sekretionstätigkeit beendet haben, wandeln sich zu „reduzierten Ameloblasten“ um und bilden zusammen mit einigen Zellen aus dem Stratum intermedium das reduzierte Schmelzepithel. Beim Zahndurchbruch wandelt sich dieses reduzierte Schmelzepithel sukzessive zum Saumepithel um und bildet den ersten Epithelansatz. Da diese Zellen aber nicht mehr teilungsfähig sind, wird ein sekundärer Epithelansatz aus den weiteren Zellen des Stratum intermedium gebildet. Dieser ist teilungsfähig und bleibt lebenslang erhalten (vgl. Abschnitt 14.4.8).

Für die Bildung der **Zahnwurzel** bleibt eine ringförmige Manschette des inneren Schmelzepithels erhalten (Abb. 6-2g), die sich zunächst in die Tiefe einsenkt (Abb. 6-2h), dann aber an Ort und Stelle verharrt und bei der Bildung der Wurzel den entstehenden Zahn in Richtung Mundhöhle durchbrechen lässt. Diese sogenannte **Hertwig-Epithelscheide*** definiert die Wurzelform und bietet den Odontoblasten die Form zur Ablagerung von Dentin, bis die Wurzelspitze erreicht und die Pulpa von Wurzeldentin umschlossen ist (Abb. 6-2i und j).

Gleichzeitig lagern die Zementoblasten eine dünne Schicht Zement auf der Zahnwurzel ab, womit die Ansatzstellen des desmodontalen Fasersystems fest auf der Wurzeloberfläche verankert werden. Während der Bildung der Wurzel und während des Zahndurchbruchs wachsen Fibroblasten in das Zement ein und spannen einen festen Faserapparat zwischen der Zahnwurzel und dem umgebenden Knochen aus, den **Zahnhalteapparat**. Gefäße und Nerven sind hier ebenfalls zahlreich zu finden.

Kurz bevor der Zahn in der Mundhöhle erscheint, verbindet sich das reduzierte Schmelzepithel mit dem Mundhöhlenepithel. Dieser Prozess leitet die Umwandlung des reduzierten Schmelzepithels zum Saumepithel ein. Im Verlauf des weiteren Zahndurchbruchs bildet sich die Gingiva aus, die den Zahnhals manschettenartig umschließt (Abb. 6-2j).

So ist Dentin ektomesenchymaler Herkunft, Schmelz entsteht aus dem Epithel (ektodermaler Herkunft). Nach Abschluss der Schmelzbildung verlieren die Ameloblasten die Fähigkeit, Zahnschmelz zu bilden, für immer. Dentin kann dagegen lebenslang weiter gebildet werden. Zement und Fasern des Zahnhalteapparates können ebenfalls zeitlebens weiter gebildet werden.

Kapitel 6

* Oskar Hertwig (1849–1919), Anatom in Berlin.

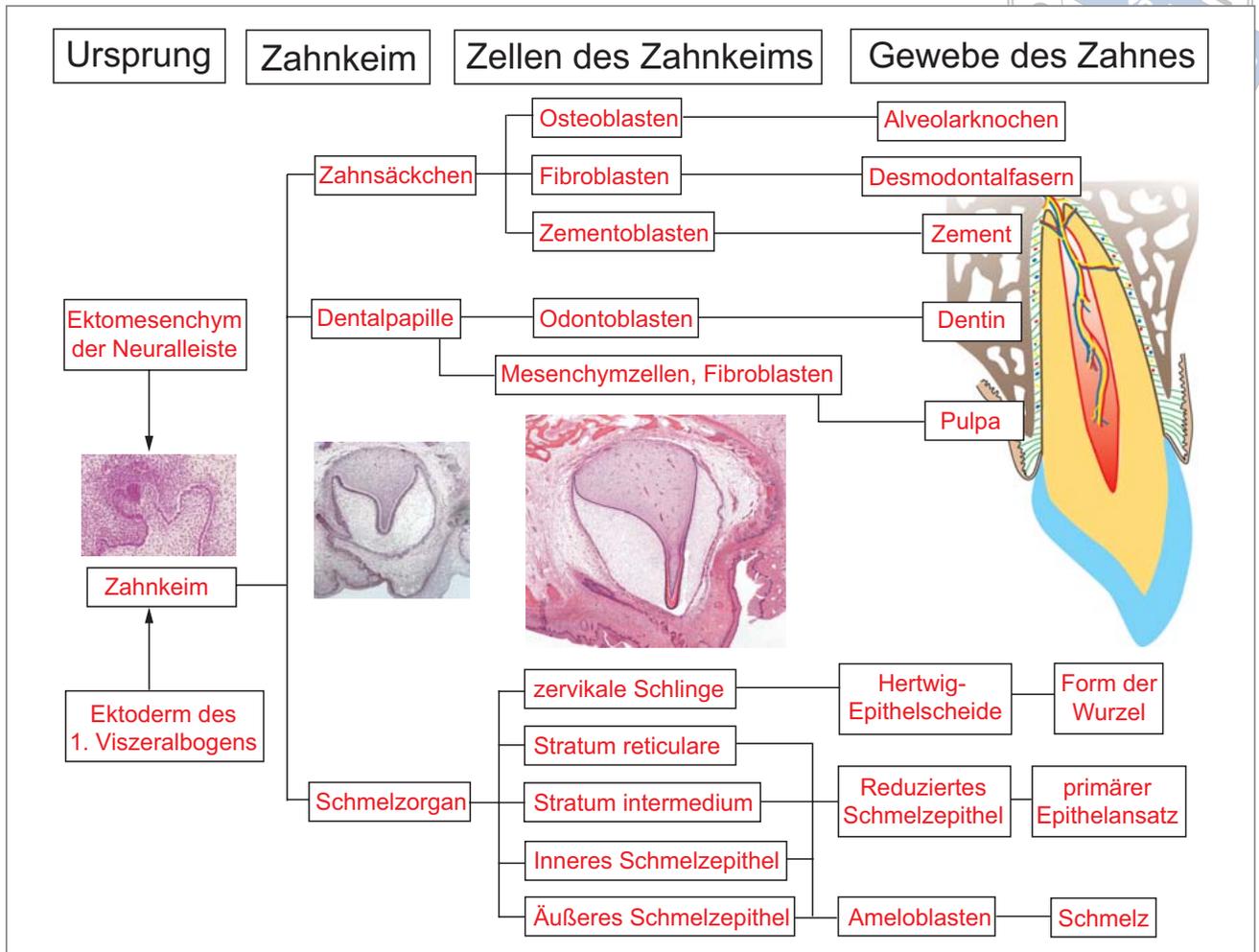


Abb. 6-3 Schematische Darstellung der Anteile des Zahnkeims und ihr jeweiliger Ursprung bis hin zum fertigen Zahn mit Parodont.

6.2 Herkunft des dentogenen Mesenchyms

Aufgrund einer Vielzahl von Markierungsexperimenten bei Hühnern¹⁴³, Wachteln^{71,216,217} und Mäusen^{46,210} geht man davon aus, dass die Zellen, aus denen später die mesenchymalen Anteile der Zähne entstehen, aus der kranialen Neuralleiste bis in die Mundregion eingewandert sind^{37,102,246}. Markierte Zellen aus der Neuralleiste sind im dentalen Mesenchym nachgewiesen worden⁷⁶. Mikrochirurgische Versuche an Hühnerembryonen, bei denen Zellpopulationen aus dem Anlagegebiet des ersten Viszeralbogens entfernt^{144,145} wurden, oder innerhalb des Embryos zwischen den Anlagegebieten des ersten und zweiten Viszeralbogens vertauscht wurden (heterotrope Geweberekombinationen)¹⁴³, unterstützen diese Auffassung. Es gibt Hinweise darauf, dass die Zellen dieses Ektomesenchyms bereits vor ihrer Einwanderungsrouten für ihre Aufgaben bei der Zahnentwicklung festgelegt wurden^{244,246}. Andererseits können die kranialen Neuralleistenzellen auch erst auf ihrem Weg oder gar erst in ihrem Zielgebiet die prägenden Signale erhalten haben^{32,37}.



6.3 Verdickungen des Mundhöhlenepithels

Aus leistenartigen Verdickungen des Mundhöhlenepithels gehen die Zahnleiste und die Vestibularleiste hervor, die sich in das darunterliegende Mesenchym einsenken.

6.3.1 Ort, Zeitfolge und Morphologie

Die Verdickung des Mundhöhlenepithels zur Bildung der Zahn- und Vestibularleiste beginnt dort, wo sich später die Zahnleiste einsenken wird, mit einer Änderung der Gestalt der Zellen^{251–253}: Die flachen kuboiden Zellen, welche die frühe Mundhöhle allgemein noch auskleiden^{162,212,252}, verwandeln sich in höhere und schlanke, säulenförmige Zellen. Innerhalb weniger Tage bildet sich das sogenannte „odontogene Epithel“, das aus einer bis drei Lagen kurzer, säulenförmiger Basalzellen besteht, die zusätzlich von zwei bis drei Lagen flacher Oberflächenzellen bedeckt werden^{142,162,251–253}. Diese Zone des odontogenen Epithels wird als Quelle der odontogenen Stammzellen angesehen, denn gerade bei Fischen, die einen ständigen Zahnwechsel zeigen, würde hier immer wieder aufs Neue die Zahnentwicklung beginnen²³³.

Die Ausbreitung dieser „odontogenic areas“²⁵¹ ist im 28 Tage alten Embryo (ca. 17 mm SSL)* zunächst auf einzelne Inseln beschränkt¹⁴². Im Unterkiefer beginnt die Einsenkung im Embryo von 8–9 mm SSL¹⁵² (etwa 5.–6. Woche) zunächst lateral im späteren Molarengebiet, im anterioren Bereich senkt sich das Epithel später ein. Eine durchgehende verdickte Leiste ist im Embryo von 15–17 mm SSL (etwa 7. Woche) feststellbar¹⁵². Im Oberkiefer befinden sich zunächst (im Embryo von 9–13 mm SSL) auf dem primären Gaumen und auf den beiden Maxillarwülsten getrennte Epithelverdickungen. Etwa 6 bis 7 Wochen nach der Ovulation (11–17 mm SSL) konfluieren sie zuerst im lateralen Bereich der Vereinigung des lateralen Nasenwulstes mit dem Maxillarwulst, bevor auch über die Gesichtsmitte hinweg eine durchgehende verdickte Epithelleiste entstanden ist^{6,128,142,148,151,152,162,164,166,208}.

Bereits in diesem frühen Entwicklungsstadium ist der Bogen des Epithelbandes im Oberkiefer größer als der im Unterkiefer, weshalb das Band in den Oberkieferwülsten etwas mehr lateral-bukkal liegt als im Mandibularbogen (Abb. 6-4). Außerdem erfolgt die Entwicklung im Unterkiefer etwas früher als im Oberkiefer.

* Die Größen- und Zeitangaben aus der Literatur sind sehr unterschiedlich. Dies liegt zum einen an der oft schwierigen und unexakten Datierung des Alters der menschlichen Embryonen. Weiterhin entstehen Ungenauigkeiten beim Umrechnen von Größenangaben in Zeitangaben und schließlich ist die individuelle Reifeentwicklung in Bezug auf Größe und Alter unterschiedlich.

10 Parodont

10.1 Aufbau des Parodonts

Bestandteile des Zahnhalteapparates (Parodont, Parodontium, Periodontium) sind (Abb. 10-1a und b, 10-2a und b):

- Wurzelzement.
- Alveolarknochen, der die Wände der eigentlichen Alveole bildet, in der der Zahn steckt.
- Wurzelhaut (Desmodont, Parodontalligament, PDL, *periodontal ligament*).
- Gingiva (marginales Parodont).

Das Desmodont geht nach koronal hin in das marginale Parodont (Gingiva) über.

Die Zähne sind mit ihren Wurzeln im Kieferknochen befestigt und ragen mit ihren Kronen in die Mundhöhle hinein. Durch das Zusammenspiel zwischen der feinen Beweglichkeit der Zähne (ca. $70 \mu\text{m}$)² und der taktilen Innervation wird der Zahnhalteapparat zum sensiblen Organ. Dies er-

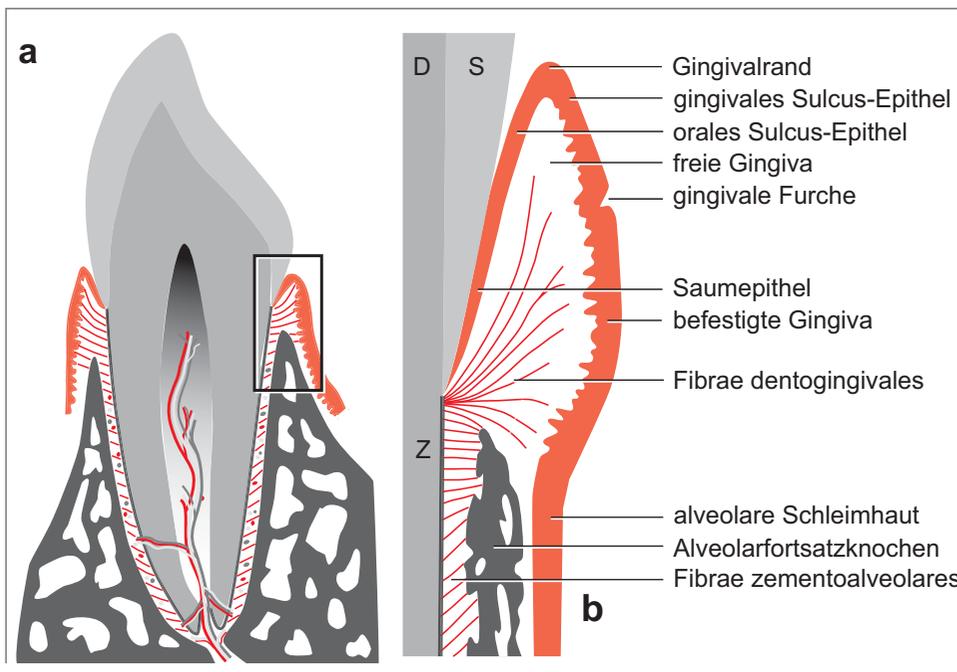


Abb. 10-1a, b

a Schematische Darstellung der Gewebe des Parodonts, Übersicht. *Kasten* = Ausschnitt für **b**.

b Schematische Darstellung der Gewebe des Parodonts. *D* = Dentin, *S* = Schmelz, *Z* = Zement.

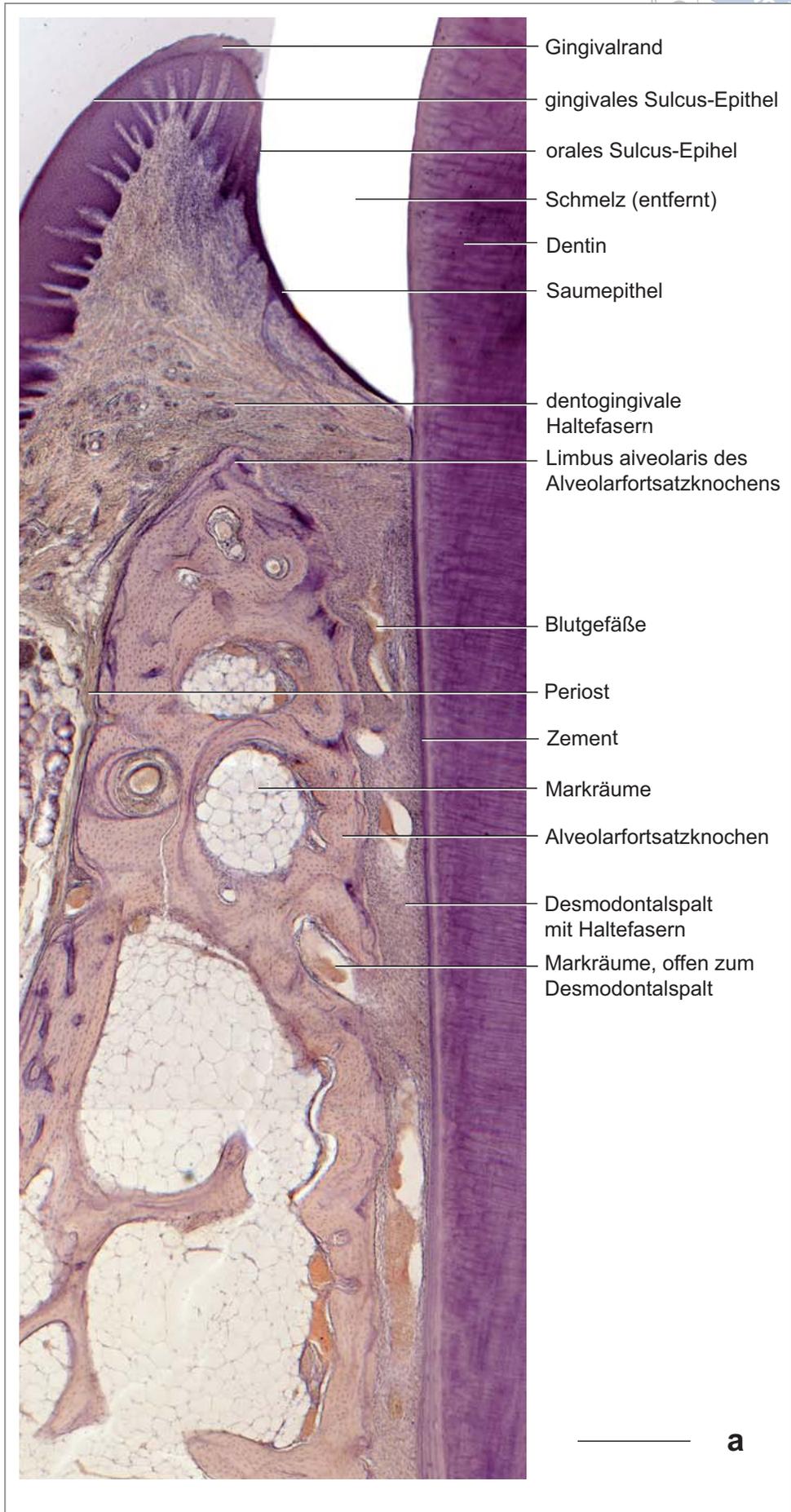




Abb. 10-2a, b

a Übersicht über den Zahnhalteapparat (Parodont) im histologischen Vertikalschnitt. Färbung: HE. Maßstabsmarke = 500 µm.

b Ausschnitt aus **a**. Maßstabsmarke = 100 µm.

laubt einen außerordentlich fein ausgeprägten Tastsinn der Zähne, der noch Unterschiede von 10 µm auflösen kann⁴. Auch die Lage des Unterkiefers im Bezug zum Oberkiefer unter Berücksichtigung der Okklusion wird zu jedem Zeitpunkt ermittelt. Darüber hinaus stellt die besondere strukturelle Konstruktion des Zahnhalteapparates, insbesondere das marginale Parodont



sicher, dass es bei gesunden Verhältnissen nicht zu einem Kontakt zwischen der bakteriell durchsetzten Mundhöhle und dem Alveolarknochen kommt.

Die Stellung der Zähne zueinander und ihre Verankerung im Knochen sind im Lauf des Lebens nicht stabil. Umbauvorgänge im Zahnhalteapparat, die auf zellulären Reaktionen beruhen, führen zu einer permanenten Justierung der Zahnstellung im Knochen^{3,5,12}. Unerwünschte Zahnbewegungen basieren hierauf genau so, wie die therapeutische Chance für die Kieferorthopädie, die Zähne im Knochen zu bewegen.

Das Parodont stellt eine funktionelle Einheit dar^{9,11}, die Gewebestrukturen sind eng miteinander verbunden und gehen sogar an vielen Stellen ineinander über. In diesem Kapitel soll nur eine Übersicht gegeben werden. Die Detailfülle an Fakten macht es nötig, jedem Bestandteil ein eigenes ausführliches Kapitel zu widmen: Wurzelzement: Kapitel 11, Desmodont: Kapitel 12, Alveolar- und Kieferknochen: Kapitel 13, Gingiva (marginales Parodont): Abschnitt 14.4.8.

Die Gingiva stellt eine spezielle Region der Mundhöhle dar, die zugleich Mundschleimhaut und Teil des Zahnhalteapparates ist. Am Gingivarand geht das gingivale Sulkusepithel in das orale Sulkusepithel über, das dem Zahnschmelz eng anliegt. Am Grund des gingivalen Sulkus setzt sich dieses Epithel in das Saumepithel fort, das von wenigen dünnen Lagen von Epithelzellen gebildet wird. Hier besteht aber zum Zahnschmelz eine engere Verbindung, die durch eine Basallamina vermittelt wird. Spezielle Leistungen des Saumepithels halten auch Noxen und Bakterien vom Desmodontalspalt fern. Koronal vom Limbus alveolaris des Alveolarfortsatzknochens verlaufen die dentogingivalen Haltefasern, über welche die Gingiva den Zahn eng umschließt. Der Alveolarfortsatzknochen zeigt große Markräume, die stellenweise mit dem Desmodontalspalt in Verbindung stehen. Zusätzlich verlaufen viele, netzartig untereinander verbundene Blutgefäße im Desmodontalspalt. Bei kurzfristigen Belastungen der Zähne wirkt dies als hydraulische Dämpfung. Auf längerfristige Krafteinwirkungen reagiert der Knochen mit Umbau (s. Kap. 13). Die Kräfte, die auf den Zahn wirken, werden über die kollagenen Haltefasern, die vom Zement zum Knochen ziehen, weitergeleitet (Abb. 10-2a und b). Weiterhin sind Nerven und Zellen des Immunsystems reichlich vorhanden.

Kapitel 10

10.2 Entstehung des Parodonts

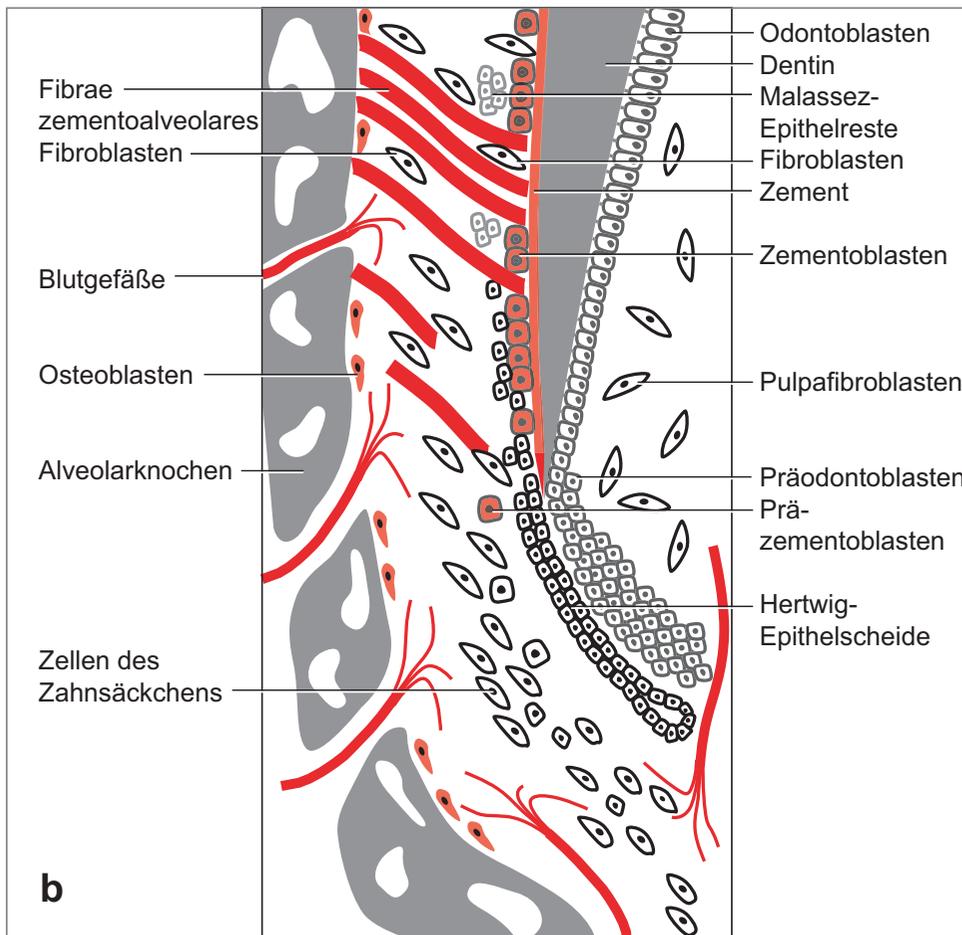
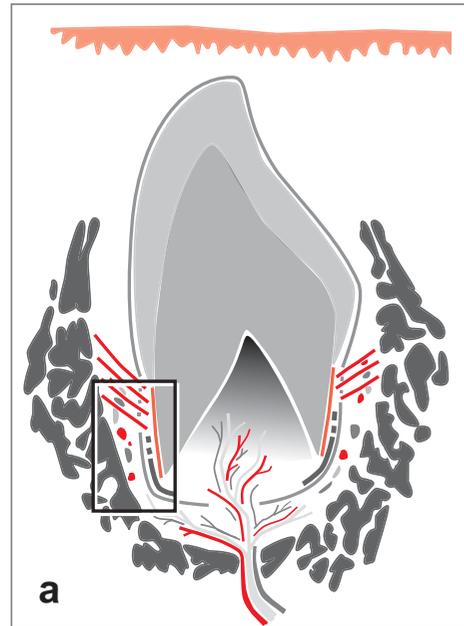
Die Entstehung der Strukturen des Parodonts ist ein hochkomplexer Vorgang^{9,11}, der in den jeweiligen Kapiteln detailliert beschrieben wird. An dieser Stelle soll deshalb lediglich eine zusammenfassende Übersicht gegeben werden.

Die Hertwig-Epithelscheide ist die Duplikatur aus dem inneren und dem äußeren Schmelzepithel. Sie gibt die Form vor, an die sich von innen die Odontoblasten anlagern und Dentin abgelagern (vgl. Kap. 8). Danach löst sich die Hertwig-Epithelscheide größtenteils auf und erlaubt den

**Abb. 10-3a, b**

a Schematische Darstellung einer Zahnanlage im Stadium der Wurzelbildung. *Kasten* = Ausschnitt für **b**.

b Schematische Darstellung der Differenzierung der Zellen und Gewebe, die bei der Bildung des Parodonts beteiligt sind. Die Nerven sind ebenfalls dargestellt, sie folgen dem Verlauf der Blutgefäße.



Zementoblasten die Ablagerung von Zement auf der Dentinoberfläche (vgl. Kap. 11). Die Zementoblasten entstehen aus den Präzementoblasten, die sich aus Bindegewebszellen des eigentlichen Zahnsäckchens differenzieren. Auch Fibroblasten entstammen aus dem Zahnsäckchen. Sie bilden die Haltefasern der Zähne, die bei der Zementablagerung mit ein-

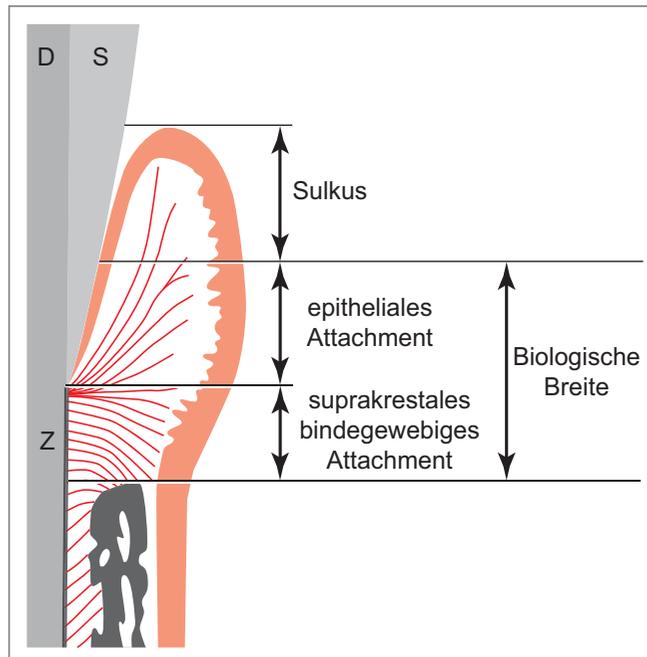


Abb. 10-4 Schematische Darstellung zur Definition der „Biologischen Breite“. (Modifiziert nach ⁷.)

gelassen werden und auch an der Knochenoberfläche einwachsen^{1,9-11}. Der Alveolarfortsatzknochen entwickelt sich aus dem mesenchymalen Bindegewebe (vgl. Kap. 13), das die Zahnanlagen umgibt (Abb. 10-3a, b).

Die Blutversorgung des Parodonts erfolgt im Oberkiefer aus Ästen der Aa. alveolares posteriores und anteriores, aus den Aa. infraorbitales und aus den Aa. palatinae. Im Unterkiefer erreichen die Aa. mandibulares, die Aa. sublinguales und die Aa. mentales und buccales die jeweiligen Parodontien, die ihnen am nächsten liegen. Die Innervation erfolgt aus den jeweiligen Ästen des N. trigeminus, welche die Zähne erreichen⁹.

Kapitel 10

10.3 Biologische Breite

Der Bereich, der den Zahn mit epithelialelem und mit bindegewebigem Attachment kragenförmig umfasst, wird als „Biologische Breite“ (*biological width*) bezeichnet⁶⁻⁸. Das Ausmaß ist bei jedem Menschen variabel, es variiert auch von Zahn zu Zahn. Als klinisches Mittelmaß wird aber eine Höhe von 2 mm angenommen. Sie setzt sich aus jeweils 1 mm epithelialelem Attachment und 1 mm suprakrestalem bindegewebigem Attachment zusammen (Abb. 10-4). Wenn also der Sulcus gingivae sondiert wird, sollte zwischen der tiefsten Stelle der Sondierung und dem knöchernen Limbus alveolaris ein Abstand von 2 mm bestehen.

Klinische Hinweise

Gerade bei restaurativen Maßnahmen sollte die biologische Breite unangetastet bleiben. Falls es nötig wird, die Lage des Präparationsrandes bei



zahnärztlichen Restaurationen in den Bereich der biologischen Breite zu verlegen, ist eine chirurgische Kronenverlängerung nötig, bei der der Limbus alveolaris gekürzt wird. Alternativ kann dazu auch eine kieferorthopädische Kronenverlängerungen (Extrusion des Zahnes) durchgeführt werden. Dabei spielen vor allem im Frontzahnbereich auch ästhetische Aspekte eine Rolle. Auch beim Setzen von Zahnimplantaten muss die biologische Breite berücksichtigt werden.

Weiterführende Literatur

Schroeder, H.E.: The Periodontium. The Handbook of Microscopic Anatomy. Vol. V/5. 1986, Berlin: Springer.

Literatur

1. Berkovitz BKB. Development of the periodontium. In: Osborn JW, editor. Dental Anatomy and Embryology. Oxford: Blackwell; 1981. p. 283ff.
2. Bumann A. Kollagensynthese im Zahnhalteapparat. München: Carl Hanser Verlag; 1991.
3. Cowin SC. Tissue Growth and Remodeling. *Annu Rev Biomed Eng.* 2004;6:77–107.
4. End E. Die physiologische Okklusion des menschlichen Gebisses. München: Verlag Neuer Merkur; 2005.
5. Enlow DH. Principles of bone remodeling. An account of post-natal growth and remodelling processes in long bones and the mandible. Springfield, Illinois, USA: Charles C. Thomas; 1963.
6. Gargiulo A, Krajewski J, Gargiulo M. Defining biologic width in crown lengthening. *CDS Rev.* 1995 Jun;88(5):20–3.
7. Gargiulo A, Wentz FJ, Orban B. Dimensions and relations of the dento-gingival junction in humans. *Periodontol.* 1961;32:261–75.
8. Ingber JS, Rose LF, Coslet JG. The “biologic width”--a concept in periodontics and restorative dentistry. *Alpha Omegan.* 1977 Dec;70(3):62–5.
9. Schroeder HE. The Periodontium. The Handbook of Microscopic Anatomy. Berlin: Springer; 1986.
10. Selvig KA. The fine structure of human cementum. *Acta Odontol Scand.* 1965 Aug;23(4):423–41.
11. Ten Cate AR. The development of the periodontium. In: Melcher AH, Bowen WH, editors. The biology of the periodontium. London: Academic Press; 1969. p. 53 ff.
12. Ten Cate AR, Deporter DA, Freeman B. The role of fibroblasts in the remodeling of periodontal ligament during physiologic tooth movement. *Amer J Orthod.* 1976;69:155–68.



Sachregister

A

Abflusswege, lymphatische 546
 Abrasion 38
 Abwehrsystem, immunologisches 531
 Adenoide 540
 Alveolarschleimhaut 490
 Ameloblast 208
 – Entwicklungsstadien 203
 – inaktiver 206
 – präsekretorischer 160, 202, 204
 – resorbierender 205
 – sekretorischer 204
 – sezernierender 205
 Ameloblastenschicht, Ca²⁺-Transport 215
 Amelogenesis imperfecta 212
 Amelogenin 58, 211, 263
 Andresen-Linien 285
 Anlagerungsgelenk 576
 Aplasie 134, 568
 – Häufigkeit 28
 Apoptose 59
 Aristoteles 54
 Artikulation 37
 Atavismen 47
attached gingiva 493
 Attrition 38

B

Barx homeobox (Barx) 58, 94, 131, 132, 143
 Basallamina 467
 Basalmembran 264, 467
 Bildungstrieb 54
 Biofilm 510
 Biogenetisches Grundgesetz 55
 Biologische Breite 348
 Bisphosphonate 430
 Bisshebung 557
 Bisslage 36
 Bleaching 224
 Blumenbach 54
bone fluid 422
Bone morphogenetic proteins (BMPs) 58, 60, 88, 132, 148, 200, 263, 266, 358, 390, 399, 428, 461, 481
bone remodelling (Knochenumbau) 84, 101, 425, 437
Bone sialoprotein 268, 317, 358, 361, 419, 420

C

cancellous bone 439
clear cells 464
 Col 502
 Crista transversa 28
 Cuticula dentis, 206, 501

D

Deckbiss 36
 Demastikation 38
 Dentalpapille 154, 157
 Dentin 257
 – Bildungsrate 281
 – freie Nervenendigungen 290
 – Härte 297
 – intertubuläres 292
 – Nomenklatur 260
 – peritubuläres 281, 291
 – primäres 258
 – Sklerosierung 298
 – zirkumpulpaes 258, 284
 – Zusammensetzung 296
 Dentinbildung, Auslöser 163
 Dentinliquor 290
 Dentinmatrix 266, 267, 268
 – Mineralisation 274
 Dentinoklasten 564
 Dentinproteine 295
 Dentinsialoprotein 268, 269, 317
 Dentintubuli 276, 277, 278, 281, 287
 desmale Ossifikationszentren 82
 Desmodont
 – Blutversorgung 400
 – Fasergruppen 395
 – Fibroblasten 388
 – Grundsubstanz 399
 – Innervation 402
 desmodontale Fasern
 – Bildung 383
 – Erneuerung 397
 – Zusammensetzung 397
 Diaphragma 173
 Differenzierungstheorie 42
 Dimertheorie 44
 diphyodont 17
 Discus articularis 578, 588
 – Anlage 97
Displacement 100
 Distalbiss 36

Distal-less homeobox (Dlx) 58, 67, 68,
131, 132, 138, 143
duct-associated lymphoid tissue
(DALY) 541
Ductus parotideus 522

E

Ebner-Zuwachslinien 285
Eigenfaserzement
– azelluläres 363
– zelluläres 363
Ektomesenchym 67
Embryonalperiode 80
Enamelysin (Matrixmetallo-
proteinase) 214, 264
Epigenese 54
Epithel
– odontogenes 128
– parakeratinisiertes 463
Epithelansatz
– primärer 498
– sekundärer 499
Epithelial growth factor 138, 143, 148,
390, 529
Epithelperlen 78
Epithelzellen, Ultrastruktur 466
Erosion 38
Ersatzzahnanlagen 123, 170
– Entwicklung 171
Evolution 41
– der Zähne 42

F

Feldtheorie 44
Fetalperiode 80
Fibrae
– alveologingivales 505
– circulares et semicirculares 505
– dentogingivales 504
– dentoperiostales 505
– intercirculares 506
– interpapilares 505
– periostogingivales 505
– transgingivales et intergingivales 505
– transseptales 506
Fibroblast growth factor (FGF) 58,
131, 132, 138, 143, 148, 154, 163,
200, 390
Fibrodentin 260
Fissuren 244
Fissurenrelief 34
Fluor 222
Fluorose 214
Foramen
– apicale 311
– caecum 24, 77
– incisivum 78
Fordyce-Flecken 454
Fossa glenoidalis 97

Fremdfaserzement, azelluläres 360
Funktion 55

G

Gaumen 8
Gaumenbildung 78
Gaumenfortsatz
– primärer 78
– sekundärer 78
Gaumenmandeln 537
Gaumenschleimhaut 487
Gaumenspalte 80
Gelenkkapsel 579, 589
Gelenkspalten 579
Gemischtfaserzement, zelluläres 364
Genotyp 41
Genu vasculosum 583, 589
Geschmacksknospen 481
Geschmackswahrnehmung 476
Gesichtsskelett
– knöchernes 85
– knorpeliges 81
Gingiva 493
– befestigte 493
– Blutgefäßversorgung 506
– freie 496
– Innervation 507
– Lymphgefäßversorgung 507
– marginale 496
– Regeneration 507
– Zellteilungsrate, 460, 495
Gingiva-Epithel, orales 494
gingivale Furche 493
Glandula(e)
– buccales 523
– labiales 523
– linguales posteriores 523
– lingualis 523
– molares 523
– palatinae 523
– parotidea 522
– sublingualis 523
– submandibularis 523
Glaser-Spalte 582
Glockenstadium
– frühes 149
– spätes 155
gnarled enamel 241
Grundgesetz, Biogenetisches 55
Grundsubstanz der Pulpa 324
Gruppenführung 37
Gubernaculum 563

H

Haeckel 55
Hartsubstanzbildung, erste 163
Haupthistokompatibilitätskomplex
(*major histocompatibility complex*,
MHC) 321, 535





Hertwig-Epithelscheide 126, 173
heterodont 17
Hirnnerven 90
Höcker, tragender 27
Höckerbildung 149
Höckerrelief, Bildung 152
homodont 42
Homöobox-Code 56, 66, 131
Hornzähne 42
Hunter-Schreger-Streifung 240
Hydroxylapatit 214, 221
Hyoidwulst 69
Hyperdontie 568,
Hyperzementose 367
Hypodontie 34

I

Idealverzahnung 36
Imbrikationslinien 238
Induktion, reziproke 163, 201, 261
Insulin-like growth factor (IGF) 58, 132,
263, 428
Interdentalpapille 502
Interglobulardentin 279, 286
Interkuspitation
– habituelle 37
– maximale 37
Inzisivisationsfelder 44

K

Kaninisationsfelder 44
Kappenstadium, 145
Kiefergelenk
– Entstehung 96
– primäres 96, 576
– sekundäres 96, 576
Kiemenbogensyndrome 110
Knochen
– desmal ossifizierender 86
– peri- und interdentaler,
Entstehung 169
– Zusammensetzung 432
Knochenmatrix 419
Knochensaumzellen 424
Knochenumbau (*bone remodeling*) 84,
101, 425, 437
Knochenumbauvorgänge bei
Zahnbewegungen 434
Knochenzellen, Entwicklungsstadien 417
Knock-out-Mäuse 56
Knorpel, Schichtaufbau am Kondylus 586
Kompensationskurve, sagittale 37
Konkreszenztheorie 44
Kontaktposition, retrale 37
Korff-Fasern 266, 273
kraniale Neuralleistenzellen 67, 127
Krone
– anatomische 15
– klinische 15

Kronenflucht 19, 37
Krümmungsmerkmal 19

L

Lamina
– densa 467
– limitans 427
– lucida 467
– propria 468
Langerhans-Zellen 465
Laterotrusion 37
leeway space 554
leucinreiches Amelogeninpeptid
(LRAP) 209
Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalte 80
Lippenrot 470
Lymphknoten 542
lymphoepitheliale Organe 532
lymphokryptone Einheiten 532

M

Malassez-Epithelreste 174, 392
Mammelon 151
Mandibula 88
Mandibularwulst 69, 70
Manteldentin 258, 271, 283
Massenmerkmal 19
Matrix, funktionelle 108
Matrixmetalloprotein (MMP20) 419
Matrixmetalloproteinase
(Enamelysin) 214, 264
Matrixstruktur 212
Maxilla 86
Maxillarwulst 69, 70, 74
Mechanotransduktion 437
Meckel-Knorpel 81
Melanozyten 464
Membranula praeformativa 269
Merkel-Zellen 465
Mesenchym, dentogenes, Herkunft 127
Mesialbiss 36
Mesiodens 35, 568
Milchzahndepression 558
Milchzähne 20
Milchzahnretention, sekundäre 558
Molarisationsfelder 44
mottled enamel 224
Msh homeobox (Msx) 58, 66, 68, 131,
132, 138, 143, 561
Mundboden 12
Mundbodenschleimhaut 485
Mundhöhlenepithel
– dreischichtiges, parakeratinisiertes 460
– vierschichtiges 456
– vierschichtiges, orthokeratinisiertes 460
Mundschleimhaut 453, 456
– Blutversorgung 472
– Innervation 472
– regionale Eigenschaften 471



Mundtrockenheit 525
 Mundvorhof 7
 – Bildung 135
 Muskelansatzzone 93
 Muskelfasern, Anordnung 92, 94
 Muskulatur, orofaziale, Entstehung 90
Myogenic regulatory factor (MRF) 94

N

Nanosphären 209
 Nasennebenhöhlen 106
 Nasenwulst
 – lateraler 76
 – medialer 76
 Nebenleiste 136
 Neonatallinie(n) 180, 181
 – Dentin 285
 – Schmelz 239
Nerve growth factor (NGF) 58, 132, 331, 529
 Neuralleistenzellen 67
 – kraniale 67, 127
 Neuropeptide 332
 Neutralverzahnung 36
 Nonkeratozyten, intraepitheliale 464

O

Oberkiefer 13
 Odontoblasten 272, 292, 317
 – sekundäre 318
 Odontoblastenfortsätze 265, 293
 – gegabelte 273
odontogenic areas 128
 Odontoklasten 564
 Okklusion 37
 Oligodontie 134, 568
 oronasale Höhle 75
 Oropharyngealmembran 66, 74
 Os palatinum 87
 Ossicula mentalia 88
 Ossifikation
 – chondrale 85
 – desmale 88
 – enchondrale 85
 – indirekte 85
 – perichondrale 86
 Ossifikationsmodi, Schädelknochen 85
 Ossifikationszentren
 – desmale 82
 – Schädelbasis 83
 Osteoblasten 418
 – Differenzierung 261, 262
 Osteocalcin 420
 Osteodentin 260
 Osteoid 421
 Osteoklasten 424
 Osteopontin 420
 Osteozyten 421
 Owen-Konturlinien 285

P

Papillae
 – filiformes 476
 – foliatae 479
 – fungiformes 478
 – vallatae 479
 Parathormon (PTH) 390, 430
 Parodont, marginales 493
 Parodontalspalt, Breite 386
 Pars alveolaris (Mandibula) 414
 Perikymatien 238, 240
 Phänotyp 41
Platelet derived growth factor (PTH) 391, 399, 429
 Polster, retroartikuläres 583
 Polypen 540
 Präameloblasten 160, 202
 Prädentin 267
 Präformationstheorie 54
 Prämaxilla 87
 Präodontoblasten 263
 Präosteoblasten 416
primary failure of eruption (PFE) 567
 Prismenbart 230
 Prismenbildung 209
 Prismenkopf 230
 Prismenscheide 231
 Processus
 – alveolaris (Maxilla) 414
 – condylaris 96
 Protrusion 37
 Pulpa
 – Blutversorgung 325
 – Gewebezonen 316
 – Innervation 329
 – Lymphgefäße 328
 – physiologische Aktivität 334
 – Stammzellen 320
 Pulpafibroblasten 320
 Pulpagewebe, Grundgerüst 323
 Pulpahorn 311
 Pulpakammervolumen 314

R

Rachenmandel 539
 Rachenmembran 66
 Rachenring, lymphatischer 533
 Radix relicta 564
 RANK/RANKL 358, 425, 565
 Raschkow-Plexus 330
 Reife
 – dentale 555
 – skelettale 555
reiterative signaling 131
 Reizdentin 259
 Rekombinationsexperimente 130
 Relief, okklusales 245
 Remodellierung (*remodeling*) 102
 Reparaturdentin 259



- Reparaturzement 372
 Resorption
 – direkte 434
 – indirekte 435
 – Wurzelspitzen 436
 Retzius-Linien 237, 240
 Riesenkanälchen 291
 Rugae palatinae 78
Runt-related transcription factor 2
 (Runx-2) 58, 131, 148, 200, 358, 417
- S**
 Salter-Linien 362
scaffold 186
 Schädelbasis, Entstehung 84
 Schädelnähte, Suturen, 89
 Schleimhaut
 – auskleidende 454
 – mastikatorische 454
 Schlussleistennetz 204, 265
 Schmelz
 – Härte 223
 – interprismatischer 231
 – prismenfreier 241
 Schmelzbildung
 – Phasen 200
 – proteolytische Enzyme 214
 Schmelzbildungsrate 219, 208
 Schmelzbüschel 226
 Schmelz-Dentin-Grenze, 207, 226, 258, 269
 Schmelzdicke 223
 Schmelzepithel
 – äußeres 155
 – inneres 156
 Schmelzknoten 141, 143, 245
 – primärer 144
 – sekundär 245
 – tertiärer 245
 Schmelzlamellen 227
 Schmelzmatrix 205, 208
 – Mineralisation 212, 218
 Schmelzmatrixproteine 209, 221
 Schmelzmulde 147
 Schmelznische 147
 Schmelzoberhäutchen
 – primäres 242, 498
 – sekundäres 243, 206, 501
 Schmelzprismen 227
 – Durchmesser 233
 – Verlauf 232
 Schmelzreifung, post eruptive 215, 223
 Schmelzspindeln 226, 273
 Schmelzsprünge 227
 Schmelz-Zement-Grenze 353
 Schmerzleitung, Dentin 298
 – hydrodynamische Theorie 299
 Schreger-Linien, Dentin 285
 Seitenkanäle 311
 Sekretion, ekkrine 204
 Sekundärdentin 258
 sekundäre Reduktion 44
Sex-determining region Y-box-9
 (SOX-9) 58
Shift (bei Knochenumbau) 101
 Signalmoleküle 58, 130, 186
 Sjögren-Syndrom 525
smear layer 299
Sonic hedgehog (Shh) 58, 79, 131, 143,
 148, 200, 481
 Spee-Kurve 37
 Speichel 528
 Speicheldrüsen, Entstehung 97
 Spongiosa 439
 Spüldrüsen 523
 Stenon-Gang 522
 Stomeodalplatte 66
 Stratum
 – basale 457
 – corneum 463
 – distendum 463
 – germinativum 457
 – granulosum 462
 – intermedium 156
 – reticulare 155
 – spinosum 462
 – superficiale 463
 Submukosa 470
 Sulkusepithel, gingivales 494
 Suture, Feinbau 103
 Synchronrosen 100, 103
 Syndesmosen 103
- T**
 Taschentiefe 497
terminal web 204, 265
 Tertiärdentin 259, 298
 thekodont 38
Tissue engineering 184
 Tomes-Faser 265
 Tomes-Fortsatz 205, 230
 Tomes-Körnerschicht 287
 Tonsilla(e)
 – lingualis 538
 – pharyngea 539
 – tubaria 541
 – palatinae 537
 Tonsillen, Entstehung 98
Transforming growth factor (TGF) 58,
 79, 88, 163, 263, 266, 390, 399, 429,
 461, 568
 Transkriptionsfaktoren 58
 Trituberkularzahn 42
 Tuberculum Carabelli 28, 43, 44
- U**
 Unterkiefer 14

V

Vascular endothelial growth factor
(VEGF) 58, 85, 565
 Vasodentin 260
 Verhornungssprung 463
 Vermilion-Zone 470
 Vestibularleiste 122, 134, 135
 Vestibulum, Bildung 136
vidian nerve 524
 Viszeralbögen 70, 72, 73, 74

W

Wachstumsfaktoren 58
 Wachstumsfugen 100
 Wachstumslinien 180, 181
 Wachstumstheorien 108
 Waldeyer-Schlundring 533
 Wangen 11
 Wangenschleimhaut 486
 Weil-Zone 318
 Wharton-Gang 523
 Wilson-Kurve 37
Wingless (Wnt) 58, 79, 132, 143, 481
 Winkelmerkmal 19
 Wolff-Gesetz 433
 Wurzelentin 280, 286
 Wurzelkanal 314
 Wurzelkanäle, akzessorische 310
 Wurzelknickungsmerkmal 19, 310
 Wurzeln, Gesamtoberfläche 386
 Wurzelzement, Dicke 353

X

Xerostomie 525

Z

Zahnanlage(n)
 – Blutversorgung 161
 – Innervation 161
 – zweite Dentition, Entstehung und Lage 169
 Zahnäquator 15
 Zahnbogenform 35
 Zahndurchbruch 565
 – Reihenfolge 550
 Zähne 15
 – Bezeichnungen 18
 – Durchbruchzeiten der ersten Dentition 553

– Durchbruchzeiten der zweiten Dentition 556
 – neonatale 552
 – permanente, Einzelbeschreibungen 22f
 – Regeneration 184
 Zähne, Wurzeln 16
 Zahnentwicklung 177
 Zahnfarbe 19
 Zahnglocke 122
 Zahnkappe 122
 Zahnknospe 122, 138
 Zahnleiste 122, 134
 – Einsenkungsmodus 134
 – generelle 135
 – Gestalt 137
 – laterale 147
 Zahnsäckchen, 157
 Zahnschmelz 223
 – permeabler 223
 – Struktur 224
 Zahnwurzeln, Bildung 167, 172
 Zement
 – azellulär-afibrilläres 359
 – Mineralisationsvorgänge 361
 – paraplastisches 369
 Zementarten 352
 Zementhyperplasie 367
 Zementikel 369
 Zementinseln 359
 Zementlinien 425, 427
 Zementoberhäutchen 501
 Zementoblasten 354
 Zementoid 366
 Zementozyten 355, 365
 Zementzungen 359
 Zone
 – zellkernreiche 319
 – bilaminäre 583, 589
 – bipolare 319
 Zunge 12, 474
 – Entstehung 77
 Zungenmandel 538
 Zuwachslinien
 – im Dentin 285
 – im Schmelz 237, 240
 – im Zement 362
 Zuwachszahnanlagen 169, 170
 Zwischenzement 366

