

Simulation von Zahnbewegungen mit Bone Remodelling

Die gebräuchliche Beschreibung der orthodontischen Zahnbewegung mithilfe eines Widerstandszentrums greift zu kurz, da hiermit nur die initiale Reaktion eines Zahns auf die Einwirkung eines Kraftsystems simuliert werden kann. Dagegen erlauben Simulationsmodelle, die auf den so genannten „Bone Remodelling“-Theorien basieren, auch eine Betrachtung der Dynamik der Zahnbewegungen. KN befragte dazu Dipl.-Phys. Prof. Dr. Christoph Peter Bourauel, der in seinem biomechanischen Labor an der Universitätszahnklinik Bonn ein solches Simulations-Rechenmodell entwickelt hat.

KN Wie genau ist die Berechenbarkeit der Knochen-Remodellierungsprozesse

Knochen und Behandlungselementen bestimmt werden. Neben diesen Parametern

benötigen wir Angaben über die klinisch eingesetzten Kraftsysteme und über die Zahnstellungen. Zur Bestimmung von Zahn- und Bracketpositionen werden kieferorthopädische Modelle und Röntgenbilder

vermessen, die Kraftsysteme werden durch Kalibrierung der Behandlungselemente ermittelt. Erst dann kann mit der Simulation begonnen werden.

Da der Zahnhalteapparat einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Zahnbewegung hat, und es in der Literatur sehr widersprüchliche Aussagen zu dessen Materialverhalten gibt, wurden hierzu sehr umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt.

Weiterhin musste ein theoretisches Modell zur Simulation des kieferorthopädischen Knochenumbaus entwickelt werden. Dieses Modell war das Ergebnis von vier bis fünf Jahren theoretischer Untersuchungen. Die Aussagen dieses Modells sollten selbstverständlich auch mit klinischen Ergebnissen verifiziert werden. Das heißt, die berechneten Zahnbewegungen müssen anhand von Patientendaten überprüft werden. Auch hierfür war es erforderlich, dass neue experimentelle und theoretische Methoden entwickelt wurden. So vermessen wir kieferorthopädische Modelle von Behandlungsbeginn und -ende mit einem Laser-Scanner und bestimmen die klinische Zahnbewegung mithilfe so genannter Surface-Matching-Algorithmen, wobei die Modelle rechnerisch ineinander überführt werden. Für die Verifizierung und die Bestimmung der Aussagekraft des Simulationsmodells ist dies einer der wichtigsten Schritte.

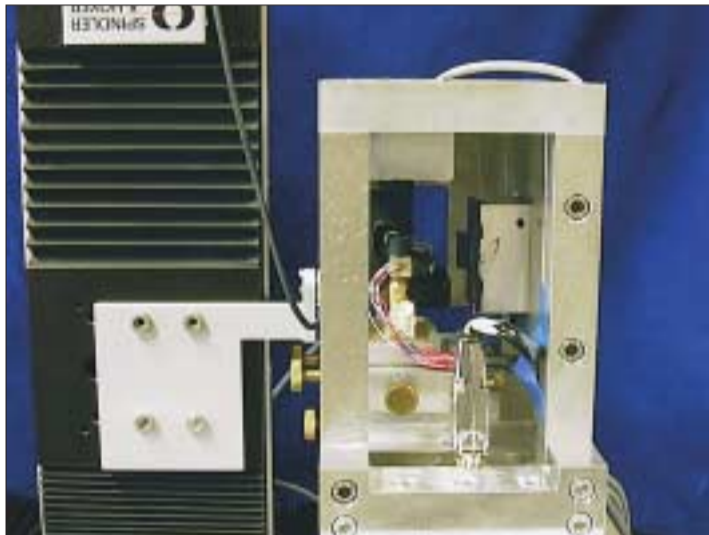


Abb. 1: Humanes Eckzahnpräparat in einem optomechanischen Messaufbau zur experimentellen Bestimmung des Last-Auslenkungsverhaltens.

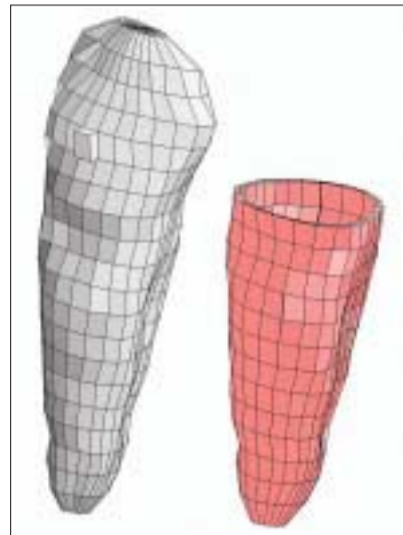


Abb. 2: Zerlegung eines humanen Eckzahns mit umgebendem Zahnhalteapparat in ein Finite-Elemente-Modell zur Berechnung des biomechanischen Verhaltens. Es sind nur Zahn und Parodontalligament dargestellt, der Knochen wurde weggelassen.

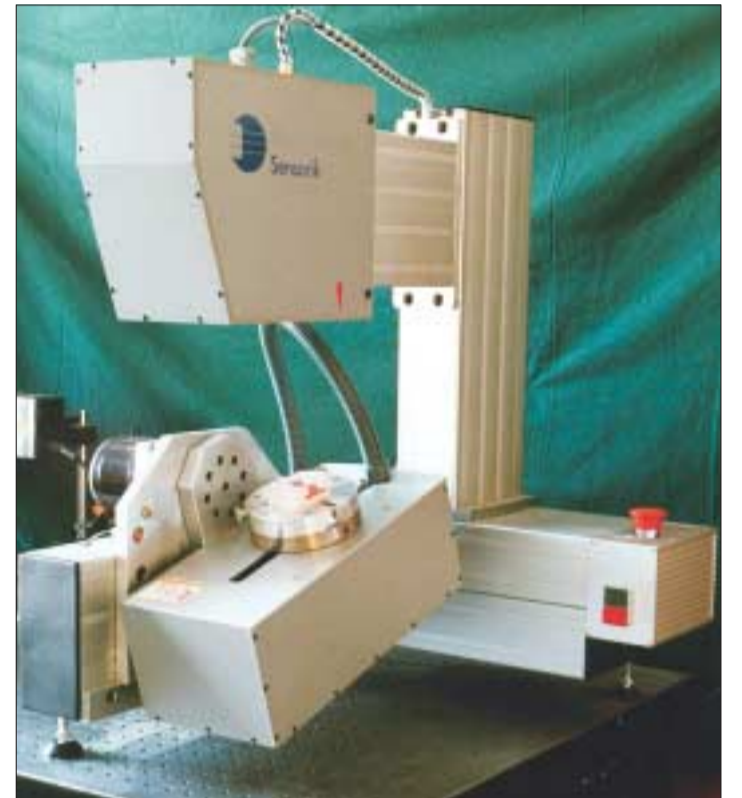


Abb. 3: Laserscanner mit eingesetztem kieferorthopädischen Modell zur dreidimensionalen Vermessung.

und welche Voraussetzungen müssen Sie dabei beachten? Die Genauigkeit liegt bei ungefähr 20%. Ähnliche Ergebnisse hat auch eine andere Arbeitsgruppe aus Ulm erarbeitet. Um die Simulationen durchführen zu können, müssen zunächst die Materialparameter von Zahn, Zahnhalteapparat,

tern benötigen wir Angaben über die klinisch eingesetzten Kraftsysteme und über die Zahnstellungen. Zur Bestimmung von Zahn- und Bracketpositionen werden kieferorthopädische Modelle und Röntgenbilder vermessen, die Kraftsysteme werden durch Kalibrierung der Behandlungselemente

KN Welche Untersuchungen sind notwendig, um möglichst genaue Vorhersagen der Remodellierung zu erhalten?

Wie bereits erwähnt, gehen die Materialparameter von Zahn und Zahnhalteapparat in die Simulationen ein.

verfügt geklärt, obwohl in den letzten Jahren ein beachtlicher Fortschritt erzielt wurde. Die Informationen über die anatomischen Daten erhalten wir, wie bereits erwähnt, aus den Modell-

schon Behandlung simuliert werden, so muss das klinisch eingesetzte Behandlungselement natür-

lich kalibriert werden, damit wir in der Berechnung die gleichen Kräfte und Drehmomente verwenden, wie sie klinisch auch aufgetreten sind. Hierfür haben wir vor über zehn Jahren bereits einen speziellen Messaufbau in Bonn entwickelt, mit dem wir diese Kalibrierungen durchführen

ANZEIGE





Fordern Sie unseren neuen Katalog an.

ODS GmbH
Dorfstr. 5f
24629 Kisdorf

Tel: 0800 400 600 1 info@orthodent.de
Fax: 0800 400 600 2 www.orthodent.de

Besuchen Sie uns an unserem Stand in Berlin (Halle 14.2 Stand 07).

Carrière Distalzer Kurs in Barcelona im März 2006.

unsere Innovationen

-  **Black Diamond™ Low-Friction NiTi-Bogen**
-  **IXION™ Zangen**
-  **Contour Dual Keramikbracket mit Kunststoffbasis**
-  **Midi Low Friction Brackets**
-  **spa™ transparentes Monokristall-Keramikbracket**

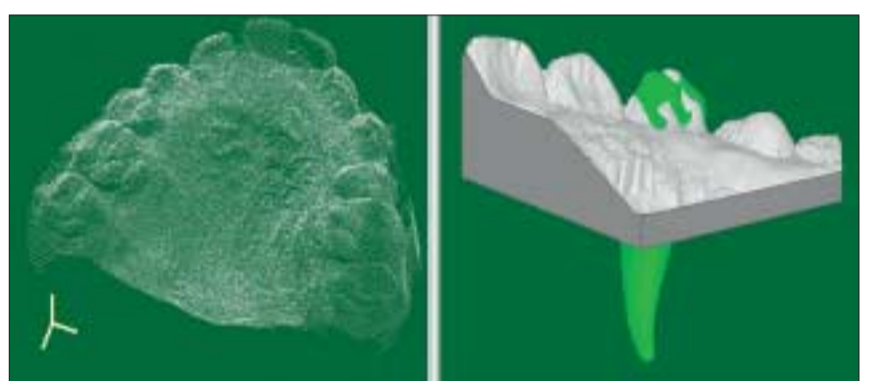


Abb. 4: Vermessene Punktwolke des Modells (links) und zur Positionsbestimmung in die Oberflächenrekonstruktion rechnerisch eingepasster Eckzahn.

KN Welche biologischen Daten benötigen Sie neben den materialtechnischen? Oder sind die biologischen Daten eher zu vernachlässigen?

Hier ist die Frage, was unter biologischen Reaktionen im Zahnhalteapparat, die zum Knochenumbau führen, oder sind die anatomischen Daten gemeint, also die Wurzelmorphologie, Wurzellänge, Zahn- bzw. Wurzelquerschnitt, Zahnposition und Zahnstellung? Die biologischen Prozesse selbst, also die Aktivität der Osteoklasten und Osteoblasten mit der gesamten Reaktionskette vom mechanischen Reiz der orthodontischen Kraft bis zur biologischen Reaktion, können derzeit und auch in absehbarer Zeit in ihrer ganzen Komplexität nicht modelliert werden. Zudem ist die biologische Reaktionskette, die vom mechanischen Reiz zur biologischen Reaktion – also dem Knochenumbau führt – noch nicht vollstän-

vermessungen sowie aus Röntgenbildern.

KN Welche Materialien setzen Sie ein, um genaue mechanische Daten zu erhalten?

Neben der Modell- und Röntgenbildvermessung verbleiben nunmehr noch die Kraftsysteme als me-

chanische Komponenten. Klinisch werden diese von den Behandlungselementen erzeugt, die der Behandler im Hinblick auf eine angestrebte Zahnbewegung

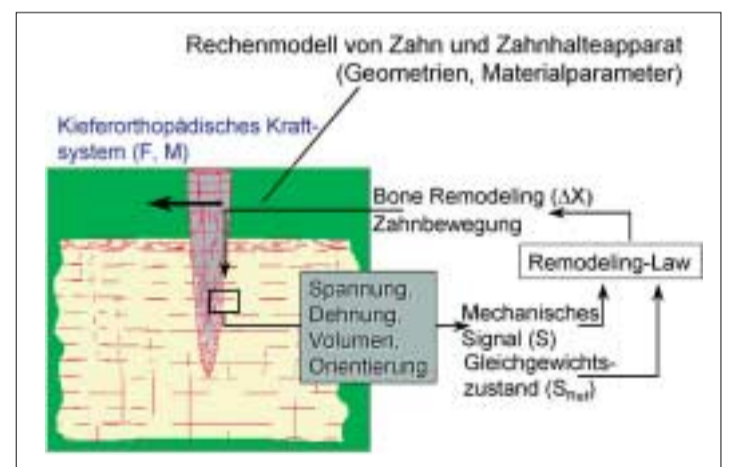


Abb. 5: Grundprinzip der numerischen Simulation des kieferorthopädischen Knochenumbaus: Das kieferorthopädische Kraftsystem wird auf das Rechenmodell eines Zahns aufgegeben. Hieraus können die Belastungen des Parodontalligaments und des Alveolarknochens berechnet werden, aus denen sich wiederum die Zahnbewegung berechnen lässt.

chanische Komponenten. Klinisch werden diese von den Behandlungselementen erzeugt, die der Behandler im Hinblick auf eine angestrebte Zahnbewegung

können. Besteht die Aufgabe jedoch darin, für die Planung einer Behandlung eine Bewegung zu simulieren, so werden bestimmte Kräfte und Drehmomente

in der Berechnung eingesetzt. Diese Kraftsysteme können auf Grund bekannter Merkgeln ermittelt werden. Wird die angestrebte Zahnbewegung in der Simulation dennoch nicht erzielt, so können Kräfte und Drehmomente so lange variiert werden, bis das Ergebnis der Berechnung zufrieden stellend ist. Zu diesem Kraftsystem könnte der Behandler dann ein entsprechendes Behandlungselement auswählen, das die erforderlichen Kräfte und Drehmomente klinisch erzeugt, um die gewünschte Zahnbewegung zu realisieren.

KN Welche Modifikationen erwarten Sie bei unbekanntem biologischen Potenzialen des Gewebes – sind die Toleranzbereiche eher größer oder eher eng zu sehen?

Wie bereits erwähnt, erscheint es derzeit nicht möglich, alle biologischen Einflussgrößen in die Simulationen einzubeziehen. Man muss sich das Simulationsmodell als eine Art „Blackbox“ vorstellen, in die die mechanischen Startgrößen, wie Zahnstellungen, Zahngeometrien und Kraftsysteme eingegeben werden und die als Ergebnis eine Zahnbewegung ausgibt. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit klinischen Resultaten wurde die Ausgabe dieser „Blackbox“ an die klinische Realität angepasst. Da sich natürlich nicht alle Patienten gleich verhalten, ergab sich eine Genauigkeit in der Voraussage von etwa 20%. Selbstverständlich kann sich die Voraussagequalität auch einmal deutlich verschlechtern. Dies kann dann auf eine mangelhafte Modell- oder Röntgenbildauswertung oder auf die Idealisierungen des Modells zurückgeführt werden.

KN Was ist biomechanisch für Sie ein Misserfolg?

Hier ist wohl die Unterscheidung zwischen dem Biomechaniker und dem Kieferorthopäden erforderlich. Für den Biomechaniker ist es natürlich ein Misserfolg, wenn die Simulation nicht mit der

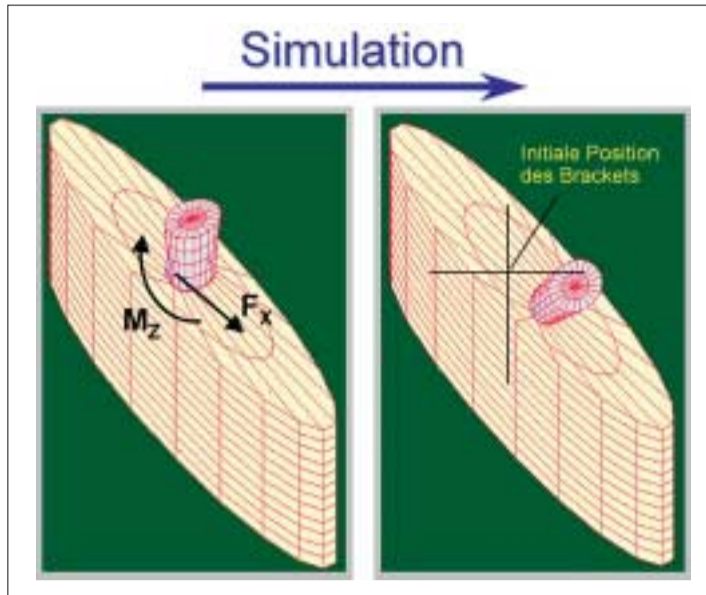


Abb. 6: Darstellung der Anfangs- und Endsituation der Simulation einer unkontrollierten Kippung. Die Zahnkrone wurde über mehrere Millimeter aus ihrer Anfangsposition heraus bewegt, dabei ist der Zahn deutlich, um etwa 20° nach distal, gekippt.

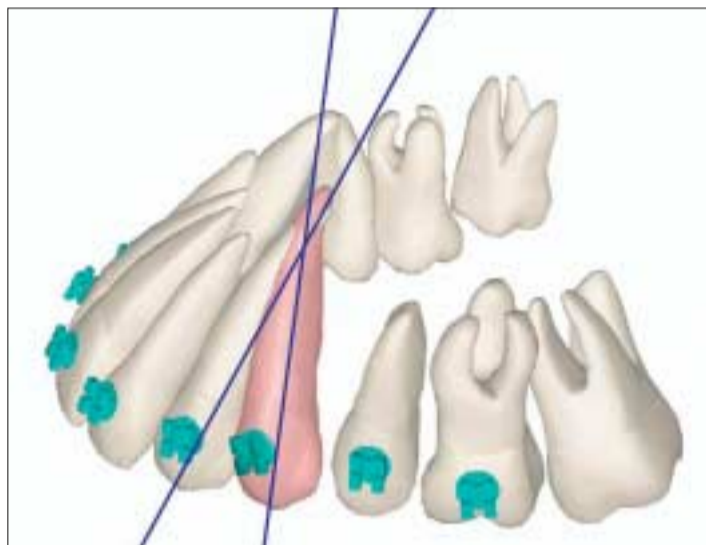


Abb. 7: Visualisierung der berechneten Bewegung aus Abb. 6. Mithilfe derartiger Animationen können Patient und Behandler einen realistischen Eindruck vom möglichen Verlauf einer Behandlung erhalten.

Realität übereinstimmt oder ein Ergebnis liefert, das in keiner Weise den Erwartungen entspricht. Was für einen Kieferorthopäden ein biomechanischer Misserfolg ist, kann ich natürlich nur

speziellen Feder haben nicht das erwünschte Behandlungsergebnis zum Resultat. Der Vorteil der Simulationsrechnungen in diesem Fall wäre natürlich, dass vorausgesagt werden kann,

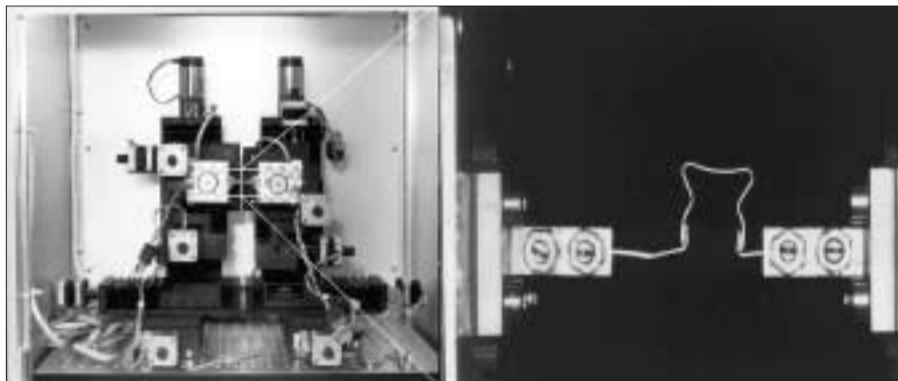


Abb. 8: Kalibrierung einer speziellen Nickel-Titan-T-Feder im orthodontischen Mess- und Simulations-System. Die Kalibrierung dient sowohl der Bestimmung der Kraftsysteme für die Simulationsrechnungen als auch der Überprüfung der Kraftsysteme neuartiger Behandlungselemente vor einem Einsatz am Patienten.

mutmaßen: Die Behandlung gelangt nicht zu dem Ziel, das er sich gemäß der Behandlungsplanung vorgestellt hat bzw. die biomechanischen Überlegungen in Bezug auf den Einsatz einer

dass die Feder nicht zum Ziel führen wird und es zu einem kieferorthopädischen Misserfolg kommen kann.

KN Ist hier eine interdisziplinäre Zusammenarbeit notwendig?

Selbstverständlich. Meine Arbeitsgruppe arbeitet eng mit der klinischen Abteilung zusammen.

KN Welche Kriterien sehen Sie als unerlässlich an, um bei genauester Betrachtung eine Behandlung als exakt und unschädlich zu kennzeichnen?

Dies ist eine sehr komplexe Frage, die von einem Biomechaniker allein schwerlich beantwortet werden kann. Sicher sind Wurzelresorptionen wohl das wesentliche Kriterium. Aber es gibt derzeit noch keine nicht-invasive Methode, mit der Schädigungen an der Zahnwurzel wirklich exakt do-

kumentiert werden können. Selbst mithilfe eines CT können nicht alle Wurzelresorptionen zuverlässig erkannt werden. Zudem kann man nicht jeden Patienten in ein CT schicken, nur weil die Gefahr besteht, dass eventuell eine Wurzelresorption vorliegen könnte. Zwischen dem Anspruch, dem Patienten möglichst wenig Schaden zuzufügen, und der Wirklichkeit, wird sicherlich noch über einige Jahre eine Diskrepanz bestehen.

KN Mit meiner Frage wollte ich auch darauf hinaus, welche Kriterien Sie in Ihrer täglichen Arbeit als unerlässlich sehen, auch in Bezug auf die ethische Vertretbarkeit.

Als Naturwissenschaftler darf ich nicht direkt am Patienten arbeiten. Insofern kann das Ergebnis meiner täglichen Arbeit immer nur eine Empfehlung an die Praktiker sein, ein bestimmtes Behandlungskonzept für eine Behandlungsaufgabe einzusetzen oder auch zu meiden. Wie die klinischen Konsequenzen daraufhin aussehen, ob also ein bestimmter Behandlungsschritt ethisch vertretbar ist, das muss der Kieferorthopäde im Zuge der Behandlung entscheiden.

KN Sind Systeme bekannt, die diese Kriterien derzeit erfüllen oder haben bisher alle biomechanischen Lösungen noch Nebenwirkungen?

Eine kieferorthopädische Apparatur, die absolut nebenwirkungsfrei arbeitet – sowohl in Hinblick auf das Behandlungsergebnis als auch in Hinblick auf biologische Schädigungen – kann ich mir nach dem derzeitigen Kenntnisstand kaum vorstellen.

KN Welche Nebenwirkungen können Sie dann als tolerierbar ansehen?

Es gibt durchaus auch Meinungen, dass eine kieferorthopädische Zahnbewegung praktisch niemals ohne geringe Wurzelresorptionen stattfinden kann. Es müsste daher geklärt werden, was als gering und tolerierbar anzusehen ist. Hier kann ich wieder nur auf die Erfahrung der Kieferorthopäden verweisen. Wenn auf der anderen Seite eine Behandlung nicht hundertprozentig zum Ziel führt, die Funktion aber dennoch hergestellt ist, dann kann dies meiner Meinung nach toleriert werden. Ob der Patient zufrieden ist, das ist natürlich eine andere Frage. Sicher ist in den kommenden Jahren noch ein großer Fortschritt auf dem Gebiet der kieferorthopädischen Biomechanik und Werkstoffkunde zu erwarten, hin zu reduzierten Nebenwirkungen oder Schädigungen. Eine völlig nebenwirkungsfreie Behandlung kann ich mir aber auch dann schwerlich vorstellen. **KN**

KN Kurzvita



Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Christoph Peter Bourauel

- geboren 1958
- 1980–1987 Studium der Physik in

Bonn, Diplom 1987

- seit 1987 Wiss. Mitarbeiter der Poliklinik für KFO in Bonn, interdisziplinäre Promotion 1992
- 1998 Habilitation in Experimenteller Zahnheilkunde/Biomechanik
- Wissenschaftliche Arbeitsgebiete: Kieferorthopädische Biomechanik und Werkstoffkunde, numerische Methoden zur Simulation des Knochenbaus, superelastische Legierungen in der Kieferorthopädie, Implantatbiomechanik, Prothetische Biomechanik und Werkstoffkunde, Entwicklung biomechanischer Messtechnik

MONDEAL
MEDICAL SYSTEMS GMBH

QUATTRO

Die einzigartige Mini-Ankerschraube von MONDEAL

- 100% passgenau mit rechteckigen Drahtbögen
- 3 Jahre klinische Erfahrung
- sichere Biomechanik
- leichte Anwendung

The latest generation Mini Anchor Screw from MONDEAL

- 100% compatible with edgewise orthodontics
- 3 years safety profile
- proven biomechanics
- easy to use



NEU Alle Schrauben steril verfügbar!

LOMAS

Weitere Informationen – for more information:
MONDEAL Medical Systems GmbH
Moltkestraße 39 · 78532 Tuttlingen · mail@mondeal.de
Telefon (07961) 93320 · Telefax (07961) 93328