

Sonderdruck



**Neuromuskuläre und skelettale
Anpassung an veränderte Funktionen
im orofazialen Bereich**

James A. McNamara, Jr., D.D.S., Ph.D.



**VERLAG
ZAHNÄRZTLICH-MEDIZINISCHES SCHRIFTTUM · MÜNCHEN**

Neuromuskuläre und skelettale Anpassung an veränderte Funktionen im orofazialen Bereich

James A. McNamara, Jr., D. D. S., Ph. D.

Institut für Wachstum und Entwicklung des Menschen und Department für Anatomie der Universität von Michigan, Ann Arbor, Michigan 48104

Die vorliegende Studie wurde durch die Zuschüsse DE-02272 und DE-03610 des Staatlichen Gesundheitsdienstes der Vereinigten Staaten sowie durch den Zuschuß DE-43120 des USPHS Special Research Fellowship gefördert.

Dieser Bericht ist Teil eines Forschungsprojekts, das den Milo-Hellmann-Forschungspreis für 1973 erhielt. Der Bericht wurde im Mai 1973 der American Association of Orthodontists in Dallas, Texas, vorgelegt.

Neuromuskuläre und skelettale Anpassung an veränderte Funktionen im orofazialen Bereich

Es ist schwierig, die grundlegenden Beziehungen zwischen der Funktion der Muskeln und dem Knochenwachstum zu erklären. Dieses Problem ist eingehend von Biologen auf der Basis der Zellgewebswechselwirkung sowie von Klinikern untersucht worden, die die Reaktion der Patienten auf die Anwendung funktioneller kieferorthopädischer Methoden in der kieferorthopädischen Praxis ausgewertet haben. Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um den Versuch, die folgenden und weitere wichtige Fragen im Zusammenhang mit den muskuloskelettalen Wechselwirkungen zu beantworten:

1. Kann eine geänderte Muskelfunktion Knochenveränderungen steuern?
2. Können skelettale Veränderungen zu einer Änderung der Muskelfunktion führen?
3. Können Veränderungen sowohl in der Skelett- als auch in der Muskelstruktur gleichzeitig, jedoch ohne direktes Ursache-und-Wirkung-Verhältnis eintreten?
4. Falls obige Wechselbeziehungen bestehen, sind die diesbezüglichen Reaktionsschwellen altersbedingt?

5. Sind Veränderungen wachstums- oder altersbezogen, können dann strukturelle und funktionelle Beziehungen, wenn sie einmal vorhanden sind, geändert werden?

Man hat kraniofaziale Disproportionen experimentell bei Rhesusaffen (*Macaca mulatta*) verschiedener Reifestufen hergestellt. Durch verschiedene Untersuchungsmethoden ist festgestellt worden, in welcher Weise die spezifischen neuromuskulären und skelettalen Adaptionen vor sich gehen. Die diesen Reaktionen zugrundeliegenden Umwandlungs- und Steuerungsprozesse sind ausgewertet worden.

Die Auswirkungen der Unterkieferverlagerung in funktioneller Hinsicht wurden einer besonderen Betrachtung unterzogen. Man hat bei einer Anzahl Rhesusaffen in vier verschiedenen Wachstumsstadien eine neue Okklusionsstruktur hergestellt, durch die sich die oralen Reizeempfindungen verändert haben; danach wurde eine anteriore Stellung der Mandibula während der funktionellen Kieferbewegungen herbeigeführt. Spezielle skelettale, dentale und neuromuskuläre Adaptionen sind untersucht und durch Serien-Elektromyogramme, kephalometrische Serien-Röntgenbilder mit Metallimplantaten und mikroskopischen Analysen in Beziehung zueinander gebracht worden.

Literaturübersicht

Forscher und Wissenschaftler auf den Gebieten der Orthodontie und der Kieferorthopädie befassen sich schon seit langem mit Fragen der Beziehung zwischen Form und Funktion in der Entwicklung des heranwachsenden Kindes. Zahlreiche Untersuchungen sind unter Anwendung verschiedenartiger Methodologien mit weitgehend unterschiedlichen Ergebnissen durchgeführt worden. Viele dieser Untersuchungen beim Menschen befaßten sich mit der Behandlung von Klasse-II-Okklusionsanomalien (Distokklusion) durch funktionelle kieferorthopädische Apparaturen. Obwohl man sich bezüglich des grundlegenden Einflusses funktioneller Apparaturen auf das skelettale Wachstum der Maxilla sowie auf die dentoalveoläre Entwicklung im Ober- und Unterkiefer einig ist, wird die tatsächliche Reaktionsweise der Mandibula in klinischen Untersuchungen oft durch Schwierigkeiten in der Ausführung der Experimente, in den Behandlungsverfahren sowie in den Vermessungsmethoden nur ungenau erkannt. Eine genaue Literaturübersicht über dieses Gebiet wird in einem weiteren Bericht veröffentlicht.¹

Die Auswirkung von Funktionsveränderungen auf das Wachstum der Mandibula und anderer kraniofazialer Strukturen ist in einer Reihe von Experimenten an Affen eingehend untersucht worden. Eine Anzahl von Apparaturen sind konstruiert worden, die für die Entwicklung einer veränderten funktionellen Position des Unterkiefers voraussichtlich benötigt werden. Die durch die Verwendung dieser Apparaturen herbeigeführten Adaptio-

nen im kraniofazialen Bereich sind von mehreren Wissenschaftlern kephalemtrisch oder histologisch untersucht worden.²⁻¹¹ In den meisten Fällen konnte man die Veränderungen im Gebiß als einen Übergang von einer normalen Lage der Molaren (Klasse I) in eine vorwärts (mesial) gerichtete Stellung der Unterkiefermolaren (Klasse III) bezeichnen. Diese Reaktion scheint in vieler Hinsicht der Korrektur der vorher erwähnten Distokklusion zu gleichen.

In der Regel ist die durch die funktionelle anteriore Verlagerung der Mandibula herbeigeführte Klasse-III-Beziehung der Molaren der kollektive Ausdruck einer Reihe von selbständigen, jedoch in Wechselbeziehung stehender adaptiver Prozesse. Zu einer solchen Klasse-III-Beziehung kann es durch die Hemmung der normalen, nach unten und vorwärts gerichteten Wanderung des Oberkiefers und/oder, einer mesialen Wanderung der Unterkieferzähne kommen. Außerdem kann durch skelettale Adaption eine Veränderung in der Richtung und im Ausmaß des Wachstums am Kopf des Unterkiefer-Kondylus eintreten, was mehr zu einer Öffnung als zur Verkleinerung des Gonionwinkels beiträgt. Die Wachstumsrichtung der Maxilla kann in entsprechender Weise umdirigiert werden. Weitere skelettale Adaptionen können an fast allen Teilen des Schädel-Gesichts-Komplexes, einschließlich der Schädelbasis, beobachtet werden.

Dem Wachstumsstadium des Versuchstiers scheint eine kritische Bedeutung bei der Bewertung der oben beschriebenen variablen Größen zuzukommen. Hiniker und Ramfjord⁷ sowie Ramfjord und Enlow¹¹ berichten, daß das Kiefergelenk des *erwachsenen* Versuchstiers stabil ist und okklusalen Veränderungen widersteht. Bei ähnlichen Experimenten mit *heranwachsenden* Versuchstieren konnten jedoch beträchtliche Adaptionen innerhalb dieses Gelenks beobachtet werden.^{9, 10}

Häupl und Psansky³ nehmen an, daß die sich ergebenden Veränderungen in der Morphologie des Schädel-Gesichts-Komplexes auf die veränderten Beanspruchungen zurückzuführen sind, denen die Muskulatur ausgesetzt ist, wenn sie in unterschiedlicher Lage und Richtung tätig ist. Derichsweiler⁵ und Joho⁹ bezeichnen eine solche anteriore Verlagerung der Mandibula als „rein funktioneller Natur“. Das Wesen der Wechselbeziehung zwischen einer veränderten Morphologie (wie sie durch Apparaturen herbeigeführt wird) und der veränderten neuromuskulären Funktion ist jedoch nicht klar. Ebenso ist die Beziehung zwischen der Neuromuskulatur und den skelettalen Adaptionen derzeit noch nicht bekannt.

Versuchsmaterial und -Methoden

Untersucht wurden 64 Rhesusaffen (*Macaca mulatta*), und zwar 28 Tiere als Grundversuchsreihe und 36 Tiere als ergänzende Versuchsgruppe zur histologischen und/oder electromyographischen Kontrolle. Zur Bestim-

mun
mus
der
von
Bei
ein
Tiere
Tiere
doch
beg
war
Dur
Grup
juge
biß
der
4 bis
bene
Mola
Jede
troll
Tiere
Tiere
zur
Das
lang
lung
wie
der
eina
Kon
Wac
Kon

Rön
Imp
Vier
bra
Näh
Obe
linie
wor
dels

mung der Beziehungen zwischen Alter und Wachstum einerseits und den muskuloskelettalen Adaptionen andererseits wurde die Versuchsgruppe der 28 Tiere nach dem Entwicklungsstadium ihrer Gebisse in vier Gruppen von je sieben Tieren eingeteilt.

Bei den Tieren der Baby-Gruppe (Gruppe I) war bei Beginn der Versuche ein vollständiges Milchgebiß vorhanden. Die Geburtsdaten der sieben Tiere waren bekannt, das Alter lag zwischen fünf und acht Monaten. Die Tiere der Kindergruppe (Gruppe II) besaßen vollständige Milchgebisse, jedoch waren bei ihnen auch die bleibenden ersten Molaren im Durchbruch begriffen oder bereits voll durchgebrochen. Bei den Gruppen II, III und IV waren die genauen Geburtsdaten der Tiere nicht bekannt. Nach den Durchbruchsskalen von Hurme und Van Wagenen¹² dürften die Tiere der Gruppe II ein Alter von etwa 18 bis 24 Monate gehabt haben. Die Tiere der jugendlichen Gruppe (Gruppe III) besaßen das vollständige bleibende Gebiß mit Ausnahme der noch nicht durchgebrochenen dritten Molaren und der nur teilweise durchgebrochenen Eckzähne. Diese Tiere waren etwa 4 bis 4½ Jahre alt. Bei der Erwachsenengruppe (Gruppe IV) war das bleibende Gebiß vollständig, einschließlich der voll durchgebrochenen dritten Molaren; die Tiere hatten ein Alter von ungefähr 6 bis 7 Jahre.

Jede der genannten Gruppen bestand aus drei Versuchs- und vier Kontrolltieren. Die Versuchstiere wurden mit a, b und c gekennzeichnet. Die Tiere d, e und f repräsentierten kephalometrische Kontrollen, während das Tier g sowohl für kephalometrische als auch für histologische Kontrollen zur Verfügung stand.

Das Experiment dauerte 26 Wochen. Diese Periode wurde in zwei gleich lange Abschnitte unterteilt, und zwar in eine Kontrollperiode zur Sammlung normaler neuromuskulärer und skelettaler Daten von allen Affen sowie in eine darauffolgende zweite Periode, in der die Wachstumsdaten der Versuchstiere und der restlichen vier Kontrolltiere jeder Gruppe miteinander verglichen wurden. Auf diese Weise erhielt man zwei Arten von Kontrollinformationen: Jedes Versuchstier wurde mit seinem eigenen Wachstum vor dem Experiment sowie mit dem Wachstum der gesamten Kontrollgruppe vor und während der laufenden Versuche verglichen.

Röntgenologische Verfahren

Implantate. 29 Tantal-Implantate sind in jedem Tier untergebracht worden. Vier Stifte wurden extraoral an der rechten Seite der Mandibula angebracht, darunter ein Stift in der Symphyse und einer am Ramus in der Nähe des hinteren Randes. Fünf Implantat-Paare wurden beidseitig im Oberkieferbereich eingeführt, weitere fünf Implantate sind an der Mittellinie der Schädelbasis durch die hintere Schlundwand hindurch angebracht worden. Zehn Implantat-Stifte verteilten sich auf andere Teile des Schädels, darunter drei im Stirnbein.

Kephalometrische Vermessung. Röntgenbilder sind zu Beginn der Kontrollperiode, am Anfang der Versuchsperiode und bei Abschluß des Experiments aufgenommen worden. Zusätzliche Röntgenaufnahmen wurden noch in verschiedenen Zeitabschnitten gemacht, jedoch in der vorliegenden Studie nicht analysiert. Bei jeder dieser Gelegenheiten sind zwei Belichtungen vorgenommen worden, und zwar eine in der Okklusion und eine bei geöffnetem Mund, um das Kiefergelenk für die Röntgenaufnahmen besser einsehbar zu machen.

Die in dieser Untersuchung angewandten röntgenologischen Verfahren sind bereits in früheren Berichten eingehend beschrieben worden.^{1, 10, 14} Für alle Kephalogramme fand Industriefilm Verwendung, da die Körnung dieses Films sehr fein ist und eine genaue Definition der Strukturen erlaubt. Jeder Film wurde auf Durchlichtfilm dreifach vergrößert. Mit diesem Verfahren können sehr kleine Zunahmen des Wachstums durchgezeichnet und vermessen werden, was sonst durch Fehler in der Aufzeichnung übersehen würde.

Konstruktion der Apparaturen

Alle intraoralen Apparaturen bestanden aus Goldguß und dienten dazu, die gesamte Okklusionsfunktion um zwei Millimeter nach vorwärts zu bewegen. Die vertikale Verlagerung wurde ebenfalls auf zwei Millimeter eingestellt. Nachdem Abdruckmodelle des Tieres auf einem Artikulator angebracht wurden, hat man jede der Apparaturen vor dem Gießen in Wachs geformt, um eine Vorwärtsverlagerung der Oberkiefer-Okklusionsanatomie zu simulieren. Die Apparatur wurde an allen bukkalen Segmenten angebracht; zwei transversale Gaumenbügel stellten die Querverbindung her (Abb. 1). Nach der Zementierung erfolgte eine sorgfältige Equilibrierung, um so einen maximalen Kontakt und ein optimales Gleichgewicht der Okklusion in der Vorwärtsstellung der Mandibula zu erzielen.

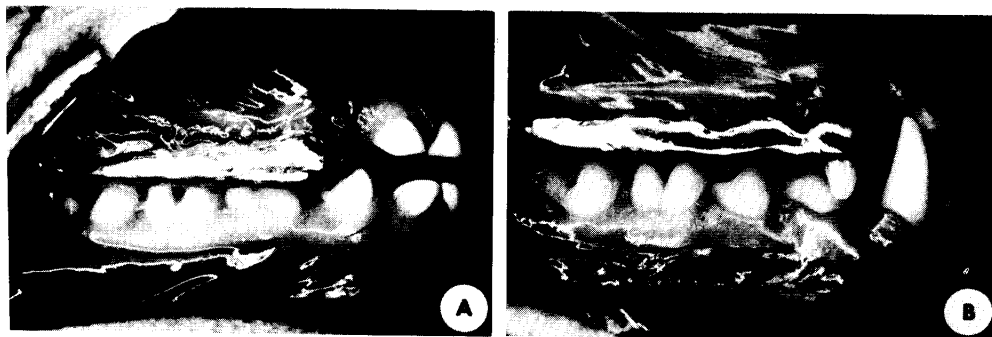


Abb. 1: Apparaturen. a) Babyalter, b) Jugendalter.

Elektromyographische Verfahren

Die neuromuskuläre Funktion wurde während der Versuche durch elektromyographische Aufzeichnungen überwacht. In den ersten dreizehn Wochen der Kontrollperiode sind in monatlichen Abständen elektromyographische Aufzeichnungen gemacht worden, um den grundlegenden Muskeltyp jedes Tieres und die Grenzen der normalen Veränderung dieser Muskeltypen feststellen zu können. Insgesamt handelt es sich um fünf derartige Aufzeichnungen, einschließlich einer Aufzeichnung vier Tage vor der Zementierung der intraoralen Apparatur und einer weiteren zum Zeitpunkt der Zementierung. Letztere war deshalb von Bedeutung, weil damit unmittelbare Reaktionen auf die Apparatur kontrolliert werden konnten, ohne daß irgendwelche sonstigen variablen Bestandteile des Experiments geändert werden mußten. Unmittelbar nach der Zementierung wurde eine einstündige, kontinuierliche Aufzeichnung gemacht. Acht weitere Aufzeichnungen sind in aufeinanderfolgenden Zeitabständen von sechs Stunden, einem Tag, vier Tagen, einer Woche, zwei Wochen, vier Wochen, acht Wochen und während der zwölften Woche angefertigt worden.

Zu Beginn wurde der Affe durch eine intramuskuläre Injektion von 6 bis 10 mg/kg Ketamin HCl anästhesiert. Ketamin ist ein schnellwirkendes, dissoziatives Betäubungsmittel, das nur vorübergehend eine unwesentliche Wirkung auf die Muskulatur des Mund-Gesichtsbereiches ausübt.¹⁵ Der betäubte Affe wurde dann in eine schalldichte, elektrisch abgeschirmte Kammer gebracht und auf eine für elektromyographische Verfahren an Menschenaffen konstruierte Anschliffvorrichtung gesetzt.¹⁶ Der Kopf des Tieres war mittels eines Kopfhalters aus Plexiglas in einer fest ausgerichteten Stellung angeordnet, in der normale Kieferfunktionen im unbetäubten Zustand möglich waren.

In die vordere und hintere Schläfenmuskulatur sowie in den Ringmuskel des Mundes und die suprahyoide Muskulatur wurden zweipolige Nadel Elektroden eingeführt. Dabei hat man die aus dem digastrischen Muskel, dem Unterkieferzungenbeinmuskel und dem Kinnzungenbeinmuskel bestehende suprahyoide Gruppe als einen einzigen Muskel betrachtet, da es ziemlich schwierig ist, die einzelnen Muskeln dieser Gruppe beim Anbringen der Elektroden anatomisch voneinander zu trennen.¹ Zur Überwachung des Pterygoideus lateralis wurden zwei teflonisolierte 25-mm-Nadelelektroden extraoral durch die sigmaförmige Kerbe in den oberen Kopf des pterygoideus lateralis eingeführt. McNamara^{1, 17} berichtet von getrennten und unabhängigen Funktionen jedes Kopfes des Pterygoideus lateralis. Alle Aufzeichnungen wurden von der Muskulatur der linken Seite gemacht.

Nach Überprüfung der Elektroden ließ man das Tier für weitere dreißig Minuten isoliert in dem schalldichten Raum, damit es sich ganz von der Anästhesierung erholen konnte. Im Anschluß daran, während das Tier weiter



in Isolierung verblieb, wurden Aufzeichnungen über Haltung, Mundreflexe und wahllose Kieferbewegungen des Affen gemacht. Dabei konnte man beobachten, daß das Tier Speichel schluckte. Später betrat der Wissenschaftler den schalldichten Raum und verabreichte mit einer Mundspritze 0,5 ccm Leitungswasser in den Mund des Tieres, damit es das Wasser schlucken und den Schlund vom Speichel reinigen konnte. Zum Kauen wurde der Affe mit kleinen Zucker- und Apfelstückchen gebracht.

Die Aktivität in Ruhelage wird aufgezeichnet, wenn alle an der Unterkieferbewegung beteiligten Muskeln nur die Aktivität demonstrieren, die notwendig ist, um die Mandibula in Gleichgewichtslage gegenüber der Schwerkraft zu halten. Durch die Schwerkraft werden ständig asynchrone, motorische Entladungen der Antischwerkraftmuskeln hervorgerufen, was zu einem leichten Kontraktions- oder Spannungszustand dieser Muskeln führt.^{1, 18} Im vorliegenden Bericht wurde die mit der Aufrechterhaltung der Ruhelage der Mandibula zusammenhängende Muskelaktivität als Gradmesser für die Reaktion der Muskulatur auf die Versuchsbedingungen benutzt. Außerdem wird noch eine allgemeine Diskussion der Muskelaktivität während der funktionellen Bewegungen durchgeführt. Eine genaue und ausführliche Beschreibung der Auswirkungen dieses Experiments auf das Kauen und Schlucken ist jedoch an anderer Stelle zu finden.¹

Histologische Verfahren

Nach Abschluß der Versuchsperiode wurden alle Goldapparaturen von den zwölf Versuchstieren entfernt und nochmals Röntgenbilder und intraorale Photos aufgenommen. Die Tiere b und c sowie das Kontrolltier g wurden dann mit einer aus Kochsalz- und Phosphat-Puffersubstanz bestehenden Formalin-Perfusion getötet. Die Kiefergelenke der rechten Seite sowie die angrenzenden Gewebe sind aus den Tieren herausgenommen und in Formalin gelegt worden. Später wurde der Gewebeblock in Ameisensäure entkalkt, in Celloidin gelegt und schließlich parallel zur Sagittalebene im 10–20-Mikron-Serienschnitt zerlegt. Drei von jeweils zehn Schnitten sind mit Hämatoxylin-Eosin, Masson oder mit modifizierten Mallory-Verfahren gefärbt worden. Ein vierter Schnitt wurde ungefärbt montiert.

Ergebnisse

1. Neuromuskulatur

Die in der Versuchsperiode erzielten Ergebnisse wurden in drei Phasen eingeteilt: *Phase eins* umfaßt die Anfangsreaktionen des Tieres während der ersten sechs Stunden des Experiments; die *Phase zwei* besteht aus Aufzeichnungen über die Periode vom ersten Tag bis zum Ende der ersten Woche; die *Phase drei* erstreckt sich vom Beginn der zweiten Woche bis

zum Ende des Experiments. Die Veränderungen der Muskelfunktionen während der Versuchsperiode wurden mit den Kontrollmustern verglichen. Da Unterschiede auch bei Tieren derselben Altersstufe festzustellen waren, wurde jedes Versuchstier als sein eigenes Kontrollobjekt benutzt, wozu für jedes Tier ein normaler Funktionsbereich während der ersten 13 Wochen des Experiments festgelegt wurde.

Phase eins

(Erste sechs Stunden des Experiments). Durch die Befestigung der Apparatur am Oberkieferzahnbogen veränderte sich der Mundbereich, was sofort verschiedenartige Reaktionen hervorrief. In der Regel konnten bei einem Tier sowohl Perioden von Überaktivität als auch Zeitabschnitte mit herabgesetzter Tätigkeit beobachtet werden (*Abb. 2*). Das Tier schloß den Mund mit regel- und ziellosen Biß- und Preßbewegungen, als ob es einen Platz suchen würde, in dem seine Kiefer eine angenehme Bißstellung einnehmen konnten. Die normalen funktionellen Abläufe waren verändert und unterbrochen und bei der Hälfte der Tiere war ein Rückgang der muskulären Synchronisierung zu beobachten. Übertriebene, wahllose Kieferbewegungen waren üblich. Die Affen im Baby- und Kindesalter zeigten vor allem im Schläfenmuskel Aktivität in der Ruhelage, wie dies auch während der Kontrollperiode der Fall war. Bei mehreren älteren Tieren jedoch kam es zu einem ausgeprägten Vorherrschen der Kaumuskel funktion so wohl in der Ruhestellung als auch während der funktionellen Bewegungen.

Eine der bedeutendsten Aktivitätsänderungen in den ersten Stunden konnte in der suprahyoiden Muskelgruppe beobachtet werden. Hypertonische Entladungen aus diesen Muskeln wurden bei allen Altersgruppen festgestellt. Man hat angenommen, daß diese Aktivität zur Absenkung der Unterkieferlage beitrug. Es wurde festgestellt, daß sich die Mandibula während dieser Zeit nach unten verlagerte, so daß die Unterkieferzähne die Apparatur nicht berührten. Die Hypertonie war jedoch nicht kontinuierlich, da auch Perioden normaler Aktivität festgestellt wurden, während derer sich die Mandibula in ihrer üblichen Orientierungslage befand.

Nach sechs Stunden waren nur bei einem der zwölf Tiere (Affe IVb) wesentliche Veränderungen in der anteroposterioren Lage der Mandibula eingetreten. Der Unterkiefer dieses Tieres hatte sich von seiner ursprünglichen Lage aus leicht nach vorwärts geschoben und es konnte eine verstärkte Aktivität des oberen Kopfes des *Musculus Pterygoidens Lateralis* beobachtet werden. Die Veränderungen in der Funktion des unteren Kopfes dieses Muskels wurden im Verlaufe der Versuchsperiode nicht gesondert untersucht, obwohl Aufzeichnungen hierüber oft bei Versuchen mit der Elektrodenanordnung im Bereich des oberen Kopfes gemacht wurden. Diese Aufzeichnungen über den unteren Kopf zeigten, daß in diesem Be-

reich keine erhöhte Aktivität während der ersten sechs Stunden des Experiments eintrat.

Phase zwei

(Vom ersten Tag bis zum Abschluß der ersten Woche). Dieser Abschnitt war gekennzeichnet durch die Wiederherstellung der oralen Funktionen und durch Änderungen der während der ersten sechs Stunden des Experiments eingetretenen adaptiven Reaktionen. Die Kieferbewegungen in dieser Periode waren nicht so stark oder dramatisch wie das Beißen, Zusammendrücken und das übertriebene Ausweichen des Unterkiefers während der Phase eins.

Die Hypertonie der suprahyoiden Muskeln, die vermutlich dazu beigetragen hat, den Unterkiefer unten und von der Apparatur fernzuhalten, verschwand gegen Ende der ersten Woche nach und nach bei allen Tieren. Der vordere Schläfenmuskel und der Kaumuskel waren in den Aufzeichnungen der Ruhestellung vorherrschend. Bei zwei der jüngeren Tiere und, mit Ausnahme von einem, bei allen älteren Tieren war eine erhöhte Tätigkeit der Hebemuskeln einschließlich des hinteren Schläfenmuskels, zu verzeichnen. Bei drei der jüngeren Tiere trat jedoch eine Aktivitätsminderung der hinteren Schläfenmuskel ein. Es wurden bei einigen Tieren auch tonische Entladungen im oberen Kopf des Pterygoideus Lateralis festgestellt, gelegentliche Aufzeichnungen vom unteren Kopf (von denen oben die Rede war) erbrachten jedoch keinerlei Anzeichen erhöhter Aktivität in diesem Teil des Pterygoideus Lateralis während der ersten Woche.

Phase drei

(Von der zweiten Woche bis zum Abschluß des Experiments). Der vordere Teil des Schläfenmuskels übernahm nach und nach wieder die aktivste Rolle während der Ruhestellung. In den früheren Perioden hatte der Kaumuskel eine wesentliche Bedeutung bei der Aufrechterhaltung der Ruhelage der Mandibula; mit zunehmender Anpassung der verschiedenen orofazialen Gewebssysteme an die Apparatur aber scheint dieser Muskel eine weniger wichtige Rolle für diese Position übernommen zu haben. Bei vier der fünf Tiere (eines im Babyalter, zwei im Kindesalter und ein erwachsenes Tier) war jedoch eine merkliche Abnahme in der Aktivität in Ruhelage anstelle einer Rückkehr zur normalen Funktion zu verzeichnen. Diese Abnahme hielt während der gesamten Zeit des Experiments an.

Die ausgeprägteste, elektromyographisch festgestellte Adaption im Verlaufe der Phase drei erfolgte in der Funktion des oberen Kopfes des seitlichen Keilbeinmuskels. In den Kontrollaufzeichnungen stand die Tätigkeit des oberen Kopfes hauptsächlich mit der Hebemuskelfunktion in Zusammenhang; nur ein paar wahllose Zacken von einzelnen motorischen Einheiten waren auf den Aufzeichnungen in Ruhelage zu sehen. Nach etwa

zwei Wochen wurden bei der Hälfte der Tiere tonische Entladungen vom oberen Kopf des seitlichen Keilbeinmuskels beobachtet. In den meisten Fällen erfolgten diese Entladungen vor oder nach funktionellen Aktivitäten wie etwa Schlucken oder zufällige Kieferbewegungen (Abb. 2). Während dieser Zeit arbeitete der obere Kopf oft allein, ohne gleichzeitige Aktivität in irgendeiner der überwachten Muskelgruppen.

Nach vier Wochen hatten alle Versuchstiere, mit einer Ausnahme, tonische „Entladungen“ im oberen Kopf des seitlichen Keilbeinmuskels während der Ruhstellung und bei funktionellen Bewegungen (Abb. 2). Nach acht Wochen hat sich diese Aktivität bei drei Tieren verstärkt und bei vier Tieren hat sie abgenommen. Auf den letzten Aufzeichnungen der Versuchsperiode, die in der zwölften Woche angefertigt wurden, waren die „Entladungen“ des oberen Bereiches des seitlichen Keilbeinmuskels bei zwei Tieren verschwunden, während sie bei acht weiteren Tieren in reduzierter Form weiterbestanden (Abb. 2). Selbst in der höchsten Aktivitätsstufe traten die tonischen „Entladungen“ vom oberen Kopf auf allen Aufzeichnungen einer einzelnen Sitzung nicht in Erscheinung. In den Zeitabschnitten mit geringen oder gar keinen Kieferbewegungen, vor allem auf den ersten Aufzeichnungen in Ruhelage, war diese Reaktion nicht in allen Fällen zu beobachten, was darauf hindeutete, daß die reflexartige Vorwärtsbewegung der Mandibula nicht kontinuierlich war.

Überraschenderweise wiesen die gelegentlichen Aufzeichnungen vom unteren Kopf des seitlichen Keilbeinmuskels nicht darauf hin, daß dieser Muskelkopf überaktiv war. Der untere Kopf unterstützte weiterhin die Tätigkeit der suprahzoiden Muskulatur, zeigte jedoch keinerlei erhöhte Aktivität während der Ruhelage oder bei funktionellen Bewegungen.

2. Makroskopisches Skelettwachstum und Adaption

Nach Abschluß der dreizehnwöchigen Versuchsperiode wurden sowohl die skelettalen als auch die dentalen Adaptionen festgestellt und bei jedem Versuchstier analysiert. Diese Adaptionen waren auf Veränderungen in der Umgebung des Mundbereiches sowie auf die darauffolgenden Funktionsänderungen zurückzuführen. Bei zehn von den zwölf Affen war eine anteroposteriore Veränderung in der Beziehung der bukkalen Segmente

Nächste Seite:

Abb. 2: Typische Muskelaktivität während der Versuchsperiode: Zu beachten ist an den Kontrollaufzeichnungen die unterstützende Funktion der Hebemuskeln und des oberen Kopfes des seitlichen Keilmuskels bei funktionellen Bewegungen wie Zusammendrücken und Schlucken. Am Anfang ist die koordinierte Muskelfunktion unterbrochen worden. Nach einer Woche wurde die Aktivitätsamplitude des seitlichen Keilmuskels nicht nur beim Bewegen, sondern auch in der Ruhstellung beobachtet. Diese Aktivität erreicht ihr Maximum bei acht Wochen und geht dann gegen Ende der Versuchsperiode wieder zurück (Tier 1a). (Aufzeichnungsgeschwindigkeit 5 mm/sec.).

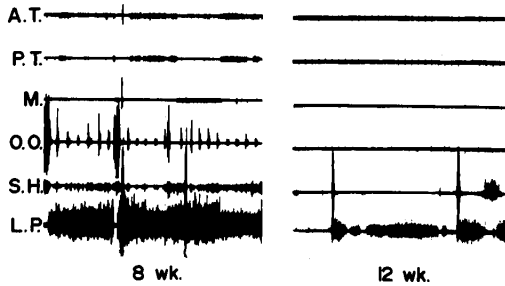
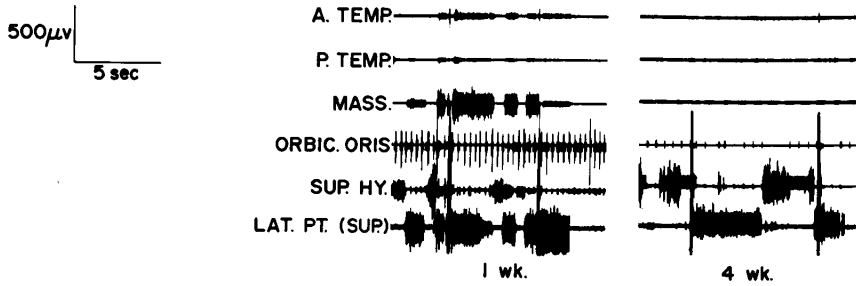
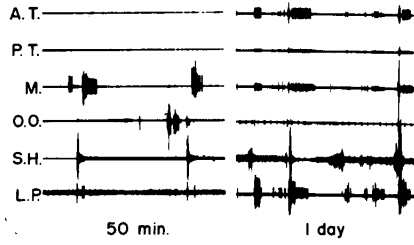
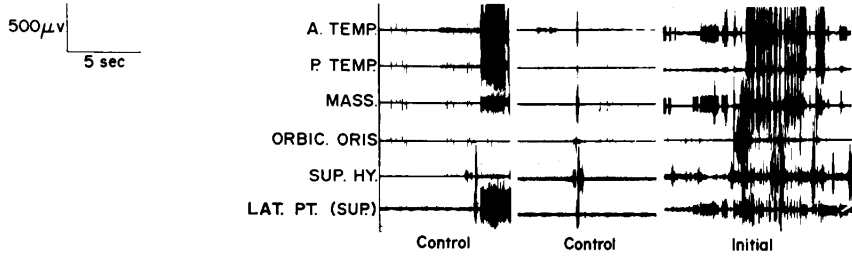


Abb. 2

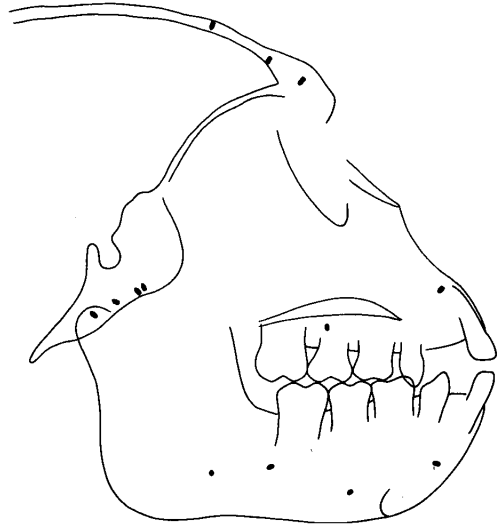


Abb. 3: Kephalmetrische Durchzeichnung eines Tieres im Kindesalter unmittelbar nach Entfernung der Apparatur.

des Ober- und Unterkiefers zu verzeichnen (Abb. 3). Art und Ausmaß der speziellen adaptiven Veränderungen waren in den verschiedenen Altersgruppen unterschiedlich und variierten in geringerem Umfang bei den einzelnen Tieren jeder Gruppe.

Statistische Analyse

Die in diesem Experiment gesammelten kephalometrischen Daten waren schon an sich vielgestaltig. Viele unterschiedliche, jedoch nicht unabhängige Messungen wurden für jedes Tier vorgenommen. Bei der Analyse dieser Art von Daten sollten für gewöhnlich multivariable Verfahren angewandt werden, in denen die Korrelationsstruktur der Daten Berücksichtigung findet. Die geringe Größe der Probemuster bei jeder Altersgruppe machte jedoch die Anwendung solcher Verfahren unmöglich. Man hat deshalb zwei univariable Verfahren angewandt. Die Anwendung dieser beiden Methoden ergab sich aus dem Umstand, daß im Entwurf des Experiments zwei Kontrollarten eingebaut waren.

Im ersten Verfahren wurde für jede Variable jeder Altersgruppe eine t-Statistik berechnet, um die leere Hypothese zu prüfen, daß die in der Periode II (Versuchsperiode) beobachtete Veränderung der in Periode I (Kontrollperiode) festgestellten Veränderung gleich ist. Dieses Verfahren wurde für die Versuchs- und Kontrollgruppen getrennt durchgeführt. Die Ergebnisse für die Versuchsgruppen sind aus den Tabellen 1, 2 und 3 ersichtlich. Die erwähnte Hypothese ist auf der 5-Prozent-Ebene (bei An-

TABELLE 1

Messungen

GRUPPE I

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Condylon	3.24 mm	.44 mm	3.61 mm	.99 mm	0.37 mm	.59 mm	1.087	
Sup. Cond.	2.35	.79	1.95	1.06	-0.40	.89	-0.778	
Post. Cond.	2.29	.13	3.06	.37	0.77	.35	3.887	.03***
Ant. Border	-0.68	.24	-0.54	.29	-0.14	.11	-2.167	
Post. Border	2.28	.53	2.34	.84	0.06	.32	0.363	
C.R.O. Angle	-3.1*	4.4*	2.4*	3.1*	5.5*	1.0*	6.995	.01*

GRUPPE II

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Condylon	1.94 mm	.51 mm	2.94 mm	.51 mm	1.00 mm	.11 mm	16.455	.002*
Sup. Cond.	1.15	.39	1.56	.29	0.41	.11	6.556	.01
Post. Cond.	1.81	.37	2.24	.38	0.43	.30	2.469	.07*
Ant. Border	-0.72	.31	-0.87	.22	-0.15	.51	-0.489	
Post. Border	1.48	.60	1.74	.15	0.26	.46	0.985	
C.R.O. Angle	1.1*	1.6*	1.5*	1.5*	2.6*	.3*	1.579	

GRUPPE III

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Condylon	1.33 mm	.16 mm	0.92 mm	.93 mm	-0.41 mm	.77 mm	-0.445	
Sup. Cond.	0.88	.46	0.51	.70	-0.37	1.35	-0.681	
Post. Cond.	1.21	.85	0.87	.47	-0.34	.53	-0.383	
Ant. Border	-0.41	.40	-0.40	.36	0.01	.69	0.980	
Post. Border	0.62	.63	0.50	.41	-0.12	.24	-0.480	
C.R.O. Angle	0.6*	1.4*	0.6*	1.0*	0.2*	.1*	0.745	

GRUPPE IV

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Condylon	0.24 mm	.41 mm	0.38 mm	.45 mm	0.14 mm	.04 mm	5.735	.01
Sup. Cond.	0.20	.35	0.28	.28	0.08	.17	0.829	
Post. Cond.	0.44	.38	0.23	.28	-0.21	.11	-3.295	
Ant. Border	-0.07	.07	-0.29	.27	.22	.20	1.889	
Post. Border	0.21	.12	0.12	.27	-0.09	.37	-0.419	
C.R.O. Angle	0.6*	.1*	0.1*	.6*	-0.5*	.1*	-0.762	

* ebenfalls statistisch signifikant, gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,05

** ebenfalls statistisch signifikant, gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,01

*** ebenfalls statistisch signifikant, gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,005

Tabelle 1: Knochenwachstum der Mandibula bei Versuchstieren während der Periode I (Kontrollperiode) und der Periode II (Versuchsperiode). Datenmaterial für drei Tiere pro Gruppe zusammengetragen.

wendung eines einteiligen Verfahrens) für 18 verschiedene Altersgruppenkombinationen in den Versuchsgruppen und für 3 Kombinationen in den Kontrollgruppen verworfen worden.

Im zweiten Verfahren wurde für jede Variable in jeder Altersgruppe eine t-Statistik berechnet, um die leere Hypothese zu prüfen, daß der mittlere Änderungswert in der Versuchsgruppe gleich dem der Kontrollgruppe war. Dieses Verfahren ist für jeden Zeitabschnitt getrennt durchgeführt worden. In der Periode I wurde die genannte Hypothese für 4 variable Altersgruppenkombinationen verworfen. In der Periode II wurde die Hypothese, nachdem die Versuchsbehandlung durchgeführt war, für 25 Kombinationen verworfen. Die Variablen, auf die dies zutrifft, sind in den Tabellen 1, 2 und 3 durch Sternchen in der Spalte ganz rechts gekennzeichnet.

Adaptationen in der Mandibula

Zwei Hauptveränderungen sind in der Morphologie der Mandibula festgestellt worden: Veränderungen im Wachstumstyp des Kondylus-Kopfes und kompensatorische Verlagerung des Gebisses. Die relative Bedeutung dieser Veränderungen hing zum Teil vom Alter des Tieres ab.

Der kondyläre Bereich. Die Wachstumssteigerungen am Kondylus waren in den Gruppen I und II am ausgeprägtesten. Die Durchschnittswachstumsraten in posteriorer, superiorer und posterosuperiorer Richtung am Kondylus-Kopf der Versuchstiere im Kindheitsalter waren im Vergleich zu den Kontrollwerten statistisch bedeutsam. So konnte zum Beispiel festgestellt werden, daß die am Kondylus dieser Versuchstiere gemessene Wachstumssteigerung in der Versuchsperiode um 51% größer war als die durchschnittliche Zunahme bei den gleichen Tieren während der Kontrollperiode (*Tabelle 1*). Der genaue Prozentsatz der Wachstumssteigerung war bei den einzelnen Tieren verschieden. Die geringste Zunahme des kondylären Wachstums betrug 36% beim Tier II a. Das Tier II c hatte die höchste Wachstumsrate, nämlich 74%. Das Durchschnittswachstum am Kondylus der Versuchstiere während der Periode II war um 27 bis 38% größer als das der Kontrolltiere in einem gleichlangen Zeitabschnitt. Der Umfang des posterioren Wachstums des Kondylus bei Versuchstieren im Babyalter war ebenfalls bedeutend größer als das der entsprechenden Kontrolltiere während der Periode II (*Tabelle 1*).

Bei den erwachsenen Tieren war das posterosuperiore Wachstum des Kondylus unbedeutend, während in Gruppe III im Durchschnitt eine leichte Abnahme der kondylären Wachstumsrate zu verzeichnen war (*Tabelle 1*). Zwei Affen (III a, III c) hatten große Schwierigkeiten mit der funktionellen Anpassung an die Apparatur, was aus einer Gewichtsabnahme von 1,5 kg bzw. 0,8 kg während der ersten vier Wochen zu ersehen war. Obwohl gegen Ende des Experiments dieser Verlust an Körpergewicht wieder auf-

geholt war, kann doch angenommen werden, daß bei diesen Tieren eine Verminderung des Gesamtumfangs an skelettalem Wachstum eingetreten ist.

Eine Änderung der Wachstumsrichtung am Kondylus kann auf die Unterkieferlage die gleiche Auswirkung haben wie eine Vergrößerung des Wachstumsumfangs. Während der Kontrollperiode bestand bei Affen im Babyalter eine hohe Vertikalkomponente im Kondyluswachstum. In der Versuchsperiode war jedoch eine Richtungsänderung im kondylären Wachstum bei allen drei Babytieren zu verzeichnen. Der Umfang des superiores Wachstums des Kondylus ging zurück, während sich die posteriore Wachstumsrate erhöhte (Abb. 4). In dieser jungen Altersgruppe mit dem höchsten, normalen Gesamtwachstum bewirkte eine Änderung im Wachstumsvektor des Kondylus eine Neuorientierung des Unterkieferwachstums in eine mehr nach vorwärts verlaufende Richtung.

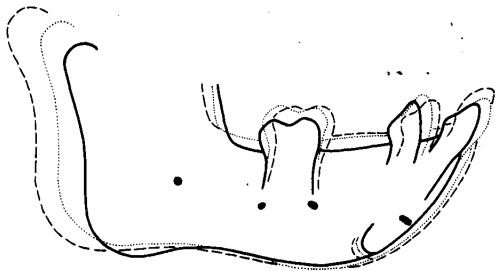


Abb. 4: Unterkieferwachstum bei einem Versuchstier im Babyalter (Ia) während der Kontroll- und Versuchsperioden. In allen Zeichnungen zeigt die durchgehende Linie den Beginn der Kontrollperiode, die gepunktete Linie den Beginn der Versuchsperiode und die gestrichelte Linie das Ende des Experiments an. Zu beachten sind die Behinderung der vertikalen Bewegung des Milchmolaren sowie die kompensatorische Verlagerung des Schneidezahnes. Der Wachstumsanstieg entlang der hinteren Kondylusfläche verstärkte sich während der Versuchsperiode noch beträchtlich.

Da sowohl die obere als auch die hintere Apposition während der Periode II zunahm, waren die vektorellen Veränderungen bei den Tieren im Kindesalter weniger stark. Bei zwei Tieren im Jugendalter war das kondyläre Wachstum etwas mehr horizontal ausgerichtet, obwohl diese Änderung beim Tier IIIa auf eine Abnahme des superiores Kondyluswachstums und nicht auf eine posteriore Wachstumszunahme zurückzuführen war. Bei den erwachsenen Affen waren keine vektorellen Veränderungen am Kondylus festzustellen.

Somit waren die adaptiven Reaktionen im Kondylusbereich bei den zwei jüngeren Altersgruppen am stärksten. In den Gruppen I und II nahm der *Umfang* des Wachstums beträchtlich zu. Die *Richtung* des kondylären Wachstums veränderte sich ebenfalls, besonders bei den Tieren im Babyalter. In den beiden älteren Gruppen wurde das Wachstum im Kondylusbereich durch das Experiment nur unwesentlich beeinflusst.

Der Unterkiefer-Ramus. Das auf Höhe der Schnittlinie der Okklusionsebene gemessene Wachstum des Ramus der Mandibula veränderte sich bei keiner der Altersgruppen. Entlang des hinteren Ramusrandes war keinerlei merkliche Knochenablagerung zu verzeichnen (Tabelle 1). Bei den jüngeren Versuchsaffen jedoch beeinflussten die festgestellten Veränderungen im Wachstum des Kondylus den Winkel zwischen Ramus-Kondylus und der Okklusionsebene. Bei den nicht behandelten Babytieren verkleinerte sich dieser Winkel während eines Zeitraumes von dreizehn Wochen in der Regel um etwa 3 bis 4 Grad. Im Verlaufe der Periode II jedoch war bei den Versuchstieren eine Umkehrung dieses Trends zu beobachten, da sich in dieser Zeit der genannte Winkel um durchschnittlich 2 bis 3 Grad öffnete. Da normalerweise eine Schließung eingetreten wäre, betrug die reine Veränderung etwa 5 bis 7 Grad, statistisch gesehen eine beträchtliche Zunahme (Tabelle 1). Ein ähnliches Wachstumsverhalten wurde in der Gruppe II beobachtet, jedoch ist hier in den älteren Altersgruppen dieser Winkel (CRO Angle) nicht beeinflusst worden.

Das Unterkiefergebiss. Die skelettalen Adaptionen in der Mandibula waren in erster Linie auf die Tiere im Baby- und Kindesalter beschränkt. Im Gegensatz hierzu waren Anpassungen im Gebiss in den reiferen Altersgruppen ausgeprägter (Tabelle 2). Die Gebiss-Adaptionen wurden unter Berücksichtigung der normalen Wanderung des Gebisses in jedem Alter analysiert, da die in der Periode II erfolgte Zahnbewegung sowohl auf das normale Wachstum als auch auf die Bedingungen des Experiments hätte bezogen werden können.

Bukkale Segmente. Von grundlegender Bedeutung waren Adaptionen in den bukkalen Segmenten der Mandibula, denn Änderungen im intermaxillären Verhältnis konnten durch eine experimentell herbeigeführte mesiale Bewegung der Unterkiefermolaren eintreten. Eine mesiale Bewegung der bukkalen Segmente der Mandibula, die auf die Wirkung der Apparaturen zurückgeführt werden konnte, erfolgte nur bei bestimmten Tieren der Gruppen II, III und IV. So war beispielsweise beim Tier IIc eine herbeigeführte Molarenbewegung von 0,5 mm nach mesial zu verzeichnen, während die beiden anderen Affen dieser Gruppe keine nennenswerten Veränderung der Bewegungsrichtung zeigten. Bei drei der sechs jugend-

TABELLE 2

Messungen

GRUPPE I

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Incisor Horiz.	1.03 mm	.29 mm	0.22 mm	.29 mm	0.81 mm	.59 mm	24.000	.001
Incisor Vert.	0.34	.28	0.71	.44	0.37	.54	1.184	
Cuspid Horiz.	0.79	.18	0.68	.36	-0.11	.20	-0.985	
Cuspid Vert.	0.41	.25	-0.14	.35	-0.55	.59	-1.592	**
Dec. Molar Horiz.	0.47	.20	0.60	.32	0.13	.15	1.511	
Dec. Molar Vert.	0.72	.48	0.23	.20	-0.49	.67	-1.276	*

GRUPPE II

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Incisor Horiz.	0.68 mm	.58 mm	0.33 mm	.37 mm	-0.35 mm	.79 mm	-0.755	
Incisor Vert.	0.09	.05	0.87	.16	0.76	.21	6.506	.01*
Cuspid Horiz.	0.50	.23	0.52	.21	0.02	.33	0.869	*
Cuspid Vert.	0.27	.09	0.04	.24	-0.23	.32	-1.118	
1st Molar Horiz.	0.33	.15	0.48	.35	.15	.41	0.635	
1st Molar Vert.	0.27	.23	0.32	.37	.05	.30	0.327	

GRUPPE III

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Incisor Horiz.	0.55 mm	.04 mm	0.39 mm	1.26 mm	-0.16 mm	1.24 mm	-0.225	
Incisor Vert.	0.00	.00	0.74	.54	0.74	.54	2.369	.07*
Cuspid Horiz.	0.92	.30	1.17	.06	0.25	.34	1.236	
Cuspid Vert.	0.97	1.20	-0.44	.30	-1.41	1.37	-1.782	
1st Molar Horiz.	0.09	.13	0.44	.28	0.35	.19	3.228	.04**
1st Molar Vert.	0.07	.12	-0.03	.17	-0.10	.11	-1.686	**
2nd Molar Horiz.	0.18	.17	0.38	.22	0.20	.42	8.488	.02**
2nd Molar Vert.	0.08	.13	-0.19	.17	-0.27	.58	8.000	.01**

GRUPPE IV

	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Incisor Horiz.	0.14 mm	.20 mm	-0.26 mm	.27 mm	-0.40 mm	.36 mm	-1.939	.10
Incisor Vert.	0.00	.00	0.63	.04	0.63	.10	10.539	.009**
Cuspid Horiz.	0.07	.06	0.62	.40	0.55	.45	2.120	.08*
Cuspid Vert.	0.00	.00	-1.07	.34	-1.07	.34	5.461	.02***
1st Molar Horiz.	0.00	.00	0.17	.29	0.17	.29	1.000	
1st Molar Vert.	0.01	.02	0.12	.32	0.11	.31	0.569	
2nd Molar Horiz.	0.00	.00	0.16	.34	0.16	.34	0.825	
2nd Molar Vert.	0.00	.00	0.11	.44	0.11	.44	0.433	
3rd Molar Horiz.	0.00	.00	0.09	.22	0.09	.22	0.730	
3rd Molar Vert.	-0.04	.03	-0.11	.10	-0.07	.67	1.857	

* ebenfalls statistisch signifikant gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,05

** ebenfalls statistisch signifikant gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,01

*** ebenfalls statistisch signifikant gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,005

Tabelle 2: Gebißveränderungen im Unterkiefer bei Versuchstieren während Periode I und II. Datenmaterial für drei Tiere pro Gruppe zusammengetragen.

lichen und ausgewachsenen Tiere hatten sich die bukkalen Segmente nach mesial bewegt. Da die Vorwärtswanderung bei Tieren dieser Altersstufen für gewöhnlich minimal ist, ist ein großer Teil dieser Bewegung als experimentell herbeigeführt betrachtet worden. Im Gegensatz hierzu war die horizontale Bewegung der bukkalen Segmente der Babygruppe im Vergleich zu den Kontrollwerten statistisch unbedeutend (Tabelle 2). Nur bei einem ausgewachsenen Tier (IV a) war die eingetretene Veränderung des Molarenverhältnisses in erster Linie auf eine experimentell herbeigeführte mesiale Verlagerung der bukkalen Segmente der Mandibula zurückzuführen.

Eckzähne. Stärkere Veränderungen in der Zahnposition konnten im vorderen Bereich beobachtet werden, vor allem bei jugendlichen und ausgewachsenen Affen (Tabelle 2). Während der Kontrollperiode brechen die Unterkiefer Eckzähne der Kontrolltiere durch und bewegen sich in eine nach vorwärts und nach oben verlaufende Richtung. In Anpassung an die Apparatur wurden die bleibenden Eckzähne der Gruppen III und IV nach vorne und nach unten gekippt, um den Hauptteil der Apparatur zwischen den oberen und unteren Eckzähnen unterbringen zu können. Durch das Kippen der Eckzähne wurde es dann möglich, die Mandibula in eine relativ normale anteroposteriore Lage zu bringen (Abb. 5). Dies war beim Tier III c und möglicherweise auch beim Tier IV b der Fall.

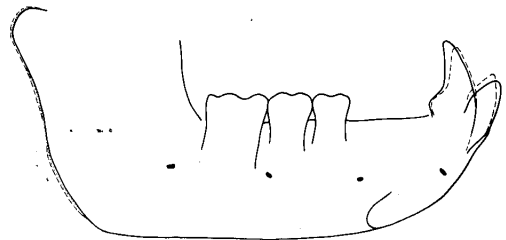


Abb. 5: Unterkieferwachstum eines ausgewachsenen Versuchstieres (IV b) während der Kontroll- und Versuchsperioden. Zu beachten sind das Kippen der Eckzähne nach vorne und nach unten sowie die kompensatorische Schneidezahnbewegung. Bei diesem Tier waren die bukkalen Segmente stabil.

Im Vergleich zu den älteren Tieren war bei den Baby- und Kindertieren keine merkliche Zunahme im Vorwärtswachstum der Eckzähne zu verzeichnen. Die vertikale Höhe nahm jedoch leicht ab, was in erster Linie auf eine okklusale und distale Abrasion der relativ weichen Milcheckzähne zurückzuführen ist.

Schneidezähne. Die Adaption der Schneidezähne erfolgte auf die gleiche Weise. Das normale anteroposteriore Wachstumsverhalten wurde geändert, so daß die vertikale Bewegung anstieg, während die nach vorwärts

gerichtete Bewegung abnahm (Abb. 4 und 5; Tabelle 2). Diese Schneidezahnbewegung war zum Teil auf die durch die Apparatur herbeigeführte Erhöhung der vertikalen Dimension um zwei Millimeter zurückzuführen. Die unteren Schneidezähne bewegten sich so, daß der Biß geschlossen wurde und sie mit ihren Antagonisten okkludieren konnten.

Adaptionen im maxillären Komplex

Auch im Oberkieferbereich jeder Altersgruppe sind spezifische skelettale und dentale Adaptionen festgestellt worden. Jede Behinderung der effektiven, nach vorwärts und nach unten gerichteten Bewegung des maxillären Komplexes trug zur Entstehung eines Klasse-III-Molarenverhältnisses bei. Ein erhöhtes, nach vorwärts und nach unten gerichtetes Wachstum wirkte dem erwarteten Versuchsergebnis entgegen.

Skelettale Adaptionen in der Maxilla. Die Verlagerung des Oberkieferkomplexes sowie das einhergehende suturale Wachstum wurden durch Vermessen der Translation der maxillären Implantate in Bezug auf die Im-

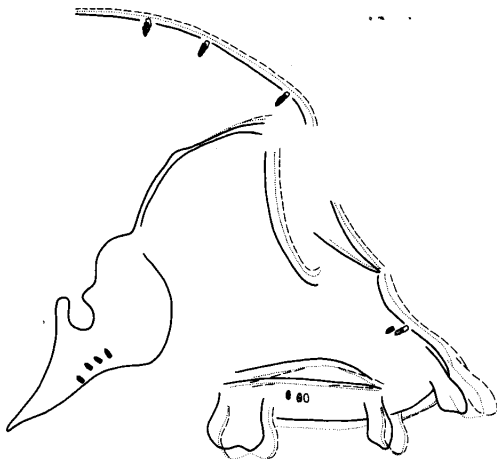


Abb. 6: Wachstum des Oberkieferkomplexes eines Versuchstiers im Kindesalter (II b) während der Kontroll- und Versuchsperioden. Zu beachten ist die Veränderung des Wachstumsvektors der Maxilla, was aus den Bewegungen der prämaxillären und maxillären Implantate zu ersehen ist. Das feste Implantat zeigt die Position zu Beginn der Kontrollperiode, das punktierte Implantat bedeutet die Lage zu Beginn der Versuchsperiode und das konturierte Implantat entspricht der Position am Ende der Versuchsperiode. Zu beachten ist auch das starke Nachlassen der nach vorne und nach unten gerichteten Bewegung des Eckzahnes und des Molars der Maxilla während der Versuchsperiode.

plantate in der vorderen Schädelbasis festgestellt. Mit Ausnahme von drei Tieren ist bei allen Versuchsaffen eine verringerte vertikale Verlagerung des Oberkieferkomplexes beobachtet worden (Abb. 6 und 7; Tabelle 3).

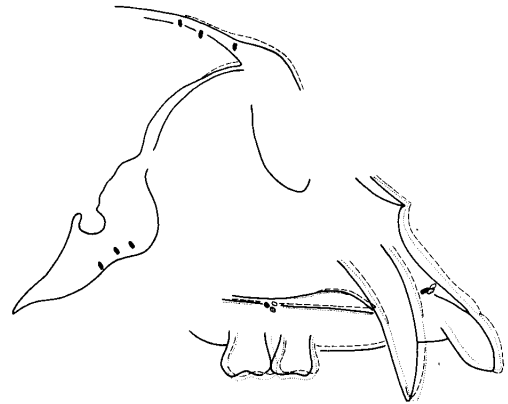


Abb. 7: Wachstum des Oberkieferkomplexes eines Versuchstieres im Jugendalter (III a). Zu beachten ist die leichte superiore Verlagerung des Oberkieferkomplexes im Verlaufe der Versuchsperiode, was aus der Bewegung der maxillären und prämaxillären Implantate ersichtlich wird.

So war zum Beispiel der durchschnittliche vertikale Abstieg der maxillären Implantate in den Gruppen I und II um 35 bis 50% geringer als bei den Kontrollwerten (Tabelle 3). In den Gruppen III und IV, die in der Regel eine geringere vertikale Entwicklung aufwiesen, wurde das weitere Absinken der Maxilla verhindert; in einigen Fällen hat man die Maxilla leicht nach oben zu bewegt (Abb. 7; Tabelle 3). Dieses umgekehrte Wachstumsverhalten dürfte in erster Linie mit Veränderungen in der vertikalen Dimension, und nicht mit anteroposterioren Veränderungen im Zusammenhang stehen.

Die vertikalen Adaptionen auf Veränderungen im Mundbereich waren nach anterior etwas ausgeprägter. Während der Kontrollperiode verlagerte sich dieser Bereich des Oberkieferbogens normalerweise in horizontaler Richtung mit minimaler, jedoch wechselnder Vertikalbewegung. Am Ende der Versuchsperiode hatte sich das prämaxilläre Implantat bei allen Altersgruppen in größerem Umfang nach superior verlagert als das maxilläre Implantat (Tabelle 3; Abb. 6 und 7). Die resultierende unterschiedliche Verlagerung unterstrich die normale Rotation des Oberkieferkomplexes im Gegenuhrzeigersinn; folgerichtig wurde die Gaumenebene anterior nach oben gekippt.

TABELLE 3

Messungen	GRUPPE I							
	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Premax. Imp. Horiz.	1.68 mm	.40 mm	1.54 mm	.38 mm	-0.14 mm	.31 mm	-0.787	
Premax. Imp. Vert.	0.28	.43	-0.04	.52	-0.32	.56	-0.360	
Max. Imp. Horiz.	1.28	.49	2.06	.63	0.78	1.16	1.163	
Max. Imp. Vert.	0.83	.44	0.41	.71	-0.42	.41	-1.531	
Palatal Descent	0.43	.20	0.50	.71	0.07	.81	0.072	

Messungen	GRUPPE II							
	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Premax. Imp. Horiz.	1.40 mm	.38 mm	1.09 mm	.88 mm	-0.31 mm	.51 mm	-0.860	
Premax. Imp. Vert.	0.05	.07	-0.56	.13	-0.61	.59	-14.600	.02**
Max. Imp. Horiz.	1.61	.22	1.44	.97	-0.17	1.07	-0.269	
Max. Imp. Vert.	0.22	.23	0.07	.21	-0.15	.43	-0.619	
Palatal Descent	0.37	.16	-0.35	.18	-0.72	.24	-5.127	.02***

Messungen	GRUPPE III							
	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Premax. Imp. Horiz.	0.68 mm	.59 mm	0.80 mm	.55 mm	0.12 mm	.72 mm	0.293	
Premax. Imp. Vert.	-0.13	.26	-0.79	.17	-0.66	.25	-4.567	.02***
Max. Imp. Horiz.	0.53	.69	0.82	.77	0.29	1.07	0.457	
Max. Imp. Vert.	0.45	.42	-0.37	.76	-0.82	1.18	-1.211	
Palatal Descent	0.02	.02	-0.41	.37	-0.43	.35	-2.137	.08*

Messungen	GRUPPE IV							
	Periode I		Periode II		mittlere Differenz		t stat	Signifi- kanz
	X	S. D.	X	S. D.	X	S. D.		
Premax. Imp. Horiz.	0.24 mm	.41 mm	0.47 mm	.47 mm	0.23 mm	.73 mm	0.541	
Premax. Imp. Vert.	0.24	.23	-0.22	.20	-0.46	.43	-1.859	*
Max. Imp. Horiz.	0.56	.79	0.81	.32	0.25	1.10	0.319	
Max. Imp. Vert.	0.30	.02	-0.29	.41	-0.59			
Palatal Descent	0.09	.15	-0.17	.15	-0.26	.27	-1.655	

* ebenfalls statistisch signifikant gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,05

** ebenfalls statistisch signifikant gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,01

*** ebenfalls statistisch signifikant gegenüber der Kontrollgruppe bei Standard 0,005

Tabelle 3: Verlagerung des Oberkieferkomplexes bei Versuchstieren während Periode I und Periode II. Datenmaterial für drei Tiere pro Gruppe zusammengetragen.

Die Versuchsbedingungen beeinflussten die Horizontalverschiebung des Oberkieferkomplexes bei allen Tieren, außer bei dem Tier IVc, jedoch drückte sich dieser Effekt bei den verschiedenen Tieren in unterschiedlicher Weise aus. Bei fünf Affen war die Vorwärtsverlagerung geringer. Sechs Tiere zeigten verstärktes Vorwärtswachstum. Dieser Unterschied kann mit der spezifischen Natur der funktionellen Beanspruchungen, denen der Oberkieferbogen jedes Tieres ausgesetzt war, in Zusammenhang stehen.

Veränderungen im Gebiß der Maxilla. Wegen der in der Regel minimalen Bewegung der Seitenzähne bei jugendlichen und ausgewachsenen Tieren dieser Altersstufen und wegen der betroffenen gesamten Wurzelfläche übte die Apparatur nur wenig Wirkung auf die bukkalen Segmente dieser Tiere aus. Bei jüngeren Tieren traten jedoch Adaptionen im Gebiß auf. Bei allen drei Tieren im Kindesalter war eine Verminderung des Abwärtswachstums der bukkalen Segmente in bezug auf den Lageort der maxillären Implantate zu beobachten. Andererseits wurde eine reduzierte Vorwärtsbewegung der bukkalen Segmente bei drei Babytieren und einem Affen im Kindesalter festgestellt. Diese Behinderung der Zahnbewegung stand in Einklang mit den erwarteten Versuchsergebnissen.

Bei den Frontzähnen waren ebenfalls Adaptionen in allen Altersgruppen zu verzeichnen. Die Abwärtsbewegung der Schneidezähne verstärkte sich, die Vorwärtsbewegung ging zurück. Diese kompensatorische Zahnbewegung, die ähnlich der der unteren Schneidezähne verlief, war wiederum ein Versuch zur Wiederherstellung der Okklusionsebene.

Überblick

Kein einzelner adaptiver Prozeß kann isoliert und als die einzige Ursache für irgendeine Veränderung im mandibulomaxillären Verhältnis bei den verschiedenen Altersgruppen bezeichnet werden. Vielmehr ist jedes neue Lageverhältnis das zusammengefaßte Ergebnis spezifischer komplementärer (und gelegentlich auch entgegengesetzt wirkender) Adaptionen im gesamten kraniofazialen Bereich. Natur und Ausmaß der Adaptionen änderten sich mit dem Alter der Tiere und waren auch bei Tieren der gleichen Altersgruppe unterschiedlich. Die Adaptionen im Unterkiefer waren bei jüngeren Tieren (Gruppen I und II) in erster Linie skelettaler Natur, während mit zunehmender Reife kompensatorische Zahnbewegungen an Bedeutung gewannen. Die Auswirkung der Versuchsbedingungen auf das Mittelgesicht betraf vor allem den Wachstumsumfang und die Wachstumsrichtung der skelettalen Komponenten des Oberkieferzahnboogens. Dies traf auf alle Altersstufen zu. Veränderungen im Gebiß der Maxilla waren hauptsächlich auf jüngere Tiere beschränkt, da die bukkalen Segmente der jugendlichen und ausgewachsenen Tiere im allgemeinen stabil waren.

3. Mikroskopisches Wachstum und Adaption

Bei zwei Versuchstieren jeder Gruppe wurde die histologische Beschaffenheit des Kiefergelenks analysiert und mit den Kontrolltieren der betreffenden Altersgruppe verglichen. Die acht Versuchstiere sind dreizehn Wochen nach Beginn der Versuchsperiode getötet worden.

Gruppe I

Allgemeine Knochenablagerung ist entlang des vorderen Randes des postglenoiden Fortsatzes und innerhalb der Fossa glenoidalis festgestellt worden. Am hinteren Rand des Fortsatzes, wo sich normalerweise Knochenapposition findet, zeigten sich beim Tier IIb Knochenablagerungen, beim Tier Ic jedoch war dieser Bereich resorptiv. Resorptionsbereiche konnten entlang von zwei Dritteln des hinteren Randes ausgemacht werden. Resorptive Aktivität war bei beiden Tieren auch am Gelenkhöcker zu verzeichnen, und zwar bei dem einen Tier am Rand des Höckers und bei dem anderen entlang der hinteren schrägen Fläche.

Am Kondylus der Mandibula konnte keine klare Abweichung der histologischen Struktur festgestellt werden. Der Gelenkknorpel war in seinem Charakter proliferativ, jedoch nicht in dem Ausmaß, daß sich beim Vergleich mit Kontrolltieren der entsprechenden Altersstufe ein beträchtlicher Anstieg in seiner Stärke gezeigt hätte. Periostale Resorption und endostale Ablagerungen wurden an der Ansatzstelle des seitlichen Keilbeinmuskels am Gelenkkopf beobachtet; diese Erscheinungen traten auch bei den Kontrolltieren auf.

Gruppe II

Knochenablagerungen waren entlang der hinteren und oberen, vorderen Ränder des postglenoiden Fortsatzes zu verzeichnen, während sich am Ende des Fortsatzes resorptive Oberflächenreaktionen zeigten. Die Auskleidungsfläche der Fossa war ihrer Natur nach im allgemeinen depositiv, ebenso der Gelenkhöcker. Beim Tier IIc wurde am seitlichen Teil der hinteren, schrägen Fläche des Gelenkhöckers ein Bereich periostaler Oberflächenresorption festgestellt. Ein solcher Resorptionsbereich ist auch bei einem Kontrolltier beobachtet worden.

Von besonderem Interesse war das Auftreten von Knorpelzellen am Knochenkamm des Gelenkhöckers tief zur faserigen Gelenkfläche hin. Diese Zellen ähneln der Bindegewebsbildung in dieser Altersgruppe. Knorpelzellen in diesem Bereich sind bei einem der Versuchstiere und in größerem Umfange bei zwei Kontrolltieren festgestellt worden.

Die Morphologie der kondylären Strukturen der Versuchstiere war auch hier nicht von der der Kontrolltiere zu unterscheiden. Periostale Resorp-

tion und endostale Ablagerungen wurden im Bereich der Ansatzstelle des seitlichen Keilbeinmuskels festgestellt.

Gruppe III

Obgleich die Knorpelzellen am Knochenkamm des Gelenkhöckers im Tier III b hypertrophisch waren, traten bei vier der sechs Kontrolltiere gleichartige histologische Erscheinungen von hypertrophischen Knorpelzellen auf (Abb. 8). Das Tier III c zeigte nur geringe fibrocartilaginöse Proliferation am Gelenkhöcker. Am postglenoiden Fortsatz gab es Knochenablagerungen sowohl anterior als auch posterior; ausgenommen hiervon war ein

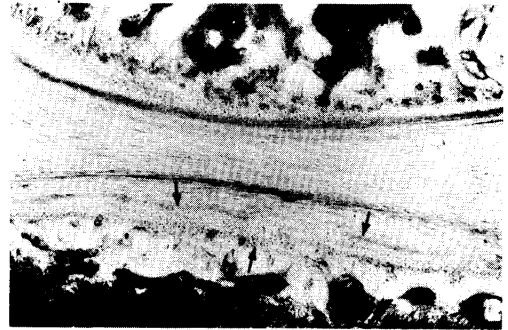


Abb. 8: Hypertrophische Knorpelzellen am Knochenkamm des Gelenkhöckers (siehe Pfeil) bei einem jugendlichen Versuchstier (II b). Gleichartige Erscheinungen sind bei mehreren Kontrolltieren der gleichen Altersstufe festgestellt worden. Hämatoxylin und Eosin (16 x).



Abb. 9: Kniegelenk eines ausgewachsenen Versuchstieres. Zu beachten ist die Verdickung der fibrösen Schicht auf dem Gelenkhöcker (siehe Pfeil). Eine gleichartige Verdickung dieser Fläche konnte auch bei einem Kontrolltier festgestellt werden. Hämatoxylin und Eosin (8 x).

Resorptionsbereich am Ende des Fortsatzes. Innerhalb der Fossa oder entlang des Gelenkhöckers sind keine Oberflächenresorptionen beobachtet worden. Die verschiedenen mandibulären Bestandteile des Kiefergelenks konnten zu diesem Zeitpunkt nicht von denen unbehandelter Tiere unterschieden werden.

Gruppe IV

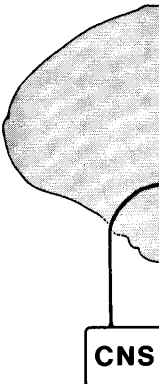
Bei den beiden Versuchstieren IVb und IVc sowie dem getöteten Kontrolltier IVf handelte es sich um junge, ausgewachsene Affen, bei denen die drei Gelenkknorpelzonen immer noch feststellbar waren. Der Knorpel war noch nicht durch fibröses Gelenkgewebe ersetzt worden, wie dies bei zwei anderen, älteren Kontrolltieren bereits der Fall war.

Die bemerkenswerteste histologische Erscheinung in Gruppe IV war das Auftreten von Knorpelzellen in den tieferen Schichten des Gelenkhöckers sowie eine Verdickung der fibrösen Schicht auf dem Gelenkhöcker (Abbildung 9). Dies trat vor allem beim Tier IVc und auch bei einem der Kontrolltiere sehr deutlich zu Tage. Pathologische Erscheinungen konnten bei den Versuchstieren aller Altersstufen nicht festgestellt werden.

Diskussion

Frühere experimentelle Untersuchungen an Affen haben gezeigt, daß die Herstellung kontrollierter experimenteller Disproportionen, die den Mund-Gesichtsbereich verändern, zu spezifischen skelettalen Veränderungen führen kann. Häupl und Psansky³, Derichweiler⁵ und Joho⁸ sowie weitere Autoren waren der Ansicht, daß experimentell erzielte Adaptionen in den betroffenen Skelettbereichen auf die veränderten Erfordernisse der zugehörigen Muskulatur zurückgeführt werden konnten. Die sogenannte „funktionelle Natur“ der orofazialen Adaptionen ist aber im wesentlichen immer noch unklar und es sind bis jetzt noch sehr wenig Untersuchungen durchgeführt worden, die sich mit den gleichzeitig im neuromuskulären System eintretenden Adaptionen befaßten.

In der vorliegenden Studie sind spezielle neuromuskuläre und skelettale Adaptionen, die ihre Ursache in experimentellen Veränderungen im Mundbereich hatten, bei Rhesusaffen (*Macaca mulatta*) verschiedener Altersstufen beschrieben worden. Es wurde eine Okklusionsform konstruiert, die die Empfindungsreize im Mundbereich veränderte und eine anteriore Stellung der Mandibula während der funktionellen Kieferbewegungen herbeiführte. Während die früher erörterten adaptiven Prozesse und Reaktionen sehr komplex sind, kann man hier zwei Haupttypen adaptiver Reaktionen leicht erkennen; nämlich Adaptionen in der anteroposterioren Dimension des Mittelgesichts und der Mandibula sowie Adaptionen in der vertikalen Dimension dieser Bereiche.



Anteroposteriore Adaptionen

Beim Schließen des Unterkiefers in der neuen Okklusionsstellung wurden am Anfang die exterozeptiven und propriozeptiven Reize in den betroffenen Mund-Gesichtsbereichen verändert (Abb. 10). Die Apparatur wurde so konstruiert, daß der Affe lernen mußte, seinen Unterkiefer nach vorne zu schieben, wenn ein gutes Schließen des Kiefers erreicht werden sollte. Das bisherige funktionelle muskuloskelettale und okklusale Verhalten wurde unterbrochen und durch eine veränderte neuromuskuläre Aktivität ersetzt.

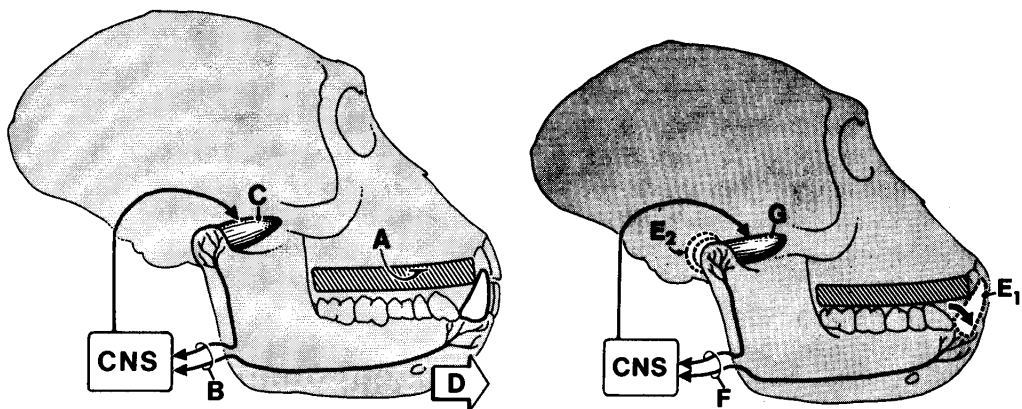


Abb. 10: Anteroposteriore Adaptionen. (A) Anbringen der Apparatur. (B) Die Veränderungen in den exterozeptiven und propriozeptiven Reizen, repräsentiert durch Rezeptoren im Gebiß und im Kiefergelenk; werden an das zentrale Nervensystem (CNS) weitergeleitet. (C) Diese Veränderung in den Empfindungsreizen führt möglicherweise zu einem komplexen Verhalten der veränderten neuromuskulären Funktion, was schematisch durch eine Kontraktion des oberen Kopfes des lateralen Keilbeinmuskels angezeigt ist. (D) Das Ergebnis ist eine nach vorwärts gerichtete Funktion der Mandibula. Die Art der skelettalen Adaptionen hängt vom Reifealter des Tieres ab. (E₁) Eine der bei ausgewachsenen Tieren beobachteten Gebißadaptionen. (E₂) Eine der bei jüngeren Tieren eingetretenen Knochenveränderungen. (F) Es treten nochmals Änderungen der Empfindungsreize im Mundbereich auf, die ein Nachlassen der entsprechenden neuromuskulären Kompensationen bewirken und zur Entwicklung wirksamerer Muskeltypen führen (G).

Entwicklung modifizierter funktioneller Verhaltensweisen

Spezifische Veränderungen in der funktionellen Aktivität sind festgestellt worden. Eine Funktionsänderung zeigte sich zuerst elektromyographisch durch erhöhte Aktivität im äußeren Kopf des Kaumuskels. Der Kaumuskel des Rhesusaffen ist wie der des Menschen biomechanisch für gemäßigte protrusive Bewegungen geschaffen.¹⁹ Beobachtet wurde auch eine reduzierte Beteiligung des hinteren Teiles des Schläfenbeinmuskels. Diese Än-

derung der Muskelaktivität begünstigte das gleitende Schließen der Mandibula, das während der ersten Zeit der Versuchsperiode zu sehen war. Nach und nach wurde der Unterkiefer vor dem Schließen reflexartig nach vorwärts bewegt, um eine Behinderung durch die Apparatur und ein Okklusionstrauma zu verhindern. Gleichzeitig erhöhte sich die Aktivität des oberen Kopfes des lateralen Keilbeinmuskels immer mehr, mit Muskelstromentladungen sowohl bei funktionellen Bewegungen als auch während der Einhaltung der Ruhelage (Abb. 10). Die tonischen Entladungen wurden in den aufeinanderfolgenden Aufzeichnungen immer häufiger und erreichten bei vier bis acht Wochen ihr Maximum.

Der untere Kopf des seitlichen Keilbeinmuskels ist im Verlaufe der Versuchsphase dieses Projekts nicht besonders untersucht worden. Gelegentliche Aufzeichnungen von diesem Bereich ergaben keinerlei Anhaltspunkte einer Überaktivität oder einer veränderten Funktion im unteren Kopf dieses Muskels. Getrennt durchgeführte Aufzeichnungen von den beiden Muskelköpfen ergaben unterschiedliche Aktivitätsmerkmale, was darauf hindeutete, daß sich die Muskelaktivität während der elektromyographischen Aufzeichnungen wahrscheinlich nicht von einem Muskelkopf auf den anderen ausbreitete.

McNamara¹⁷ deutet in einer Studie über die normale Funktion des lateralen Keilbeinmuskels beim Rhesusaffen an, daß die beiden Köpfe dieses Muskels funktionell gesehen voneinander unabhängig sind. Der obere Kopf des lateralen Keilbeinmuskels beim Rhesusaffen ist der einzige Teil des ganzen Muskels, der während der Schließbewegungen elektrisch aktiv ist, während der untere Kopf mit seiner nach abwärts gerichteten Orientierung während der Öffnungsbewegungen Aktivität zeigt. Letzterer unterstützt vermutlich die Überführung des Kondyluskopfes nach anterior, inferior und kontralateral während der Tätigkeit, in der der Kondyluskopf in bezug auf den Gelenkhöcker frei bewegt wird.

McNamara stellt fest, daß durch eine leichte Kontraktion des oberen Kopfes während der Schließbewegungen der Kondyluskopf und die Gelenkscheibe stabilisiert werden könnten, indem sie bei den Bewegungen gegen den Gelenkhöcker synchron zueinander gehalten werden, vor allem während funktioneller Bewegungen wie Kauen und Schlucken. Ferner sagt er, daß durch verstärkte Kontraktion des oberen Kopfes die Gelenkscheibe, der Kondyluskopf und die Gelenkkapsel nach anterior und etwas nach superior bewegt werden könnten, möglicherweise gegen die hinteren und unteren Flächen des Gelenkhöckers.

In der vorliegenden Studie scheint der obere Kopf des lateralen Pterygoidmuskels eine aktive Rolle in der Bestimmung der anteroposterioren Unterkieferposition gespielt zu haben. Die beobachtete Vorwärtsverlagerung der Mandibula kann ihre Ursache in Kontraktionen des oberen Muskel-

kopfes haben. Durch solche Kontraktionen können die Gelenkscheibe und der Kondyluskopf entlang des Gelenkhöckers nach vorwärts bewegt (oder rotiert) und stabilisiert worden sein.

Erkenntnisse aus anderen, in unserem Laboratorium durchgeführten Experimenten scheinen die Vermutung zu bestätigen, daß der obere Kopf des seitlichen Pterygoid-Muskels ein bestimmendes Element in der anteroposterioren Unterkieferlagerung ist. In einer unveröffentlichten Studie über eine experimentell herbeigeführte retrusive Unterkieferfunktion bei Affen wurde eine erhöhte Aktivität im oberen Kopf dieses Muskels festgestellt. Anscheinend stellte diese verstärkte Aktivität den Versuch dieses Muskels dar, eine posteriore Verlagerung des Unterkieferkondylus und der Gelenkscheibe während der funktionellen Bewegungen zu verhindern. In einer anderen Untersuchung der erhöhten vertikalen Dimension bei Affen²⁰ wurde jedoch während der funktionellen Bewegungen, nach erfolgter zwei bis fünfzehn Millimeter großer Abwärtsrotation der Mandibula, bei wahrscheinlich nur geringfügiger anteroposteriorer Lageveränderung des Gelenkkopfes, keinerlei Überaktivität im oberen Muskelkopf beobachtet. In einem weiteren, unveröffentlichten Experiment an Affen schließlich, bei dem man den Tieren die Zähne zu Versuchszwecken entfernt hatte, wurde der seitliche Keilbeinmuskel stark überaktiv. In diesem Fall war die Funktion des oberen Muskelkopfes wahrscheinlich auf die Stabilisierung der kondylären Elemente ausgerichtet, vielleicht in dem Versuch, die anteroposteriore und mediolaterale Orientierung der Mandibula zu regulieren und aufrechtzuerhalten. Eine solche erhöhte Aktivität im oberen Kopf des seitlichen Keilbeinmuskels dürfte bei den zahnlosen Tieren zur Notwendigkeit geworden sein, damit der Verlust der normalerweise vom Gebiß ausgehenden exterozeptiven Reize kompensiert werden konnte.

In den oben erwähnten Experimenten und der vorliegenden Studie war die erhöhte Aktivität im oberen Kopf des seitlichen Keilbeinmuskels in der Regel mit Veränderungen der horizontalen Unterkieferposition verbunden, bei Rotations- oder vertikalen Veränderungen der funktionellen Position konnte ein solcher Aktivitätsanstieg jedoch nicht beobachtet werden. Diese unterschiedliche Aktivität dürfte darauf hindeuten, daß der obere Muskelkopf nicht nur die Gelenkscheibe und den Gelenkkopf während der normalen Schließbewegungen stabilisiert, sondern daß er auch als *Positioner* des Kondylus und der Gelenkscheibe entlang der Gelenkflächen am Schläfenbein arbeitet, womit er zur Regulierung und Aufrechterhaltung der anteroposterioren Ausrichtung der Mandibula beiträgt.

Mechanismen der modifizierten Funktion

Die Errichtung und Aufrechterhaltung anteroposteriorer und mediolateraler Kieferbeziehungen hängen nicht nur von Rezeptoren im Kiefer-

gelenk und in der Muskulatur, sondern auch von den Rezeptoren im periodontalen Ligamentum, in der Zunge, im Gaumen und in weiteren Mund-Gesichtsstrukturen ab. Moyers¹⁸ stellt fest, daß die zentrische Relation und andere Kieferbeziehungen erst nach dem Durchbruch der Zähne genau definiert werden können. Die von den periodontalen Rezeptoren kommenden Sinnesimpulse laufen durch den mesenzephalischen Abschnitt des Trigemiusnervs und gelangen in subkortikale und kortikale Bereiche, wo sie mit Reizimpulsen aus den Gelenk-, Muskel- und weiteren oralen Rezeptoren das motorische System der Kaumuskeln beeinflussen.

In der vorliegenden Untersuchung berührten zu Anfang die Unterkiefer-eckzähne beim Anheben der Mandibula in Schließstellung die Okklusions-ebene in einem Winkel zur Längsachse der Zähne. Die Mandibula wurde dann während des Schließens durch die Eckzähne nach vorne geführt, wobei sie an den schrägen Flächen der Apparatur entlangglitt. Es zeigte sich, daß die periodontalen Rezeptoren auf laterale Beanspruchungen empfindlicher wirkten als auf axiale.^{21, 22} Vermutlich um okklusale Störungen zu verhindern, dürften die von den periodontalen Mechanorezeptoren und auch von den Gelenk- und Muskelrezeptoren kommenden Reize eine nach vorwärts gerichtete Verlagerung der Mandibula herbeigeführt haben. Die erhöhte Aktivität im oberen Kopf des Keilbeinmuskels kann Symptom eines (zuerst nicht bedingten und dann bedingten) Reflexes sein, der dazu beitrug, daß sich das Tier an die experimentellen Veränderungen im Mundbereich anpaßte.

Die Vorwärtsverlagerung des Unterkiefers kann auch eine Sekundärreaktion auf die durch die Apparatur und die darauffolgenden Veränderungen der Zungenstellung herbeigeführte Änderung des Mundvolumens gewesen sein.^{23, 24} Während der ersten Tage des Experiments hat sich die Mandibula abgesenkt, möglicherweise um die Aufrechterhaltung des Luftweges durch Veränderung der Zungenstellung zu gewährleisten. Als sich adaptive funktionelle Veränderungen einstellten, dürften sich sowohl die Zunge als auch der Unterkiefer nach vorne verlagert haben, und zwar nicht nur um eine wirksamere funktionelle Position für die Bewegungen der Mandibula einzunehmen, sondern auch um den für die Zungenfunktion benötigten Raum im Mund aufrechtzuerhalten.

Wechselbeziehung zwischen neuromuskulären und skelettalen Adaptionen

Berücksichtigt werden muß auch das fortlaufende Verschwinden der modifizierten neuromuskulären Phänomene, wie zum Beispiel der im Keilbeinmuskels beobachteten Symptome. Die Stärke der Aktivität im oberen Kopf dieses Muskels kann direkt oder indirekt mit den durch die experimentellen Verfahren herbeigeführten, nach und nach auftretenden skelettalen Adaptionen in Beziehung gebracht werden (Abb. 10).

Bei Abschluß der Tierversuche schien es, als hätten sich die meisten Tiere skelettal den experimentellen Veränderungen angepaßt. Kephalometrisch hatten die Unterkiefer-Gelenkfortsätze ihre ursprüngliche anatomische Ausrichtung in der Gelenkfläche des Schläfenbeins wieder eingenommen. Die hierfür bestimmenden strukturellen Anpassungen waren nicht auf einen Bereich des Gesichts beschränkt, sondern waren vielmehr die Zusammenfassung vieler skelettaler und dentaler Adaptionen im gesamten Schädel-Gesichts-Komplex. Die spezielle Natur dieser skelettalen Adaptionen stand in direktem Zusammenhang mit dem Alter des Tieres. So wurden zum Beispiel kompensatorische Zahnbewegungen in der Mandibula bei jugendlichen und ausgewachsenen Tieren beobachtet, während Veränderungen im Umfang und/oder in der Richtung des kondylären Wachstums bei jüngeren Altersgruppen auftraten (Abb. 10). Aus der vorliegenden Studie hat sich ergeben, daß mit dem Eintreten skelettaler Adaptionen, gleichgültig, welcher Art sie waren, die Notwendigkeit kompensatorischer Muskelfunktionen abnahm.

Die Wechselbeziehung zwischen Muskelfunktion und strukturellen Adaptionen kann durch Vergleich der vorliegenden Befunde mit denen früherer Studien noch weiter untersucht werden. Dabei kann der Zeitpunkt des Auftretens und Verschwindens veränderter funktioneller Erscheinungen zur Größe und zum Umfang der skelettalen und dentalen Adaptionen in Beziehung gebracht werden. In unserer anfänglichen Protrusionsuntersuchung¹⁰, auf der die vorliegende Studie teilweise basiert, wurden sechs Affen im Kindesalter fünf Monate lang einer gleichartigen Veränderung der funktionellen Unterkieferposition unterzogen. Die monatlichen Wachstumsraten wurden gemessen und man hat, wie in der vorliegenden Studie, eine statistisch bedeutsame Erhöhung des Wachstums des Gelenkfortsatzes der Mandibula festgestellt. Die Wachstumsrate änderte sich jedoch mit der Länge der Zeit nach der Zementierung der Apparatur. Das erhöhte Wachstum war bei den Versuchstieren im allgemeinen während der ersten drei Monate, mit einer Spitzenwachstumsrate im zweiten Monat, zu verzeichnen. Nach vier Monaten jedoch unterschied sich die Wachstumsrate der Versuchstiere nicht wesentlich von der der Kontrolltiere.

Beim Vergleich obiger Ergebnisse mit denen der vorliegenden Studie ist vor allem zu beachten, daß das stärkste Skelettwachstum bei diesen Tieren im zweiten Monat auftrat. Die höchste adaptive, neuromuskuläre Aktivität war in der vorliegenden Studie unmittelbar vor oder während dieser Periode zu verzeichnen. Das nachlassende adaptive Skelettwachstum kann dahingehend ausgelegt werden, daß das strukturelle Gleichgewicht im vierten Monat wieder hergestellt war. Die Aktivität des oberen Kopfes des Keilbeinmuskels ging zu dieser Zeit ebenfalls zurück. Die Tatsache jedoch, daß die herbeigeführte Keilbeinmuskellaktivität am Ende der Ver-

suchsperiode nicht bei allen Tieren aufhörte, deutet auch darauf hin, daß das kompensatorische Skelettwachstum bei einigen Tieren noch nicht abgeschlossen war.

Wechselbeziehung zwischen neuromuskulären und mikroskopischen Befunden

Charlier²⁵ sowie Petrovic und Stutzmann²⁶ stellten fest, daß das Kondyluswachstum von funktionellen Stimulationen, vor allem aus dem Keilbeinmuskel, abhängen kann. Charlier²⁵ hat beobachtet, daß die Wachstumsrichtung des Unterkiefergelenkkopfes beim Menschen mit der Zugkraft des Keilbeinmuskels zusammenhängt, dessen hintere Ansatzstelle neben dem Gelenkknorpel liegt. Charlier und Petrovic²⁷ berichteten, daß sich beim kondylären Gelenkknorpel der Ratte keinerlei unabhängiges Wachstumspotential zeigte, wenn dieser von seinen Umgebungsstrukturen isoliert wurde. Vogel und Pignanelli²⁸, Charlier²⁵ sowie Charlier und Mitarbeiter²⁹ haben jedoch berichtet, daß der Gelenkknorpel auf funktionelle Reizkräfte mit einem erhöhten Wachstum des Unterkiefer-Gelenkfortsatzes reagieren kann. Eine nach vorwärts gerichtete Verlagerung der Mandibula führt zu erhöhtem Zellenwachstum in der proliferativen Schicht des kondylären Gelenkknorpels.

Stöckli und Willert⁹ beobachteten im Verlaufe einer histologischen Untersuchung der protrusiven Funktion bei jungen Affen Anzeichen gewisser struktureller Adaptionen im Gelenkkopf, die in bestimmten Zeitintervallen eintraten. Eine erhöhte Proliferation des Gelenkknorpels sowie eine verstärkte Knorpelossifikation sind nach dreieinhalb Wochen bzw. nach sieben Wochen festgestellt worden. Anzeichen von Veränderungen in der Gewebereaktion wurden jedoch weder nach dem siebzehnwöchigen Zeitabschnitt noch nach irgendeinem darauffolgenden Zeitintervall beobachtet. Stöckli und Willert nahmen an, daß alle Versuchstiere die gleiche Folge von Gewebsreaktionen hatten, daß aber letztlich alle Anzeichen von Adaptionen durch die normalen, inneren Umwandlungsprozesse beseitigt wurden.

In der vorliegenden Studie waren bei den aus den Versuchstieren im Kindesalter entnommenen Kiefergelenken keinerlei histologische Anzeichen von experimentell herbeigeführten Gewebsreaktionen festzustellen. Die Versuchsperiode war jedoch genügend lange, so daß ein innerer Umbildungsprozeß, ähnlich dem von Stöckli und Willert beschriebenen, stattfinden konnte, der jede Spur einer vorübergehenden adaptiven Reaktion überdeckte. Möglich ist aber auch, daß die Natur der adaptiven Prozesse dergestalt war, daß die Prozesse in keinem Zeitintervall von normalen Wachstumsprozessen unterschieden werden konnten. Eflow³⁰ hat gezeigt, daß kleinere Richtungsänderungen während des Wachstums zu veränder-

ten Strukturverhältnissen führen können. Die adaptiven Prozesse brauchen auch nicht notwendigerweise unterschiedliche Erhöhungen der Gelenkknorpel-Proliferation, der Knorpelossifikation und der inneren Umbildung mit sich zu bringen. Wenn alle diese Prozesse in einem relativ gleichmäßigen Steigerungsgrad vor sich gehen, dürfte es schwierig sein, zwischen adaptiven und normalen Wachstumsmechanismen zu unterscheiden, sofern es überhaupt solche Unterschiede gibt.

Wenn aber Stöckli und Willert auf mikroskopischer Ebene einen spezifisch adaptiven Mechanismus festgestellt haben, so hat dies folgerichtig wiederum eine Wechselbeziehung zu den von Elgoyhen und Mitarbeitern¹⁰ festgestellten Skelettwachstumsraten und zum Auftreten und Verschwinden der Positionsfunktionen des oberen Kopfes des Keilbeinmuskels, wovon in der vorliegenden Studie berichtet wird. Die anfänglichen Veränderungen in der Muskelfunktion schienen direkt mit den experimentell herbeigeführten Veränderungen im Mundbereich in Zusammenhang zu stehen. Die neuromuskuläre Funktion wurde unterbrochen und dann als Kompensation für die Strukturveränderungen neu gebildet. Als dann durch spezifisch strukturelle Adaptionen das skelettale Gleichgewicht wieder hergestellt worden war, stellten sich in der Neuromuskulatur wieder wirksamere Funktionsvorgänge ein.

In den oben erwähnten Beispielen bestand ein Zusammenhang zwischen dem verstärkten kondylären Wachstum bei jungen Tieren und der funktionellen Verlagerung der Mandibula nach vorne. Dies ist natürlich nur eine Art der Skelettadaption. Die besondere Natur und der Ort von skelettalen und dentalen Adaptionen waren je nach der *Altersstufe* des betreffenden Versuchstieres unterschiedlich.

In einer ähnlichen Untersuchung der Unterkieferverlagerung beim Rhesusaffen berichteten Hiniker und Ramfjord⁷, daß die Kiefergelenke des ausgewachsenen Tieres sehr stabil und widerstandsfähig gegen Veränderungen der Okklusionslage und gegen Traumata waren. Die beiden Autoren stellten fest, daß die mikroskopischen Adaptionen im Kiefergelenk „unbedeutend, nicht anhaltend und möglicherweise ohne Behandlung rückbildungsfähig“ waren. In unserer vorliegenden Studie haben wir bei den ausgewachsenen Versuchstieren gleichartige Feststellungen gemacht. Es haben sich keinerlei Spuren von Veränderungen im Neubildungstypus ergeben, ebensowenig waren histopathologische Befunde zu verzeichnen.

Die Ergebnisse des mikroskopischen Teils der vorliegenden Untersuchung stimmen mit früheren Studien überein, in denen festgestellt wird, daß der histologische Bau der Kiefergelenke *stabil* und widerstandsfähig gegen Funktionsänderungen ist. Die Ergebnisse stehen jedoch auch mit solchen Untersuchungen im Einklang, die besagen, daß das Kiefergelenk *reaktionsfähig* auf funktionelle Veränderungen ist. Hier muß hervorgehoben

werden, daß der Hauptfaktor, der bei diesen Erscheinungen eine Rolle spielt, die *Altersstufe* des jeweiligen Versuchstieres ist. Eine Reizeinwirkung, die zu einer bestimmten Zeit zu adaptiven Veränderungen führen kann, kann in einem späteren Entwicklungsstadium völlig wirkungslos bleiben.

Vertikale Adaptionen

Das Einsetzen der Apparatur im Oberkiefer verursachte nicht nur ein horizontales Ungleichgewicht, sondern führte auch zu einem starken Anwachsen der Höhenstruktur des Oberkieferkomplexes (*Abb. 11*). Dadurch wurde die vertikale maxillomandibuläre Beziehung verändert, indem die Mandibula in eine nach unten und leicht nach rückwärts gerichtete Rotation gezwungen wurde. Die Rotation des Unterkiefers führte zu einer Verlängerung oder Drehung eines Teils des zwischen der Mandibula und den oberen Schädel-Gesichtsstrukturen verlaufenden Weichgewebes und zu einer effektiven Verkürzung anderer Weichgewebeteile. Zwei Weichgewebsreaktionen auf diese Verlagerung von Knochenteilen sind schon vorweggenommen worden, nämlich eine „Neubildung“ des damit verbundenen Bindegewebes und Veränderungen der neuromuskulären Funktionen.

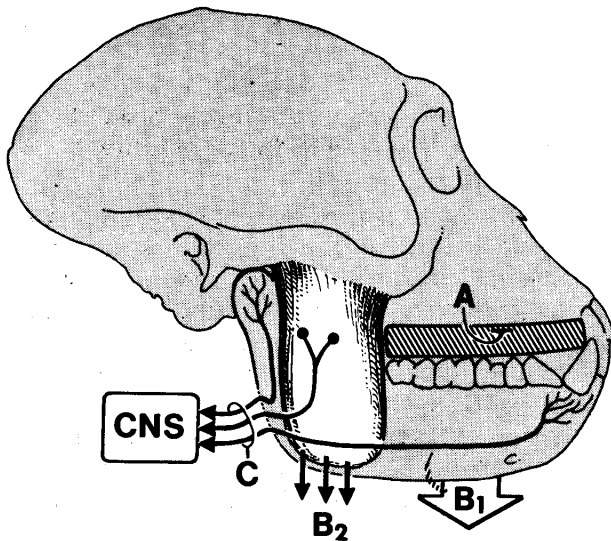


Abb. 11: Vertikale Adaptionen. Das Einsetzen der Apparatur (A) verursacht eine nach unten und leicht nach hinten gerichtete Rotation der Mandibula (B₁) sowie eine sofortige Verlängerung der zugehörigen Muskulatur (B₂). Das orale Gefühl ändert sich wieder (C), wie aus den Rezeptoren im Gebiß, in der Muskulatur und im Kiefergelenk hervorgeht.

Veränderungen der neuromuskulären Funktion

Die Auswirkung des vertikalen Ungleichgewichts des Skeletts auf die Neuromuskulatur drückte sich auf zweierlei Weise aus. Anfangs wurden die funktionellen Beanspruchungen, denen die Mund-Gesichtsstrukturen ausgesetzt waren, durch zu geringe Tätigkeit und durch Überaktivität bestimmter Muskelgruppen verringert. So diente zum Beispiel die Überaktivität der über dem Zungenbein gelegenen Muskelgruppe wahrscheinlich zum Herunterdrücken des Unterkiefers. Diese Veränderung der Unterkieferposition trug nicht nur zu einer entsprechenden Lagerung der Zunge bei, sondern dürfte auch die Gefahr von Okklusionstraumata vermindert haben, da hierdurch die unteren Zähne von einer unvermuteten Berührung der Oberkieferauflage abgehalten wurden. Diese Schutzreaktionen waren jedoch von relativ kurzer Dauer, da sie innerhalb der ersten Woche nach der Wiederherstellung der Funktion wieder verschwanden.

Zusammen mit der schnellen Entstehung jener Reaktionen, die vermutlich die Beanspruchung des Gebisses verminderten, traten weitere, durch erhöhte Muskelaktivität gekennzeichnete Erscheinungen auf, die die Gebißbeanspruchung wahrscheinlich verstärkten. So wurde zum Beispiel bei Tätigkeiten wie Schlucken oder zufälligen Kieferbewegungen eine erhöhte Hebemuskulaturaktivität beobachtet. Der Unterkiefer wurde oft vor der Ausführung einer bestimmten Mundfunktion gegen die Apparatur stabilisiert. Im Gegensatz zu den Schutzreaktionen, die in unserem Experiment schon frühzeitig wieder verschwanden, hielt die größere Häufigkeit und längere Dauer der Hebemuskelfunktion in gewisser Weise während der gesamten Versuchsperiode an.

Die Auswirkungen des vertikalen Ungleichgewichts auf die Neuromuskulatur waren von den horizontalen Auswirkungen völlig verschieden. In der anteroposterioren Dimension hat sich das Tier die Positionsreflexe *nach und nach* angeeignet, was hauptsächlich zu einer zweckbedingten *Kontraktion* des oberen Kopfes des seitlichen Keilbeinmuskels führte. Im Gegensatz hierzu verursachte die Vergrößerung der Höhe des Oberkieferzahnbogens die *sofortige* Trennung der Ansatzstellen der Hebemuskeln am Knochen, was in den meisten Fällen zu einer *Ausdehnung* dieser Muskeln in Ruhestellung führte (Abb. 11).

Mechanismen der neuromuskulären Adaption

Boos³¹ und weitere Autoren stellten fest, daß jeder Muskel oder jede Muskelgruppe, die innerhalb bestimmter physiologischer Grenzen ausgedehnt oder verlängert wurden, ihren ursprünglichen funktionellen Zustand wieder zu erlangen suchen. Diesbezügliche Mechanismen sind:

1. *Verlängerung der Muskelfasern selbst.*³²

2. Herstellung abgeänderter neuromuskulärer Rückkopplungsmechanismen.¹
3. Wanderung der Muskel-Ansatzstellen entlang der Knochenflächen.^{33, 34}
4. Auftreten veränderter muskulärer Dimensionen aufgrund von Verlagerungen und Rotationen von Knochenelementen.

Dieser letztgenannte Mechanismus wurde speziell in unserer vorliegenden Studie untersucht. Wachstum und Neubildungsprozesse der betroffenen Knochenteile sind dabei einer Analyse unterzogen worden. Wegen der Lage der Ansatzstellen der Hebemuskeln konnten die sich ergebenden Skelettadaptionen sowohl in der Mandibula, der Maxilla, der Schädelbasis und in den damit zusammenhängenden Schädelbereichen auftreten. In unserer vorliegenden Studie wurden die beiden erstgenannten Bereiche detailliert untersucht. Das Wachstum des Oberkieferkomplexes (aufgezeichnet anhand der Implantate in der vorderen Schädelbasis) wurde sehr stark durch die Versuchsbedingungen beeinflusst, da die normale Abwärtsverlagerung des Oberkiefers bei 75% der Tiere zurückging oder ganz aufhörte. Die nach oben gerichtete Bewegung der Unterkiefermolaren ging ebenfalls leicht zurück, während sich die Auswirkung der Versuchsbedingungen auf das obere Gebiß in unterschiedlicher Weise ausdrückte. Im hinteren Bereich waren die vertikalen Adaptionen weniger stark. Bei vier der sechs jüngeren Tiere war ein Rückgang der Wachstumsrate des Kondylus festzustellen, jedoch konnte dies auch mit funktionellen Veränderungen in der anteroposterioren Dimension in Zusammenhang stehen.

Somit konnte also eine *Abnahme* der vertikalen Größe als eine der Folgeerscheinungen der apparaturbedingten Skelettreaktionen festgestellt werden. Während eine solche Abnahme auf die Muskelfunktion bezogen werden konnte, müssen auch die Auswirkungen auf andere Weichgewebe einer Betrachtung unterzogen werden. Mit der Trennung von den Knochenteilen erfolgte auch ein passives Strecken von Teilen der zugehörigen Bindegewebe. Entstehen in diesen Bindegeweben Spannungen, so kann das erwähnte Strecken des Bindegewebes auch Auswirkungen auf die komplizierten Rückkopplungen (feedbacks) der Skelettadaptionen haben, vor allem deshalb, weil die Hebemuskeltätigkeit bei unseren Versuchstieren nicht so überaktiv war wie bei Tieren, deren vertikale Dimensionsänderungen einen größeren Umfang angenommen hatten.²⁰ Es darf angenommen werden, daß sowohl die Muskelfunktion als auch passive Veränderungen anderer Weichgewebstypen direkt oder indirekt mit skelettalen Adaptionen in Fällen mit veränderter Homöostasis der Weichgewebe in Zusammenhang stehen.

Allgemeine Betrachtungen

Die Aufteilung der in der vorliegenden Studie beobachteten neuromuskulären und skelettalen Adaptionen in vertikale und anteroposteriore Komponenten ist künstlich, da der Ablauf derartiger funktioneller Veränderungen in engem Zusammenhang untereinander steht. Veränderungen in der Höhe, Tiefe und Weite des Gesichts stehen in enger Wechselbeziehung zueinander und Änderungen in einer Dimension oder in einem Bereich des Schädel-Gesichts-Komplexes ziehen notwendigerweise eine Kette von konkomittierenden Veränderungen in anderen Bereichen nach sich.

Wechselbeziehungen sind auch in der *zeitlichen Abstimmung* von neuromuskulären und skelettalen Reaktionen festgestellt worden, obwohl in der vorliegenden Studie keine direkte Beziehung nach Ursache und Wirkung zwischen der Muskelfunktion und dem Knochenwachstum hergestellt werden konnte. Eine allgemeine Folge von Adaptionen kann jedoch als gegeben betrachtet werden (Abb. 10). Zuerst wurden die exterozeptiven und propriozeptiven Reize aus dem Mund-Gesichts-Bereich durch das Anbringen der Apparatur geändert. Bestehende Funktionsmuster wurden unterbrochen und umgestaltet. Dies wiederum verursachte eine Änderung der maxillomandibulären Funktionsverhältnisse. Durch diesen modifizierten Funktionstypus wurde die orofaziale Umgebung so verändert, daß sich daraus strukturelle Gewebsadaptionen ergaben und das anatomische Gleichgewicht gegebenenfalls wieder hergestellt wurde. Gleichzeitig ließ die neuromuskuläre Kompensationstätigkeit wieder nach und es konnten sich leistungsfähigere Funktionsmuster entwickeln.

Derartige Wechselbeziehungen müssen nicht nur unter Versuchsbedingungen auftreten, sondern können auch während des normalen Wachstums vorhanden sein. Schon ein geringfügiges Ungleichgewicht in der Struktur oder Funktion kann zu kompensatorischen Adaptionen führen. Man kann annehmen, daß in den verschiedenen Skelett- und Weichgewebsteilen des Schädel-Gesichts-Komplexes ein komplizierter „Feedback“-Mechanismus existiert, der die Aufgabe hat, die Wechselwirkung von Muskeln und Knochen zu regulieren und auszugleichen.

Zusammenfassung

Zweck der vorliegenden Studie war es, die wahre Natur der sich aus den experimentellen Veränderungen im Mund-Gesichts-Bereich ergebenden muskuloskelettalen Adaptionen zu untersuchen. Hierzu wurde eine neue Okklusionskonfiguration hergestellt, die bei Rhesusaffen (*Macaca mulatta*) in vier verschiedenen Altersstufen zu einer Änderung der oralen Empfindungsreize und damit zu einer Vorwärtsverlagerung der Mandibula während der funktionellen Kieferbewegungen führte. Spezielle skelettale, dentale und neuromuskuläre Adaptionen sind anhand von elektromyogra-

phischen Serienaufzeichnungen, kephalometrischen Serien-Röntgenaufnahmen mit Metall-Implantaten sowie durch mikroskopische Analysen untersucht und zueinander in Beziehung gebracht worden.

Die Studie wurde in zwei Perioden eingeteilt. Im Verlaufe der dreizehn Wochen dauernden Kontrollperiode sind Aufzeichnungen über das normale Wachstum in den vier Altersstufen gemacht worden. In der dreizehnwöchigen Versuchsperiode wurden Aufschlüsse über spezielle, durch die Versuchsbedingungen verursachte neuromuskuläre und skelettale Veränderungen gewonnen. Durch die im Mundbereich herbeigeführten Veränderungen sind die Aktivität der Kaumuskeln und vermutlich auch die Unterkieferposition geändert worden. Die Aktivität des oberen Kopfes des Keilbeinmuskels nahm nach und nach zu, zuerst während der funktionellen Bewegungen, und dann während der Aufrechterhaltung der Ruhelage der Mandibula. Die grundsätzliche Funktion des oberen Kopfes dieses Muskels schien darin zu bestehen, eine nach vorwärts gerichtete Bewegung des Unterkiefers herbeizuführen. Die diesbezügliche Aktivität des Muskelkopfes ging aber gegen Ende des Experiments wieder zurück oder verschwand völlig.

Am Schluß der Versuchsperiode zeigte sich bei zehn der zwölf Versuchsaffen eine anteroposteriore Veränderung der Molarenrelation. Es konnte kein einzelner Adaptionprozeß herausisoliert und als alleinige Ursache irgendeiner Veränderung im maxillomandibulären Verhältnis in irgendeiner der Altersstufen identifiziert werden. Vielmehr war jedes sich ergebende Lageverhältnis das kollektive Resultat spezieller komplementärer (und gelegentlich auch gegensätzlicher) Adaptionen im gesamten Schädel-Gesichts-Komplex. Adaptionen im Unterkieferknochen traten vor allem bei Tieren im Baby- und Kindesalter auf, bei denen sich Ausmaß und Richtung im Wachstum des Kiefergelenkfortsatzes änderten.

Anpassungen im Gebiß der Mandibula waren in erster Linie bei jugendlichen und ausgewachsenen Tieren zu beobachten. Bei allen Versuchstieren, mit drei Ausnahmen, wurde im Nasen- und Oberkieferbereich ein Rückgang der Vertikalverschiebung des maxillären Komplexes festgestellt. Die Horizontalverlagerung des Oberkieferkomplexes und die Bewegungsrichtung des oberen Gebisses sind ebenfalls beeinflußt worden, ihre Auswirkungen waren jedoch unterschiedlich.

Nach dreizehn Wochen zeigten sich bei den getöteten Tieren nur geringe histologische Spuren physiologischer oder pathologischer Reaktionen auf die herbeigeführte protrusive Funktion. Diese histologischen Feststellungen standen im Einklang mit früheren Untersuchungen, die zeigten, daß das Kiefergelenk bei ausgewachsenen Tieren stabil und widerstandsfähig war, während es bei heranwachsenden Tieren Reaktionen auf funktionelle Veränderungen zeigte.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie deuten ferner darauf hin, daß zwischen Auftreten und Verschwinden einer veränderten neuromuskulären Funktion und der Wiederherstellung des skelettalen Gleichgewichts eine *chronologische Wechselbeziehung* besteht. Mit der Wiedererrichtung des skelettalen Gleichgewichts durch spezielle strukturelle Adaptionen nahm die Notwendigkeit kompensatorischer Muskelfunktionen ab. Art und Ausmaß der skelettalen und dentalen Adaptionen hingen außerdem vom *Alter* des Tieres ab.

Danksagung

Dank gebührt den Herren Dr. Donald H. Enlow, Dr. Robert E. Moyers und Dr. Takayuki Kuroda für ihre Unterstützung und ihren Rat. Technische Hilfe wurde mir durch Frau M. Christine McBride zuteil, redaktionelle Hilfe leistete Frau Ruth Bigio. Die Vorbereitung und Bearbeitung des Bildmaterials besorgten Herr William L. Brudon, Frau Ruth Bigio, Herr Gerald G. Davenport und Herr Edward E. Sayer.

Literaturnachweis

1. McNamara, J. A., Jr.: Neuromuscular and skeletal adaptations to altered orofacial function (Neuromuskuläre und skeletale Adaptionen auf veränderte Funktionen im Mund-Gesichts-Bereich). Monographie Nr. 1, Serie über das Schädel-Gesichts-Wachstum, Center for Human Growth and Development, The University of Michigan, Ann Arbor, 180 Seiten, 1972.
2. Breitner, C.: Experimentelle Veränderung der mesiodistalen Beziehungen der oberen und unteren Zahnreihen. Zeitschrift für Stomatologie, 28: 343–356, 1930.
3. Häupl, K. und Psansky: Experimentelle Untersuchungen über Gelenktransformation bei Verwendung der Methoden der Funktionskieferorthopädie. Deutsche Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, 6: 439–448, 1939.
4. Hoffer, O. und G. L. Colico: Le modificazioni dell' A. T. M. conseguenti a spostamento mesiale della mandibola (Die Veränderungen des A. T. M. als Folge der mesialen Verlagerung des Unterkiefers). Rass. Int. Stomatol. Prat. 9: 27–40, Anhang Nr. 4, 1958.
5. Derichsweiler, H.: Experimentelle Tieruntersuchungen über Veränderungen des Kiefergelenkes bei Bißlageveränderung. Fortschr. Kieferorthopädie, 19: 30–44, 1958.
6. Baume, L. J. und H. Derichsweiler: Is the condylar growth center responsive to orthodontic therapy? An experimental study in *Macaca mulatta* (Ist das kondyläre Wachstumszentrum reaktionsfähig auf die kieferorthopädische Therapie? Eine experimentelle Untersuchung beim Rhesusaffen). Oral Surg., Oral Med., Oral Pathol. 14: 347–362, 1961.
7. Hiniker, J. J. und S. P. Ramfjord: Anterior displacement of the mandible in adult rhesus monkeys (Anteriore Verlagerung der Mandibula bei ausgewachsenen Rhesusaffen). J. Prosth. Dent. 16: 503–512, 1966.
8. Joho, J. P.: Changes in form and size of the mandible in the orthopaedically treated *Macaca irus* (an experimental study) (Form- und Größenänderung der Mandibula beim orthopädisch behandelten *Macaca irus* — eine experimentelle Studie). Trans. Europ. Orthod. Soc. 44: 161–173, 1968.

9. Stöckli, P. W. und H. G. Willert: Tissue reactions in the temporomandibular joint resulting from anterior displacement of the mandible in the monkey (Gewebsreaktionen im Kiefergelenk aufgrund der anterioren Verlagerung des Unterkiefers beim Affen). *Amer. J. Orthod.* 60: 142–155, 1971.
10. Elgoyhen, J. C., R. E. Moyers, J. A. McNamara, Jr. und M. L. Riolo: Craniofacial adaptation to protrusive function in young rhesus monkeys (Kraniofaziale Adaptationen auf protrusive Funktionen bei jungen Rhesusaffen). *Amer. J. Orthod.* 62: 469–480, 1972.
11. Ramfjord, S. P. und R. D. Enlow: Anterior displacement of the mandible in adult rhesus monkeys: long-term observations (Anteriore Verlagerung des Unterkiefers bei ausgewachsenen Rhesusaffen: langfristige Beobachtungen). *J. Prosth. Dent.* 26: 517–531, 1971.
12. Hurme, V. O. und G. Van Wagenen: Basic data on the emergence of permanent teeth in the rhesus monkey (*Macaca mulatta*) (Grundlegende Daten über das Durchbrechen der bleibenden Zähne beim Rhesusaffen – *Macaca mulatta*). *Proc. Amer. Philo. Soc.* 105: 105–140, 1961.
13. Björk, A.: The use of metallic implants in the study of facial growth in children: method and application (Die Verwendung von Metall-Implantaten bei der Untersuchung des Gesichtswachstums bei Kindern: Methode und Anwendung). *Amer. J. Phys. Anthropol.* 29: 243–254, 1968.
14. Elgoyhen, J. C., M. L. Riolo, L. W. Graber, R. E. Moyers, und J. A. McNamara, Jr.: Craniofacial growth in juvenile *Macaca mulatta*: a cephalometric study (Schädel-Gesichtswachstum bei Rhesusaffen im Kindesalter: eine kephalometrische Untersuchung). *Amer. J. Phys. Anthropol.* 36: 369–376, 1972.
15. Kuroda, T. und J. A. McNamara, Jr.: The effect of ketamine and phencyclidine on muscle activity in non-human primates (Die Wirkung von Ketamin und Phencyclidin auf die Muskelaktivität bei Primaten). *Anesth. & Analg.* 51: 710–716, 1972.
16. McNamara, J. A., Jr.: Restraint of monkeys for craniofacial research (Behandlung von Affen für Versuche im Schädel-Gesichts-Bereich). *J. Dent. Res.* 52: 183, 1973.
17. McNamara, J. A., Jr.: The independent functions of the two heads of the lateral pterygoid muscle (Die unabhängige Funktion der zwei Köpfe des seitlichen Keilbeinmuskels). *Amer. J. Anat.*, in Druck.
18. Moyers, R. E.: Some physiologic considerations of centric and other jaw relations (Physiologische Betrachtungen der zentrischen sowie weiterer Kieferbeziehungen). *J. Prosth. Dent.* 6: 183–194, 1956.
19. Grant, P. G.: Biomechanical analyses of the masticatory muscles of the rhesus macaque (*Macaca mulatta*) (Biochemische Analysen der Kaumuskeln des Rhesusaffen). Dissertation, University of California, Berkeley, 1972.
20. McNamara, J. A., Jr.: Increasing vertical dimension in the growing face: an experimental study (Steigende vertikale Dimension des wachsenden Gesichts: eine experimentelle Untersuchung). *Amer. J. Orthodont.*, in Druck.
21. Adler, P.: Sensibility of teeth to loads applied in different directions (Empfindlichkeit von Zähnen auf in verschiedenen Richtungen angelegte Belastungen). *J. Dent. Res.* 26: 279–290, 1947.
22. Ness, A. R.: The mechanoreceptors of the rabbit mandibular incisor (Die Mechanorezeptoren im Oberkieferschneidezahn des Kaninchens). *J. Physiol.* 126: 475–493, 1954.
23. Fish, S. F.: The respiratory associations of the rest position of the mandible (Der Atemverkehr bei Ruhestellung des Unterkiefers). *Brit. Dent. J.* 116: 149–159, 1964.

24. Bosma, J. F.: Human infant oral function (Die Mundfunktion des Kindes). Aus: Symposium on Oral Sensation and Proprioception (Symposium über orale Sinnesempfindung und Propriozeption), Verlag J. F. Bosma. Charles C. Thomas, Springfield, Ill., 1967.
25. Charlier, J. P.: Les facteurs mécaniques dans la croissance de l'arc basal mandibulaire à la lumière de l'analyse des caractères structuraux et des propriétés biologiques de cartilage condylien (Die mechanischen Faktoren im Wachstum des Unterkieferbogens im Lichte einer Analyse der strukturellen Merkmale und biologischen Eigenschaften des Kiefergelenkknorpels). *Orthod. Franç.* 38: 177–186, 1967.
26. Petrovic, M. A. und J. Stutzmann: Le muscle ptérygoidien externe et la croissance du condyle mandibulaire. Recherches expérimentales chez le jeune rat (Der äußere Keilbeinmuskel und das Wachstum des Unterkiefergelenkfortsatzes. Experimentelle Untersuchungen an der jungen Ratte). *Orthodont. Franç.* 43: 271–285, 1962.
27. Charlier, J. P. und A. Petrovic: Recherches sur la mandibule de rat en culture d'organs: le cartilage condylien a-t-il un potentiel de croissance indépendant? (Untersuchungen am Unterkiefer der Ratte während der Organbildung: Besitzt der Gelenkknorpel ein unabhängiges Wachstumspotential?). *Orthod. Franç.* 38: 165–175, 1967.
28. Vogel, G. und M. Pignanelli: Indagini istochimiche sull' articolazione T. M. del *Macacus rhesus* in corso di trattamento gnato-orthopedico (Histochemische Untersuchungen am Kiefergelenk des Rhesusaffen im Verlaufe der kieferorthopädischen Behandlung). *Rass. Int. Stomatol. Prat.* 9: 46–50, Anhang Nr. 4, 1958.
29. Charlier, J. P., A. Petrovic und J. Herrmann-Stutzmann: Effects of mandibular hyperpropulsion on the prechondroblastic zone of young rat condyle (Auswirkungen der mandibulären Hyperpropulsion auf die prächondroblastische Zone am Kiefergelenkfortsatz der jungen Ratte). *Amer. J. Orthodont.* 55: 71–74, 1969.
30. Enlow, D. H.: *The Human Face* (Das Gesicht des Menschen). Hoeber Medical Division, Harper and Row, New York, 1968.
31. Boos, R. H.: Intermaxillary relation established by biting power (Intermaxilläre Beziehung, entstanden durch die Beißkraft). *J. Amer. Dent. Assoc.* 27: 1192–1199, 1940.
32. Crawford, G. N. C.: An experimental study of muscle growth in the rabbit (Eine experimentelle Untersuchung des Muskelwachstums beim Kaninchen). *J. Bone & Joint Surg.* 36 B: 294–303, 1954.
33. Enlow, D. H.: Functions of the Haversian system (Funktionen des Haversischen Systems). *Amer. J. Anat.* 110: 269–306, 1962.
34. Hoyte, D. A. N. und D. H. Enlow: Wolff's law and the problem of muscle attachment on resorptive surfaces of bone (Das Wolffsche Gesetz und das Problem des Muskelansatzes an resorbierenden Knochenflächen). *Amer. J. Phys. Anthropol.* 24: 205–214, 1966.