

Checklisten der Zahnmedizin ✓

Kieferorthopädie

Winfried Harzer

⊕ Online-Version in der eRef

2. Auflage

Neues
Kapitel zur
Digitalisierung
in der KFO



 Thieme

Checklisten der Zahnmedizin

Kieferorthopädie

Winfried Harzer

2., unveränderte Auflage

744 Abbildungen

Georg Thieme Verlag
Stuttgart · New York

Winfried Harzer, Prof. Dr. med.
Universitätsklinikum der TU Dresden
Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Kieferorthopädie
Fetscherstraße 74
01307 Dresden

*Bibliografische Information
der Deutschen Nationalbibliothek*

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

1. Auflage 2011

© 2021. Thieme. All rights reserved.
Georg Thieme Verlag KG
Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany
www.thieme.de

Printed in Germany

Zeichnungen: Roland Geyer, Möttingen
Covergestaltung: © Thieme
Bildnachweis Cover: © Thieme/Martina Berge
unter Verwendung von Brackets
© [edwardolive/stock.adobe.com](https://www.edwardolive.com)
Satz: Druckhaus Götz GmbH, Ludwigsburg
gesetzt in 3B2, Version 9.1, Unicode
Druck: AZ Druck und Datentechnik, Kempten

DOI 10.1055/b000000519

ISBN 978-3-13-244218-4 1 2 3 4 5 6

Auch erhältlich als E-Book:
eISBN (PDF) 978-3-13-244219-1

Wichtiger Hinweis: Wie jede Wissenschaft ist die Medizin ständigen Entwicklungen unterworfen. Forschung und klinische Erfahrung erweitern unsere Erkenntnisse, insbesondere was Behandlung und medikamentöse Therapie anbelangt. Soweit in diesem Werk eine Dosierung oder eine Applikation erwähnt wird, darf der Leser zwar darauf vertrauen, dass Autoren, Herausgeber und Verlag große Sorgfalt darauf verwandt haben, dass diese Angabe **dem Wissensstand bei Fertigstellung des Werkes** entspricht.

Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag jedoch keine Gewähr übernommen werden. **Jeder Benutzer ist angehalten**, durch sorgfältige Prüfung der Beipackzettel der verwendeten Präparate und gegebenenfalls nach Konsultation eines Spezialisten festzustellen, ob die dort gegebene Empfehlung für Dosierungen oder die Beachtung von Kontraindikationen gegenüber der Angabe in diesem Buch abweicht. Eine solche Prüfung ist besonders wichtig bei selten verwendeten Präparaten oder solchen, die neu auf den Markt gebracht worden sind. **Jede Dosierung oder Applikation erfolgt auf eigene Gefahr des Benutzers.** Autoren und Verlag appellieren an jeden Benutzer, ihm etwa auffallende Ungenauigkeiten dem Verlag mitzuteilen.

Geschützte Warennamen (Warenzeichen) werden **nicht** besonders kenntlich gemacht. Aus dem Fehlen eines solchen Hinweises kann also nicht geschlossen werden, dass es sich um einen freien Warennamen handelt.

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

Der sprunghafte Wissenszuwachs in den Teilgebieten der Medizin und Zahnmedizin hat dazu geführt, dass Text- und Lehrbücher dem Leser nur noch in komprimierter Form Informationen und Kenntnisse vermitteln können. Die Checklisten der Kieferorthopädie sind kein Nachschlagewerk mit aneinandergereihten Fakten, die abgehakt und abgearbeitet werden sollen. Kieferorthopädische Diagnostik und therapeutische Wege sind viel zu vielschichtig und werden vom Einzelpatienten individuell geprägt, sodass es für die spezifischen Zahnstellungs- oder Kieferanomalien kein pauschales Behandlungsrezept geben kann. Vielmehr soll mithilfe klinischer Beispiele der Algorithmus und das stufenweise, rationale Vorgehen in nachvollziehbarer Form dargestellt werden. Dies geschieht vor allem mit der Absicht, dem Studenten, dem Weiterbildungsassistenten, dem Kieferorthopäden und dem kieferorthopädisch interessierten Zahnarzt einen durchgängigen Leitfaden für das Fachgebiet in die Hand zu geben, der durch eine klare Gliederung, systematischen Aufbau, Zusammenfassung wichtiger Merksätze am Ende jedes Kapitels und reiche Illustration die Aneignung des umfangreichen Wissensstoffs erleichtern helfen soll.

Der Darstellung prophylaktischer und therapeutischer Maßnahmen sind essenzielle Kapitel zur Ätiologie, zur Diagnostik und zu den biologischen Grundlagen vorangestellt, um einen befundadäquaten Behandlungsweg einschlagen zu können. Dabei fanden besonders neue Erkenntnisse zur Genetik, zur funktionellen Diagnostik und bildgebende Verfahren Berücksichtigung. Erstmals wurde in einer kieferorthopädischen Monografie die manuelle und instrumentelle Funktionsanalyse zum Ausschluss

einer kraniomandibulären Dysfunktion aufgenommen, da die zunehmende orthodontische Behandlung Erwachsener dies erforderlich macht.

Checklisten zur funktionskieferorthopädischen und orthodontischen Therapie sollen ebenso wie die Kombination von Diagnosekriterien mit den Behandlungsschritten für die spezifischen Zahnstellungsanomaliegruppen zum Verständnis und zum Einschlagen des optimalen Therapiewegs beitragen. Diesem Ziel dienen auch die Falldemonstrationen und 744 Abbildungen. Der Konzeption der Checklistenreihe folgend, kann der Band zur Kieferorthopädie nicht die Breite einer Lehrbuchdarstellung erfüllen, soll jedoch dem Leser das Grundverständnis und Fähigkeiten zum Handeln vermitteln. Dabei ist häufig der einzuschlagende Weg wichtigstes Kriterium für eine optimale Therapie und deren Stabilität. Besonderer Wert wurde auf die Berücksichtigung neuer skelettaler Verankerungsformen gelegt, die das Therapiespektrum der Kieferorthopädie maßgeblich erweitert haben.

In die Nachauflage wurde an den Beginn das neue Kapitel „Digitalisierung in der Kieferorthopädie“ aufgenommen. Die digitale Prozesskette kieferorthopädischer Diagnostik, Behandlungsplanung und Druck von Behandlungsmitteln wird in den kommenden Jahren unser Fachgebiet und die tägliche Arbeit des Kieferorthopäden ganz wesentlich beeinflussen.

Für weiterführende Anregungen, Kritiken und Anmerkungen zum Aufbau und Inhalt des Buches bin ich sehr dankbar.

Dresden, Dezember 2020

Winfried Harzer



API	Approximalraum-Plaque-Index	isa	Incisivus superior apicale
i.D.	im Durchbruch	JBB	Jochbogen-Breite
PAR	Parodontalbehandlung	KIG	Kieferorthopädische Indikationsgruppen
A	A-Punkt	KPF	Kieferprofilfeld
AHI	Apnoe-Hypopnoe-Index (= RDI)	LBI	Längen-Breiten-Index
ANB	Winkel zwischen den Strecken A-N und N-B	LKGSS	Lippen-Kiefer-Gaumen-Segel-Spalte
Ar	Artikuläre	LL	Unterlippenpunkt
B	B-Punkt	Lo	obere Zahnbogenlänge
Ba	Basion	Lu	untere Zahnbogenlänge
BOP	Bleeding on Probing(-Index)	MB	Multiband
BZ	bleibender Zahn	MGI	morphologischer GesichtsindeX
CAD/CAM	Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing	M-CSF	koloniestimulierender Faktor des Monozyten-Makrophagen-Systems
cAMP	Cyclo-Adenosinmonophosphat	MFA	manuelle Funktionsanalyse
cap	Epiphyse überkappt Diaphyse	ML-NL	Winkel zwischen Nasalebene und Mandibularebene
CBT	Cone Beam Technique	ML-NSL	Winkel zwischen Mandibularebene und Nasion-Sella-Ebene
CMD	kranio-mandibuläre Dysfunktion	MP	mediale Fingerphalangen
CR	Centre of Resistance, Widerstandszentrum	MVP	Mund-Vorhof-Platte
DHC	Dental Health Component	MZ	Milchzahn
DMF	decayed, missing, filled	N	Nasion
DP	distale Fingerphalangen	nCPAP	nasal continuous positive Airway Pressure
DVT	digitales Volumetomogramm	NL-NSL	Winkel zwischen Nasalebene und Nasion-Sella-Ebene
ECTS	European-Credit-Transfer-System	NSBa	Schädelbasisknickungswinkel
EL	Ästhetiklinie	OC	Osteoklast
EOA	elastisch-offener Aktivator	OHI	Orale-Hygiene-Index
FR	Funktionsregler	OHI/S	Oral-Hygiene-Index, simplified
FR III	Funktionsregler Typ III	OK	Oberkiefer
FRS	Fernröntgenseitenaufnahme	OPG	Osteoprotegerin
Gn	Gnathion	OPT, OPG	Orthopantomogramm, Panoraschichtaufnahme
GNE	Gaumennahtsprengung nach Derichsweiler	OSA	obstruktives Schlafapnoesyndrom
GTR	guided Tissue Regeneration	PAS	posterior Airway Space
H	Os hamatum	PB	Prämolarenbreite
HZB	hintere Zahnbogenbreite	PBI	Papillen-Blutungs-Index
IDK	interdisziplinärer Kurs	PDL	Parodontalligament, Desmodont
ii	Incisivus inferior	Pg	Pogonion
iiA	Incisivus inferior apicale	PG	Weichteilpogonion
IKP	Interkuspitation		
IOTN	Index of Orthodontic Treatment Need		
is	Incisivus superior		

PHV	Peak high Velocity	si	Breitensumme der bleibenden Inzisiven im Unterkiefer
Pisi	Os pisiforme	SLA	sand-blasted, large grit, acid-etched (grob sandgestrahlt, säuregeätzt)
Pm	Pterygomaxillare	SNA	Winkel zwischen den Strecken S-N und N-A
POL	problemorientiertes Lernen	SNB	Winkel zwischen den Strecken S-N und N-B
PP	proximale Fingerphalangen	Sp	Spina-Punkt
PSI	parodontaler Screening-Index	Sp'	Sp'-Punkt
PTH	Parathormon	SWA	straight Wire Appliance
PTHRec	Parathormon-Rezeptor	T₁	Tangentenpunkt 1
PTHrp	Parathormone-related Proteine	T₂	Tangentenpunkt 2
PTV	Pterygoid-Vertikale	TAD	temporary Anchorage Device
QHI	Quigley-Hein-Plaque-Index	tgo	Tangentengonion
R	Radius	TMA	Titanium Molybdenium Alloy (Legierung)
RANK	Receptor Activator of nuclear Factor κ B	TNF	Tumor-Nekrose-Faktor
RANKL	Receptor Activator of nuclear Factor κ B Ligand	TPA	Transpalatinalbogen
RC	Centre of Rotation, Rotationszentrum	Tub. carab.	Tuberculum anomale dentis = Carabelli-Höcker
RDI	Respiratory Disturbance Index	u	unit, Epi- und Diaphyse sind verschmolzen
RKP	Retrale-Kontakt-Position	UK	Unterkiefer
RME	Raphe-Median-Ebene	UL	Oberlippenpunkt
RPT	Raphe-Papillen-Transversale	VTO	Visualized Treatment Objective
S	Sella	VZB	vordere Zahnbogenbreite
S	Sesamoid, Os sesamoideum	WG	Wechselgebiss(-Phase)
SBI	Sulkus-Blutungs-Index	ZBB	Zahnbogen-Breite
SCAN	standardised Continuum of aesthetic Need		
SI	Breitensumme der bleibenden Inzisiven im Oberkiefer		



1 EINLEITUNG

Historischer Überblick 1

Nomenklatur, Begriffe und Definitionen .. 2

Ziel und Aufgaben der Kieferorthopädie . 3

Kieferorthopädie und Mundgesundheit ... 3

Digitalisierung in der Kieferorthopädie ... 4

Einleitung 4

Dokumentation 4

Beratung und Erstellen der

Befundunterlagen 5

Befunderhebung 5

Virtuelle Erstellung diagnostischer und

therapeutischer Unterlagen 6

Spezielle Digitalisierung für die

Lingualtechnik 11

Fertigung abnehmbarer Geräte, Schienen

und Retainer 13

Kieferchirurgische Behandlungsplanung im

Rahmen der Kombinationstherapie 14

Zusammenfassung 17

Vor- und Nachteile der Digitalisierung

kieferorthopädischer Prozesse 19

2 BIOLOGISCHE GRUNDLAGEN DER SCHÄDELENTWICKLUNG

**Biologische Grundlagen der
Schädelentwicklung** 20

**Phylogenetische und ontogenetische
Aspekte der Schädelentwicklung** 21

Wachstum von Ober- und Unterkiefer .. 23

Ablauf des postnatalen

Schädelwachstums 23

Knochenbildungsarten 25

Knochenwachstums- und

Knochenentwicklungsmechanismen 28

Wachstumsvorgänge am

Oberkieferkomplex und Unterkiefer 30

Dimensionsänderungen der
Alveolarfortsätze von Ober- und
Unterkiefer 33

Wachstumssteuerung 38

**Dentition – Verlauf und
prophylaktisches Eingreifen bei
Störungen** 41

Zahnbildung und -verkalkung 41

Zahndurchbruch 42

Milchgebissphase 42

1. Wachszahnung – Durchbruch des

1. Molaren 43

1. Phase des Zahnwechsels

(Schneidezähne) 45

2. Phase des Zahnwechsels

(Prämolaren und Eckzähne) 46

2. Wachszahnung – Durchbruch des

2. Molaren 47

Dentition des 3. Molaren und

Zahnengstand der unteren

Schneidezähne (tertiärer Engstand) 48

3 ÄTIOLOGIE UND GENESE VON DYSGNATHIEN

Humangenetische Grundlagen 50

Chromosomenzahl und chromosomale

Störung 50

Monogene Vererbung 51

**Dysmorphiesyndrome mit monogener
Ätiologie** 54

**Multifaktorielle Vererbung der
Dysgnathien** 57

Ursachenkomplex von Anomalien 58

Multifaktorielles Schwellenwertmodell .. 59

Orofaziale Funktionsabläufe 60

4 DIAGNOSTIK

Kieferorthopädische Betreuung durch den Hauszahnarzt 65

Psychologie, Motivation und Mitarbeitsbereitschaft 69
 Psychosomatik 69
 Motivation und Mitarbeitsbereitschaft (Compliance) 71

Anamnese 73
 Erste Vorstellung und Beratung des Patienten beim Kieferorthopäden 73

Klinischer Befund 77
 Allgemeinbefund 77
 Spezielle klinische Untersuchung 80

Funktionelle Proben und Funktionsanalyse 93
 Funktionelle Proben 93
 Funktionsanalyse 98

Röntgenanalyse und bildgebende Verfahren 105
 Hand-Röntgenaufnahme 106
 Fernröntgenanalyse 114
 Wachstumsprognose 124
 Imaging und Gesichtsscanning 125

Modellanalyse 126
 Abdrucknahme und Modellgewinnung 126
 Modellanalyse und -vermessung 127

Anhang 139

5 KIEFERORTHOPÄDISCHE PROPHYLAXE

Kieferorthopädische Prophylaxe 142

Habits und Dyskinesien 143
 Daumenlutschen 143
 Lippen- und Zungenbeißen, Einsaugen von Lippe und Wange, Fingernägelkauen 145

Myofunktionelle Übungen 146

Einschleifen von Milchzähnen 147

Kariesprophylaxe und Erhalt der Stützzone 149

6 SYSTEMATIK

Terminologie und Nomenklatur von Zahnfehlstellung und Okklusionsabweichung 152
 Sechs Schlüssel für die optimale Okklusion 152

7 KLASSIFIKATIONEN UND EPIDEMIOLOGIE

Klassifikationen 154

Häufigkeit von Dysgnathien 156

8 THERAPIE

Ziel und Grenzen kieferorthopädischer Therapie 157

Biologie und Mechanik der Zahnbewegung 160
 Physiologie des Zahnhalteapparats 160
 Parodontium und orthodontische Belastung 163
 Biomechanik der Zahnbewegung 172
 Kraftgröße und Dauer der Einwirkung .. 177
 Nebeneffekte orthodontischer Zahnbewegung 178

Biomechanik der Funktionskieferorthopädie 181

Kieferorthopädische Werkstoffe 186
 Kieferorthopädische Drähte 186



Kieferorthopädische Polymerisationskunststoffe 192
 Werkstoffkundliche Grundlagen 192

Kieferorthopädische Apparaturen und Behandlungsmethoden 194
 Abnehmbare Plattenapparaturen 194
 Funktionskieferorthopädische Geräte ... 204
 Festsitzende Apparaturen 211
 Behandlung mittels festsitzender Apparaturen (SWA modifiziert) 226
 Festsitzende Apparaturen für spezielle Behandlungsaufgaben 234
 Extraorale Geräte 243

9 BEHANDLUNGSSYSTEMATIK

Therapie im Milchgebiss 250

Therapie von Bisslageanomalien 251
 Distalbiss (Angle-Klasse II) 251
 Mandibuläre Prognathie – Progener Formenkreis 263
 Offener Biss 275

Zahnstellungsanomalien 281
 Zahnengstand 281
 Kreuzbiss 294

Zahnzahlanomalien und traumatischer Verlust 304
 Zahnunterzahl 304
 Frontzahnverlust 320
 Zahnüberzahl 327

Diastema mediale 328

Zahnretention 331

Behandlungsaufgaben bei Syndrompatienten und geistig behinderten Patienten 351

Kieferorthopädisch-chirurgische Therapie bei ausgeprägten Dysgnathien 354

11 ORTHODONTISCHE BEHANDLUNG ERWACHSENER

Besonderheiten der orthodontischen Behandlung Erwachsener gegenüber der kieferorthopädischen Therapie während des Wachstums 365

Indikation und Grenzen der Behandlung im Erwachsenenalter 367

Diagnostik 368

Behandlungsplanung und -ausführung . 369
 Falldemonstration 371

12 KIEFERORTHOPÄDISCHE THERAPIE BEIM OBSTRUKTIVEN SCHLAFAPNOE-SYNDROM (OSAS) 376

13 MUSIKINSTRUMENTE UND KIEFERORTHOPÄDIE 379

14 LITERATUR 381

SACHVERZEICHNIS 385

10 KIEFERORTHOPÄDISCHE BEHANDLUNGSAUFGABEN BEI DER INTERDISZIPLINÄREN BETREUUNG VON PATIENTEN

Lippen-Kiefer-Gaumen-Segel-Spalten ... 344

Historischer Überblick

Die Anfänge der Kieferorthopädie reichen zwar bis vor die Zeitenwende zurück, die Entwicklung als medizinische Fachdisziplin mit fundierten wissenschaftlichen Grundlagen und einer breiten diagnostischen und

therapeutischen Anwendung setzte jedoch erst am Ende des vergangenen Jahrhunderts ein. In Tab. 1.1 sind die wesentlichen Namen und Entwicklungsetappen zusammengefasst.

Tab. 1.1 Zeittabelle: Entwicklung der Kieferorthopädie.

Namen und Entwicklungen	
400 v. Chr.	<i>Hippokrates</i> beschreibt unregelmäßig stehende Zähne.
25 v. Chr. – 50 n. Chr.	<i>Celsus</i> empfiehlt die Entfernung persistierender Milchzähne.
129 – 199 n. Chr.	<i>Galen</i> schlägt vor, einen Zahnengstand durch <i>Befeilen</i> der Zähne zu verringern.
1619	<i>Fabricius</i> beschreibt die <i>Extraktion</i> von Zähnen zur Behebung des Platzmangels.
1728	<i>Fauchard</i> verfasst die 1. umfassendere Schrift mit dem Titel „Le Chirurgien dentiste ou Traité des dents“. Darin beschreibt er einen Außenbogen aus Elfenbein zur orthodontischen Behandlung.
1879	<i>Kingsley</i> stellt eine <i>Vorbissplatte</i> mit schiefer Ebene zur Korrektur der Unterkieferrücklage vor und gibt damit den ersten Anstoß zur funktionskieferorthopädischen Behandlung.
1899 – 1910	<i>Angle</i> veröffentlicht in seinem Buch „Okklusionsanomalien der Zähne“ eine bis heute angewandte <i>Klassifikation der Anomalien</i> (Neutral-, Distal- und Mesialokklusion, bezogen auf die ersten Molaren). Er mahnt eine kephalometrische Diagnostik an und entwickelt die festsitzenden Geräte <i>Expansions- und Gleitbogen</i> .
1928	<i>Nord</i> empfiehlt abnehmbare <i>Plattenapparaturen</i> zur Korrektur von Zahnstellungsanomalien. A. M. Schwarz (1935) erweitert das Indikationsgebiet.
1928 – 1932	<i>Andresen</i> und <i>Häupl</i> entwickeln die Grundlagen für die Funktionskieferorthopädie und wenden den nach ihnen benannten <i>Aktivator</i> an.
1931	<i>Hofrath</i> in Deutschland und <i>Broadbent</i> in den USA führen unabhängig voneinander das <i>Fernröntgenverfahren</i> in die kieferorthopädische Diagnostik ein.
1938	A. M. Schwarz teilt die orthodontischen Kräfte in 4 biologische Wirkungsgrade ein und warnt vor der Anwendung zu hoher Kräfte, nachdem aus den USA Parodontschäden und Wurzelresorptionen nach Anwendung festsitzender Band-Bogen-Apparate bekannt geworden waren.
1955	<i>Hotz</i> fördert die breite Wirksamkeit kieferorthopädischer Therapie durch die präventive Steuerung der Gebissentwicklung mithilfe sogenannter kleiner orthodontischer Maßnahmen und der Extraktionstherapie bei schwerem Zahnengstand.
1960	<i>Fränkel</i> führt das Konzept der funktionellen Orthopädie in die Kieferorthopädie ein und entwickelt dafür spezielle Geräte, die <i>Funktionsregler</i> .
1970 –	Fortentwicklung der Materialien für festsitzende Band-Bogen-Apparate zur Reduzierung applizierter Kräfte (Nickel-Titan- und Molybdänlegierungen) und Einführung skelettaler Verankerung mittels Minischrauben und Gaumenimplantaten.

Nomenklatur, Begriffe und Definitionen

Für das Fachgebiet werden die Begriffe *Kieferorthopädie* (orthos = gerade, richtig; paedein = erziehen) und *Orthodontie* (gerader Zahn) verwendet. Entsprechend der regional unterschiedlichen therapeutischen Ausrichtung wurden in den USA, aber zu Beginn des Jahrhunderts auch in Deutschland, die Behandlungsmöglichkeiten allein in der Zahnstellungsänderung – beschränkt auf den Alveolarfortsatz – gesehen und deshalb das Fachgebiet als Orthodontie bezeichnet. Erst mit der Entwicklung der Funktionskieferorthopädie um 1930 und der Erweiterung der Headgear-Anwendung auf den gesamten Oberkieferkomplex ist auch der umfassende-

re Begriff Kieferorthopädie (engl. dentofacial orthopedics), der eine wachstumsmodifizierende Lageveränderung der Kiefer zueinander und in Relation zur Schädelbasis einschließt, berechtigt.

Diese erweiterte Definition ist auch in den pathogenetischen Begriffen der *Eugnathie* und *Dysgnathie* wiederzufinden. Während unter Ersterem die morphologisch und funktionell harmonische Beziehung der Kiefer und eine physiologische Okklusion zu verstehen sind, werden mit „dysgnath“ alle Abweichungen von dieser regelrechten Form und Funktion im orofazialen System umschrieben.

Ziel und Aufgaben der Kieferorthopädie

Ziel kieferorthopädischer Diagnostik und Therapie ist die Erkennung und Behandlung von Dysgnathien. Eine Prophylaxe von Gebissanomalien ist nur im Sinne der Frühbehandlung und damit der Verhütung der vollen morphologischen und funktionellen Ausprägung möglich. Eine primäre Verhütung ist im Gegensatz zur Prophylaxe bei Karies und Parodontopathien nicht möglich, da Dysgnathien vorwiegend auf Erbfaktoren und nicht allein auf exogene Ursachen zurückzuführen sind. Unabhängig davon gehört das Abstellen von Habits, Parafunktionen und weiterer ungünstiger äußerer Einflüsse zur kieferorthopädischen Betreuungsaufgabe, da diese Faktoren das Ausmaß und die Schwere der Gebissanomalie beeinflussen und eine mögliche Selbstaussheilung verhindern können. Dysgnathien sind keine Krankheiten im engeren Sinne. Die Behandlungsindikation ergibt sich aus der erweiterten WHO-Definition für Gesundheit: „Gesundheit ist nicht allein das Freisein von Krankheit, sondern beinhaltet auch das psychosoziale Wohlbefinden“.

Ziel kieferorthopädischer Therapie ist im Einzelnen die *Verbesserung der Ästhetik und der Funktion* sowie die *Verhütung von Karies und Parodontalerkrankungen*. Letzteres wird durch die Beseitigung von Plaqueretentionsnischen und Gingivatraumata erreicht. Weiteres Ziel kieferorthopädischer Therapie ist die Verhütung von Zahntraumata sowie die Erkennung, Verhütung und Behandlung von Dysfunktionen des Kiefergelenks.

Kieferorthopädie und Mundgesundheit

Obwohl für die meisten gesundheitlichen Vorteile durch kieferorthopädische Therapie noch keine evidenzbasierten Ergebnisse vorliegen, kann bei Behandlung der folgenden Symptome von einer Verbesserung für die Zahn- und Mundgesundheit ausgegangen werden:

- vergrößerte sagittale Stufe und Rücklage des Unterkiefers →
- verbesserter Mundschluss und Umstellung von Mund- auf Nasenatmung
- Förderung der Schmelzremineralisation durch Speichelfilm
- Reduktion der Infekthäufigkeit
- Senkung des Risikos für Schnarchen und obstruktive Schlafapnoe
- geringeres Risiko für Zahntraumata, da Prominenz einzelner Schneidezähne reduziert wird
- Zahnengstand und Dystopie einzelner Zähne →
- verbesserte Plaqueentfernung, Karies- und Parodontitisprophylaxe durch natürliche Speichelumspülung und Bürstenreinigungsmöglichkeit
- offener Biss und Anomalien mit geringer Anzahl okklusaler Kontakte →
- verbesserte Kaufunktion mit erhöhter Boluszerkleinerung → geringere Plaqueanlagerung
- verbesserte S-Lautbildung.

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

Einleitung

Definition. Eine digitale Prozesskette ist als die räumliche und zeitliche Abfolge von funktional, physikalisch oder technisch zusammengehörigen Arbeitsschritten auf digitaler Basis definiert.

Digitale Prozesskette in der Kieferorthopädie. Die Digitalisierung des Lehr-, Lern- und Arbeitsprozesses hat auch in der Kieferorthopädie Einzug gehalten. Dies betrifft die Dokumentation und den Diagnose-, Behandlungsplanungs- und Designprozess kieferorthopädischer Apparaturen. Auch die interdisziplinäre Planung der orthognathen Chirurgie kann in den Digitalisierungsprozess einbezogen werden.

Die neue Qualität von 3D-bildgebenden Systemen wurde mit Volumen- und Gesichtsscans eingeleitet. Gegenwärtig werden digitale Prozessketten in Form von Einzelmodulen unter Verwendung digitaler Modelle entwickelt und angeboten, um praxisinterne Arbeitsabläufe zu präzisieren und den Laborprozess für Geräte effektiv mit dem Behandlungsprozess zu verbinden. Dieser Weg der virtuellen Planung ist eine Hilfe bei der Individualisierung des Behandlungsablaufes, kann sie jedoch nicht vollständig ersetzen. Die Entscheidungsfindung für den einzelnen Patienten unterliegt nach wie vor dem fachzahnärztlichen Wissen des Kieferorthopäden. Die künstliche Intelligenz (KI) kann, im Gegensatz zur Anwendung in den technischen Prozessketten, in der Medizin noch nicht der Heterogenität des Individuums gerecht werden. Dennoch kann die Verknüpfung digitaler Befundmodule den Entscheidungsprozess eingrenzen. Das digitale Design von Kiefermodellen mittels Oralscan und Überführung in ein großes Spektrum abnehmbarer und festsitzender kieferorthopädischer Apparaturen ist gegenwärtig herausragendes Merkmal der digitalen Kieferorthopädie.

Die Beschreibung digitaler Strategien im Fachgebiet wird der traditionellen Vorgehensweise in diesem Buch vorangestellt, um den Leser auf diese neuen Wege hinzuführen. Dabei wird auf die bisher erarbeiteten Me-

thoden und mögliche Erweiterungen der Prozesskette und ihrer Derivate eingegangen. Diese sind:

- Dokumentation
- Digitale Bildanalyse: Orthopantomogramm (OPG), digitale Volumentomografie, Kephallometrie und Weichteilanalyse
- Digitaler Oralscan, Datentransfer zum Druck oder stereolithografischen Fräsung des Gebissmodells
- Digitale Modellanalyse mit Platzanalyse, Angabe von Overjet, Overbite und Abweichung der Gebissymmetrie
- Design von abnehmbaren und Multibandapparaturen mit Kopplung an skelettale Verankerungselemente
- Computergestützte Behandlungsplanung und Fertigung (*Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing, CAD/CAM*) von Retainern
- Virtuelle Planung von Dysgnathieoperationen und Splint-Design für die orthognathe Chirurgie.

Dokumentation

Die Digitalisierung im Praxisalltag beginnt bei der Anmeldung und Patientenaufnahme. Dafür bringt die folgende Prozesskette zeitlichen Gewinn für den Patienten und den Kieferorthopäden:

- Neben der telefonischen Anmeldung besteht die Möglichkeit der Online-Anmeldung über ein Kontaktformular auf der Praxiswebseite
 - Inhalt sollte neben den Kontaktdaten der Grund des gewünschten Termins sein (Wie kann ich Ihnen helfen?)
 - Der Patient kann neben dem Vortrag seines Anliegens entsprechende Unterlagen hochladen und anfügen
- In der medizinischen Praxis wird nach Online-Anmeldung der *Anamnesebogen* zugesandt und zur Beantwortung und Rücksendung vor dem Konsultationstermin aufgefordert.
 - Werden in diesen Besonderheiten und spezifische Symptome angegeben, beginnt ein **Feedback-Mechanismus**, gesteuert durch das Hilfspersonal oder den Arzt. Damit wird einerseits die Diagnosefindung eingegrenzt

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

und andererseits Zeit für das persönliche Beratungsgespräch gewonnen.

- Ein ähnliches Vorgehen könnte auch für den kieferorthopädischen Patienten bei der Anamneserhebung (s. Befundblatt I im Anhang, S. 139) z. B. zur Spezifizierung von Allgemeinerkrankungen oder Vorbehandlungen hilfreich sein.
- Die Praxiswebseite ist auch im Vorfeld der Konsultation der geeignete Ort, um über diagnostische Maßnahmen, alternative Behandlungsarten, Geräte, Compliance, Mundhygiene, Nutzen und Risiken, die unterschiedliche Dauer der Behandlung und Retentionsmaßnahmen anschaulich hinzuweisen und aufzuklären.
- Die sich anschließende Dokumentation und Archivierung aller Patientendaten vor, während und nach der Behandlung ist Standard der karteiosen Patientenakte und wird in unterschiedlichem Umfang und Komfort angeboten.

Beratung und Erstellen der Befundunterlagen

Das Gespräch mit Eltern und Patienten ist zentraler Teil der individuellen Einstellung auf den Diagnose- und Behandlungsprozess. Die umfassende Vorbereitung (s. o.) via online ermöglicht eine Konzentration auf die Hauptaufgaben: Aufklärung, Ablauf und Alternativen der Behandlung, Geräteabfolge, Compliance und Retention.

Die Definition eines virtuellen Behandlungsziels ist zwar erst nach kompletter Digitalisierung aller Befunde möglich, sollte jedoch schon zum Erstgespräch Erwähnung finden und kann bei Zweifeln in einem 2. Termin angeboten werden. Einschränkung lehrt die tägliche Praxis, dass die simulierten Ergebnisse, wie sie schon länger von Schienenherstellern und Anbietern für die individualisierte Lingualtechnik angeboten werden, nicht immer den primär zu erreichenden Abschlussbefunden entsprechen. Eine entsprechende Risikoaufklärung und Dämpfung übersteigter Erwartungen ist deshalb angebracht.

Befunderhebung

- **Intraoraler Scan und Modellherstellung:**
 - Für die exakte räumliche Erfassung werden direkte und indirekte optische Oberflächen-Scan-Verfahren eingesetzt. Dabei werden Oberflächenpunkte zu einem Oberflächennetz verbunden. Die Genauigkeit liegt bei 1/100 mm.
 - Während bisher Modellscanner hauptsächlich für die Implantatprothetik angewandt werden, stellt die Erfassung der beiden Zahnbögen und Alveolarfortsätze in der Kieferorthopädie eine wesentliche Erweiterung für die zahnmedizinischen Abformmethoden dar (Abb. 1.1).
 - Vorteile gegenüber der konventionellen Abdrucknahme sind die stark verkürzte Dauer von ca. 3 Minuten pro Kiefer, Vermeidung des Würgereizes und die Eignung für den Einsatz bei Patienten mit begrenzter Compliance.
- **Mit der STL-Schnittstelle erfolgt die CAD/CAM-Überführung.**
 - Dafür werden Rapid-Prototyping- oder 3D-Photopolymerisationsverfahren angewandt.
 - Bei Letzteren wird mittels einer Lichtquelle aus einer Harzwanne Schicht für Schicht des Modells gedruckt (Abb. 1.2).
 - Das so gewonnene Modell ist als Ersatz des bisherigen Herstellungsverfahrens für eine erste Einschätzung und Aufklärung sinnvoll. Der Vorteil der Digitalisierung liegt jedoch in der weiteren virtuellen Planung.



Abb. 1.1 **Klinische Anwendung eines Intraoral-scanners** (hier 3shape TRIOS). (Foto: Gabriele Bellmann, Universitätsklinikum Dresden)

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

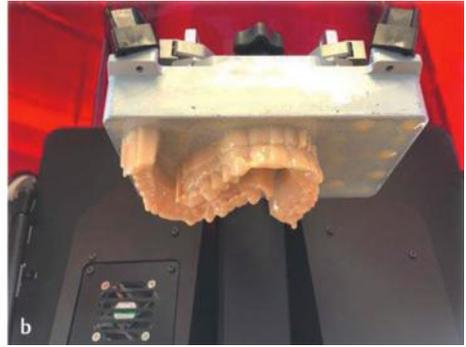
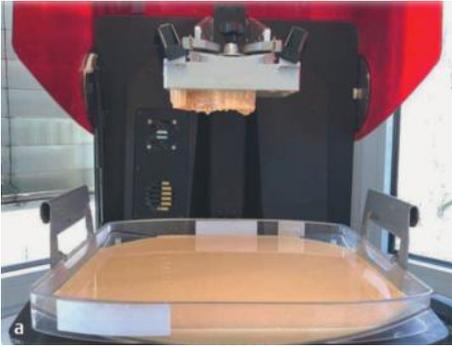


Abb. 1.2 CAD/CAM-Technologie

- a** Drucken eines Modells nach dem Intraoralscan. Das halbfertige Modell wird abgesenkt und Schicht für Schicht mittels Lasterstrahl aufgetragen.
b Fertige Modelle nach dem Druck.

kann die Kongruenz zur Gesichtsmitte geprüft werden. Die mittlere Okklusionsebene wird als Hilfsmittel zur Ausrichtung der Kauebene genutzt (Abb. 1.3).

Virtuelle Erstellung diagnostischer und therapeutischer Unterlagen

Im Folgenden wird auszugsweise der Algorithmus der *Imaging*-Software OnyxCeph für die virtuelle Planung kieferorthopädischer Behandlungen dargestellt. Die Autoren betonen eingangs, dass alle verfügbaren Funktionen des Programms lediglich unterstützend bei der Diagnosefindung mitwirken können. Letztlich müssen alle Diagnosen und die darauf aufbauenden Therapieansätze auf der Erfahrung und den Kenntnissen des Arztes beruhen, sein diagnostisches Urteil kann nicht ersetzt werden.

Datenimport

Das Modell erscheint in allen 3 Modellebenen. In Höhe der Okklusionsebene wird mit Hilfe der Raphe-Median-Linie die Übereinstimmung von skelettaler und dentaler Mittellinie geprüft. Durch Hinzufügen des En-face-Fotos

Modelle virtuell beschneiden, trimmen und sockeln

In diesem Schritt wird das Modell entsprechend der bisherigen Handhabung gesockelt und nach den 3 Modellebenen ausgerichtet. Dabei werden zur Betonung der Malokklusion die Kronen weiß und der Rest rot eingefärbt.

Modelle segmentieren, separieren und komplettieren

Mit diesem Modul wird ein Hauptprinzip der virtuellen Planung, die Segmentierung des Kiefers in Einzelzähne bzw. Kronen, umgesetzt.

- Zunächst wird für jede Zahnkrone die Gingivagrenze automatisch eingeblendet und kann erforderlichenfalls korrigiert werden.
- Im Schritt „Separieren“ wird jede Krone als 3D-Objekt herausgearbeitet.
- Die Zahnkronen werden im Schritt „Komplettierung“ zu vollständigen Einzelzahnob-

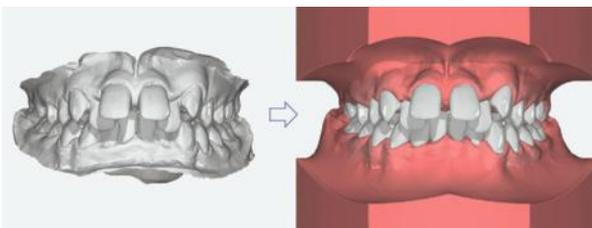


Abb. 1.3 Anbringen von Sockelschalen (nach Hinz) an das virtuelle Modell (OnyxCeph)

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

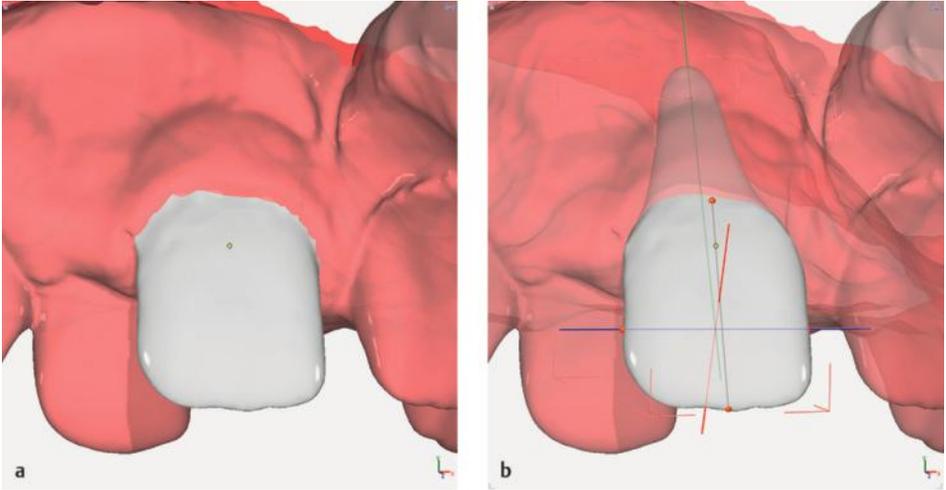


Abb. 1.4 Segmentieren des Kiefers

- a Segmentieren, Kronen vereinzeln (OnyxCeph)
- b Segmentieren, Kronen vervollständigen und Referenzpunkte prüfen (OnyxCeph)

jekten ausgeformt. Als Hilfe kann auch eine sogenannte Musterzahnbibliothek genutzt werden.

- Wichtige Kronenreferenzpunkte sind die Kontaktpunkte, der Inzisal- und der Gingivapunkt (Abb. 1.4). Damit wird ein Koordinatensystem mit Festlegung von Bogenachse,

Kronenachse und Vestibularachse gebildet. Dieses ist für alle Einzelzahnbewegungen (Angulation, Torque, Rotation und Mesiodistalbewegungen) nutzbar (Abb. 1.5).

Modellauswertung

Mit diesem Schritt erfolgt die Modellvermessung im Milch-, Wechsel- und bleibenden Gebiss mit Hilfe der unterschiedlichen Messmethoden (s. Modellanalyse, S. 127) Zahnbreiten und Bogensegmente lassen sich durch die Einzelzahnsegmentierung weitaus

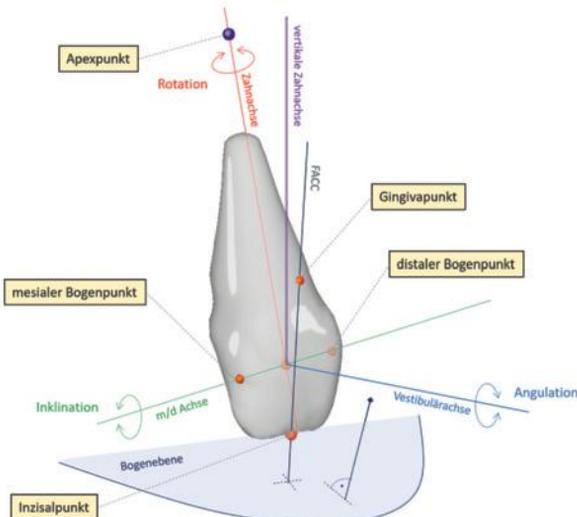


Abb. 1.5 Segmentieren, modulübergreifend genutztes Koordinatensystem (OnyxCeph)

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

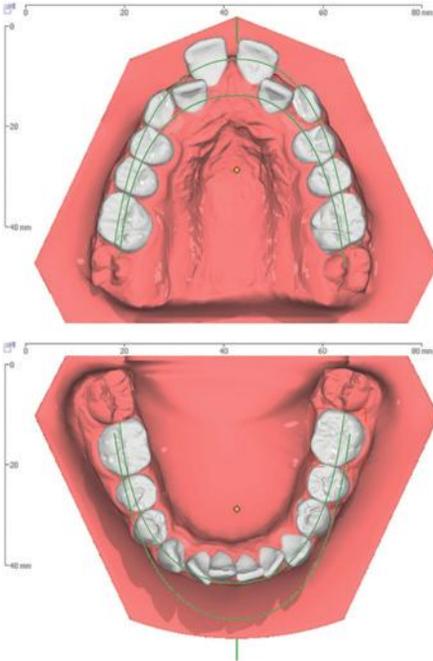


Abb. 1.6 Platzanalyse am Anfangsmodell mit idealem Zahnbogen und Setup
Grüne Linien: Zeichnung des Gegenkiefers (OnyxCeph)

präziser durchführen als z. B. mittels Messschieber und Orthokreuz (Abb. 1.6). Der Entwickler der Software gibt an, dass auch Indices zur Behandlungsnotwendigkeit und -erfolg, wie IOTN (Index of Orthodontic Treatment Need) und PAR (Peer Assessment Rating), erhoben werden können. Dafür ist die exakte Okklusion eine Grundvoraussetzung.

Virtuelles Behandlungsziel definieren

Im Modul „V.T.O. 3D“ werden vom Softwareentwickler ein Ziel-Setup mit verschiedenen automatischen und interaktiven Zahnstellungskorrekturen auf Basis des segmentierten digitalen Modells angeboten (Abb. 1.7).

Die Anordnung der segmentierten Einzelzähne folgt einer mesiodistalen Ausrichtung entsprechend einer Coreline, die zwischen

den mesialen Mittelpunkten der Frontzähne und den distalen Randpunkten der hinteren Seitenzähne entsprechend der Wilson-Kurve mit individuellem Bogenradius verläuft. Auf Grundlage des mathematischen Gesamtmodells können alle Einzelzahnbewegungen reproduzierbar kontrolliert und einzelne Korrekturmaßnahmen, wie Nivellierung, Angulation und Inklination, abgebildet und für die Behandlungsstrategie nutzbar gemacht werden. Der Softwareanbieter weist an dieser Stelle ausdrücklich darauf hin, dass ein Unterschied zwischen numerischer Simulation und den tatsächlichen orthodontischen und kieferorthopädischen Umsetzungsmöglichkeiten besteht. Das virtuell aufgestellte Behandlungsziel kann nur dann als Referenz für das tatsächliche Ziel dienen, wenn der Kieferorthopäde die Übertragung auf Grundlage der anatomischen Gegebenheiten, insbesondere der parodontalen und Weichgewebsvoraussetzungen, sowie der Wachstumsdynamik und Grenzen orthodontischer Krafteinleitung geprüft hat.

Die *Visualized Treatment Objective*-Methode (VTO) wurde u. a. von Ricketts eingeführt und beinhaltet eine Wachstumsprognose am Fernröntgenseitenbild (FRS) über einen Zeitraum von zwei Jahren für den knöchernen Schädel und seine Weichteilbedeckung, basierend auf dem individuellen genetischen Wachstumsmuster. Eine solche Planung ist vor allem für die kieferorthopädische Behandlung während des Wachstums essenziell. Wenn einerseits Modellauswertung und Ziel-Setup dreidimensional erfolgen, sollte andererseits die Auswertung bildgebender Verfahren vom 2D zum 3D wechseln. Für den knöchernen Schädel bietet sich das digitale Volumentomogramm (DVT) an (s. DVT). Eine automatisierte Auswertung der ca. 35 Messpunkte gestaltet sich z. Zt. schwierig und die Messfehlerbreite ist größer als bei manuellem Setzen der Landmarken. Zur Vermeidung einer Erhöhung der Strahlendosis ist die weitere Verwendung der 2D-Fernröntgenaufnahme unter bestimmten Voraussetzungen vertretbar:

- Ab dem 10. Lebensjahr ist das transversale Gesichtsschädelwachstum zu 90–95% abge-

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

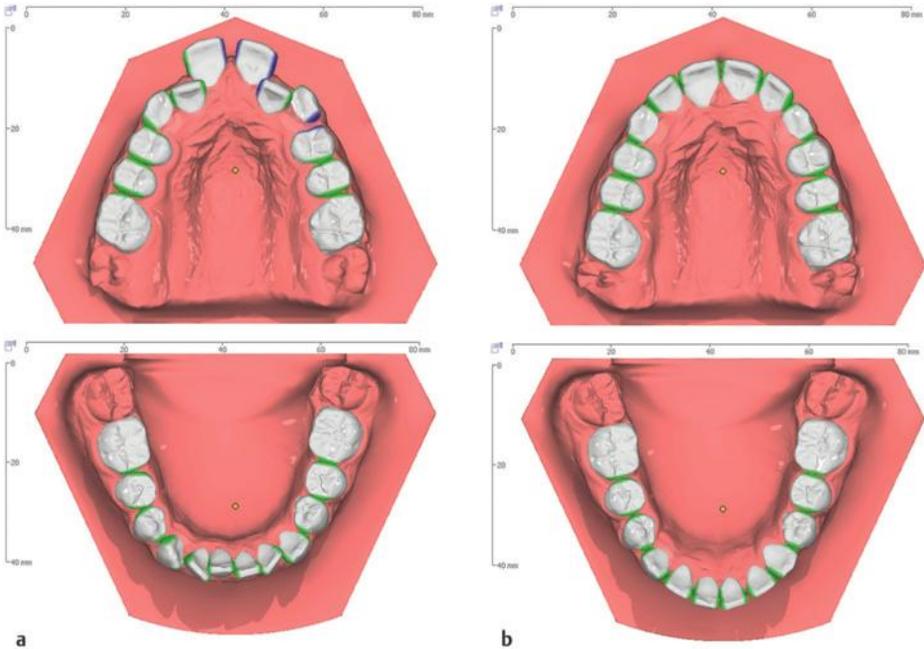


Abb. 1.7 Definition des virtuellen Behandlungsziels

a Platzbedarf und -angebot, Markierung der Kontaktpunkte (grün) und Platzüberschuss (blau) (OnyxCeph)

b Diagnostisches Setup mit der OnyxCeph-Modellanalyse 3D

schlossen bei ausstehenden 35 % in sagittal/vertikaler Richtung

- Berücksichtigung der individuellen Wachstumsrichtung (s. Wachstumsrichtung, S. 120).
- Einbeziehung der Harmoniebox nach Hasund und Segner (s. Harmoniebox, S. 122).
- Übertragung der aus dem FRS errechneten vorderen und seitlichen Grenzlinie des unteren Zahnbogens auf das Ausgangsmodell und 3D Ziel-Setup (s. Kopplung der Modellanalyse, S. 134)

Das zweidimensionale FRS mit seinen Ebenen sagittal und vertikal hat jedoch mit dem Fehlen der transversalen Ebene einen weiteren entscheidenden Nachteil. Für den Kreuzbiss, die Non-Okklusion und asymmetrische Kieferkompressionen kann das Fernröntgenbild in a. p.-Ausrichtung einen diagnostischen Wert bringen. Das DVT ist auch für diese zusätzlichen Aussagen nutzbar.

Diese Vorgaben sind für den knöchernen Gesichtsschädel ausreichend, nicht aber für seine Weichteilbedeckung. Bekanntlich folgen die Weichteile nicht adäquat den orthodontischen Veränderungen des Zahnbogens und des Alveolarfortsatzes. Die fotografischen En-face- und Profilaufnahmen können nur den Ausgangszustand wiedergeben und sind nicht für ein VTO tauglich. Negative Weichteilveränderungen in Form schmalen Lippenrotes, vergrößerten Naso-Labial-Winkels und Verstreichens der Eckzahnprominenz sind besonders nach Extraktionstherapie bei Nichtbeachtung der Entscheidungskriterien zu beobachten. Diese verstärken sich noch mit zunehmender Konkavisierung und Verlängerung des unteren Gesichtsdrittels (s. Knochenbildungsarten, S. 25). Die Einbeziehung eines Gesichtsscans und Ergebnisorientierung an Normwerten ist in die weitere Entwicklung der digitalisierten Kieferorthopädie unbedingt einzubeziehen (Abb. 1.8) (s. Gesichtsscanning, S. 125). Wie bereits beschrieben, führt die übermäßige Bewertung virtueller Modellzielplanung ohne ausreichende Einbeziehung individuel-

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

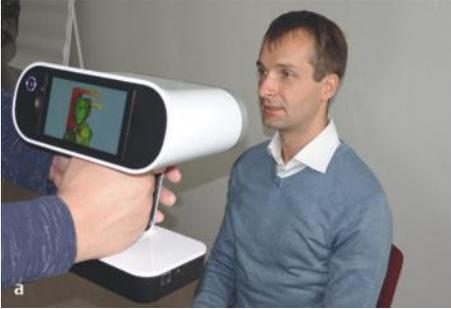


Abb. 1.8 Gesichtsscan

- a** Gesichtsscan mit dem Professional Handheld 3D Scanner (Artec 3D Leo)
b Gesichtsscan

ler skelettaler Bedingungen zu Risiken für eine fehlerhafte Indikation, Verlängerung der Behandlung und Patientenunzufriedenheit. Häufig notwendige zusätzliche Aligner für die Schienenbehandlung oder zusätzliche Bögen bei der Lingualbehandlung können ihre Ursachen nicht nur in der fehlerhaften Modellplanung, sondern auch im „Zahnbogen-Environment“ haben.

MERKE

Die Perfektion der virtuellen 3D Modell-Zielplanung verleitet den unerfahrenen und nicht spezialisierten Behandler, diese als Maxime für die Behandlung zu nutzen, ohne die grundsätzliche Planungskette zu berücksichtigen.

Bracketposition am Malokklusionsmodell und am Ziel-Setup planen

In diesem Modul können den Zahnkrone Brackets aus der systemeigenen Bracketbibliothek zugewiesen werden. Die Planung kann sowohl am virtuellen Anfangsmodell als auch am Zielmodell erfolgen (Abb. 1.9). Für die Lingualtechnik sollte die Positionierung ausschließlich am Ziel-Setup erfolgen, um optimale Distanzen für den Straightwire-Zielbogen einzuhalten.

Die Platzierung erfolgt entsprechend der im Modul „Segmentierung“ zugewiesenen Klebehöhen, es können jedoch auch andere Systeme (MBT, Andrews u. a.) angewandt werden. Einzelne Positionierungen können manuell vom Anwender korrigiert und die Ausrichtung am geraden Bogen als Vorschau

wiedergegeben werden. Da das Ausmaß notwendiger Zahnbewegungen zwischen virtuellem Anfangs- und Zielmodell bekannt ist, sollte eine Überprüfung der Machbarkeit, Anzahl der Bögen und orthodontischen Kraftgröße möglich sein.

Indirektes Kleben, bukkal und lingual auf virtueller Basis, Bogenindividualisierung

Für die Übertragung werden unterschiedliche Verfahren angewandt:

- Tiefziehschienen oder Silikonschlüssel für den Zahnkranz, Gruppen oder Einzelzähne mit virtuell geplanten Fassungen für die platzierten Brackets. Anschließend Bestückung der *gedruckten Schiene* mit physischen Brackets. Probleme können das Herausfallen der Brackets vor Platzierung oder fehlende Passfähigkeit aufgrund von Unterschnitten der Brackets sein.
- Übertragungsschienen können auch extra entworfen und aus flexiblem Material im *3D-Druck* gefertigt werden. Hier gibt es jedoch für die Einarbeitung von Extraangulation und Extratorque noch Schwierigkeiten bei der Umsetzung. Die vorgeschlagene Positionierung der Brackets mit einer unterschiedlichen Kleberstärke inzisal und gingival birgt Mängel bei notwendiger Umpositionierung und Wiederbefestigung in sich.
- Für stark rotierte Einzelzähne und solche, die im Anfangsmodell nicht zugänglich sind, kann im Modul „Splint 3D“ das Bracket über einen Einzel-jig, der formschlüssig auf der Krone aufsitzt, gebondet werden (Abb. 1.9 d). Eine individuelle Bogengestaltung ist besonders für die Lingualtechnik vorteilhaft. Hier-

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

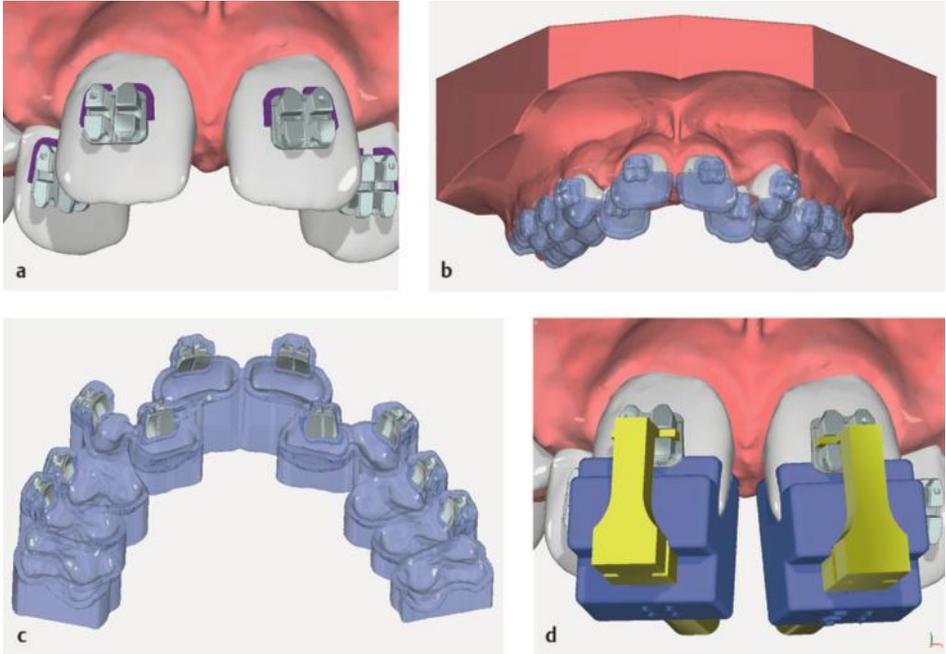


Abb. 1.9 Planen der Bracketposition

- a Virtuelles Platzieren der Brackets auf den bukkalen Kronenflächen (OnyxCeph)
- b Gedruckte Übertragungsschienen für die indirekte Klebtechnik
- c Mit Brackets beladene Übertragungsschiene
- d Übertragungshilfe für Einzelbrackets

für wird der orthodontische Bogen am Zielmodell den Bracketslots angepasst und kann dann in verschiedener Stärke und Materialzusammensetzung gedruckt oder als Koordinatenfile im CSV-Dateiformat zur Ansteuerung von Biegemaschinen exportiert werden. Dieses Verfahren ist jedoch gegenwärtig nicht voll umsetzbar.

Der Softwareentwickler schlägt für Differenzen zwischen Ziel-Setup und erreichtem Endergebnis im Modul „Bracket-Erase-Verfahren“ die virtuelle Bracketentfernung im Zwischen-Oralscan und das anschließende Finishing mittels Schienen vor. Das Verlassen der Edgewise-Technik und Umstieg auf die Schientechnik ist zu hinterfragen (s. u.)

Spezielle Digitalisierung für die Lingualtechnik

Anbieter für die sogenannte voll individualisierte Lingualtechnik (3 M Treatment Management Portal) arbeiten ebenfalls schon seit geraumer Zeit auf virtueller Grundlage, wobei der Fertigungsprozess für die individuell gegossenen Brackets und die mit Biegeköpfen hergestellten Bögen (außer Nickel-Titan-Anfangsnivellierungsbögen) angenommen ist.

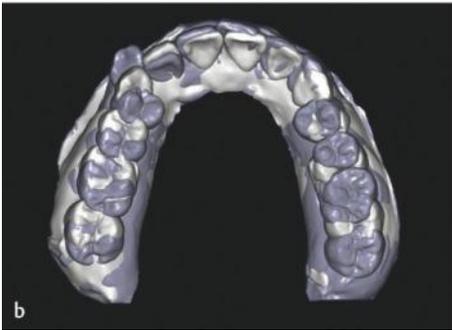
Nach dem Oralscan werden dem Anwender auf Anforderung Anfangs- und Zielmodell online zugesandt (Abb. 1.10). Hierbei kann man durch Überlagerung des Ziel-Setups mit dem Ausgangszustand das Ausmaß der notwendigen Umformungen einschätzen. Dies ist besonders von Vorteil, wenn man die virtuelle Überlagerung für den Extraktions- und Non-ex-Fall gegenüberstellen kann. Nach Freigabe werden dann der *Brackettray für das indirekte Bonding* und die entsprechende Bogensequenz erstellt. Dies bedeutet, dass der Kieferorthopäde ab Freigabe die Umsetzung der Therapieplanung an den Hersteller dele-

Digitalisierung in der Kieferorthopädie



Abb. 1.10 Digitalisierung für die Lingualtechnik

- a Virtuelle Überlagerung von Anfangsmodell (blaugrau) und Setup für das Behandlungsziel. Prämolarenextraktion (3 M Treatment Management Portal)
- b Überlagerung des Oberkiefermodells
- c Überlagerung des Unterkiefermodells



giert. Aus der eigenen Erfahrung sind nicht selten Zusatzbögen für das Finishing erforderlich.

Vergleicht man dieses Vorgehen mit dem zuvor dargestellten Verfahren (OnyxCeph), so bleibt der Planungsprozess bei Letzterem durch Nutzung der Module einschließlich der Bogenkonfiguration für die Lingualtechnik mit anschließendem Drucken beim Anwender. Die letztlich auch hier teilweise vorhandenen Abweichungen des Endergebnisses vom virtuell geplanten Ziel-Setup sollen dann mittels erwähnter Mini-Schienteknik kompensiert werden. Schwächen der Schienteknik sind vor allem trotz Mehrfachbuttons Derotationen und vertikale Zahnbewegungen. Aus diesem Grund ist es zu überlegen, ob (abgesehen von zusätzlichen Oralscans) dem Fortsetzen der festsitzenden Technik mit Extrabiegungen oder zusätzlichen Bögen (Lingualtechnik) der Vorzug zu geben ist.

Letztlich ist es der Empirie mit dem Lernen aus eigenen Fehlern des Spezialisten zu verdanken, eine effektive Therapieplanung mit optimalem Ergebnis zu erreichen. Es stehen sich das Fertigprodukt, vor allem in der Lingual- und Schienteknik, und das Softwareangebot zur Erarbeitung von Einzelschritten im Modulsystem gegenüber. Beide Prozessketten können im Einzelfall ihre Berechtigung haben und nebeneinander Anwendung finden. In beiden Systemen fehlt z. T. noch die Digitalisierung der therapiebedingten Weichteilveränderung. Im virtuellen Modulsystem kann die Zusammenfassung von Einzelbefunden im Sinne der Wichtung, z. B. für oder gegen Lückenöffnung und Extraktions- oder Non-ex-Fall, die Therapieplanung zeitlich und ökonomisch optimieren helfen. Die Entwicklung und Anwendung von KI-Techniken ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine Alternative und wird der Individualität des Patienten nicht gerecht.

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

MERKE

Digitalisierung in der Kieferorthopädie bedeutet keine Automatisierung des Algorithmus von Therapieplanungs- und Umsetzungsschritten und bedarf einer ständigen Kontrolle, einerseits der Nacharbeit bei fehlender Korrektheit durch Bögen und Schienen der Anbieter, andererseits der Korrektur eigener Therapieplanungen.

Fertigung abnehmbarer Geräte, Schienen und Retainer

Das 3D-Druckverfahren kann auch für die Herstellung von kieferorthopädischen *Platten*, *Aktivatoren* und *Schienen* aus biokompatiblen Werkstoffen genutzt werden. Zunächst

erfolgt die Planung des Gerätes auf Basis des Modells und anschließend der Druck. Metallische Bestandteile können im Sinterverfahren hergestellt oder vorgefertigte Konstruktionselemente wie Haken, Dehnschrauben und Bügel im virtuellen Design über Platzhalter integriert werden. Mit einem Modul der OnyxCeph-Software können Bänder, die automatisch an den ausgewählten Kronen platziert werden, mit Verbindungsteilen einer erweiterbaren 3D-Komponentenbibliothek (z. B. Anbindung einer Hyrachschaube an die Bänder der GNE-Apparatur, s. Abb. 1.11), komplettiert werden. Diese Konstruktion kann dann an die jeweilige Herstellungstechnologie exportiert werden.

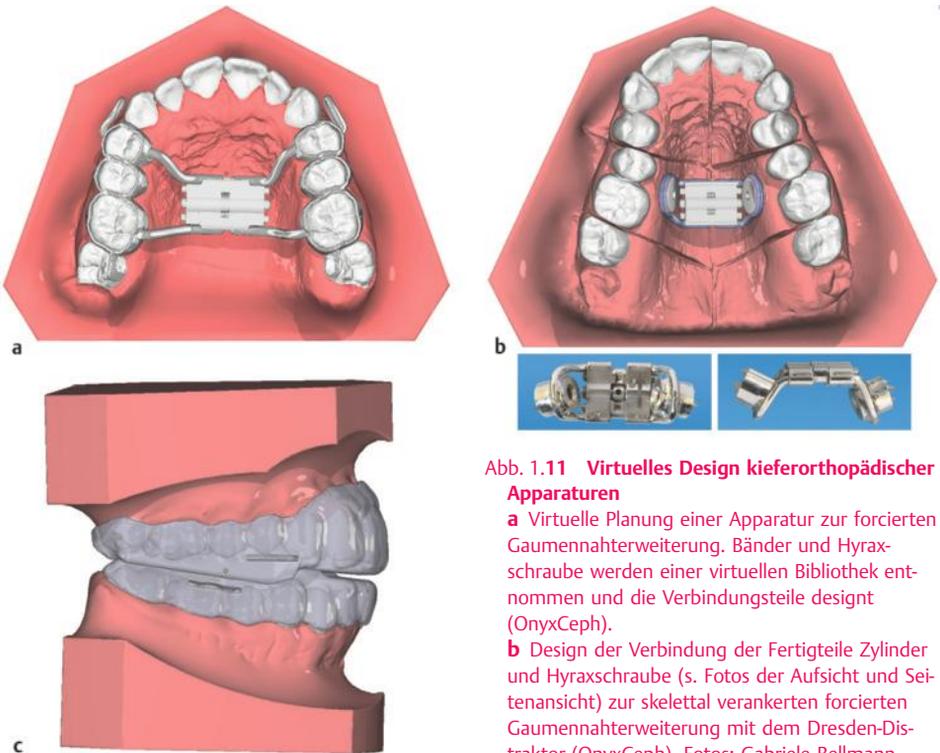


Abb. 1.11 Virtuelles Design kieferorthopädischer Apparaturen

a Virtuelle Planung einer Apparatur zur forcierten Gaumennahterweiterung. Bänder und Hyrachschaube werden einer virtuellen Bibliothek entnommen und die Verbindungsteile designt (OnyxCeph).

b Design der Verbindung der Fertigteile Zylinder und Hyrachschaube (s. Fotos der Aufsicht und Seitenansicht) zur skelettal verankerten forcierten Gaumennahterweiterung mit dem Dresden-Distraktor (OnyxCeph). Fotos: Gabriele Bellmann, Universitätsklinikum Dresden

c Virtuelles Design einer Protrusionsschiene zur symptomatischen Behandlung des obstruktiven Schlafapnoesyndroms (s. S. 378). Die Metallhaken für den elastischen Zug des Unterkiefers nach anterior müssen noch eingefügt werden (s. Markierung) (OnyxCeph).

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

Die Schienenherstellung für die Alignertherapie erfolgt bei den Großanbietern schon seit längerer Zeit über das *3D-Druckverfahren* (s. Invisalign-Verfahren, S. 202). Die Sicherheit der stufenweisen orthodontischen Korrektur ist jedoch nicht allein vom Material und dessen Passfähigkeit abhängig, sondern auch von auf den Zähnen angebrachten Attachments und sogenannten Power-Ridges in den Schienen. Beides soll die Bewegungsmechanik optimieren. Dieses Ziel kann jedoch in bestimmten Fällen (s. o.) besser mit der Multibandapparatur erreicht werden. Die im 3D-Druckverfahren hergestellten Schienen bedeuten einerseits einen geringeren Materialeinsatz und zeitlichen Aufwand gegenüber dem Tiefziehverfahren, andererseits ist der optimale Einsatz für die Alignertherapie von der Korrektheit des Aufbringens zusätzlicher Composite-Retentionsbuttons bei Erhalt der Schienenpassfähigkeit abhängig. Ohne Frage ist der 3D-Druck der Schienen für die Retention des Behandlungsergebnisses optimal und wird durch den Druck vor Abnahme der Multibandapparatur komplettiert (s. o. Erase-Verfahren).

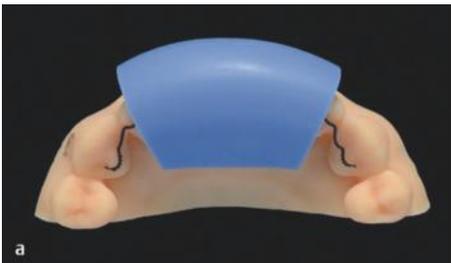
Festsitzende *Retainer* für das Frontzahnggebiet werden ebenfalls im *3D-Druckverfahren* angeboten. Sie haben gegenüber den konventionell im Labor gebogenen Retainern den Vorteil, dass sie in der virtuellen Vorbereitung durch zusätzliche Biegungen verlängert werden können, wodurch die Retentions-

fläche vergrößert wird (Memotain, s. Abb. 1.12). Da Retainer in den meisten Fällen permanent an den Lingual- bzw. Palatinalflächen der Frontzähne verbleiben sollen, ist eine Dauerstabilität von besonderer Bedeutung.

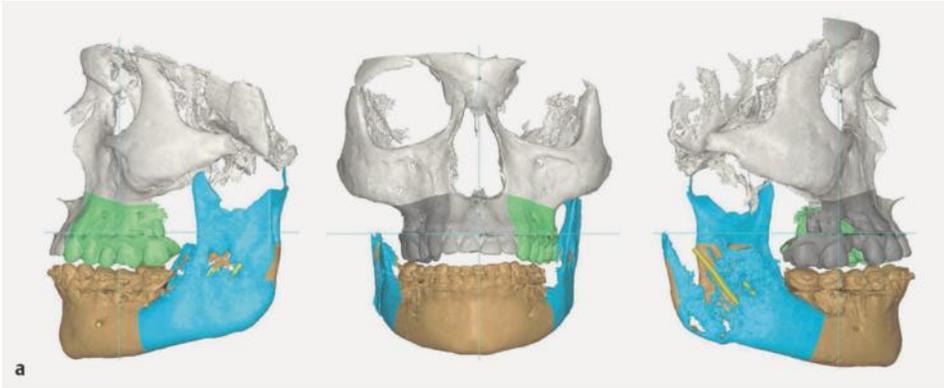
Kieferchirurgische Behandlungsplanung im Rahmen der Kombinationstherapie

Auf der Grundlage von 3D-Bilddaten, wie DVT, CT und MRT, werden dreidimensionale Modelle des knöchernen und Weichteilschädels erstellt. Mit der angebotenen Software können nun *virtuell Operationsplanung*, Osteotomien, Distraktor-Planung und - mit Hilfe bestimmter Module - z. B. Unterkiefer-Rekonstruktionen vorgenommen werden. Bei Möglichkeit zur Weichteilsimulation und mithilfe eines Photomapping-Tools (Materialise/KLS Martin Group) lassen sich Ausgangs- und Endzustand simulieren. Die Planung kann durch Import und Fusionierung zusätzlicher Bilddaten (z. B. aus optischen Scans, Modellen und Fotos) abgesichert werden. Im Beispielfall eines Patienten mit einem offenen Biss und Klasse-III-Morphologie wird das Vorgehen mit Unterkieferosteotomie und Segmentosteotomie im Oberkiefer dargestellt (Abb. 1.13) In jedem Fall sollte die Fossa-Condylus-Beziehung erhalten und operativ fixiert werden.

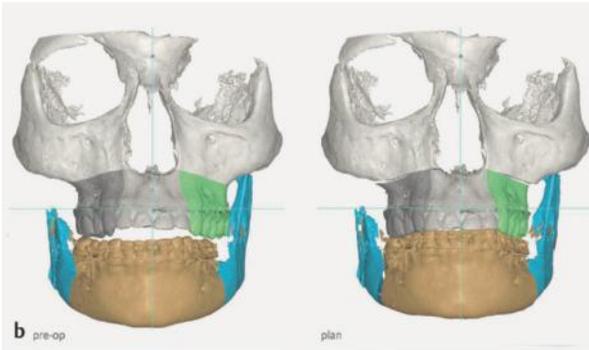
Abb. 1.12 **Gedruckter Retainer**
a mit Übertragungskappe, **b** auf dem Modell
 (Memotain). Foto: Gabriele Bellmann, Universitäts-
 klinikum Dresden



Digitalisierung in der Kieferorthopädie

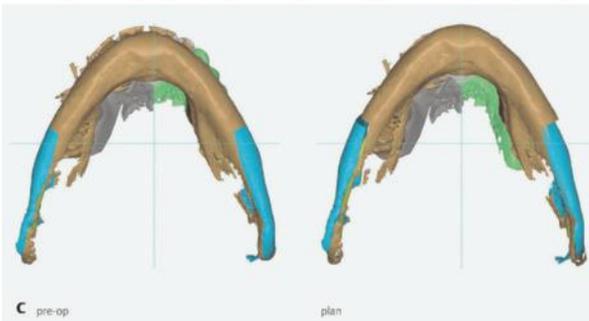


a



b pre-op

plan



c pre-op

plan

Abb. 1.13 a – c **Virtuelles Design für eine Dysgnathieoperation** bei einem Patienten mit offenem Biss.
a Zustand präoperativ
b präoperativ (links) und Zielplanung (rechts)
c Schnittführung am Unterkiefer

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

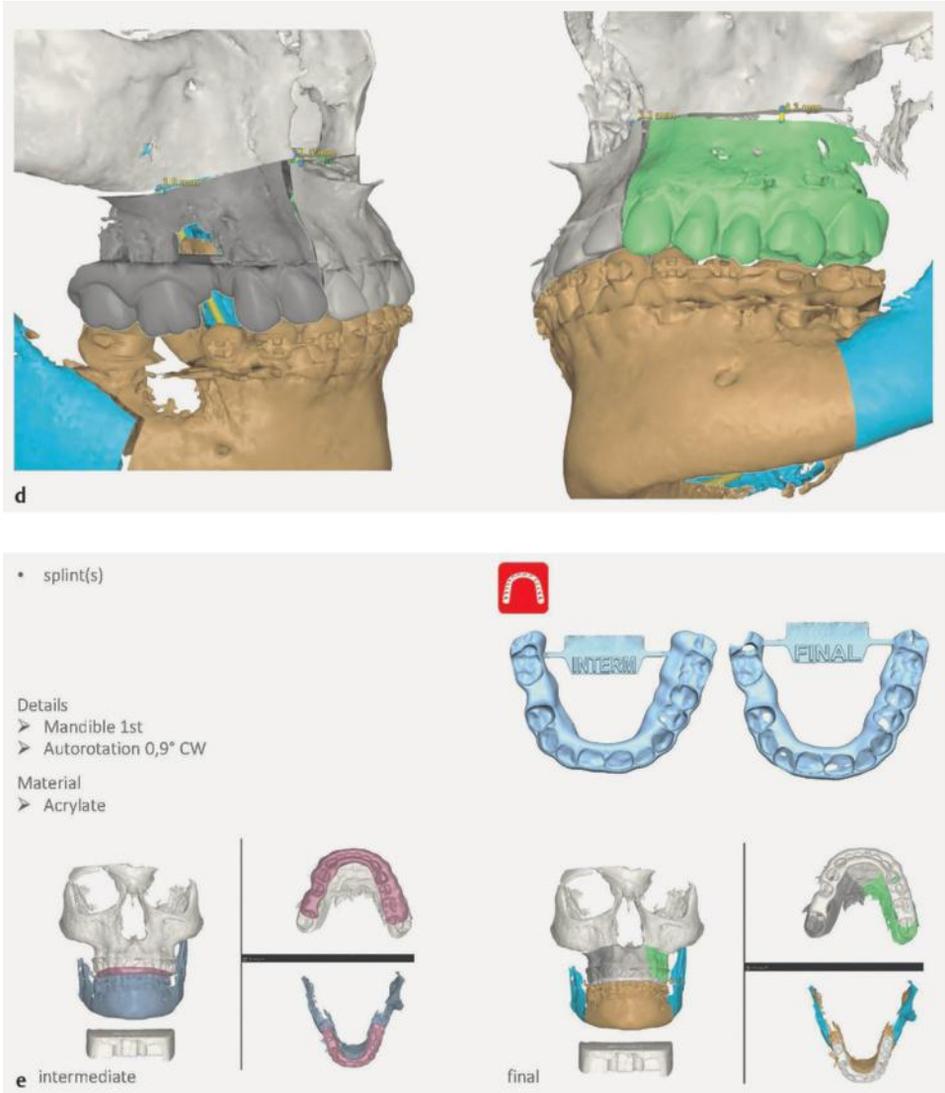


Abb. 1.13 d – e Virtuelles Design für eine Dysgnathieoperation bei einem Patienten mit offenem Biss.

d Schnittführung für Segmentosteotomie am Oberkiefer, rechts und links

e Druckvorlage für Zwischensplint (unten links und oben links), Druckvorlage für 2. Splint (unten rechts und oben rechts). Design KLS Martin Group

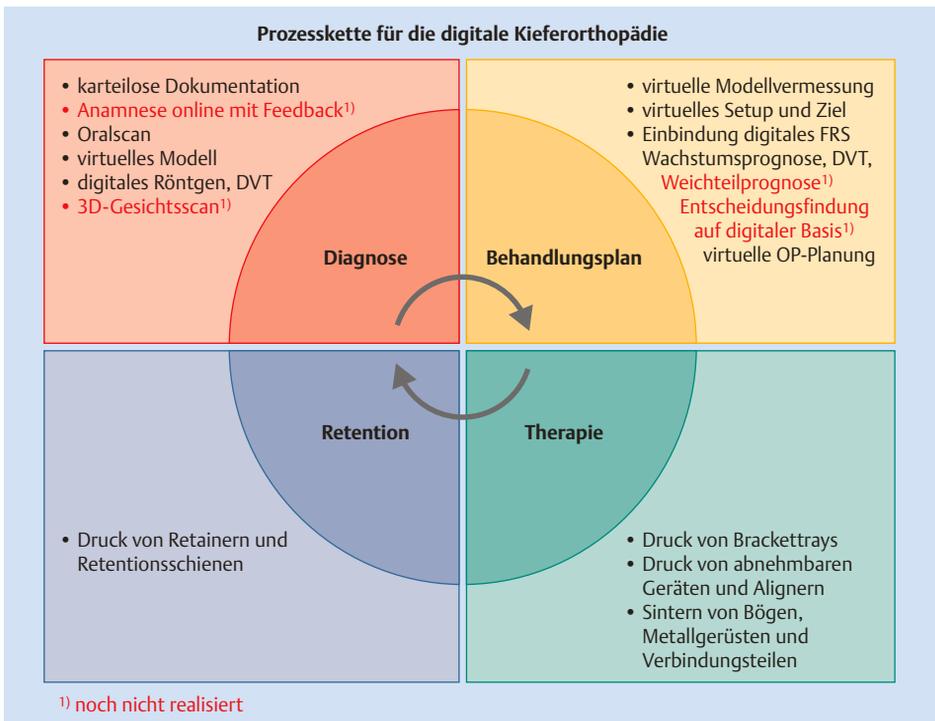
Digitalisierung in der Kieferorthopädie

Zusammenfassung

Die Digitalisierung der gesamten Dokumentation zur Anmeldung des Patienten, Anamnese, Befunderhebung, Behandlungsplanung und -ablauf ist Bestandteil einer lückenlosen Prozesskette (Abb. 1.14). Während die karteilose Dokumentation des Diagnose- und Behandlungsprozesses schon weitestgehend in den Praxen umgesetzt wird, bedarf es hinsichtlich der Patientenaufnahme via Webseite und Feedback-Mechanismus beim Versenden des Anamnesebogens weiterer Prozessbausteine. Auch die digitale Übermittlung von Behandlungsunterlagen an die Kassen und zur Begutachtung, wie dies bereits bei der kassenzahnärztlichen Abrechnung umgesetzt wird, bedeutet Zeitersparnis und Datensicherheit.

Bei der Befunderhebung ist das Oralscanverfahren als größter Digitalisierungsvorteil zu werten. Es kommt dem Patientenkomfort und der Effizienz der kieferorthopädischen Behandlung zugute, sowohl im Hinblick auf die Einsparung von Zeit- und Laborressourcen als auch der Präzisierung der Modellvermessung. Es sei schon an dieser Stelle angemerkt, dass den Einsparungen hohe Investitionen in Soft- und Hardware gegenüberstehen, welche vom Kieferorthopäden in eigener Niederlassung zu tragen sind. Der Perfektion bei der virtuellen 3D-Modellherstellung und Zielplanung stehen die Nachteile der 2D-Darstellung von OPG, FRS und Fotostat gegenüber. Die digitale Volumentomografie zur radiografischen 3D-Wiedergabe ist wegen erhöhter Strahlenbelastung in der Mehrzahl der Fälle auszuschließen.

Abb. 1.14 Prozesskette für die digitale Kieferorthopädie



Digitalisierung in der Kieferorthopädie

ßen und kann nur bei Primärindikation in die allgemeine Befunderhebung einbezogen werden. Dagegen kann zukünftig die Auswertung von *Gesichtsscans* zu Beginn der Behandlung und Überlagerung mit Ziel-Scans aus einer Normwertbibliothek die Entscheidungsfindung z. B. für oder gegen eine Extraktionstherapie unterstützen.

Das Platzieren der Brackets am virtuellen Modell und das anschließende indirekte Bonding mit Splinten, welche mit Brackets beladen werden, erhöht die Präzision für die Gerade-Bogen-Technik und hilft, vor allem Klebefehler im Seitenzahngebiet, zu vermeiden. Probleme dieser Technik treten z. Zt. noch durch fehlende Passfähigkeit und Herausfallen von Brackets mit ausgeprägten Unterschnitten auf.

Die Verfahren für das Drucken bzw. Sintern von orthodontischen Bogensequenzen sind noch nicht ausgereift, sodass vor allem für die Lingualtechniken Biegeköpfe das Mittel

der Wahl sind. Dagegen können kieferorthopädische Platten, Aktivatoren und Aligner hervorragend aus biokompatiblen Werkstoffen hergestellt werden. Vorgefertigte metallische Konstruktionselemente können über Platzhalter in die Apparatur eingearbeitet werden.

Das Drucken festsitzender Retainer ermöglicht durch Extrabiegungen und präzise Anpassung im Approximalbereich eine Vergrößerung der Klebeflächen und einen höheren Tragekomfort durch flache Gestaltung.

Die virtuelle 3D-Operationsplanung in der orthognathen Chirurgie konnte in den letzten Jahren wesentlich verbessert werden. Nicht nur Schnittführung und Simulation des Endzustandes, sondern auch Rekonstruktionen und Weichteilveränderungen können virtuell geplant und sichtbar gemacht werden.

Digitalisierung in der Kieferorthopädie

Vor- und Nachteile der Digitalisierung kieferorthopädischer Prozesse

Tab. 1.2 Vor- und Nachteile der Digitalisierung kieferorthopädischer Prozesse.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ● Zeiteinsparung bei Abformung und Laborprozessen ● Höhere Präzision bei der Modellgewinnung und Modellanalyse ● Vermeidung individueller Fehler bei Abformung und Modellauswertung ● Virtuelle Simulation der Zielplanung ● Druck von abnehmbaren Apparaturen, Alignern und Sinterung von Metallelementen mit hoher Passgenauigkeit ● Druck von Retainern mit Vergrößerung der Retentionsfläche ● Indirektes Bondingverfahren mit virtueller Bracketplatzierung zur Vermeidung von Klebefehlern ● Virtuelle Behandlungs- und Zielplanung von Dysgnathieoperationen. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Allgemeine Risiken bei Datenverlust, Cyberkriminalität, und fehlende Kompetenz der Patienten für die Onlineverarbeitung von Daten ● Risiko der fehlenden Individualisierung der Behandlungsplanung, d. h. unkritische Umsetzung des allein auf die Zahnreihen bezogenen Therapieziels.

Biologische Grundlagen der Schädelentwicklung

MERKE

Kenntnisse zur knöchernen und funktionellen Entwicklung des orofazialen Systems sind für den Lernenden im Fachgebiet der Kieferorthopädie essenziell, da kieferorthopädische Diagnostik und Therapie am wachsenden Individuum erfolgen und die Befunderhebung nur eine Momentaufnahme im Entwicklungsablauf des Schädels darstellt. Das bereits abgelaufene und noch ausstehende Kiefer- und Gesichtswachstum müssen eingeschätzt werden, um Ausmaß und Richtung der Entwicklungspotenzen therapeutisch nutzen zu können oder störende Faktoren auszuschalten. Im trivialen Vergleich heißt dies: Der Behandler springt auf ein fahrendes Automobil – dem wachsenden Individuum vergleichbar – auf und muss, um es wirksam in die gewünschte Richtung von der Dysgnathie zur Eugnathie lenken zu können, nicht nur das Fahrtziel, sondern auch die Antriebs- und Steuermechanismen des Motors kennen.

Kenntnisse zur Schädel- und Gesichtsentwicklung dienen folgenden diagnostischen und therapeutischen Zielstellungen:

- Ätiologie und Pathogenese von schweren Dismorphiesyndromen und Spaltbildungen im Kiefer-Gesichts-Bereich erkennen bzw. verfolgen,
- Festlegung des optimalen Behandlungsbeginns,
- Bestimmung lokaler Angriffsmöglichkeiten für kieferorthopädische Kräfte,
- Hemmung von Wachstumstendenzen, die die Harmonie von Ober- und Unterkiefer stören,
- Ausschluss therapeutischer Möglichkeiten wegen generell oder lokal sistierenden Wachstums.

Phylogenetische und ontogenetische Aspekte der Schädelentwicklung

Eine entscheidende Umbildung des Schädels der Vertebraten setzte mit dem aufrechten Gang ein. Dabei wurde die Lagerung des Gesichtsschädels vor dem Hirnschädel aufgehoben und die Kieferkomplexe verlagerten sich mehr unter die vordere Schädelbasis. Gleichzeitig verkleinerte sich der Gesichtsschädelanteil zugunsten eines vergrößerten Hirnschädels. Mit der räumlichen Trennung von Kehlkopf und Nase wurde eine sprachliche Artikulation auch physikalisch durch eine Verlängerung der zur differenzierten Lautbildung erforderlichen Luftsäulen-schwingung möglich.

Nase, Mund und Augen kamen in eine Ebene. Die Verkleinerung der Kiefer wurde bei primitiven Menschentypen (Pithecantropus) noch durch einen alveolären Prognathismus kompensiert, d. h. Alveolarfortsatz und Schneidezähne waren nach labial geneigt und vergrößern damit den Zahnbogen (Abb. 2.1, Abb. 2.2). Während der weiteren Entwicklung wird das Gesichtsskelett zunehmend graziler, die Schneidezähne richten sich auf, das Kinn verliert seine fliehende Form und wird prominenter. Diese Kinnumbildung ist auch als Folge der Zungenraumverkleinerung anzusehen, da durch die sagittale Kieferreduzierung die Zunge vertikal ausweichen musste und so zu einer Ausbuchtung am Unterkieferrand beitrug. Dies wiederum führte zu einer Aufrichtung der Symphyse mit Ausbildung der Kinnprominenz.

Der übermäßig in der Population auftretende Zahnengstand aufgrund einer Disproportion von Zahn- und Kiefergröße ist auf eine evolutionäre Entkoppelung beider Größen zurückzuführen. Das Gebiss, d. h. die Zahnzahl, Höcker- und Wurzelzahl hat von Spezies zu Spezies geringere Änderungen erfahren als die kraniofaziale Morphologie. Mit der sagittalen Verkürzung der Alveolarfortsätze ist eine Verzögerung der Dentition für den Eckzahn und die 2. und 3. Molaren verbunden, da sich die Keime dieser Zähne nicht neben, sondern zunächst über den Nachbarzähnen befinden und damit einen längeren Durchbruchsweg zu bewältigen haben. Dies kann

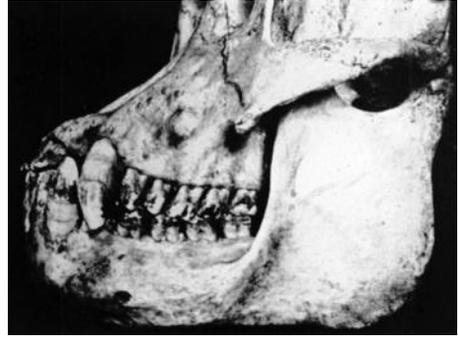


Abb. 2.1 Schädel eines Primaten. Dominanter Gesichtsschädel.

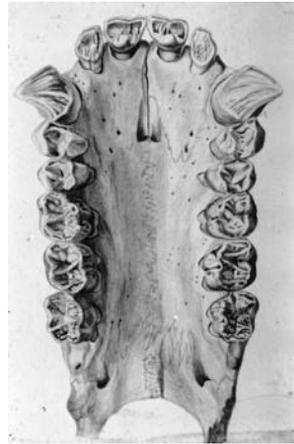


Abb. 2.2 Oberkiefer eines Primaten. Lang gestreckter Kiefer mit prominenten Eckzähnen und Primatenlücken zwischen den Eck- und Schneidezähnen.

sich auch als Platzmangel- und Engstandssymptom niederschlagen und letztlich zur erschwerten Zahnung (Dentitio difficilis) oder zur Retention dieser Zahngattungen führen (Abb. 2.3). Die Körperhöhenzunahme im Rahmen der Akzeleration findet ihren Niederschlag am Schädel hauptsächlich in der Länge, nicht in der Breite, und kommt damit nicht dem Platzbedarf der Zähne im Kiefer zugute.

Aus ontogenetischer Sicht führen die sehr unterschiedlichen Zeiten für die Morphogenese und die Einflussmöglichkeiten exogener

Phylogenetische und ontogenetische Aspekte der Schädelentwicklung

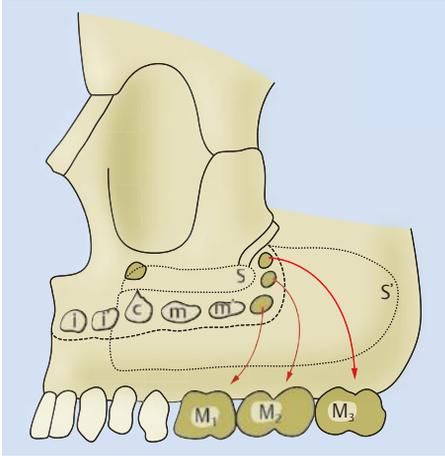


Abb. 2.3 **Menschlicher Gesichtsschädel.** Die Keime der Molaren sind wegen des fehlenden Platzes im Alveolarfortsatz übereinander angeordnet.

Faktoren auf Zahn- und Knochenstrukturen zu einer weiteren Entkopplung hinsichtlich einer abgestimmten Entwicklung (Tab. 2.1). Die Kieferlagebeziehungen ändern sich pränatal vor allem in sagittaler Richtung.

A.M. Schwarz unterscheidet 3 Stadien der Lagebeziehung von Unterkiefer zu Oberkiefer:

- 1. Stadium: bis zur 7. Woche noch gemeinsame Mund- und Nasenhöhle → *Urrückbiss*

- 2. Stadium: 8.– 11. Woche Aufrichtung der Gaumenfortsätze, Zunge weicht nach vorn und unten aus → *Urvorbiss*
- 3. Stadium: zur Geburt → 2. *embryonaler Rückbiss*, da erneuter Wachstumsvorsprung des Oberkiefers. Dieser ist der naturgemäße „Regelbiss“ des Neugeborenen. Ein wichtiger Faktor für die Wachstumsstimulation des Unterkiefers ist der Stillvorgang, bei dem der Unterkiefer zum Ausstreichen der Brustwarze permanent nach vorn gebracht werden muss. Dies ist bei der Flaschenernährung nicht der Fall, weshalb bei Weiterbestehen des Rückbisses eine Mundvorhofplatte indiziert ist (s. S. 142, Prophylaxe).

MERKE

Während der Phylogenese haben die knöchernen Anteile des Gesichtsschädels eine größere Veränderung erfahren als die Gebissanteile. Neben der funktionellen Unterbeanspruchung der Zähne kann dies als die Hauptursache für den Zahnengstand aufgrund einer Disproportion zwischen Zahn- und Kiefergröße betrachtet werden. Weitere Ursachen für die Disproportion sind die Herkunft aus Ekto- und Mesoderm, die kurze Bildungsperiode für die Zähne gegenüber der langen Morphogenese der knöchernen Strukturen und dem damit verbundenen sehr unterschiedlichen Wirksamwerden von Umwelteinflüssen, wie Habits und Mundatmung.

Tab. 2.1 Phylo- und ontogenetische Unterschiede zwischen Zahn- und Kieferentwicklung.

	Zähne (Struktur, Form, Größe, Zahl)	Kiefer- und Gesichtsskelett
Phylogenese	geringe Form-, Zahl- und Größenreduktion → 3. Molar, Tuberculum carabelli	starke Reduktion der Alveolarfortsätze → Elimination des Prognathismus
Ontogenese	vorwiegend Ekto- und Mesoderm; kurze Entwicklungsperiode (3 – 5 J.)	Mesoderm und Neuralrohr lange Entwicklungsperiode (ca. 15 J.)
Funktion	geringer funktioneller Einfluss auf Entwicklung	hoher funktioneller Einfluss auf Entwicklung

Wachstum von Ober- und Unterkiefer

Wie eingangs erwähnt, ist für die erfolgreiche Behandlung eine Prognose für das weitere Gesichtsschädelwachstum zu stellen. Das kraniofaziale Wachstum ist kein linearer und symmetrischer Prozess, der von einem Ursprungspunkt ausgeht, sondern ist auf unterschiedliche Wachstumsarten, die zu unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlicher Intensität und mit unterschiedlicher Richtung wirksam werden, zurückzuführen. Obwohl Knochengewebe eine relative Formbeständigkeit und Festigkeit aufgrund seiner Stützfunktion haben muss, zeichnet es sich im Kindes- und Jugendalter durch eine hohe Anpassungsfähigkeit und Formveränderlichkeit aus. Knochenwachstum, d. h. Gewebeerneuerung, erfolgt nur an Oberflächen und Nahtstellen. Ein interstitielles Knochenwachstum gibt es nicht. Die Vergrößerung und Ausdehnung des Hirn- und Gesichtsschädels ist jedoch nicht allein auf Gewebezunahme, sondern zum großen Teil auf *abgestimmte Appositions- und Resorptionsvorgänge* sowie *Verlagerung* knöcherner Anteile zurückzuführen.

Zum besseren Verständnis der nebeneinander und gleichzeitig ablaufenden, aber immer aufeinander abgestimmten Entwicklungs-

und Regelmechanismen soll von folgender Systematik ausgegangen werden:

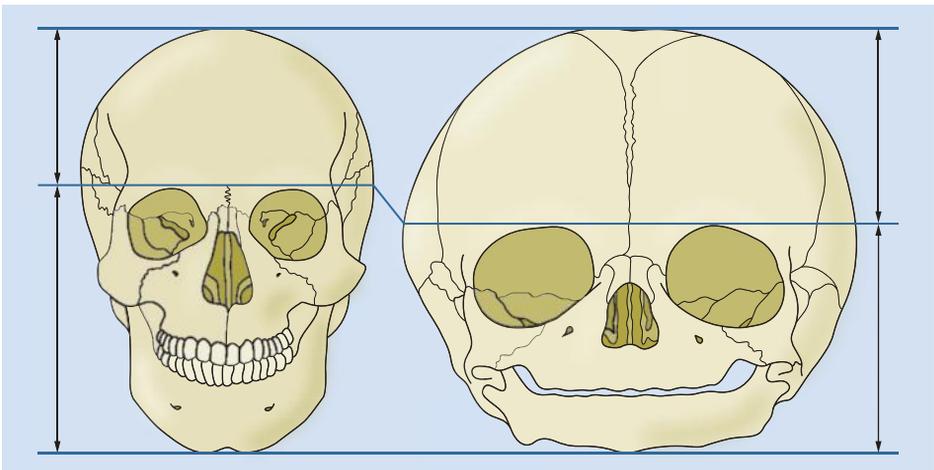
- Ablauf des postnatalen Schädelwachstums
- Knochenbildungsarten
- Entwicklungs- und Wachstumsmechanismen
- Wachstum von Oberkieferkomplex und Unterkiefer mit Beispielen
- Stimulation durch kieferorthopädische Apparaturen
- Wachstumstheorien und Steuerprozesse

Ablauf des postnatalen Schädelwachstums

Neurokranium und Viszerokranium haben zur Geburt einen unterschiedlichen Entwicklungsgrad erreicht. Im 5. Lebensjahr hat das Neurokranium 85% seiner Endausdehnung erreicht, während beim Viszerokranium noch 55% des Wachstums ausstehen. Das Größenverhältnis von Neurokranium zu Viszerokranium beträgt im 5. Lebensjahr 8 : 1 und wird bis zum 20. Lebensjahr auf 2,5 : 1 angeglichen (Abb. 2.4, Abb. 2.5).

Der Anpassungsprozess erfolgt nicht kontinuierlich, sondern ist von Verlangsamung und Beschleunigung gekennzeichnet. Der Verlauf entspricht dem des allgemeinen Körperwachstums (Abb. 2.6). Für die kieferorthopädische Behandlung ist vor allem das Zeitintervall der Wachstumsbeschleunigung während der Pubertät von Bedeutung, da

Abb. 2.4 Proportion von Gesichts- zu Hirnschädel beim Neugeborenen und Erwachsenen. Beim Neugeborenen (rechts) überwiegt der Hirnschädel.



Wachstum von Ober- und Unterkiefer

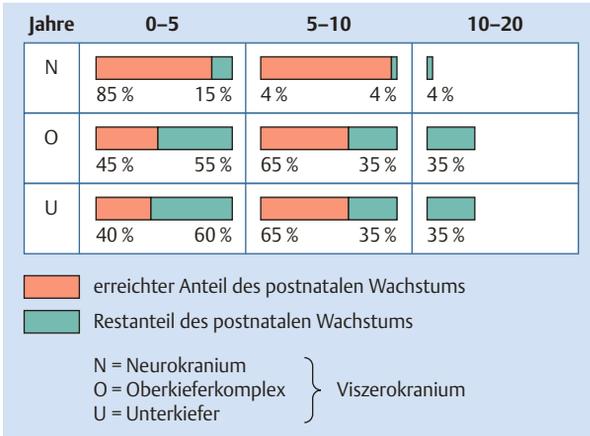


Abb. 2.5 Zeitlicher Ablauf des Gesichtsschädel- und Hirnschädelwachstums. Im Alter von 10 Jahren ist das Wachstum des Hirnschädels weitgehend abgeschlossen, während beim Gesichtsschädel noch 35% ausstehen.

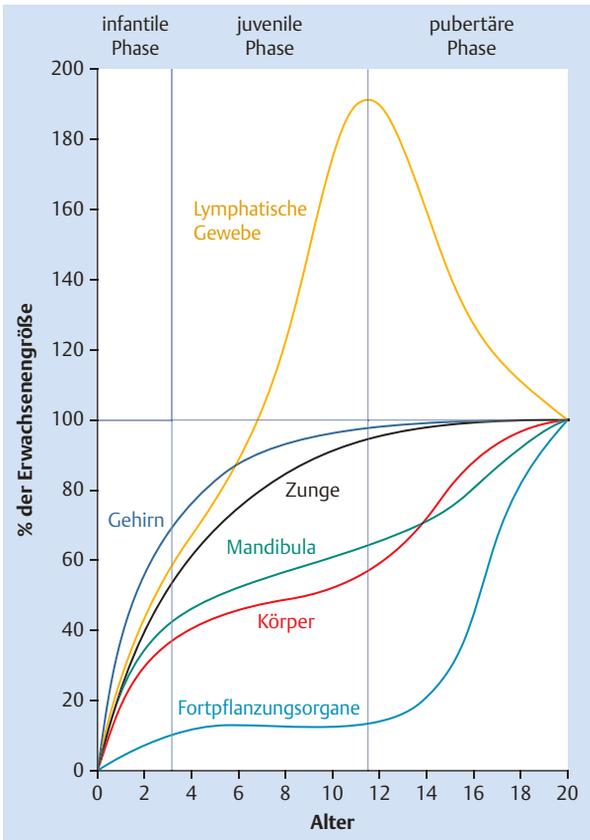


Abb. 2.6 Verlauf des Körperwachstums und das verschiedener Organe. Unterkiefer- und Körperwachstum verlaufen weitgehend parallel.

besonders unmittelbar vor oder während dieses Wachstumsschubs die Harmonisierung der Lagebeziehung von Ober- und Unterkiefer durch Stimulation des in der Ent-

wicklung zurückgebliebenen Kiefers mit funktionskieferorthopädischen Apparaturen möglich ist (Abb. 2.7).

Wachstum von Ober- und Unterkiefer

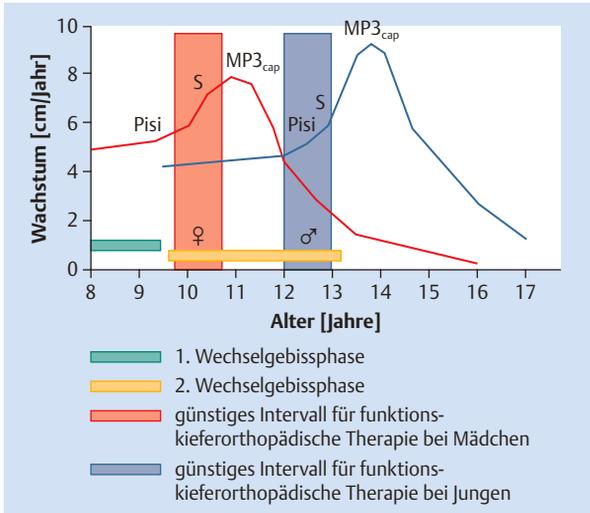


Abb. 2.7 Körperlängenwachstumsintensität [in cm/Jahr]. Bei Jungen und Mädchen, zur Identifizierung der optimalen Periode für die Funktionskieferorthopädie

Die Wachstumsintensität ist, gemessen als jährlicher Körperhöhenzuwachs mit 9 cm bei Jungen und 6 cm bei Mädchen, während der Pubertät am größten. Da das Wachstum in den Knochensuturen des Gesichtsschädels und an den Kondylen, speziell am Unterkieferkondylus, weitgehend parallel verläuft, ist dieser Parameter für die Stimulation des Unterkieferwachstums bei Rücklage und Hypoplasie therapeutisch zu nutzen. Das suturale Wachstum ist eher abgeschlossen als das Körperwachstum, sodass die transversale Dimension zwischen den Orbitae schon etwa mit 13 – 15 Jahren stabil ist. Dagegen kann man im Bereich des Unterkieferkondylus auch nach dem 20. Lebensjahr, also weit nach Abschluss des Körperwachstums, noch Zellaktivität feststellen.

Bezogen auf das chronologische Alter schwankt der pubertäre Wachstumsschub sehr stark. Aus diesem Grund ist das *skeletale Alter*, mit dem der knöcherne Entwicklungsstand wiedergegeben wird, für die kieferorthopädische Therapie bedeutungsvoller als das chronologische (s. Handröntgenaufnahme). Als weitere Kategorie ist für den Behandlungsbeginn und den erfolgreichen Behandlungsverlauf das *dentale Alter* bedeutungsvoll, da mit dem Zahnwechsel ebenfalls eine hohe Umbau- und Anpassungsbereit-

schaft verbunden ist. Skelettales und dentales Alter weisen beim Einzelnen nur eine geringe Korrelation und starke Geschlechtsunterschiede auf. Bei Mädchen liegt die 2. Wechselgebissphase meistens im Wachstumsschub, während sie bei Jungen schon davor abgeschlossen ist (Abb. 2.7).

Knochenbildungsarten

Das *enchondrale Wachstum* erfolgt besonders während des Embryonal- und Fetalstadiums. Eine Ausnahme bildet das Wachstum des Unterkieferkondylus. Durch desmale Verknöcherung entstehen die *Schädelkapsel, der Oberkieferkomplex und der Unterkiefer*. Eine Sonderform des desmalen Knochenwachstums im Sinne eines besonderen Wachstumsmechanismus ist das *periostale* und *endostale Wachstum*. Es zeichnet sich durch eine abgestimmte Apposition und Resorption aus und tritt während der gesamten postnatalen Entwicklung auf (Ricketts 1988). Der Gestaltwandel der Gesichtsschädelform, der seinen Ausdruck in einer konkavem Profilform, einer stärkeren vertikalen Streckung gegenüber der Verbreiterung findet, ist diesem Wachstumsmechanismus zuzuschreiben (Abb. 2.8).

Wachstum von Ober- und Unterkiefer

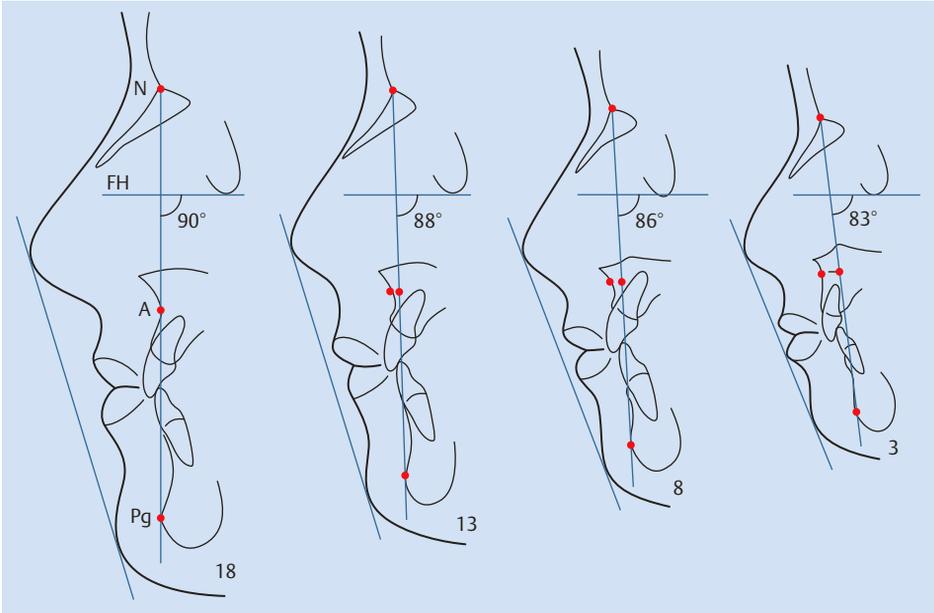


Abb. 2.8 **Profilveränderungen.** Veränderungen vom 3. bis 18. Lebensjahr durch modellierende Resorption. Profil wird konkaver (nach Ricketts 1975).

Knochenbildungsmechanismen und kieferorthopädische Therapie

- **chondrale Ossifikation:** Wie der Name besagt, besteht bei dieser Verknöcherungsart eine knorpelige Präformierung. Der Knorpel bildet jedoch nur eine Art Gussform oder Schalung und wird durch die gleichen Mechanismen wie bei der desmalen Ossifikation durch knochenbildende Zellen und Einlagerung von Apatitkristallen ersetzt bzw. ausgetauscht. Nach der Topografie werden *perichondrale* und *enchondrale* Ossifikation unterschieden. Beide Verknöcherungsarten kommen an den langen Röhrenknochen vor. Die perichondrale Ossifikation geht von Mesenchymzellen des den Diaphysen aufgelagerten Perichondriums aus. Die enchondrale Ossifikation beginnt zunächst mit der Umwandlung und Auflösung der Knorpelzellen (Blasenknorpel) im Inneren und wird durch Kalkeinlagerungen, Einsprossung von Gefäßen und Einwanderung bzw. Differenzierung von Chondroklasten und Osteoblasten aus Bindegewebszellen fortgeführt. Auf diese Weise wird ein

Knochenbälkchensystem aufgebaut, in das noch Knorpelreste eingebettet sind. Dieses Knochenbälkchensystem kann beanspruchungsgemäß zur Spongiosa oder Kompakta umgebaut werden. Bei der chondralen Verknöcherung lassen sich in den Übergangsbereichen zwischen Knochen und Knorpel charakteristische Schichtungen nachweisen. Diese sind beim sogenannten *primären Knorpel* (Epiphysenknorpel) in anderer Zusammensetzung als beim *sekundären Knorpel* (Unterkieferkondylus) geschichtet (Abb. 2.9). Im Gegensatz zum primären Knorpel fehlt beim sekundären die Säulenknorpelzone, während die hyaline Knorpelzone dominiert. Letztere reagiert gemeinsam mit der Proliferationszone bei einer Beeinflussung durch ein kieferorthopädisches Gerät mit einer merklichen Verbreiterung (Abb. 2.9). Danach wird er wie der Säulenknorpel bei der primären Variante in Knochen umgewandelt. Im Gegensatz zum Knochenwachstum, das nur an den Oberflächen und Rändern erfolgt, ist eine interstitielle Knorpelvermehrung möglich. An die Stelle des Perichondriums tritt das Periost mit seiner osteogenen Funktion. Dies geschieht, obwohl im Inneren die enchondrale Ossifikation fortschreitet.

Wachstum von Ober- und Unterkiefer

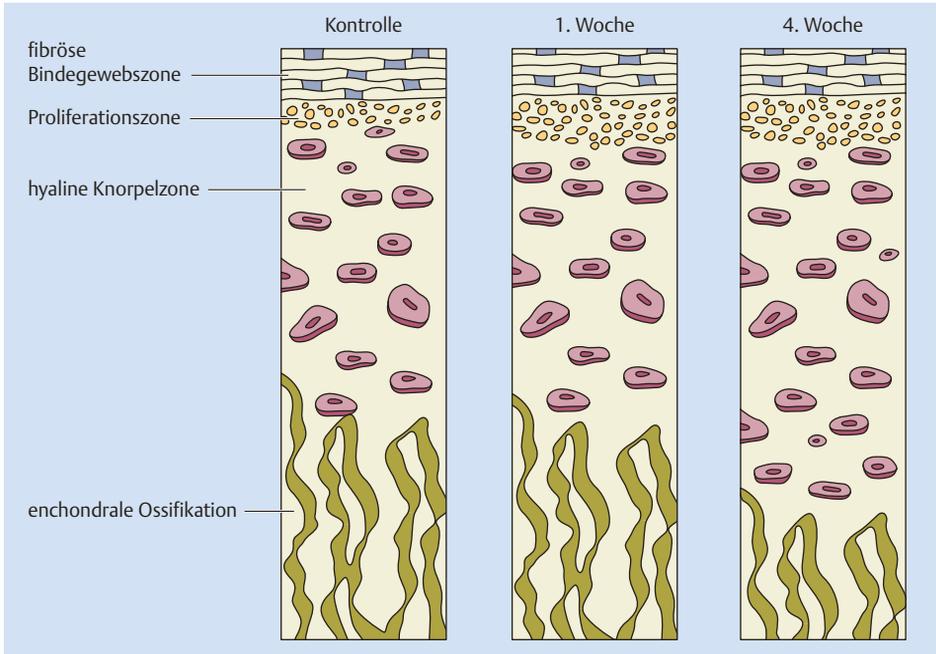


Abb. 2.9 **Wachstumsvorgänge.** Im sekundären Knorpel des Unterkieferkondylus, ausgelöst durch funktionskieferorthopädische Geräte. Verbreiterung der Proliferationszone (Rakosi und Jonas 1989).

- **desmale Ossifikation:** Auf desmaler, also bindegeweblicher Grundlage entstehen 2 Formen: Faserknochen und lamellärer Knochen.
- **Faserknochen** entsteht unvermittelt in der unverkalkten bindegewebigen Grundsubstanz: Fibroblasten → Osteoblasten → Osteoid (Verkalkung durch Einlagerung von Apatitkristallen) → Ausreifung durch Ausrichtung der Kristallanordnung und der Verlaufsrichtung der Kollagenfibrillen. Aus topografischer Sicht bilden sich ein aufgelockerter medullärer und ein kortikaler Bereich heraus. Auf den kortikalen Teil lagert sich das Periost auf, dessen innere Schicht osteogene Funktionen besitzt und maßgeblich am periostalen Wachstum beteiligt ist. Die Mineralisation des Faserknochens erfolgt relativ rasch und stellt nur die Vorform für eine spätere Umbildung in Lamellenknochen dar.
- Der **Lamellenknochen** ist die Komplettierungs- und Stabilisierungsform des Faser-

knochens bzw. der verkalkten Knorpelgrundsubstanz. Er benötigt eine mineralisierte Grundlage und formiert sich durch konzentrische Anordnung als **Osteon** und **Havers'sches System**. Diese sind funktionell ausgerichtet. Die Apatitanordnung in den Bindegewebsfibrillenschichten entspricht den einwirkenden Belastungen und Beanspruchungen. Der größte Teil des Havers'schen Systems wird jedoch erst im Erwachsenenalter ausgebildet, da die Statik dieses Systems der Dynamik des wachsenden kindlichen Skeletts entgegensteht. Lamellenknochen wächst und formiert sich sehr langsam und ist beim Wachsen durch die ständig sich ändernden funktionellen Beanspruchungen einem permanenten Umbau ausgesetzt. *Dieser natürliche labile Zustand kann besonders durch die orthodontische Zahnbewegung genutzt werden.* Stabile lamelläre Systeme entstehen erst, wenn das Wachstum sistiert. Die Geschwindigkeit der Bildung lamellären Knochens beträgt 0,7 – 1,5 µm pro Tag. Demgegenüber beträgt die Mineralisation des Faserknorpels ca. 0,5 mm pro Tag (Tab. 2.2).

Wachstum von Ober- und Unterkiefer

Zeit [d]	Fluorochrom	Fluoreszenz-Farbe	Knochenapposition I ₁ * [µm/d]	Knochenapposition I ₃ ** [µm/d]
245	Xylenolorange	braun	1,65	1,48
259	Alizarinkomplexon	rot	2,02	1,86
273	Fluorexon	grün	2,41	1,81
287	Xylenolorange	braun	2,61	2,02
* Incisivus 1 (mittlerer Schneidezahn)				
** Incisivus 3 (3. Schneidezahn; gibt es nur beim Hund, Tierexperiment)				

Tab. 2.2 Polychrome Sequenzmarkierung zum Nachweis der Knochenbildung (s. Abb. 3.18) während des orthodontischen Lückenschlusses im Tierexperiment.

MERKE

Der sekundäre Knorpel im Unterkieferkondylus kann zur Anpassung des hypoplastischen Unterkiefers an den Oberkiefer stimuliert werden.
Der ständige Auf- und Umbau des Faser- und Lamellenknochens beim Wachsenden kann für die orthodontische Korrektur von Zahnfehlstellungen genutzt werden.

Knochenwachstums- und Knochenentwicklungsmechanismen

Das knöcherne Schädelwachstum wird von 2 Hauptprinzipien bestimmt:

1. Erreichen einer optimalen Relation zwischen *Form und Funktion*, d. h. mit einem Minimum an Knochenmasse soll ein Maximum an Stabilität und Schutz für die umschlossenen Weichteile erreicht werden.
2. Der unterschiedliche Wachstumsvorlauf des Hirnschädels schafft mechanische *Spannungen und Ungleichgewichte*, die einer ständigen Anpassung bzw. eines Ausgleichs bedürfen.

Der Umsetzung dieser Prinzipien dienen 3 *grundsätzliche Vorgänge*, die durch ihr unterschiedliches qualitatives und quantitatives Zusammenspiel eine Expansion des Ober- und Unterkiefers in allen 3 Ebenen des Raumes ermöglichen. Dies sind: *Apposition, Resorption und Verlagerung* (Abb. 2.10).

Apposition und Resorption bedeuten Knochenan- oder -abbau, der vom Periost oder Endost ausgeht, während die Verlagerung des gesamten Knochens auf benachbartes Kno-

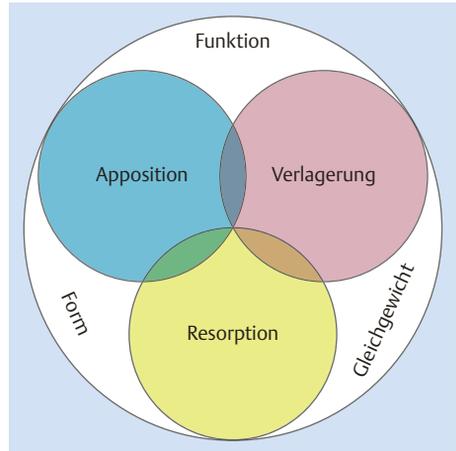


Abb. 2.10 **Form-Funktion-Gleichgewicht.** Durch abgestimmte Apposition, Resorption und Verlagerung wird das Form-Funktion-Gleichgewicht gewahrt.

chenwachstum oder räumliche Expansion ganzer Knochenkomplexe zurückzuführen ist.

Periostales und endostales Wachstum

Die Eigenart dieses Knochenwachstums besteht in einem abgestimmten An- und Abbau (Apposition und Resorption) und führt zu einem *Driften der Kortikalis* (Abb. 2.11). Es ist zu beachten, dass etwa die Hälfte der Kortikalis des Gesichtsschädelskeletts von der äußeren Rinde, dem *Periost*, und die andere Hälfte von der inneren Rinde, dem *Endost*,

Wachstum von Ober- und Unterkiefer

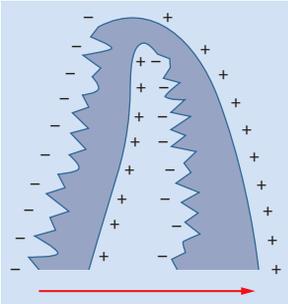


Abb. 2.11 Kortikalisdrift durch wechselseitige Apposition und Resorption (Enlow DH. Handbuch des Gesichtswachstums. Quintessenz Verlag, Berlin 1989).

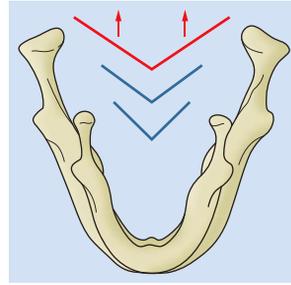


Abb. 2.12 V-Prinzip. V-förmige Verlängerung und Verbreiterung des Unterkiefers (nach Enlow).

gebildet wird. Überwiegt die Apposition, wird der Knochen dicker, während bei vorherrschender Resorption die Knochenstärke abnimmt. Beides ist auch während des Gesichtsschädelwachstums zu registrieren, wobei die Summe die Knochenapposition im Laufe der Entwicklung etwas überwiegt.

Relokation und Umbau

Bei Knochenapposition an einem Knochenrand, der gelenkig oder durch eine Naht mit einem anderen in Verbindung steht, kommt es gleichzeitig zur Lageänderung oder Relokation des Knochens in toto. Wenn z. B. mithilfe eines funktionskieferorthopädischen Gerätes zum Ausgleich einer Unterkieferrücklage am Kondylus Knochen angebaut wird, erfolgt eine Verlagerung der Mandibula nach mesial. Um jedoch alle bereits bestehenden Funktionen aufrechtzuerhalten, muss kompensativ ein Umbau (Remodellation) an anderen Orten geschehen. Im geschilderten Fall muss eine Resorption am Vorderend des Astes erfolgen. Dieser Vorgang dominiert auch das gesamte natürliche Unterkieferwachstum (Abb. 2.10).

Dabei geht die Relokation immer der Remodellation voraus. Bei diesem bisher 2-dimensional (sagittal und vertikal) betrachteten Prozess muss jedoch auch die transversale Ausdehnung Berücksichtigung finden. Im Falle des Unterkieferwachstums bedeutet dies eine Anpassung an die Gelenkgruben, die sich nach außen, hinten und unten ver-

lagern. Die Kompensation in transversaler Richtung erfolgt ebenfalls durch abgestimmte Appositions- und Resorptionsprozesse, die dem sogenannten V-Prinzip folgen. Dabei wird an der Innenfläche Knochen angebaut, während außen Knochen abgebaut wird. Dadurch öffnet sich das „V“, wird also breiter und bewegt sich nach hinten (Abb. 2.12). Ein ähnliches Prinzip gilt auch für die Gaumenverbreiterung.

Verlagerung

Wie bereits erwähnt, kommt es neben den direkten lokalen Wachstumsprozessen durch die unterschiedliche und oft zeitlich versetzte Expansion zur Verlagerung oder „Displacement“ benachbarter und auch weiter entfernter Knochenstrukturen. Dies trifft vor allem auf die Grenzlinie zwischen Gesichtsschädel und Hirnschädel zu. Hier kommt es besonders an den sphenoookzipitalen und frontonasomaxillären Nähten durch das spätere Wachstum der Gesichtsknochen zur Verlagerung des Oberkieferkomplexes nach vorn und unten. Dabei erfolgt hauptsächlich Apposition an der Nahtstelle und nicht an der Vorderseite. Die Verlagerungsrichtung ist damit in den meisten Fällen der Wachstumsrichtung entgegengesetzt (Abb. 2.13). Im Unterschied zu dieser direkten, durch keilförmiges Wachstum verursachten Verlagerung, kann es auch zum indirekten Displacement durch die Expansion von nicht direkt benachbarten Knochen und Weichteilen, die ebenfalls

Wachstum von Ober- und Unterkiefer

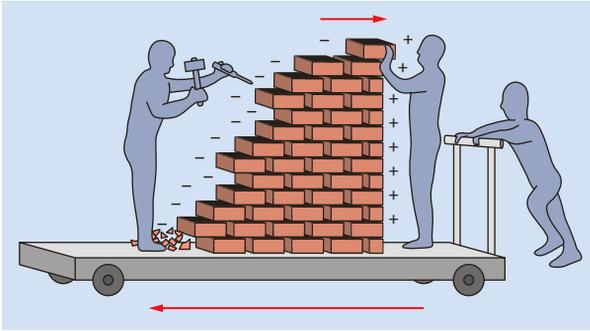


Abb. 2.13 **Gesichtsschädelwachstum.** Schematische Darstellung zur modellierenden Resorption (-), zur Apposition (+) und zur Verlagerung (+/-) des Gesichtsschädels. Die Verlagerungsrichtung verläuft zu der des Wachstums in entgegengesetzter Richtung (nach Enlow).

maßgeblich an der Knochenverlagerung beteiligt sein können, kommen.

Wachstumsvorgänge am Oberkieferkomplex und Unterkiefer

Allgemeine Vorbemerkung zum Mittelgesichtswachstum

Wie im Kapitel zum zeitlichen Ablauf des Schädelwachstums dargestellt, hat der Hirnschädel zur Geburt einen Wachstumsvorsprung, der erst allmählich während der weiteren postnatalen Entwicklung ausgeglichen wird. Dies betrifft vor allem die sagittale und vertikale Ausdehnung des Gesichtsschädels, die noch unterentwickelt erscheint. Dagegen werden die transversalen Ausmaße schon zur Geburt aufgrund der frühen Reifung des Gehirns von der Breite der Schädelbasis auf Ober- und Unterkiefer übertragen. Aus diesen Zusammenhängen wird auch deutlich, dass die Schädelbasis eine Art *Entwicklungsschablone* oder dynamisches Schnittmuster für die Kiefer darstellt (Enlow 1989).

Aufgrund der direkten Nahtstellen hat die vordere Schädelgrube mehr eine Leitfunktion für den orbitonasomaxillären Komplex, im Folgenden kurz als Oberkiefer bezeichnet, und die mittlere Schädelgrube beeinflusst die Lage des Unterkiefers. So ist z. B. davon auszugehen, dass sich bei einer langen schmalen Schädelbasis ein hohes, schmales und langes Gaumengewölbe entwickelt und ein frühes Sistieren der Schädelsturen mit einer Mittelgesichtshypoplasie verbunden ist.

Das Unterkieferwachstum wird dagegen von 2 übergeordneten Regionen gesteuert. Wäh-

rend die Kondylen über das Wachstum der mittleren Schädelbasis und das der Temporalappen des Gehirns beeinflusst werden, kommt es im vorderen zahntragenden Alveolarfortsatzanteil zum Abgleich über die Okklusion mit dem Oberkiefer. Diese Verzahnung ist jedoch sehr labil, sodass durch die unterschiedlichsten Einflüsse der Unterkiefer entkoppelt werden und entweder im Wachstum weit zurückbleiben (Distalbiss) oder den Oberkiefer überragen kann (Vorbiss oder mandibuläre Prognathie).

Vordere und hintere Schädelgrube haben die Funktion eines Fundaments, dessen Ausdehnung weitgehend den Aufbau des Gesichtsschädelgebäudes mitbestimmt. Dies muss auch im Sinne des schon angesprochenen Gleichgewichts zwischen Form und Funktion als biologisches Prinzip bedacht werden, wenn kieferorthopädisch einseitig in lokale Wachstumsprozesse am Ober- oder Unterkiefer eingegriffen wird. Rezidive und fehlende Behandlungsstabilität könnten ihre Ursache darin haben und nur eine ausreichend lange Retentions- und Kontrollzeit lässt die Chance, einen neuen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Weichteilwachstum und -funktion haben in diesem Zusammenhang auch eine wesentliche Bedeutung und werden im Zusammenhang mit den Wachstumstheorien zu den primären Steuerungsmechanismen zu besprechen sein. Andererseits, so vermutet Enlow (1989), sind gerade lokale und zeitlich versetzte Wachstumsprozesse, die zu Spannungen in den Schädelnähten und damit zum Ungleichgewicht führen, der Motor für Wachstum und