

Aus der Zahn- und Kieferklinik der Universität  
Freiburg i. Br.

Direktor: Prof. Dr. H. Rehm

Spannungsoptische Untersuchungen zur Statik  
des Alveolarfortsatzes

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde  
einer

H o h e n M e d i z i n i s c h e n F a k u l t ä t

der

Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg i. Br.

vorgelegt

von

Jürgen Grönewald

geboren in

Berlin

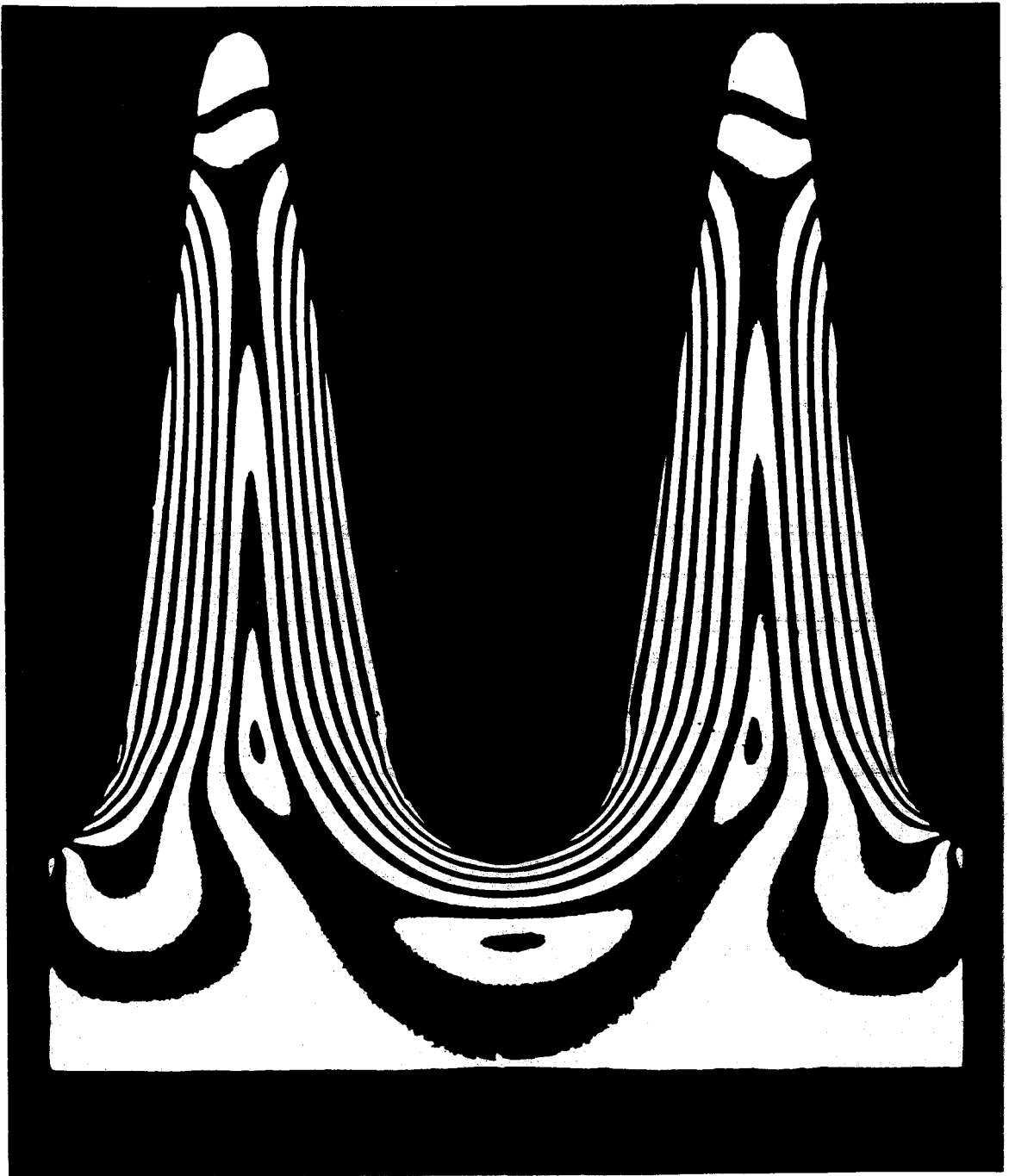
1967

Dekan : Prof. Dr. W. Künzer

Referent : Prof. Dr. S. Schreiber

Meinen lieben Eltern  
in Dankbarkeit  
gewidmet

Spannungsoptische Untersuchungen zur Statik  
des Alveolarfortsatzes



# INHALTSVERZEICHNIS

I	Einleitung und Problemstellung	1
II	Der Alveolarfortsatz	3
	1 Allgemeines	3
	2 Physiologisch-anatomische Gegebenheiten im Alveolarfortsatz	4
	3 Beanspruchung von Zahn und Alveolarfortsatz	8
	4 Struktur des Alveolarfortsatzes	14
III	Methoden der Analyse der Knochenstruktur	19
	1 Überblick über die einzelnen Verfahren	19
	2 Das spezielle Verfahren der Spannungsoptik	23
	3 Versuchsanordnung	32
	4 Modellgestaltung und Modellherstellung	36
IV	Spannungsoptische Versuche zur Statik des Alveolarfortsatzes	42
	1 Vorversuche am Biegebalken	42
	a Belastungen eines einseitig aufgehängten Balkens, Versuch I	42
	b Belastungen eines beidseitig aufgehängten Balkens, Versuch II	49
	2 Die Bedeutung der Periodontalfasern für die Spannungsverteilung im Alveolarfortsatz, Versuch III	52
	3 Beweis der gleichmäßigen Funktion aller einzelnen Aufhängeelemente der Modellzähne Versuch IV	59
	4 Belastung eines dreidimensionalen Modells des Alveolarfortsatzes, Versuch V	61

5	Untersuchungen an zweidimensionalen Modellen achsialer Alveolenschnitte ein- und zweiwurzeliger Zähne	69
a	Belastungen eines einwurzeligen Zahnes, Versuch VI	69
b	Belastungen eines zweiwurzeligen Zahnes, Versuch VII	75
6	Untersuchungen am zweidimensionalen Modell eines Längsschnittes durch eine Zahnreihe im Seitenzahnbereich	80
a	Einseitige Aufhängung, Versuch VIII	81
b	Beidseitige Aufhängung, Versuch IX	90
c	Unterstützung im Bereich der Belastung, Versuch X	99
7	Quantitative Bestimmung und Darstellung der inneren Spannungen eines beanspruchten Septummodelles mit Hilfe der Querdehnungsmessung (Lateralextensometer)	106
a	Eichversuch	107
b	Zentrische Belastung beider Nachbarzähne, Stauchung des Septums, Versuch XI	109
c	Statische Bedeutung der horizontalen Spongiosaelemente in den Interdentalsepten	117
d	Zentrische Belastung nur eines Nachbarzahnes, Biegung des Septums, Versuch XII	118
V	Die Statik des Alveolarfortsatzes in neuer Sicht	126
1	Innere und äußere Beanspruchung im Alveolarfortsatz	126
2	Statik der interdentalen und interradi- kulären Septen	128
3	Der Alveolarfortsatz als statisch selb- ständiges System	133
VI	Zusammenfassung	134

## I Einleitung und Problemstellung

Die vorliegende Arbeit gibt zunächst eine Literaturübersicht über die "funktionelle Struktur" der Kieferknochen. Innerhalb des Problemkreises um "Form und Funktion" wurde vielfach davon ausgegangen, die Spongiosastrukturen seien nur durch die Funktion der Knochen und die dadurch sich im Innern ergebenden Kräftefelder bedingt. In den einzelnen Arbeiten bestehen jedoch Ungenauigkeiten, Widersprüche und sogar Fehler, so daß eine Studie mit modernen Methoden wichtig erschien.

Die Experimente dieser Arbeit wurden mit Hilfe der Spannungsoptik durchgeführt; die physikalischen Grundlagen dieses Verfahrens werden erklärt. Es wird diskutiert, in wieweit spannungsoptisch-experimentelle Untersuchungen für die Medizin aussagefähig sind.

Am Beispiel des Alveolarfortsatzes wird eine Analyse der Statik im Innern dieses Knochenteiles versucht; es werden die Spannungszustände ermittelt, die durch die Belastung der Zähne entstehen. Besonders wird untersucht, an welchen Stellen und vor allem in welchen Richtungen Zug- bzw. Druckspannungen bei bestimmten Belastungen einzelner Zähne sowie einer Zahnreihe vorkommen.

Im Naturgeschehen ist das Bewegte, das Dynamische vorherrschend, das Statische bleibt immer ein vorübergehender Zustand. Man rechnet aber häufig so, als ob ein Bauteil dauernd bewegungslos wäre. Dazu ist man in gewisser Weise berechtigt, weil die wirklichen Bewegungen und Formveränderungen so gering sind, daß sie vernachlässigt werden können. Die Bewegungen der einzelnen Bauelemente des Knochens sind sehr klein, es handelt sich nur um Verformungen wie Biegung, Stauchung, Dehnung und Torsion. Die statische Betrachtung erscheint somit als Untersuchungsmethode auch für den Knochen gerechtfertigt.

Wie in jedem elastischen Körper werden auch in der Knochenhartsubstanz die Kräfte von der Lasteinleitungsstelle an der Oberfläche durch die Bauelemente in das Innere des Körpers fortgeleitet und Kräftefelder aufgebaut.

Bei dem Versuch, die inneren Kräfte im Knochen zu analysieren, hat man sich meist auf eine Theorie von Flourens (1865) gestützt, die besagt, vom Organismus werde am Knochen durch Zugspannungen Substanz angebaut, durch Druckspannungen werde die Knochensubstanz abgebaut. Man schloß aus klinischen Beobachtungen und Untersuchungen auf statische Gegebenheiten.

Auf diese Weise lassen sich die Spannungsverhältnisse aber nicht beschreiben, denn es wurden weder der genaue Ort noch die Richtung der vermuteten Spannungen überhaupt ermittelt. Diese Angaben sind zur exakten Beschreibung der Spannungszustände aber unbedingt notwendig, durch sie erst lassen sich dann Zahnkippen und -wanderungen, Atrophien usw. möglicherweise erklären.

Besonders wird auf die Art eingegangen, wie der Zahn mit seiner knöchernen Alveole verbunden ist. Es wird sich zeigen, daß es nicht gleichgültig ist, ob der Zahn "wie ein Keil" im Alveolarknochen steckt, wie es lange Zeit für physiologisch gehalten wurde, oder ob er durch Fasern am Knochen zieht. Hierbei interessiert besonders das Verhalten des periodontalen Gewebes unter der mechanischen Beanspruchung des Zahnes, ob nämlich das Gewebe als inkompressibel angesehen werden muß oder ob es einer Kompression ausweichen kann. Auch die Frage, ob unter physiologischen Bedingungen der Zahn an der Alveolenwand anstößt oder nicht, wird ausführlich behandelt.



## II Der Alveolarfortsatz

### 1 Allgemeines

Im Anschluß an die Untersuchungen von Meyer und Culmann (1867) befaßten sich fast alle Untersuchungen über die Abhängigkeit des Aufbaues der Knochen von seiner Funktion mit dem proximalen Femurende. Aber auch die Struktur des Alveolarfortsatzes wurde schon lange in den Zusammenhang mit seiner Funktion gebracht: "Der Alveolarfortsatz ist ein deutliches Beispiel für die Abhängigkeit des Knochens in seinem Aufbau von der Funktion überhaupt. Ein besseres Beispiel gibt es im ganzen Organismus nicht." (Roux, 1895). Andreas Vesalius (1514 bis 1564) hat in seinen 1538 in Venedig erschienenen "Tabula anatomica" den Schwund der Alveole nach Zahnextraktionen hervorgehoben. Ebenso fehlt dem von Geburt an zahnlosen Kiefer (Anodontie) der Zahnfortsatz ähnlich wie dem Neugeborenen vor dem Zahndurchbruch.

Birkenbeil (1931) beschreibt den Alveolarknochen als den variabelsten Knochen, der während des ganzen Lebens deutlichen Strukturveränderungen unterworfen ist. Landsberger (1924) wies durch Versuche mit dem Pflanzenfarbstoff Alizarin nach, daß im Alveolarknochen in außerordentlich großem Ausmaß Umbauprozesse ablaufen.

Man ist heute allgemein der Ansicht, die Entwicklung der Zähne und ihre spätere, funktionelle Beanspruchung bedinge das Wachstum und den Bestand des Alveolarfortsatzes.

Der Alveolarfortsatz geht ohne scharfe Grenze in den Kieferkörper über und die Wurzel des Zahnes befindet sich in der Alveole. "Die Tiefe des eigentlichen alveolären Knochens hängt von der Länge der Wurzeln ab und beträgt durchschnittlich 1,5 cm." (Parfitt, 1962).

Wurzel- und Alveolenform ist aufeinander abgestimmt. Zwischen Zahn und Alveole ist ein ununterbrochener Spalt zu beobachten, der Periodontalspalt. Es scheint ein Zusammenhang zu bestehen zwischen Zahnwachstum und dem Aufbau der diesen Zahn umgebenden Gewebe. "Der mechanisch beanspruchte Zahn muß sich immer wieder eine neue Alveole bauen" (Gross, 1934).

## 2 Physiologisch-anatomische Gegebenheiten im Alveolarfortsatz

Um die Wurzel liegt eine Gewebeschicht im periodontalen Raum. Dieser schalenförmige Raum wurde von mehreren Autoren vermessen<sup>1)</sup>. Die Werte sind verhältnismäßig einheitlich; sie betragen im Mittel

0,25 bis 0,35 mm für den Alveolenrand,  
0,15 mm für die Wurzelmitte und  
0,2 bis 0,25 mm für den apikalen Bereich.

Der Begriff "paradental" stammt von Wunschheim (1911), Weski prägte 1921 den Begriff "Paradentium", nach der heutigen Nomenklatur "Parodontium" (Fröhlich), 1948). Die Gewebssysteme im Alveolarfortsatz werden von vielen Untersuchern als eine Einheit beschrieben: als "organische embryologische Einheit", die Zahn und Knochen verbindet und sich aus Zement, Periodontium, alveolärem Knochen und Gingiva zusammensetzt (Weski, 1921), als "untrennbares Ganzes" sowohl anatomisch wie ontogenetisch von Zahnkeim, Periost und Alveole (Landsberger, 1923, 1924), als "Zusammengehörigkeit" zwischen Zahn und Alveolarknochen (Orban, 1926) oder als "Einheit als die eines biologischen Systems" (Gross, 1934).

<sup>1)</sup> Wüstenhagen (1923), Kronfeld (1927), Klein (1928), Kellner (1928), Gottlieb und Orban (1931), W. Meyer (1951), 1958), Mühlemann (1951) u.a.

Sicher (1916, 1925) faßte als erster das Parodontium als funktionelles Gewebssystem auf<sup>1)</sup>. Häupl (1941) zog aus seinen pathologisch-anatomischen Untersuchungen den Schluß, daß das Parodontium ein "funktionelles Organ" darstellt: 1941 schreibt er, daß "auch der retinierte Zahn ein Zahnbett, aber kein Parodontium" hat.

Eschler (1939) untersuchte die funktionelle Entwicklung des Parodontiums an Tierversuchen und bewies, daß sich die Strukturen der Wurzelhaut sowie die alveoläre Knochenkompakta erst durch die Einwirkung der Funktion des Zahnes aus dem Zahnsäckchen entwickelt. Demnach stelle das Parodontium "kein Organ, sondern ein 'System' dar, keine beharrende, endgültige und unveränderliche Form, sondern eine funktionelle Formung, die infolge der Inkonstanz der funktionellen Kräfte einer ständig sich vollziehenden Umgestaltung unterliegt" (Eschler, 1952). Fröhlich (1948) bestätigte diese wichtigen Erkenntnisse.

Bereits 1928 betonte Kellner, daß der Aufbau des Bandapparates im periodontalen Gewebe funktionell bedingt sei. Als Ursache für die Bildung der Wurzelhautsehnen bezeichnete Eschler (1939) den Kau-, Zungen-, Wangen- und Lippendruck.

<sup>1)</sup> Noch zahlreiche andere Autoren beschrieben die Bestandteile des Parodontiums als funktionelles Gewebssystem: Weski (1921), Weinmann (1926), Häupl-Lang (1927), A.M. Schwarz (1928), Kellner (1928), Weidenreich (1926), Harndt (1950), Rohen (1957) u.a.. Schumacher (1962) faßt das Parodontium mit Ausnahme des gingivalen Epithels als eine genetische Einheit auf.

Bereits 1861 erkannte Tomes die Periodontalfasern, die dann unter anderem von Hohl (1867), Colland (1890), Black (1897), Feneis (1952), Wetzel (1925) und Weski (1921) beschrieben und untersucht wurden. Eschler (1939-1963) spricht von "Bändern" oder "Ligamenta", die aus einzelnen Faserbündeln bzw. Fasciculi aufgebaut sind. In ihrem Bau sind sie den Sehnen ähnlich und verbinden wie Bänder Knochengewebe (Zement) mit Knochen (Alveolarkompakta). Unter mechanischen Gesichtspunkten werden sie zu verschiedenen "Bändersystemen" aufgeteilt, die jedoch aufgrund der Durchflechtung und der unterschiedlichen Verlaufsrichtungen gegeneinander schwer abzugrenzen sind.

Die Hauptmasse der Periodontalfasern läßt einen zur Wurzelachse schräg abwärts gerichteten Verlauf erkennen, die Sehnenbündel sind im allgemeinen in einer  $45^{\circ}$ -Stellung angeordnet (Meyer, 1958). Eschler (1939-1963) bezeichnete diesen Faseranteil als "lig. obliquum".

Am Alveoleneingang und im Bereich der Wurzelspitze verlaufen radiär vom Wurzelzement zum Alveolarknochen horizontale Fasergruppen, die besonders gut bei einwurzeligen Zähnen ausgebildet sind, das "lig. horizontale" (Eschler, 1939-1963) oder "alveolar crest fibers" (Kazis, H.u.J., 1956).

Horizontal-tangential zur Wurzel verlaufende Fasern bilden nach Eschler (1939-1963) das "lig. tangential", Fasern, die zur Zahnachse parallel verlaufen, nannte er "lig. verticale bzw. achsiale", wobei eine "pars cervicalis" mit dem Verlauf von der Septumspitze zum Zahnfleisch von einer "pars apicalis" zu trennen ist.

Am Apex in radiärer Verlaufsrichtung sind Fasersysteme angeordnet, die nach A.M. Schwarz (1928) "lig. apicale" genannt werden.

Die wirksamsten Anteile für die Übertragung der an der Zahnkrone angreifenden Kräfte auf den Alveolar-knochen sind diese Periodontalfasern. R.Loos (1900), Gabel (1934), Drum (1948) und Feneis (1963) hielten diese Fasern für elastisch. Häupl und Lang untersuchten 1927 unter Berücksichtigung der Arbeiten Triepels (1902-1908) die Periodontalfasern hinsichtlich ihrer Elastizität genau. Sie stellten fest, daß diese Fasern kollagen und **n i c h t** elastisch sind! Da bekanntlich aber alle Stoffe nur mehr oder weniger elastisch sind, wäre es besser, von "relativ unelastischen" Fasern zu sprechen, deren geringe Dehnbarkeit bei physiologischen Belastungen vernachlässigt werden kann.

Häupl und Lang (1927) errechneten aus dem Elastizitätsmodul einer Sehne, bezogen auf die periodontalen Fasern, daß bei 100 kg Belastung die Faserbündel nur um 0,001 mm gedehnt würden. Dieser Wert bezieht sich auf eine Insertionsfläche von etwa 200 mm<sup>2</sup>, entspricht also ungefähr der Wurzeloberfläche eines Eckzahnes. Daraus folgt, daß die Fasern als "quasi nicht elastisch" anzusehen sind. Nach neuesten Untersuchungen, die von Ast, Diemer und Hofmann 1966 an Zähnen und Kieferpräparaten durchgeführt wurden, sind die Werte 100- bis 500mal zu groß, sie geben den Elastizitätsmodul für den periodontalen Bandapparat im Bereich von 0,2 bis 0,5 kg/mm<sup>2</sup> an.

In der Ruhelage, beim unbelasteten Zahn, sind die Fasern gewellt. Bei Beginn einer Auslenkung werden sie gestreckt und geben allein auf diese Weise dem Zahn eine gewisse Beweglichkeit. Rohen (1957) betonte, bei geringer Krafteinwirkung gebe, außer dem gewellten

Verlauf der Fasern, vor allem ein "Plexus intermedius"<sup>1)</sup> dem Zahn eine sehr leichte Anpassungsmöglichkeit um seine Ruhelage.

Nach Mühlemann (1951) entspricht die "initiale Zahnbeweglichkeit", die sich besonders bei horizontalen Belastungen nachweisen läßt, der spannungsfreien Streckung der in der Ruhelage gewellten Periodontalfasern. Mit der "intermediären Zahnbeweglichkeit" beginnt die Beanspruchung des gesamten Periodonts, bei der "terminalen Zahnbeweglichkeit" kommt es zur Verformung des Bandapparates und des Knochens.

### 3 Beanspruchung von Zahn und Alveolarfortsatz

Wenn wir uns den Inhalt des Periodontalraumes wegdenken, so liegt zwischen Wurzelzement und knöchernem Zahnfach ein Hohlraum, in dem die Zahnwurzel Bewegungen in allen drei Richtungen des Raumes ausführen kann.

Kräfte, die in Richtung der Zahnachse durch das Zentrum des Zahnes wirken, werden achsiale Kräfte genannt, sie bewegen den Zahn in seiner Achsenrichtung nach apikal. Rein achsial jedoch wird der Zahn nur in Ausnahmefällen belastet: Normalerweise zielt die einwirkende Kraft zwar in Achsenrichtung, wirkt aber exzentrisch. Dadurch erfährt der Zahn ein Drehmoment, er wird gekippt um einen Drehpunkt zwischen Wurzelmitte und unterem Wurzeldrittel (A.M. Schwarz, 1928). Eine horizontal an der Zahnkrone angreifende Kraft belastet den Zahn extrem: Er wird besonders stark gekippt. Zielt eine horizontale Belastung an der Zahnachse vorbei, ist

<sup>1)</sup> Dieser "Plexus intermedius" ist als eine Verflechtung der Periodontalfasern in der Mitte zwischen Zahn und Knochen von Sicher (1916, 1925), Köhler (1950) und Fröhlich (1948) beschrieben worden.

die Belastung also tangential-horizantal, so entsteht für den Zahn zusätzlich zu der Kippung ein Drehmoment. Dieses verursacht besonders bei einwurzeligen Zähnen eine Rotationsbewegung.

Entscheidend für die statischen Verhältnisse im Alveolarfortsatz ist, in welcher Weise er durch den belasteten Zahn beansprucht wird, und in welcher Art die einzelnen Gewebsanteile auf die einwirkende Kraft reagieren.

Dadurch, daß Kronfeld (1927) und Fröhlich (1948) nachgewiesen hatten, daß der physiologisch belastete Zahn selbst bei den extremsten, horizontalen Krafteinwirkungen die knöcherne Alveole noch nicht einmal berührt, lassen sich zwei grundsätzlich voneinander verschiedene Ansichten unterscheiden: Seit Bartholinus (1663) nämlich galt, der Zahn sei durch eine *G o m p h o s i s*<sup>1)</sup> wie ein Nagel in der Wand befestigt; demgegenüber sprechen andere Autoren von einer *A u f h ä n g u n g* des Zahnes in der Alveole.

Den ersten Hinweis auf die Aufhängung des Zahnes fanden wir bei Hohl: In seiner Arbeit aus dem Jahre 1867 "Die Befestigung des Zahnes in der Alveole" schreibt er, der Zahn sei "quasi an die Alveole angebunden". Nach seiner Meinung steckt der Zahn "nicht in seiner Alveole wie ein Keil im Holze oder der Nagel in der Wand, ... die kontinuierlich vom Knochen zum Cement zu verfolgenden Faserzüge bewirken den Halt".

---

<sup>1)</sup> In der Anatomie bedeutet *Gomphosis* eine keilartige Einzapfung von Knochen in Knochen als Unterbegriff der Syndesmose.

Oft ist der Bandapparat zwischen Zahn und Knochen nur als Befestigung der Zahnwurzel beschrieben worden<sup>1)</sup>, die Autoren meinten, trotz dieses Fasersystems werde der Zahn in den Kieferknochen eingepreßt und die Wurzel wirke wie ein Keil. Auch die Autoren, die das gesamte periodontale Gewebe für inkompressibel halten, meinen damit eine abgewandelte Art der direkten Einkeilung, denn die Alveolenwand wird auch in diesem Fall senkrecht durch Druck belastet, d.h. die Alveole wird gespreizt. Wüstenhagen (1923) schrieb von einer "gelenkähnlichen Befestigung des Zahnes im Knochen" durch eine Gomphosis, Landsberger (1924) verglich den Zahn mit einem "Pflock", der in den Knochen eingetrieben ist", so daß beim Mundschluß "durch den Druck der sich gegenüberstehenden Zähne einzelne Knochen-  
teilchen in der Tiefe zerstört werden".

Synge (1933) formulierte als erster eine Theorie der inkompressiblen Wurzelhaut. Schröder (1934) schloß sich dieser Meinung an. Auch Wild (1950) schrieb dem Periodontium diese Eigenschaft zu: "Am Fundus der Alveole entsteht Druck durch das Zusammenpressen der Gewebsflüssigkeit im Periodontium". Gable (1954) kam durch die Beobachtung, daß der Zahn bei Belastung nur sehr wenig in die Alveole gedrückt wird, zu der Annahme, das periodontale Gewebe sei inkompressibel.

Schon 1881 beschrieb Wedl und nach ihm Schweitzer (1909) das periodontale Gefäßsystem mit einer dämpfenden Wirkung im Sinne einer hydraulischen Bremse bei Druckbelastung des Zahnes. Da Flüssigkeiten aber inkompressibel sind, ist das Problem der Kompressibilität eine Frage der Verschieblichkeit von Flüssigkeitsvolumen in die angrenzenden Knochenpartien oder innerhalb des Perio-

<sup>1)</sup> Zielinsky (1908), Birkenbeil (1931), Loos (1900), Walkhoff (1900-1903), Kallhardt (1904), Katz (1931), Orban (1927), Sicher (1916).



dontalspaltes selbst. Auch Loos (1900), Weski (1921), Häupl (1949, 1961), Fröhlich (1948) u.a. äußerten, die Gefäßknäuel im Periodontium wirken als Bremse. Eschler (1951, 1952) bestritt die funktionell-mechanische Bedeutung dieser Gefäßschlingen im Periodontium mit der Begründung, der Innendruck der Präkapillaren und Kapillaren könne den Kaudruck nicht abbremsen. Eine Widerstandsleistung in Form einer hydraulischen Bremse sei demnach abzulehnen.

Die Alveoleninnenwand ist an mehreren Stellen durch breite sog. Haversche Kanäle unterbrochen, über die das periodontale Gewebe mit den Markräumen des Knochens in Verbindung steht. Mühlemann (1951) sprach von einem "intraalveolären vaskulären Zirkulationsmechanismus": Eine Druckerhöhung im Periodontalspalt durch den belasteten Zahn könne deshalb nicht zustande kommen, weil sie durch die Auspreßbarkeit des Gefäßnetzes im Periodontalspalt über eine Volumenverminderung oder eine Volumenverschiebung kompensiert würde. Durch kurzfristig angreifende Kräfte wird auf die Alveolenwand kein oder nur ein geringer Druck ausgeübt, da durch den Ausgleich der Flüssigkeit dieser aufgehoben wird. Bei stärkeren Kräften jedoch könne es zu einem Druck auf den Knochen kommen, entscheidend sei die Art der Krafteinwirkung.

Loos (1900) erklärte schon damals die auch heute noch gültige Ansicht: "Der Druck auf den Zahn wirkt als Zug auf die Periostfasern und hat daher das Bestreben, die Alveole in das Innere des Alveolarfortsatzes zu treiben und die beiden Platten derselben gegeneinander zu ziehen".

Kronfeld (1927) und Fröhlich (1948) betonten, daß der physiologisch stark belastete Zahn die Alveolenwand

sowohl bei achsialer als auch bei horizontaler Belastung nicht berühre und lehnten damit j e d e direkte Druckwirkung im Sinne einer Keilwirkung ab. Auch Sicher schrieb 1916: "Bei der Anspannung dieser vom Knochen zur Wurzel ziehenden Fasern muß selbstverständlich auf den Knochen ein Zug ausgeübt werden. Wir sind daher berechtigt zu sagen, daß der auf den Zahn ausgeübte Druck zum allergrößten Teil als Zug (!) auf den Knochen des Alveolarfortsatzes fortgepflanzt wird." Ähnlich beschrieben auch Wild (1950), Eschler (1939-1963) und Mühlemann (1951) die Wirkung der periodontalen Fasern.

Häupl (1961) behauptete, daß durch die Kautätigkeit "im" Knochen "Zugwirkungen"(!) auftreten. Er unterschied allerdings noch nicht eine "innere" von einer "äußeren" Beanspruchung, wie wir es heute tun. Aus der Festigkeitslehre wissen wir, daß beide voneinander unterschieden werden müssen: Die innere Beanspruchung ist eine Folge der äußeren und hinsichtlich Richtung und Qualität nicht unbedingt dieser gleich. Die Behauptung Häupls, "im" Knochen herrsche "Zugwirkung", ist nicht richtig in dem von ihm gemeinten Sinne, weil er innere und äußere Beanspruchung gleichsetzte. Dagegen stimmt, daß die Fasern eine Zugbeanspruchung auf den Knochen übertragen. Die meisten Autoren schreiben nur etwas unklar von "Zugwirkungen" auf den Knochen.

Die Druckkräfte auf die Zähne werden somit auf den Alveolarknochen durch die Periodontalfasern als Zugkräfte übermittelt. Walkhoff (1900-1903) jedoch billigte den Periodontalfasern nur eine "unterstützende" Wirkung zu, den eigentlichen Widerstand würde die gesamte Wurzelhaut leisten. Wetzel (1925) formulierte: "Durch die zugfesten Wurzelhautfasern wird die Gefahr einer Sprengung der Alveole durch den Kaudruck vermieden."

Viele halten den Zahn wohl für aufgehängt, sie meinen jedoch, bei horizontalen Belastungen würde er an der Alveolenwand anstoßen. Wiessner (1908): "Der Zahn wirkt als ein- oder zweiarmiger Hebel". Bei vollkommen zusammengedrücktem Periodontium entsteht nach A.M. Schwarz (1928) ein "Anlehnbereich" des Zahnes am Alveoleneingang bzw. eine "diagonale Verklebung" des Zahnes in seiner Alveole. Andere Autoren sprechen von "Einspannstellen" (Falk, Bauer-Lang, zit. A.M. Schwarz, 1928) und "Anprallgebieten" (Häupl-Lang, 1927) an Zahn und Knochen. Weber-Thedy (1964) bezeichnet die Wurzel als Hebel ("Brechstange"), der die Alveole aufsprengt und die Wurzelhaut zerquetscht.

Gabel (1934), der wie Gaman (1929) die Periodontalfasern für elastisch hielt, berechnete "Druck- und Zugzonen", die durch eine direkte Einwirkung des Zahnes auf den Knochen entstehen. Eine Beanspruchung der Alveole durch den nicht axial belasteten Zahn als Hebel deuteten auch H. Schröder (1934), Eschler (1939-1963), Häupl (1941), Drum (1948), Aisenberg (1952), Dempster und Duddles (1964), Reichenbach (1963) und Wannemacher (1963). Gottlieb und Orban (1931) sprechen sogar von einer "Quetschwunde" im periodontalen Gewebe.

Kronfelds Vorstellung aus dem Jahre 1927 formulierte Fröhlich 1948 neu und schlug andere Bezeichnungen vor: "Durch die horizontale Druckkomponente einer physiologischen Zahnbelastung werden in der sog. Druckzone die Aufhängefasern lediglich entlastet und die Alveolenwand nicht oder nur wenig belastet. Man spricht besser von 'Entlastungszonen'." Durch elektronische Zahnbeweglichkeitsmessungen konnten Körber (1963) und nach ihm Hofmann (1963) eindeutig nachweisen, daß bei einer reinen Horizontalbelastung von beispielsweise 1000 p ein oberer Schneidezahn nur um ein Viertel der mittleren Perio-

dontalspaltbreite ausgelenkt wird. Bei physiologischer Kaubelastung wird diese Kraft sicher nie erreicht oder sogar überschritten, weil es sich ja lediglich um die horizontale Komponente der Druckkraft handelt.

Somit können wir heute mit Sicherheit annehmen, daß der Zahn bei physiologischen Kaubelastungen durch die horizontalen Kraftkomponenten an den Alveolarknochen nicht angedrückt wird.

Mühlemann (1951) hielt es aufgrund seiner Beobachtungen für bewiesen, daß die elastische Deformation des Alveolarknochens bis an die Oberfläche festzustellen ist und glaubte damit, "die interessanten spannungsoptischen Studien Zaks" bestätigen zu können, auf die in der vorliegenden Arbeit gesondert eingegangen wird. (Vgl. Versuch III dieser Arbeit: Die Bedeutung der Periodontalfasern für die Spannungsverteilung im Alveolarfortsatz, Seite 52.).

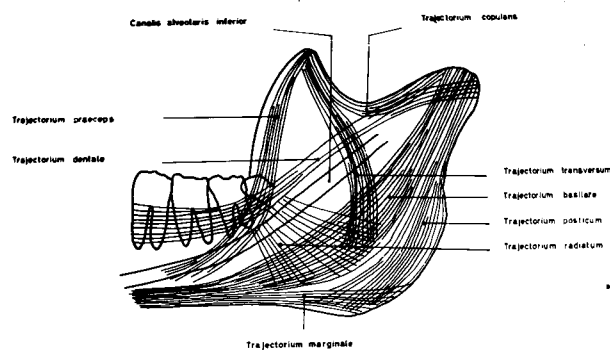
#### 4 Struktur des Alveolarfortsatzes

Lewin (1913) und auch Weber-Thedy (1964) betrachteten den gesamten Unterkiefer als einseitig eingespannten Biegebalken; beide kommen daher auch zu der Ansicht, im oberen, alveolären Gebiet würde der Knochen auf Zugspannungen beansprucht. In welcher Weise diese an sich richtige Tatsache durch innere Untersuchungen bestätigt werden konnte (vgl. Versuch I, Seite 42), und in wieweit sie modifiziert werden muß, wird noch eingehend erläutert werden müssen.

Kallhardt hatte bereits 1904 betont, die Bildung der Spongiosabälkchen finde "in einer auffallend regelmäßigen, architektonischen Gesetzen folgenden Weise statt, wodurch

sie dem Druck gegenüber die größte Widerstandskraft entfalten könnten". Auch Mc Millan (1926) erkannte die Struktur des Alveolarfortsatzes als nach mathematisch-mechanischen Erfordernissen aufgebaut. Gaman (1929) trennte im corpus mandibulae eine dental-funktionell orientierte von einer nicht dental-funktionell orientierten Zone, die sich durch verschiedene Beanspruchungen ursächlich unterscheiden.

Walkhoff (1900-1903) beschreibt die Zähne "wie in einem horizontal aufgespannten Netzwerk schwebend"; unterhalb des Alveolarfortsatzes erkennt er ein "großmaschiges, horizontales Balkennetz, in welchem die Bälkchen häufig gegen die Wurzeln der Zähne ziehen. Er nennt dieses in seinem Schema der Knochenzüge "Trajektorium dentale". Nach Lewin (1913) verteilen sich die Trajektorien im Alveolarfortsatz über einen breiten Raum, sie "blättern sich auf" und widerstehen Zugwirkungen im belasteten Alveolarfortsatz, die bei Biegung des gesamten Unterkieferknochens als einseitig aufgehängter Hebel entstehen.



Walkhoff - 1902  
 Schema der Trajektorien des Unterkiefers  
 beim Orang-Utan (Nachzeichnung)

Abb. 1

Gaman (1929) beschreibt ein "Trajektorium basale alveoli": "Unter den Zähnen kann in der dental-funktionell orientierten Zone ein neues, trajektoriell gebäckt entstehen", dessen Gestalt der Erfahrung nach bei fast allen Menschen gleich sei: ein "von jeder Wurzelspitze ... leicht gebogenes Balkenwerk, welches in Bogenform stark nach hinten gerichtet ist". Seipel (1934) beobachtete: "Die interdentalen Trajektorien vereinigen sich in der Apikalregion zu einer Arkadenform." Gaman (1929) bestätigte Walkhoffs Ansicht durch seine Untersuchungen, die ergaben, an vom Kaudruck befreiten Stellen (Extraktionen) seien die Trajektorien vollständig verschwunden, dagegen an besonders belasteten Stellen (wie z.B. Brückenpfeilern) besonders gut ausgebildet.

Von Walkhoffs Darstellungen ausgehend, beschreibt Birkenbeil (1931): "Es entsteht eine wahre Kahnform (der Spongiosastruktur), indem die Balken nahezu vertikal von der Basis (der Unterkante der Mandibula) aufstreben und gegen die Alveole umbiegen, so daß sie auch mit bogenförmigen Streben zu vergleichen ist; in welchem System der betreffende Zahn hängt".<sup>1)</sup>

Loos (1900): "Wir finden ... die Spongiosa in der Nähe der kompakten Begrenzungsplatten in parallelen Zügen, die untereinander und mit den Wänden durch kurze Balken verbunden sind." Er vergleicht dieses Bild mit einer "Abblätterung" der kompakten Wände und führt weiter aus: "In der Mitte des Alveolarfortsatzes und auch der anderen, größeren, mit Spongiosa erfüllten Räume des Kieferbeines finden wir Spongiosa in anscheinend unregelmäßiger Anordnung vorhanden".

<sup>1)</sup> Zum Vergleich und zur Verdeutlichung sei auf die Abbildungen 2/5, 2/6, 2/7 und 2/8 dieser Arbeit hingewiesen.

Die Untersuchungen vieler Autoren ergaben, daß sich die Spongiosabälkchen senkrecht zur Kompakta einstellen<sup>1)</sup> und untereinander orthogonal angeordnet sind, d. h. sich rechtwinklig kreuzen<sup>2)</sup>.

Die Vorstellung der einzelnen Autoren über die innere Beanspruchung im belasteten Alveolarfortsatz läßt sich aus der Funktion ableiten, die sie den Spongiosabälkchen zuschrieben:

Von den meisten Autoren wird die Aufgabe der Spongiosabälkchen darin gesehen, daß sie die Alveolenkompakta abstützen (Kallhardt, 1904; Gaman, 1929; Eschler, 1952 u.a.) Loos (1900): "Die Spongiosa überträgt den Druck, den die Alveolenwand erfährt, auf die kompakten Begrenzungswände des Alveolarfortsatzes; ein kräftiges Strebensystem ist zur Versteifung des Alveolarfortsatzes Bedingung." Stein und Weinmann (1925) beschrieben die horizontalen Knochenbälkchen als "Verspreizung" und "Stützung der Alveolenwände". Diese Ansicht wurde in der Literatur übernommen und verbreitet.

Wymann hatte bereits 1849 bei den Spongiosabälkchen "studs" (Druckstützen) von "braces" (Zugspannten) unterschieden. Auch Wetzel (1925) beschrieb die Spongiosa als ein System von zug- und druckfesten "Sparren", Shore (1959) bezeichnete die Spongiosa als ein System "substantivierter Spannungslinien", von Druck- und Zuglinien unter Beanspruchung.

---

<sup>1)</sup> Walkhoff (1900-1903), M. Müller (1915), McMillan (1926), Gaman (1929), Birkenbeil (1931) u.a.

<sup>2)</sup> Schenk (1896), Walkhoff (1900-1903), Kallhardt (1904), Zielinsky (1908), M. Müller (1915), Davida (1915), McMillan (1926), Kellner (1928), Gaman (1929), Birkenbeil (1931), Seipel (1934), Glattes (1936), Eschler (1939-1963), Häupl (1949-1961), W. Meyer (1951), Shore (1959), Lhotsky (1965) u.a.

Im Jahre 1900 nannte Loos in seiner Arbeit "Bau und Topographie des Alveolarfortsatzes im Oberkiefer" die Spongiosauüge, die im Septum in der Richtung der Alveolenachse nach aufwärts (Oberkiefer) ziehen, "Strebe Pfeiler". Die Spongiosafäden, die interdental von Lamelle zu Lamelle ziehen und diese untereinander und auch mit den Wänden des Alveolarfortsatzes verbinden, verglich Loos mit "gespannten Saiten". Damit hatte er vermutlich als erster den Gedanken, daß die interdentalen und interradikulären Septen in horizontaler Richtung auf Zug, in vertikaler Richtung auf Druck beansprucht sein könnten.

Wetzel (1925) beschrieb am Oberkieferfortsatz: "Die Knochenteile, von welchen die Hauptfasern entspringen, unterliegen der Wirkung einer Kraft, welche sie aufwärts gegen die Schädelbasis drängt." Sein Doktorand Gebser (1925) nannte diese Kraft "Verschiebungsdruck". Ähnlich sprach Seipel (1934) von einer Druckverteilung durch Trajektorienkreuzung und bezeichnete die Septen im Alveolarfortsatz ihrer funktionellen Bedeutung nach als "Interdentalpfeiler".

Schröder (1934) entwickelte folgerichtig, aus der senkrecht den Zahn beanspruchenden Kaukraft ergebe sich wegen des schrägen Verlaufs der in der Hauptachse beanspruchten Fasern im Periodontalspalt eine Komponente, die, radial nach innen gerichtet, den Umfang der Wurzelscheide zu verringern suche, "demgemäß werden die Spongiosabälkchen des benachbarten Knochens auf Zug beansprucht". Damit erkannten Loos (1900), Wetzel (1925), Gebser (1925), Schröder (1934) und Seipel (1934) die Beanspruchung des alveolären Knochens bereits rein theoretisch derart, wie wir sie in unseren Versuchen experimentell nachweisen konnten.



### III Methoden der Analyse der Knochenstruktur

#### 1 Überblick über die einzelnen Verfahren

Schon makroskopisch läßt sich am Knochen eine kompakte Schale von einem aufgelockerten, spongiösen Teil im Innern unterscheiden. Es fällt auf, daß in diesem spongiösen Gebiet die Knochensubstanzen mitunter in bestimmten Strukturen angeordnet sind.

Das Interesse vieler Bemühungen war darauf gerichtet, Ursache und Bedingungen dieser inneren Struktur der Knochen herauszufinden. Eine Anordnung der Knochenhartsubstanzen einfach zu beschreiben und mit den Konstruktionen der Bautechnik zu vergleichen, kann die Entstehung der fertigen Struktur selbst nicht erklären. Aus diesem Grunde ist diese Methode nicht richtig. Außerdem bestehen schon in der bloßen Beschreibung der Struktur der Knochenhartsubstanzen Gegensätze zwischen den einzelnen Autoren.

Als Beispiel soll schon hier auf einen Fehler hingewiesen werden, der nur infolge dieser Betrachtungsweise auftreten konnte: Viele sprechen von horizontalen "Stützbälkchen" der Interdentalsepten<sup>1)</sup>. In Wahrheit handelt es sich vom statischen Standpunkt genau um das Gegenteil, nämlich um "Zugbälkchen"<sup>2)</sup>.

Die bekannten Methoden statisch-mechanischer Analysen der Knochenstrukturen werden im folgenden beschrieben und kritisiert:

<sup>1)</sup> Walkhoff (1900-1903), Müller (1915) Häupl (1941) u.a.m.

<sup>2)</sup> Vgl. Seiten 17 und 18 und Seite 126ff. (Die Statik des Alveolarfortsatzes in neuer Sicht.)

Bei vielen Untersuchungen wurden Knochenschnitte bzw. -schliffe angefertigt, weil vermutet wurde, daß aus Schnitten und Schnittserien gefundene Strukturen als funktionelle Linien gedeutet werden könnten<sup>1)</sup>. Insbesondere entstanden Meinungsunterschiede über von einigen Autoren beschriebene und benannte "Trajektorien", weil diese von anderen in entsprechenden Knochenpartien nicht beobachtet werden konnten, oder nicht als funktionelle Linien gedeutet, sondern als Wachstumslinien oder gar als vererbt angesehen wurden. Dies ist auch heute noch ein vielfach geübtes Verfahren; es unterliegt aber derselben Kritik, die im folgenden bei dem Verfahren von Wyss<sup>2)</sup> angebracht wird.

Andere Autoren<sup>3)</sup> deuteten in Röntgenbildern gefundene Zeichnungen als statisch bedingt und stellten sie als Trajektorienzüge dar. Cserneyei (1953) untersuchte morphologisch die geröntgten Knochenabschnitte und wies nach, daß wegen der Dicke des Objektes (Alveolarfortsatz ca 1 cm) durch Überprojektionen hintereinander liegender Hartsubstanzen das betreffende Röntgenbild auf die tatsächlichen Gegebenheiten keine eindeutigen Rückschlüsse zulassen könnte<sup>4)</sup>.

Benninghoff (1930-1931) entwickelte eine spezielle Untersuchungsmethode, das sog. Spaltlinienverfahren. Dieses erlaubt, in der Knochenkompakta Struktursysteme sichtbar zu machen. Diese Linien glaubte Benninghoff als

<sup>1)</sup> Bourgeroy (1832), Ward (1838), Wyman (1849), Engel (1851), Humphry (1858), Meyer, Wolff (1867) u.a.m.

<sup>2)</sup> Vgl. Seite 22

<sup>3)</sup> Walkhoff (1900-1903), Goerke (1903), Dieck (1911), Lewin (1913), Barth (1919), Birkenbeil (1931), Parfitt (1962) u.a.

<sup>4)</sup> Schon vor Cserneyei bestritten auch Weidenreich (1926), Told (1904), Triepf (1908), Winkler (1921), Braunschweiger (1922), Franke (1922), Katz (1931), die mit Hilfe von Röntgenbildern behaupteten Trajektorienzüge.

mechanisch bedingte Strukturen deuten zu können. Abgesehen davon, daß diese Methode nur für die Kompakta Aussagen zuläßt, wiesen Pauwels (1948) und Knese (1958) nach, daß die Spaltlinien lediglich Wachstumsstrukturen darstellen, also nicht Strukturen entsprechen, die mit der funktionellen Beanspruchung des Knochens direkt in Zusammenhang stehen.

Küntscher (1935), Bichelmeier (1939) und Evans (1957) wendeten für spezielle Untersuchungen der Frakturen die Reißlackmethode an: Sie überzogen die Knochenoberfläche mit einer Lackschicht, die bei bestimmten Beanspruchungen in charakteristischer Weise Dehnungsrisse zeigte. Im Gegensatz zu allen vorher beschriebenen Methoden ermöglicht die letztgenannte, objektiv Verformungen zu ermitteln, die durch Beanspruchungen des Objekts entstehen, denn Dehnung steht in einer direkten Beziehung zur Spannung.

Ähnliches leistet auch ein Verfahren, bei dem mittels Dehnungsmeßstreifen Formveränderungen von Körperoberflächen bei Beanspruchungen registriert werden können. Für Aussagen über Strukturen können diese Methoden jedoch nur als Indizien herangezogen werden.

Andere Untersucher<sup>1)</sup> betrachteten die Hartsubstanzen des Körpers als statisch-mechanische Elemente und untersuchten diese mit den entsprechenden Methoden der Physik. Diese Art der Untersuchung ermöglicht an technischen Modellen wissenschaftlich einwandfreie und reproduzierbare, exakte Messungen auch im Innern der Untersuchungsobjekte:

Angeregt durch den Anatomen H. von Meyer unternahm der Ingenieur Culmann die ersten Untersuchungen im Jahre

<sup>1)</sup> H. Meyer (1867), Culmann (1873), Zak (1935, 1938, 1941), Wyss (1948), Jajima, Jmada, Miyauchi und Mitarbeiter (1959), Schlüter (1965).

1867 über die innere Struktur von Stützelementen auf wissenschaftlich-theoretischer, funktionell-statischer Grundlage. In einer Beschreibung des Spannungszustandes in einem belasteten Kran vergleicht er diesen mit dem Hals des Oberschenkelknochens<sup>1)</sup>. Dies waren die ersten Untersuchungen, die durch rein physikalische Versuche die mechanischen Eigenschaften von Geweben und Organen im lebenden, menschlichen Körper erklären helfen sollten.

Die Erkenntnisse der Technik in Bezug auf Spannungslinien machte sich Wyss (1948) zunutze, als er Knochen-schliffen Trajektoriensysteme überzeichnete, die insbesondere sog. "isotrope Punkte" als eine Eigenheit komplizierter Spannungsfelder berücksichtigten. Diesem Verfahren ist jedoch vorzuhalten, daß nur in Ausnahmefällen die Schnittebene der Knochen in der Ebene der Spannungen verläuft, vielmehr schneiden die Schnittebenen die Spannungsflächen im Normalfall schräg an. Die beobachteten Anordnungen der Knochensubstanz können demnach nicht als in der Schnittebene mit ihren Tensoren verlaufend gedacht werden. Es ist also auch nicht zulässig, dem beobachteten Bild ein System rechtwinklig sich kreuzender Hauptspannungslinien überzuzeichnen, denn üblicherweise werden so nur die Hauptspannungen dargestellt; ein sehr auffälliger Fehler ist Wyss unterlaufen, als er in den isotropen Punkten eine ungerade Anzahl (5) von Spannungslinien sich treffen ließ. Eine ungerade Anzahl von Hauptspannungslinien kann sich nicht in einem Punkt treffen, weil die beiden Systeme der maximalen und der minimalen Hauptspannungslinien wechselseitig senkrecht aufeinander stehen!

Aus diesen Gründen können diese Untersuchungen und diese Methodik nicht akzeptiert werden.

<sup>1)</sup> Vgl. Versuche I und II (Biegebalken) der vorliegenden Arbeit.

## 2 Das spezielle Verfahren der Spannungsoptik

"Spannungsoptik" <sup>1)</sup> ist ein modell-experimentelles Verfahren zur Ermittlung ebener und räumlicher Spannungszustände. Wird ein Körper durch äußere Kräfte beansprucht, dann wirken diese in sein Inneres fort. Um den dadurch bewirkten Zustand des Körpers zu kennzeichnen, hat man den Begriff "Spannung" eingeführt, die als eine pro Flächeneinheit wirksame Kraft definiert wird.

Man unterscheidet in der Festigkeitslehre Normalspannungen: "Zug-" und "Druckspannungen" und "Schubspannungen". Verlaufen an einem gedachten Schnitt durch einen belasteten Körper die Zug- und Druckspannungen senkrecht (und parallel) zu diesem Schnitt, nennt man sie "Normalspannungen"; verlaufen sie dagegen schräg zum Schnitt, werden sie in "Normal"- und "Schubspannungen" zerlegt.

Es läßt sich beweisen, daß es bei räumlichen Spannungszuständen für jeden Punkt drei zueinander senkrechte Verlaufsrichtungen gibt, in denen keine Schubspannungen, sondern nur Normalspannungen auftreten. (Ausnahmen: singuläre, isotrope Punkte und Ecken.) Diese Normalspannungen bezeichnet man als "Hauptnormalspannungen" oder einfach als "Hauptspannungen".

An der unbelasteten Oberfläche eines allgemeinen, räumlichen Körpers, steht immer eine Hauptspannung senkrecht zu dieser Fläche, so daß die beiden anderen parallel zu der Körperoberfläche liegen. Die senkrecht auf eine lastfreie Oberfläche auftreffende Hauptnormalspannung ist an der Oberfläche immer gleich Null.

---

<sup>1)</sup> Föppl-Mönch (1959), Frocht (1957), Kuske (1950, 1959), Wolf (1961)

Die Verlaufsrichtungen der drei zueinander senkrechten Hauptnormalspannungen bilden im Körper ein dreidimensionales orthogonales Netz. Üblicherweise wird dieses Netzwerk durch Linienscharen dargestellt, die willkürlich dicht gezeichnet für jeden beliebigen Punkt im Spannungsfeld die Richtungen der drei Hauptspannungen erkennen lassen.

Demnach ist bei der Auswertung von Hauptspannungslinienbildern darauf zu achten, daß der Abstand der gezeichneten Linien im allgemeinen nichts über die Größe und den Wert der Spannungen aussagt; Bündelungen und Auffächerungen von Hauptspannungslinien lassen allein keine Aussagen zu!

Die Hauptspannungslinienbilder, die aus Versuchen mit zweidimensionalen Modellen gewonnen werden, bieten ein zweidimensionales Netz aus nur zwei Systemen aufeinander senkrecht stehender Linienscharen.

Von beiden Liniensystemen stellt das eine den Verlauf der maximalen Hauptspannungen dar, definitionsgemäß mit  $\sigma_1$  bezeichnet, das andere den Verlauf der minimalen Hauptspannungen ( $\sigma_2$ ).

Es ist besonders darauf hinzuweisen, daß nicht das System der minimalen Hauptspannungen nur Druck- (negatives Vorzeichen), das der maximalen Hauptspannungen nur Zugspannungen (positives Vorzeichen) darstellt; es können vielmehr diese Qualitäten im Verlauf einer dargestellten Hauptspannungslinie wechseln.

Man spricht von "ausgezeichneten" Punkten bzw. Linien des Spannungsfeldes dort, wo beide Hauptspannungen außer derselben Qualität auch dieselben absoluten Werte erreichen. Man kann "isotrope" ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq 0$ ) von "singulären" ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ) unterscheiden. In diesen Punkten ist außerdem die Hauptspannungsrichtung nicht definiert, es treten in keiner Richtung Schub-

spannungen auf. Man nennt solche Punkte daher auch "schubfreie Punkte", in diesen besteht ein "ebener, hydrostatischer Spannungszustand". Während sich singuläre Punkte sowohl am Modellrand wie im Modellinnern nachweisen lassen, gibt es isotrope Punkte nie an lastfreien Rändern.

Bei den singulären und isotropen Punkten unterscheidet man aufgrund der Hauptspannungslinienbilder sog. "eingeschlossene Punkte" von sog. "abweisenden Punkten".

Den "eingeschlossenen singulären Punkt" umgeben beide Hauptspannungslinienscharen in parabelähnlichem Verlauf, während nur eine einzige Hauptspannungsgrenzlinie durch diesen Punkt läuft und im Punkte selber vom System der maximalen Hauptspannungen zu dem der minimalen, bzw. umgekehrt wechselt. (vgl. Abb. 15c, Punkte in den Septen).

Beim "abweisenden singulären Punkt" zeigen sechs Linienscharen, je drei von beiden Hauptspannungssystemen, hyperbelähnliche Figuren, für welche drei Hauptspannungsgrenzlinien, die durch diesen Punkt laufen, "Asymptoten" sind; sie ändern im Punkte ebenfalls die Zugehörigkeit zu den beiden Hauptspannungssystemen.

Zur zweidimensionalen spannungsoptischen Untersuchung werden Objektquerschnitte aus bestimmten durchsichtigen Kunststoffen nachgebildet. (Plexiglas, Araldit o.ä.). Zweidimensionale Modelle müssen überall gleich dick sein, - meist sind sie 10 mm stark -, deshalb können verschiedene, nebeneinander liegende Modellgebiete miteinander verglichen werden.

Diese Werkstoffe sind im unbelasteten Zustand isotrop, d.h., sie zeigen nach allen Richtungen gleiche mechanische und optische Eigenschaften. Durch mechanische Beanspruchung werden diese Werkstoffe anisotrop, die Eigenschaften werden richtungsgebunden.

Eine Eigenschaft aller anisotropen, durchsichtigen Stoffe ist die Doppelbrechung: Jeder auf die Objektoberfläche auftreffende Lichtstrahl wird in zwei Teilstrahlen zerlegt, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten das Objekt durchdringen. Wegen dieser unterschiedlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten werden die beiden Teilstrahlen verschieden stark optisch gebrochen, es entstehen "Doppelbilder".

Die Doppelbrechung belasteter und dadurch anisotrop gewordener Plexiglas- oder Aralditmodelle ist im gewöhnlichen Licht nicht erkennbar; man benötigt "polarisiertes" Licht, um dieses Phänomen für spannungsoptische Zwecke auszunutzen.

Polarisiertes Licht wird beim Durchtritt durch einen unbelasteten isotropen Werkstoff nicht verändert. Ein zweites Polarisationsfilter (Analysator), dessen Durchlaßrichtung senkrecht zum ersten steht, löscht das Licht total aus.

Bei der Erläuterung der Vorgänge im belasteten, anisotropen und dadurch doppelbrechenden Modell wird zur Vereinfachung der Darstellung angenommen, die beiden Teilstrahlen pflanzen sich zwar mit verschiedenen Geschwindigkeiten, aber auf ein und derselben Linie im Modell fort. Außerdem wird das optische Verhalten der belasteten Modelle bei Gebrauch von monochromatischem Licht erklärt, bei Licht mit nur einer Wellenlänge. Bei den Versuchen der vorliegenden Arbeit wurde stets Natriumdampflicht mit einer Wellenlänge von  $589,3\mu$  verwendet.

Beim Auftreffen auf ein belastetes Modell wird der linear polarisierte, monochromatische Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen zerlegt. Dies geschieht so, daß die beiden Teilstrahlen in zwei aufeinander senkrecht stehenden Ebenen sich jeweils als polarisierte Schwingungen fortpflanzen.



Wegen der verschiedenen Geschwindigkeiten erhalten die Teilschwingungen beim Durchtritt durch das Modell zunehmend eine Phasenverschiebung. Nach Austritt aus dem Modell durchheilen beide Schwingungen wieder mit gleicher Geschwindigkeit das Medium Luft, jedoch mit einem gewissen Gangunterschied. Die Überlagerung zweier senkrecht zueinander linear polarisierter Lichtwellen gleicher Frequenz und Wellenlänge, jedoch mit einem gewissen Gangunterschied ergibt elliptisch polarisiertes Licht; die Achsen der Ellipse liegen in demselben Winkel zu den Schwingungsrichtungen wie die der Teilstrahlen im Modell zur Senkrechten. Dieses elliptisch polarisierte Licht läßt sich aber durch den Analysator nicht auslöschen, denn immer gibt es am Analysator Komponenten des ankommenden Lichtstrahles, die der Polarisationsrichtung dieses Filters parallel laufen und daher durchgelassen werden müssen.

Bei zwei besonders zu behandelnden Sonderfällen entstehen im belasteten Modell solche Lichtstrahlen, die sich am Analysator total auslöschen lassen.

a) Isochromaten: Beträgt der durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der beiden Teilstrahlen bedingte Gangunterschied genau das Ein- oder Vielfache einer ganzen Wellenlänge, dann sind die beiden Teilwellen wieder phasengleich: Daraus resultiert ein linear polarisierter Lichtstrahl, den der Analysator total auslöscht. Die auf diese Weise im Modell entstehenden dunklen Felder und Linien (bei Verwendung von monochromatischem Licht) nennt man Isochromaten. Ihre Lage ist nicht von der Filterstellung abhängig.

Jede Verschiebung um eine neue, ganze Wellenlänge der beiden Teilstrahlen im Modell zeigt sich am Analysator durch das Auftreten erneuter totaler Auslöschung, z.B.

dunkler Streifen; diese werden nach der Reihenfolge ihres Auftretens unter Zunahme der Beanspruchung als Isochromaten 1., 2. etc. Ordnung bezeichnet. Weil die Phasenverschiebung der Belastung proportional zunimmt, läßt sich an der Isochromatenordnungszahl die relative Beanspruchung an verschiedenen Punkten des Modells ablesen.

Es läßt sich mathematisch beweisen, daß eine Isochromate jeweils alle die Orte miteinander verbindet, in denen die Differenz der beiden Hauptspannungen ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) gleich groß ist. Da am unbelasteten Modellrand die senkrecht auf dem Rand auftreffende Spannung Null ist, läßt sich aus der Ordnungszahl der Randisochromaten die relative Beanspruchungsgröße des Modells an dieser Randstelle ablesen.

Bei Verwendung von weißem Licht treten statt der dunklen Streifen im Modell kontinuierliche, farbige Bänder auf; zwischen zwei Streifen gleicher Farbe liegen in der Art eines Spektrums die anderen Farben.

Die verschiedenen Farbbänder kommen dadurch zustande, daß für jede einzelne Wellenlänge des gemischten bzw. weißen Lichtes dasselbe Gesetz gilt, wie es oben für das monochromatische Licht beschrieben wurde: Wird eine bestimmte Wellenlänge gelöscht, so bleibt die Komplementärfarbe übrig.

b) Isoklinen: Es ist mathematisch bewiesen, daß die beiden aufeinander senkrecht stehenden Ebenen, in denen der ankommende polarisierte Strahl im Modell zerlegt wird, mit den bestehenden Hauptspannungsrichtungen der betreffenden Punkte übereinstimmen.

Alle polarisierten Lichtstrahlen, die in Richtung der Hauptspannungen schwingen, werden an diesen Stellen beim Auftreffen auf die Modelloberfläche nicht in Teilschwin-

gungen zerlegt. Sie durchlaufen das Modell unverändert und werden am Analysator total ausgelöscht: Die dadurch entstandenen dunklen Linien und Felder nennt man Isoklinen. Sie verbinden die Orte gleicher Hauptspannungsrichtung.

Im Gegensatz zu den Isochromaten ist die Lage dieser Isoklinen von der Filterstellung abhängig, von der Lasthöhe dagegen unabhängig.

In beanspruchten Teilen des Modells läßt sich auf diese Weise für jeden Punkt die Richtung der Hauptspannungen angeben. Nur durch sog. ausgezeichnete Punkte (siehe Seite 24) gehen alle Isoklinen, so daß für diese Punkte sich keine Hauptspannungsrichtung definieren läßt.

Aus einer genügend großen Anzahl von Meßpunkten, in denen die Hauptspannungsrichtungen festgestellt sind, läßt sich das Gesamtbild der Hauptspannungslinien zusammensetzen.

Isochromaten und Isoklinen erscheinen bei der oben beschriebenen Versuchsanordnung gleichzeitig, sie überlagern sich (vgl. Abb 2b). Um sie auseinanderhalten zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- $\alpha$ ) Änderung der Lasthöhe. Die Isochromaten werden durch Verminderung der Lasthöhe weitgehend zum Verschwinden gebracht, weil sie von ihr abhängig sind; die Isoklinen, deren Lage von der Belastungsstärke unabhängig ist, bleiben deutlich sichtbar.
- $\beta$ ) Drehen der Filter: Die Isoklinen wandern beim Drehen der Filter über die Modellfläche, weil sie von der Filterstellung abhängig sind, während die Isochromaten ihre Lage nicht verändern.
- $\gamma$ ) Verwendung von Viertelwellenplatten: In besonders schwierig zu unterscheidenden Gebieten ist dies ein elegantes Verfahren, weil hierbei die Isoklinen überhaupt

nicht auftreten (vgl. Abb. 2c): Mit Hilfe dieser Platten wird vor dem Modell der linear polarisierte Lichtstrahl in zwei Teilwellen zerlegt, die einen Gangunterschied von genau  $90^\circ = \lambda/4$  verursachen. Dadurch entsteht wegen der Überlagerung von Lichtschwingungen gleicher Frequenz und Schwingungsweite sog. "zirkular polarisiertes" Licht.

Durchdringen diese Lichtstrahlen das belastete Modell, bleiben sie an allen Stellen, in denen entweder keine neue Phasenverschiebung oder eine um ganze Wellenlängen erfolgt, als zirkulär polarisiertes Licht erhalten.

Durch nochmalige Phasenverschiebung um  $\lambda/4 = 90^\circ$  (durch die zweite Viertelwellenplatte hinter dem Modell), entsteht aus dem zirkular polarisierten wieder linear polarisiertes Licht, das durch den Analysator ausgelöscht wird.

An beanspruchten Punkten im Modell entsteht durch eine zusätzliche Phasenverschiebung um nicht ganzzahlige Wellenlängen elliptisch polarisiertes Licht.

Weil zirkular polarisiertes Licht keine bestimmte, bleibende Schwingungsrichtung hat, sondern der Vektor rotiert, lassen sich die richtungsgebundenen Isoklinen nicht beobachten; die nicht richtungsgebundenen Isochromaten bleiben dagegen sichtbar.

Darstellung von Isoklinen und Isochromaten bei zentrischer Belastung nur eines Nachbarzahnnes des Mittelseptums im Modell IV (vgl. Abb. 36, Seite 118)

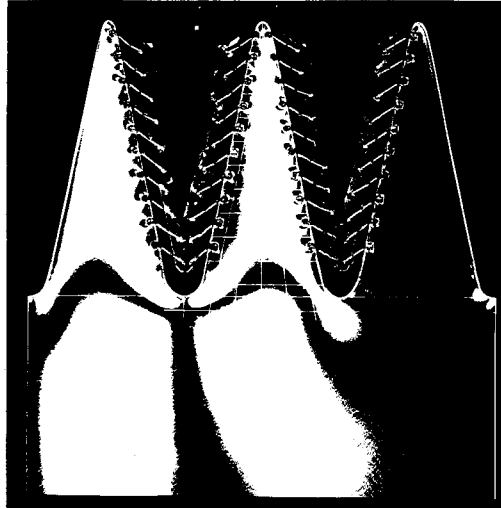


Abb. 2 a

Darstellung der  $90^{\circ}$ -Isoklinen bei geringer Belastung des Modells (6,6 kp), weißes Licht, Polarisationsfilter, keine Viertelwellenplatten

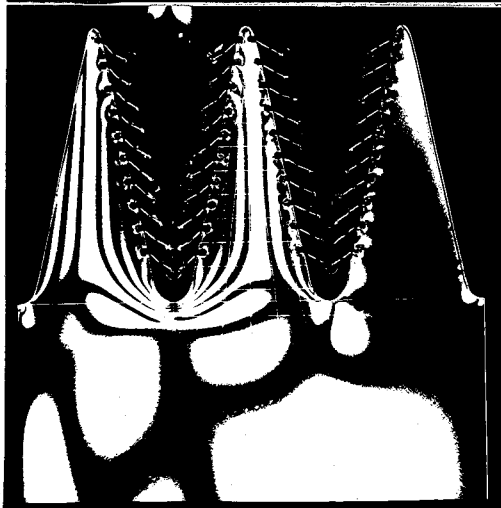


Abb. 2 b

Darstellung derselben  $90^{\circ}$ -Isoklinen wie bei Abb. 2 a; durch Erhöhung der Belastung auf 50 kp überlagern sich die Isoklinen mit den entstandenen Isochromaten; weißes Licht, Polarisationsfilter, keine Viertelwellenplatten

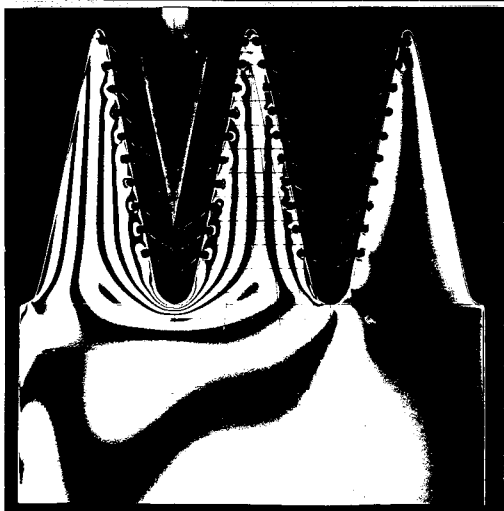


Abb. 2 c

Darstellung der Isochromaten bei derselben Lasthöhe von 50 kp bei monochromatischem Licht; durch Verwendung von Viertelwellenplatten sind die Isoklinen nicht darstellbar

### 3 Versuchsordnung

#### a) Allgemeines

Um das modell-experimentelle Verfahren der Spannungsoptik für statische Untersuchungen im biologischen Bereich heranziehen zu können, müssen eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein:

Die Profile der Modelle sollen dem Untersuchungsobjekt entsprechen. Die Lasteinleitung muß in der Art erfolgen, die den natürlichen Gegebenheiten entspricht. Beispielsweise wurde sowohl bei den zwei- wie auch beim dreidimensionalen Modell größter Wert darauf gelegt, daß die Zähne in den Alveolen hängen.

Die Abstützung des Modells soll das Prinzip der Gegenkraft des belasteten Objektes gegen die einwirkende Last wiedergeben. Es entstehen grundsätzlich andere Spannungsverhältnisse, wenn das Modell breit oder punktförmig unterstützt, einseitig oder beidseitig aufgehängt ist.

Bei dreidimensionalen Untersuchungskörpern besteht das Problem darin, inwieweit sich für sie mit Hilfe zweidimensionaler Schnittmodelle Aussagen machen lassen. Diese Schnitte müssen so gewählt werden, daß sie zwei oder drei räumlichen Hauptspannungen enthalten. Dies setzt voraus, daß der Schnitt einer Symmetrieebene des zu untersuchenden dreidimensionalen Modellkörpers entspricht.

Für die vorliegenden Versuche soll immer gelten, daß sie als Schnittscheiben von symmetrischen, idealisierten Körpern anzusehen sind. Das Modell I (Abb. 4) läßt sich als Querschnitt des Alveolarfortsatzes durch einen Alveolenfundus auffassen; die Modelle II, III und IV (Abb. 4 und 5) sind als Teile von Längsschnitten durch die Symmetrieachse eines Alveolarfortsatzes gedacht.

Um dem Einwand zu begegnen, die alveolären Kortikalisschichten buccal und palatinal bzw. lingual würden als besondere Versteifung des Alveolarfortsatzes grundsätzlich neue statische Verhältnisse schaffen, ist zusätzlich ein dreidimensionaler Versuchskörper als idealisierter Teil des Alveolarfortsatzes hergestellt worden.

Lassen sich aber auch für Körper Aussagen aus diesen Versuchsmodellen machen, die wie zum Beispiel der spongiöse Knochen in ihrem Innern eine bestimmte Struktur aufweisen?

Weil wir mit unseren Untersuchungen gerade herausbekommen wollen, warum der Knochen *n i c h t* homogen ist, warum er darüber hinaus nicht homogen zu sein braucht ist die Frage vielmehr, ob die Materialverteilung im Knochen statisch einen Sinn hat. Der Knochen wird unter der Belastung geformt, er ist kein Bauteil, das fertig konstruiert den Belastungen ausgesetzt wird. Das Spannungsoptische Verfahren kann im Gegensatz zur beschreibenden Anatomie die Frage beantworten, in welchen Teilen der Knochen funktionell strukturiert ist.

Ein Modellkörper, der belastet ist und dessen Hauptspannungslinien ermittelt sind, wird nicht wesentlich geschwächt, wenn man die gesamte Substanz zwischen den konstruierten Hauptspannungslinien entfernt und nur das orthogonale Netz stehen läßt, obwohl von der Masse des Körpers dabei sehr viel genommen wird: Die "substantivierten Hauptspannungslinien" geben dem Modellkörper für die sie verursachende Belastung die größtmögliche Festigkeit.

Der fertige Knochen, der eine Kortikalisschale und ein inneres Spongiosagebälk aufweist, ist der Endzustand der Anpassungsmöglichkeit des Knochengewebes an eine bestimmte oder mehrere verschiedenartige Belastungen.

Nur wenn Knochenstrukturen nicht funktionell geformt, sondern vererbt oder wachstumsbedingt sind, muß das spannungsoptische Verfahren versagen. Dann aber wird z.B. der Spongiosabälkchenverlauf in gewissen Gebieten von dem verschieden sein, wie wir ihn zum Beispiel als funktionell günstig ermittelten.

Die Kompaktaschale vermag die Knochenkörper im Vergleich zum kompakten Stab wie ein Rohr besonders zu stabilisieren. Auf diese Tatsache ist bei der Deutung der modell-experimentell ermittelten Hauptspannungslinienbilder und auch bei der Messung von Spannungswerten sehr zu achten.

Da im ganzen gesehen aber nie quantitative, sondern nur qualitative Aussagen gemacht werden sollen, ist mit diesen Einschränkungen für ein mechanisch-statisches Gebilde wie der Knochen das spannungsoptische Verfahren zur statischen Analyse erlaubt.

#### b) Versuchsaufbau:

Die Modelle werden in die Belastungsvorrichtung eingespannt (vgl. Abb.3). Vor und hinter dem Modell sind jeweils Polarisationsfilter aufgestellt und zwischen Modell und Filter je eine Viertelwellenplatte so angeordnet, daß die im Winkel von  $90^\circ$  gekreuzten Polarisationsfilter und ggf. Viertelwellenplatten gegeneinander um  $45^\circ$  gedreht sind. Als Lichtquelle dient monochromatisches, einfarbiges Licht (gelbes Natriumdampflicht =  $589,3 \text{ n}$ ).

Das Modell wird durch einen an der Belastungsvorrichtung fixierten Keil belastet. Die Aralditalveole bleibt bei der Belastung starr verankert.





Abb. 3 Versuchsanordnung zur Bestimmung der Isochromaten Belastungsrahmen mit eingespanntem Aralditmodell; zusätzlich das angebrachte Lateralextensometer, Lichtkasten und Filtersysteme (Polarisationsfilter und Viertelwellenplatten)

Bei der Belastung wird die Wurzel in die Alveole gedrückt; über Danylfäden wird von der Wurzel die Last auf die Aralditalveole übertragen. Zunehmende Belastung wird für den Beobachter sichtbar durch die in die Aralditplatte einrückenden Isochromaten.

Bei vollständiger Entlastung wird die Wurzel durch die Elastizität der Danylfäden bis in die Ausgangslage wieder aus der Alveole herausgehoben und das Modell wieder spannungsfrei.

Die Lasthöhe zur Bestimmung der Isoklinen wurde grund-

sätzlich geringer gewählt als zur Bestimmung der Isochromaten; statt des einfarbigen Natriumdampflichtes werden die Isoklinen üblicherweise bei gemischtfarbigem, weißem Licht bestimmt.

Mit Tusche wird die jeweilige Lage der Isoklinen auf der Aralditoberfläche markiert. In der Regel sind die Isoklinen bei Filtereinstellungen von  $10^\circ$  zu  $10^\circ$  bei Drehung der Filter im Uhrzeigersinn aufgezeichnet worden.

Das Ergebnis ist eine Linienschar, die über die ganze Modellfläche sich verteilt und in bestimmten Stellen in der Fläche sich kreuzt oder am Rande zusammenläuft. Diese Linienschar erlaubt es, jeder Stelle im Modell eine Winkel- bzw. eine Filterstellung zuzuordnen. (vgl. Abb. 12a, 12c, 14b, 15b, 21b, 31a).

Entlang jeder Isokline wird die entsprechende Stellung der Filter durch ein Kreuz markiert. Die Hauptspannungslinien werden aus dem so gewonnenen Feld von Kreuzen ersichtlich, die ausgezeichneten Linien sind in ihrer Führung durch die über das ganze Feld verteilten Kreuze bestimmt. Auf diese Weise entsteht ein orthogonales System, die Hauptspannungslinien.

Die eine Linienschar entspricht dem Verlauf der maximalen Hauptspannungen ( $\sigma_1$ , gestrichelte Linien), die andere, zur ersten stets senkrecht verlaufende Linienschar, zeigt den Verlauf der minimalen Hauptspannungen ( $\sigma_2$ , durchgezogene Linien).

#### 4 Modellgestaltung und Modellherstellung

Bei dem modell-experimentellen spannungsoptischen Verfahren wird mit Kunstharzen gearbeitet, die in polarisiertem Licht die optische Erscheinung der Doppelbrechung zeigt. Für unsere Versuche verwenden wir

Araldit B, ein hartes Äthoxylinharz <sup>1)</sup>.

Die zweidimensionalen Modelle werden aus 1 cm dicken, hochglanzpolierten Scheiben geschnitten. Für das dreidimensionale Modell wurde Araldit nach der Verarbeitungsvorschrift geschmolzen und in speziellen Formen ausgehärtet.

Die Modelle müssen so gestaltet sein, daß beim Versuch das Prinzip des zu untersuchenden Problemes als ein statisch-mechanisches System gewahrt ist. So wurde z.B. auf die Imitation der Aufhängung der Zähne sowohl in den zwei- wie auch im dreidimensionalen Versuch größter Wert gelegt. In den zweidimensionalen Modellen wurden als Aufhängeelemente Ultra-Damyl-Schnüre von 0,9 mm Durchmesser verwendet. Nach jeder Entlastung entspannen sich diese Fäden wieder bis zum Ausgangszustand. Dadurch ist es möglich, an einem einzigen Modell viele unterschiedliche Belastungszustände zu studieren. In das Modell wurden Stücke dieser Schnüre mit einem Spezialkleber - Uhu plus - eingeleimt, im Wurzelteil mit Kaltpolymerisat.

Die Aufhängung der Zähne mit Ultra-Damyl-Fäden ließ sich im dreidimensionalen Modell nicht durchführen; da aus dem belasteten Modell zur Analyse der "eingefrorenen" Spannungen ohnehin eine Scheibe herausgesägt werden muß, das Modell also nur für einen einzigen Versuch brauchbar ist, genügt es, zur Aufhängung der Wurzel Stahldrähte zu benützen.

Bei der Belastung der Wurzeln im Modellversuch wirkt dieser Aufhängeapparat also wie der Bandapparat (lig.

---

1) An dieser Stelle sei der Firma CIBA, Basel, für die Bereitstellung des Werkstoffes Araldit B gedankt.

suspensorium dentis) im Kiefer, nämlich als Zug am Knochen bzw. dem entsprechenden Modellteil. In unseren Modellen wurde das lig. obliquum dargestellt, im dreidimensionalen Versuch sind zusätzlich Anteile des lig. horizontale cervicale und apicale und des lig. tangentielle in das Modell eingebaut. Durch den Verlauf der Aufhängeelemente vom Knochenmodell schräg nach unten zur Wurzel werden bei einer Belastung die Fäden gespannt, demzufolge wird das Knochenmodell mit einer Zugkraft beansprucht.

Auf die Halteelemente um den Apex wurde verzichtet, weil sie in unserem Falle das System der Aufhängung des Zahnes nicht wesentlich beeinflussen, denn ihre Aufgabe ist bekanntlich die Fixierung des Apex bei Zahnexkursionen besonders bei horizontalen Belastungen.

Ebenso wurde weder ein Plexus intermedius noch eine gewellte Verlaufsform an den Fäden imitiert. Der statische Sinn dieser anatomischen Gegebenheiten mag darin zu sehen sein, die Anfangsbeschleunigung bzw. die initiale Beweglichkeit des Zahnes zu bremsen.

Die Beanspruchung wird ausschließlich über Faseranteile vom Zahn auf den Knochen übertragen. Der Widerstand des übrigen Periodontalgewebes soll praktisch Null sein, daher ist an den Modellen der Periodontalspalt leer bis auf die Halteelemente, die ihn frei durchlaufen.

Die Zugbeanspruchung am Modell soll über die Fasern gleichmäßig an allen Aufhängungen geschehen. Dazu ist wegen des Elastizitätsmoduls der Ultra-Damyl-Schnur eine konstante Fadenlänge erforderlich. Die Damyl-Schnur ist oberflächenvernetzt; um bei den Verankerungen einen guten Halt zu gewährleisten, sind die Enden der Fäden jeweils zu Retentionen geknotet. Die physiologische Sanduhrform des periodontalen Raumes wurde ebenfalls

nicht berücksichtigt, weil durch sie im Prinzip statisch sich nichts ändert.

Damit in den Versuchen die Wurzel an der Alveolenoberfläche nicht anstößt und dadurch unphysiologische Zustände vorgetäuscht werden, wurde der Periodontalspalt 5mm breit gewählt.

Auf den Aralditplatten wurden mit Schablonen die entsprechenden Alveolenteile für die Modelle I, II, III und IV (Abb. 4a und 4b) aufgeritzt und mit einer Bandsäge ausgesägt. Durch besonders sorgfältige Bearbeitung und Behandlung (langsames Sägen und Feilen, Lagern der Modelle in Exsikkatoren, Schutz vor Feuchtigkeit etc), ließ sich die Entstehung von Randspannungen weitgehend vermeiden.

In der Mitte der Aralditplattenstärke wurden Marken für die Ansatzstellen der Danylfäden angezeichnet, wie aus den Abbildungen ersichtlich ist. An den markierten Stellen wurden Näpfchen von ca drei mm Tiefe mit Rosenbohrern ausgebohrt.

Von der Danylschnur (0,9 mm  $\varnothing$ ) wurden 1 cm lange Stücke abgeschnitten, die an beiden Enden als Retentionen geknotet waren. Diese Danylstücke wurden unter einem Winkel von  $30^{\circ}$  zur Grundlinie in der Modellebene parallel zueinander in die Näpfchen im Araldit eingeleimt mit einem besonderen Zweikomponentenkleber "UHU plus", einem dem Araldit ähnlichen Stoff.

Die Wurzelformen wurden ebenfalls nach Schablonen aus Plexiglasplatten ausgesägt und durch ein Kaltpolymerisat (Protoplast) mit den freien Enden der Danylfäden verleimt.

In der Konstruktionsskizze für das Modell IV ist zusätzlich das System der Meßpunkte für den Versuch IX (Lateralextensometer) eingezeichnet. Auf beiden Seiten

des Modells wurden die für diesen Versuch notwendigen, sich genau entsprechenden Markierungen exakt ausgemessen und die Meßlinien eingeritzt.

Nach dem folgenden, von Müller (1961) angegebenen Verfahren wurden die Meßpunkte kontrolliert:

Das Modell wurde auf einen Spiegel plan aufgelegt und monookular betrachtet. Bei korrekter Lage müssen die eingeritzten Linien, insbesondere deren Kreuzungspunkte als Meßpunkte übereinander an demselben Ort wie die Spiegelbilder liegen, statt vier Linien darf also nur eine einzige zu sehen sein.

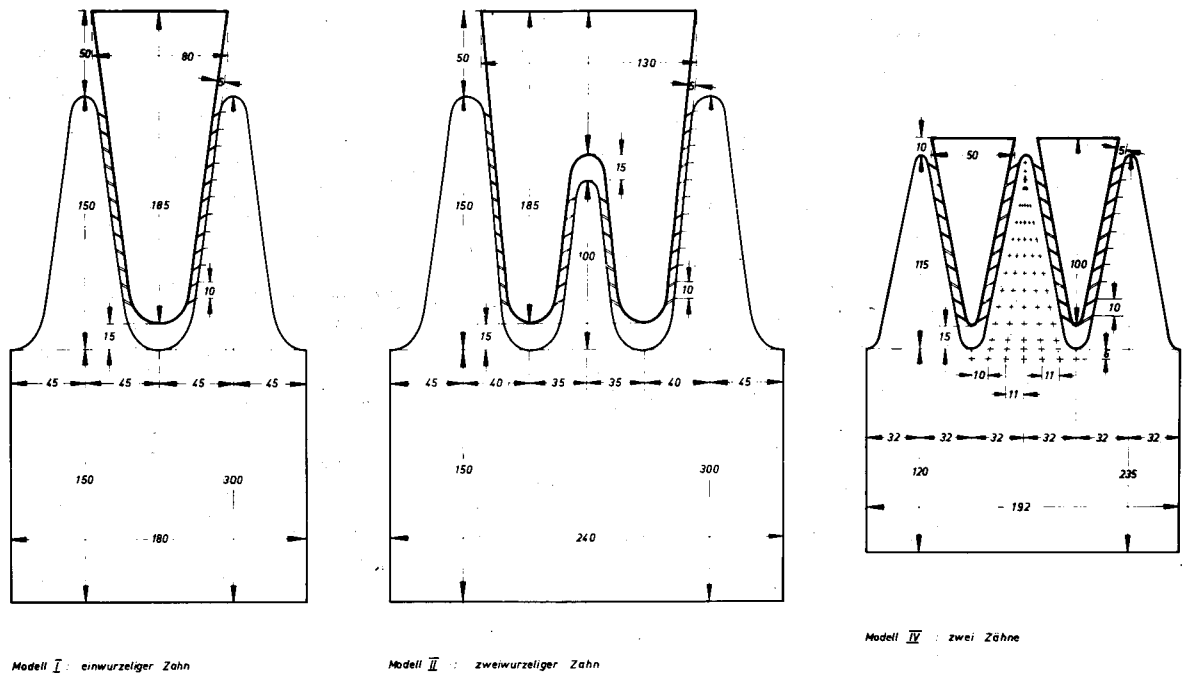


Abb. 4 : Aufriß der Modelle I, II und IV

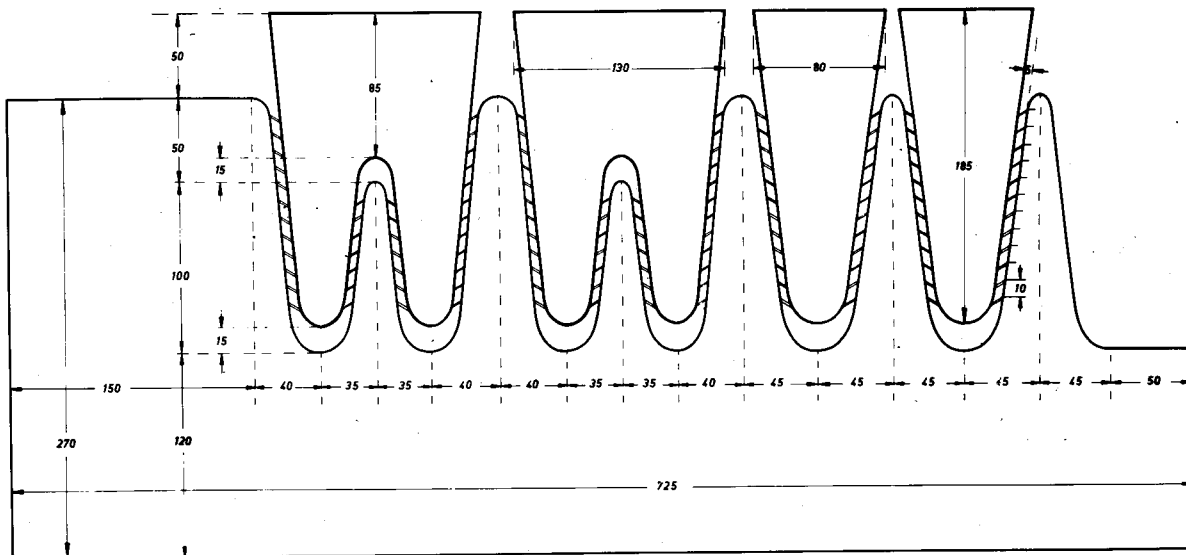


Abb. 5 : Aufriß des Modells III

#### IV Spannungsoptische Versuche zur Statik des Alveolarfortsatzes

##### 1 Vorversuche am Biegebalken

##### a) Belastungen eines einseitig aufgehängten Balkens, Versuch I.

Am einfachen Biegebalken sind Belastungen und Einspannungen in der Versuchsanordnung untersucht worden, die den folgenden Versuchen an Modellen mit Septen entspricht. Besondere Charakteristika, die in allen Versuchen immer wieder angetroffen werden, sollen diese Biegebalkenversuche aufzeigen.

Die später im Versuch durchgeführten Zahnbelastungen sind auf die extremsten und wichtigsten Richtungen beschränkt; alle anderen lassen sich als Kombination dieser untersuchten Belastungen denken. Lediglich die Rotationsbewegung ist nicht berücksichtigt worden.

Bei der Zahnreihe (Modell III) sind Spannungszustände ausschließlich bei zentrischen Belastungen der einzelnen Zähne untersucht worden. Andere Belastungsmöglichkeiten, die im natürlichen Gebiss vorkommen und die Berücksichtigung der gegenseitigen Abstützung der Zähne im Zahnverband bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten. Das Prinzip möglicher Änderungen durch andere Belastungsarten läßt sich aber sicher schon durch den Vergleich mit den Versuchen an Modell I, II und IV erkennen.

Die Belastung mehrerer Zähne wie mehrerer Punkte beim Balken gleichzeitig geschah über Brücken, die exakt in der Mitte belastet symmetrisch jeweils wiederum zwei Brücken in deren Mitte belasteten. An den Enden dieser beiden Brücken wurden schließlich die Zähne, (Punkte) gleichartig belastet.



Auswertung der Isochromatenbilder des Versuches I

Belastung A:



Abb. 6a: Isochromaten eines einseitig aufgehängten und am Ende belasteten Balkens.

Der am Ende belastete Balken zeigt über seine ganze Fläche verteilt Isochromaten als Ausdruck eines über den ganzen Balken verteilten Spannungszustandes.

An der Oberkante und an der Unterkante des Balkens sind zwei Liniensysteme deutlich zu unterscheiden: Von der Mittellinie zu den Rändern steigen fast symmetrisch die Isochromatenordnungszahlen bis zu 8 an der Modelloberkante und 11 an der Modellunterkante. Da die Randisochromatenordnungszahlen den randparallelen Spannungen proportional sind, läßt sich diesem Versuch entnehmen, daß die Spannungen am Modellrand zur Einspannstelle des Balkens kontinuierlich wachsen.

In der Balkenmittellinie ist zwischen diesen beiden beschriebenen Isochromatensystemen die geringste Ordnungszahl gelegen. (Bei dieser Belastung die 1. Ordnung).

An der Stelle der punktförmigen Lasteinleitung sieht das Bild ganz charakteristisch aus: Elliptische Isochromatenlinien berühren sich im Lasteinleitungspunkt innen; die Ordnungszahl ist in diesem Punkt sehr hoch.

Zu der unbelasteten rechten, unteren Ecke hin, nehmen die Spannungen ab.

Belastung B und C:

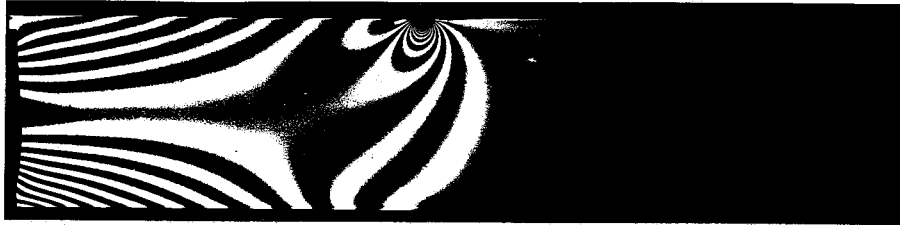


Abb 6b: Isochromaten eines einseitig aufgehängten und in der Mitte belasteten Balkens.

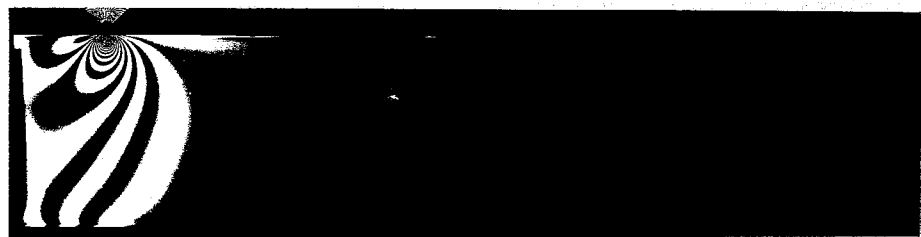


Abb. 6c: Isochromaten eines einseitig aufgehängten und nahe der Einspannstelle belasteten Balkens.

Der in der Mitte B und der nahe der Aufhängestelle C belastete Balken bietet kein grundsätzlich neues Bild der Spannungsverteilung, lediglich ist jeweils zwischen Lasteinleitungsstelle und dem freien Ende des Balkens das Gebiet wegen der Spannungslosigkeit im polarisierten Licht durchsichtig, in der Abbildung schwarz.

Während bei der Belastung B die für den Biegebalken typischen Isochromatensysteme zur Einspannstelle hin entlang der Balkenober- und unterkante sich noch ausgebildet haben, sind diese bei der Belastung C nicht aufgetreten.

Belastung D:

Abb. 6d: Isochromaten eines einseitig aufgehängten und an vier Stellen belasteten Balkens.

Der an vier Stellen gleichmäßig belastete Balken zeigt ein Isochromatenbild, das besonders dem des am freien Ende belasteten Balkens (Belastung A) vergleichbar ist.

Durch die zusätzlichen Lasteinleitungspunkte näher zur Aufhängung hin, wird das Bild insofern verändert, als dadurch die Linienscharen der beiden typischen Biegebalkensysteme zu den Längskanten des Balkens steiler verlaufen: Die Isochromatenordnungen (an der Oberkante an der Einspannstelle  $n/7$ , an der Unterkante  $n/9$ ) reichen nicht so weit zum freien Balkenende.

Weil an diesem freien Balkenende nur ein Viertel der Gesamtlast einwirkt, erscheint das Isochromatenbild von dem bei Belastung A in diesem Bereich sehr verschieden; im Prinzip ist es jedoch diesem gleich.

Zusammenfassung.

Typisch für die Isochromatenbilder von einseitig aufgehängten Biegebalken sind die beiden Linienscharen entlang den Längskanten des Balkens.

Erfolgt die Belastung nur am freien Ende des Balkens, so verlaufen die Isochromaten randparalleler als bei einer Belastung, bei der der Balken außer am Ende an vielen anderen Stellen gleichmäßig beansprucht wird.

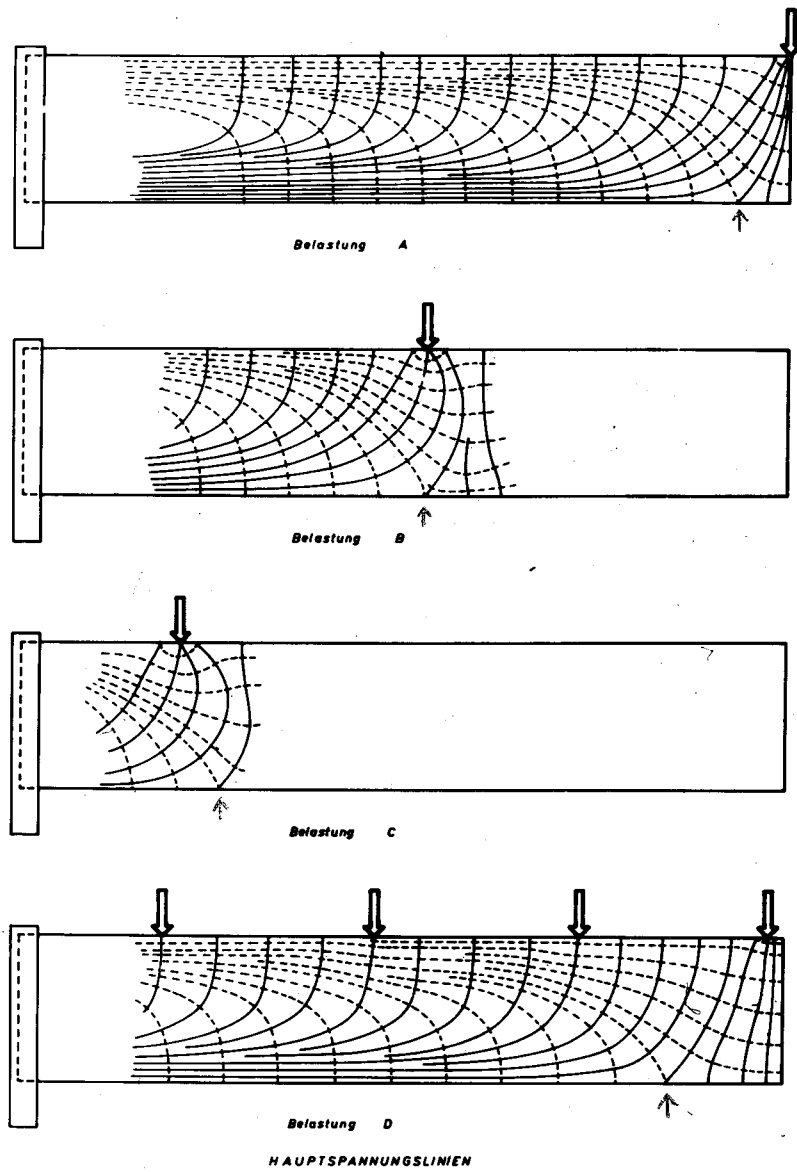


Abb. 7 : Hauptspannungslinien eines einseitig aufgehängten Balkens.

Auswertung der Hauptspannungslinienbilder des Versuches I :

Bei allen Belastungen (A, B, C und D) sind die Bilder zwischen den Stellen der Lasteinleitung und den Aufhängungen gleichartig:

Die Hauptspannungslinien laufen nahezu parallel zu den Ober- bzw. Unterkanten des Balkens; in der Gegend der Balkenmittelachse biegen sie um und treffen auf dem gegenüberliegenden Rand senkrecht auf.

Beim einseitig aufgehängten Biegebalken findet sich an der Balkenunterkante stets ein singulärer Punkt <sup>1)</sup>, an dem sich die Systeme abwechseln: Treffen bis hierher die gestrichelten Linien des einen Systems senkrecht auf den Rand auf, so tun es ab hier die durchgezogenen Linien des anderen Systems, laufen bis hierher die durchgezogenen Linien dem Rand parallel, so tun es ab hier die gestrichelten.

Ebenso gibt es an der Balkenoberkante zu beiden Seiten des Lasteinleitungspunktes je einen singulären Punkt.

Bei den Belastungen B und C war es in dem Gebiet zwischen Lasteinleitung und freiem Balkenende nicht möglich, Isoklinen zu entdecken; die Spannungen wirken sich hier nicht aus.

Besonders interessant ist das Bild bei Belastung im Vergleich zu dem der Belastung A:

Es gibt nur zwei geringe Unterschiede zwischen beiden Bildern, nämlich in der Lage des singulären Punktes, der näher zur Aufhängung gerückt ist und im Verlauf der Hauptspannungslinien entlang der oberen Balkenkante, der durch die verschiedenen Lasteinleitungspunkte geringfügig

<sup>1)</sup> In der Abb. 7 sind die singulären Punkte an der Balkenunterkante durch Pfeile (↑) gekennzeichnet.

beeinflusst wird, so daß diese Linienschar im Ganzen gesehen, mehr im Winkel zur Balkenkante verläuft. (Siehe Seite 46 ).

Zusammenfassung:

Typisch für das Hauptspannungslinienbild eines belasteten, einseitig aufgehängten Biegebalkens ist ein Linienverlauf, der ein spitzbogenähnliches Bild ergibt, wobei die beiden Schenkel der "Spitzbögen" charakteristischerweise jeweils den beiden Hauptspannungssystemen angehören.

Für den einfachen Modellkörper des Biegebalkens läßt sich eine im Modellversuch XII (Seite 118) bewiesene Aussage auch schon aus theoretischen Erwägungen machen:

Entlang der Kante des Balkens, zu der das freie Balkenende hingebogen wird, sind Druckspannungen, entlang der anderen Balkenkante sind Zugspannungen nachzuweisen. (Auf dem lastfreien Rand senkrecht auftreffende Spannungen sind wertmäßig gleich Null.)

b) Belastungen eines beidseitig aufgehängten Balkens, Versuch II.

Die im Versuch I verwendete Aralditplatte wurde an beiden Seiten aufgehängt und genau in der Mitte (Belastung A) und exzentrisch (Belastung B) durch den Druckkeil beansprucht. Für beide Belastungen wurden Isochromaten und Isoklinen bestimmt und die Hauptspannungslinien ermittelt.

Belastung A:

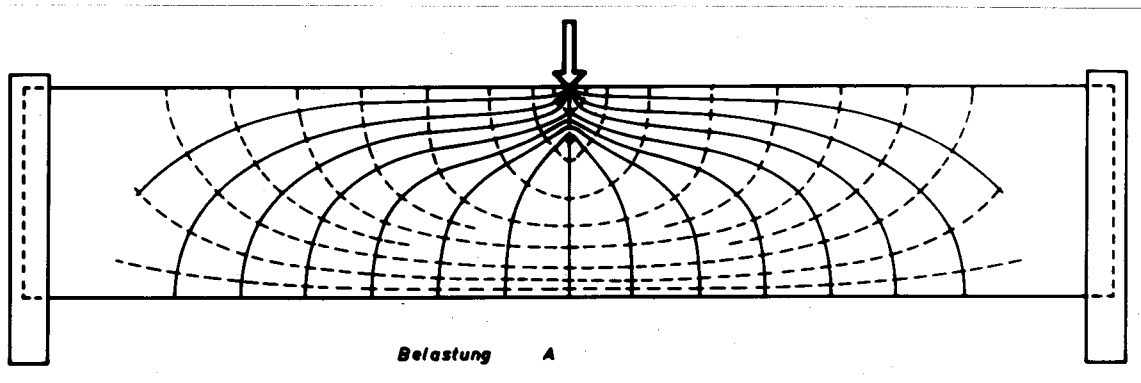
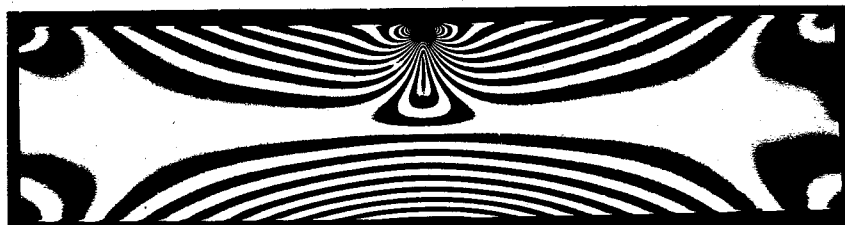


Abb. 8a und 8b

Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) eines beidseitig aufgehängten und zentrisch belasteten Balkens.

Das Isochromatenbild zeigt zwei verschiedene Linien-systeme, die bogenförmig und symmetrisch entlang der Modellober- und -unterkante verlaufen. Um alle Ecken des Modelles haben sich die Isochromaten der 2. Ordnung abgeschlossen, in den Ecken sind jeweils noch die 1. Ordnungen erkennbar.

Im Unterschied zum Versuch I sind beim beidseitig eingespannten Balken an den Einspannstellen die niedrigsten Isochromatenwerte, also auch die niedrigsten Spannungswerte den Rändern entlang. Sowohl an der Balkenober- als auch an der Balkenunterkante steigen die Werte zur Balkenmitte hin an. Die Isochromaten erreichen an der Unterkante die 10. Ordnung, an der Oberkante einen der Abbildung nicht mehr entnehmbaren hohen Wert.

Das Hauptspannungslinienbild zeigt in der senkrechten Symmetrieachse zwei isotrope Punkte übereinander im Modellinnern, an den Modellrändern aber keine singulären Punkte (vgl. Abb. 7).

Entlang der Modellunterkante verlaufen die (gestrichelt gezeichneten) Linien des einen Systems; auch hier kann für diesen einfachen Versuchskörper die Aussage gemacht werden, daß diese Linienschar dem Verlauf der Zugspannungen entspricht.

Die (durchgezogen dargestellten) Linien des anderen Spannungssystems, die den Druckspannungen entsprechen, verlaufen entsprechend parallel der Oberkante des Modells. Durch den oberen, abweisenden isotropen Punkt werden sie in zwei Gruppen unterteilt: Alle oberhalb der Grenzlinie durch diesen Punkt verlaufenden Druckspannungen treffen im Lasteinleitungspunkt zusammen, der andere Teil der Druckspannungen läuft zwischen den beiden isotropen Punkten von der einen Modellhälfte zur anderen.

In der Längssymmetrieachse biegen auch bei diesem Biegebalken die Spannungslinien aus ihrem nahezu randparallelen Verlauf um und treffen auf dem gegenüberliegenden Rand senkrecht auf.



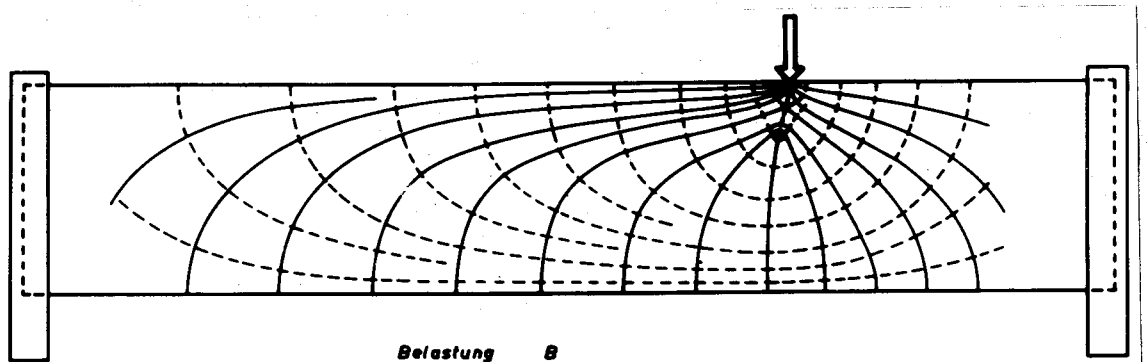
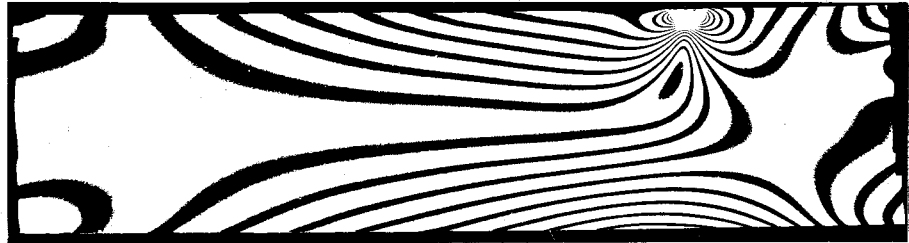
Belastung B:

Abb. 9a und 9b

Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) eines beidseitig aufgehängten und exzentrisch belasteten Balkens.

Sowohl Isochromaten- wie Hauptspannungslinienbild unterscheiden sich von denen der Belastung A nur geringfügig. Die Beschreibung und Ausdeutung der Bilder der Belastung A trifft sinngemäß bis auf die Symmetrie auch für diese beiden Abbildungen zu.

Zusammenfassung

Beim beidseitig aufgehängten und von oben belasteten Balken verlaufen im Gegensatz zum nur einseitig aufgehängten Balken entlang der Modellunterkante Zugspannungen, entlang der Modelloberkante Druckspannungen.

## 2 Die Bedeutung der Periodontalfasern für die Spannungsverteilung im Alveolarfortsatz, Versuch III

"Die Einreihung des Periodontiums in die photoelastischen Versuche hat an dem grundsätzlichen Charakter der molekularen Deformation im Alveolus nichts geändert". Im Jahre 1938 kam Zak aufgrund seiner spannungsoptischen Untersuchungen zu der Ansicht, "daß dieses in vollkommener Weise selbstverständlich unerfaßbare Organ ausgeschaltet werden kann". Zak hielt seine Versuche mit und ohne Periodontium für "absolut eindeutig, wenn sie auch nicht vollkommen gleich sind". Als einzigen Unterschied beobachtete er, daß die Versuche ohne "Periodontium" die Erscheinung (Deformation) in nur einer Alveolarwand zeigen, diejenigen mit "Periodontium" aber in beiden Alveolarwänden". Welcher Art diese Deformationen seien, meinte er, "fallweise logisch ableiten" zu müssen.

Diese Folgerungen zieht Zak aus der Feststellung, daß die Isochromatenbilder gleich seien, ob der Zahn aufgehängt ist in seiner Alveole (Versuch mit Periodontium) oder ob er in seine Alveole hineingekeilt ist. (vgl. Abb. 10 und 11). Dieser Schluß ist aber unzulässig, weil die Isochromaten als Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz über Verlauf und Vorzeichen der Spannungen nichts aussagen.

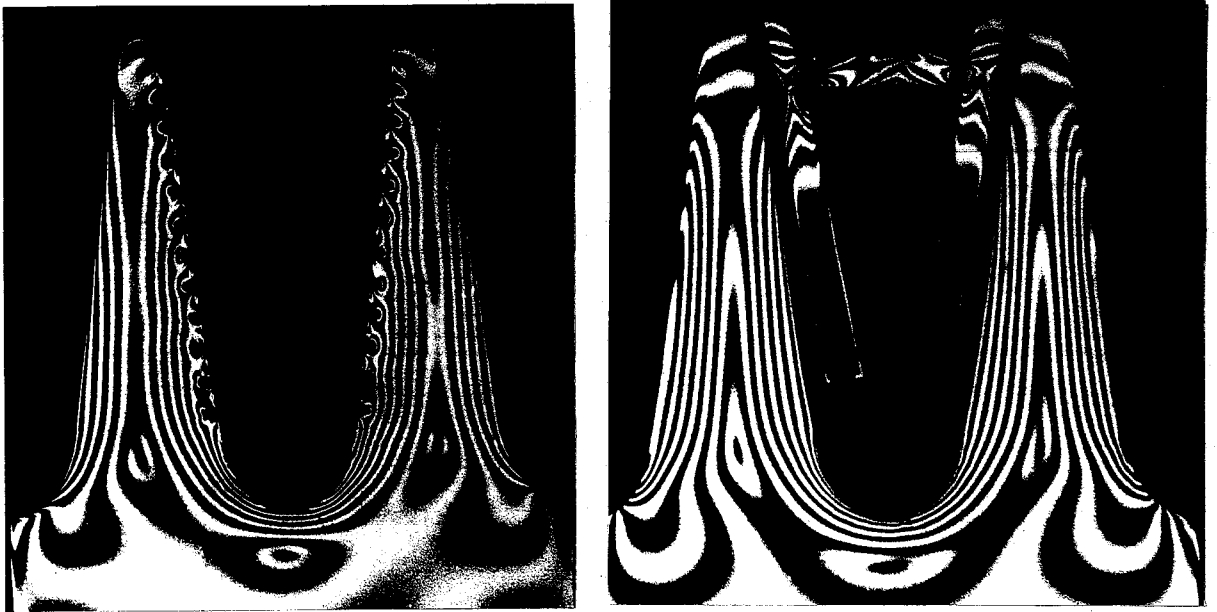


Abb. loa und lob:

Lage und Verlauf der Isochromaten beim eingehängten Zahn in seine Alveole (Periodontiumimitation) Abb. loa und bei eingekeiltem Zahn (vgl. Versuch Zaks) Abb. lob.

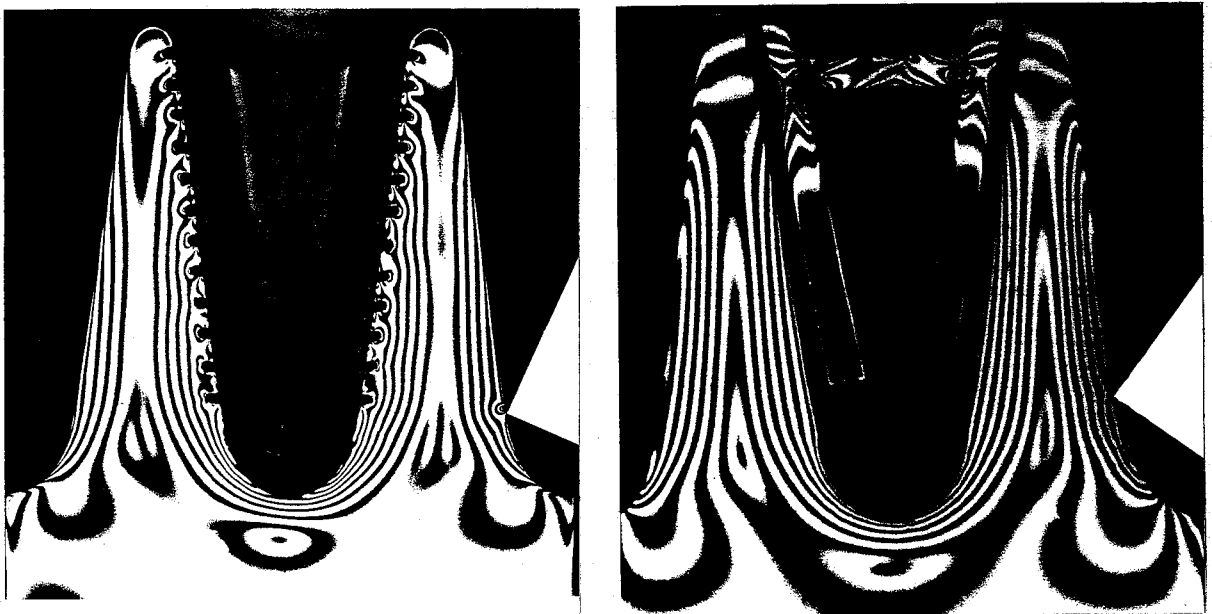


Abb. 11a und 11b:

Isochromaten derselben Versuchsanordnungen wie bei Abb. loa und lob mit der sog. "Nagelprobe" (vgl. Text); Beachte unterschiedliche Reaktionen bei Aufhängung und Einkeilung.

Die Abbildungen loa und lob zeigen, wie ähnlich die Isochromaten bei der unterschiedlichen Beanspruchung (Aufhängung und Einkeilung) sind. Den grundsätzlichen Unterschied, daß es sich nämlich qualitativ um ganz andere Spannungen handelt, vermag der folgende, einfache Versuch deutlich zu machen, den man in der Spannungsoptik als "Nagelprobe" bezeichnet:

Beansprucht man ein belastetes Modell am Rande punktförmig, dann überlagern sich das dadurch hervorgerufene lokale Spannungsfeld mit dem schon bestehenden, die Isochromatenordnung ändert sich an dieser Stelle am Rand. Die Abbildungen lla und llb zeigen diese Isochromatenänderung:

Jeweils am rechten, unteren Septumrand ist das beanspruchte Modell zusätzlich punktförmig belastet. Der Unterschied der jeweiligen Isochromatenschar wird durch die verschiedene Reaktion deutlich: bei dem Modell mit eingehängtem Zahn (Periodontiumimitation) weichen die Isochromaten in das Modellinnere, bei dem Modell mit eingekeiltem Zahn nähern sich an diesem Punkt die Isochromaten dem Modellrand. Nach einem in der Spannungsoptik in Zusammenhang mit der Nagelprobe gültigen Gesetz lassen sich die dem Rand an dieser Stelle parallel verlaufenden Spannungen qualitativ bestimmen.

Verschieben sich bei zum Rand ansteigender Ordnungszahl die Isochromaten durch eine punktförmige Belastung in das Modellinnere, dann sind die randparallelen Spannungen Zugspannungen (vgl. Abb. lla, bei Aufhängung des Zahnes); verschieben sie sich zum Rand hin, dann laufen parallel dem Rand Druckspannungen (vgl. Abb. llb, bei Einkeilung des Zahnes).

Dieser Befund und die Tatsache, daß das Septum die für einen Biegebalken typische Isochromatenordnung zeigt,

erhärtet die Feststellung, daß bei der Einhängung des Zahnes das Septum zum belasteten Zahn hingebogen wird, während der eingekeilte Zahn gerade entgegengesetzt das Septum nach außen, vom Zahn weg, biegt.

Damit ist eindeutig bewiesen, daß im Gegensatz zu der Auffassung Zaks die Einreihung des Periodontiums in die photoelastischen Versuche den Charakter der molekularen Deformationen im Alveolus grundsätzlich ändert, die Spannungsverteilung wird dadurch qualitativ verändert.

Im vorliegenden Fall muß außerdem das folgende, festigkeits-theoretische Prinzip nach De Saint Venant gelten: In genügender Entfernung vom Angriffspunkt einer Kraft ist die Wirkung, d.h. die innere Spannungsverteilung nicht mehr von der Art der Krafteinleitung abhängig. Die Hauptspannungslinienbilder müssen also für den aufgehängten wie für den eingekeilten Zahn im Modell in genügender Entfernung von der Alveole sowohl in ihrer Richtung wie in ihrer Qualität identisch sein.

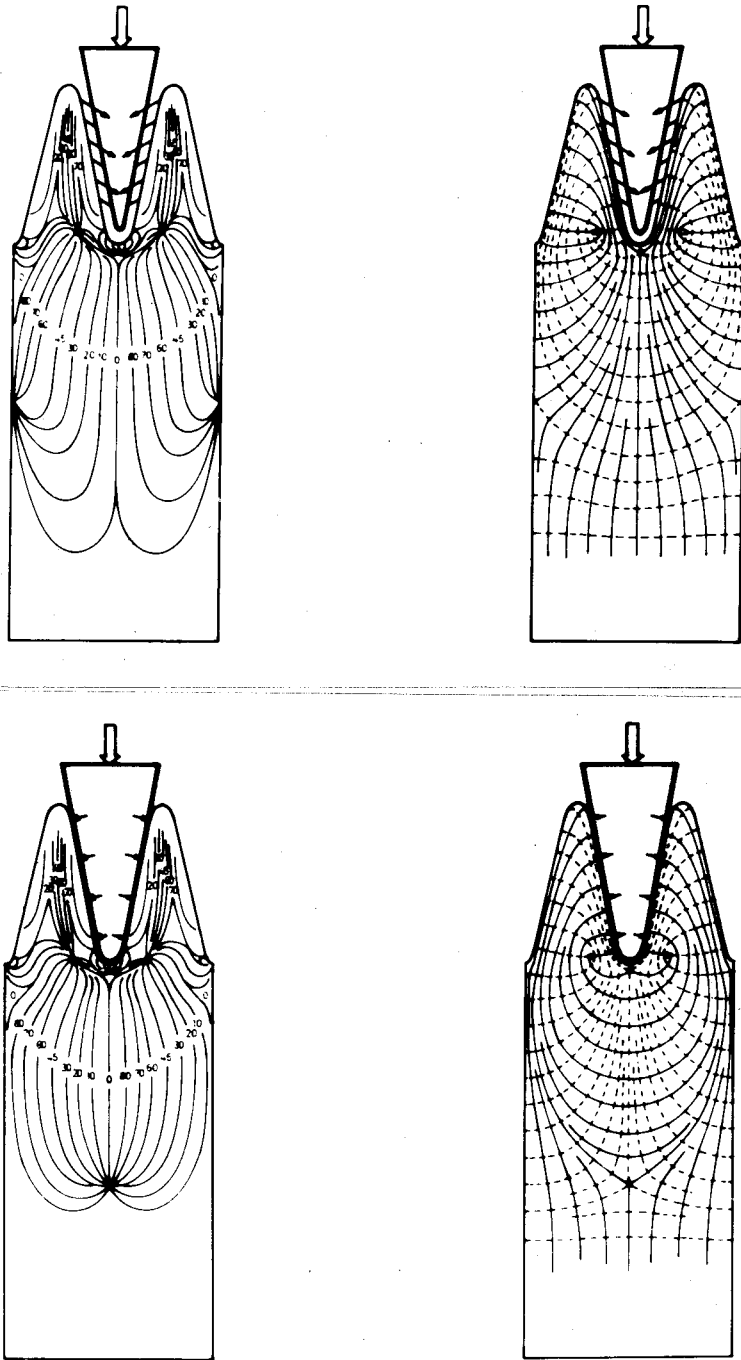


Abb. 12: Die Isoklinen- und die Hauptspannungslinienbilder für den eingehängten und den belasteten Zahn zeigen den richtungsgleichen, aber qualitativ entgegengesetzten Verlauf der Hauptspannungen in den Septen und um den Alveolenfundus, in einiger Entfernung nach Umkehrung der Systeme die Identität von Richtungen und Qualitäten der beiden Systeme (nach dem Prinzip von De Saint Venant, vgl. Text).

Im Innern der Septen und um den Alveolenfundus verlaufen die Hauptspannungen bei beiden Beanspruchungen mit gleicher Richtung, jedoch liegen die beiden Systeme genau entgegengesetzt: Wo das System der maximalen Spannungen im einen Fall verläuft, ist im andern das der minimalen und umgekehrt.

Erst in einem gewissen Abstand von der Alveole sind bei beiden Beanspruchungen die Spannungen sowohl richtungs- als auch qualitätsgleich. Dieser Versuch bestätigt das De-Saint-Venant-Prinzip: Zwischen dem oberen und dem unteren Modellabschnitt liegt ein Gebiet, in dem die Spannungssysteme wechseln.

Für die Gegebenheiten in den Kieferknochen kann man folgenden Schluß ziehen: Gleichgültig, wie die Zähne belastet werden, ob zentrisch, exzentrisch oder sogar horizontal, ob nur ein einziger, zwei oder drei gleichzeitig - in einer gewissen Entfernung von der Belastungsstelle (beispielsweise in der Unterkante der Mandibula) sind die Spannungen höchstens quantitativ verschieden, qualitativ aber immer gleich. Es kann daher in einer bestimmten Entfernung unterhalb der Zähne auch bei unterschiedlichen Belastungen während des Kauaktes zum Beispiel, nicht zu Spannungsumkehrungen kommen, es entstehen lediglich quantitative Schwankungen. Für den Aufbau und den Umbau des Knochens scheint dies entscheidend wichtig zu sein.

Von Zak (1935, 1938, 1941), Jajima (1954), Miyauchi (1959) und Imada (1959) sind mit Hilfe der Spannungsoptik eine Reihe von Untersuchungen im Kieferbereich unternommen worden, allerdings immer mit Einkeilung der Zähne; sie berufen sich auf die oben von Zak erwähnten Schlußfolgerungen, die aufgrund dieses Versuches als falsch gelten müssen.

Alle Versuche, in denen die Periodontalfasern nicht imitiert werden, können wir demnach für Aussagen, die den Alveolarfortsatz und die peripicalen Gebiete betreffen, nicht anerkennen.

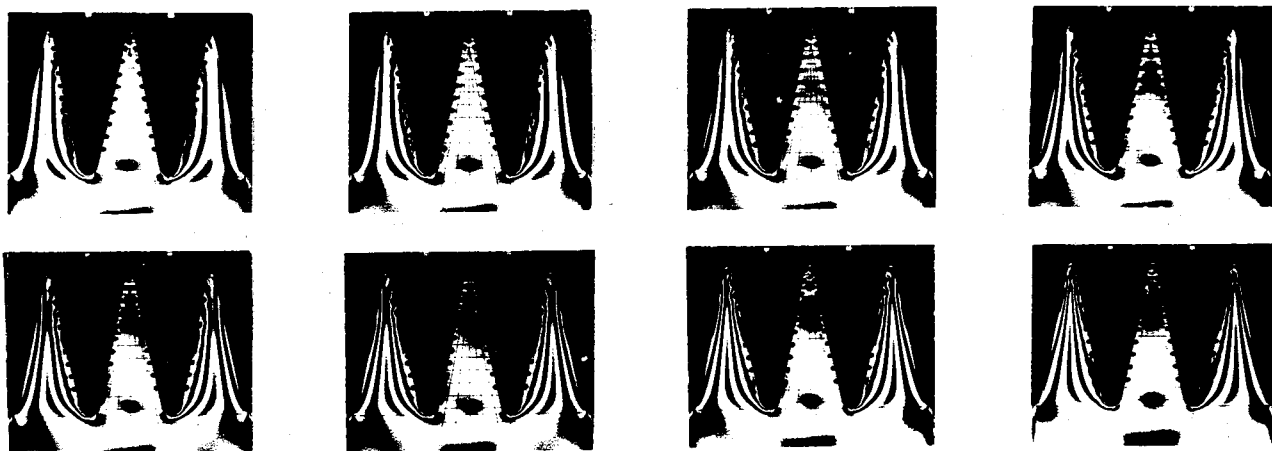
Da im zahnärztlichen Bereich im Zusammenhang mit der Replantation von Zähnen ähnliche Verhältnisse vorliegen, sei nochmals betont: Ein replantierter Zahn, der ohne Vermittlung der periodontalen Fasern wie ein Keil in der Alveole steckt, beansprucht den umgebenden Knochen qualitativ völlig anders als der normale Zahn. Dieser Umstand und diese physikalische Notwendigkeit ist unseres Wissens nach in ihrer biologischen Bedeutung noch nicht entsprechend beachtet worden.



3 Beweis der gleichmäßigen Funktion aller einzelnen Aufhängeelemente der Modelle I, II, III und IV - Versuch IV

Durch diesen Versuch soll bewiesen werden, daß sämtliche Aufhängeelemente, wie sie an den Modellen I, II, III und IV zur Befestigung der Wurzeln in den Alveolen verwendet wurden, bei axialer Belastung der Wurzel gleichmäßig stark belastet werden und dadurch mit gleicher Kraft das Modell beanspruchen.

Dazu wurden am Modell IV von apical nach cervical die jeweils untersten Aufhängeelemente an beiden Wurzeln paarweise durchtrennt; die Lasthöhe, die auf beide Wurzeln gleichmäßig axial wirkte, wurde während des ganzen Versuches nicht geändert. Die verschiedenen Spannungszustände wurden anhand der Isochromaten festgestellt.



*Bei dem ersten Bild links oben sind an beiden Wurzeln die untersten, bei den folgenden die jeweils nächst höher gelegenen Fasergruppen durchtrennt.*

Abb. 13: Beweis der gleichmäßigen Wirkung aller Aufhängeelemente der Wurzel durch kontinuierliche Isochromatenzunahme bei Reduzierung der Zahl der Aufhängeelemente von unten her.

Die Zahl der im Modell sichtbaren Isochromatenordnungen hat sich während des Versuches erhöht, und zwar an den Rändern der Seitensepten von 2 auf 3, an den Rändern des Mittelseptums von 0,5 auf 1,5.

Im Vergleich zu den Isochromatenbildern des Versuches I hat sich die Linienverteilung und damit die Spannungsverteilung in den gebogenen Außensepten von dem Bild der Belastung D zu dem der Belastung A entwickelt.

Die Lage des Maximums der Randisochromatenordnungszahl, die größte Beanspruchung am Rand, hat sich während des Versuches vom unteren Alveolendrittel nach oben hin verschoben.

Die Erhöhung der Isochromatenordnungszahlen ist Ausdruck einer erhöhten Beanspruchung: Die Seitensepten werden stärker gebogen, weil dieselbe Last an der Spitze der Septen aufgrund des längeren Hebelarmes wirkungsvoller angreift als bei flächiger Beanspruchung.

Die wichtigste, der Bildserie zu entnehmende, Tatsache ist, daß die Zunahme der Isochromatenordnungszahl von Abbildung zu Abbildung, d.h. mit jeder Durchtrennung eines Aufhängeelementes kontinuierlich erfolgt.

|| Daraus folgt eindeutig, daß jedes Aufhängeelement in  
|| gleichem Maße das Modell beansprucht.

#### 4 Belastung eines dreidimensionalen Modelles des Alveolarfortsatzes, Versuch V

##### a) Allgemeines

Einen richtigen Eindruck von den Spannungszuständen im Gewebe um den belasteten Zahn kann eigentlich nur der dreidimensionale Modellversuch vermitteln.

Für Modellexperimente ist es erforderlich, die natürlichen, komplizierten Verhältnisse auf grundsätzliche Konstruktionen zu reduzieren; gewahrt bleiben muß das funktionelle Prinzip, damit wesentliche Schlußfolgerungen für die natürlichen Verhältnisse zulässig sind.

Das Experiment an einem dreidimensionalen Modell soll in Verbindung mit einigen schon beschriebenen zweidimensionalen Versuchen die Berechtigung dieser Untersuchungen an Scheibenmodellen beweisen.

Insbesondere soll in diesem Versuch die Frage beantwortet werden, ob durch die dritte Dimension im Modell die Spannungen wesentlich beeinflußt werden, ob sie sich qualitativ ändern.

Als Einwände gegen alle zweidimensionalen Versuche wären die Erwägungen möglich, die "corticalen" Seitenplatten des Alveolarfortsatzes lingual bzw. palatinal und buccal könnten als Verstärkungslamellen grundsätzlich andere Spannungsverhältnisse schaffen oder die runde Alveolenkompakta wäre in sich so gestützt, daß die statischen Zustände durch zentrale Längsschnitte nicht zu ermitteln sind.

Betrachtet man den Alveolarfortsatz vereinfacht als einen in seiner Längsachse symmetrischen Körper, bei dem die Symmetrieebene durch die Wurzelmitte läuft, dann kann man bei zentrischer Beanspruchung, d.h. Belastung der Wurzeln in dieser Ebene, annehmen, daß

das Material in dieser Fläche nur durch solche Kräfte beansprucht wird, die ebenfalls in dieser Ebene wirken; in senkrechter Richtung wird diese Fläche nicht beansprucht, sie wird nicht durchgebogen oder tordiert. Die gefundenen Isoklinen in dieser Symmetrieebene zeigen also Hauptnormalspannungen an.

#### b) Modellherstellung

Aus einem Gipsblock, in den eine Eisenstange als (spätere) Achse eingegoßen war, wurde an der Drehbank die Form der Zahnwurzel gedreht. (Länge ca 11 cm, oberer Durchmesser ca 6 cm). Um diese Wurzelform herum wurde ein dicker Wachsmantel gegossen, aus dem, ebenfalls an der Drehbank, die Alveolenform gedreht wurde. (Länge = Tiefe der Alveole : 13 cm, oberer Durchmesser 8,2 cm). Die verbleibende Wachsschicht von 1,1 cm Dicke um die Wurzel war als Periodontalspalt gedacht. Für die Alveole selbst wurde eine auseinandernehmbare Gipsform hergestellt.

Die Wurzelform wurde mit der äußeren Form so verbunden, daß nach Entfernen der Wachsschicht ein freier Spalt blieb, der mit Silicone vollgegoßen wurde. Die so gewonnene Siliconeform soll dem Periodontalraum des Alveolarmodelles entsprechen; sie hat zunächst im Verlauf der Modellherstellung die Funktion eines Platzhalters für den Periodontalraum.

Auf den Platzhalter wurde von außen ein orthogonales Liniennetz aufgezeichnet: Im Abstand von je 2 cm von der Oberkante ab verlaufen fünf Kreise in Ebenen senkrecht zur Wurzelachse auf der Siliconeform. Die Peripherie jedes Kreises wurde in acht gleiche Teile geteilt und in den Teilpunkten (auf der Siliconeoberfläche) die Senkrechten errichtet. Diese Punkte auf den Kreislinien

markieren die Stellen, an denen die Halteelemente der Wurzel (Drähte) den später freien Periodontalspalt passieren sollen; sie sind senkrecht untereinander angeordnet.

Die Halteelemente für die Wurzel ("Periodontalfasern") wurden aus federhartem Draht von 0,6 mm  $\emptyset$  hergestellt: Drahtstücke von ca 3 cm Länge wurden mit einer Retention versehen und von außen mit dem geraden Ende voraus durch die Siliconeschicht in den Kreuzungspunkten des aufgezzeichneten Liniennetzes gesteckt. An den oberen vier Kreisen wurden je acht Drahtstücke im Winkel von  $30^{\circ}$  zur Grundebene mit Hilfe einer Schablone durchgesteckt, somit also 32 schräg angeordnete Halteelemente geschaffen.

Am apicalen Ring wurden die acht Drahtstücke in horizontaler Richtung, am cervicalen Ring ebenfalls noch nicht horizontale Drähte zwischen je zwei angestellten durchgesteckt. Die Zahl der horizontalen Halteelemente betrug somit 16.

Die in den Innenraum des Siliconemantels ragenden Drahtenden wurden zu Retentionen umgebogen. Am zweiten und dritten oberen Ring wurden außerdem noch je vier Drähte so durchgesteckt, daß sie im Innenraum zwischen den inneren Austrittsstellen zweier benachbarter schräg verlaufender Drähte ein flaches Segment bildeten, dann in geradem Verlauf wieder durch die Siliconeschicht die äußere Oberfläche durchstießen. Beide Enden dieser tangential verlaufenden Drähte wurden mit Retentionen versehen. Damit waren insgesamt 16 tangentielle Halteelemente hergestellt.

Nach diesem Verfahren wurden die völlig gleichartigen Wurzeln hergestellt, und jede Wurzel war auf diese Weise durch insgesamt 64 Halteelemente befestigt (vgl. Abb. 4b).

Die Form des Modells V (vgl. Abb. 4a) mit den Abmessungen: Länge 31 cm, Breite 15 cm, Höhe 18 cm, wurde aus Wachs gefertigt und davon eine durch ein Stahlgerüst armierte Negativform hergestellt.

Die mit den Drähten in der oben angegebenen Weise bewehrten Silicone-Platzhalter für die Periodontalräume wurden in der Negativform des ganzen Modells an den für die Alveolen vorgesehenen Plätzen eingeleimt.

Die vorgewärmte Form wurde bei  $150^{\circ}\text{C}$  mit Araldit gefüllt, der Guß anschließend bei  $100^{\circ}\text{C}$  20 Stunden lang ausgehärtet und dann mit  $3^{\circ}\text{C}$  pro Stunde programmiert abgekühlt.

Die Siliconeform wurde entfernt, auch in den Alveolen. An die Stelle der späteren Periodontalspalten wurde jetzt ein dünnflüssiger Gips-Bimsstein-Brei gebracht und erhärten lassen. In die so erhaltene Wurzel-Negativform, in die die Drahtretentionen hineinragten, wurde Zinn gegossen und die Gips-Bimssteinschicht wieder entfernt.

Das auf diese Weise gefertigte Modell (Abb. 4a) konnte im Versuch X belastet werden.

Das fertige, dreidimensionale Modell (V) stellte einen Teil eines vereinfachten Alveolarfortsatzes dar mit drei genormten Alveolen, in die an federharten Stahlfäden wurzelförmige Zinnkegel eingehängt waren.

### c) Versuchsdurchführung

Entsprechend dem in der experimentellen Spannungsoptik angegebenen sog. 'Einfrierverfahren' wurde dieses Modell an den Enden der Basis unterstützt und bei  $150^{\circ}\text{C}$  12 Stunden lang in einem Heizschrank durch eine achsiale Belastung des mittleren Zahnes mit 30 kp beansprucht. Nach langsamem und gleichmäßigem Abkühlen (mit  $2^{\circ}\text{C}$  pro

Stunde, 60 Stunden lang) wurden die Zinnzähne mit ihren Zugfäden wieder entfernt und aus der Längsachse des Modells der Symmetrieschnitt herausgesägt; dieser Schnitt wurde poliert und an ihm Isochromaten und Isoklinen bestimmt.

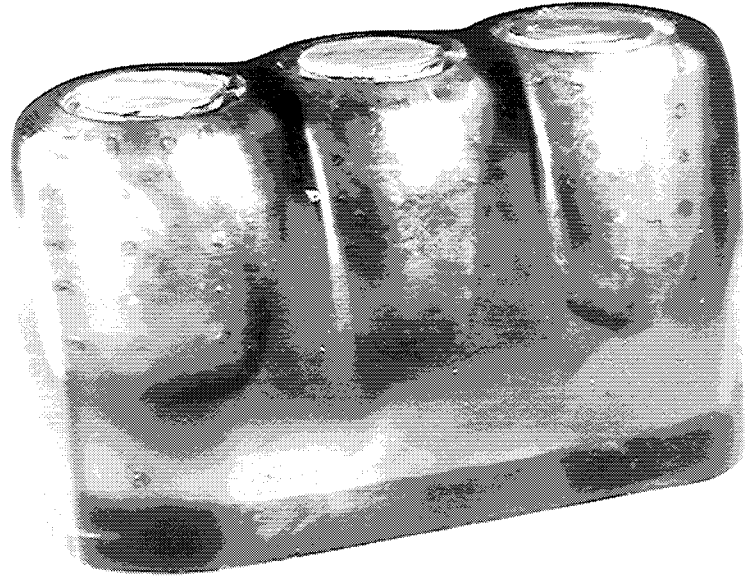


Abb. 14a Modell V, Gesamtansicht

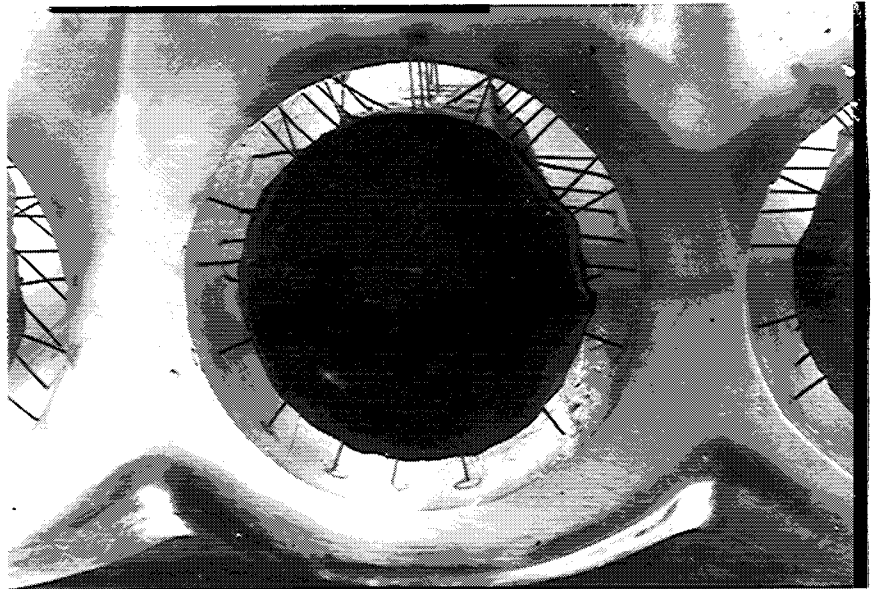
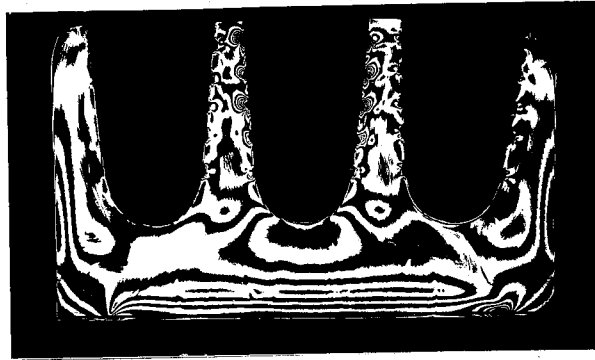
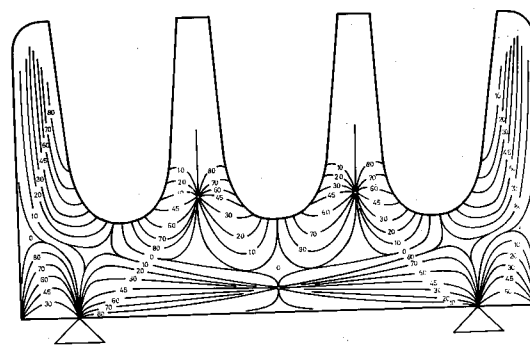


Abb. 14b Modell V, Ausschnitt, der den Periodontalspalt des mittleren Zahnes zeigt, durch den 64 Halteelemente vom "Knochen" zur "Wurzel" frei hindurchlaufen.

c)

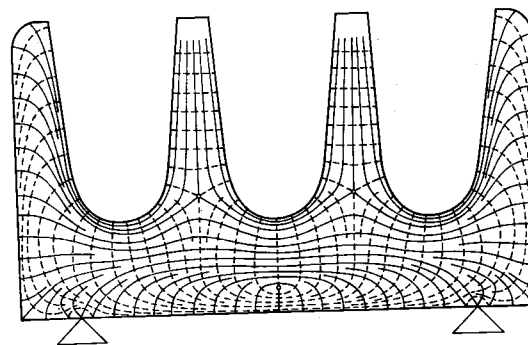


d)



Schar der Isoklinen

e)



Schar der Hauptspannungslinien

Abb. 14 c-e: Isochromaten (c), Isoklinen (d) und Hauptspannungslinien (e) im mittleren Längsschnitt des dreidimensionalen Modelles V.

Beachte: Die Hauptspannungslinien in Abb. 14 e sind im basalen Teil sinnentsprechend ergänzt, sie stimmen nicht mit dem aus den Isoklinen (Abb. 14 d) zu ermittelnden Bild überein!



#### d) Versuchsauswertung

Im alleruntersten Abschnitt des Symmetrieschnittes, unterhalb des isotropen Punktes, bis zur Modellunterkante, war die Lage der Isoklinen nicht deutlich, denn gerade in diesem Gebiet verlaufen die Isochromaten sehr dicht und zu den Isoklinen nahezu in gleicher Richtung. Bei der Konstruktion des Hauptspannungslinienbildes aus den angenommenen Isoklinen in diesem Bereich (im Isoklinenbild dargestellt) ergab sich ein widersinniger Verlauf. Weil dieser Abschnitt im Zusammenhang des in dieser Arbeit behandelten Problems ohnehin nicht interessierte, wurde die Verfolgung dieses experimentellen Befundes späteren Untersuchungen vorbehalten. Den Kenntnissen und Gesetzmäßigkeiten der Spannungsoptik und der Mechanik entsprechend, sind diese Stellen ergänzt worden.

Unterhalb der Alveolen und in den Septen sind die Isoklinen eindeutig zu beobachten. In diesen Gebieten entsprechen die aus ihnen konstruierten Hauptspannungslinien in ihrem Verlauf und in der Lage der isotropen Punkte den Bildern, wie wir sie anhand der zweidimensionalen Scheibenmodelle ermittelten.

Aus der Tatsache, daß die Septen zwischen den Wurzeln nicht gebogen wurden, sondern das Hauptspannungslinienbild des gestauchten Septums ergeben, schließen wir für diesen Fall rückwärts zweierlei: Einmal, daß das Eigengewicht der benachbarten Zinnwurzeln mit je 1,4 kg offensichtlich für das Modell bei 150°C eine starke Beanspruchung war, so daß die Mehrbelastung von 30 kg auf die mittlere Wurzel nicht die Nachbarsepten zu biegen vermochte; zum anderen behindert die räumlich-zirkuläre Druckspannung sowie die Zuggurtung über die beiden Nachbarzähne eine Biegung der Zwischensepten zusätzlich.

Die Außensepten sind zur Zahnmitte hin gebogen. Damit

ist erwiesen, daß die räumliche, zylindrische Form die Biegung grundsätzlich nicht verhindert. Ebenfalls beeinflussen die Seitenplatten des Alveolarfortsatzes den Spannungslinienverlauf nicht.

Das Ergebnis dieses Versuches ist:

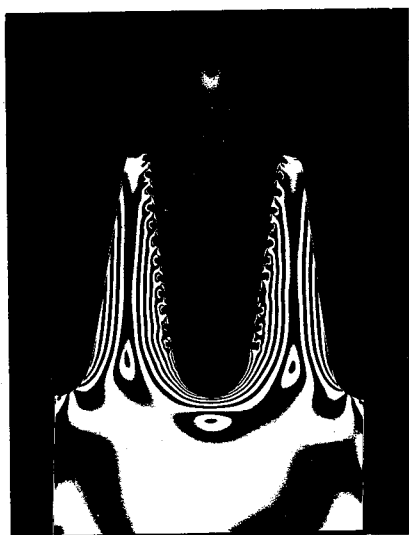
Im Verlauf der Hauptspannungslinien läßt sich kein wesentlicher Unterschied zwischen den zweidimensionalen und den dreidimensionalen Untersuchungen feststellen.

Aus dieser Feststellung leiten wir die Berechtigung ab, die zweidimensionalen Versuche für statische Zustände im dreidimensionalen Alveolarfortsatz zu interpretieren.

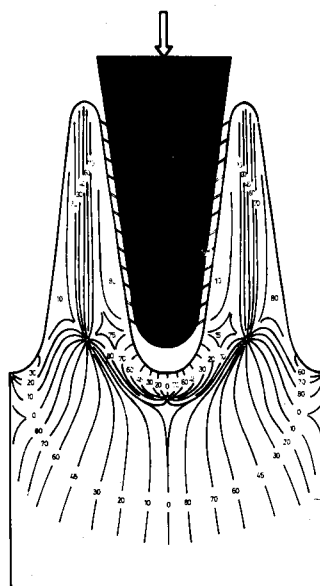
5 Untersuchungen an zweidimensionalen Modellen  
achsialer Alveolenschnitte ein- und zweiwurze-  
liger Zähne

a) Belastungen eines einwurzeligen Zahnes, Versuch VI  
zentrische Belastung.

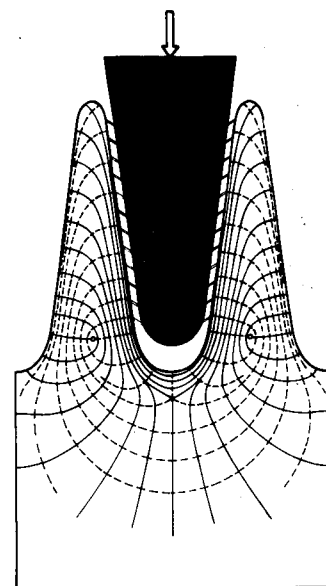
Das Modell I wurde in den Belastungsrahmen gestellt und so belastet, daß der Belastungskeil die Wurzel in der Symmetrieachse traf. Es wurden Isochromaten und Isoklinen bestimmt und durch Konstruktion die Hauptspannungslinien ermittelt.



(a)



(b)



(c)

Abb. 15 a - c : Isochromaten (a), Isoklinen (b) und Hauptspannungslinien (c) im Modell I bei zentrischer Belastung der Wurzel.

Im Innern der Septen zeigen die Isochromaten wie auch die Hauptspannungen ein Linienbild, wie wir es am einseitigen Biegebalken dargestellt haben: Durch die zentrische Belastung der Wurzel werden die Septen über die Aufhängelemente zum Zahn hingebogen. Dementsprechend sind auch die Spannungssysteme gekennzeichnet: Entlang der Alveoleninnenwand verlaufen die minimalen Spannungen (nicht unterbrochene Linien), von denen wir im Vergleich zum einfachen Biegebalken sagen können, daß es sich um Druckspannungen handeln muß. Entlang der Septenaußenkante verlaufen die Spannungen des maximalen Systems, es sind Zugspannungen.

Der singuläre Punkt, der für einseitig eingespannte Biegebalken als Typisch bezeichnet wurde, liegt, durch die Form der Septen bedingt, ganz an der Septenspitze. Nach unten, zur "Einspannstelle" hin breiter werdend, steigen die Isochromatenordnungszahlen von der Spitze der Septen ( $n : 0$ ) zur Basis am Septenrand kontinuierlich an, sowohl an der Alveolen- wie an der Außenseite; sie erreichen im unteren Drittel ein Maximum ( $n : ca 7$ ) und fallen zum Scheitel des Alveolenfundus wieder etwas ab ( $n : ca 4,5$ ).

Im unteren Drittel der Septenoberflächen bestehen also Bereiche mit relativ hohen Druckspannungen an der Alveolenseite und entsprechend großen Zugspannungen an der Außenseite.

Drei isotrope Punkte weist das Modell bei dieser Beanspruchung auf: Im Isochromatenbild als von der 1. Ordnung eingeschlossene Punkte 0. Ordnung; im Isoklinenbild als Punkte unbestimmter Hauptspannungsrichtung ausgewiesen, weil alle Isoklinen durch sie hindurchlaufen; im Hauptspannungslinienbild als zwei eingeschlossene Punkte im Bereich der Septenbasen und als abweisenden Punkt genau unterhalb des Alveolenfundus.

Dadurch wird ein Linienfeld durchgezogener Druckspannungslinien durchgehend um den Apex von solchen getrennt, die in radiärer Richtung sich unterhalb des Apex verteilen.

exzentrische Belastung.

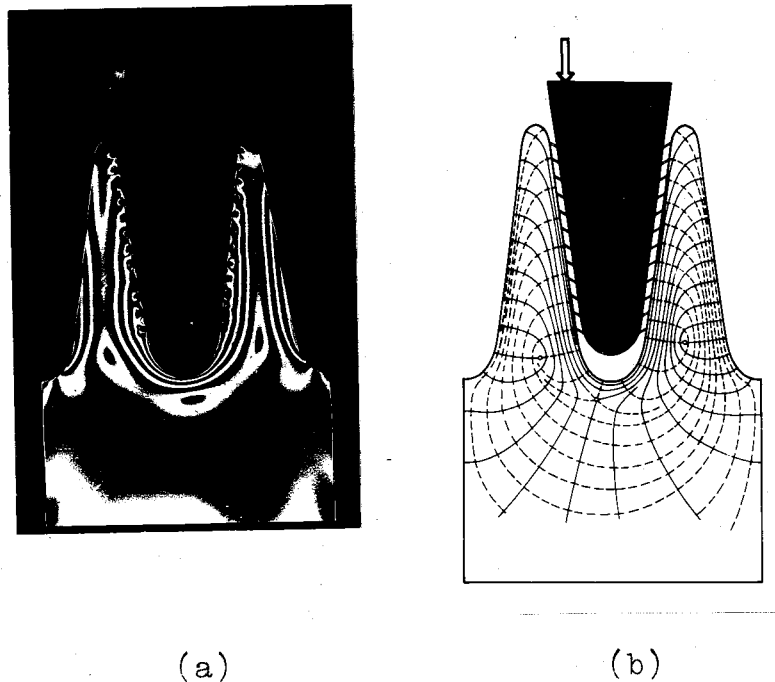


Abb. 16 a und 16 b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell I bei exzentrischer Belastung der Wurzel.

Grundsätzlich hat sich im Vergleich zu Abb. 15 a - c der zentrischen Belastung nichts geändert: Beide Septen werden zu der belasteten Wurzel hingebogen. Unterhalb des durchziehenden, ununterbrochenen Druckliniensystems um den Apex, gibt es wieder das Bild eines Druckkegels im Hauptspannungslinienbild, der jedoch auf die Seite der Druckeinleitung verschoben ist.

Die Zone des verstärkten Zuges auf der Seite der Last-  
einleitung liegt, durch Drehung um eine Achse unterhalb  
der Wurzelmitte bedingt, nahe der Septumbasis und kann  
daher nicht wirkungsvoll das ganze System biegen.

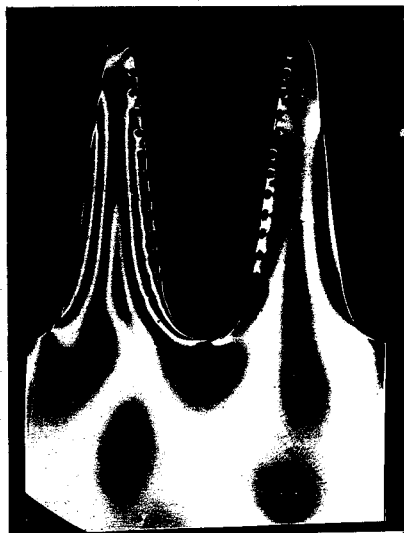
Dies erklärt die unterschiedlichen, im Prinzip jedoch  
gleichen Isochromatenerscheinungen in den beiden Septen.  
Durch die exzentrische Belastung wird die Wurzel gekippt.  
Über die periodontalen Aufhängefasern wird dadurch das  
gegenüberliegende Septum relativ stärker zum Zahn hin-  
gebogen, als das auf der Seite der Lasteinwirkung, bei  
dem die Kraft eher als Stauchung des Septums wirkt.

#### Zusammenfassung:

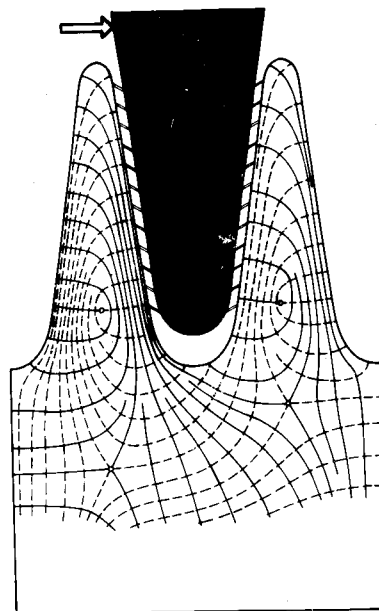
Bei zentrischer und exzentrischer Belastung eines  
einwurzeligen Zahnes werden die Nachbarsepten dieses  
Zahnes zu ihm hingebogen. Es verlaufen der Alveolenwand  
parallel Druckspannungen, die ununterbrochen um den  
Apex herumziehen und sich unterhalb des Apex in Form  
eines Druckkegels aufteilen. Entlang der Alveolenober-  
fläche wächst die Druckspannung bis zu einem Maximum  
im unteren Alveolendrittel.

Die höhere Isochromatenordnungszahl und damit die  
größere Beanspruchung finden wir am unteren Drittel  
der Alveolenwand des stärker gebogenen Septums, an  
einer Stelle also, an der die Periodontalfasern nur  
wenig beansprucht sind und die Wurzel nur der Alveolen-  
wand näher kommt, ohne sie zu berühren.

horizontale Belastung



(a)



(b)

Abb. 17 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell I bei horizontaler Belastung der Wurzel. Belastung des Modells wie Versuch VII/c, Abb. 20

Das Septum auf der Seite der Lasteinleitung ist noch stärker gebogen als es bei der exzentrischen Belastung der Fall war, obwohl die Last nur ein Viertel der Gesamtlast war. Das der Lasteinleitung gegenüberliegende Septum wurde im Versuch leicht zur Gegenseite der Belastungsrichtung weggebogen.

Dadurch erhielten wir im Versuch eine Beanspruchungsweise für das Knochenmodell, wie sie Picton (1962) für den Alveolarfortsatz beschrieben hat. Im Versuch erklären wir uns diesen Effekt folgendermaßen: Die Daml-

fäden an der entlasteten Seite werden nicht spannungslos wie in der Natur die Periodontalfasern in diesem Gebiet, sie werden vielmehr etwas gestaucht zwischen dem Septum (der Gegenseite der Lasteinleitung) und der durch die horizontale Belastung herabbewegten Wurzel. Wegen der Drucksteifigkeit der Darnylfäden wird auf dieses Septum dann ein Druck ausgeübt. Für die Natur erklärt Picton das Zustandekommen dieses Effektes durch die Festigkeit der knöchernen räumlichen Alveolenmanschette, wodurch der gesamte Alveolarfortsatz bei horizontaler Belastung im Gebiet der Lasteinleitung in Richtung der Belastung gebogen wird. Es entspricht also in diesem Fall die Spannungsverteilung im Modell den Gegebenheiten im Alveolarfortsatz!

Im Hauptspannungslinienbild zeigen beide Septen wieder die typische Spannung des Biegebalkens. Ohne daß der Zahn cervical oder apical anstieß, sind die höchsten Werte der Isochromatenordnungen wieder unterhalb der Alveolenmitte am mehrgebogenen Septum zu beobachten. Weil dieses Septum zum Zahn hingebogen wird, treten ebenfalls entlang der Alveolenoberfläche Druckspannungen auf.

Am Apex liegt an der Stelle, an der Zug- und Druckspannungen entlang der Alveolenoberfläche wechseln, ein singulärer Punkt. Einen Druckkegel unterhalb des Apex gibt es nicht; im Versuch wäre das gesamte Modell aufgrund der besonderen Einspannung im Prinzip wiederum ein Biegebalken, dessen belastetes Ende hier dargestellt ist.



b) Belastung eines zweiwurzeligen Zahnes,  
Versuch VIII

zentrische Belastung

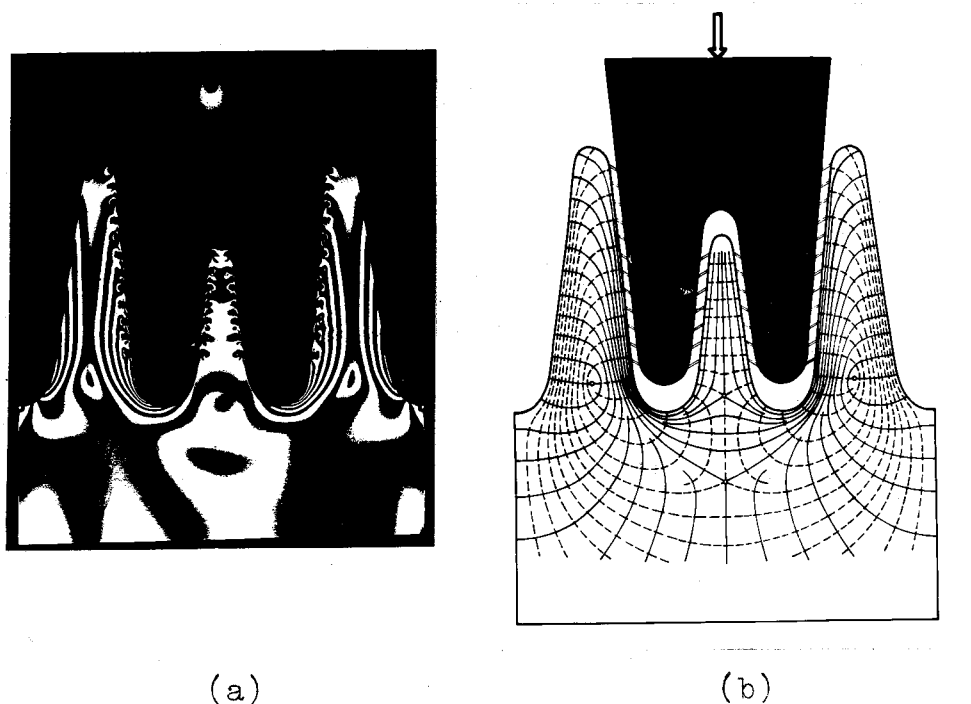


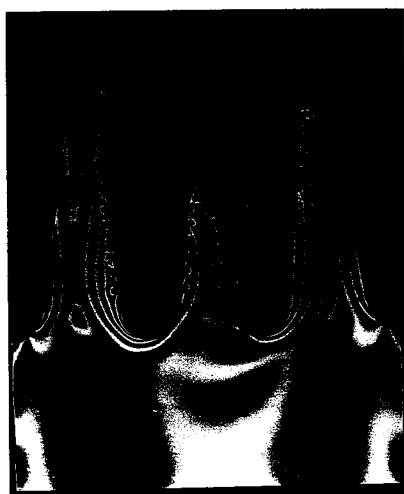
Abb. 18 a und 18 b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell II bei zentrischer Belastung.

Sowohl die Isochromatenverteilung wie auch die Darstellung der Hauptspannungslinien zeigt in den beiden äußeren Septen im Prinzip das gleiche Bild, wie wir es vom einwurzeligen Zahn her kennen. Die Druckspannungslinien der beiden äußeren gebogenen Septen teilen sich hier aber in drei Scharen durch die beiden in der Symmetrieachse übereinander liegenden abweisenden isotropen Punkte:

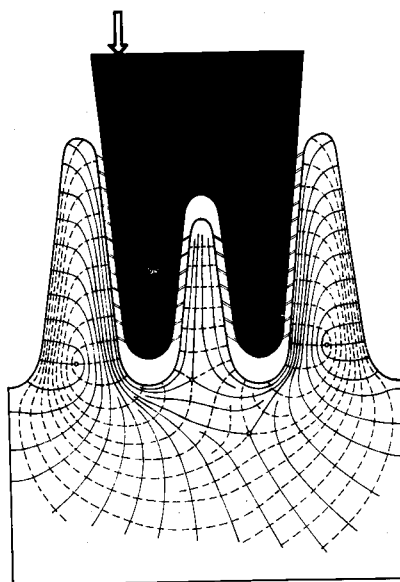
In gewissem Abstand unterhalb des Zahnes bilden die Linien einen Druckkegel; zwischen beiden isotropen Punkten verlaufen Drucklinien ununterbrochen von einem

Außenseptum zum anderen, während oberhalb beider Punkte um die Apices herum von beiden Außensepten Drucklinien sich zu einem System im Interradikularseptum vereinigen. Dieses Septum wird nicht auf Biegung beansprucht, sondern nur vertical gestaucht. Dies kommt auch im Isochromatenbild zum Ausdruck. Die Beanspruchung über die Zugelemente ist auf beiden Seiten gleich symmetrisch stark.

### Exzentrische Belastung



(a)



(b)

Abb. 19 a und 19 b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell II bei exzentrischer Belastung der Wurzel.

Das Prinzip der Spannungsverteilung hat sich durch diese Belastung nicht verändert. Obwohl die isotropen Punkte verschoben sind, ist das Mittelseptum nicht gebogen, sondern immer noch gestaucht. Die Seitensepten

sind unterschiedlich gebogen: Auch in diesem Falle wird das Septum auf der Seite der Lasteinleitung stärker gestaucht als das der Gegenseite, das stärker zum Zahn hingebogen wird. In diesem Versuch ist die Beanspruchung im apicalen Bereich der Alveole auf der Lasteinleitung größer; im Versuch VI, Belastung B war dies nicht der Fall.

Die stärkere Stauchung dieses Septums und die zusätzliche Zugwirkung wirken sich also insgesamt noch stärker aus als die relativ stärkere Biegung des gegenüberliegenden Septums.

An dieser Stelle soll bereits auf das hingewiesen werden, was den Isochromaten- und Isoklinenbildern für die Spannungsverteilung im gestauchten Septum zu entnehmen ist.

Der Spannungsverlauf im gestauchten Septum ist charakteristisch auch im Vergleich zum gebogenen Septum, anders: Zwischen den Septumwänden spannen sich die (gestrichelten) Linien des einen Systems der Hauptspannungen, während die (durchgezogenen) des anderen Systems in der Längsachse des Septums verlaufen.

Erinnert sei hier an die Spongiosafäden, die zwischen den Alveolen innerhalb der Septen, horizontal verlaufend, in Röntgenbildauswertungen und Knochenschnitten beschrieben wurden.

Die Spannungsverhältnisse sind im Versuch XI genau ermittelt und dargestellt.

Horizontale Belastung

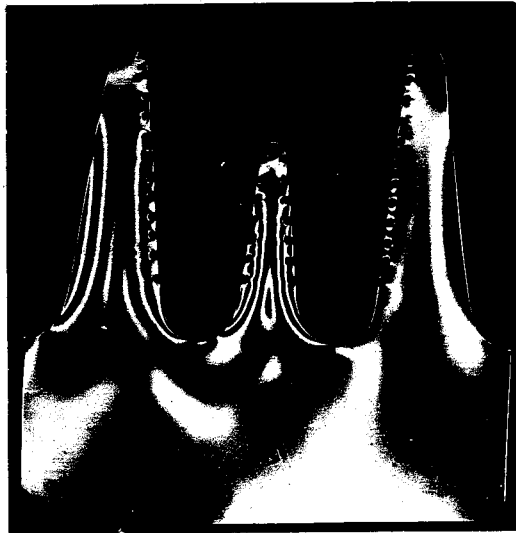
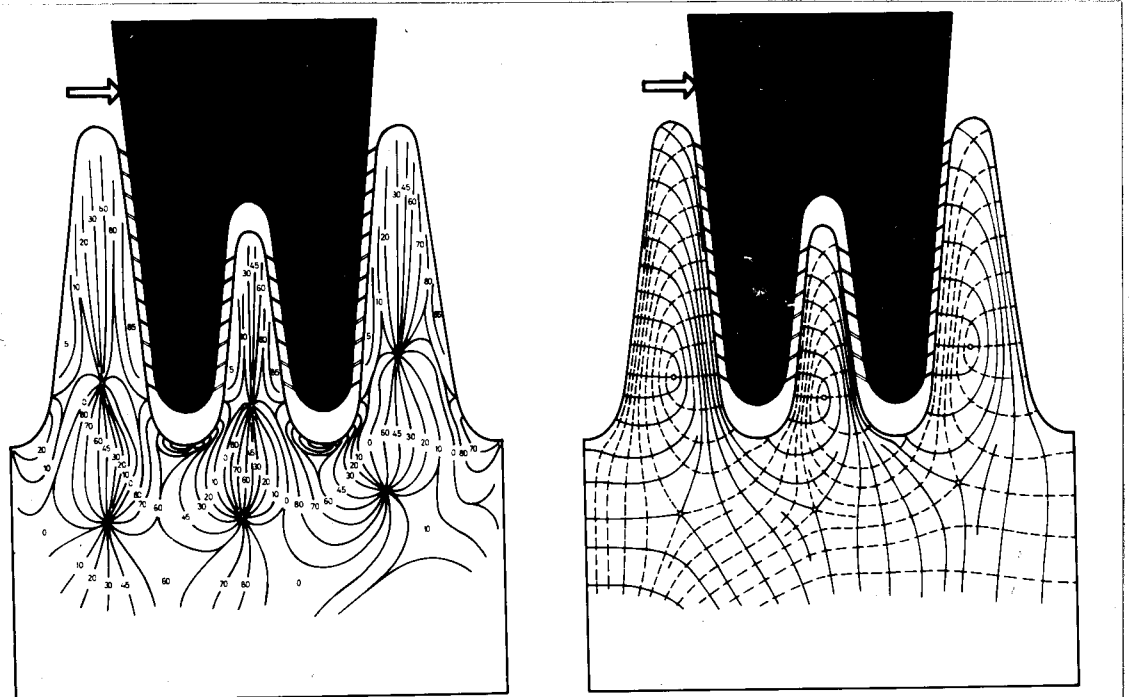


Abb. 20 a : Isochromaten im Modell II bei horizontaler Belastung der Wurzel.



(b)

(c)

Abb. 20 b und c : Isoklinen (b) und Hauptspannungslinien (c) im Modell II bei horizontaler Belastung der Wurzel.

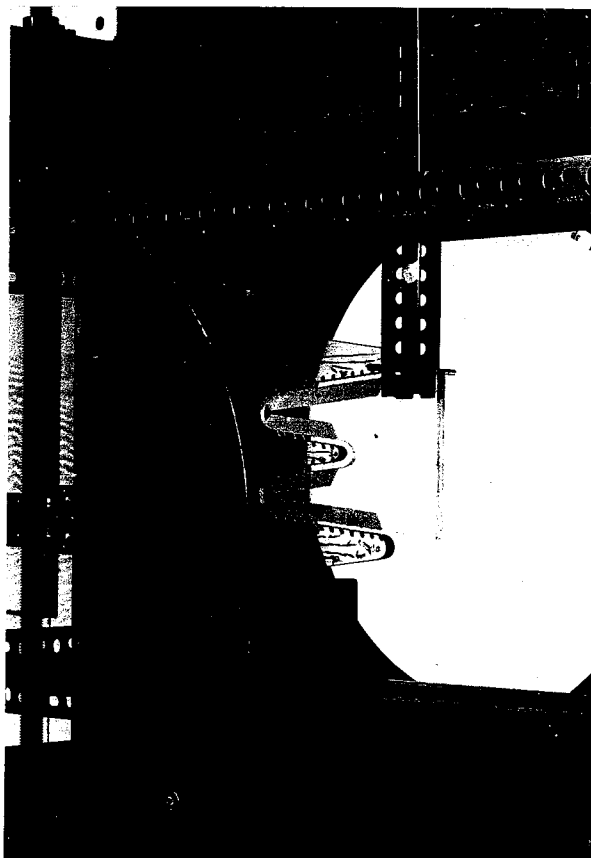


Abb. 21 : Belastungsvorrichtung mit Einspannung des Modells II für den Versuch VII, Belastung C

Alle drei Septen werden in dieselbe Richtung gebogen. Dies geht aus den Isochromaten- und Hauptspannungslinien im Vergleich zu denen bei der horizontalen Belastung am einwurzeligen Zahn (Modell I) hervor. Durch den starken Zug der Periodontalfasern am Septum auf der Seite der Lasteinleitung und am Mittelseptum sind diese beiden Septen besonders stark gebogen, während das Septum gegenüber der Seite der Lasteinleitung durch eine gewisse Drucksteifigkeit der Danylfäden vom Zahn weggebogen worden ist (vgl. Seite 73, Picton-Effekt).

Dieser Versuch beweist, daß die Beanspruchung der Septen bei allen möglichen Zahnbelastungen grundsätzlich Biegung oder Stauchung ist.

6 Untersuchungen am zweidimensionalen Modell eines Längsschnittes durch eine Zahnreihe im Seitenzahnbereich, Versuche VIII, IX, X.

Durch verschiedenartige Einspannung dieses Modells, ein- oder beidseitige Aufhängung oder Unterstüzung können die für den Unterkiefer diskutierten Hebelverhältnisse (Motsch 1965) imitiert werden.

Die drei Möglichkeiten der Hebelverhältnisse am Unterkiefer sind folgende:

- a) Der Unterkiefer wirkt wie ein einarmiger Hebel: Dies entspricht der einseitigen Modellaufhängung.
- b) Der Unterkiefer ist ein zweiarmiger Hebel, durch Muskelschlingen, oder durch Kiefergelenksfixierungen, oder beides zusammen auf beiden Seiten fixiert: Beidseitige Modellaufhängung im Versuch.
- c) Die Muskelkräfte können so koordiniert werden, daß im Gebiet der Lasteinleitung die Resultante aller Kaumuskeln der Belastung des Zahnes entgegenwirkt: Im Versuch ist diese Resultante durch einfaches Unterstützen des Modelles im Bereich der Lasteinleitung erreicht.

Da diese Möglichkeiten immer noch diskutiert werden, berücksichtigten wir alle drei Möglichkeiten in den folgenden Versuchen.

Die Spannungsverhältnisse und die Auswirkung der Zahnbelastungen können bei verschiedenen Einzelbelastungen der Zähne bzw. Zahngruppen an diesem Modell untersucht werden.

Auch für die folgenden zehn verschiedenen Belastungen werden die Isoklinen ermittelt und die zugehörigen Hauptspannungslinienbilder konstruiert.

Für das Hauptspannungslinienbild im Versuch X, Belastung A, ist das Isoklinenbild dargestellt, wie es im Modell ermittelt wurde.

Wegen der Übergröße des Modells in Bezug zur Größe der Filter (siehe Abb. 22) konnte das Isochromatenbild nicht in einem festgehalten werden. Deshalb sind Teilaufnahmen zum Gesamtbild wieder zusammengefügt und vermittelt als Fotomontage mit dem betreffenden Hauptspannungslinienbild den Gesamteindruck der Spannungsverteilung.

a) einseitige Aufhängung, Versuch VIII

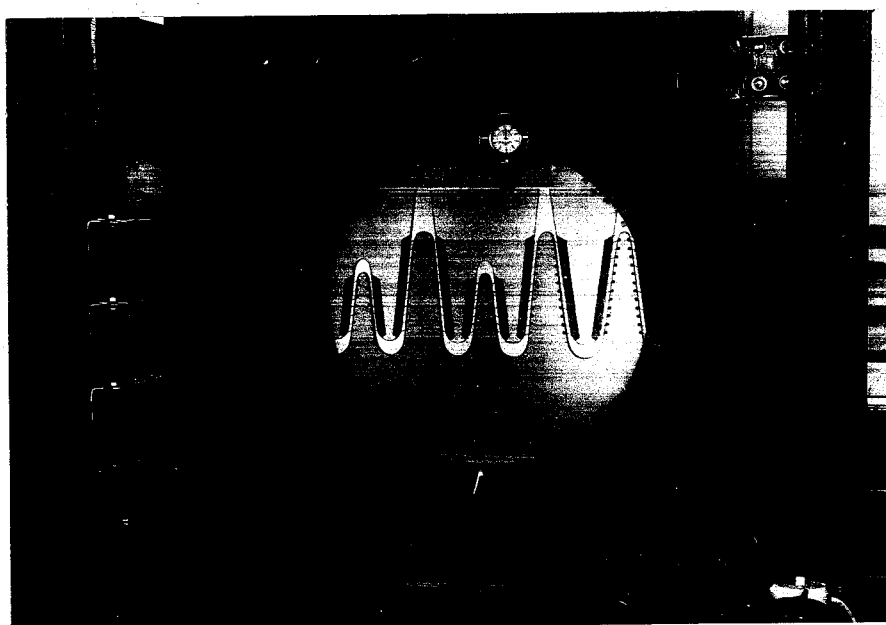
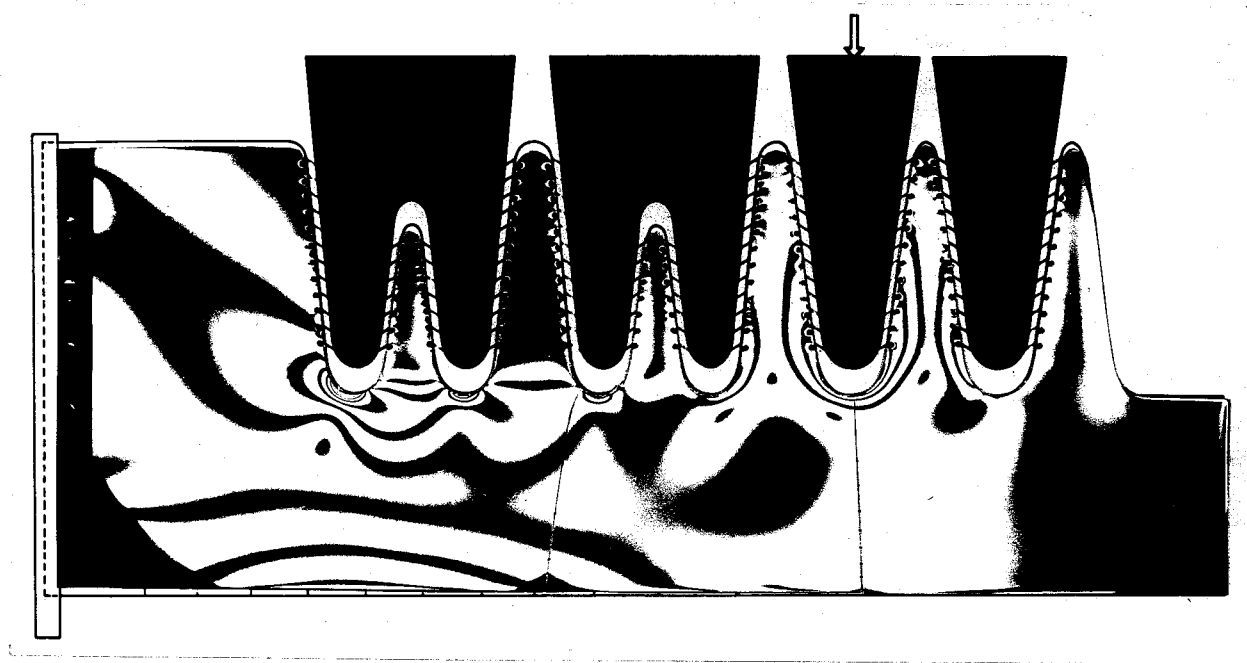
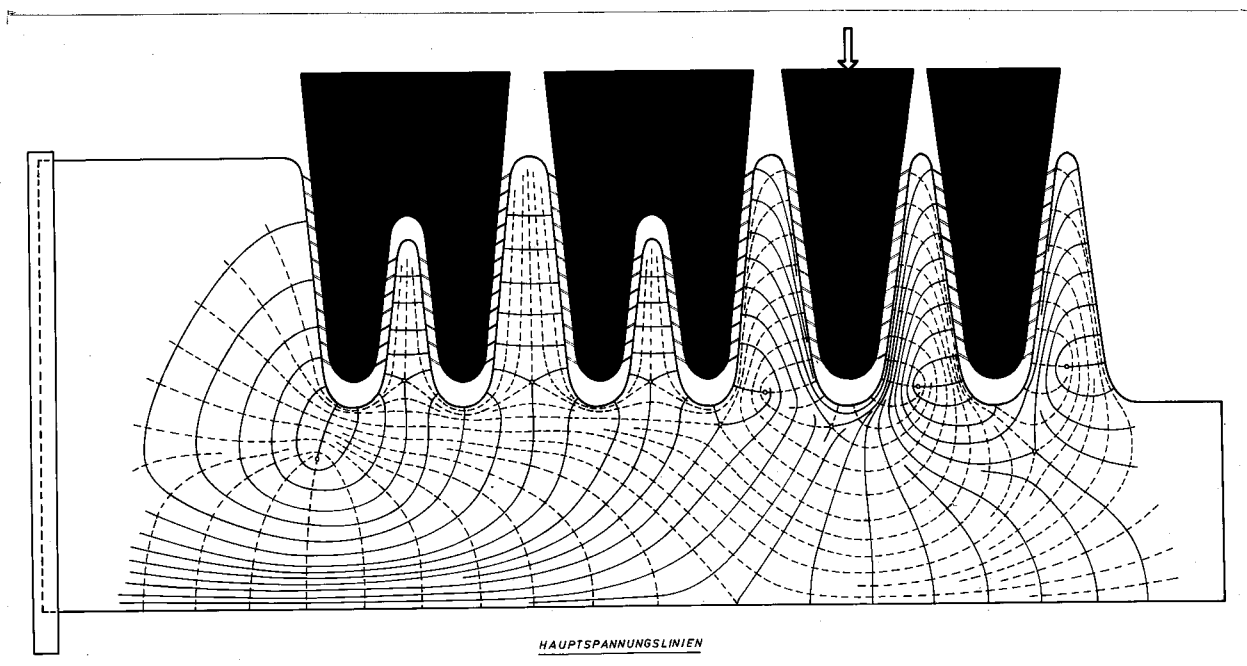


Abb. 22 : Belastungsvorrichtung und Einspannung des Modells III für den Versuch VIII.

Belastung des zweiten Praemolaren



(a)



(b)

Abb. 23 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei einseitiger Aufhängung des Modells und zentrischer Belastung der Wurzel des zweiten Praemolaren.



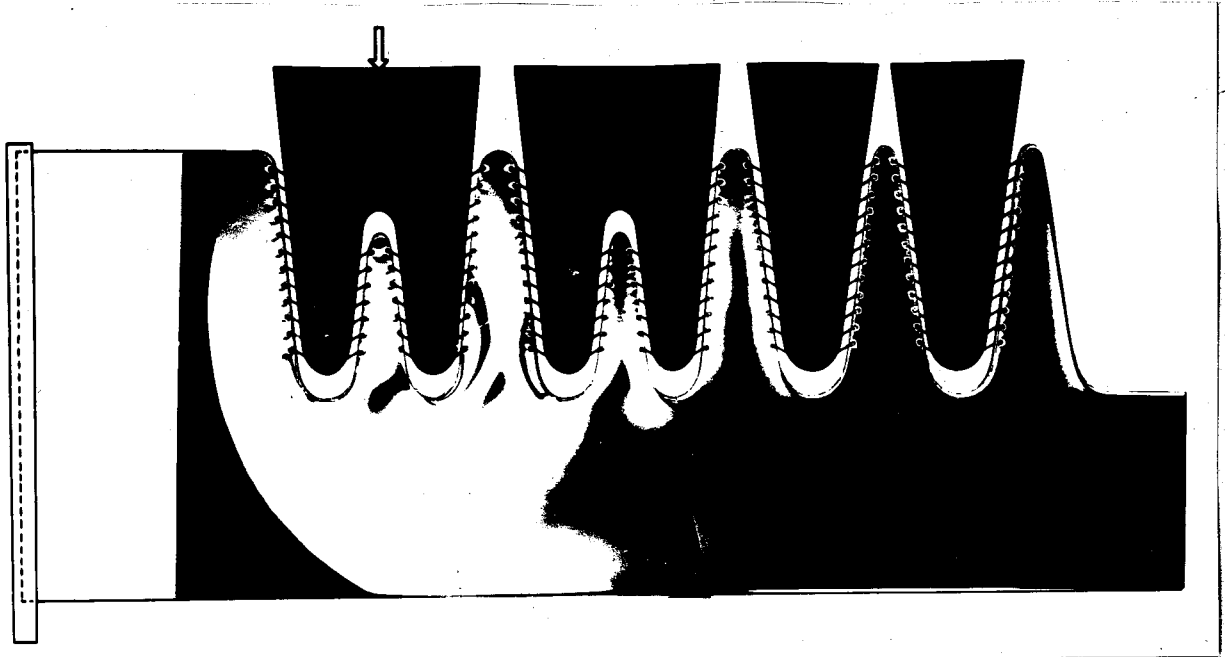
Die Belastung des zweiten Praemolaren verursacht Spannungen im gesamten Modell. Sowohl das Isochromaten- wie auch das Hauptspannungslinienbild zeigen für die Basis des Modells und für die Nachbarsepten des belasteten Zahnes die typische Linienverteilung des einseitig aufgehängten Biegebalkens.

Die Nachbarsepten des belasteten Zahnes und das Außenseptum vor dem ersten Praemolaren werden zum Lastzentrum hin gebogen. Die anderen Septen werden nicht gebogen. Das Isochromatenbild beweist eine geringe Beanspruchung dieser Gebiete.

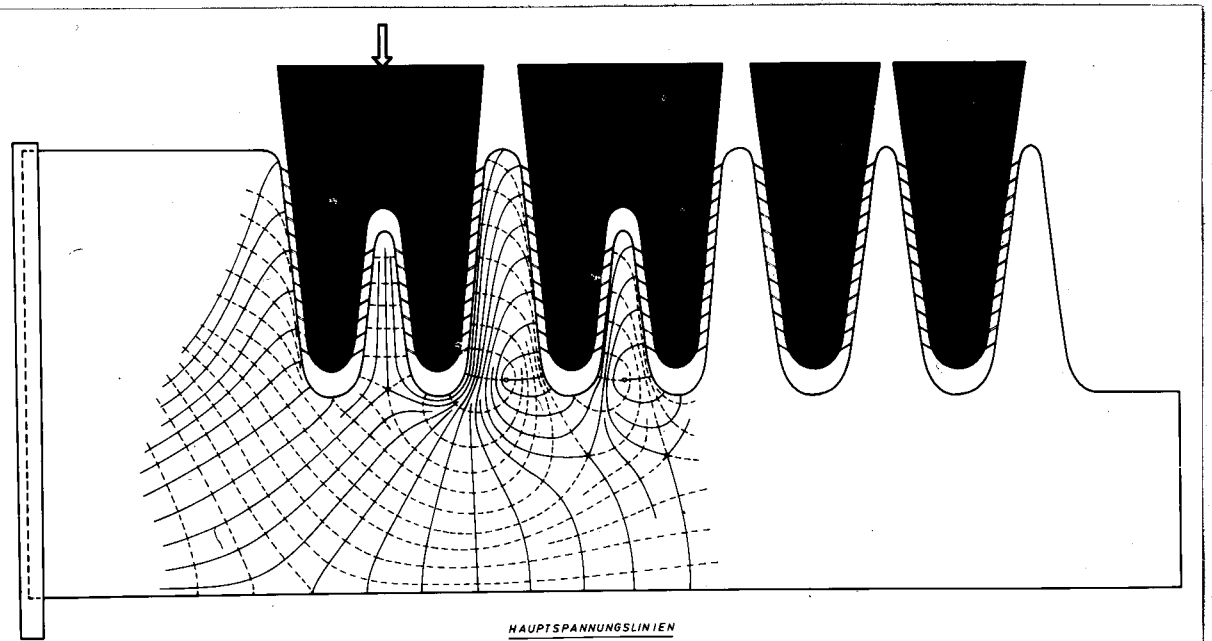
Besonders große Spannungen treten an den Alveolenfundi der Molaren von mesial nach distal zunehmend auf.

Die Vielzahl der isotropen Punkte liegt nahe der apicalen Basis. Besonders im Bereich der Molaren läuft das Zugspannungsfeld im Bereich dieser apicalen Basis.

Belastung des zweiten Molaren



(a)



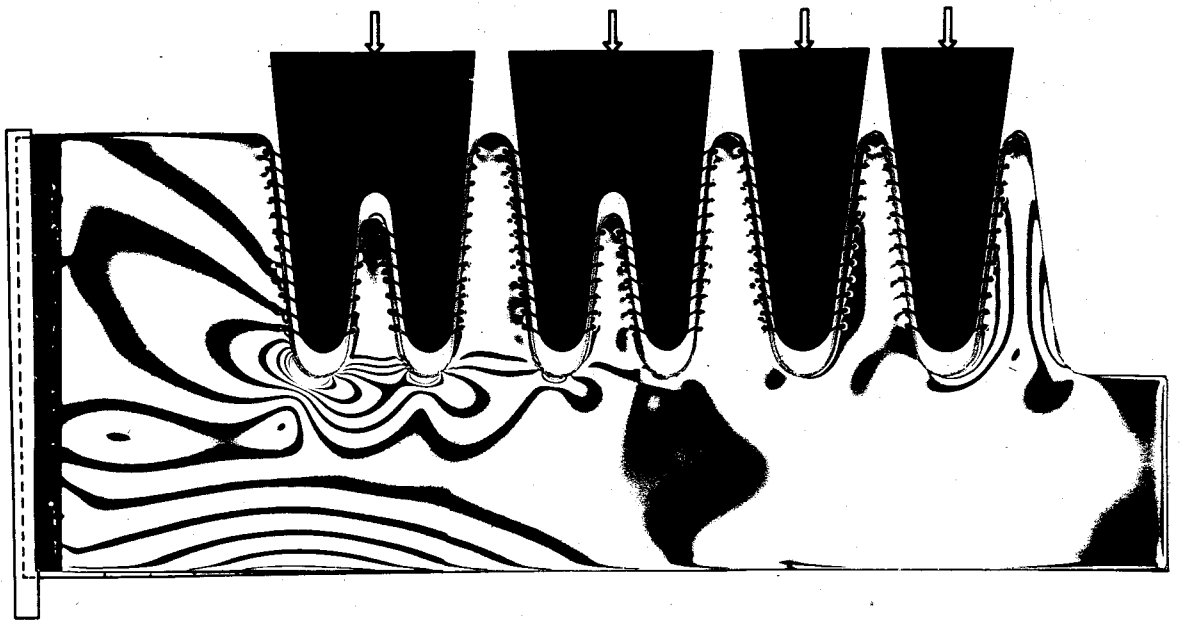
(b)

Abb. 24 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei einseitiger Aufhängung des Modells und zentrischer Belastung der Wurzel des zweiten Molaren.

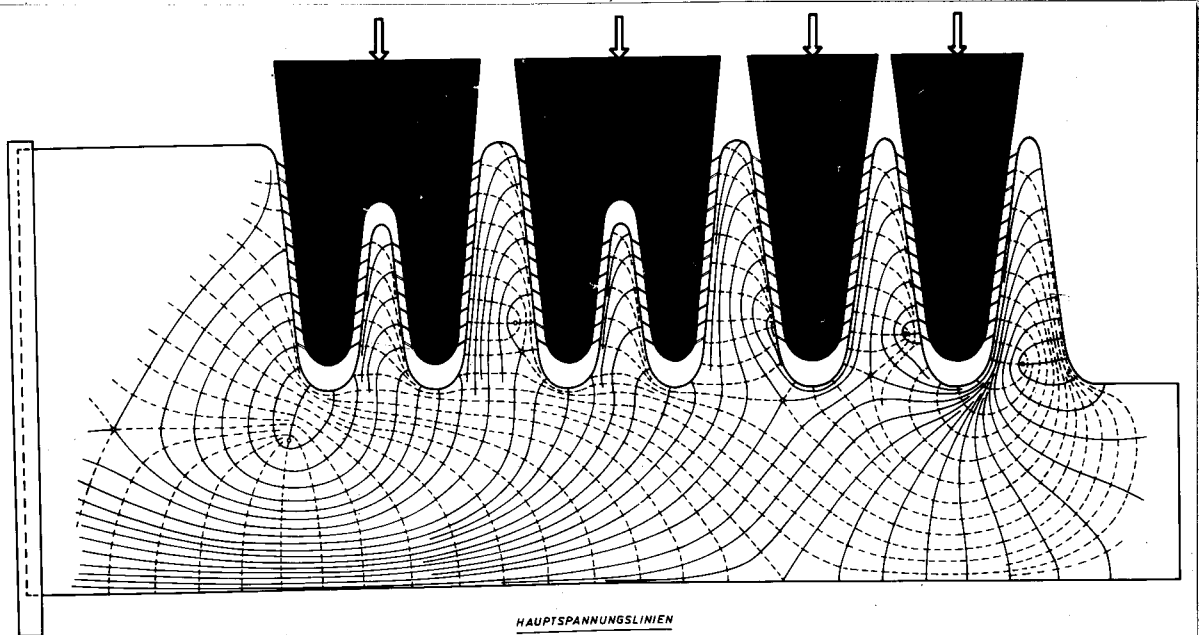
Obgleich die Lasthöhe genau dieselbe war, wie im vorigen Versuch, ist die Spannungsverteilung und die Größe der Spannungen wesentlich verändert.

Im Prinzip ist im Basalteil des Modells noch der einseitig eingespannte Biegebalken zu erkennen. Das Isochromatenbild zeigt aber nur geringe Spannungen im Modellinnern; von der Mitte des ersten Molars nach mesial ist im Basalteil überhaupt keine Spannung nachzuweisen. Das Septum zwischen Praemolaren und Molaren wird über die Aufhängungen des ersten Molaren durch das gebogene Septum zwischen den Molaren noch beeinflusst, so daß die Nachbarinterdentalsepten zum belasteten Zahn hingebogen sind, während lediglich das interradiikuläre Septum des belasteten Zahnes gestaucht wird. Auch hier (wie bei der Belastung A) wirken die Septen wie auf den Basalbalken aufgesetzt; sie selbst werden wie Biegebalken beansprucht.

Belastung der ganzen Zahnreihe



(a)



(b)

Abb. 25 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei einseitiger Aufhängung des Modells und gleichmäßiger, zentrischer Belastung aller Wurzeln dieser Zahnreihe.

Die Spannungsverteilung ähnelt der bei der Belastung des zweiten Praemolaren (A).

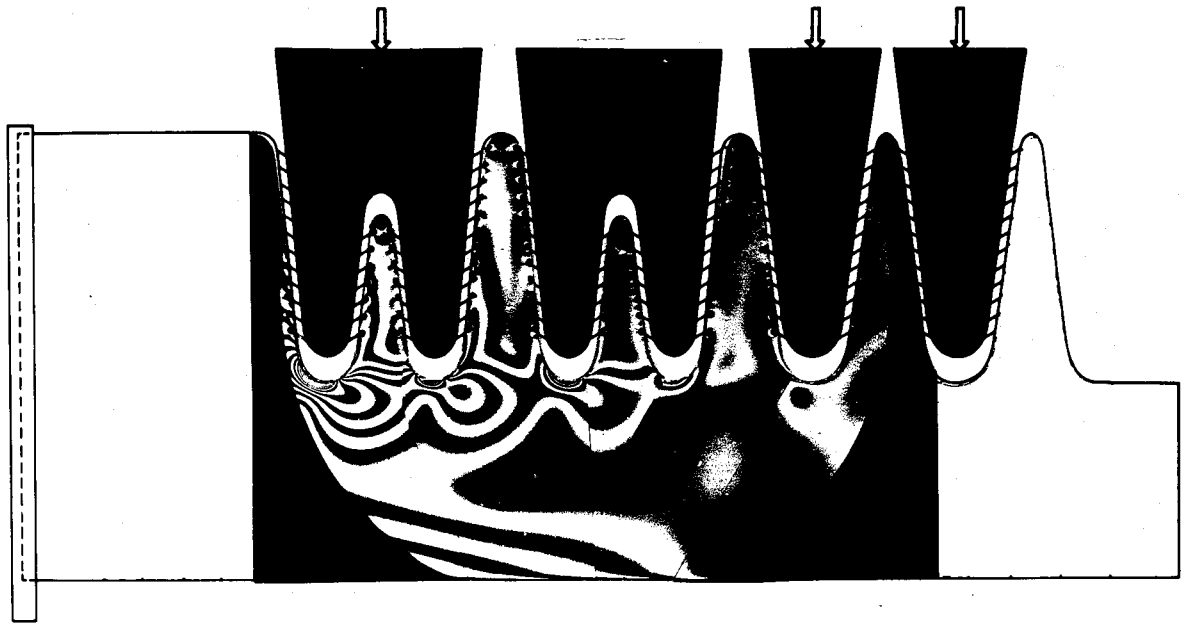
Auffallend ist, daß sämtliche Septen gebogen aber nur wenig beansprucht sind, bis auf das Außenseptum vor dem ersten Praemolaren.

Das Spannungsmaximum an der distalen Wurzelspitze des zweiten Molaren ist durch die verstärkte Belastung gegenüber dem bei Belastung A erhöht.

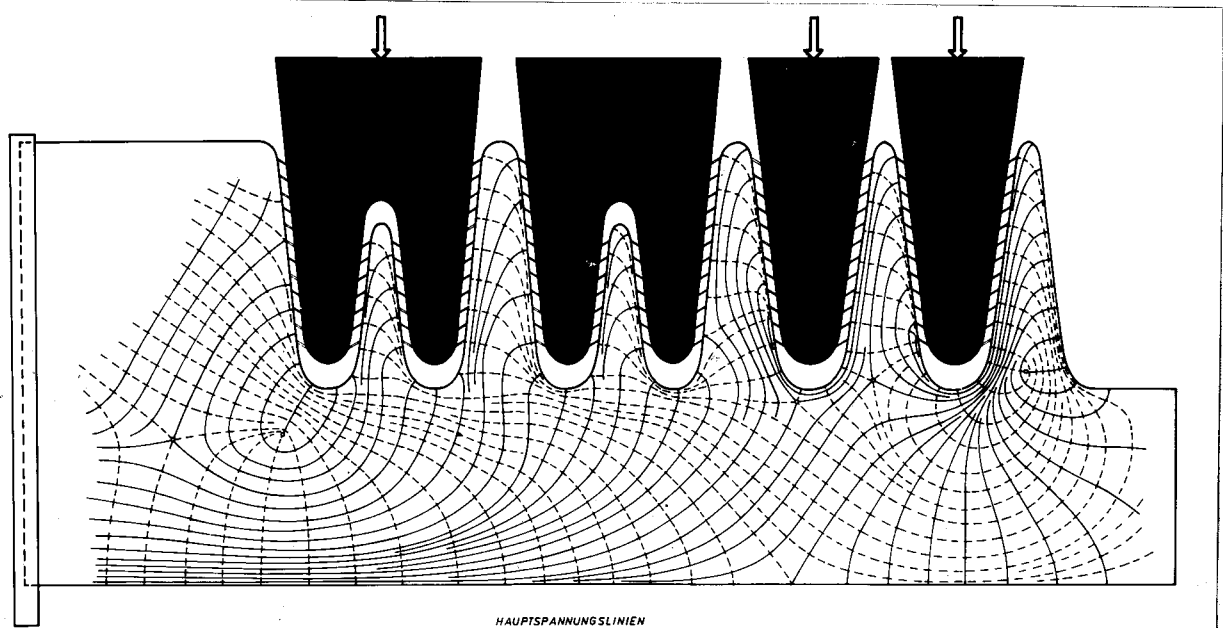
Zu vergleichen ist dieses Bild mit Abb. 6 d, wo der einfache Biegebalken an vier Stellen gleichzeitig belastet wurde.

Die Septen erscheinen auch hier wieder wie auf den Basalbalken aufgesetzt und sind selbst auch wieder wie Balken beansprucht.

Belastung der ganzen Zahnreihe ohne  
den ersten Molaren



(a)



(b)

Abb. 26 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei einseitiger Aufhängung des Modells und zentrischer Belastung aller Wurzeln außer der des ersten Molaren.

Bei dieser Belastung lassen sich zum vorigen Versuch fast keine Unterschiede in den Isochromaten und den Hauptspannungslinien nachweisen.

Lediglich das interradiikuläre Septum des unbelasteten ersten Molaren ist weniger beansprucht (Isochromatenwerte), es wird aber über die periodontalen Halteelemente der Wurzeln bei dieser einseitigen Aufhängung des ganzen Modells doch beansprucht und zwar in derselben Weise, wie bei Belastung dieses ersten Molaren.

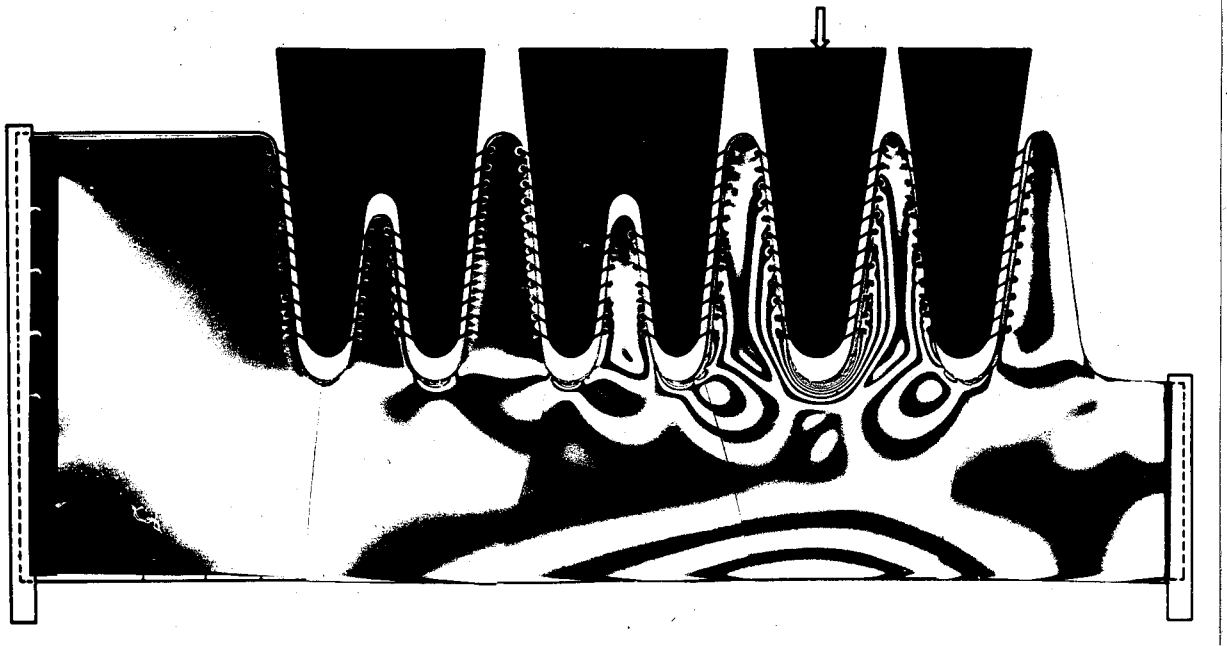
Durch die vermehrte Last auf dem zweiten Molaren, hat das Spannungsmaximum an dessen distalen Alveolenfundus noch zugenommen.

#### Zusammenfassung:

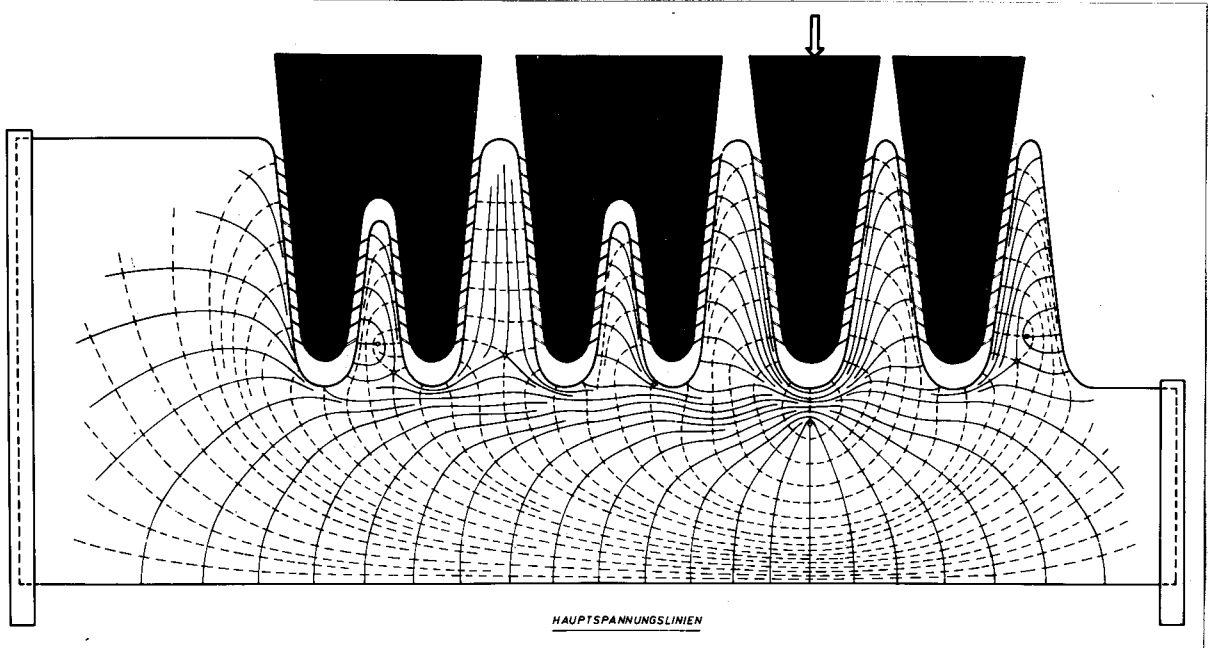
Bei einseitiger Aufhängung des Modells III ist das Verhalten des Basalteiles des Modells am auffälligsten, der sich wie ein einseitig eingespannter Biegebalken in seiner Spannungsverteilung verhält. Die Belastung einzelner Zähne wirkt sich über die gebogenen Nachbarsepten und die Aufhängeelemente der Nachbarzähne in beide Richtungen weiter fort.

Alle Septen werden gebogen, und zwar zum belasteten Zahn, bzw. zum stärker belasteten Zahn hin. Die einzelnen, gebogenen Septen verhalten sich spannungsmäßig ebenfalls wie Biegebalken.

b) beidseitige Aufhängung, Versuch IX  
Belastung des zweiten Praemolaren



(a)



(b)

Abb. 27 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei beidseitiger Aufhängung des Modells und zentrischer Belastung der Wurzel des zweiten Praemolaren.



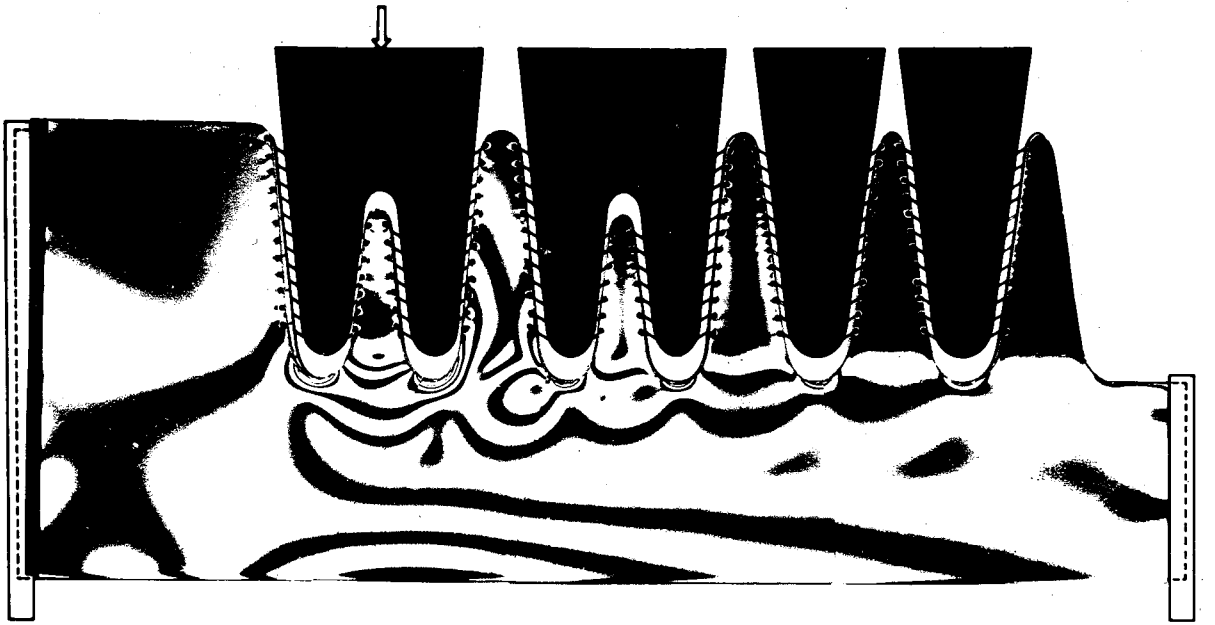
Das beidseitig eingespannte Modell ist in seinem Basalteil vergleichbar dem beidseitig eingespannten und belasteten Biegebalken (vgl. Versuch II, Belastung B). Dieser Vergleich ist sowohl durch das Isochromaten- wie durch das Hauptspannungslinienbild gerechtfertigt. Das Isochromatenbild verdeutlicht, daß die Nachbarsepten des belasteten zweiten Praemolaren stark, die anderen nur sehr wenig beansprucht werden.

Das Maximum der Beanspruchung der Modellunterkante liegt genau unterhalb des belasteten Zahnes.

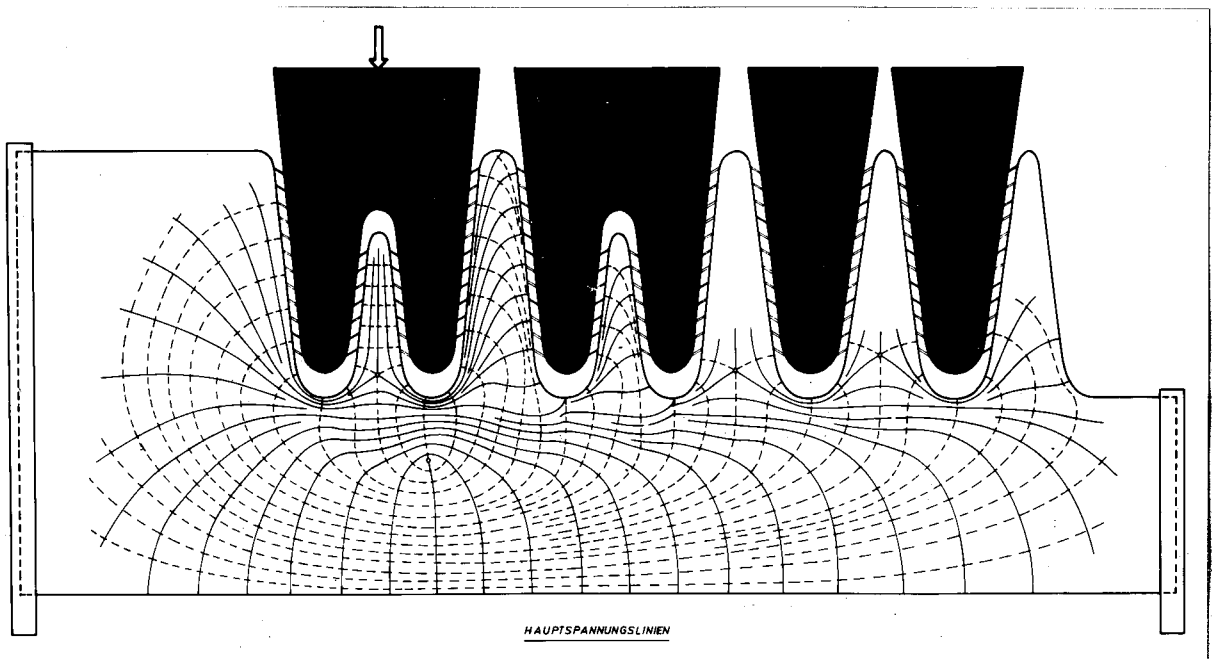
Im Hauptspannungslinienbild ist unter allen Alveolenfundi durchziehend ein Liniensystem von Spannungen zu erkennen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß z.B. Walkhoff in diesem Gebiet unterhalb der Alveolen einen Knochenzug beschrieb, den er als "Trajektorium basale" bezeichnete.

Belastung des zweiten Molaren



(a)



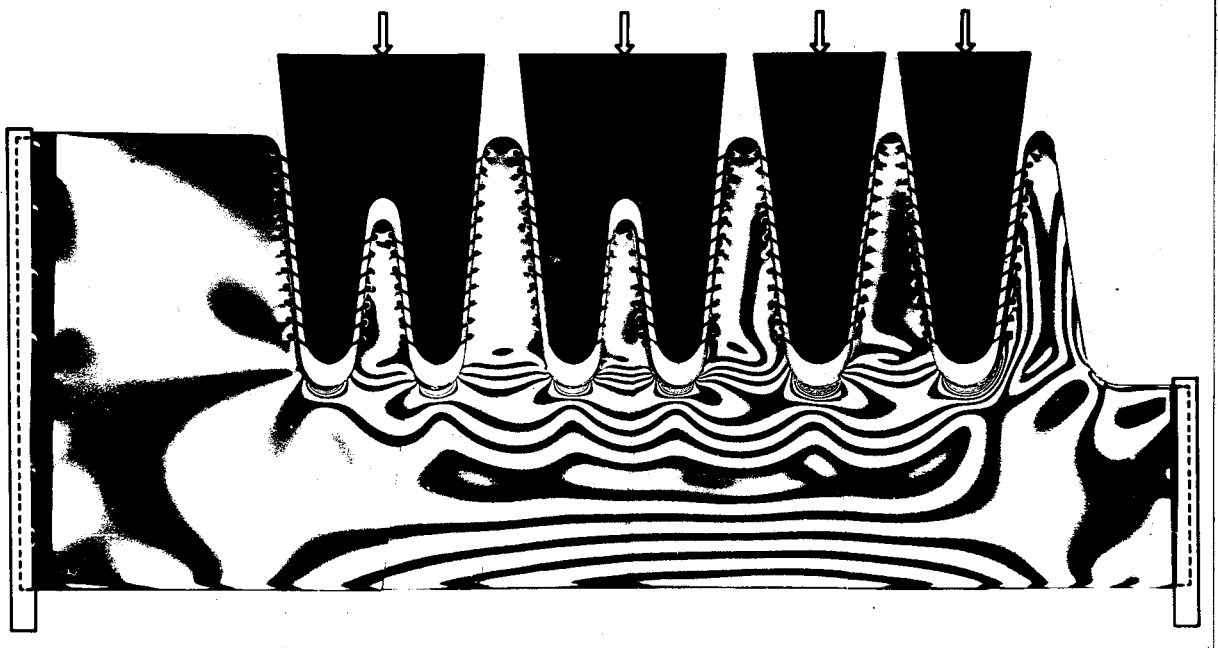
(b)

Abb. 28 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei beidseitiger Aufhängung des Modells und zentrischer Belastung der zweiten Molarenwurzel.

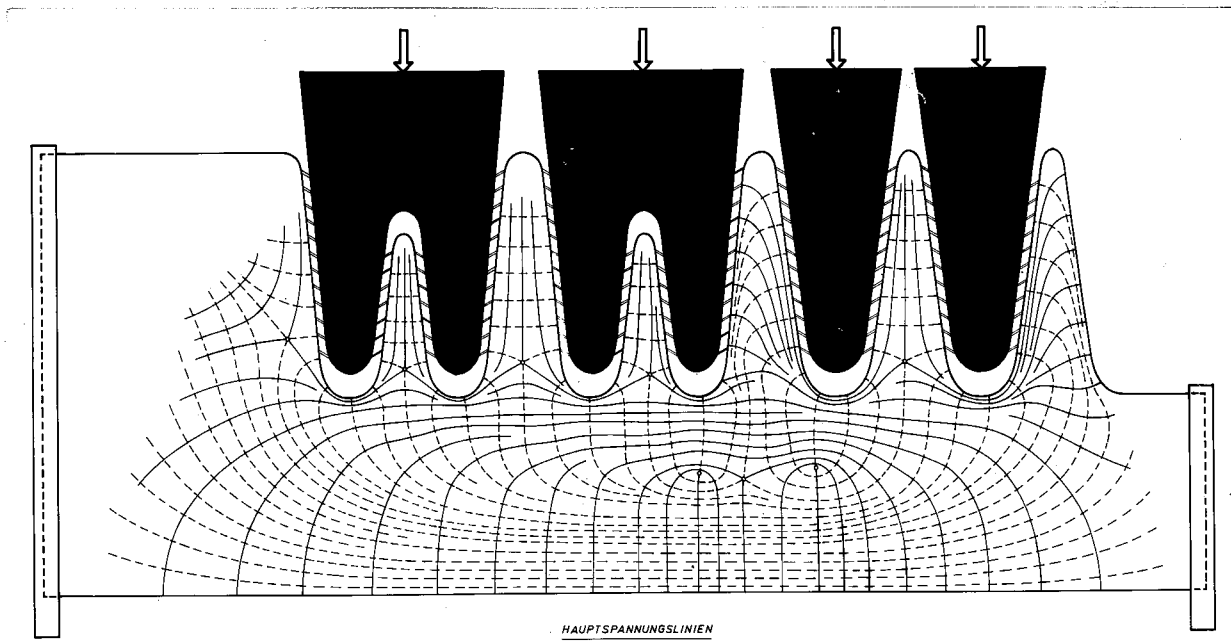
Der Verschiebung der Lasteinleitung entsprechend, haben sich auch die Isochromaten und die Hauptspannungslinien verschoben.

Wie im vorangegangenen Versuch, entspricht die Basis des Modells in beiden Bildern dem beidseitig eingespannten Biegebalken. Die Septen werden auch ohne direkte Belastung des zugehörigen Zahnes über die Periodontien durch die beanspruchten Septen belastet. Unter den Alveolen liegt auch hier ein Linienzug von Spannungen in der Gegend der apicalen Basis, der schon bei Belastung A beschrieben ist.

Belastung der gesamten Zahnreihe



(a)



(b)

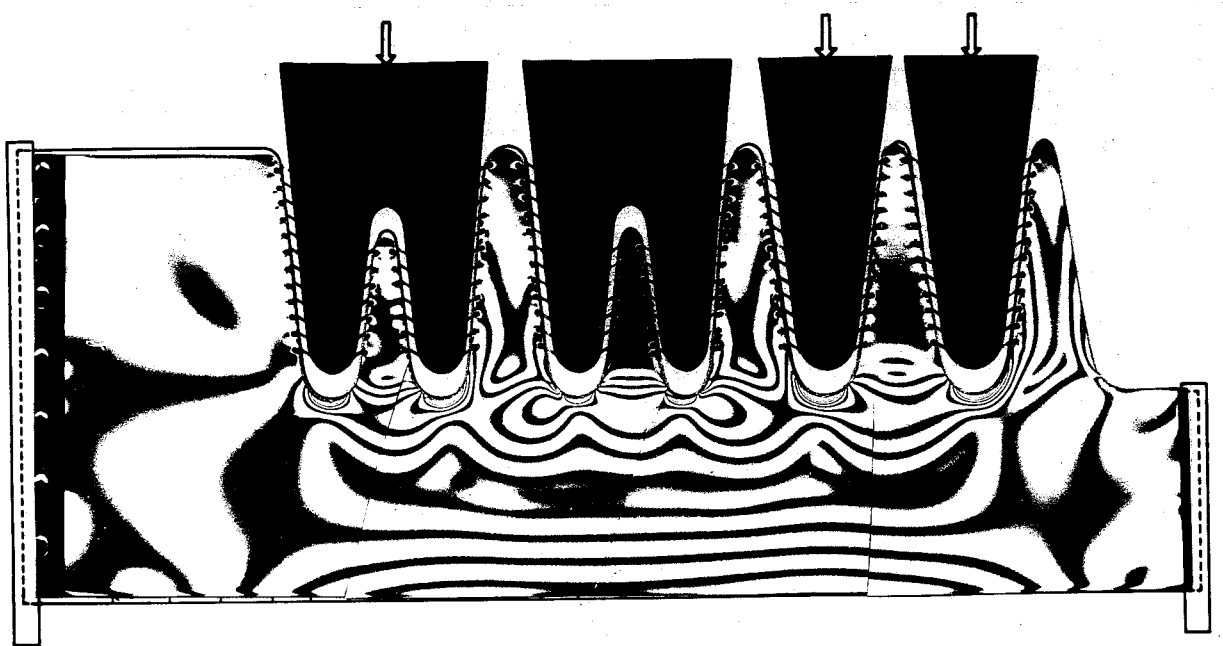
Abb. 29 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei beidseitiger Aufhängung des Modells und der gleichmäßigen Belastung aller Wurzeln dieser Zahnreihe.

Zu den vorangegangenen Belastungen unterscheidet sich das Isochromaten- wie das Hauptspannungslinienbild im Prinzip nicht.

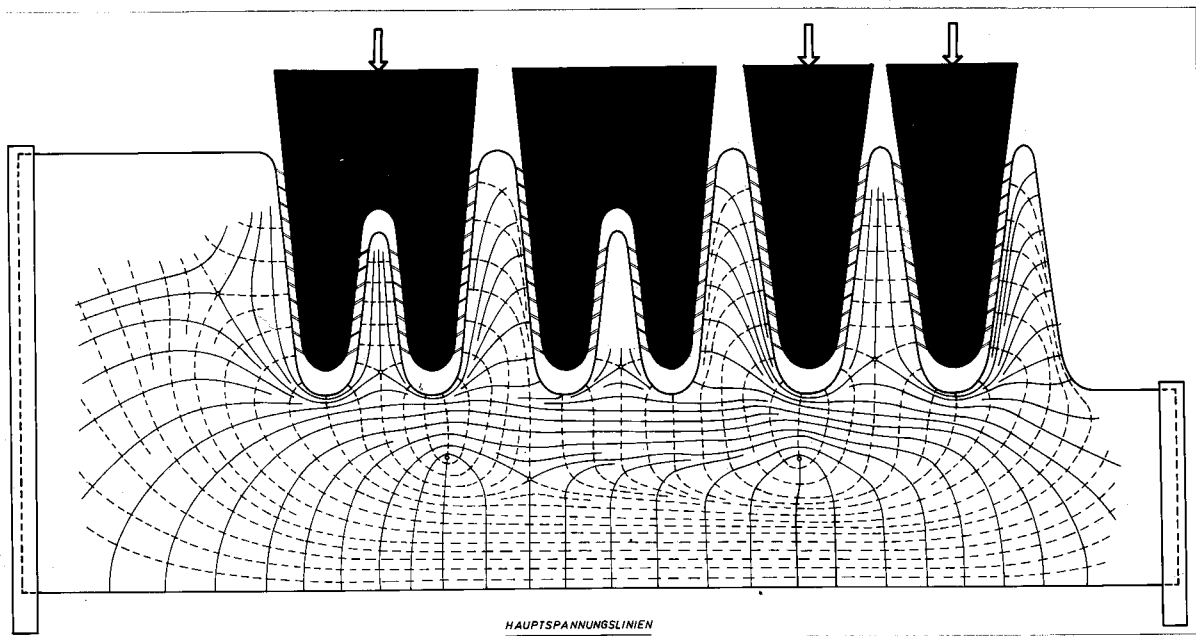
Das Bild des beidseitig aufgehängten und in der Mitte belasteten Biegebalkens ist für den Basalteil dieses Modells sehr deutlich.

Die Septen zwischen zwei gleich stark belasteten Zähnen und die zwischen den Wurzeln der Molaren sind gestaucht. Die ungleich zu beiden Seiten beanspruchten Septen und das Außenseptum vor den Praemolaren sind gebogen. Die Septen werden also wieder wie einzelne Biegebalken beansprucht; der Basalteil des Modells ebenfalls. (vgl. Balkenversuche I und II.)

Belastung der ganzen Zahnreihe ohne den  
ersten Molaren



(a)



(b)

Abb. 30 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei beidseitiger Aufhängung des Modells und Belastung aller Wurzeln außer der des ersten Molaren.

Im Vergleich zu dem Versuch bei Belastung aller Wurzeln hat sich die innere Beanspruchung im Modellkörper weder in der Spannungsverteilung noch im Verlauf der Hauptspannungen wesentlich geändert. Das interradikuläre Septum des unbelastet gebliebenen Zahnes ist praktisch nicht beansprucht, die beiden Nachbarsepten dieses Zahnes sind zu den belasteten Nachbarzähnen hingezogen.

Die Versuche mit einzelnen, unbelasteten Zähnen in einer sonst belasteten Zahnreihe sind angestellt worden, um im Zusammenhang mit der vollständig belasteten Zahnreihe die Unterschiede herausarbeiten zu können, die z.B. im natürlichen Gebiß bei antagonistischen oder antagonistisch gewordenen Zähnen in Bezug auf eine veränderte Spannungsverteilung um die Wurzeln der Zähne auftreten.

In diesen Versuchen (Versuch VIII, Belastung D und Versuch IX, Belastung D) wurde deutlich, daß das Prinzip der Spannungsverteilung bei Auslassen eines Zahnes in der sonst belasteten Zahnreihe nicht wesentlich geändert wird. Änderungen beobachtet man nur in den Nachbarsepten, die zur anderen Seite gebogen werden und im Mittelseptum, das bei beidseitiger Aufhängung des gesamten Modells sogar unbelastet bleibt. Bis in die unmittelbare Umgebung dieses unbelasteten Zahnes ist keine entscheidende Veränderung im Spannungsverlauf und in der Beanspruchungsgröße festzustellen.

#### Zusammenfassung

Die im Versuch IX bei beidseitig eingespanntem Modell und den verschiedenen Belastungen ermittelten Isochromaten- und Hauptspannungslinienbilder zeigen einen sehr einheitlichen Linienverlauf.

Bei allen Belastungen (A - D) verlaufen dem unteren Rand des Modells parallel maximale Spannungen, ohne daß ein Umkehrpunkt vorkommt. (Vgl. Versuch II, beidseitig aufgehängter Balken). Entsprechend verlaufen unterhalb der Alveolen im Bereich der apicalen Basis in leicht gewelltem Verlauf, wegen der uneinheitlichen Modelloberkante, horizontale Spannungen.

Wie schon bei der Auswertung der Abbildungen 27 a und 27 b erwähnt, beschreibt z.B. Walkhoff für dieses Gebiet einen Knochenzug, den er als "Trajektorium basale" bezeichnet.

Die einzelnen Septen verhalten sich wie Biegebalken, die dem basalen, einseitig wie beidseitig eingespannten Teil, aufgesetzt sind. (Vgl. Versuch I und II, Biegebalken.)

In allen Isochromaten- und Isoklinenbildern zeigt sich zusätzlich: Die Belastung eines Zahnes wirkt sich über seine Nachbarsepten und die Periodontien der Nachbarzähne auch auf entferntere Septen aus.



c) Unterstützung im Bereich der Belastung, Versuch X  
Belastung des zweiten Praemolaren

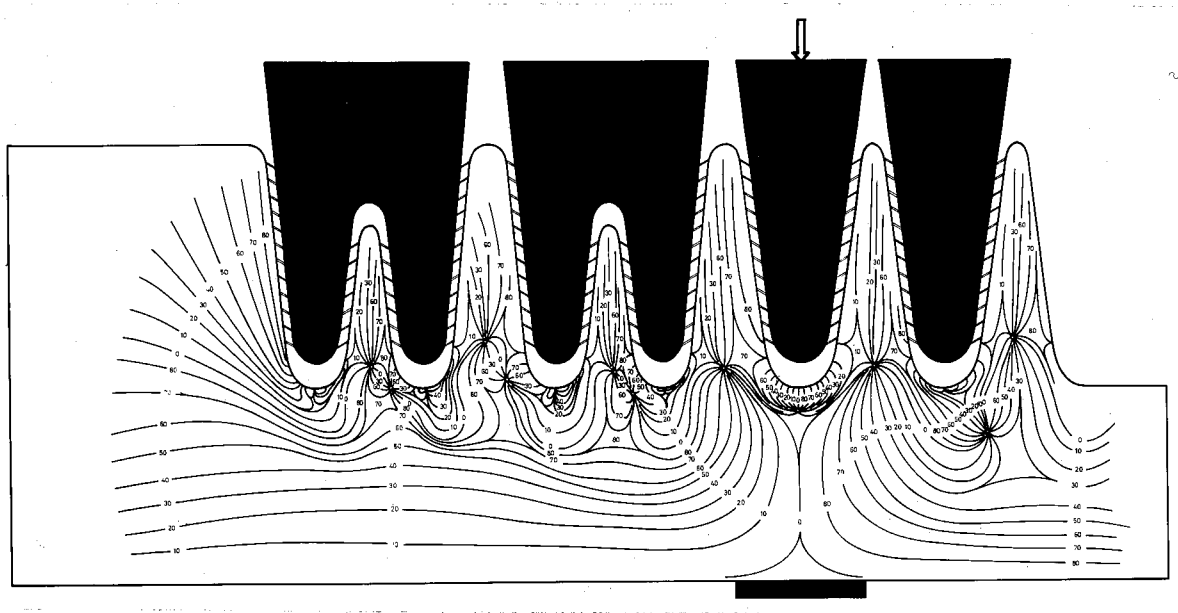
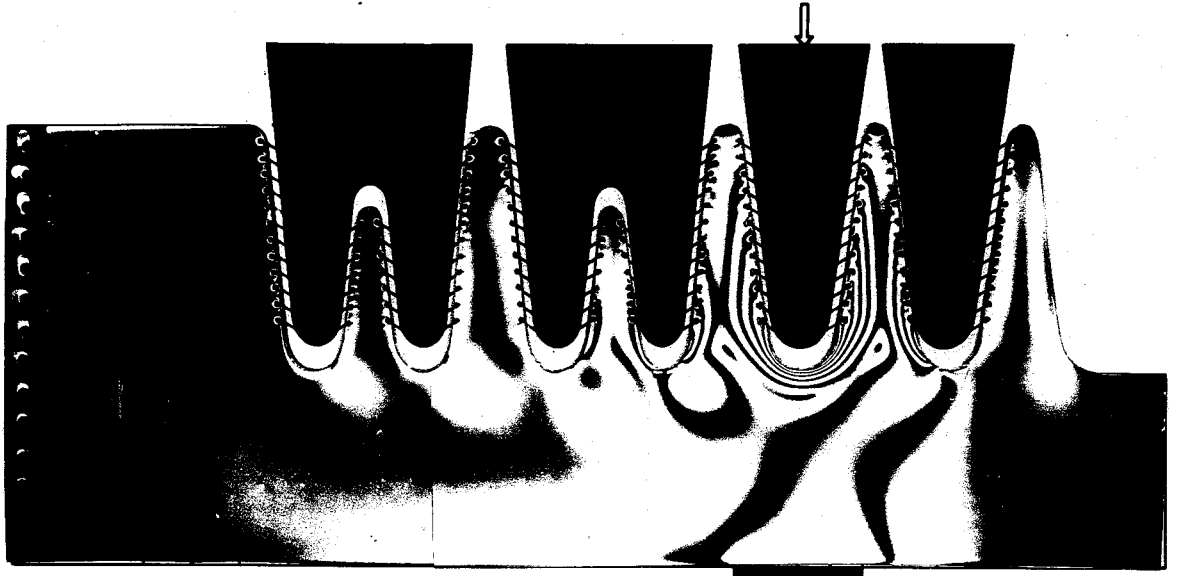


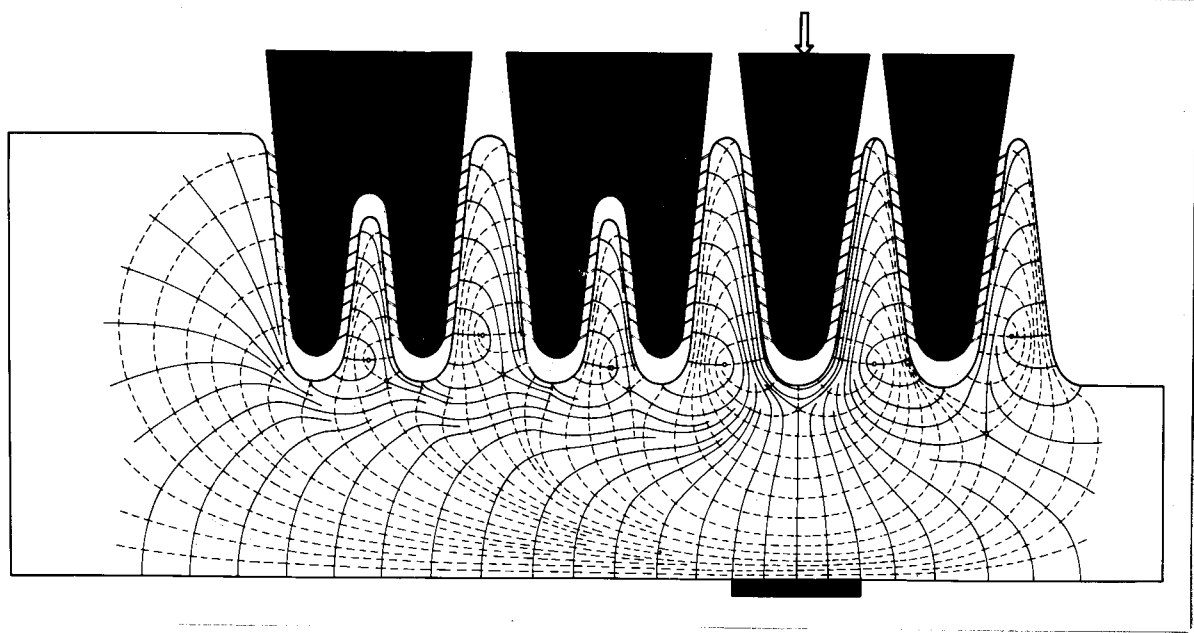
Abb. 31 a : Isoklinen im Modell III bei Unterstützung des Modells im Bereich des belasteten zweiten Praemolaren.

Jedes, der hier dargestellten Hauptspannungslinienbilder, ist aufgrund eines Isoklinenbildes, wie das hier abgebildete, konstruiert worden.

Insbesondere sei auf die Ähnlichkeit des Linienverlaufs am belasteten Zahn mit dem im Versuch VI (Abb. 15 b, Seite 69) hingewiesen.



(b)



(c)

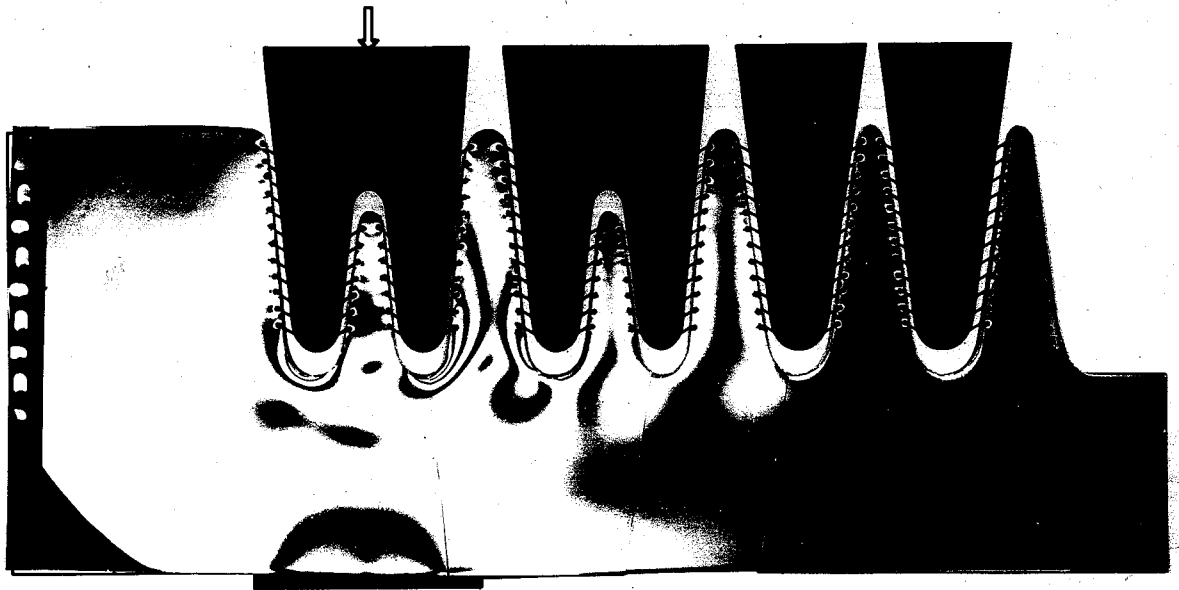
Abb. 31 b und c : Isochromaten (b) und Hauptspannungslinien (c) im Modell III bei Unterstützung des Modells im Bereich des belasteten, zweiten Praemolaren.

Die Abbildungen zeigen einen Isoklinenverlauf und ein Hauptspannungslinienbild, das im Bereich des belasteten Praemolaren den für einen einzelnen, einwurzeligen Zahn ermittelten Bildern entspricht.

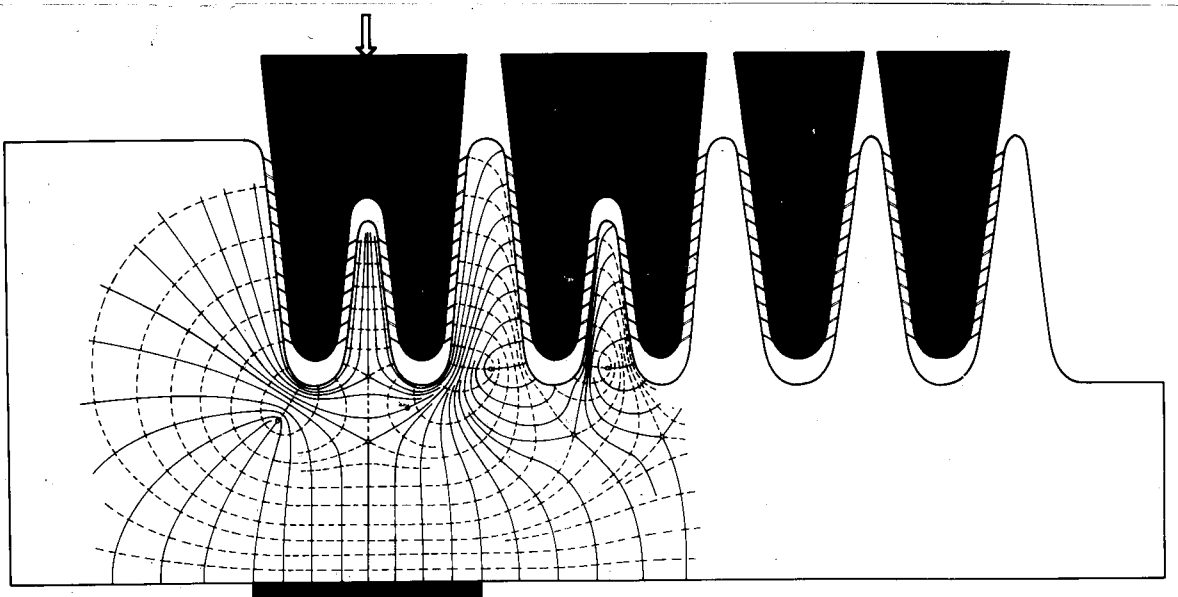
In diesem Versuch ist besonders deutlich, daß auch die weiter entfernt liegenden Septen mitbeansprucht werden.

Wie beim beidseitig aufgehängten Modell (Versuch IX), verlaufen ohne Umkehrpunkt, dem unteren Modellrand parallel, Spannungen des maximalen Systems. Unterhalb der Alveolen der Molaren finden sich wiederum im Bereich der apicalen Basis horizontale Spannungen (vgl. Versuch IX), diesmal aber vom anderen Hauptspannungssystem.

Belastung des zweiten Molaren



(a)



(b)

Abb. 32 a und b : Isochromaten (a) und Hauptspannungslinien (b) im Modell III bei Unterstützung des Modells im Bereich des belasteten zweiten Molaren.

Die Belastung des zweiten Molaren konnte nicht die gewohnte Isochromatenverteilung im übrigen Modell ergeben (vgl. Abb. 18 a), weil die Lasthöhe hier (Abb. 32 a) einerseits verhältnismäßig gering ist, zum anderen auf der distalen Seite das Modell nicht als echter Biegebalken reagieren kann, weil es hier zu kompakt ist. Die Beanspruchung erfaßt nur einen kleinen Teil des Modells.

Dagegen zeigt das Bild der Hauptspannungen den Verlauf, wie wir ihn aus dem Versuch VII, Belastung A (Abb. 18 b, Seite 75) schon kennen.

#### Zusammenfassung

Auch bei der Unterstützung des Modells unterhalb der belasteten Zähne, läßt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Basalteil und Alveolarteil feststellen. Während in diesem Fall der Basisteil noch deutlicher als Fundament für die Septen hervortritt, als bei den anderen Aufhängungen des Modells, sind die Septen selber wieder einfache Biegebalken, die entweder unmittelbar über das periodontale Fasergewebe oder mittelbar über die Septen und Haltestrukturen der Nachbarzähne beansprucht und gebogen werden.

### Zusammenfassung für die Versuche VIII bis X.

Das zweidimensionale Modell eines achsialen Längsschnittes durch eine Zahnreihe im Praemolaren- und Molarengebiet des Unterkiefers wurde auf seine Spannungsverteilung bei bestimmten Belastungen untersucht. Entsprechend der diskutierten Möglichkeiten der Wirkung der Gegenkräfte zu den Belastungen durch Muskel- und Gelenkwirkung wurden verschiedene Aufhängungen und Unterstützungen berücksichtigt (vgl. Seite 80).

Bei allen (zehn) durchgeführten Versuchen zeigte sich, daß der Basalteil und die Septen sich einzeln wie die vorher im Versuch I und II untersuchten Biegebalken verhalten:

Je nach Aufhängung des gesamten Modells zeigt der Basalteil des Modells durch Isochromaten und Isoklinen bzw. Hauptspannungslinien das Bild eines einseitig oder beidseitig befestigten Hebels. Grundsätzlich wird an der Spannungsverteilung nichts geändert, ob nur ein oder mehrere Zähne gleichzeitig belastet werden. Dies erinnert an das De Saint Venant'sche Prinzip (Seite 55).

Die Septen werden grundsätzlich entweder gebogen oder gestaucht, je nachdem, ob die Lasthöhe zu beiden Seiten des betreffenden Septums gleich oder verschieden ist. Die Grenze zwischen Septen und Basalteil wird in fast allen Versuchen dadurch im Hauptspannungslinienbild verdeutlicht, daß horizontal unter den Alveolenfundi ein Zug von Spannungslinien verläuft. Allerdings sind dabei die Liniensysteme direkt unterhalb der Wurzelspitzen bei einseitiger und bei beidseitiger Aufhängung genau entgegengesetzt: Bei der einseitigen Aufhängung stellen diese Linien Zugspannungsrichtungen (gestrichelt) dar, bei beidseitiger Aufhängung bedeuten diese Linien Druckspannungen (durchgezogen).

Diese Region, in der sich die Wurzelspitzen befinden, wird nach A.M. Schwarz (1928) als "Wurzelgrund", nach Lundström (1923) "apicale Basis" genannt und ist das Gebiet, in dem der Alveolarknochen in den Kieferknochen übergeht.

Aufgrund dieser Versuchsreihe können wir dieses Gebiet auch statisch-funktionell ebenfalls als die Grenze zwischen Alveolarfortsatz und Kieferknochen bezeichnen.

Neben der Definition der Anatomen, der Alveolarfortsatz sei lediglich die Summe aller interdentalen und interradikulären Septen, wird dieser Knochenteil wegen seiner funktionellen Eigenständigkeit zu Recht gesondert bezeichnet. Klinische Befunde am Alveolarfortsatz, wie seine Entstehung bei Zahnwachstum, sein Verschwinden bei Zahnverlust und seine Anpassung bei Zahnwanderung usw., finden auf diese Weise eine Erklärung.

7 Quantitative Bestimmung und Darstellung der inneren Spannungen eines beanspruchten Septummodelles mit Hilfe der Querdehnungsmessung. (Lateralextensometer)

In der Literatur wurde bisher immer von einer Zugbeanspruchung der Interdental- bzw. Interradikularsepten geschrieben. Die vorausgegangenen spannungsoptischen Modellversuche zeigten aber, daß durch die Beanspruchung des Septums über die Periodontalfasern auf Zug die Spannungen entlang der Alveolenoberfläche Druck sein müssen.

Es lag daher nahe, in einem gesonderten Versuch die inneren Spannungen eines derartig beanspruchten Septums an einem Modell auch wertemäßig genau zu ermitteln, um für die Verhältnisse im Alveolarteil der Kieferknochen Anhaltspunkte zu gewinnen.

Hiltscher (1950) beschrieb ein Verfahren, mit dessen Hilfe für jeden beliebigen Modellpunkt die Werte der maximalen und minimalen Hauptspannungen bestimmbar sind: das Lateralextensometerverfahren.

Außer der Ordnungszahl  $n$  der Isochromaten und dem Winkelparameter  $\varphi$  ist die Messung der Dickenänderung des Modelles unter der Belastung erforderlich, um in Verbindung mit den Materialkonstanten  $S$  und  $K$  und der Lasthöhe  $P$  diese Spannungswerte zu errechnen.

An einem einfachen Modell, etwa einer Kreisscheibe, lassen sich die Spannungen auch mathematisch-rechnerisch bestimmen. In Kombination mit dem Lateralextensometerverfahren lassen sich die Werkstoffkonstanten angeben: Für eine kreisrunde Modellscheibe (Dicke  $d$  [cm], Durchmesser  $t$  [cm]), die längs eines Durchmessers im Belastungsrahmen eingespannt ist und mit der Last  $P$  [kg] beansprucht wird, gibt die Festigkeitslehre für den



Mittelpunkt der Scheibe für die Hauptspannungen folgende Formeln an:

$$\text{I} \quad \sigma_1 = \frac{2P}{\pi \cdot t \cdot d}$$

$$\text{II} \quad \sigma_2 = -\frac{6P}{\pi \cdot t \cdot d}$$

Ermittelt man die bei dieser Lasthöhe P im Modellmittelpunkt auftretende Ordnungszahl n und die Dickenänderung  $\Delta t$  und setzt man diese und die durch die Formeln I und II für den Kreismittelpunkt ermittelten Werte ein in die Formeln

$$\text{III} \quad \sigma_1 - \sigma_2 = n \cdot \frac{S}{K} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

(Hauptgleichung der Spannungsoptik)

und

$$\text{IV} \quad \sigma_1 + \sigma_2 = \Delta t \cdot \frac{K}{t} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

(Lateralextensometergleichung),

so gewinnt man die Werte der Materialkonstanten S und K.

#### a) Eichversuch

Zur Bestimmung der Materialkonstanten S und K wurde aus derselben Modellplatte, aus der das Modell IV hergestellt war, eine Kreisscheibe von 5 cm Durchmesser (1 cm Dicke) ausgesägt. Diese Scheibe wurde mit einer "Vorlast" von 23 kg in den Belastungsrahmen eingespannt. Die "Gesamtlast" im Versuch betrug 235 kg, die "Hauptlast" war also 202 kg.

Im Kreismittelpunkt stieg Isochromatenordnungs-  
zahl  $n$  im Versuch von 1,15 (Vorlast) auf 10,5 (Gesamt-  
last). Unter der Hauptlast erhöhte sie sich demnach  
um 9,35 Ordnungen.

Die Dickenänderung  $\Delta t$  wurde im Mittelpunkt mit  
5,8 Skalenteilen bestimmt (ein Skalenteil der Meßuhr  
des Lateralextensometers entspricht  $0,1\mu$ ).

Der Winkelparameter  $\varphi$  betrug im Kreiszentrum  $0^\circ$ .  
Damit berechneten sich die für diese Versuche gültigen  
Werkstoffkonstanten:

$$S = \frac{8P}{n \cdot \pi \cdot d \cdot t} \approx \frac{254,2 \cdot P}{5n} \approx \frac{513,484}{46,75}$$

$$\underline{\underline{S = 10,984}}$$

$$K = \frac{-4P}{\Delta t \cdot \pi \cdot d \cdot t} \approx \frac{-172,1P}{5t} \approx \frac{-347,642}{29,0}$$

$$\underline{\underline{K = -11,988}}$$

b) Zentrische Belastung der beiden Nachbarzähne  
Stauchung des Septums, Versuch XI.

Das Modell IV wurde durch eine Vorlast von 6,6 kg in den Belastungsrahmen eingespannt. Die beiden Wurzeln wurden über einen in der Mitte belasteten Balken zentrisch beansprucht. Dadurch war erreicht, daß die beiden Wurzeln mit gleicher Last in die Alveolen bewegt wurden.

Die Gesamtlast hatte eine Höhe von 80kg, die Hauptlast demnach 73,4 kg.

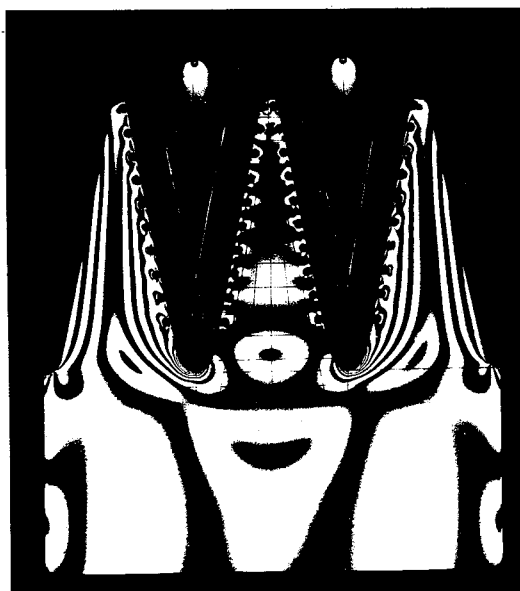


Abb. 33 : Die Isochromaten im Modell IV bei zentrischer Belastung (Lasthöhe 80 kg) des Mittelseptums beider Nachbarzähne bei reiner Stauchung.

Die Aufhängevorrichtung wurde so angeordnet und ausbalanciert, daß das Instrument in Bezug auf jeden Meßpunkt kardanischn aufgehängt war.

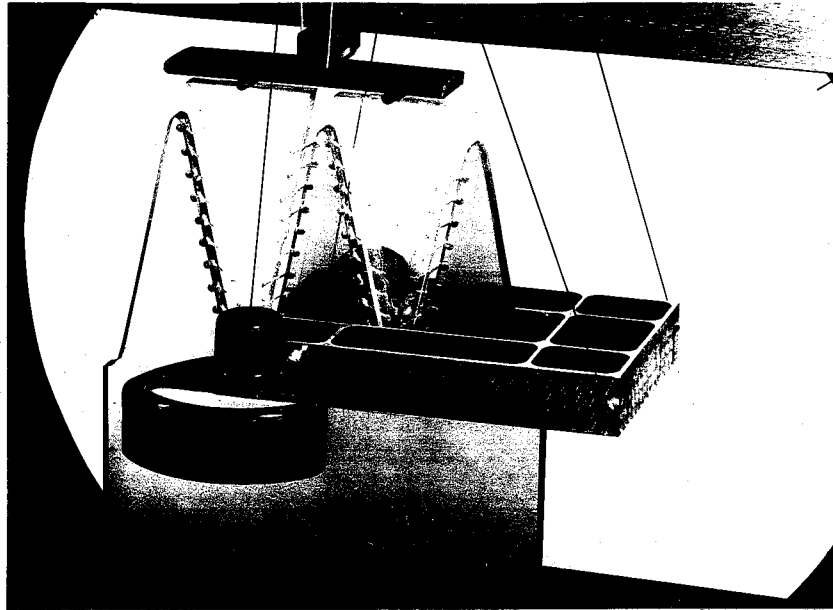


Abb. 34 : Einspannung des Modelles IV in den Belastungsrahmen und Aufhängung des Lateralextensometers für den Versuch IX, Belastung A, Stauchung des Mittelseptums.

Um das bei jedem elastischen Körper bestehende Phänomen der Hysterese (= elastische Nachwirkung) möglichst vollständig auszuschließen und möglichst genaue Werte zu erhalten, wurden für jeden der 65 Meßpunkte jeweils zehn Messungen durchgeführt, indem in konstantem Rhythmus von 20 Sekunden be- und entlastet wurde. Die Dickenänderung  $\Delta t$  des Modelles wurde durch die Änderung der Zeigerstellung in Skalenteilen angegeben.

Die folgenden Tabellen zeigen die Mittelwerte für  $\Delta t$  und die in besonderem Versuch ermittelten Werte für  $\varphi$  bzw. den Parameter der Neigung der Hauptspannungslinien. Die weiterhin angegebenen Isochromatenwerte  $n$  für jeden Meßpunkt entsprechen der Differenz der Isochromatenordnungen von Vorlast zur Gesamtlast, also der Hauptlast.

Mit dem Kompensationsverfahren nach SENARMONT (Wolf, 1965) wurden die Isochromatenordnungen auf Bruchteile genau bestimmt.

Die Werte der maximalen und der minimalen Spannungen an allen 65 Meßpunkten sind berechnet nach den Formeln:

$$(V) \quad \sigma_1 = 5,5 n - 6 \cdot \Delta t$$

und

$$(VI) \quad \sigma_2 = -5,5 n - 6 \cdot \Delta t$$

Mittel - Symmetrielinie

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	0	1	-0,25	+7	- 4
2	0	1	0,15	+4,6	- 6,4
3	0	1	0,25	+4	- 7,0
4	0	1	0,45	+2,8	- 8,2
5	0	1	0,55	+2,2	- 8,8
6	0	1,15	0,625	+1,75	- 9,25
7	0	1,15	0,65	+2,4	-10,225
8	0	1,15	0,70	+2,125	-11,525
9	0	1,15	0,80	+1,825	-10,825
10	0	1,15	0,90	+1,525	-11,125
11	0	1,15	1,13	+0,925	-11,725
12	0	0,7	1,50	-2,93	-12,63
13	alle	0	1,60	-9,0	- 9,0
14	0	0,4	1,70	-7,4	-11,8
15	0	0,75		-6,07	-14,37

Außenlängslinie (ganz links im Bild)  
mit Basispunkt (13) unter dem linken  
Alveolenfundus

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	0	1	0,50	+ 2,5	- 8,05
2	0	1	0,65	+ 1,6	- 9,4
3	0	1	0,70	+ 1,3	- 9,7
4	0	1	0,75	+ 1,0	-10,0
5	0	1,15	0,80	+ 1,525	-11,125
6	0	1,15	0,70	+ 2,125	-10,525
7	0	1,15	0,75	+ 1,825	-10,825
8	0	1,15	0,80	+ 1,525	-11,125
9	0	0,9	1,20	- 2,25	-12,15
10	0	1	1,70	+ 1,3	- 9,7
11	50	1,1	2,10	- 6,55	-18,65
12	80	1,1	2,45	- 8,65	-25,75
13	10	1,15	3,70	-15,87	-28,525

Außenlängslinie (ganz rechts im Bild)  
mit Basispunkt (13) unter dem rechten  
Alveolenfundus

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	0	1	0,45	+ 2,8	- 8,2
2	0	1	0,55	+ 1,7	- 8,8
3	0	1	0,60	+ 1,9	- 9,1
4	0	1	0,55	+ 1,7	- 8,8
5	0	1,15	0,65	+ 2,425	-10,225
6	0	1,15	0,60	+ 2,725	- 9,925
7	0	1,15	0,60	+ 2,725	- 9,925
8	0	1,15	0,65	+ 2,425	-10,225
9	0	0,9	1,05	- 1,35	-11,75
10	0	1	1,60	- 4,1	-15,1
11	40	1,15	2,15	- 6,57	-19,225
12	10	1,1	2,40	- 8,35	-20,45
13	80	1,15	3,70	-15,87	-28,525

## Längslinie (halb links im Bild)

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	0	1	0,48	+ 2,86	- 8,14
2	0	1	0,60	+ 1,90	- 9,1
3	0	1	0,65	+ 1,6	- 9,4
4	0	1,15	0,70	+ 2,125	-10,525
5	0	1,15	0,75	+ 1,825	-10,825
6	0	1,15	0,75	+ 1,825	-10,825
7	0	1,15	0,80	+ 1,525	-11,125
8	0	1,15	0,95	+ 0,625	-12,025
9	10	0,8	1,20	- 2,8	-11,6
10	60	0,45	1,60	- 7,125	-12,07
11	80	0,65	1,80	- 7,225	-14,37
12	0	0,8	1,95	- 7,3	-16,1

## Längslinie (halb rechts im Bild)

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	0	1	0,45	+ 2,8	- 8,2
2	0	1	0,50	+ 2,5	- 8,5
3	0	1	0,65	+ 1,6	- 9,4
4	0	1,15	0,65	+ 2,425	-10,225
5	0	1,15	0,70	+ 2,125	-10,525
6	0	1,15	0,70	+ 2,125	-10,525
7	0	1,15	0,70	+ 2,125	-10,525
8	0	1,15	0,90	+ 0,925	-11,725
9	80	0,8	1,15	- 2,5	-11,3
10	30	0,45	1,55	- 6,825	-11,77
11	10	0,67	1,70	- 6,35	-14,05
12	0	0,85	1,90	- 6,725	-16,07

Zusammenfassung der  $\sigma_1$ -Werte

			+ 7		
			+ 4,6		
			+ 4		
+ 2,5	+ 2,86	+ 2,8	+ 2,8	+ 2,8	
+ 1,6	+ 1,90	+ 2,2	+ 2,5	+ 1,7	
+ 1,3	+ 1,6	+ 1,75	+ 1,6	+ 1,9	
+ 1,0	+ 2,125	+ 2,4	+ 2,425	+ 1,7	
+ 1,525	+ 1,825	+ 2,125	+ 2,125	+ 2,425	
+ 2,125	+ 1,525	+ 1,825	+ 2,125	+ 2,725	
+ 1,815	+ 1,525	+ 1,525	+ 2,125	+ 2,725	
+ 1,525	+ 0,625	+ 0,925	+ 0,925	+ 2,425	
- 2,25	- 2,8	- 2,93	- 2,5	- 1,35	
+ 1,3	- 7,125	- 9,0	- 6,825	- 4,1	
- 6,55	- 7,225	- 7,4	- 6,35	- 6,57	
-15,87	- 8,65	- 7,3	- 6,07	- 6,725	- 8,35
					-15,87

Zusammenfassung der  $\sigma_2$ -Werte

			- 4		
			- 6,4		
			- 7,0		
- 8,05	- 8,14	- 8,2	- 8,2	- 8,2	
- 9,4	- 9,1	- 8,8	- 8,5	- 8,8	
- 9,7	- 9,4	- 9,25	- 9,4	- 9,1	
-10,0	-10,525	-10,225	-10,225	- 8,8	
-11,125	-10,825	-11,525	-10,525	-10,225	
-10,525	-10,825	-10,825	-10,525	- 9,925	
-10,825	-11,125	-11,125	-10,525	- 9,925	
-11,125	-12,025	-11,725	-11,725	-10,225	
-12,15	-11,6	-12,63	-11,3	-11,75	
- 9,7	-12,07	- 9,0	-11,7	-15,1	
-18,65	-14,37	-11,8	-14,05	-19,225	
-28,525	-25,75	-16,1	-14,37	-16,07	-20,45
					-28,525



Den Zahlenkolonnen kann man entnehmen, daß die Messung hinreichend symmetrisch ausgefallen ist, daß im Punkt 13 der Symmetrielinie ein isotroper Spannungszustand besteht, weil die Hauptspannungsrichtung nicht definiert ist und in beiden Spannungssystemen gleichartige und gleiche Werte ermittelt werden konnten.

Den Spannungszustand des gestauchten Septums soll eine mit Hilfe der Meßwerte angefertigte parallelperspektivische Konstruktion anschaulich darstellen. Die Symmetrie des Modells und der Belastung erlaubten eine Mittelwertbildung zwischen beiden Modellhälften, ebenso war entlang den einzelnen Meßlinien durch diese Art der Darstellung eine Interpolation möglich. Als Ergebnis stellte ein zu den Meßlinien gehörendes Liniennetz eine gekrümmte Fläche dar, deren Abstand von der Grundebene die Größe der Spannung für jeden Punkt angab.

Die diesen Hauptspannungslinien zugehörigen Spannungswerte wurden jeweils an den Schnittpunkten vom System der Hauptspannungslinien und den Verbindungslinien der Meßpunkte interpoliert.

Das Ergebnis ist ein räumliches Schema, aus dem man leicht sowohl die Richtung als auch die Qualität und Größe der Hauptspannungen ersehen kann.

Die Abbildung 35 zeigt die inneren Spannungen, wie sie am untersuchten zweidimensionalen Scheibenmodell bei zentrischer Belastung der beiden Nachbarzähne entstanden sind; das Septenmodell ist rein gestaucht.

In Form von Lamellen, die senkrecht auf den Hauptspannungslinien stehen und deren Verlauf folgen, sind die Spannungen dargestellt, indem die Höhe der Lamellen die Größe der Spannungen angibt. Die Qualität der Spannungen ist durch Schraffierung deutlich gemacht.

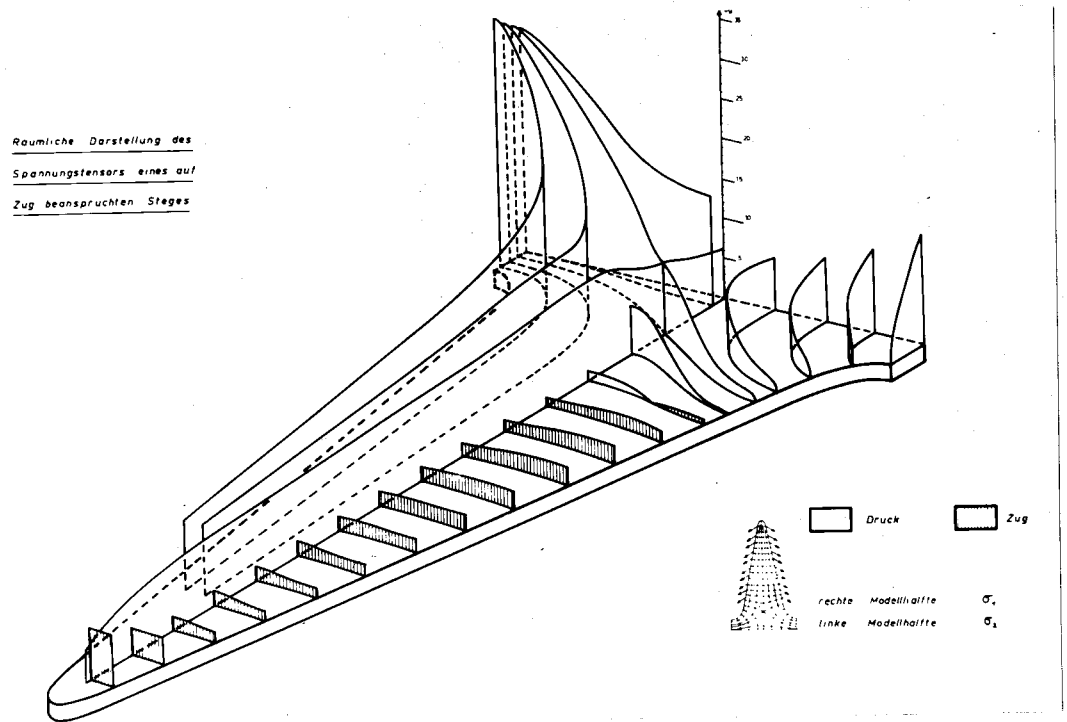


Abb. 35 : Räumliche Darstellung des Spannungstensors eines beidseitig gleichermaßen auf Zug beanspruchten, gestauchten Septums.

Der Übersicht wegen, sind die symmetrischen Systeme der maximalen und minimalen Hauptspannungen auf je einer Seite des Septums getrennt dargestellt; sie gelten aber für beide Seiten und kreuzen sich rechtwinklig.

Dieser Versuch bestätigt Überlegungen und Beobachtungen aus den vorangegangenen Versuchen:

In der Längsachse des Septums, besonders entlang der Alveolenwand, verlaufen Druckspannungen. Wertemäßig nehmen sie von der Spitze des Septums zu dessen Basis hin kontinuierlich zu und erreichen um den Apex herum ein Maximum.

Quer zum Septum lassen sich, soweit wie die Periodontalfasern das Modell auf Zug beanspruchen, Zugspannungen

nachweisen. Von dem apicalen Ende dieses Gebietes ab zum Apex hin, am Fundus der Alveole also, finden sich aber auch in senkrechter Richtung zur Alveolenoberfläche Druckspannungen.

Die Darstellung macht zugleich die Größenverhältnisse zwischen den queren Zug- und den Druckspannungen in der Längsrichtung des Septums deutlich:

Im vorliegenden Versuch übertreffen die Druckspannungen die Zugspannungen um das Fünffache.

c) Statische Bedeutung der horizontalen Spongiosaelemente in den Interdentalsepten

Auffallend oft sind in Röntgenbildern und Knochen-schnitten in horizontaler Richtung zwischen den einzelnen Septen verlaufende Spongiosafäden zu beobachten. Allgemein werden sie als "interdentale Stützbälkchen" bezeichnet. Schon R. Loos hatte um 1900 den Verdacht, daß diese Spongiosabälkchen wohl eher mit "gezogenen Fädchen" vergleichbar seien; da diese Fädchen tatsächlich, wie wir eindeutig nachweisen konnten, auf Zug beansprucht werden, ist es dementsprechend nicht angebracht, von "Stützbälkchen" zu sprechen. Durch sie wird die Alveole nicht gestützt, vielmehr werden die Septen dadurch untereinander verspannt. Man sollte aus diesem Grunde Bezeichnungen wie "Zugbälkchen" oder "Spannbälkchen" verwenden.

Vergleichen lassen sich diese statischen Verhältnisse mit einem System von Stützen, wie z.B. bei einer Überlandleitung. Jeweils zwischen zwei Pfeilern (Stützen) sind Gewichte (Stromkabel) eingehängt. Die Träger werden zwischen den Ansatzstellen der Aufhängungen quer auf Zug beansprucht, während sie in ihrer Längsrichtung die Last der Gewichte als Druck auf ihre Unterlage übermitteln.

d) Zentrische Belastung nur eines Zahnes;  
Biegung des Septums, Versuch XII

Die Versuchsanordnung beim Ermitteln der Werte geschah ähnlich der bei der Belastung A.

Die Vorlast war wiederum 6,6 kg, jedoch wurde nur die eine Wurzel belastet. Die Gesamtlast betrug in diesem Versuch 50,0 kg, somit die Hauptlast 43,4 kg.

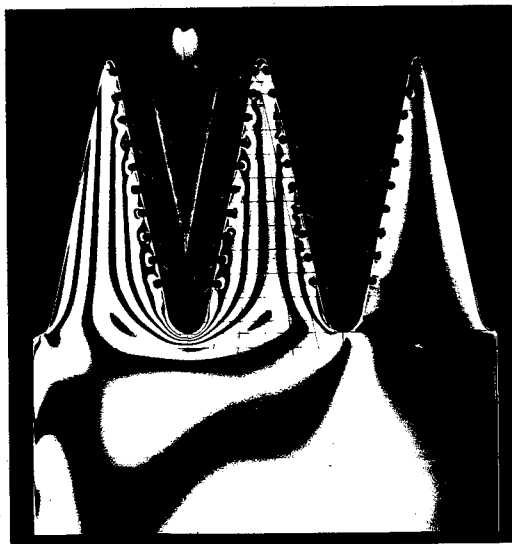


Abb. 36 : Die Isochromaten im Modell IV bei zentrischer Belastung (Lasthöhe 50 kg) nur eines Nachbarzahnes des Mittelseptums: Biegung.

In allen Einzelheiten wurde auch bei dieser Belastung der Versuch genau wie bei Belastung A durchgeführt.

## Mittel - Symmetrielinie

Punkte	$\varphi$	$h$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	30	0,55	-0,17	+2,005	-4,045
2	30	0,62	0,03	+3,23	-3,59
3	30	0,66	0,09	+3,09	-4,17
4	30	0,65	0,21	+2,315	-4,835
5	30	0,71	0,29	+2,165	-5,645
6	30	0,78	0,31	+2,43	-6,15
7	30	0,86	0,33	+2,75	-6,71
8	30	0,86	0,35	+2,63	-6,83
9	30	0,85	0,34	+2,635	-6,715
10	30	0,82	0,34	+2,47	-6,55
11	30	0,76	0,43	+1,6	-6,76
12	30	0,52	0,59	-0,68	-6,4
13	30	0,2	0,75	-0,34	-5,6
14	30	0,6	0,81	-1,56	-8,16
15	35	0,95	0,87	+0,005	-10,445

Außenlinie (ganz links im Bild)  
mit Basispunkt (13) unter dem  
linken Alveolenfundus

Punkte	$\varphi$	$h$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	10	0,6	0,38	+ 1,02	- 5,58
2	10	1,18	0,72	+ 1,97	-10,81
3	10	1,68	1,07	+ 2,82	-15,66
4	10	2,0	1,40	+ 2,60	-18,40
5	10	2,25	1,69	+ 2,235	-22,515
6	10	2,58	1,85	+ 3,09	-25,29
7	10	2,7	2,07	+ 2,43	-27,27
8	10	2,8	2,27	+ 1,78	-29,02
9	10	2,65	2,74	- 1,865	-31,015
10	10	2,0	3,49	- 9,94	-31,94
11	30	1,0	3,62	-16,22	-27,22
12	70	0,3	3,24	-17,79	-21,09
13	alle	0,0	4,20	-25,2	-25,2

Außenlinie (ganz rechts im Bild)  
mit Basispunkt (13) unter dem  
rechten Alveolenfundus

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	70	0,1	+0,07	+ 0,13	-0,97
2	70	0,5	-0,21	+ 4,01	-1,49
3	70	0,8	-0,45	+ 7,10	-1,7
4	70	1,06	-0,72	+10,15	-1,51
5	75	1,38	-1,02	+13,71	-1,47
6	75	1,65	-1,22	+17,07	-2,43
7	80	1,85	-1,45	+18,875	-1,475
8	80	2,0	-1,67	+21,02	-0,98
9	75	2,0	-1,88	+22,28	-0,28
10	75	1,45	-1,90	+19,375	+3,425
11	80	1,2	-1,56	+15,96	+2,76
12	85	1,25	-0,88	+12,155	-1,595
13	50	0,95	-0,58	+ 8,705	-1,745

Längslinie (halblinks im Bild)

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	20	0,7	0,32	+ 1,93	- 5,77
2	20	1,0	0,52	+ 2,38	- 8,62
3	20	1,16	0,64	+ 2,54	-10,22
4	20	1,40	0,84	+ 2,66	-12,74
5	20	1,55	1,03	+ 2,345	-14,705
6	15	1,72	1,19	+ 2,32	-16,60
7	10	1,77	1,40	+ 1,335	-18,135
8	10	1,78	1,52	+ 0,67	-18,91
9	10	1,46	1,78	- 2,65	-18,71
10	10	1,29	2,00	- 4,905	-19,095
11	60	0,2	2,10	-11,50	-13,70
12	50	0,75	2,02	- 7,995	-16,245

## Längslinie (halbrechts im Bild)

Punkte	$\varphi$	$n$	$\Delta t$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1	50	0,20	+0,10	+0,5	-1,7
2	50	0,37	+0,07	+1,615	-2,455
3	60	0,38	-0,07	+2,51	-1,67
4	60	0,56	-0,19	+4,22	-1,94
5	60	0,70	-0,32	+5,77	-1,93
6	60	0,83	-0,45	+7,265	-1,865
7	65	0,90	-0,57	+8,37	-1,35
8	70	0,90	-0,63	+8,73	-1,17
9	80	1,00	-0,63	+9,28	-1,72
10	10	0,64	-0,51	+6,58	-0,46
11	15	0,91	-0,35	+6,105	-2,905
12	15	1,15	-0,16	+7,285	-5,365

Zusammenfassung der  $\sigma_1$  - Werte

			+ 2,005		
			+ 3,23		
			+ 3,09		
+ 1,02	+ 1,93	+ 2,315	+ 0,5	+ 0,13	
+ 1,97	+ 2,38	+ 2,165	+ 1,615	+ 4,01	
+ 2,82	+ 2,54	+ 2,43	+ 2,51	+ 7,10	
+ 2,62	+ 2,66	+ 2,75	+ 4,22	+10,15	
+ 2,235	+ 2,345	+ 2,63	+ 5,77	+13,71	
+ 3,09	+ 2,32	+ 2,635	+ 7,265	+17,07	
+ 2,43	+ 1,335	+ 2,47	+ 8,37	+18,875	
+ 1,78	+ 0,67	+ 1,6	+ 8,73	+21,02	
- 1,865	- 2,65	- 0,68	+ 9,28	+22,28	
- 9,94	- 4,905	- 3,4	+ 6,58	+19,375	
-16,22	-11,50	- 1,56	+ 7,105	+15,96	
-25,2	-17,79	- 7,995	+ 0,005	+ 7,285	+12,155 + 8,705

Zusammenfassung der  $\sigma_2$  - Werte

			- 4,045		
			- 3,95		
			- 4,17		
- 5,58	- 5,77	- 4,835	- 1,7	- 0,97	
-10,81	- 8,62	- 5,645	- 2,455	- 1,49	
-15,66	-10,22	- 6,15	- 1,67	- 1,7	
-18,40	-12,74	- 6,71	- 1,94	- 1,51	
-22,515	-14,705	- 6,83	- 1,93	- 1,47	
-25,29	-16,60	- 6,715	- 1,865	- 2,43	
-27,27	-18,135	- 6,55	- 1,53	- 1,475	
-29,02	-18,91	- 6,76	- 1,17	- 0,98	
-31,015	-18,71	- 6,4	- 1,72	+ 0,28	
-31,14	-19,095	- 5,6	- 0,46	+ 3,425	
-27,22	-13,70	- 8,16	- 2,905	+ 2,76	
-25,2	-21,09	-16,245	-10,445	- 5,365	- 1,595
					-1,745

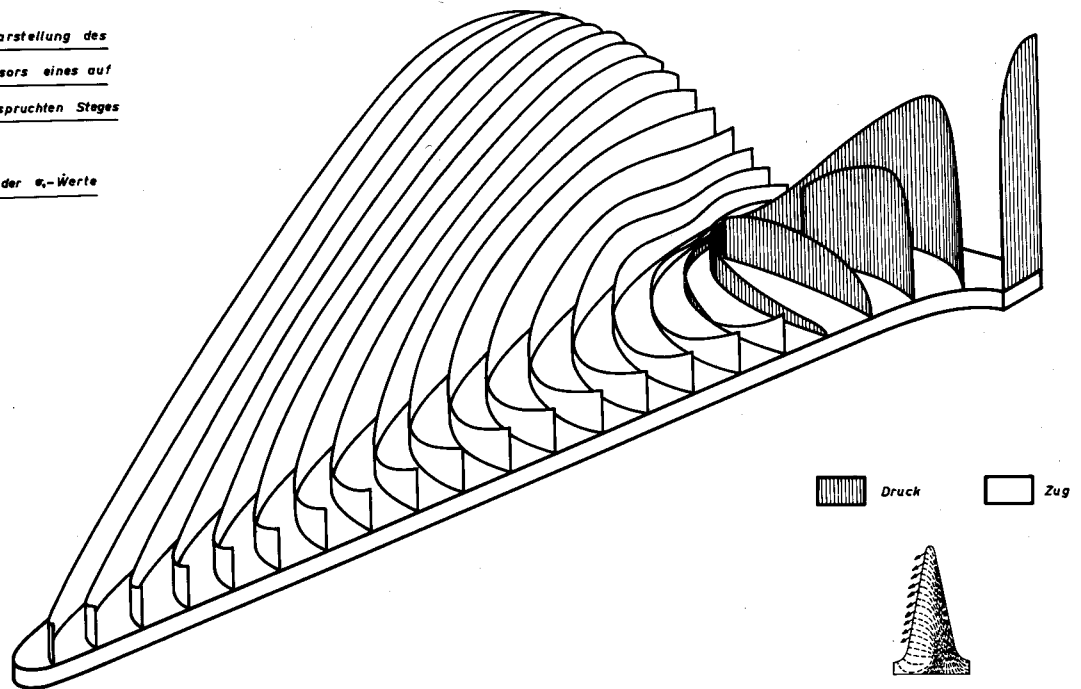
Die parallelperspektivischen Darstellungen der Werte (Abb. 37 a und 37 b) sind in derselben Weise wie für die der Belastung A interpoliert und angefertigt worden.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind beide Hauptspannungsliniensysteme mit ihren Lamellen in zwei verschiedenen Zeichnungen dargestellt. Beide zeigen dasselbe Septum bei einer einzigen Belastung und in einem einzigen Spannungszustand. Die Lamellen, d.h. die Hauptspannungen durchkreuzen sich in beiden Systemen immer rechtwinklig.



Räumliche Darstellung des  
Spannungstensors eines auf  
Biegung beanspruchten Steges

Darstellung der  $\sigma_x$ -Werte



Räumliche Darstellung des  
Spannungstensors eines auf  
Biegung beanspruchten Steges

Darstellung der  $\sigma_x$ -Werte

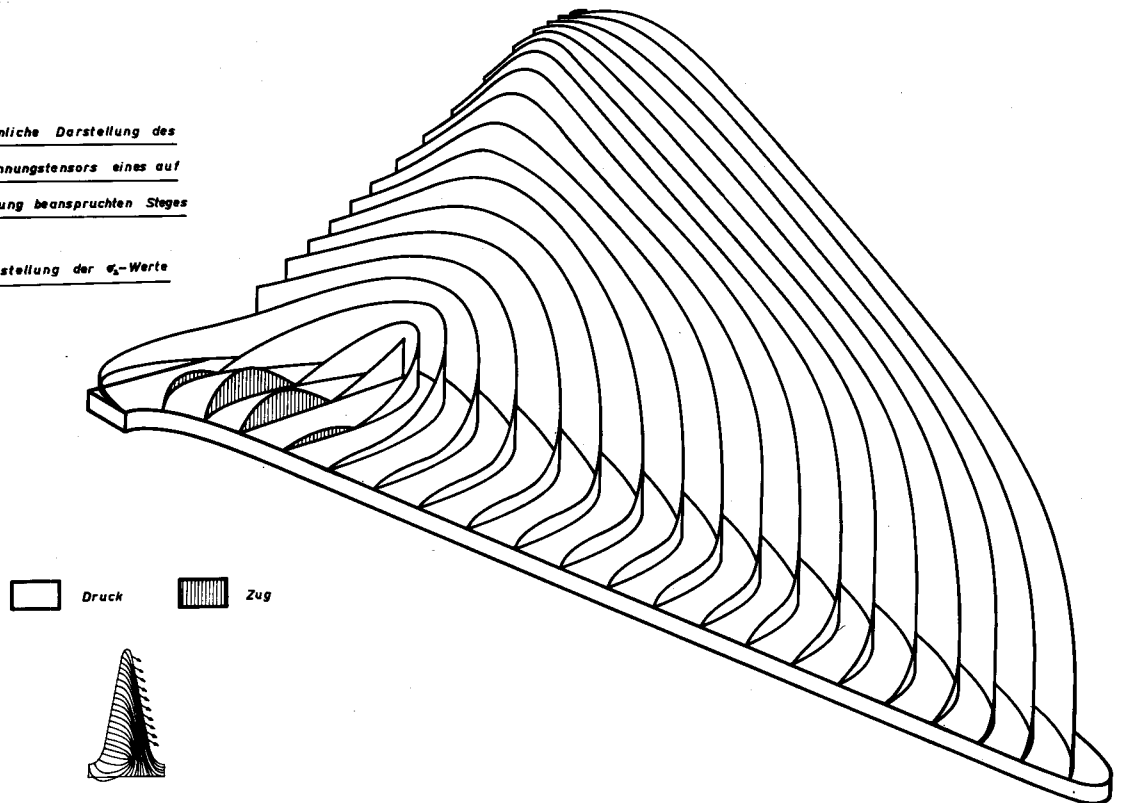


Abb. 37 a und 37 b : Räumliche Darstellung des Spannungstensors eines nur einseitig auf Zug beanspruchten, gebogenen Septums.

Aus den Versuchen geht hervor, daß die Biegung der Septen neben der Stauchung eine Hauptbeanspruchung ist.

Die Darstellungen 37 a und 37 b zeigen die für gebogene Körper typische Verteilung der Spannungen:

Entlang der Alveolenoberfläche des belasteten Zahnes, zu dem das Septum hin gebogen ist, verlaufen hohe Druckspannungen, die im apicalen Drittel einen Maximalwert erreichen. Um den Alveolenfundus des belasteten Zahnes herum, parallel zur Oberfläche, lassen sich ebenfalls hohe Druckspannungen nachweisen (Abb. 37 b). Zum gegenüberliegenden Septumrand hin biegen die Druckspannungen um und treffen senkrecht auf diesem auf. Wertemäßig sind sie an dieser unbelasteten Oberfläche = 0. In der Nähe des Fundus des Nachbarzahnes weist dieses System der maximalen Spannungen in diesem Versuch sogar Zug auf!

Das System der minimalen Spannungen (Abb. 37 a) zeigt im Verlauf der Alveolenoberfläche des unbelasteten Nachbarzahnes enorme Zugspannungen; auch diese erreichen im apicalen Drittel maximale Werte. In der Weise, die für Biegung charakteristisch ist, ändern auch diese Spannungen ihre Verlaufsrichtung und biegen um in der Mitte des Septums, um ebenfalls auf der gegenüberliegenden Alveolenoberfläche senkrecht aufzutreffen. Soweit die Zugbeanspruchung durch die Periodontalfasern an der Septumwand zum Apex hin reicht, behalten diese Spannungen einen gewissen Wert bis an die Alveolenoberfläche bei. Um den Fundus des belasteten Zahnes weist auch dieses System senkrecht zur Fundusoberfläche (analog zu dem Befund bei der Belastung A!) Druckspannungen auf.

#### Zusammenfassung.

Bei beiden Belastungen A und B ließ sich für das Mittelseptum beim Modell IV nachweisen:

Auf der Seite des belasteten Zahnes verlaufen in cervical-apicaler Richtung Druckspannungen, die zum Apex hin stetig zunehmen. Bei einer Biegebeanspruchung (Belastung B) liegen die größten Druckwerte im apicalen Drittel der Alveolenwand, die auf der Seite des belasteten Zahnes hin liegt.

Das System der rechtwinklig kreuzenden Spannungen weist - soweit die Beanspruchung über die Periodontalfasern als Zug geschieht - auch im Innern des Septums in beiden Fällen Zugspannungen auf: Bei reiner Stauchung quer zwischen beiden Seitenwänden und von relativ geringen absoluten Werten, bei Biegung quer nur zunächst geringe, nach Umbiegen zu parallelem Verlauf an der gegenüberliegenden Septumwand jedoch hohe Zugspannungen.

Um den Apex des belasteten Zahnes herum bestehen bei beiden Belastungen in beiden Hauptspannungssystemen Druckspannungen.

## V Die Statik des Alveolarfortsatzes in neuer Sicht

Über die Beanspruchung des alveolären Knochens bestand bisher folgende Vorstellung:

Durch die Fasern des Aufhängeapparates wird der Knochen "paradental" auf Zug beansprucht, während zum Beispiel eine schleimhautgetragene Prothese genau entgegengesetzt den Knochen auf Druck beansprucht.

Diese Vorstellung berücksichtigt eine Unterscheidung zwischen äußerer und innerer Beanspruchung nicht. Obwohl sich viele Untersucher mit diesem Problem eingehend befaßten, hat bisher niemand eine äußere von einer inneren Beanspruchung unterschieden.

Bei komplizierten Körpern kann in der Regel aus den angreifenden Kräften nicht auf Spannungen im Innern geschlossen werden. In einem solchen Fall sind spezielle Versuche notwendig.

In den Versuchen dieser Arbeit wurde die Wirkung des Periodontalgewebes zwischen den Faserzügen nicht berücksichtigt. Wie im Kapitel A "Literatur" bereits erwähnt, haben viele Autoren bisher die Meinung vertreten, daß dieses Gewebe durch seinen Flüssigkeitsreichtum und die zahlreichen Anastomosen zu den Knochenmarksräumen eine "puffernde Wirkung" habe. Dieser Ausdrucksweise können wir uns nicht anschließen, weil damit ausgedrückt werden soll, daß die einwirkende Kraft in ihrer Wirkung abgepuffert, d.h. verringert in ihrer Größe, dafür jedoch verlängert auf den Knochen einwirken sollte. Ein Puffersystem wäre mit Luft als Medium denkbar: Ein Teil der kinetischen Energie würde zur Kompression der Luft verwendet, dieser Teil der Energie würde dann hinterher (!) wieder frei. Flüssigkeiten sind inkompressibel, daher läßt sich ein solches System mit Flüssigkeit (statt Gas)

nicht denken. Dagegen kann durch einen Flüssigkeitsmantel um die Wurzel die Bewegung dieses Zahnes in ihrem Ausmaß verringert werden.

Dies bedeutet jedoch, daß bei Stößen, bei denen die Kraft in verhältnismäßig kurzer Zeit auf den Zahn einwirkt, die äußere Beanspruchung für den Alveolarknochen Druck sein muß. Da in einem Flüssigkeitsraum der Druck sich gleichmäßig in alle Richtungen fortpflanzt, ist in einem ideal gedachten Fall, wenn nämlich das Flüssigkeitsvolumen nur von Wurzel- und Alveolenoberfläche eingeschlossen wäre, der Alveolarknochen überall gleich durch Druck belastet.

Weil aber die Gewebe als elastisch anzusehen sind und bei exzentrischen, besonders aber bei horizontalen Bewegungen Flüssigkeitsverschiebungen durch die schon erwähnten Anastomosen in die Knochenmarksräume ermöglicht werden, halten wir lokale, kurzdauernde Druckwirkungen auf die Partien des alveolären Knochens für möglich, auf die die Wurzel hinbewegt wird: am Alveoleneingang auf der der Lasteinleitung gegenüberliegenden Seite, in der Nähe des Apex auf der Seite der Lasteinleitung.

Die exzentrische Belastung läßt sich als zusammengesetzt denken aus einer zentrischen und einer horizontalen Komponente.

Diese Vorgänge spielen wohl bei Impulsbelastungen eine gewisse Rolle, aber in jedem anderen Fall, bei dem über das Fasersystem, insbesondere das lig. obliquum, die Belastung des Zahnes vermittelt wird, ist für den Alveolarknochen die äußere Beanspruchung Zug.

Bei allen größeren Belastungen und auch bei den länger dauernden, wie sie beim Beißen und Kauen hauptsächlich vorkommen, wird die einwirkende Last nach übereinstim-

mender Meinung aller Untersucher über das lig. obliquum vom Zahn auf den Alveolarknochen übertragen.

Die angestellten Versuche, bei denen lediglich diese Wirkungsweise bei der Weiterleitung der Kraft untersucht wurde, beweisen, daß im Bereich der derart funktionell wirksamen Faseranteile auch im Innern der Septen Zugspannungen auftreten.

Sie verlaufen horizontal durch das Septum, wenn die beiden benachbarten Zähne gleichstark zentrisch belastet werden.

Die von zahlreichen Autoren beschriebenen, dieser Zugrichtung entsprechend verlaufenden Spongiosabälkchen, wurden allgemein als "Stützbälkchen" bezeichnet; ihrer tatsächlichen Funktion nach sollten sie in "Spannbälkchen" umbenannt werden.

Eine neue und wesentliche, bisher noch nicht beschriebene Erkenntnis aus unseren Versuchen ist aber eine erhebliche Druckspannung in der Längsrichtung eines wie oben angegeben beanspruchten Septums. Diese Druckspannungen übersteigen sogar in ihrer Größe die der horizontalen Zugspannungen beträchtlich; sie laufen der Hauptbelastungsrichtung der Zähne im Innern der Septen ungefähr parallel, obwohl Systeme von Fasern in gewissem Winkel eingeschaltet sind, so daß die äußere Beanspruchung des Septums durch die primäre Druckkraft als Zug wirksam wird.

In diesem Fall muß man von einer inneren Druckbeanspruchung des Knochens sprechen, deren Größe von der Spitze des Septums zu dessen Basis hin zunimmt und an der Alveolenoberfläche im unteren Alveolendrittel ein Maximum erreicht.

Mit Einschränkungen sind diese statischen Verhältnisse

mit denen einer Stehleiter vergleichbar: Die Belastung einer Sprosse wird als Druck in der Vertikalen durch die starren Stützen der Leiter weitergeleitet. In der Horizontalen wirkt sich bei derselben Lasteinwirkung eine Zugspannung aus, der eine Kette oder ein Seil entgegenwirken kann.

Für den gesamten Alveolarfortsatz könnte man als statischen Vergleich ein System, wie es bei Überlandleitungen vorkommt, heranziehen: Träger (Masten) stützen die Last der Kabel, sie werden vertikal auf Druck beansprucht (innere Beanspruchung), an den Masten selbst ziehen die Kabel durch ihr Gewicht (äußere Beanspruchung).

Auch bei einer ungleich starken Belastung der Zähne beiderseits eines Septums, ist es für das Septum selbst unbedingt erforderlich, die äußere von der inneren Beanspruchung streng zu trennen. Wiederum ist die äußere Beanspruchung über die Fasern des Periodontiums Zug; weil in diesem Fall die Belastung ungleichmäßig, im Extremfall sogar nur auf einer Seite ist, wird das Septum zum belasteten bzw. zum mehrbelasteten Zahn hin gebogen. Es zeigt die für einen Biegebalken typische Verteilung von Zug- und Druckspannungen in seinem Innern.

Längs der Seite des belasteten Zahnes, also ungefähr parallel zur Richtung der Lasteinleitung, verlaufen Druckspannungen. Gegenüber, längs der anderen Seite, parallel zur Wurzelachse des unbelasteten bzw. weniger belasteten Zahnes, finden sich Zugspannungen. Das schon bei der zentrischen Belastung beschriebene Maximum der Beanspruchung im apicalen Alveolendrittel an der Alveolenoberfläche ist in diesem Fall noch deutlich ausgeprägt.

Insgesamt hat man sich die Spannungsverteilung um einen belasteten Zahn so vorzustellen, daß zirkulär-tangential und längs-tangential Druckspannungen, senkrecht zur Alveolenoberfläche jedoch Zugspannungen den Knochen

beanspruchen, soweit wie die Fasern zwischen Zahn und Knochen auf Zug beansprucht werden. Um den Apex herrschen in allen drei Hauptrichtungen Druckspannungen.

Die innere Beanspruchung des Knochens ist vertikal Druck, sowohl bei einer äußeren Zugbeanspruchung der Periodontalfasern des belasteten Zahnes, als auch bei einer möglichen Druckbeanspruchung des Periodontalgewebes (Impulsbelastung).

Bei exzentrischen und horizontalen Belastungen einzelner Zähne hat die Untersuchung der Wirkung der Kräfte, die über die Periodontalfasern (lig. obliquum) den Alveolarknochen beanspruchen, folgendes gezeigt: Der durch den Bandapparat mit dem Alveolarknochen verbundene Zahn kippt bei diesen Belastungen um eine Drehachse in seinem Innern. Die Kraft, die physiologischerweise dabei auf die Zahnkrone einwirkt, ist erwiesenermaßen nicht so groß, daß der Zahn die Alveolenwand berührt.

Die Auslenkung bewirkt ein Anspannen der Aufhängefasern auf der einen Seite am Alveoleneingang und diagonal dazu auf der anderen Seite am Apex; jeweils auf der gegenüberliegenden Seite am Alveoleneingang und am Apex werden die entsprechenden Fasern entspannt.

Im so beanspruchten Alveolarknochen sind die inneren Spannungen an den Stellen, an denen die Periodontalfasern angespannt wurden, Zugspannungen senkrecht zu Alveolenoberfläche. Sie sind in Bezug auf die in diesen Gebieten der Alveolenoberfläche parallel laufenden Spannungen groß. An den Zonen der Entlastung sind die senkrecht zur Alveolenoberfläche verlaufenden Spannungen sehr gering.

In der entlasteten Septumsspitze ist auch der der Alveolenoberfläche parallel gerichtete Druck sehr gering, so daß in diesem Gebiet trotz relativ hoher Belastung des Zahnes in allen Richtungen nur geringe innere Kräfte



im Knochen wirksam sind.

Im apicalen Entlastungsgebiet bestehen besonders hohe, der Alveolenwand parallele Druckspannungen (vgl. Abb. 38).

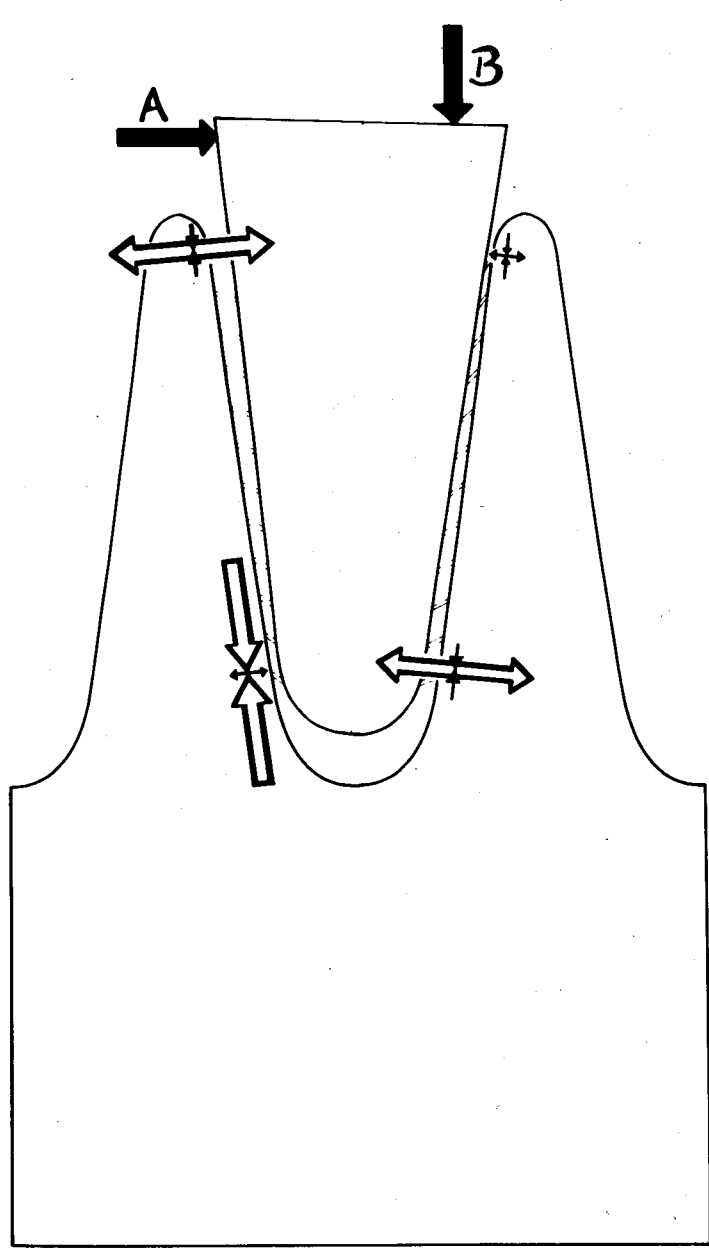


Abb. 38 : Grafik zur Darstellung von Spannungszuständen im Innern der Nachbarsepten eines horizontal (A) bzw. exzentrisch (B) belasteten Zahnes am Alveoleneingang und am Alveolenfundus.

Bei experimentellen und klinisch festgestellten Fehlbelastungen kommt es zu Kippungen von Zähnen, bei denen durch histologische Untersuchungen im apicalen Drittel auf der Alveolenoberfläche, zu der die Wurzel hinbewegt wird, Resorptionen nachweisbar sind. Ausgehend von den Befunden, hat man ursprünglich einen direkten Druck der Wurzelspitze durch ein Anstoßen des Zahnes an der knöchernen Alveole und Zerquetschungen des Periodontalgewebes angenommen. Nachdem in der neueren Literatur durch entsprechende Versuche und Messungen erklärt und beschrieben wurde, daß wegen der Relation Zahnbeweglichkeit-Periodontalspaltbreite die Zahnwurzel unter physiologischen Belastungen der Alveolenoberfläche sich praktisch nur etwas nähert (nur  $1/4$  der Periodontalspaltbreite wird von den Exkursionen des belasteten Zahnes beansprucht!), ist dieser bestehenden Theorie für die Erklärung der Atrophie die wesentliche Grundlage entzogen.

Es ist entscheidend, daß in diesem apicalen Gebiet eine innere, außerordentlich hohe Druckbeanspruchung im Knochen nachweisbar ist, obwohl die äußere Beanspruchung durch die eingetretene Entlastung minimal ist.

Diese innere Druckbeanspruchung, die der Alveolenwand parallel gerichtet ist, erklärt sich durch die klassischen Spannungsverhältnisse, wie man sie vom Biegebalken her kennt:

Auf der Seite, auf der die Fasern des Zahnhalteapparates am Alveoleneingang stark gespannt werden, wird das Septum besonders wirkungsvoll zum Zahn hingezogen, daher die hohen inneren Zugspannungswerte in der Spitze dieses Septums und die hohen Druckspannungswerte auf der Seite, zu der das Septum hingebogen wird.

Das andere Septum wird in der Nähe seiner Basis zum

belasteten Zahn besonders stark gezogen. Dieser Zug kann aber nicht so wirkungsvoll zu einer Verbiegung dieses Septums führen. Der entstehende Druck entlang der Alveolenoberfläche bleibt also klein.

Diese neuen Erkenntnisse vermögen den schon bekannten Befunden eine neue Grundlage zu geben.

Die Modelluntersuchungen an einer funktionell beanspruchten Zahnreihe ergaben, daß sich der Alveolarfortsatz gegen den übrigen Kieferknochen abgrenzen läßt. Die Grenze zwischen beiden liegt in der Höhe der Wurzelspitzen aller Zähne, in einem Gebiet also, das auch als "apicale Basis", nach Lundgreen, oder "Wurzelgrund" nach A.M. Schwarz, bezeichnet wird, und in dem von fast allen Autoren in übereinstimmender Weise geordnete Spongiosastrukturen beschrieben wurden.

An der "apicalen Basis" ist also neben einer anatomischen Abgrenzung auch eine funktionelle Unterscheidung der Kiefer möglich.

Der Alveolarfortsatz besteht demnach anatomisch aus der Summe aller Septen, die durch die von den Kieferknochen aus gezogenen oralen und buccalen Kompaktaanteilen gefaßt sind. Statisch-funktionell ist der Alveolarfortsatz selbständig; dies erklärt auch die klinischen Befunde der Anpassung bei Zahnverlust, Anodontie etc.

## VI Zusammenfassung

Nach dem Untersuchungsverfahren der Spannungsoptik wurde die Beanspruchung von Kompakta und Spongiosa in den Alveolarfortsätzen der Kieferknochen bei Zahnbelastungen ermittelt. Im Anschluß an eine eingehende Diskussion der Publikationen zum Thema wurde zunächst auf die physiologisch-anatomischen Gegebenheiten im Alveolarfortsatz eingegangen und insbesondere die Art der Kraftübertragung vom belasteten Zahn auf den alveolären Knochen erörtert.

Die spannungsoptischen Versuche in dieser Arbeit berücksichtigen eine durch neuere Untersuchungen erwiesene Tatsache, daß unter physiologischen Gegebenheiten der an zugfesten Bändern aufgehängte Zahn den Alveolarknochen weder berührt noch direkt belastet. Auf die Notwendigkeit der Unterscheidung in innere und äußere Beanspruchung für die Beurteilung der Beanspruchung des Knochens wurde hingewiesen. Ein besonderer Versuch demonstrierte die Bedeutung der Periodontalfasern für die äußere Beanspruchung des Knochens und den grundlegenden Unterschied für die inneren Spannungen im Knochen bei Einhängung im Gegensatz zur Einkeilung des Zahnes. Die zweidimensionalen spannungsoptischen Versuche wurden in ihrem Aussagewert bestätigt durch einen dreidimensionalen Vergleichsversuch. Verschiedene Belastungszustände wurden imitiert und als innere Spannungen in einem gestauchten und einem gebogenen Septum nachgewiesen:

1. Entlang der Alveolenoberfläche eines zentrisch belasteten Zahnes in cervikal - apikaler Richtung und durchgehend um den Apex Druckspannungen, in zirkulär - tangentialer Richtung um die Alveole ebenfalls Druckspannungen, dagegen infolge der äußeren Beanspruchung als Zugwirkung über die Periodontalfasern senkrecht

zur Alveolenoberfläche Zugspannungen, um den Alveolenfundus in allen drei Richtungen des Raumes Druckspannungen. Die Druckspannungen in der Septumlängsachse sind bedeutend stärker als die zu diesen senkrecht verlaufenden Zugspannungen und erreichen im apikalen Wurzel Drittel Maximalwerte.

2. Für die Interdental- bzw. Interradikularepten ergibt sich: Bei gleichmäßiger Belastung auf beiden Seiten eines Septums wird dieses gestaucht. Dabei kommt es zu Zugspannungen, die quer durch das Septum zwischen den beiden Nachbaralveolen wirken. Die in der Literatur in diesem Zusammenhang beschriebenen horizontalen "Druckbälkchen" des Septums sollten, den wahren Spannungsverhältnissen entsprechend, besser in "Zugbälkchen" umbenannt werden. In der Längsrichtung des Septums, also ungefähr parallel zur Richtung der Zahnbelastung, gibt es Druckspannungen, die um ein Vielfaches größer sind als die horizontalen Zugspannungen.

Werden beide Nachbarzähne eines Septums ungleich stark belastet oder nur einer, so kommt es zu einer Biegebeanspruchung des Septums zu der Seite hin, die stärker belastet ist. Auch in diesem Fall bestehen Druckspannungen parallel zur Alveolenoberfläche des belasteten Zahnes. Dem Rand der Nachbaralveole parallel lassen sich Zugspannungen nachweisen. Auch diese erreichen im unteren Alveolendrittel ihren maximalen Wert.

3. Der Alveolarfortsatz ist ein statisch - funktionell selbständiges Gebilde. Er besteht aus der Summe der Interdental- bzw. Interradikularepten und den Knochenlamellen oral und buccal; er reicht bis in die Höhe der apicalen Basis, der Verbindungsfläche aller Wurzelspitzen.

## Literaturverzeichnis

- Aisenberg, M.S.      Histology and Physiology of the Supporting Structure; J.Amer.Dent.Ass.,44.,628-632, 1952
- Ast, Diemer, R.  
Hofmann, M.      Untersuchungen über das elastische Verhalten der Wurzelhaut, des alveolären Knochens und der Wurzelhartsubstanzen; Dt.zahnärztl.Z.,20., 639-647,671-680, 1966
- Barth, M.      Über die funktionelle Struktur des Oberkieferapparates bei Neuweltaffen; Anat.Hefte,56.,171-242, 1919
- Bartholinus      1663; Zit. M.Müller, 1915
- Bauer - Lang      Zit.A.M.Schwarz, 1928
- Benninghoff, A.      Über die Entstehung funktioneller Strukturen; Erg.Bd.Anat.Anz.,71., 62-69, 1930/31
- Bichlmayr, A.      Über den experimentellen Nachweis von Schwachpunkten am Unterkiefer und deren klinische Bedeutung für das Frakturgeschehen; Dt.Zahn-Mund-u.Kieferhk.,6.,448-456, 1939
- Birkenbeil, Ch.      Das Trabekularsystem des Unter- und Oberkiefers unter besonderer Berücksichtigung des Alveolarfortsatzes im Molarengebiet in normalem und pathologischem Zustand; Diss.Köln, 1931
- Black      1897; Zit. G.H.Schumacher, 1962
- Bourgerly      1832; Zit. B.Kummer, 1959
- Braunschweiger, H.      Die Bedeutung der Spongiosa des Unterkiefers für das Röntgenbild; Dt.Zahnk.,56.,64, 1922
- Colland, A.      Etude sur le ligament alvéolodentaire Internat.Mschr.Anat.Physiol.,7., 32-68, 1890
- Csernyei, J.      Knochenstruktur und Röntgenbild des Processus alveolaris; Zahnärztl.Rdsch.Berlin,62.,346-349, 1953
- Culmann, K.      Die graphische Statik; Zürich, 1873
- Davida      1915; Zit. Gámán, F., 1929
- Dempster, W.T.  
a. Duddles, R.A.      Tooth statics: equilibrium of a free body; J. Amer.Dent.Ass.,68.,652-666, 1964

- Dieck, W. Anatomie und Pathologie der Zähne und Kiefer im Röntgenbilde; Fortschr. Geb.Röntgenstr., Erg.Bd.25, L.Gräfe u. Gillem, Hamburg, 1911
- Drum, W. Zur Morphologie der paradentalen Schwundvorgänge; Dt. zahnärztl.Z., 21., 888-896, 1948
- Engel, J. Über die Gesetze der Knochenentwicklung; Sitz.ber.d.math.nat.wiss.Cl.d. K.Akad.d.Wiss., 7., 591-684, 1851
- Eschler, J. Zur Frage der Entwicklung des Paradentiums; Z.Stomat., 37., 134-151, 202-213, 1939
- Eschler, J. Inwiefern stützen experimentelle Studien über die Formgestaltung der paradentalen Gewebe und des Kieferknochens die Grundlagen der FKO; Dt. Zahn-Mund-u.Kieferhk., 6., 759-768, 1939
- Eschler, J. Weiterer Beitrag zur Entwicklung des Paradentiums; Z.Stomat., 39., 79-96, 194
- Eschler, J. Über die Auswirkung und Bedeutung der muskulär-funktionellen Inanspruchnahme des Zahnes für die Entwicklung der paradentalen Gewebe zum Gewebssystem Paradentium; Dt.zahnärztl.Z., 3., 603-612, 693-705, 1948
- Eschler, J. Die Kausalgenese des Paradentiums; Morph.Jb., 90., 262-297, 1950
- Eschler, J. Kontinuierliche Zug- und Druckspannungen im Experiment und in der Klinik; Österr.Z.Stomat., 50., 169-186, 1953
- Eschler, J. Das Kausystem, ein Funktionskreis; Morph.Jb., 104., 444-459, 1963
- Eschler, J. und K. Häupl Die Drucktheorie Flourens' vor dem Forum tierexperimenteller Untersuchungen; Z.Stomat., 38., 423-453, 469-488, 499-516, 1940
- Evans, F.G. Stress and strain in bones; Ch.C. Thomas-Pub., Springfield, Ill.USA, 1957
- Falk Zit. A.M.Schwarz, 1928
- Feneis, H. Gefüge und Funktion des normalen Zahnfleischbindegewebes; Dt.zahnärztl.Z., 7., 467-476, 1952
- Feneis, H. Gefüge und Funktion des normalen Zahnfleischbindegewebes; Blätter f. Zahnhk., 24., 71-82, 1963

- Fick, L. Neue Untersuchungen über die Ursachen der Knochenformen; Elwert. Buchhdlg., Marburg, 1858
- Föppl, E. und E. Mönch Praktische Spannungsoptik; Springer Verl., Berlin, 1959
- Franke, J. Über die Kraftverteilung im paradentalen Stützgewebe bei der achsialen Beanspruchung des Zahnes; Dt.zahn-ärztl.Z., 7., 236-239, 1952
- Franke, O. Beitrag zur funktionellen Anpassung des Knochens mit besonderer Berücksichtigung des Unterkiefers vor und nach Zahnverlust; Diss. Marburg, 1922
- Frocht, M.M. Photoelasticity; J. Wiley & Sons, New York, Vol I, 1960; Vol II, 1957
- Fröhlich, E. Ein Beitrag zur Morphologie der paradontalen Schwundvorgänge; Dt.zahn-ärztl.Z., 3., 187-217, 1948
- Gabel, A.B. A new Theorie of the Mechanics of Tooth support; Dent.Cos., 76., 677-683 1934
- Gable The American Textbook of Operative Dentistry; Lean a. Febiger, 1954
- Gaman, F. Beiträge zur Frage der Kieferknochenstruktur unter normalen und einigen krankhaften Verhältnissen; Z.Stomat., 27., 824-845, 1929
- Gebser Diss.Halle; Zit. G.Wetzels, 1925
- Glattes, M. Mikroskopische Untersuchungen am normal belasteten Alveolarknochen in verschiedenen Altersstufen; Dt.Zahn-Mund-u.Kieferhk., 3., 827-837, 1936
- Görke, O. Beitrag zur funktionellen Gestaltung des Schädels bei den Anthropomorphen und Menschen durch Untersuchung mit Röntgenstrahlen; Arch.Anthropol., 29., 91-108, 1903
- Gottlieb, B. und B. Orban Die Veränderungen der Gewebe bei übermäßiger Beanspruchung der Zähne; G.Thieme, Leipzig, 1931
- Groß, H. Histologische Untersuchungen über das Wachstum der Kieferknochen beim Menschen; Dt.Zahnhk., 89., 1934
- Häupl, K. Die Bedeutung der Funktion für Gewebsneubildungen und Gewebsumbau im Parodontium; Parad., 13., 1-9, 1941
- Häupl, K. Lehrbuch der Zahnheilkunde; Verl. Urban u. Schwarzenberg, Wien, 1949



- Häupl, K. Zahnärztliche Prothetik; Joh. Ambr. Barth, Leipzig, 1961
- Häupl, K. und D. Lang Die marginale Parodontitis; Meusser, Berlin, 1927
- Harndt, E. Parodontitis und Parodontose; C. Hanser-Verl., München, 1950
- Hiltscher, R. Ein praktisches Lateralextensometer zur Bestimmung der Spannungssumme; Kgl. tekn. Högskol. Handb. Nr. 42, Stockholm 1950
- Hohl Die Befestigung des Zahnes in der Alveole; Dt. Vierteljschr. Zahnk., 7., 15-24, 1867
- Hofmann, M. Zahnbeweglichkeit - Bestimmung und Analyse; Dt. zahnärztl. Z., 18., 924, 1963
- Humphry 1858; Zit. F.G. Evans, 1957
- Imada, H. und Mitarbeiter Spannungsverteilung im Oberkieferknochen (japanisch); J. Yonago Med. Ass., 10., 318-338, 1959
- Jajima Spannungsverteilung in den Zähnen (japanisch); J. Yonago Med. Ass., 121-130, 232-332, 365-368, 1954; 81-94, 1959
- Jung, F. Die Zahnbeweglichkeit; Dt. zahnärztl. Z., 18., 934-936, 1963
- Katz, A. Architektur des Unterkiefers im Zusammenhang mit der Lage der Wurzeln und der Widerstandsfähigkeit des Zahnbogens beim Erwachsenen; Vjschr. Zahnk., 47., 85-108, 214-249, 1931
- Kallhardt, H. Über den Durchbruch der bleibenden Zähne; Österr. Ung. Vjschr. Zahnk., 20., 145-182, 116-144, 1904
- Kazis, H. and A.J. Kazis Complete Mouth Rehabilitation Through Crown and Bridge Prosthodontics; H. Kimpton, London 1956
- Kellner, E. Histologische Befunde an antagonistischen Zähnen; Z. Stomat., 26., 271-283, 1928
- Klein, A. Systematische Untersuchungen über die Periodontalbreite; Z. Stoma., 26., 417-439, 1928
- Knese, K.H. Knochenstruktur als Verbundbau; G. Thieme-Verl., Stuttgart, 1958
- Köhler, E. Das normale Parodontium der Milchzähne und seine Genese; Dt. Zahn-Mund-u. Kieferhk., 13., 284-317, 1950

- Motsch, A. Spannungsoptische Experimente zur funktionellen Anatomie des Unterkiefers; Med.Habil.Schr., Freiburg/Br. 1965
- Mühlemann, H.R. Die physiologische und pathologische Zahnbeweglichkeit; Schweiz.Mschr. Zahnhk., 61., 1-68, 1951
- Müller, M. Die Gewebsspannung im Kieferknochen; Dt.Mschr.Zahnhk., 9., 400-418, 1915
- Müller, R.K. Das Lateralextensometer und seine Anwendung in der ebenen Spannungsoptik; Die Bautechnik, 38., 364-368, 1961
- Orban, B. Ist das "Paradentium" eine "organische Einheit"? Z.Stomat., 24., 515-525, 1926
- Orban, B. Beziehungen zwischen Zahn und Knochen. Bewegung der Zähne; Z.Anat.Entw.Gesch., 82., 804-816, 1927
- Parfitt, G.J. An investigation of the normal variations in the alveolar bone trabeculation; Oral surg.St.Louis, 15., 1453-1463, 1962
- Pauwels, F. Bedeutung und kausale Erklärung der Spongiosastruktur in neuer Auffassung; Ärztl.Wschr., 3., 379, 1948
- Reichenbach, E. Festsitzender partieller Ersatz (Brückenersatz), Allgemeines; in Hofer/Reichenbach/v.Kreudenstein/Wannenmacher, Lehrbuch der klinischen Zahnheilkunde II/3.Auflage, 60-68, 1963
- Picton, D.C.A. Distortion of the jaws during biting; Arbh.oral.biolog. 7., 573-580, 1962
- Rohen, J. Der Kauapparat als funktionelle Gestalt unter besonderer Berücksichtigung des Parodontiums; Fortschr.d. Kieferorthopädie, 18., 280-296, 1957
- Roux, W. Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen; Funktionelle Anpassung, Bd.1, Verl.W.Engelmann, Leipzig, 1895
- Saint Venant Zit. H.Wolf, Spannungsoptik, 1961
- Schenk 1896; Zit. F.Gaman, 1929
- Schlüter, K. Form und Struktur des normalen und des pathologisch veränderten Wirbels; Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd.30, Hippokrates-Verl.Stuttgart, 1965

- Schröder, H. Über die Auswirkung der Kaudruckkräfte auf den Aufbau und die Struktur der den Zahn umschließenden Knochen; Dt.Zahn-Mund-u.Kieferhk., 1., 214-235, 1934
- Schumacher, G.H. Anatomie und Physiologie des Parodontiums; Dt.Stomat., 12., 305-330, 1962
- Schwarz, A.M. Über die Bewegung belasteter Zähne; Z.Stomat., 1., 40-83, 1928
- Schwarz, A.M. Mathematische Überprüfung des Verhaltens belasteter Zähne; Z.Stomat., 4., 398-403, 1928
- Schwarz, A.M. Ein weiterer Beitrag zur Frage der Bewegung belasteter Zähne; Z.Stomat., 6., 499-515, 1929
- Schweitzer, G. Die Lymphgefäße des Zahnfleisches und der Zähne beim Menschen und bei Säugetieren; Arch.mikr.Anat., 74., 927-999, 1909
- Seipel, C. Über den strukturellen Bau des Unterkiefers beim Menschen; Diss., Bonn, 1934
- Sénarmont Zit. H.Wolf, Spannungsoptik, 1961
- Shore, N.A. Occlusal Equilibration and Temporomandibular Joint Dysfunktion; J.B. Lippincott, Comp., Philad.-Montreal, 1959
- Sicher, H. Die Mechanik im Fixationsapparat des Zahnes bei Belastung und Überbelastung Österr.Z.Stomat., 16., 181-185, 1916
- Sicher, H. Über die Fixation und das Wachstum dauernd wachsender Zähne; Korresp.bl. Zahnärzte, 49., 332-336, 1925
- Stein, G. und J. Weinmann Die physiologische Wanderung der Zähne; Z.Stoma., 8., 733-744, 1925
- Synge 1933; Zit. H.R. Mühlemann, 1951
- Toldt, C. Der Winkelfortsatz des Unterkiefers beim Menschen und bei den Säugetieren und die Beziehungen zu demselben; Sitz.ber.Kais.Akad.Wiss.Wien, 113, 1904
- Tomes, J. 1861; Zit. G.H. Schumacher, 1962
- Triepl, H. Einführung in die physikalische Anatomie; J.F. Bergmann, I u. II 1902, III 1908
- Triepl, H. Architektur der Spongiosa bei abnormer Beanspruchung der Knochen; Anat. Hefte, 25., 211-169, 1904
- Vesalius 1514 - 1564; Zit. B. Ihotsky, 1965

- Walkhoff, O. Der menschliche Unterkiefer im Lichte der Entwicklungsmechanik; Dt.Mschr. Zahnk., 1./2., 1900/1901
- Walkhoff, O. Der Unterkiefer des Anthropomorphen und des Menschen in seiner funktionellen Entwicklung und Gestalt; Selenka, 4.Lief., Kreidelverl., Wiesbaden, 1902/03
- Wannenmacher, E. Das Parodontium; in Hofer/Reichenbach/v.Kreudenstein/Wannenmacher, Lehrbuch der klinischen Zahnheilkunde, II/3. Aufl. 820-834, 1963
- Ward 1838; Zit. F.G. Evans, 1957
- Weber - Thedy, K.W. Die Zuggurtungsfunktion der Wurzelhaut; Dt.zahnärztl.Z., 19., 426-433, 1964
- Wedl, C. Über Gefäßknäuel im Zahnperiost; Arch. path.Anat.Physiolog., 85., 175-177, 1881
- Weidenreich, F. Über die Beziehungen zwischen Zahn, Alveolarwand und Kiefer; Z.Anat.Entw. Gesch., 81., 420, 1926
- Weinmann, J. Das Knochenbild bei Störungen der physiologischen Wanderung der Zähne; Z.Stomat., 5., 397-423, 1926
- Weski, O. Röntgenologisch-anatomische Studien aus dem Gebiet der Kieferpathologie; Vjschr.Zahnk., 37., 1921
- Wetzel, G. Versuche und Beobachtungen zur Schädelstatik; Z.Anat.Entw.Gesch., 76., 261-283, 1925
- Wiessner, V. Die Einwirkung mechanischer Energie auf die Zähne; Österr.Ung.Vjschr.Zahnk., 1./2., 46-83, 257-283, 1908
- Wild, W. Funktionelle Prothetik; B.Schwabe, Basel, 1950
- Winkler, R. Über den funktionellen Bau des Unterkiefers; Z.Stomat., 7., 403-427, 1921
- Wolf, H. Spannungsoptik; Springer Verl.Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1961
- Wüstenhagen, H. Die physiologische Resorption des Alveolarfortsatzes bei Jugendlichen; Dt. Mschr.Zahnk., 20., 593-608, 1923
- Wunschheim, K. 1911; Zit. O.Weski, 1921
- Wymann 1849; Zit. F.G. Evans, 1957
- Wyss, Th. Die Kraftfelder in festen Körpern; Vjschr.Naturfreunde Ges., Zürich, 93., 151-186, 1948

- Zák, B. Photoelastische Analyse in der orthodontischen Mechanik; Z.Stomat.,1., 22-37,2.,87-103, 1935
- Zák, B. Die Reaktionen des Knochens auf mechanische Einwirkungen vom Gesichtspunkte der photoelastischen Methode; Dt. Zahn-Mund-u.Kieferhk.,5.,161-178,1938
- Zák, B. Spannungsoptische Studien; Z.Stomat., 14.,512-539, 1941
- Zielinsky, W. Das Wachstum der Kiefer und Zähne und ihre Beziehungen zur Kaufunktion; Dt. Mschr.Zahnk.,11.,804-840, 1908

Am Ende dieser Arbeit sei Herrn Prof.

Dr. S. S c h r e i b e r  
für die Überlassung des Themas und  
Herrn Doz. Dr. A. Motsch für die  
freundliche Unterstützung bei der  
Durchführung der Arbeit gedankt.

## Lebenslauf

Am 6. Juni 1939 wurde ich, Jürgen Gröneward, als Sohn des Prokuristen Baldur Gröneward und dessen Ehefrau Erika, geb. Leppich, in Berlin-Schöneberg geboren.

Von Ostern 1946 bis Ostern 1950 besuchte ich die Volksschule in Wuppertal-Vohwinkel, anschließend das dortige Gymnasium, an dem ich zu Ostern 1960 die Reifeprüfung bestand. Mit dem Sommersemester 1960 begann ich das Studium der Medizin und der Zahnheilkunde an der Universität zu Köln. Nach bestandenem Vorphysikum setzte ich mein Studium an der Universität in Freiburg i. Brsg. fort, bestand hier im Sommer 1963 das Physikum für Mediziner und Zahnmediziner und legte im Dezember 1966 das Staatsexamen ab.

Seit März 1967 bin ich an der Universitäts- Zahn- und Kieferklinik in Freiburg i. Brsg. als Verwalter einer wissenschaftlichen Assistentenstelle tätig.

# Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Mit Zustimmung des Rektors der Universität, des ordentlichen Professors für Humangenetik und Anthropologie  
Dr. Dr. Helmut Baitsch, ernennet die Medizinische Fakultät durch ihren Dekan  
den ordentlichen Professor der Kinderheilkunde Dr. Wilhelm Künzer

## Herrn Jürgen Grönewald

geboren in Berlin

nach bestandener Prüfung und auf Grund der vorgelegten sehr guten Abhandlung

Spannungsoptische Untersuchungen zur Statik des Alveolarfortsatzes

zum

## Doktor der Zahnheilkunde

Zum Zeichen dessen ist gegenwärtige Urkunde ausgefertigt

Freiburg i. Br., den 6. Dezember 1967

Der Rektor:  
Helmut Baitsch

Der Dekan:  
Wilhelm Künzer





DIE MEDIZINISCHE FAKULTÄT  
DER  
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT  
FREIBURG IM BREISGAU  
VERLEIHT MIT DIESER URKUNDE DEN

**GÖDECKE  
FORSCHUNGSPREIS 1968**

AN HERRN DR. MED. DENT. JÜRGEN GRÖNEWALD  
AUS BERLIN

FÜR DIE ARBEIT

„SPANNUNGSOPTISCHE UNTERSUCHUNGEN  
ZUR STATIK DES ALVEOLARFORTSATZES“

FREIBURG IM BREISGAU, DEN 23. JAN. 1969

MEDIZINISCHE FAKULTÄT  
DER DEKAN

*[Handwritten signature]*