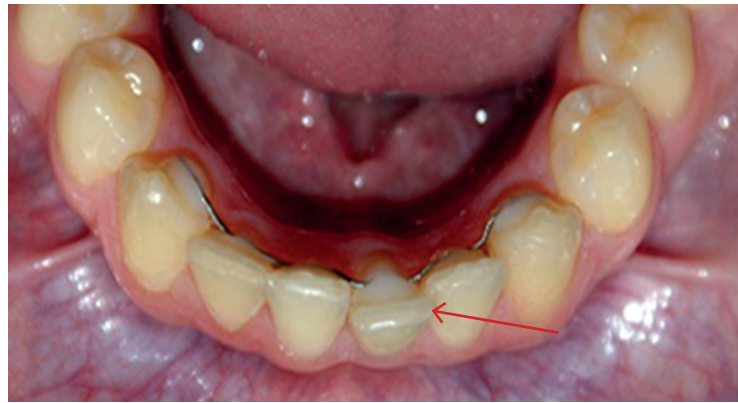


**Fortsetzung von Seite 1**  
**Der X-Effekt als unerwartete Komplikation nach Retainerklebung**

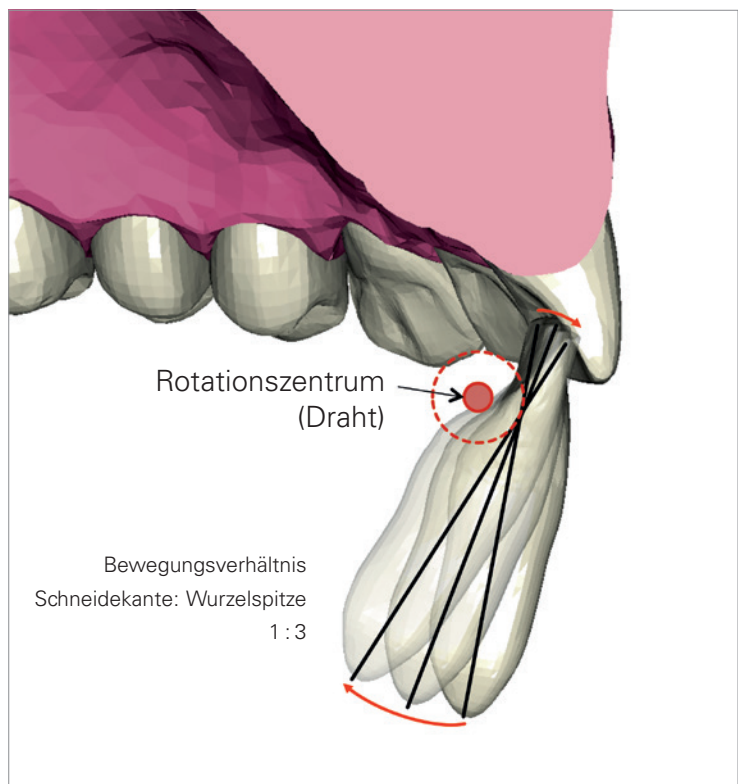
sich bei den einwurzeligen Frontzähnen im Übergangsbereich zwischen erstem und zweitem Wurzeldrittel befindet, aufgehoben. Der relativ starre Retainer

wirkt wie eine Reckstange, um die die Zähne, sobald sie einmal aus dem Zahnbogen herausgedrängt wurden, einen regelrechten Looping vollführen, wie es Kollege Dannhauer anlässlich einer DGKFO-Tagung einmal bezeichnete.<sup>8</sup> Durch die Hebelarm-längen Zahnkrone/Retainerachse/Zahnwurzel

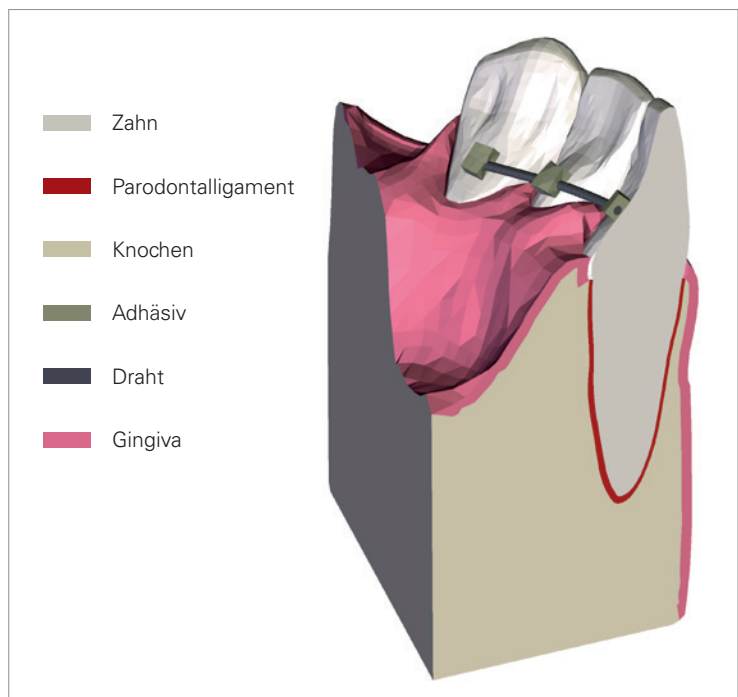
entwickeln sich Bewegungen, bei denen die Schneidekante nur recht kleine, die Wurzelspitze aber sehr große Auslenkungen zeigt. Typischerweise kann man ein Verhältnis von 1:3 zwischen der Bewegung der Schneidekante und der Wurzelspitze feststellen. Dadurch können diese Komplikationen, insbesondere für einen unerfahrenen Behandler, sehr spät auffallen. In einigen Fällen traten dabei so extreme Rotationen um die Retainerachse auf, dass die Wurzeln sichtbar aus dem Knochen heraustreten. In einer numerischen Studie mit Finite-Elemente-Modellen haben die Autoren daher versucht, Erklärungen für den X-Effekt zu finden und die verschiedenen biomechanischen Einflussgrößen zu analysieren. Im Folgenden möchten wir einige Details der Simulationen sowie Erklärungsansätze für diese unerwarteten Nebenwirkungen vorstellen.



**Abb. 1b:** Auch im Unterkiefer wird dieser X-Effekt beobachtet. Deutlich ist zu erkennen, dass weder ein Retainerbruch noch eine auffällige plastische Deformation des Retainers vorliegen. (Foto: Praxis Dr. Raiman)



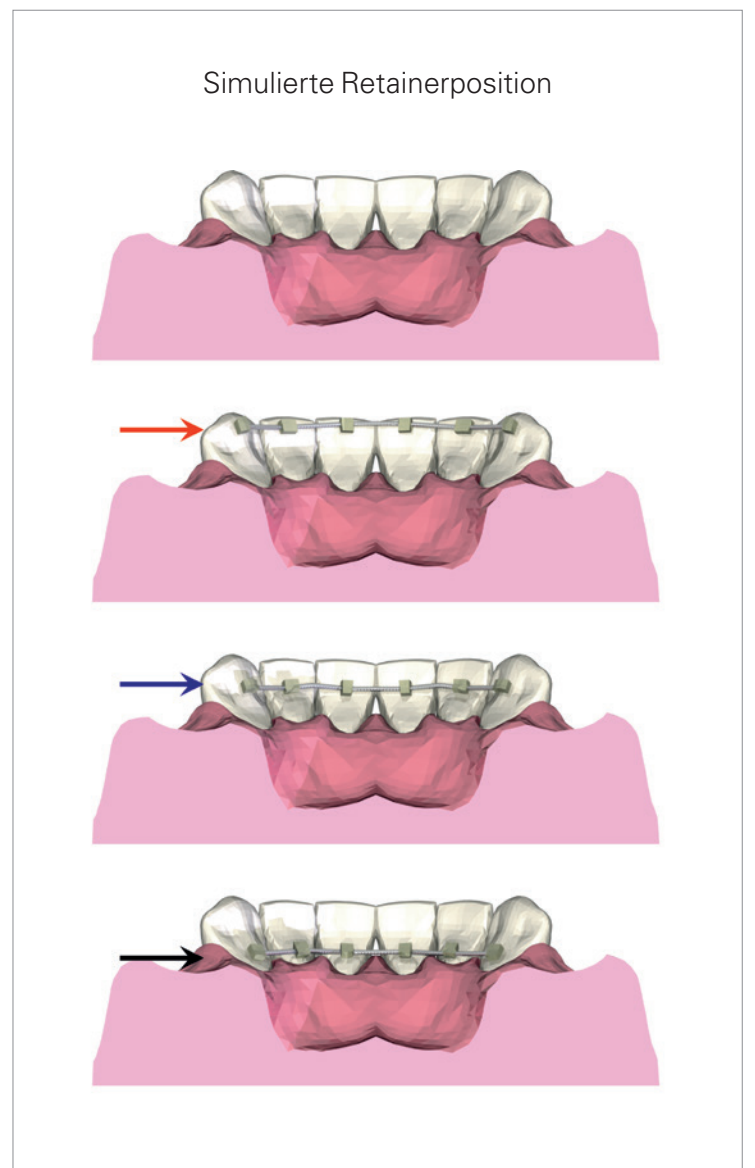
**Abb. 2:** Zur Charakterisierung des X-Effekts: Durch den Retainer entsteht eine steife Drehachse, das Rotationszentrum verlagert sich aus dem Bereich der Zahnwurzel (Widerstandszentrum) in die Drahtachse. Durch die Hebelarmverhältnisse ergibt sich so ein Verhältnis der Bewegung von Schneidekante zu Wurzelspitze von etwa 1:3. Dadurch sind die Auswirkungen erst sehr spät zu erkennen, bei kleiner Bewegung der Schneidekante kann sich die Wurzelspitze schon sehr stark bewegt haben.



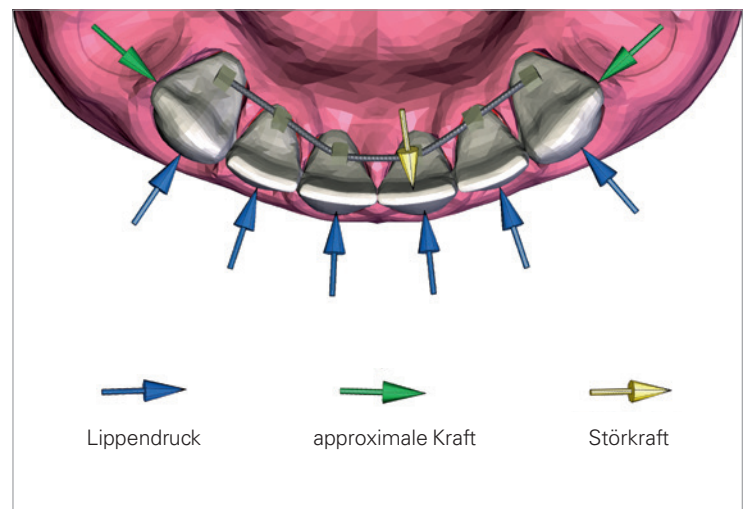
**Abb. 3:** Darstellung der Komponenten des entwickelten Finite-Elemente-Modells. Das die Zähne umgebende Parodontalligament wurde mit einer einheitlichen Dicke von 0,2mm generiert. Der Lingualretainer wurde spannungsfrei direkt auf den Lingualflächen der Zähne modelliert und über Adhäsivtropfen mit den Zähnen verbunden.

**Biomechanisches Modell von Zahn, Zahnhalteapparat und Retainer**

Für unsere Studie haben wir die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt, da diese es erlaubt, zu einem bestehenden Modell ergänzende Komponenten hinzuzufügen, verschiedene Einflussgrößen systematisch zu variieren und bestimmte Belastungssituationen zu analysieren. Abbildung 3 zeigt die verschiedenen Komponenten des Modells. Es baut auf einem bereits für frühere Untersuchungen verwendeten Modell auf<sup>9</sup> und besteht aus den Zähnen 33 bis 43 mit umgebendem Parodontalligament (PDL), dem Knochensegment in diesem Bereich, der Gingiva sowie dem Lingualretainer, der mit Adhäsiv an den Lingualflächen der Zähne befestigt ist. Das Gesamtmodell besteht aus 200.000 Tetraederelementen und 50.000 Knoten. Abbildung 4 zeigt die verschiedenen simulierten klinischen Situationen: Zunächst wurde ein Modell ohne Retainer konstruiert. An diesem kann z. B. die Entwicklung eines Engstands als Rezidiv studiert werden. Anschließend wurden auf diesem Modell Lingualretainer in verschiedenen Höhen modelliert. Da oftmals die Empfehlung ausgesprochen wird, dass Retainer möglichst gingivanah geklebt werden sollten, um die Zahnreinigung zu erleichtern, wurde eine Variante mit einem Retainer unmittelbar über dem Gingiva-saum modelliert. Bei den beiden weiteren Varianten war der Retainer zum einen mittig auf den Lingualflächen befestigt, zum anderen nahe der Inzisalkante. Abbildung 5 zeigt die analysierten Kräfte in unserem Modell. Neben einem gleichförmig auf alle Frontzähne wirkenden Lippendruck wurde auch eine proximale Kraft auf die Eckzähne und schließlich eine „Störkraft“ auf einen einzelnen



**Abb. 4:** Der Lingualretainer wurde in verschiedenen Höhen auf den Zahnkronen befestigt. Bei dem obersten Modell ist eine Situation ohne Retainer dargestellt, darunter ist ein Modell gezeigt, bei dem der Retainer inzisal befestigt wurde. Bei den beiden unteren Modellen wurde der Retainer mittig bzw. in der Nähe des Gingiva-saums befestigt.



**Abb. 5:** Die verschiedenen Kräfte im Simulationsmodell. Neben einem einheitlichen Lippendruck auf alle Frontzähne wurden auch eine proximale Kraft auf die Eckzähne sowie eine Störkraft auf dem Zahn 31 simuliert. Diese könnte z. B. durch einen Frühkontakt oder auch durch Habits entwickelt werden.

Schneidezahn aufgebracht. Die Entstehung dieser Störkraft kann man sich z. B. durch einen Frühkontakt oder durch Habits, beispielsweise beständiger Zungendruck auf eine Klebestelle, vorstellen. Des Weiteren wurden die Reibungseigenschaften zwischen den Zähnen im Bereich der Approximalkontakte und der Kontakt zwischen Retainer und Adhäsiv variiert. Die Kräfte wurden in folgendem Bereich variiert: Lippendruck: 0,0 bis 2,0N, Störkraft: 0,0 bis 2,5N und Approximalkraft: 0,5 bis 2,4N. Der Reibungskoeffizient wurde zwischen 0,0 und 0,2 verändert. Mit derartigen Finite-Elemente-Simulationen kann nur eine initiale Zahn-beweglichkeit simuliert werden.

Wenn man die Entwicklung eines X-Effekts über einen längeren Zeitraum nachvollziehen möchte, so muss man wie bei der kieferorthopädischen Zahn-bewegung die Knochenumbauprozesse berücksichtigen. Dies kann durch sogenannte Bone Remodeling-Theorien realisiert werden.<sup>10,11</sup> Prinzipiell sind dies FE-Simulationen in einer Vielzahl aufeinanderfolgender kleiner Schritte. Das Prinzip ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Lösung der Belastungssituationen aus Abbildung 5 ergeben die initialen Zahnauslenkungen als Reaktion auf die verschiedenen angreifenden Kräfte. Dabei wird die Zahnwurzel in der Alveole ausgelenkt. Aus diesen Auslenkungen erge-

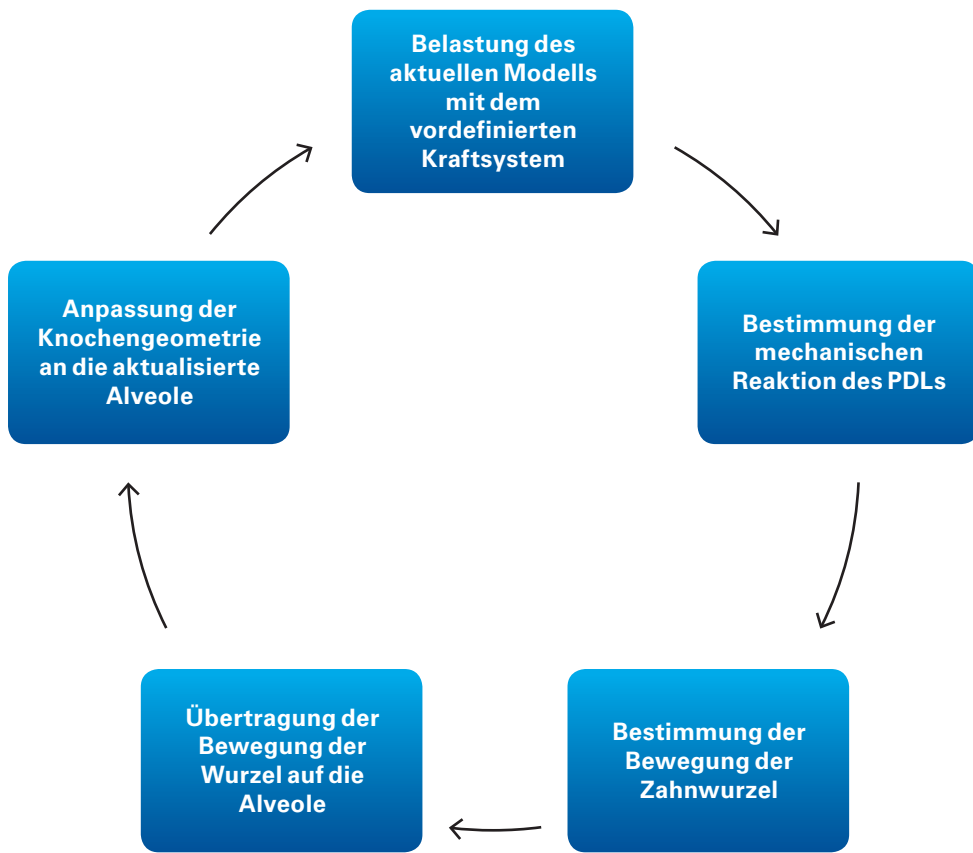


Abb. 6: Der sich über einen langen Zeitraum entwickelnde X-Effekt kann nur durch Bone Remodeling-Simulationen berechnet werden. Dabei muss das FE-Modell zyklisch umgebaut werden. Dies geschieht dadurch, dass man in Einzelschritten die Deformationen und insbesondere die Zahnauslenkungen in der Alveole berechnet und mit den ermittelten Wurzelbewegungen die Knochengometrie der Alveole aktualisiert.

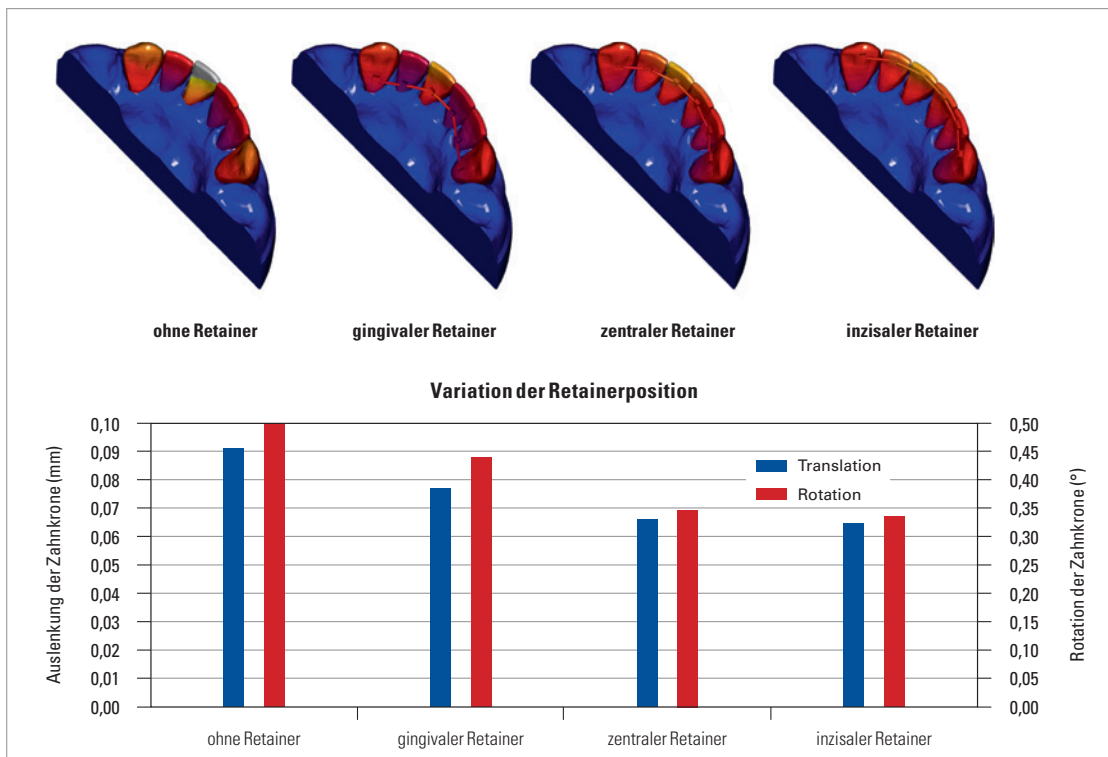


Abb. 7: Berechnete initiale Zahnauslenkungen bei den verschiedenen Modellen. Aufgetragen sind die Translation in labialer Richtung sowie die Rotation (labialer Kronentorque) bei einer Kraft durch Lippendruck von 2,0 N, einer approximalen Kraft von 1,4 N und einer linguale Störkraft von 2,5 N. Die größten Auslenkungen zeigen sich erwartungsgemäß für das Modell ohne Retainer. Ein Retainer nahe der Inzisalkante reduziert die Auslenkung effektiv.

ben sich Deformationen des PDL, die man wiederum in Knochen- deformationen im Bereich der Alveole umrechnen kann. Wenn diese Deformationen auf das bestehende FE-Modell übertragen werden, kann die Geometrie so angepasst werden, dass sich ein neues Modell mit leicht verändertem Knochen ergibt. Dieses angepasste Modell wird wiederum mit den Kräften aus Abbildung 5 belastet, und als Resultat der Simulation erhält man wiederum ein neues FE-Modell. Auf diese Art und Weise können eine kieferorthopädische Zahn- bewegung oder auch die Entwicklung eines X-Effektes mit einer großen Zahl kleiner Schritte simuliert werden.

### Ergebnisse und Diskussion

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Studie zusammengestellt. Abbildung 7 zeigt zunächst einen Vergleich der initialen Zahnauslenkungen in den Modellen ohne Retainer und mit unterschiedlichen vertikalen Retainerpositionen. Die verschiedenen Kräfte auf die Frontzahngruppe wurden wie folgt gewählt: Kraft durch Lippendruck 2,0 N, approximale Kraft 1,4 N und linguale Kraft 2,5 N. Wenn diese Kräfte wieder von den Zähnen genommen werden, kehren diese in ihre Ausgangsstellungen zurück. Die größte Auslenkung der Schneide- kante beträgt 0,09 mm beim Mo-

dell ohne Retainer. Gleichzeitig entwickelt sich ein labialer Kronentorque von 0,50°. Dies entspricht in etwa der Hälfte der physiologischen Zahnbeweglichkeit in der Alveole und ist so zu erwarten. Durch Kleben der Retainer wird die Auslenkung effektiv reduziert, allerdings in Abhängigkeit von der vertikalen Retainerposition. Dabei wirkt ein inzisal positionierter Retainer am effektivsten. Interessant ist auch, dass das Verhältnis von Rotation zu Translation beim inzisal positionierten Retainer am geringsten ist. Den Einfluss der approximalen Kraft verdeutlicht Abbildung 8.

Fortsetzung auf Seite 10 KN



3M™  
APC™ Flash-Free  
Kleben ohne  
Überschüsse.

Revolutionär.  
Zeitsparend.  
Effizient.

Interesse?  
Rufen Sie uns an unter  
08191/9474-5000

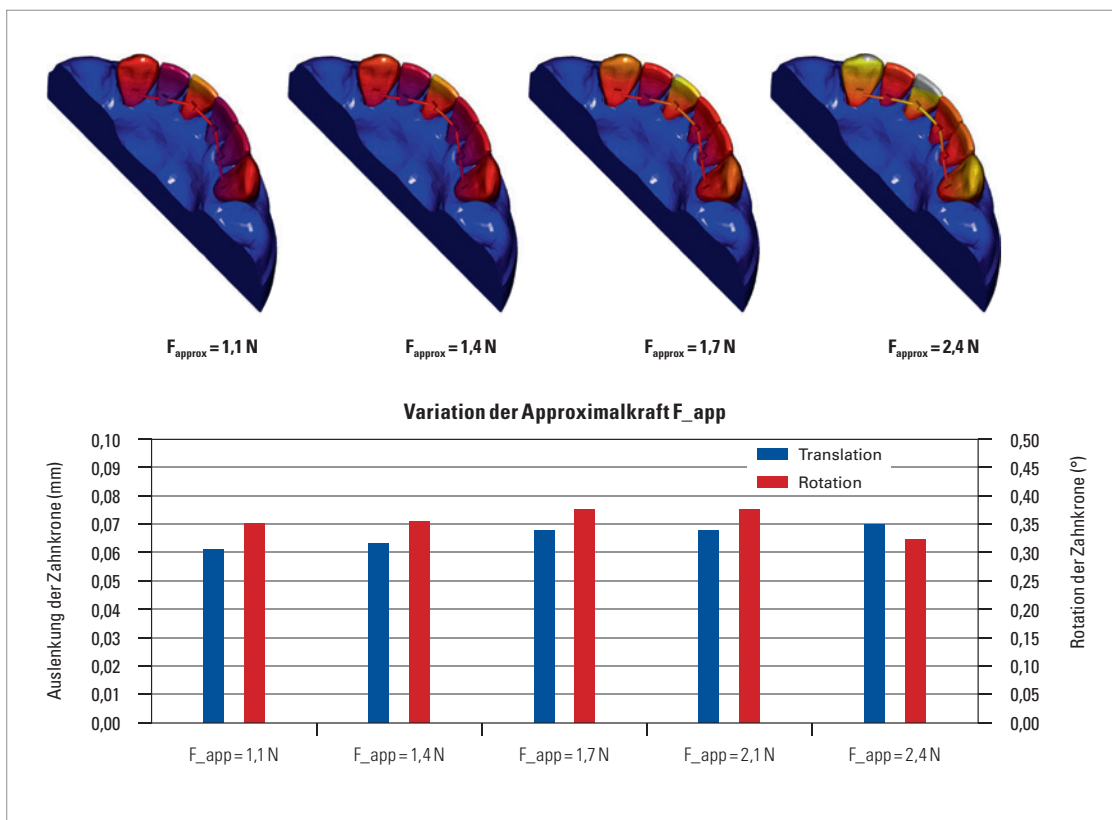


Abb. 8: Einfluss der approximalen Kraft auf die initialen Zahnauslenkungen bei gingival positioniertem Retainer und einer lingualen Kraft von 2,0 N. Mit Erhöhung der approximalen Kraft steigt die Auslenkung für alle Zähne deutlich an. Aber insbesondere der mit der Störkraft belastete Zahn wird verstärkt aus dem Zahnbogen gedrückt.

KN Fortsetzung von Seite 9

Für den mit der Störkraft durch Vorkontakt oder Zungendruck belasteten Zahn 31 steigt die Bewegung in labialer Richtung mit der approximalen Kraft deutlich an. Auch der Kronentorque nimmt zunächst mit der approximalen Kraft zu, oberhalb von 2 N wird der Torque allerdings abrupt gestoppt. Wenn man die Verhältnisse in der Alveole betrachtet, so sieht man, dass in diesem Fall die Wurzelbewegung offensichtlich durch die Alveolarwand eingeschränkt wird. Auch bei diesen simulierten Zahnauslenkungen gilt, dass sie lediglich die physiologische Zahnbeweglichkeit repräsentieren. Nach Entlastung kehren die Zähne wieder in ihre Ausgangsstellung zurück. Zudem entwickelte sich in keinem der gezeigten Fälle der typische X-Effekt oder der Looping um den Retainer. Die Wurzelbewegung war stets durch die

Begrenzungen der Alveolarwand eingeschränkt. Im Folgenden sind daher drei verschiedene Fälle gezeigt, bei denen die biomechanische Situation mithilfe von Bone Remodeling-Simulationen untersucht wurde. Die Kraftsysteme entsprechen dabei denen, die für die Simulationen aus Abbildung 7 verwendet wurden. Abbildung 9 zeigt zunächst die Situation ohne Retainer. Sehr schön ist zu erkennen, dass sich ein frontaler Engstand entwickelt. Wichtig dabei ist, dass die Bewegung der Schneidekante deutlich größer ist, als die der Wurzelspitze (Pfeile). Das Rotationszentrum liegt im Bereich der Wurzelmitte, die Wurzel wird nur geringfügig verlagert, und es besteht nicht die Gefahr, dass sie sogar aus dem Knochen heraustritt. Abbildung 10 zeigt eine entsprechende Situation mit einem Lingualretainer in Nähe der Gingiva. Ganz deutlich ist zu er-

kennen, dass sich die Wurzel stärker bewegt, als die Schneidekante. Dadurch, dass das Rotationszentrum etwa auf Höhe der Retainerachse liegt, zeigt sich keine Deformation des Retainers, ebenso, wie die geringe Bewegung der Schneidekante erst sehr spät zu bemerken ist. Beides erhöht das Risiko, dass diese unerwartete Nebenwirkung viel zu spät bemerkt wird. Verstärkt wird der Effekt durch die leicht trapezförmige Geometrie der Zahnkronen: Ist das obere Drittel der Krone erst einmal aus der Zahnreihe herausgeschoben worden, so kann die approximale Kraft die Zahnkrone wie auf einer Rampe immer weiter nach unten drücken, sodass die Wurzel so weit ausgelenkt wird, dass sie aus dem Knochen heraustritt. Dies kann offensichtlich sehr effektiv durch eine Positionierung des Retainers nahe der Inzisalkante verhindert werden

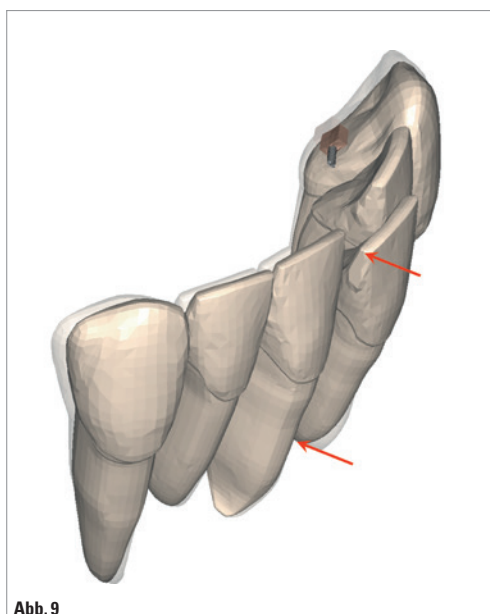


Abb. 9

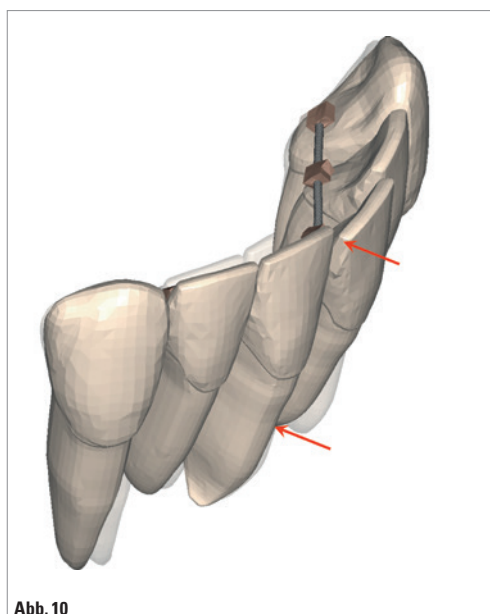


Abb. 10

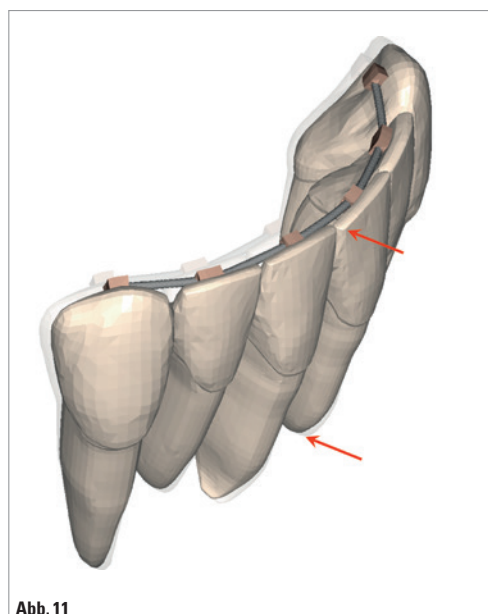


Abb. 11

Abb. 9: Simulation der Zahnbewegung durch Einwirken approximaler Kräfte, einer lingualen Störkraft und des Zungendrucks. Die Kräfte entsprachen denen aus den Simulationen zu Abb. 7. In der Situation ohne Retainer entwickelt sich ein frontaler Engstand. Die Auslenkung der Schneidekante ist deutlich größer als die der Wurzelspitze. – Abb. 10: Simulation des X-Effekts mit Lingualretainer positioniert in Nähe der Gingiva. Die Kräfte waren identisch zu den vorangegangenen Simulationen, zusätzlich musste noch von einem mangelhaften Kontakt zwischen Retainerdraht und Adhäsiv ausgegangen werden. Hier zeigt sich das typische Verhalten bei einem X-Effekt: Die Inzisalkante bewegt sich um etwa einen Faktor 3 geringer als die Wurzelspitze (Pfeile), die in dieser Ansicht sogar bereits hinter der Wurzel des benachbarten Schneidezahns verschwunden ist. Das Rotationszentrum liegt auf Höhe der Retainerachse. – Abb. 11: Verhinderung des X-Effekts durch Positionierung des Retainers nahe der Inzisalkante.

(vergleiche Abb. 11). Dadurch kann die Schneidekante nicht aus der Zahnreihe herausgedrückt werden, die Wurzel und die Inzisalkante bleiben verglichen mit den Nachbarzähnen nahezu stationär. Die biomechanischen Einflussgrößen, die die Entwicklung eines X-Effekts auslösen, sind sehr vielschichtig. Neben den hier vorgestellten Parametern können noch weitere Größen diese unerwarteten Nebenwirkungen nach Klebung eines Lingualretainers beeinflussen.

In unseren Untersuchungen hat sich gezeigt, dass mindestens eine oder mehrere der folgenden Voraussetzungen erfüllt sein müssen:

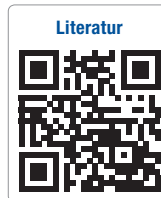
- Kein Gleichgewicht zwischen lingualen und labialen Kräften (Vorkontakte).
- Einzelne Kräfte auf betroffenen Zähnen (Habits, Vorkontakte).
- Signifikante interapproximale Kräfte.
- Retainer wurde nahe des Gingivaums geklebt.
- Kontakt zwischen Retainer und Adhäsiv mangelhaft.
- Retainer war initial nicht spannungsfrei.

Weiterhin kann eine ungünstige, trapezförmige Morphologie der Zahnkronen die Entwicklung des X-Effekts verstärken. In der Literatur und auf Kongressen sind verschiedene Ansätze beschrieben worden, wie diese Nebenwirkung verhindert oder reduziert werden können:

1. Verwendung von bandartigen Retainern, die nicht als Drehachse wirken können, wie z.B. das Produkt „Ortho-Flextech“ (Firma Reliance). Auch bei MEMOTAIN®-Retainern (Firma CA Digital) wurde bislang nicht über einen X-Effekt berichtet, jedoch könnte hier eine Rolle spielen, dass dieser Retainer noch nicht lange angeboten wird.
2. Leichtes Beschleifen der Approximalkontakte, um eine flä-

chige Anlagerung zu erreichen und den Einfluss der trapezförmigen Kronen zu reduzieren.

All diese Maßnahmen ersetzen aber nicht eine regelmäßige und sorgfältige Kontrolle des Retainerzustands und der Überprüfung der Position der Inzisalkanten. Bereits geringste Auslenkungen könnten Hinweise auf signifikante Wurzelbewegungen geben, die ohne weitere Beobachtung in einem katastrophalen Ergebnis enden könnten. KN



KN Kurzvita



Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Christoph Peter Bouraue [Autoreninfo]



Dr. rer. nat. Dipl.-Math. Ludger Keilig [Autoreninfo]



Dr. med. dent. Jan V. Raiman [Autoreninfo]



KN Adresse

Univ.-Prof. Dr. Christoph Bouraue  
 Universität Bonn  
 Welschnonnenstraße 17  
 53111 Bonn  
 Tel.: 0228 28722332  
 Fax: 0228 28722588  
 christoph.bouraue@ukb.uni-bonn.de  
 www.meb.uni-bonn.de