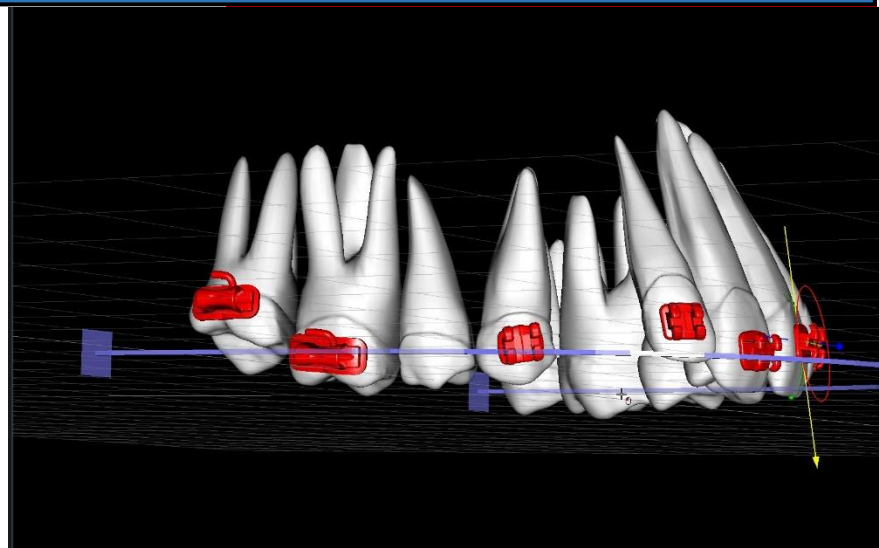


# Die Physik in der Kieferorthopädie



Dr. Jean-Marc Retrouvey

Dr. Katherine Koussaie

Translated into German by

Dr. Milan Stojanovic

Johanna Rutter



**IFDE**  
INTERNATIONAL  
FOUNDATION FOR DENTAL EDUCATION

# Grundlegende Mechanismen in der Kieferorthopädie

Dr. Jean-Marc Retrouvey

Dr. Katherine Kousaie

## 1 INHALTSVERZEICHNIS

---

2	Einleitung .....	2
3	Grundlegende Mechanik.....	2
3.1	Newton'sche Gesetze .....	3
3.1.1	Erstes Gesetz.....	3
3.1.2	Zweites Gesetz .....	3
3.1.3	Drittes Gesetz.....	3
4	Konzept der Krafteinwirkung .....	4
4.1	Einfache Kraft.....	4
4.1.1	Definition.....	4
4.1.2	Angriffspunkt.....	5
4.1.3	Wirkungslinie mit Richtung und Größe.....	6
4.1.4	Gesetz der Übertragbarkeit von Kraft.....	7
4.1.5	Angriffspunkt.....	7
4.1.6	Masseschwerpunkt .....	7
5	Widerstandszentrum (CR).....	9
5.1	Variabilität des Widerstandszentrums im Verhältnis zu parodontaler Unterstützung .....	11
5.1.1	Widerstandszentrum eines einzelnen Zahnes .....	11
5.1.2	Widerstandszentrum für eine Gruppe von Zähnen .....	13
5.1.3	Kombination von Kräften. Resultierende Kraft oder Netto-Kraft.....	14
6	Rotationszentrum .....	16
6.1.1	Freie Körperdiagramme .....	16
7	Zahnbewegungen.....	19
7.1	Bewegung.....	19
7.2	Rotation (reine).....	20

7.3	Kippen .....	21
7.3.1	Unkontrolliertes Kippen .....	21
7.3.2	Kontrolliertes Kippen .....	21
7.3.3	Wurzelbewegung .....	22
7.3.4	Intrusion/Extrusion .....	22
8	Kraft Systeme .....	24
8.1	Drehmoment.....	24
8.2	Kraftpaare .....	25
8.3	Momentum zu Kraft Verhältnis .....	26
8.4	Bewegungen, wenn Kräfte und Systeme verändert werden.....	29
8.5	Äquivalente Kraftsysteme.....	34
9	Verankerung.....	36
9.1	Anwendungen .....	38
9.1.1	Retraktion des Eckzahns .....	38
9.1.2	Extrusion zur Kronenverlängerung und Implantat-Platzierung .....	39
10	Literatur Empfehlung .....	39

## 2 EINLEITUNG

---

Die Kieferorthopädie basiert auf grundlegenden Prinzipien der Physik, die bewegliche Körper im Raum betreffen. Selbstverständlich sind die Bewegungen in der Kieferorthopädie komplizierter, da die beweglichen Körper im Mund sind und dadurch komplexeren Kraftsystemen ausgesetzt sind, als es eine einfache Mechanik voraussagen könnte. Biomechanik ist ein wichtiger Teil der Kieferorthopädie und ist die Lehre des statischen Equilibriums (Gleichgewicht) und der Auswirkung von Kräften auf biologische Systeme. In dieser Arbeit wird versucht, die Biomechanik der Kieferorthopädie zu vereinfachen und einen Rahmen für die klinische Anwendung zu bilden.

## 3 GRUNDLEGENDE MECHANIK

---

Es gibt einige wenige grundlegende Konzepte in der Physik, die zuerst erläutert werden, bevor in die Tiefe der Biomechanik in der Kieferorthopädie und ihre Anwendung auf klinische Fälle eingegangen wird. In der Kieferorthopädie bedienen wir uns der Newtonschen Gesetze, um die Kraftauswirkungen auf Objekte zu erklären.

### 3.1 NEWTONSCHE GESETZE

Die Newtonschen Gesetze beschreiben die Bewegung eines Objekts aufgrund der einwirkenden Kräfte. Das zweite und dritte Gesetz von Newton haben in der Kieferorthopädie die größte Bedeutung.

#### 3.1.1 Erstes Gesetz

In Abwesenheit von Reibung bleibt ein Körper im Ruhezustand oder in gleichmäßiger Bewegung bis eine Kraft auf ihn einwirkt. Newtons erstes Gesetz beschreibt das Konzept von Inertia (Trägheit) oder die Reaktion (den Widerstand) eines Körpers gegenüber einer durch Kraft ausgelösten Bewegung (Fig 1).

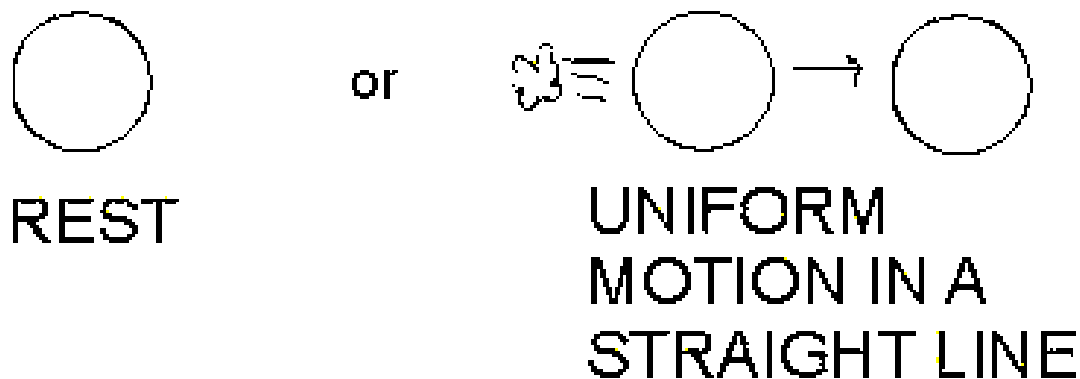


Figure 1: Newtons erstes Gesetz

#### 3.1.2 Zweites Gesetz

Ein Körper beschleunigt in dieselbe Richtung wie die Kraft, die diese Beschleunigung verursacht. Die Beschleunigung hängt von der Größe, der Kraft und der Masse des Objekts ab.

$$F_{\text{net}} = m a$$

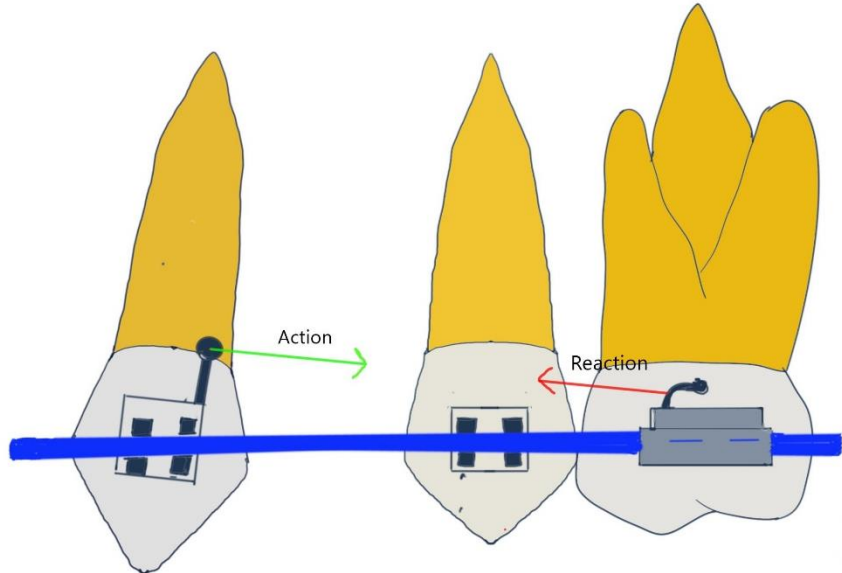
(Kraft = Masse x Beschleunigung)

#### 3.1.3 Drittes Gesetz

Newtons drittes Gesetz besagt, dass es mit jeder Krafteinwirkung einen gleich großen Widerstand der Kraft in die entgegengesetzte Richtung gibt. Nach diesem Gesetz üben zwei interagierende Objekte, immer eine Kraft und eine Gegenkraft untereinander aus. (Aktion – Reaktion) Die Kräfte in diesem Paar (Kraft und Widerstand) sind Vektoren, da sie Größe und Richtung vorweisen. Die Größe der Kraft, die auf das erste Objekt ausgeübt wird ist gleich der Größe der Kraft, die auf das zweite Objekt ausgeübt wird. Die Richtung der Kraft, die auf das erste Objekt ausgeübt wird, ist entgegengesetzt zu der Kraft, die auf Objekt Nummer zwei wirkt.

Denken Sie an die Interaktion zwischen den Reifen eines Kraftfahrzeugs und der Straße. Wenn die Räder rollen, findet eine Kraftübersetzung auf die Straße statt. Gleichzeitig übt die Straße eine Kraft auf die Räder aus, die der Kraft der Räder in ihrer Größe gleichen, jedoch in die gegenteilige Richtung zu der Kraftauswirkung, welche die Straße von den Rädern erhält, geht. Man kann also sagen, die Räder drücken die Straße zurück und die Straße drückt die Räder nach vorne (gleich und gegenteilig), sodass sich das Kraftfahrzeug weiter bewegt.

Im Mund können wir Beispiele solcher Aktionen sehen – Widerstandssysteme beim Zurückziehen eines Eckzahns. Die Feder zieht den Eckzahn mit einer bestimmten Kraftgröße. Dadurch, dass die Apparatur die Molaren als Verankerung verwendet, gibt es eine übereinstimmende Größe und eine gegenteilige Richtung der Kraft, die dazu führt, dass sich die Molaren nach vorne bewegen (Fig 2). Dies könnte eine unerwünschte Nebenwirkung darstellen. In der Behandlungsplanung müssen diese unerwünschten Nebeneffekte miteinbezogen und eliminiert, beziehungsweise zumindest reduziert werden.



Figur 1: Aktion und Reaktion der Kraft versetzen das System in ein Equilibrium. Dies ist eine vereinfachte Zeichnung.

## 4 KONZEPT DER KRAFTEINWIRKUNG

---

### 4.1 EINFACHE KRAFT

#### 4.1.1 Definition

Als Kraft wird jede Aktion, die in einer Veränderung der Bewegung des Objekts resultiert, bezeichnet. Kräfte werden in Unzen, Gramm oder Newtons (circa 100gr per 1 Newton auf der Erde, da die Beschleunigung aufgrund der Schwerkraft als konstant angenommen wird und äquivalent zu  $9.807\text{m/s}^2$  ist). In der Kieferorthopädie ist das Maß der Kraft grundsätzlich Gramm (2).

## Richtung und Größe der Kraft

Nachdem Kraft ein Vektor ist, ist die Richtung der Kraft durch einen Pfeil dargestellt, der in dieselbe Richtung deutet, wie die, der Zahnbewegung.

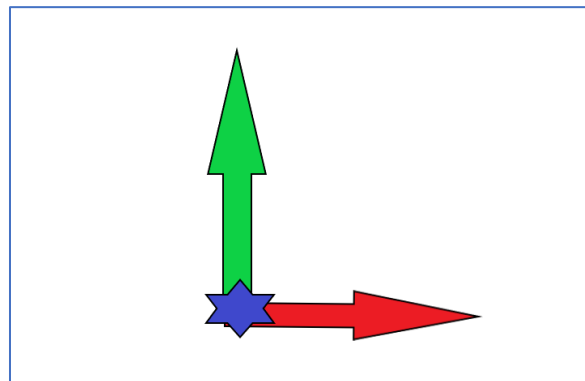
Konventionell repräsentiert die Länge des Pfeils die Größe der Kraft. (Fig 3).



*Figur 2: Einfache Kraft mit Richtung und Grösse*

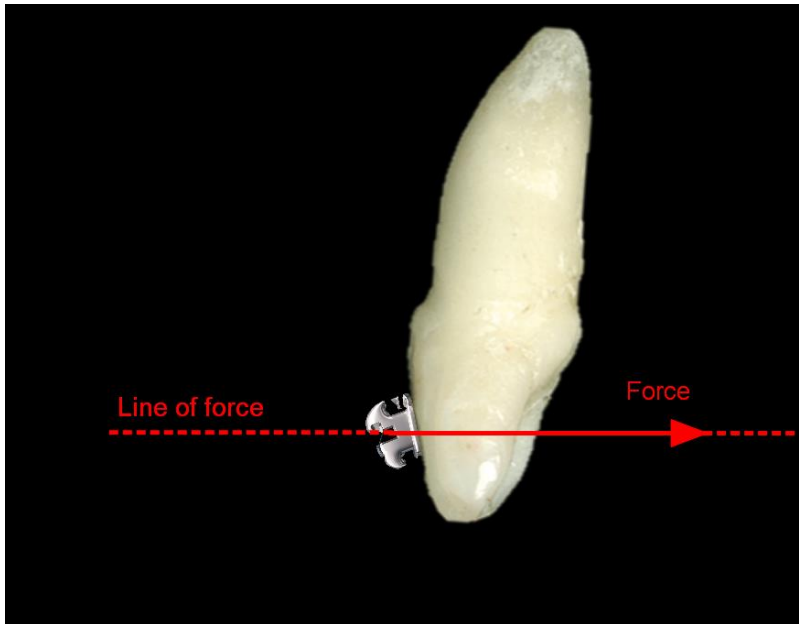
### 4.1.2 Angriffspunkt

Der Angriffspunkt der Kraft ist der Ort, an dem die Kraft auf das Objekt angewandt wird und das ist konventionell der Anfang des Pfeils. Der Ort des Angriffspunkts ist verbunden mit dem Masseschwerpunkt. Dieser genau definierte Ort bestimmt über die Tendenz des Objekts sich zu bewegen oder sich zu drehen, wenn eine Kraft ausgeübt wird.



*Figur 3: Angriffspunkt der Kraft*

Figur 4: die beiden Pfeile in rot und grün haben jeweils eine andere Richtung, aber haben denselben Angriffspunkt.

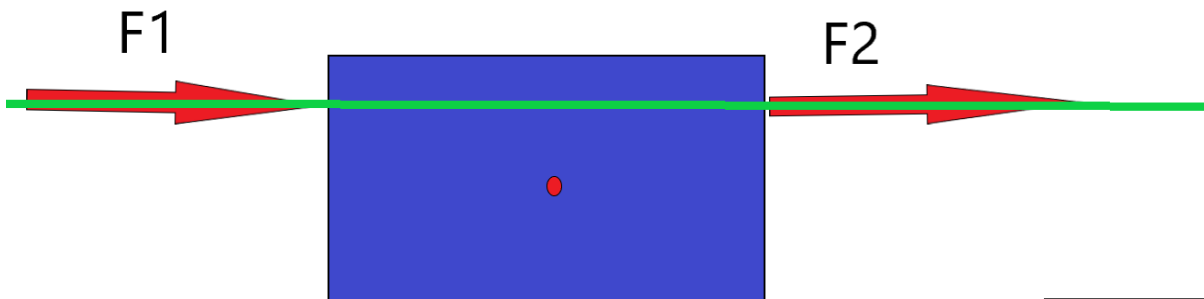


Figur 4: Eine einfache Kraftausübung auf das Bracket eines zentralen Schneidezahns

#### 4.1.3 Wirkungslinie mit Richtung und Größe.

Die Wirkungslinie ist die geometrische Darstellung der Lage der Kraftanwendung. Die Wirkungslinie ist die Achse der Verschiebung, wenn die Kraft angewandt wird. Die Richtung der Kraft ist durch den Pfeil markiert. Die Größe wird durch die Länge des Pfeils dargestellt.

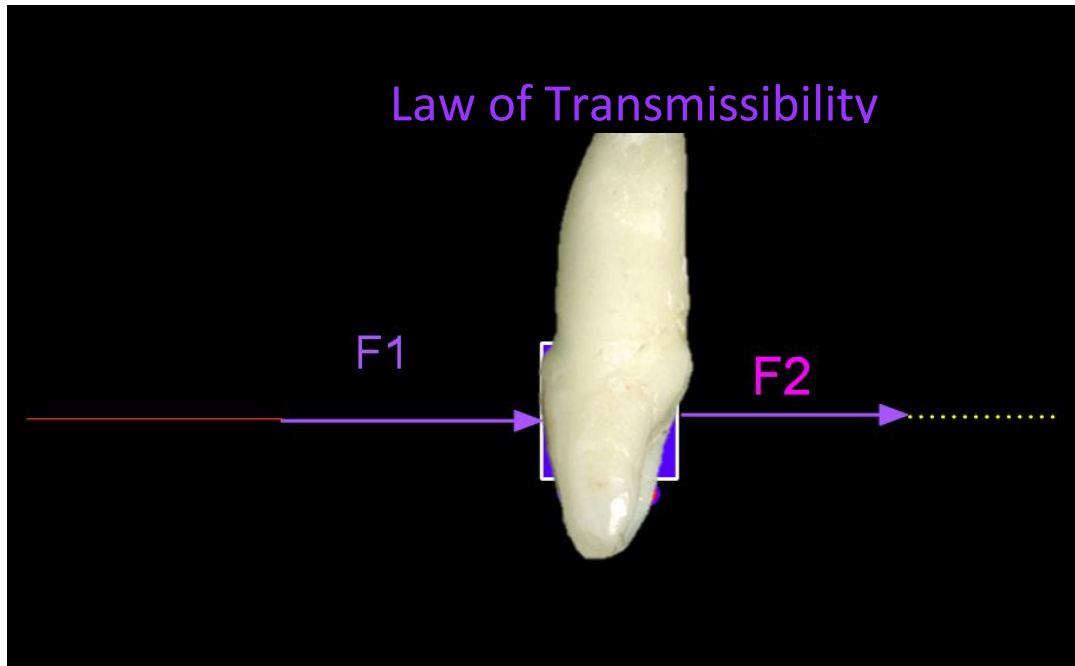
Zwei Kräfte mit gleicher Amplitude, gleicher Richtung und gleicher Wirkungslinie haben dieselbe Auswirkung auf einen festen Körper. In Figur 6, werden  $F_1$  und  $F_2$  dieselbe Auswirkung auf den blauen Körper hervorrufen. Es macht keinen Unterschied, ob eine Kraft drückt und die Andere zieht. Die Netto-Auswirkung wird identisch sein.



Figur 5: Wirkungslinie der Kräfte

#### 4.1.4 Gesetz der Übertragbarkeit von Kraft

Die Auswirkung einer Kraft auf einen Körper ist immer dieselbe, solange sie auf der gleichen Wirkungslinie platziert ist (Fig 7). Zum Beispiel macht es keinen Unterschied, solange die Wirkungslinie der langen Achse des Zahnes entlang verläuft, ob die Kraft an der Schneidekante, auf dem Bracket oder dem Cingulum angewandt wird, soweit die ausgeübte Kraft dieselbe Richtung und Größe hat.



Figur 7: Gesetz der Übertragbarkeit von Kraft:  $F_1$  und  $F_2$  haben denselben Effekt

#### 4.1.5 Angriffspunkt

Das Gesetz der Übertragbarkeit besagt, dass Kräfte mit gleicher Richtung und Größe dieselben Auswirkungen haben, unabhängig davon, wo sich der Angriffspunkt befindet, solange die Kraft auf derselben Wirkungslinie ausgeübt wird.

Skalare werden verwendet, um Kräfte zu beschreiben; Skalare haben eine Größe, jedoch keine Richtung. Vektoren hingegen haben eine Größe und Richtung (Vektoren werden bei freien Körperdiagrammen verwendet).

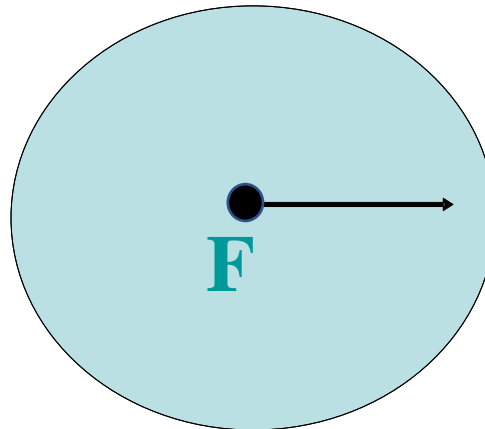
Feste Körper: Diese verändern ihre Form nicht durch Krafteinwirkung (Kompressions- oder Druckkräfte). Zähne sind feste Körper; das Gleiche kann hingegen nicht über Weichgewebe gesagt werden.

#### 4.1.6 Masseschwerpunkt

Der Masseschwerpunkt stellt den Gleichgewichtspunkt eines Systems dar. In einfachen Objekten, wie bei Zähnen, ist der Masseschwerpunkt ein Punkt, wo die Position der verteilten Masse null ist. Wenn keine Kraft auf den Körper ausgeübt wird, dann verhält es sich so, als würde seine ganze Masse auf diesem einzelnen Punkt vereint werden (Masseschwerpunkt).



# 1. Centre of Mass: balance point of a system



Figur 8 : Masseschwerpunkt

Wenn eine Kraft auf den Masseschwerpunkt ausgeübt wird, dann bewegt sich das Objekt in die Richtung der Kraftausübung, ohne, dass eine Rotation stattfindet (gerade Bewegung).

Das wäre so wie eine Box oder jedes andere Objekt auf dem Mond (oder in einem Umfeld, wo keine Kräfteeinwirkung auf den Zahn stattfindet) (Fig 9). Dies ist offensichtlich keine realistische Situation, sondern vielmehr ein theoretisches Konzept.

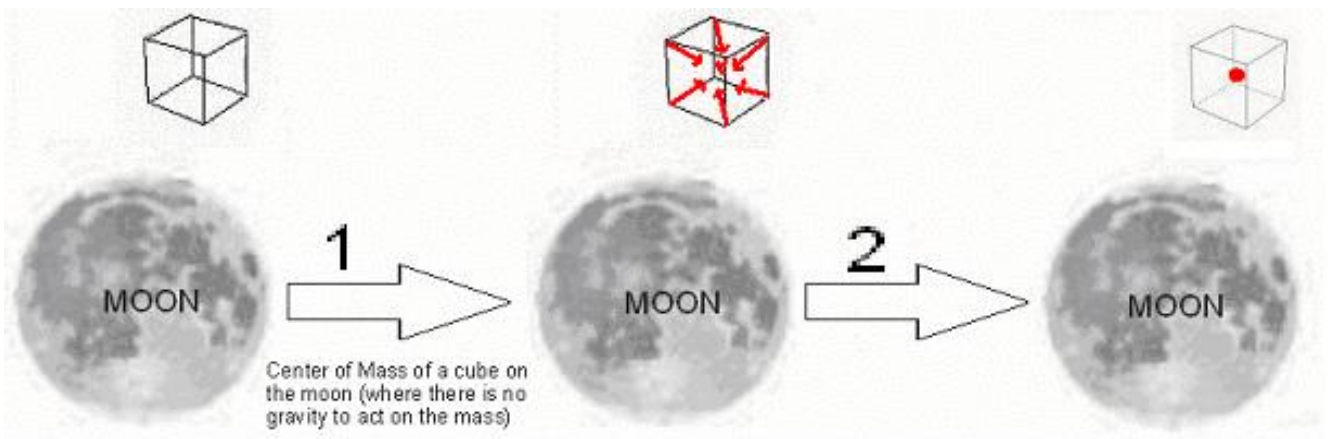


Fig 9: Zentrum der Masse auf dem Mond

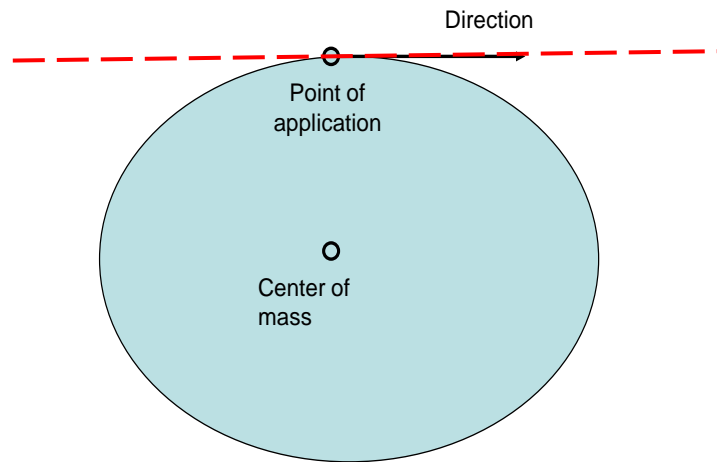


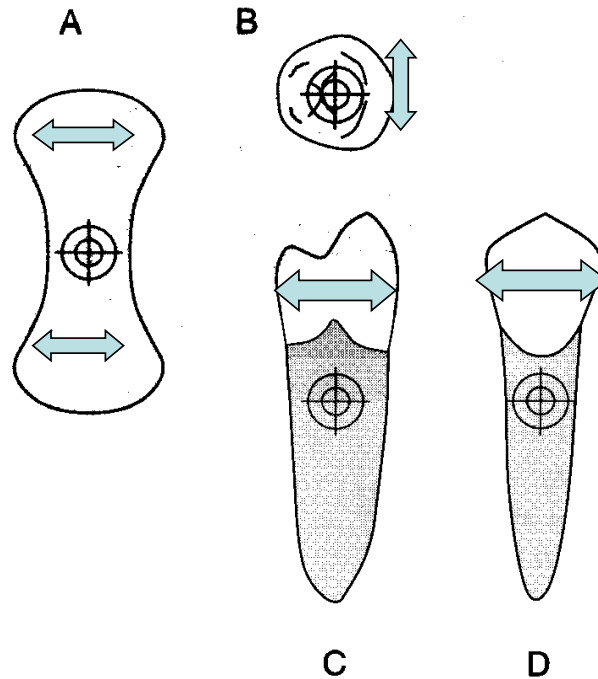
Fig 10: Wirkungslinie der Kraft abseits vom Massezentrum platziert

Wenn die Wirkungslinie eines freien Körpers abseits vom Massezentrum platziert ist, ist eine Kombination an Rotation und Bewegung zu erwarten.

## 5 WIDERSTANDSZENTRUM (CR)

---

Das Widerstandszentrum ist ein wichtiges Konzept in der Kieferorthopädie, da Zähne keine freien Körper darstellen. Die Zahnwurzeln sind durch parodontale Ligamente am Alveolarknochen verankert. Das Massezentrum und das Widerstandszentrum sind nicht an derselben Stelle. Das Widerstandszentrum ist apikaler platziert als das Massezentrum. Das ist eine mathematische Stelle, an welcher jeder Widerstand zur Verschiebung konzentriert wird. Berechnungen von Kraftsystemen in Anbetracht von ihrer Fähigkeit zur Bewegung oder Rotation werden in Relation zum Massezentrum durchgeführt.



Figur 11: Ort des Widerstandszentrums aus mehreren Blickwinkeln: A: Radikulär, B: Okklusal, C: Labio-lingual, D: Mesio-Distal

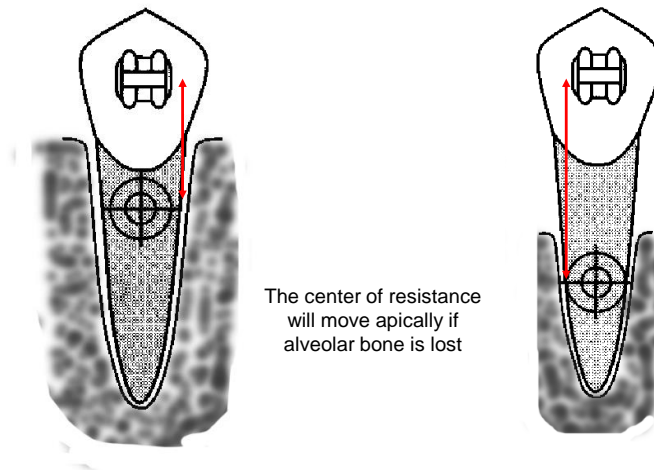
Das Widerstandszentrum verschiebt sich je nach Zahn und je nach parodontaler Unterstützung. Es ist jedoch ungefähr in der Mitte der Zahnwurzel (Fig 11).

Das Widerstandszentrum reagiert auf alle Kräfte, die auf den Körper ausgeübt werden. Bei Zähnen sind das alle Kräfte durch parodontale Ligamente (PDL), Blutgefäße, Knochen und Bindegewebe (Fig 12). Das Widerstandszentrum kann für einen einzelnen Zahn oder für mehrere Zähne angenommen werden, wenn sie zusammen verankert sind (und dadurch als eine große Masse agieren).

Wichtigkeit des Widerstandszentrums: Bei Kraftanwendung auf Zähne ist es unumgänglich ihre 3-dimensionalen Auswirkungen und die daraus resultierenden Bewegungen zu evaluieren.

## 5.1 VARIABILITÄT DES WIDERSTANDSZENTRUMS IM VERHÄLTNIS ZU PARODONTALER UNTERSTÜTZUNG

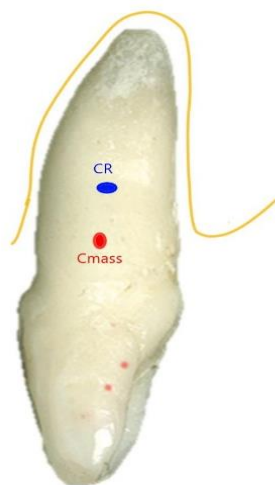
### Alveolar bone support



Figur 12: Das Widerstandszentrum bewegt sich apikal bei horizontalem Knochenverlust

Bei Patienten mit reduzierter parodontaler Unterstützung ist der Kamm des Alveolaren Knochens apikaler. Das Widerstandszentrum des Zahnes ist dann dramatisch apikaler und die Distanz vom Bracket zum Widerstandszentrum verdoppelt sich beinahe (Fig 12). Wenn die gleiche Kraft auf die Zahnspangen der beiden Zähne angewandt wird, werden daraus zwei unterschiedliche kieferorthopädische Bewegungen resultieren. Der Zahn auf der rechten Seite wird aufgrund der vergrößerten Distanz der Wirkungslinie zum Widerstandszentrum zur Rotation tendieren.

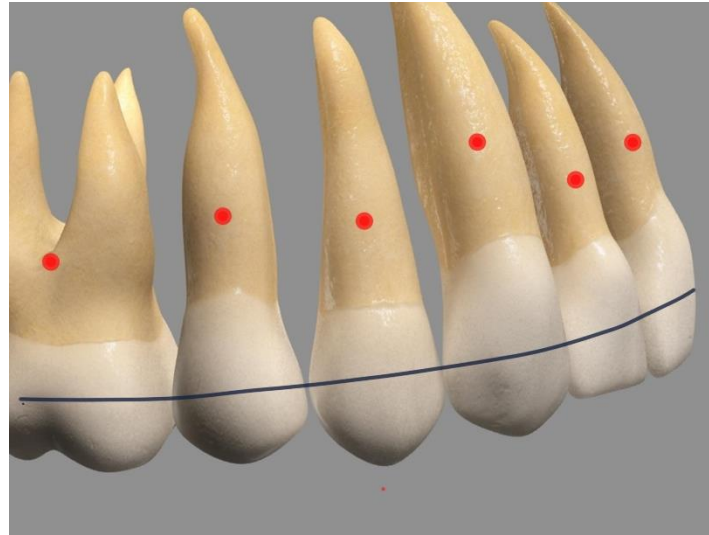
#### 5.1.1 Widerstandszentrum eines einzelnen Zahnes



Der Ort des Massezentrums ist aufgrund des "Widerstands" der parodontalen Ligamente und des Dentoalveolaren Knochens immer okklusaler als die des Widerstandszentrums. Nachdem es unmöglich ist, den Widerstand für jeden Zahn und Patient zu quantifizieren, bleibt das Widerstandszentrum ein theoretisches Konzept, das jedoch als Mittelwert zur Kreation von optimalen Kraftsystemen herangezogen werden kann.

Figur 13: Widerstandszentrum (CR) vs Massezentrum (Cmass) eines monoradikularen Zahns

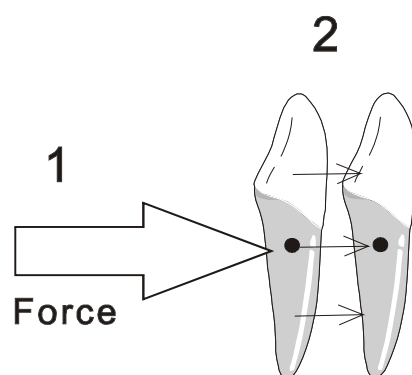
In jenen Fällen, in denen die parodontale Unterstützung konstant ist, befindet sich das Widerstandszentrum verschiedener Zähne auf unterschiedlicher Höhe. Die oberen Eckzähne haben dann ein höheres Widerstandszentrum, während es bei Prämolaren und lateralen Schneidezähnen tiefer liegt.



Figur 14: Unterschiedliche Positionen von Widerstandszentren bei Annahme, dass die parodontale Unterstützung gleichmäßig und normal ist

Es ist offensichtlich, dass das Widerstandszentrum je nach Zahn divergiert. Dabei kommt es auf die Wurzellänge und die Anatomie an, das Widerstandszentrum unterscheidet sich beispielsweise bei Schneidezähnen, Molaren, Prämolaren und Eckzähnen. Die Position hängt auch von der Knochenhöhe ab, sodass es auch einen Unterschied macht, ob ein Kind oder ein Erwachsener, mit Parodontitis, behandelt wird (das Widerstandszentrum bewegt sich apikaler bei Erwachsenen mit Konchenverlust) (Fig 14).

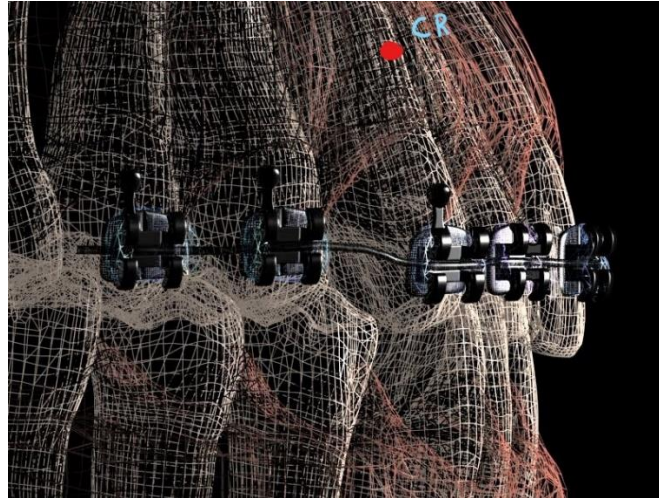
Eine andere Betrachtungsweise des Widerstandszentrum ist jene, dass es die Stelle eines Körpers ist, wo eine einzelne Kraftanwendung in eine geradlinige Bewegung übersetzt wird (Fig 15).



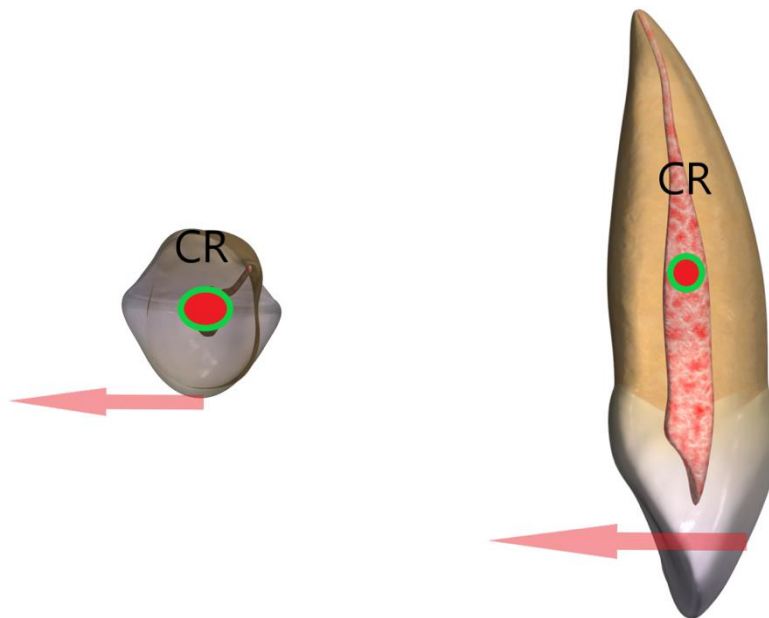
Figur 15: Kräfte wirken auf das Widerstandszentrum und resultieren in gerader Bewegung

### 5.1.2 Widerstandszentrum für eine Gruppe von Zähnen

Wenn Zähne durch Brackets oder Drähte verbunden sind, entsteht ein neues Widerstandszentrum und diese Gruppe von Zähnen wird dann als ein einzelnes Objekt betrachtet.



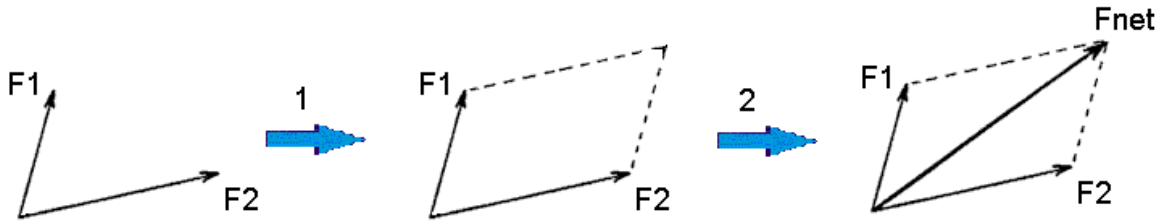
Figur 16: Widerstandszentrum einer Gruppe von Zähnen



Figur 17: Wenn Kraft auf Brackets angewandt wird, ist die Wirkungslinie immer abseits vom Widerstandszentrum

### 5.1.3 Kombination von Kräften. Resultierende Kraft oder Netto-Kraft

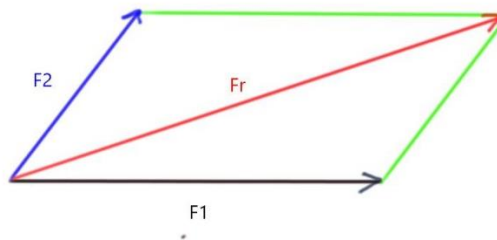
In der Kieferorthopädie wird eine Kombination aus Kräften in den drei verschiedenen Richtungen des Raumes herangezogen und die Netto-Kraft (oder resultierende Kraft) berechnet. Die Regel des Parallelogramms wird benutzt, um die Summe der Vektoren zu berechnen.



Figur 18. Regel des Parallelogramms

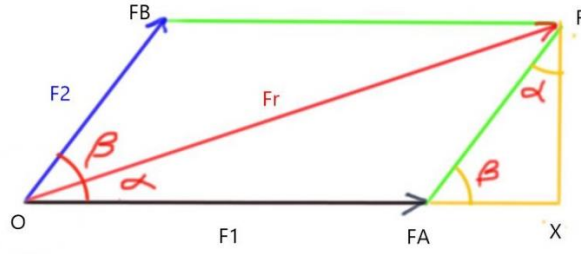
Es ist wichtig, dass die Kraft ( $F_{net}$ ), die Netto-Kraft, welche die Summe der Vektoren aller Kräfte darstellt, ist ( $F_1$  and  $F_2$ ). Die Regel des Parallelogramms erlaubt es uns, die Netto-Kraft zu bestimmen: Kraft  $F_1$  und  $F_2$  sind Vektoren und haben Länge (Kraft) sowie Richtung. Wenn  $F_1$  und  $F_2$  in einem Winkel zueinander stehen, bilden sie ein Parallelogramm. Die Diagonale, die durch dieses Parallelogramm verläuft, ist die resultierende Netto-Kraft.

Berechnen der Summe von 2 Vektoren (Sehen Sie sich folgenden URL für detaillierte Erklärungen an: <https://www.mathstopia.net/vectors/parallelogram-law-vector-addition>)



Figur 19: Berechnung der Summe zweier Vektoren

Um die Grösse der resultierenden Kraft ( $F_r$ ) auszurechnen, verwenden wir folgende Formel  $F_r = F_1 + F_2$ . Wir müssen die Wirkungslinie von  $F_1$  verlängern, um ein rechtwinkliges Dreieck  $OXR$  herzustellen und um Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  hinzuzufügen.



Figur 20: Ausdehnung des Parallelogramms

Berechnung der Länge von Fr

$$Fr^2 = OX^2 + RX^2$$

$$OX = OFA + FAX \text{ or}$$

$$Fr^2 = (OFa + FaX)^2 + Rx^2$$

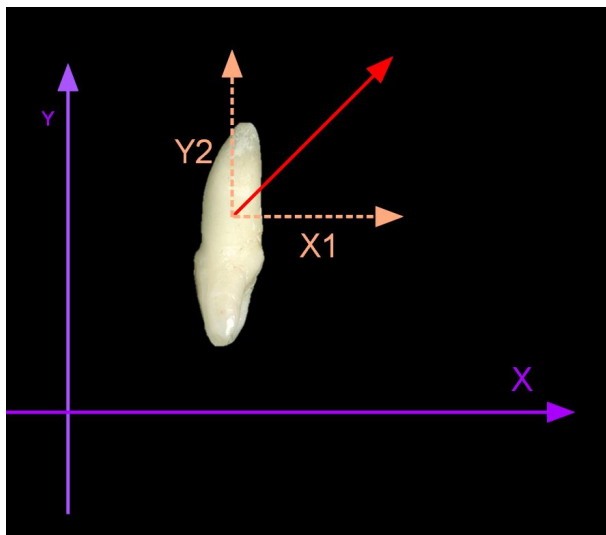
Wenn es voll aufgelöst ist, bekommen wir:

Wir wissen, dass  $\cos \beta = \frac{\text{abgrenzende Seite zum } \beta \text{ Winkel}}{\text{Hypotenuse}}$

$$\frac{FaX}{F2} \text{ or } FaX = F2 \cos \beta \text{ and } \sin \beta = \frac{Rx}{F2} \text{ or } RX = F2 \sin \beta$$

$$Fr^2 = F2 \sin \beta +$$

$$\text{Nach Ersetzen der Werte: } Fr = \sqrt{F1^2 + 2F1F2 \cos \beta + F2^2}$$



Figur 21: Resultierende Netto-Kraft, wenn Kräfteinwirkung im Winkel von 90 Grad

Bei Kraftansatz im rechten Winkel, vereinfacht sich die Formel, sodass diese dann wie folgt lautet:

$$Fr = \sqrt{X1^2 + FY2^2}$$

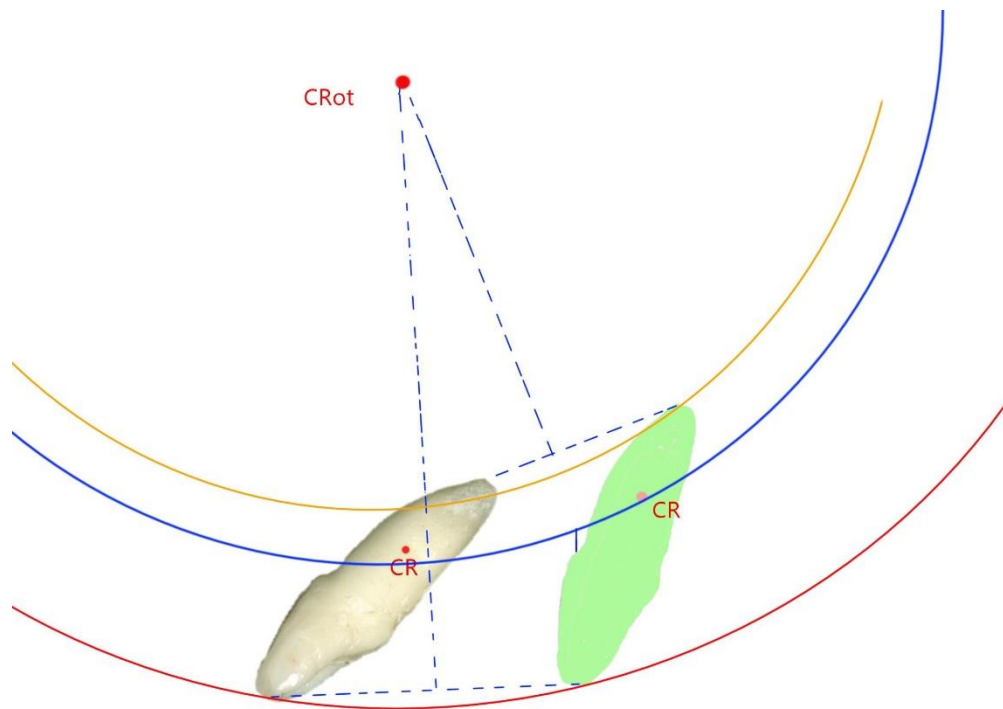


## 6 ROTATIONSZENTRUM

---

Das Rotationszentrum ist der Punkt, um welchen das Objekt rotiert. Dieser Punkt variiert mit dem Widerstandszentrum und der Krafteinwirkung auf das Objekt. Liegen das Rotationszentrum und das Widerstandszentrum zusammen, entsteht eine reine Rotation. Reine Bewegung findet dann statt, wenn das Rotationszentrum in unendlicher Distanz vom Widerstandszentrum liegt.

Um das Zentrum der Rotation zu finden, (Fig 22), wählen Sie zwei Punkte am Zahn (oder Objekt) und ziehen Sie eine Linie zwischen den Punkten. An dem Punkt, an dem sich die rechtwinkligen Linien kreuzen, befindet sich das Zentrum der Rotation.

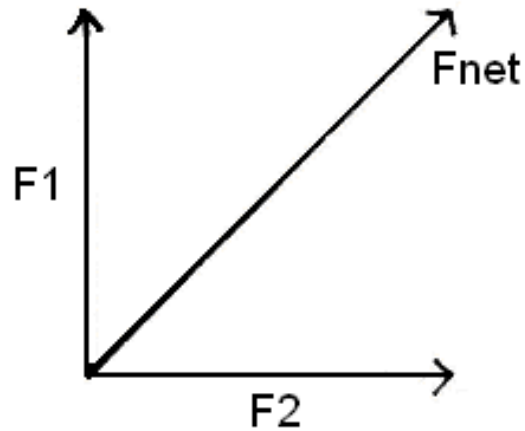


Figur 22: Methode zur Bestimmung des Rotationszentrums

### 6.1.1 Freie Körperdiagramme

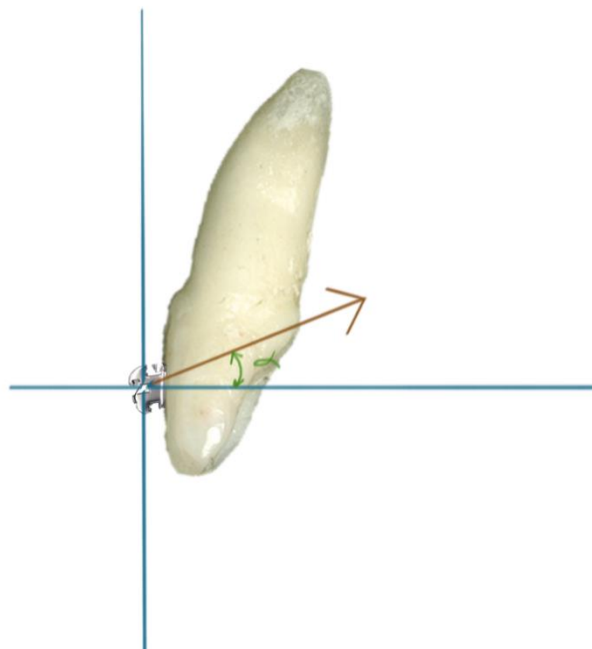
Freie Körperdiagramme helfen dabei, die Auswirkungen verschiedener gleichzeitiger Krafteinwirkungen auf einen Körper (Netto-Kraft) vorherzusagen oder bei der Aufschlüsselung der Kraft in ihre Komponenten.

Ein Beispiel eines freien Körperdiagramms mit  $F_1$ ,  $F_2$  und  $F_{net}$  (Denken Sie an die Parallelogramm Regel) (Fig 23) .



Figur 23: Freies Körperdiagramm

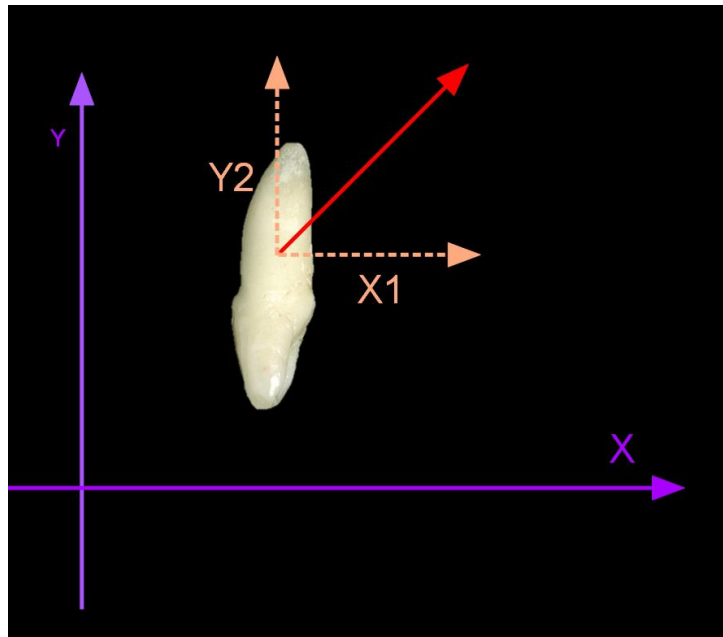
Ein klinisches Beispiel zum Gebrauch eines freien Körper Diagramms mit einem Intrusionsbogen



und Gummizügen

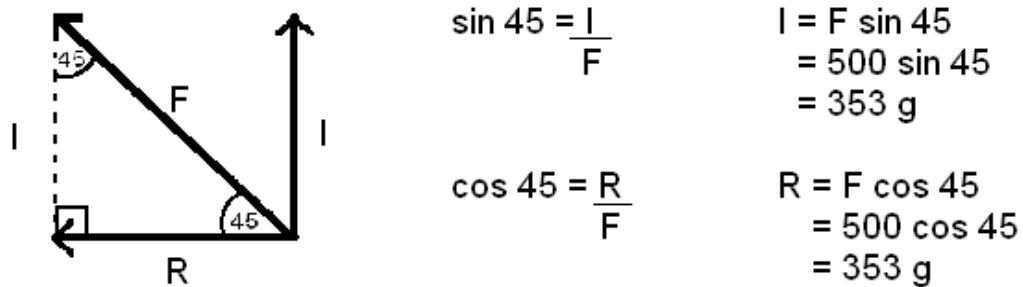
Figur 24: Einfache Kraft zur Intrusion und Retraktion oberer Scheidezähne

Eine Kraft  $F$  wird angewandt. Diese hat intrusive und retrusive Komponenten. Wenn wir die Größe und den Winkel der Kraftanwendung kennen, können wir die Größe der intrusiven und retrusiven Kräfte mit Hilfe von einfacher Trigonometrie finden (Fig 24-25).



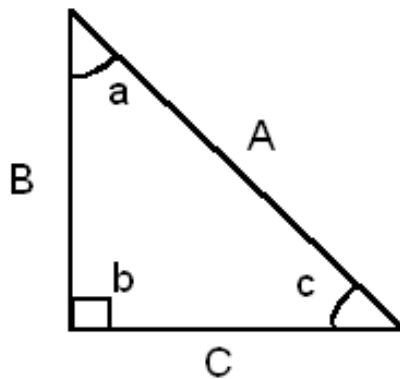
Figur 25: Freies Körperdiagramm und die Kraft, die durch einen Headgear erzeugt wird

Wenn wir wissen, dass  $F_{net} = 500g$ , können wir I (Intrusive Kraft) und R (Retrusive Kraft), mit Hilfe der rechtwinkligen-Dreiecks-Regel, lösen (Fig 26).



Figur 26: Bestimmung der resultierenden intrusiven und retrusiven Kräfte mit Hilfe von der rechtenwinkligen-Dreiecks-Regel

Somit, ist die Kraftausübung von 500g in Richtung  $F_{net}$  dieselbe, wie 353g Kraft in Richtung I und 353g in Richtung R auf dem Objekt, zur gleichen Zeit.



$$\sin a = \frac{\text{opposite}}{\text{hypoteneuse}} = \frac{B}{A}$$

$$\cos a = \frac{\text{adjacent}}{\text{hypoteneuse}} = \frac{C}{A}$$

$$\tan a = \frac{\text{opposite}}{\text{adjacent}} = \frac{B}{C}$$

Figur 26: Trigonometrische Berechnungen

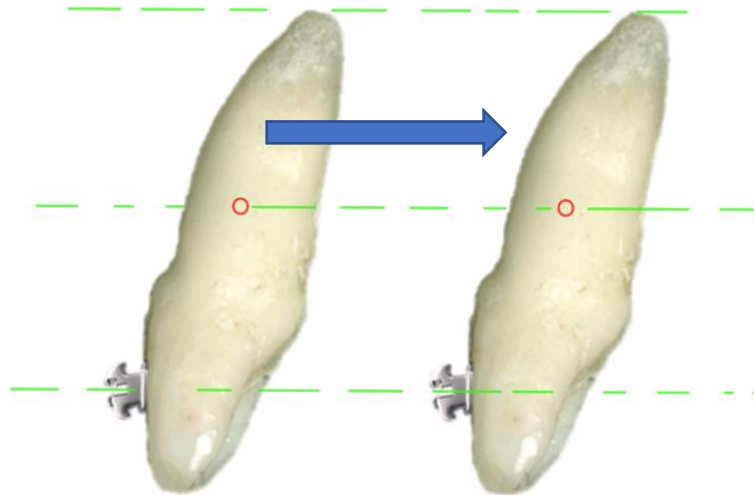
## 7 ZAHNBEWEGUNGEN

---

Zähne bewegen sich in allen drei Raumdimensionen. Es ist wichtig, sich über die verschiedenen, möglichen Bewegungstypen im Klaren zu sein, wenn man einen Behandlungsplan aufstellt, um alle erwünschten und unerwünschten Zahnbewegungen berücksichtigen zu können.

### 7.1 BEWEGUNG

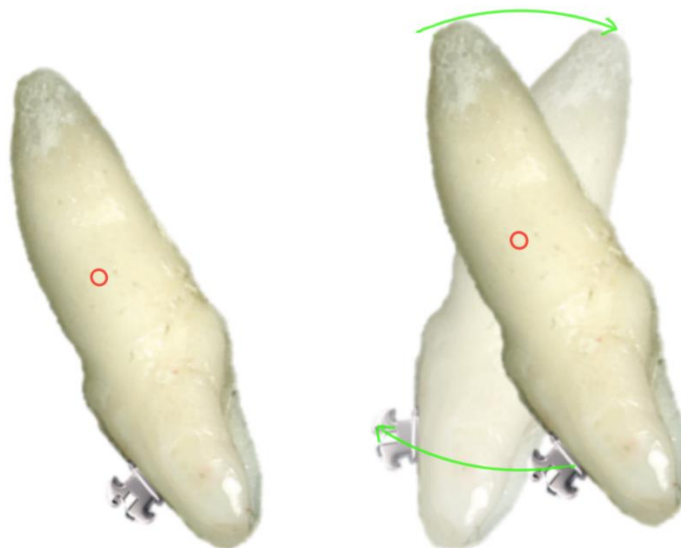
Bei der Bewegung verschieben sich alle Punkte am Körper mit gleicher Länge, in die gleiche Richtung (Fig 28). Im Endeffekt ist dabei das Rotationszentrum unendlich weit weg vom Zahn, da es keine Rotation gibt.



Figur 28: Körperliche Bewegung der zentralen Schneidezähne

## 7.2 ROTATION (REINE)

Eine reine Rotation erfolgt dann, wenn der Körper um das Rotationszentrum rotiert (Cres) (z.B., wenn das Rotationszentrum am Widerstandszentrum ist Fig 29)).



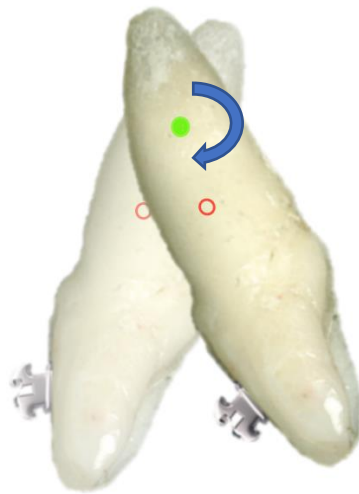
Figur 29: Reine Rotation

### 7.3 KIPPEN

Beim Kippen ist das Resultat davon anhängig, wo die Kraft angesetzt wird.

#### 7.3.1 Unkontrolliertes Kippen:

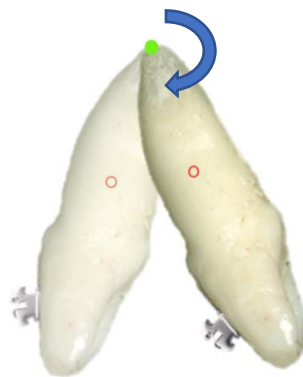
Wenn die Kraft an der Krone angewandt wird, dann bewegt sich die Krone in eine Richtung, während die Wurzel sich in die Andere bewegt. In diesem Fall ist das Rotationszentrum nahe oder apikal zum Widerstandszentrum, sodass ein Kippen über dem Widerstandszentrum stattfindet (Fig 30).



*Figur 30: Unkontrolliertes Kippen*

#### 7.3.2 Kontrolliertes Kippen

Das Zentrum der Rotation ist der Apex des Zahnes. Dazu braucht es ein Drehmoment und eine Kraft, sodass der Zahn über den Rotationspunkt kippt.

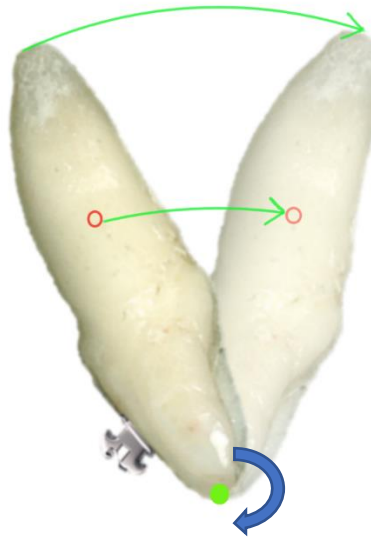


*Figur 31: Kontrolliertes Kippen*

A) Zum Beispiel, bei der Korrektur einer Klasse II Division I Malokklusion mit Proklination der Oberkieferfront, kann der Gebrauch von unkontrolliertem Kippen in einer Perforation der bukkalen Knochenwand resultieren. Im Gegensatz dazu würde kontrolliertes Kippen nur in der Bewegung der Krone resultieren, sodass die Wurzel nicht die bukkale Knochenwand perforieren würde.

### 7.3.3 Wurzelbewegung

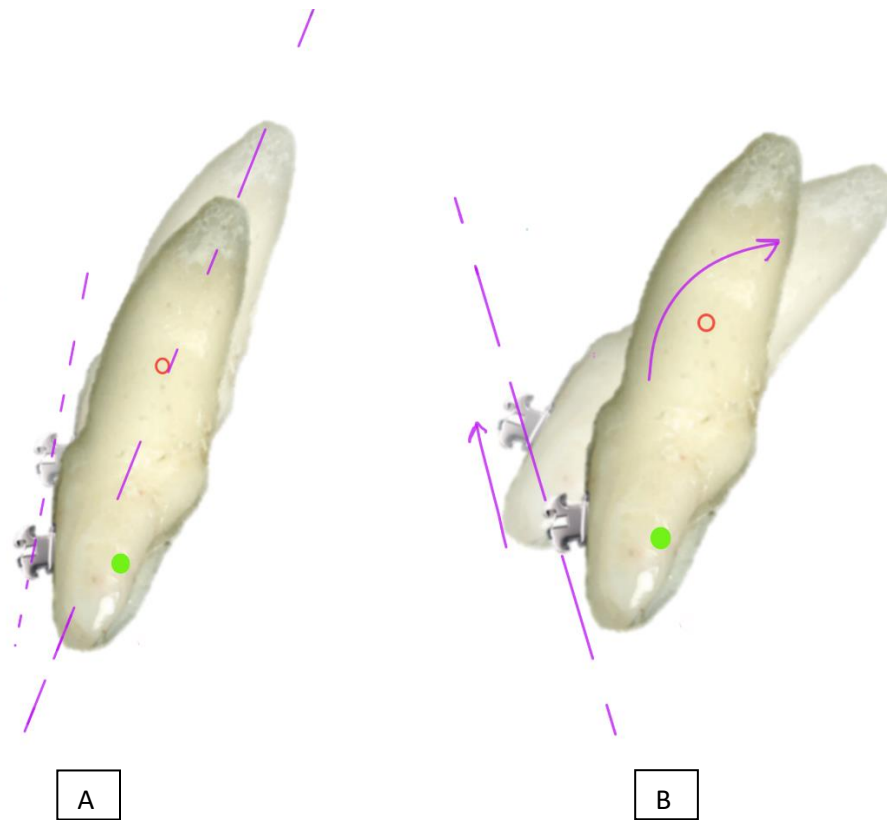
Wurzelbewegung findet dann statt, wenn das Rotationszentrum an oder in der Nähe der Schneidekante ist und die Rotation dann um diesen Punkt stattfindet (Fig 32). Deshalb wird die Krone weniger bewegt als die Wurzel. Wurzelbewegungen dauern, aufgrund der dafür notwendigen Knochenresorption länger.



Figur 32: Wurzelbewegung

### 7.3.4 Intrusion/Extrusion

Intrusion und Extrusion beinhalten Bewegungen entlang der Axe des Zahnes (Fig 33, 34). Erinnern Sie sich an die körperliche Bewegung (Fig 28), das Zentrum der Rotation ist für diese Art von Bewegung unendlich weit positioniert (weil es keine Rotation gibt). Mit anderen Worten rotiert der Zahn um einen Punkt in unendlicher Distanz, sodass man keine Rotation sieht, nur eine rein körperliche Bewegung oder eine Intrusions-/Extrusions-Bewegung.

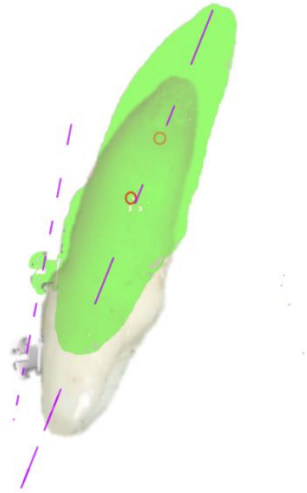


Figur 33 A. Intrusion eines extrudierten Schneidezahns

*Intrusion:* In Figur 33A, (im folgenden Beispiel werden unerwünschte Resultate einer Intrusion nicht beachtet: während ein Zahn intrudiert, extrudieren die Nachbarzähne, außer, wenn sie verankert sind. Weitere Details im Kapitel Verankerung. Relative Intrusion ist das Resultat von Proklination und Intrusion (Fig 33B).

*Extrusion:* (im folgenden Beispiel (Fig 34), werden unerwünschte Resultate einer Extrusion nicht beachtet: während ein Zahn extrudiert wird, intrudieren die Nachbarzähne leicht, außer, wenn sie verankert sind (Verweis Kapitel bzgl. der Verankerung).





Figur 34: Extrusion eines intrudierten Schneidezahns

## 8 KRAFT SYSTEME

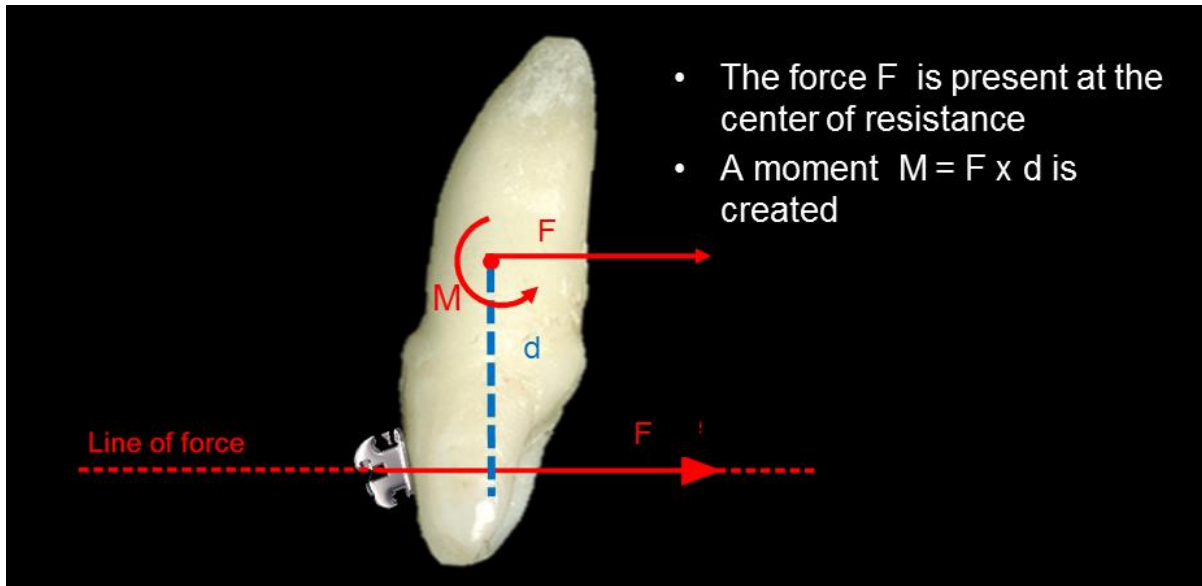
---

Um zu verstehen, wie man gewünschte Zahnbewegungen erzeugt, sollte man sich mit Kraftsystemen auseinandersetzen. Kraftsysteme bestehen aus einem Momentum (Drehmoment) und einer Kraft, deren Verhältnis zueinander (Ratio) den Typ der Bewegung bestimmt. Dieser Abschnitt setzt sich auseinander mit den Drehmomenten, Kraftpaaren, dem Momentum- zu-Kraft-Verhältnis und Bewegungen, die entstehen, wenn Kräfte und Systeme sich verändern.

### 8.1 DREHMOMENT

Der Drehmoment ist die Tendenz der Kraft eine Rotation an einem Körper zu verursachen. Um das Momentum einer Kraft zu berechnen, multipliziert man die Größe der Kraft mit der rechtwinkligen Distanz zum Widerstandszentrum, über welches das Drehmoment stattfindet (Fig 35).

$$M = F \times d$$



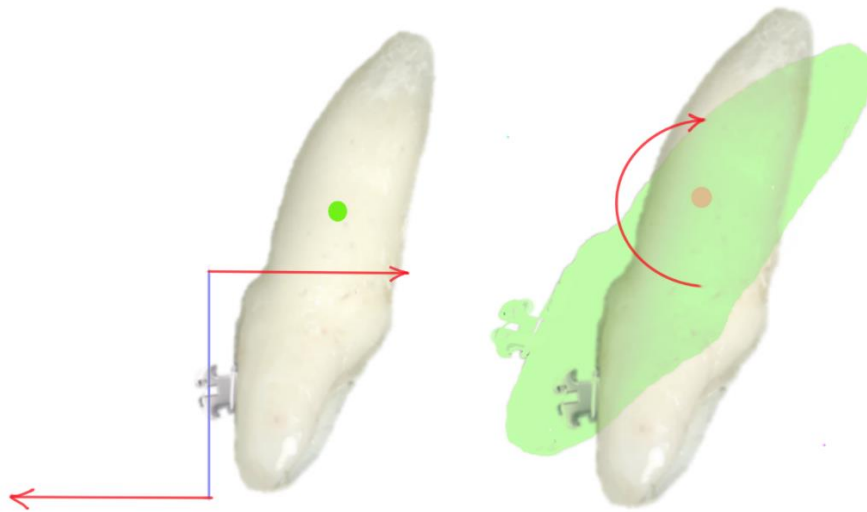
Figur 35: Drehmoment verursacht durch Kraftanwendung aus der Distanz vom Widerstandszentrum

## 8.2 KRAFTPAARE

Ein Kraftpaar ist ein reines Drehmoment und findet statt, wenn zwei Kräfte ( $F_1$ ,  $F_2$  gleicher Größe und gegenteiliger Richtung), jedoch parallel zueinander einwirken.

Um das Momentum des Kraftpaares zu berechnen, müssen die Kräfte separat betrachtet werden.

Beispiel:  $F_1$  und  $F_2$  produzieren keine translatorischen Wirkungen, weil sie von gleicher Größe und gegenteiliger Richtung sind und sich daher gegenseitig aufheben. Die Momente der beiden Kräfte heben sich hingegen nicht gegenseitig auf, weil sie eine Rotation in dieselbe Richtung generieren (Stellen Sie sich die Rotation über das Widerstandszentrum vor, wenn Kräfte  $F_1$  und  $F_2$  angewandt werden). Um das gesamte Drehmoment auf das System zu ermitteln, addieren Sie die Momente: das ist ein Kraftpaar. Dabei ist es gleichgültig, wo die Kraft am Objekt (oder Zahn) ansetzt. Sehen Sie sich das folgende Beispiel eines Kraftpaares an (Fig 36).



Figur 36: Kraftpaar, Beispiel 1

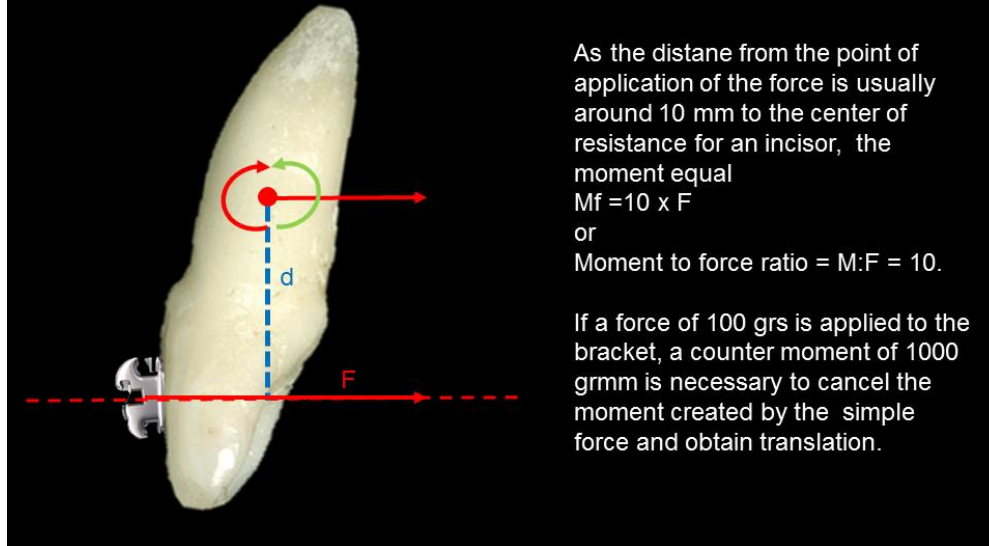
Nachdem es für ein Kraftpaar gleichgültig ist, wo die Kraft ansetzt, kann dasselbe Resultat dadurch erreicht werden, indem  $F_1$  und  $F_2$  an anderer Stelle angesetzt werden (Dieser neue Ort ist im folgenden Beispiel biologisch besser und klinisch sicherer). Abschließend ist zu sagen, dass es nicht darauf ankommt, wo das Kraftpaar am Zahn agiert. Das Netto-Momentum auf dieses System ist gleich einer Kraft multipliziert mit der Distanz zwischen den Kräften.

### 8.3 MOMENTUM ZU KRAFT VERHÄLTNIS

Das Verhältnis von Momentum zu Kraft kombiniert die translatorischen und rotierenden Bewegungen. Das Verhältnis kann durch das Multiplizieren der Kraftgröße mit der rechtwinkligen Distanz zum Widerstandszentrum eines oder mehrerer Zähne errechnet werden (Fig 37).

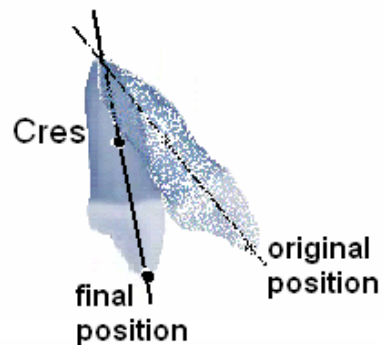
Die folgenden Beispiele zeigen kontrolliertes Kippen eines Zahns durch Gebrauch von kombinierter körperlicher Bewegung und Rotation (einfache Kraft und Momentum) (Fig 38, Fig 39).

# Moment to force ratio



Figur 37: Momentum zu Kraft Verhältnis für die körperliche Bewegung

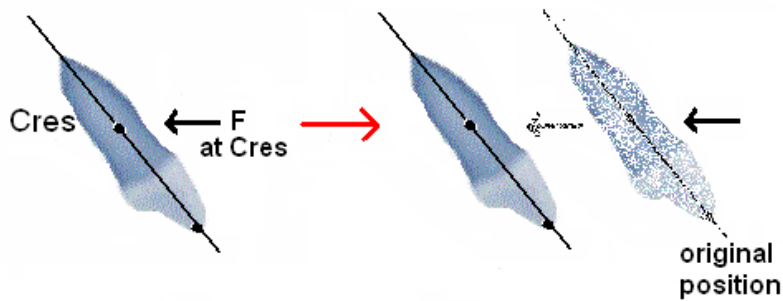
Controlled Tipping:  
If we want the following movement:



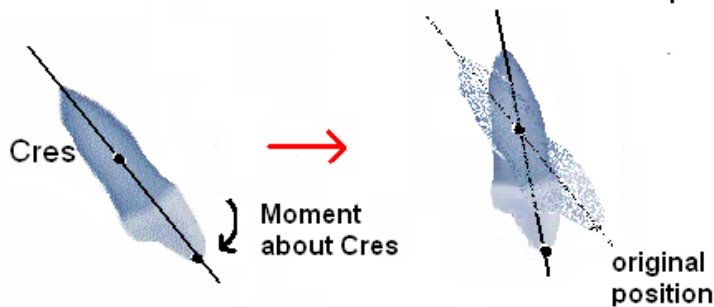
Figur 38: Gewünschte Bewegung

Break up the movement into its translation and rotation component parts

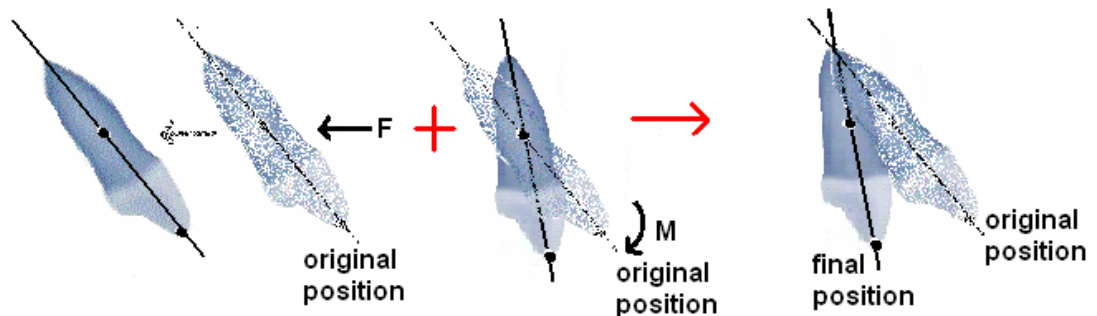
Translation:



Rotation:



Result:

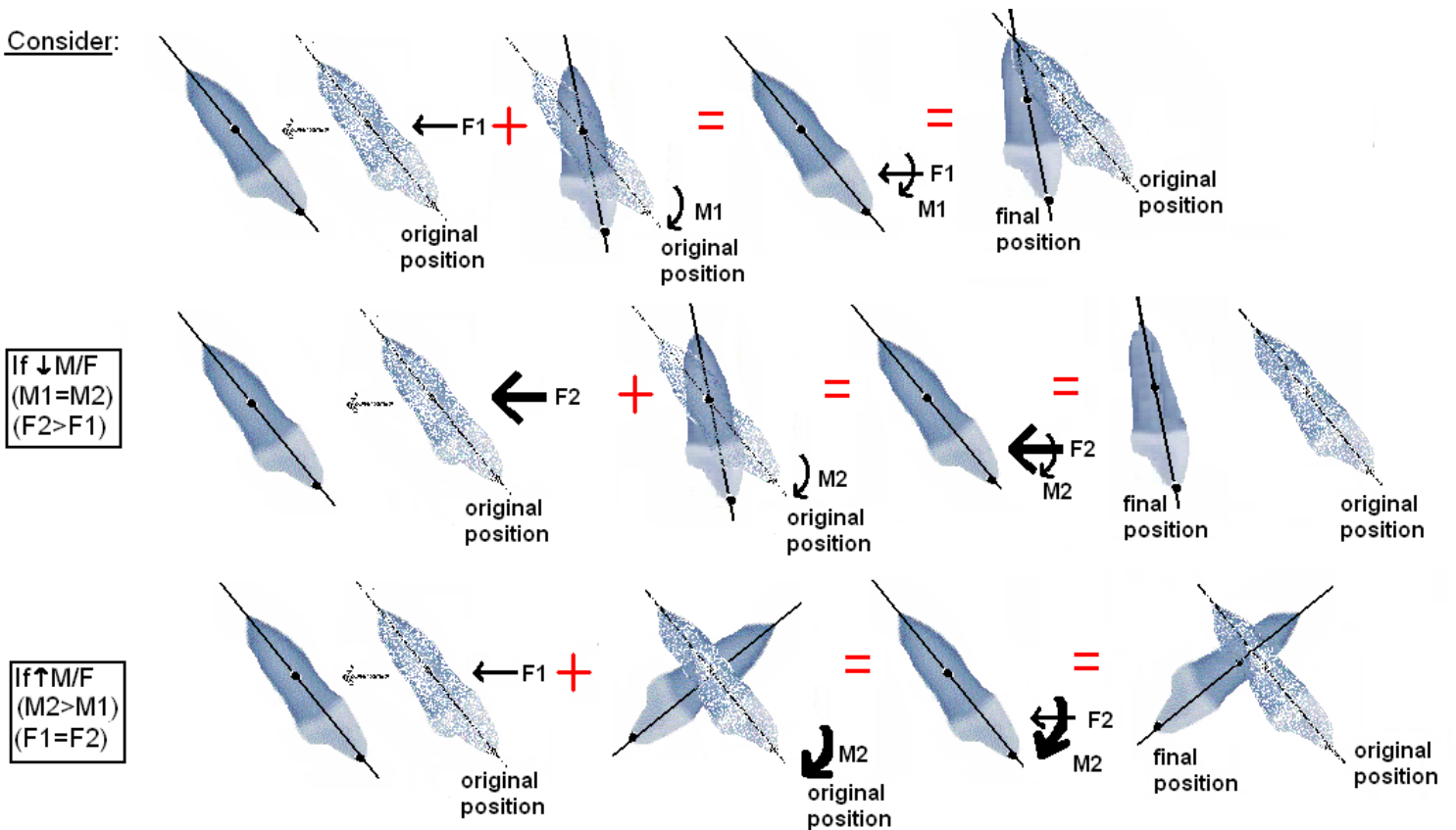


Figur 39: Kombination von Translation und Rotation um kontrolliertes Kippen zu erzeugen

Durch die Veränderung des Verhältnisses von Moment zu Kraft (M/F Ratio), können verschiedene Rotationszentren erzeugt werden. Figur 40 zeigt genau diese Wirkung beim kontrollierten Kippen, aufgrund der Veränderung der M/F Ratio.

Reduziert man die M/F Ratio (M bleibt konstant oder wird reduziert, während F erhöht wird), dann erreicht man eine bessere körperliche Bewegung, weil das Zentrum der Rotation sich in Richtung Apex des Zahnes bewegt (mit anderen Worten: weg vom Widerstandszentrum, ins Unendliche). Wenn die M/F Ratio durch Erhöhung des M und Verringerung der F erhöht wird, erreicht man mehr Rotation, da das Zentrum der Rotation sich in Richtung Widerstandszentrum bewegen wird (mit anderen Worten: Rotationszentrum bewegt sich aus seiner ursprünglichen Position mehr Richtung Schneidekante).

Consider:

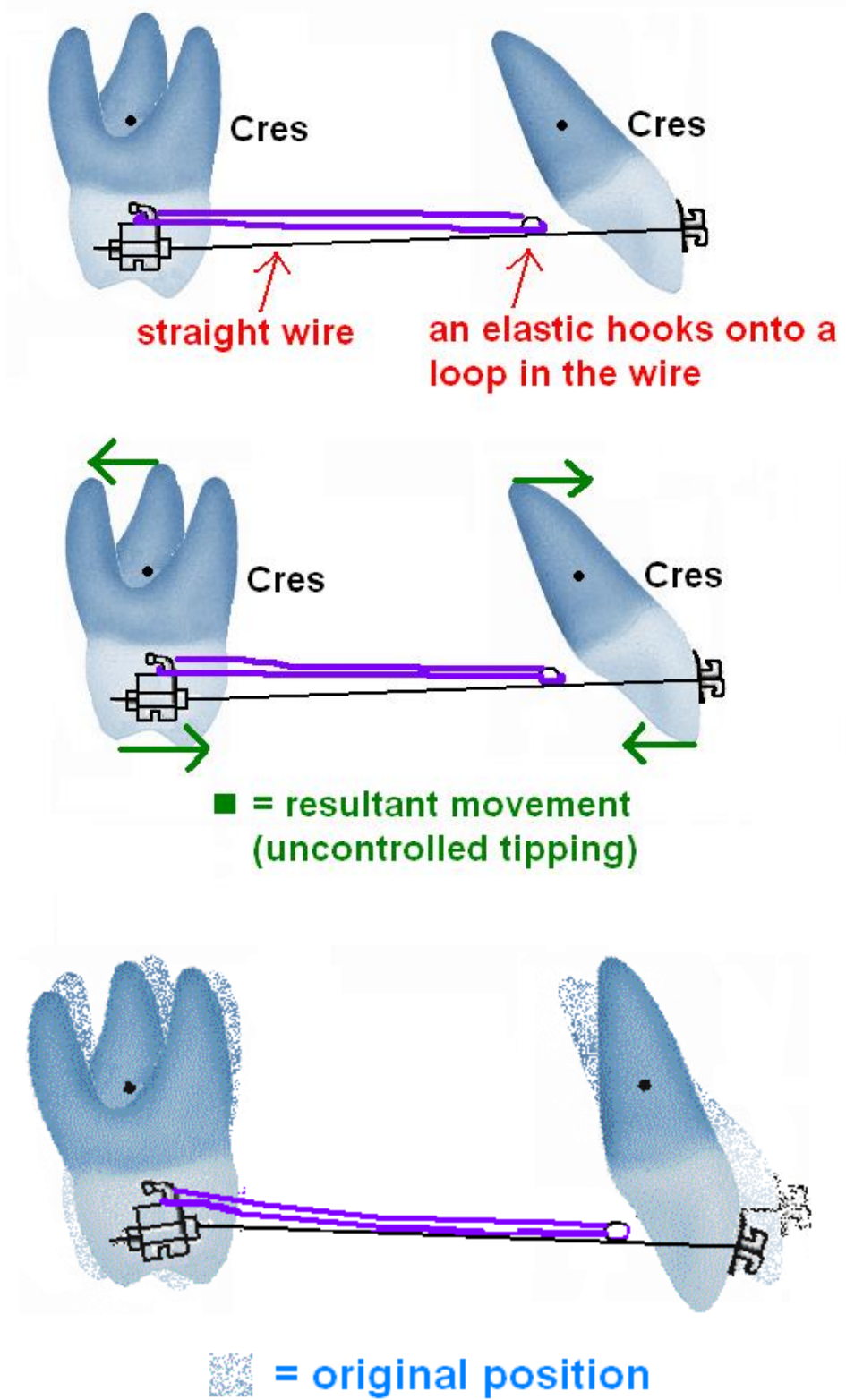


Figur 40: Auswirkungen durch Änderung des Moment-zu-Kraft-Verhältnisses

#### 8.4 BEWEGUNGEN WENN KRÄFTE UND SYSTEME VERÄNDERT WERDEN

Wir können das Wissen, das wir uns von den äquivalenten Kraftsystemen angeeignet haben an einem realen Beispiel anwenden. Nämlich bei der Schneidezahn Retraktion.

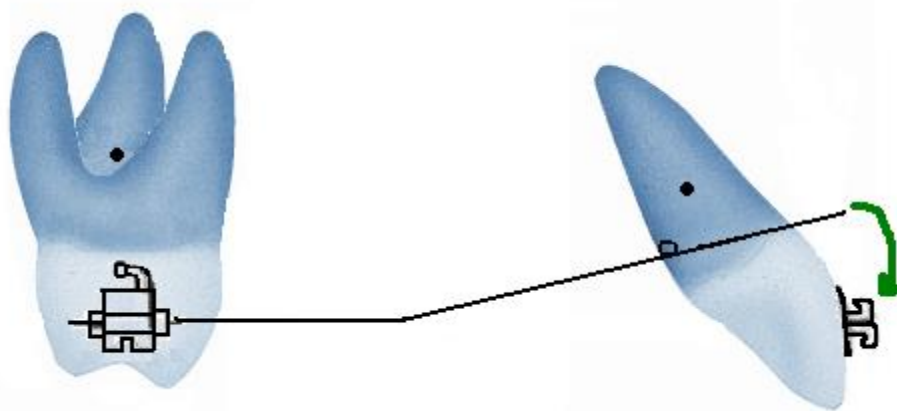
Wenn wir einen Molar als Anker verwenden, können wir nicht einfach einen geraden Draht zwischen den Schneidezähnen und Molaren platzieren und eine Schlaufe im Draht einbiegen um mit einem elastischen Gummizug eine Retraktion zu erzeugen. Diese Situation würde in einem unkontrollierten Kippen beider Zähne resultieren (Rotationszentrum wird beim Widerstandszentrum liegen (Fig. 41).



Figur 41: Schneidezahn Retraction durch Gummizug an Schlaufe im Draht. Resultat ist unkontrolliertes Kippen.

Um die Bewegung kontrollieren zu können, müssen wir ein Moment an der Krone hinzufügen um dem Moment, das durch die Kraft erzeugt wird, entgegenzuwirken, um eine möglichst reine Bewegung zu erreichen (Sehen Sie sich dazu das Kapitel über äquivalente Kraftsysteme an). Wir können dieses Moment an der Krone dadurch erzeugen, indem wir den Draht des Zahnes so biegen, dass der Zahn die Tendenz zum kontrollierten Kippen bekommt, sobald der Draht in seiner Position fixiert ist. Das folgende Beispiel zeigt dieses Konzept (Fig 42).

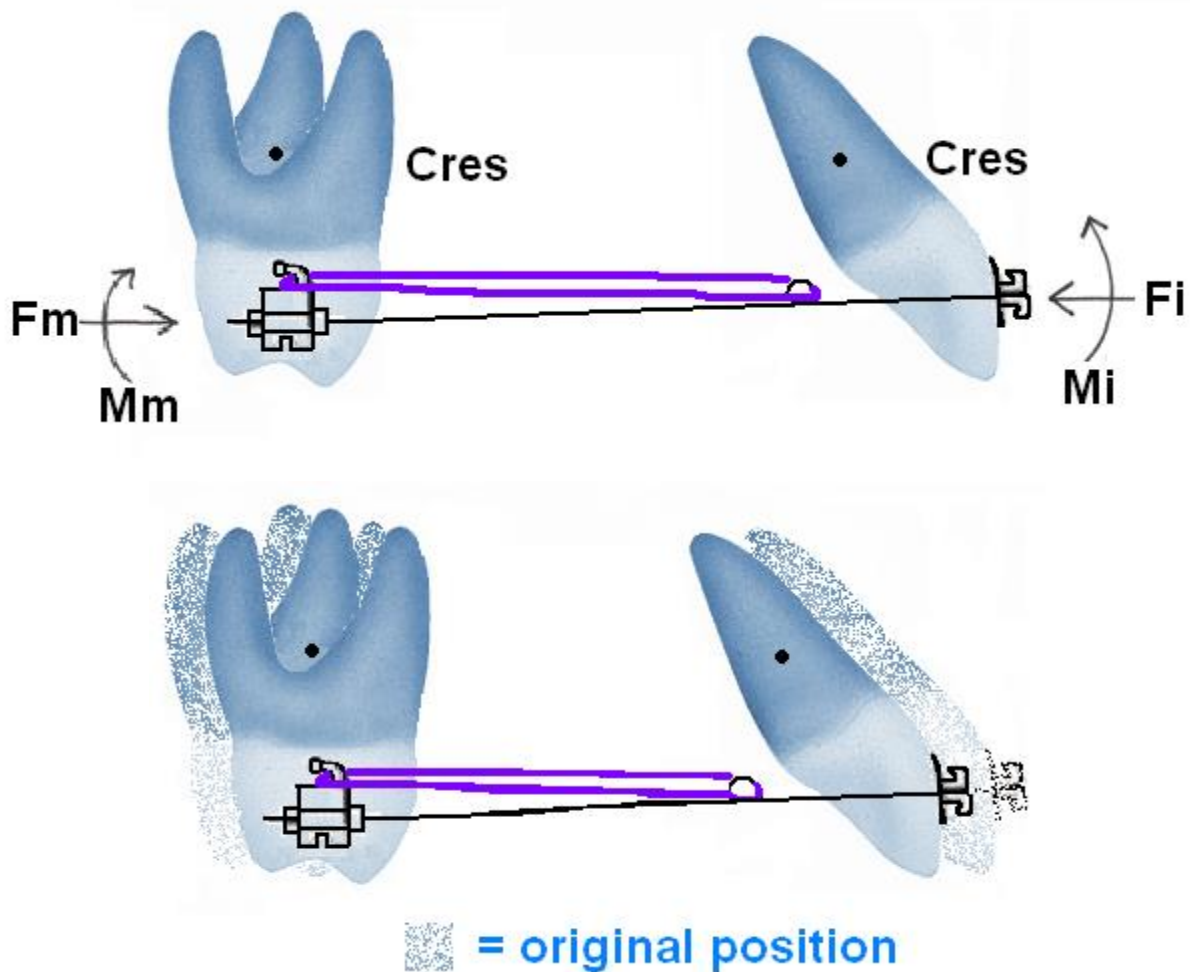
In order to produce a moment as well as a force, a bend in the wire is necessary



Figur 42: Erzeugen eines Moments durch Biegen des Drahtes, als auch Kraft durch eine Schlaufe im Draht.

Damit der Draht in den Slot des Brackets am Schneidezahn passt, muss er mit leichtem Druck an seinen Platz gebracht werden. Sobald der Draht mit Hilfe von elastischen Ligaturen an seinem Platz befestigt ist, verursacht er folgende Kraftauswirkungen auf die zwei in Frage stehenden Zähne.  $F_m$ ,  $M_m$  sind Kraft und Moment auf den Molar;  $F_i$ ,  $M_i$  sind Kraft und Moment auf den Schneidezahn.



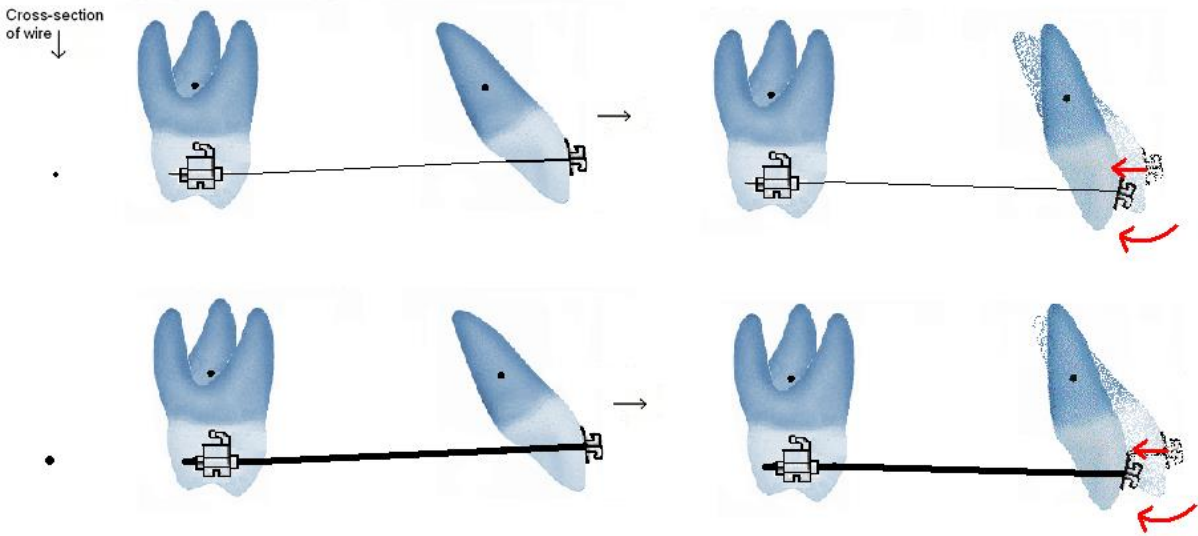


Figur 43: Resultierende Bewegung mit Biegung in Schlaufe vom Draht ist die Schneidezahn Retraktion (Kontrolliertes und minimiertes Kippen)

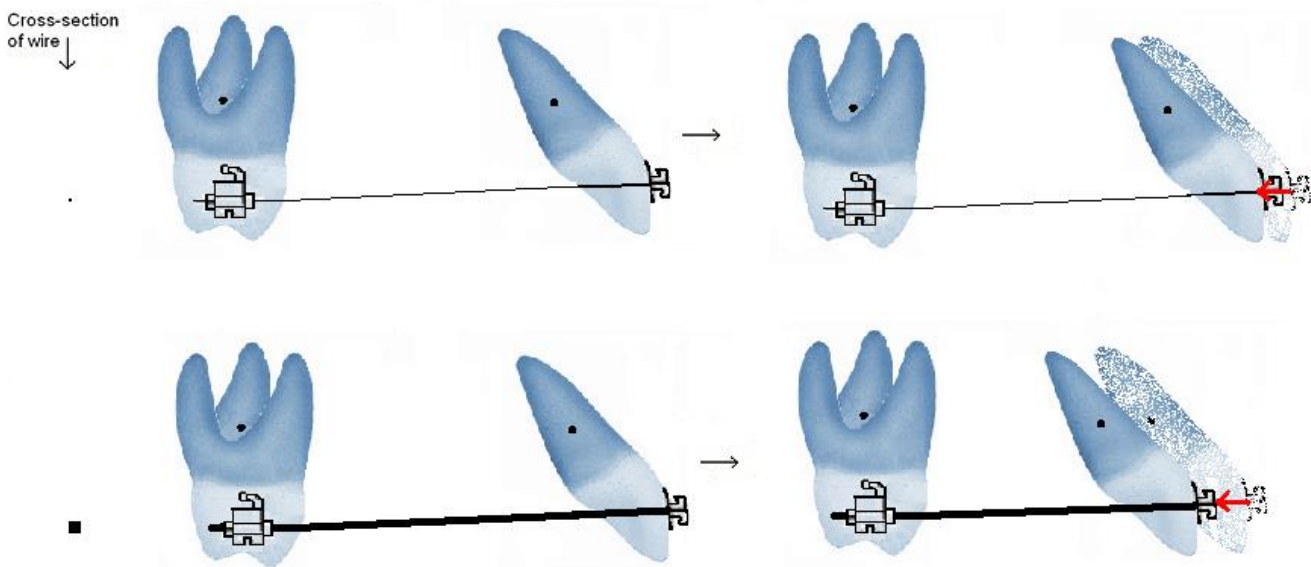
Dieses Beispiel zeigt, dass durch die Anpassung des M/F Verhältnisses, wir die gewünschte Wirkung an körperlicher Bewegung erreichen können (Fig. 43). Dieses M/F Verhältnis kann, je nach Ziel, angepasst werden (Es könnte Kippen erwünscht sein). Das M/F Verhältnis ist aber nicht nur durch das Verwenden von elastischen Gummizügen und einer Biegung im Draht beeinflusst. Die Art des Elastiks wird die Größe der angewandten Kraft beeinflussen. Zusätzlich wird sowohl die Art des Drahtes (ob rund oder rechteckig), als auch dessen Durchmesser das M/F Verhältnis beeinflussen.

Wenn ein runder Draht statt einem rechteckigen Draht benutzt wird, könnte dies in unkontrolliertem Kippen resultieren, weil der Zahn um den Draht rotieren kann (Der **Slot** des Brackets ist quadratisch und der Draht rund) (Fig 44). Andererseits, wenn ein rechteckiger Draht benutzt wird, wird der Draht den Bracket Slot füllen (rechteckig in quadratisch) (Fig 45). Daraus resultiert, dass ein Momentum entsteht, bei welchem der Zahn zurückgezogen wird und dies

wirkt dem Momentum entgegen, welches zum unkontrollierten Kippen geführt hätte. Zusätzlich wird die Größe des Drahtes das Resultat beeinflussen. Ein dünnerer Draht würde mehr durchbiegen als ein dickerer. Insofern werden körperliche Zahnbewegungen am besten mit dickeren Drähten ausgeführt, nachdem diese weniger durchbiegen und ihre Form behalten und dadurch die Bewegung führen.



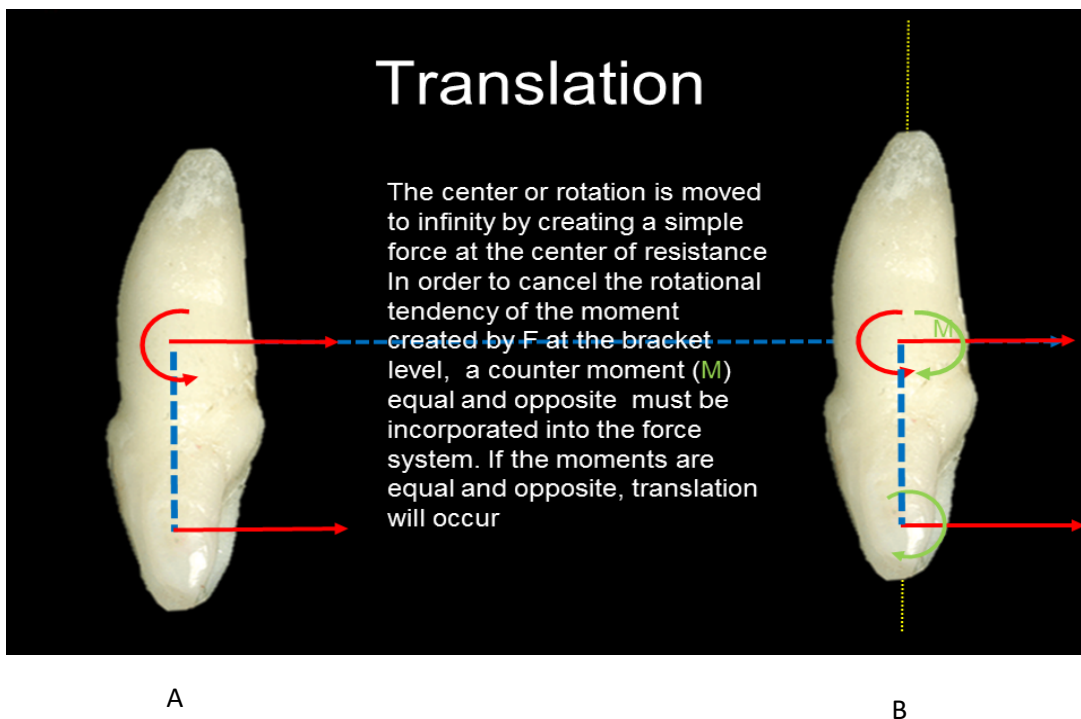
Figur 44: Verschiebungsmechanismen mit einem runden Draht und zwei verschiedenen Durchmessern



Figur 45: Verschiebungsmechanismen mit einem rechteckigen Draht und zwei verschiedenen Durchmessern

## 8.5 ÄQUIVALENTE KRAFTSYSTEME

Das oben beschriebene Problem mit der Kraft ist, dass Kräfte oft am Widerstandszentrum platziert werden. Es ist unmöglich ein Bracket am Widerstandszentrum zu kleben, weil dieses an der Oberfläche der Wurzel liegt. Die Lösung des Problems ist, äquivalente Kräftesysteme heranzuziehen. Äquivalente Kräftesysteme bestehen darin, dass sie in allen Raumrichtungen (x,y,z) gleich sind, gleiches Moment haben und die gleiche Auswirkung auf Objekte (oder Zähne) haben. In der Kieferorthopädie erzeugen äquivalente Kräftesysteme die gleiche Auswirkung, unabhängig davon, ob das Kräftesystem im Widerstandszentrum oder an der Krone (Bracket oder Tube) platziert ist.



Figur 46: Beispiel äquivalenter Kräftesysteme

Welche Art von Kräftesystem wird in B das gleiche Ergebnis (körperliche Bewegung) wie in A erreichen, wenn in B das Kräftesystem an der Krone platziert ist und am Widerstandszentrum bei A (Fig. 46)?

Unter Verwendung der oben umschriebenen Konzepte sowie des  $M/F$  Verhältnisses können wir das Problem lösen.

(A)

$$F1 = -300g$$

$$\Sigma M = 0$$

(B)

$$F2 = -300g$$

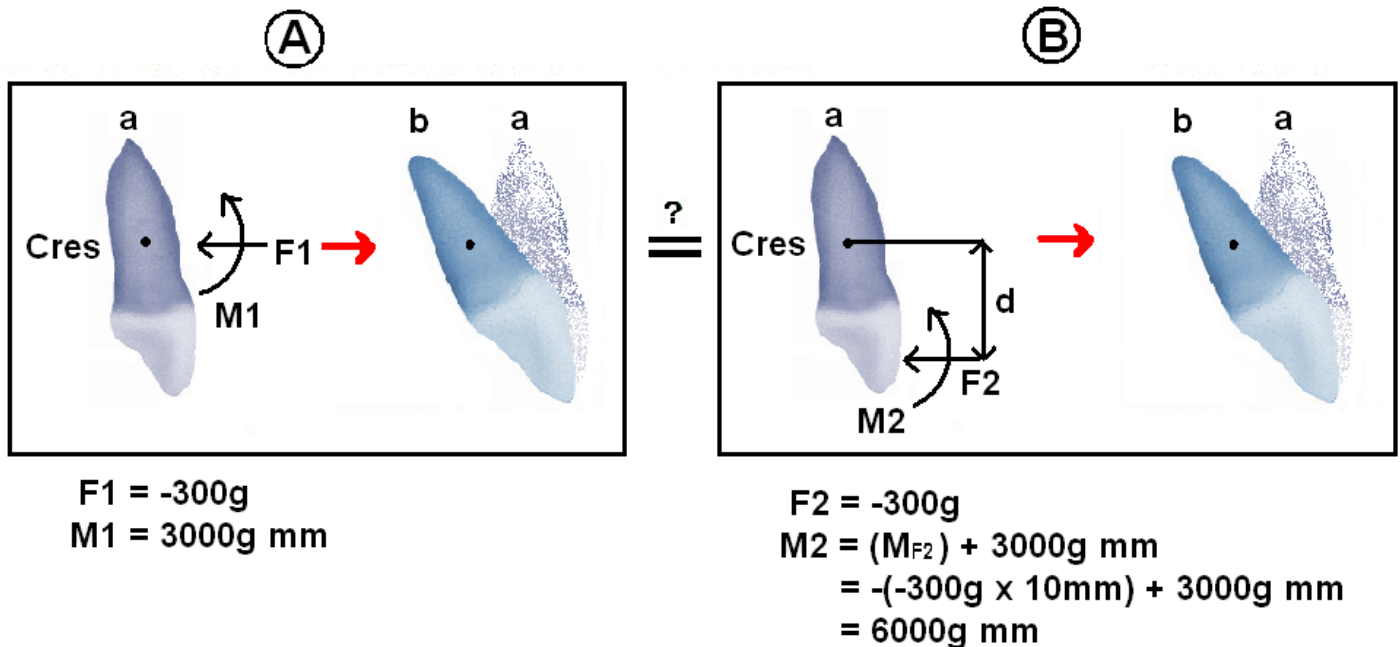
$$d = 10mm$$

$$M = F2 \times d = -3000g \text{ mm}$$

(this is the moment produced by the force F2 on the crown of the tooth)

F2 alleine wird unkontrolliertes Kippen des Zahnes verursachen, da ein Momentum am Zahn existiert und der Zahn um das Widerstandszentrum rotiert. Deshalb ist es notwendig, um eine körperliche Bewegung in System B zu erzeugen, die mit dem in System A übereinstimmt, ein Moment an der Krone zu erzeugen, welches gegenteilig zu F2 nur in der Art ist, dass das Netto-Drehmoment im System B gleich NULL ist (wie in System A). Somit ist das Drehmoment  $M = 3000g \text{ mm}$ .

Beispiel: Beachten Sie das notwendige und äquivalente Kraftsystem für Bewegungen der Wurzel.



Figur 47: Berechnungen, für äquivalente Kraftsysteme für Wurzelbewegungen

In diesem Beispiel, agiert System A mit der Kraft und dem Moment auf dem Widerstandszentrum, um die erwünschte Zahnbewegung zu erreichen. In System B, gibt es ein Moment in Verbindung mit F2 (weil F2 an der Krone ansetzt und nicht am Widerstandszentrum). Diesem Moment muss entgegenwirkt werden, um das Rotationszentrum zu kontrollieren. Um zusätzlich kontrolliertes Kippen des Zahnes zu erreichen, wird ein weiteres Moment am Zahn platziert, sodass ein äquivalentes Resultat in System A und B erreicht wird.

Einige Hinweise, um Bewegungen zu kontrollieren

Die Veränderung des Drehmoment ist der Veränderung der Kraft vorzuziehen.

- a) Für kontrolliertes Kippen, verringern Sie das Drehmoment (Verringerung M/F)
- b) Für eine körperliche Bewegung, passen Sie das Drehmoment an, sodass Sie ein äquivalentes Kraftsystem haben.
- c) Verankern Sie die Krone für Bewegungen der Wurzel (z.B.: steigern Sie das Drehmoment)
- d) Eine körperliche Bewegung findet nicht nur dadurch statt, indem die Kraft, die auf das Objekt ausgeübt wird, erhöht wird.

Das M/F Verhältnis im Widerstandszentrum bestimmt die Wirkung auf das PDL. In der Region angespannter PDL (entgegen der Richtung der Zahnbewegung) wird Knochen angebaut, und der unter dem komprimierten PDL befindliche Knochen, wird resorbiert.

Vergessen Sie nicht, die Größe des M/F Verhältnisses wird von Wurzellänge/Knochendichte beeinflusst (weil sich die Distanz zwischen dem Bracket und dem Widerstandszentrum verändern kann). Zum Beispiel brauchen kürzere Zähne im Vergleich zu Längeren eine niedrigere M/F Ratio für eine körperliche Bewegung.

## 9 VERANKERUNG

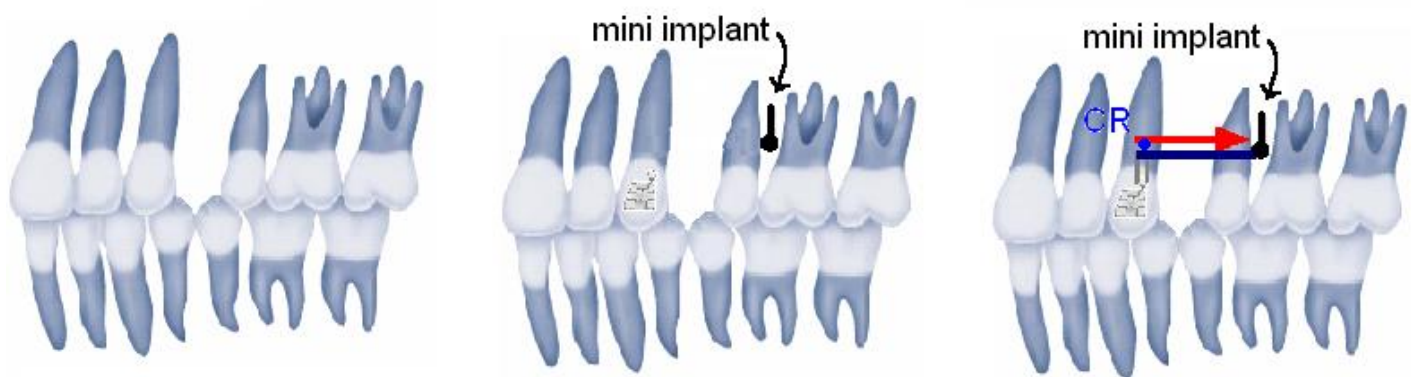
---

Die Verankerung ist ein wichtiges Element in der Kieferorthopädie, da sie Widerstand für ungewollte Zahnbewegungen liefert. Newtons drittes Gesetz ist für die Diskussion über Verankerungen entscheidend. Denken Sie also daran, dass jede Wirkung auch eine gleich Starke und gegenteilige Gegenwirkung erzeugt. Deshalb wird das Kraftsystem, das genutzt wird, um den Zahn zu bewegen, eine gleiche große mit gegenteiliger Richtung auf das Verankerungssystem existierende Kraft haben. Eine Verankerung kann im gleichen Kieferbogen, zwischen den Kieferbögen oder extra-oral sein. Jede von ihnen stellt jeweils eine

andere Größe der Stabilität oder des Widerstands gegen unerwünschte Bewegungen, dar. Zum Beispiel können Zähne, der Gaumen, die Neuromuskulatur, Implantate und extraorale Strukturen der Verankerung dienen.

Die Menge an benötigter Verankerung hängt vom Behandlungsplan ab. Zum Beispiel, um eine Extraktionslücke zu schließen, gibt es grundlegend drei Möglichkeiten; das Zurückziehen des vorderen Segmentes (die hinteren Zähne sind verankert), das Zurückziehen der vorderen Zähne und das Nach-vorne-Rücken der hinteren Zähne oder nur das Nach-vorne-Rücken der hinteren Zähne.

Maximale Verankerung kann durch Implantate (micro, mini, palatinal) oder extraorale Geräte (Headgear) erreicht werden. Maximale Verankerung liegt vor, wenn die verankerte Einheit sich nicht bewegt, während der Zahn oder eine Gruppe von Zähnen bewegt wird. Dies ist nur mit intraoralen Anwendungen (ohne Implantate) schwer zu erreichen, weil dann die verankerte Einheit durch eine dentoalveoläre Antwort beeinflusst wird. Ein Beispiel intraoraler Anwendungen, die viel Verankerung bietet, ist das Herbst Scharnier (auch wenn es nicht so viel Verankerung, wie andere maximal verankernde Anwendungen, bietet).



Figur 48: Die Anwendung von mini Implantaten bei Eckzahn Retraktion

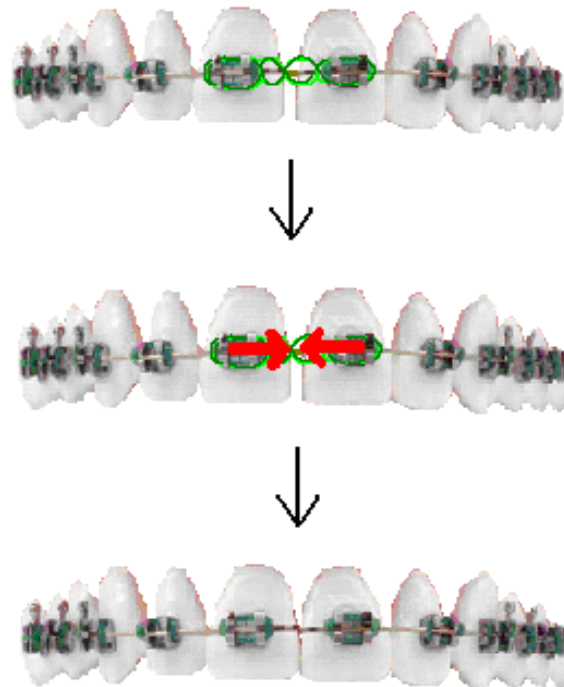
Der Einsatz von Micro-Implantaten wird in der Kieferorthopädie immer populärer. Das folgende Beispiel zeigt, wie ein Eckzahn durch die Anwendung eines Micro-Implantats distalisiert werden kann (Fig 48). In diesem Fall erfolgt die distale Körperbewegung, weil die Kraft näher am Widerstandszentrum ist. Beachten Sie, dass bei Implantaten, vor allem bei den auf der bukkalen Seite der Alveolen eine unerwünschte Bewegung in eine andere Ebene stattfindet (in Richtung bukkal). Dies kann durch die Anwendung des richtigen Drahtes minimiert werden (Sehen Sie hierzu die Diskussion über Drähte).

Moderate Verankerung liegt vor, wenn die verankerte Einheit verschoben werden darf, aber weniger als die Zähne die geplant bewegt werden. Moderate Verankerung wird grundsätzlich mit intraoral getragenen Geräten oder Gruppen von Zähnen erreicht.

Kombinationen von maximaler und moderater Verankerung können auch genutzt werden. Zum Beispiel im Extraktionsfall eines zweiten Prämolaren und, wenn es geplant ist den ersten PM zu distalisieren, können wir den ersten Molar zum Zweiten verankern. Mit Hilfe einer Ligatur

verhindern wir eine mesiale Verschiebung. Wenn wir versuchen würden das gesamte vordere Segment zurückzuziehen, dann wird zusätzliche Verankerung erforderlich, dazu benötigen wir zusätzlich ein Headgear. Die Verankerung eines Systems kann dadurch erhöht werden, indem entweder die Zahl der Zähne, die aneinander gebunden werden erhöht wird oder, indem extraorale Verankerungen hinzugefügt werden, je nachdem, was für ein Endergebnis erreicht werden soll.

Eine Situation ohne Verankerung erzeugt Wirkung auf beiden Seiten, so wie die Schließung eines Diastemas (Fig 49).



Figur 49: Reziproke Bewegung zur Schließung eines Diastemas

## 9.1 ANWENDUNGEN

### 9.1.1 Retraktion des Eckzahns

Um den Platz zu schließen, der durch eine Extraktion der Prämolaren verursacht wird, kann der Eckzahn zuerst zurückgezogen werden, gefolgt von den Schneidezähnen oder alternativ können auch alle sechs vorderen Zähne zugleich (en masse) zurückgezogen werden. Um die Biomechanik des Zurückziehens zu veranschaulichen, wird im Beispiel die Retraktion eines Eckzahns gezeigt. Der Zahn unterliegt einer distal wirkenden Kraft, entlang einem führendem Bogendraht. Nachdem die Kraft okklusal am Widerstandszentrum wirkt, gibt es eine Kippbewegung des Zahnes. Dieser Kippbewegung wirkt ein Kräftepaar entgegen, erzeugt durch das Bracket und den Bogendraht, was in einer kleinen Veränderung der langen Achse des Zahnes

resultiert. Dieses gegenteilige Paar hängt von der Größe und Querschnittsform des Bogendrahts ab. Der Draht muss den Slot des Brackets füllen, damit das Kräftepaar wirkt. Das Resultat dieser Aktion ist ein zurückgezogener, aufrechter Eckzahn, dessen Wurzel parallel zur Wurzel des Nachbarzahns verläuft.

### 9.1.2 Extrusion zur Kronenverlängerung und Implantat-Platzierung

Klinische Applikationen für Zahnbewegungen sind Teil der Kieferorthopädie, aber auch Teil von anderen Spezialgebieten. Zum Beispiel, wenn wir in einer Situation sind, in der parodontale Eingriffe ausgeschlossen sind (weil es sich um einen sensiblen Bereich handelt), die Krone eines Zahns aber verlängern wollen, kann KFO-Extrusion eine Option sein. Kieferorthopädische Extrusion kann schnell oder langsam durchgeführt werden und hängt von dem angestrebten Behandlungsziel ab oder der hierfür eingesetzten Mechanik (Kräfte) der KFO Apparatur ab. Zum Beispiel, kann mit Hilfe einer kieferorthopädischen Extrusion ein Implantat-Bett vorbereitet werden.

## 10 LITERATUR EMPFEHLUNG

---

- Andrews, L. F. (1979). "The straight-wire appliance." British Journal of Orthodontics **6**(3): 125-143.
- Antoszewska, J. and N. Küçükkeles (2011). Biomechanics of Tooth-Movement: Current Look at Orthodontic Fundamental, INTECH Open Access Publisher.
- Barlow, M. and K. Kula (2008). "Factors influencing efficiency of sliding mechanics to close extraction space: a systematic review." Orthodontics & craniofacial research **11**(2): 65-73.
- Beertsen, W., C. A. McCulloch and J. Sodek (1997). "The periodontal ligament: a unique, multifunctional connective tissue." Periodontology 2000 **13**(1): 20-40.
- Begg, P. R. (1954). "Stone Age man's dentition: with reference to anatomically correct occlusion, the etiology of malocclusion, and a technique for its treatment." American Journal of Orthodontics **40**(4): 298-312.
- Bridges, T., G. King and A. Mohammed (1988). "The effect of age on tooth movement and mineral density in the alveolar tissues of the rat." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **93**(3): 245-250.
- Brudvik, P. and P. Rygh (1993). "The initial phase of orthodontic root resorption incident to local compression of the periodontal ligament." The European Journal of Orthodontics **15**(4): 249-263.
- Burstone, C. J. (1962). "Rationale of the segmented arch." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **48**(11): 805-822.
- Burstone, C. J. (2011). "Application of bioengineering to clinical orthodontics." Orthodontics-E-Book: Current Principles and Techniques: 345.
- Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1974). "Force systems from an ideal arch." American journal of orthodontics **65**(3): 270-289.
- Burstone, C. J. and H. A. Koenig (1988). "Creative wire bending—the force system from step and V bends." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **93**(1): 59-67.
- Burstone, C. J. and R. J. Pryputniewicz (1980). "Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces." American journal of orthodontics **77**(4): 396-409.



Cahill, D. R. and S. C. Marks (1980). "Tooth eruption: evidence for the central role of the dental follicle." Journal of Oral Pathology & Medicine **9**(4): 189-200.

Cai, Y., X. Yang, B. He and J. Yao (2015). "Finite element method analysis of the periodontal ligament in mandibular canine movement with transparent tooth correction treatment." BMC oral health **15**(1): 106.

Caputo, M., C. Di Luzio, A. Bellisario, F. Squillace and M. L. Favale (2017). "Evaluation Of The Effectiveness Of Clear Aligners Therapy In Orthodontic Tooth Movement."

Castroflorio, T., F. Garino, A. Lazzaro and C. Debernardi (2013). "Upper-incisor root control with Invisalign appliances." J Clin Orthod **47**(6): 346-351.

Chen, G., F. Teng and T.-M. Xu (2016). "Distalization of the maxillary and mandibular dentitions with miniscrew anchorage in a patient with moderate Class I bimaxillary dentoalveolar protrusion." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **149**(3): 401-410.

Choy, K., E.-K. Pae, K.-H. Kim, Y. C. Park and C. J. Burstone (2002). "Controlled space closure with a statically determinate retraction system." The Angle Orthodontist **72**(3): 191-198.

Cobo, J., A. Sicilia, J. Argüelles, D. Suárez and M. Vijande (1993). "Initial stress induced in periodontal tissue with diverse degrees of bone loss by an orthodontic force: tridimensional analysis by means of the finite element method." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **104**(5): 448-454.

Cope, J. (2011). "An interview with Jason Cope." Dental Press Journal of Orthodontics **16**(2): 36-46.

Epstein, M. B. (2002). Benefits and rationale of differential bracket slot sizes: the use of 0.018-inch and 0.022-inch slot sizes within a single bracket system.

Fiorelli, G., B. Melsen and C. Modica (2001). "Differentiated orthodontic mechanics for dental midline correction." Journal of clinical orthodontics: JCO **35**(4): 239.

Garino, F., T. Castroflorio, S. Daher, S. Ravera, G. Rossini, G. Cugliari and A. Deregibus (2016). "Effectiveness of composite attachments in controlling upper-molar movement with aligners." J Clin Orthod **50**(6): 341-347.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis—concepts and values. Part I." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **107**(4): 434-443.

Gebeck, T. R. and L. L. Merrifield (1995). "Orthodontic diagnosis and treatment analysis—concepts and values: part II." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **107**(5): 541-547.

Geramy, A., K. Tanne, M. Moradi, H. Golshahi and Y. Farajzadeh Jalali (2016). "Finite element analysis of the convergence of the centers of resistance and rotation in extreme moment-to-force ratios." Int Orthod **14**(2): 161-170.

Geron, S., R. Romano and T. Brosh (2004). "Vertical forces in labial and lingual orthodontics applied on maxillary incisors—a theoretical approach." The Angle Orthodontist **74**(2): 195-201.

Giancotti, A. and A. A. Gianelly (2001). "Three-Dimensional Control in Extraction Cases Using a Bidimensional Approach." World Journal of Orthodontics **2**(2).

Giancotti, A., P. Mozzicato and M. Greco (2012). "En masse retraction of the anterior teeth using a modified bidimensional technique." Journal of Clinical Orthodontics **46**(5): 267.

Jacobs, R. and D. v. Steenberghe (1994). "Role of periodontal ligament receptors in the tactile function of teeth: a review." Journal of periodontal research **29**(3): 153-167.

Kim, S.-J., J.-W. Kim, T.-H. Choi and K.-J. Lee (2014). "Combined use of miniscrews and continuous arch for intrusive root movement of incisors in Class II division 2 with gummy smile." The Angle Orthodontist **84**(5): 910-918.

Koenig, H. A. and C. J. Burstone (1989). "Force systems from an ideal arch—large deflection considerations." The Angle Orthodontist **59**(1): 11-16.

Kojima, Y. and H. Fukui (2014). "A finite element simulation of initial movement, orthodontic movement, and the centre of resistance of the maxillary teeth connected with an archwire." European Journal of Orthodontics **36**(3): 255-261.

Krishnan, V. and Z. e. Davidovitch (2006). "Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **129**(4): 469. e461-469. e432.

Kurol, J. and P. Owman-Moll (1998). "Hyalinization and root resorption during early orthodontic tooth movement in adolescents." The Angle orthodontist **68**(2): 161-166.

Kusy, R. P. and J. C. Tulloch (1986). "Analysis of moment/force ratios in the mechanics of tooth movement." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **90**(2): 127-131.

Lavigne, G., J. Kim, C. Valiquette and J. Lund (1987). "Evidence that periodontal pressoreceptors provide positive feedback to jaw closing muscles during mastication." Journal of Neurophysiology **58**(2): 342-358.

Lekic, P. and C. McCulloch (1996). "Periodontal ligament cell populations: the central role of fibroblasts in creating a unique tissue." The Anatomical Record **245**(2): 327-341.

Lindauer, S. J. (2001). The basics of orthodontic mechanics. Seminars in Orthodontics, Elsevier.

McCulloch, C. A. and S. Bordin (1991). "Role of fibroblast subpopulations in periodontal physiology and pathology." Journal of periodontal research **26**(3): 144-154.

McCulloch, C. A., P. Lekic and M. D. Mckee (2000). "Role of physical forces in regulating the form and function of the periodontal ligament." Periodontology 2000 **24**(1): 56-72.

Meling, T. R., J. Ødegaard and E. Ø. Meling (1997). "On mechanical properties of square and rectangular stainless steel wires tested in torsion." American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics **111**(3): 310-320.

Melsen, B. (1999). "Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement." The Angle orthodontist **69**(2): 151-158.