

## Verfahren zur Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung

*Christian Kirschneck und Peter Proff (Regensburg)*

In den letzten Jahren haben Verfahren zur Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung zunehmend in der klinischen Praxis Einzug gehalten. Der erwartete Vorteil ist die Verkürzung der Behandlungszeit. Für die entsprechenden Methoden hat sich inzwischen der Überbegriff "Accelerated Orthodontics" in der Fachwelt etabliert. Erste systematische tierexperimentelle Untersuchungen hierzu wurden in den 70er/80er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt. Erste Studien zur Kortikotomie reichen dabei bereits bis 1890 zurück [5]. Zahlreiche weitere, meist tierexperimentelle Studien zu den verschiedenen Verfahren zur Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung sind seit dieser Zeit im nationalen und internationalen Schrifttum erschienen [4, 5, 8, 27, 31, 33, 34, 42, 45]. Die beschriebenen Methoden müssen hinsichtlich ihrer klinischen Effizienz und Sicherheit differenziert bewertet werden.

Die Verfahren zur Beschleunigung der Zahnbewegung basieren auf der Grundlage, dass eine gezielte weitere Steigerung der mit der Zahnbewegung assoziierten pseudo-inflammatorischen Prozesse bzw. des Knochenmodellings/-remodelling und der parodontalen Durchblutung zu einer Beschleunigung der Zahnbewegung führt [22]. Dabei sind besonders die möglichen Gefahren einer iatrogen induzierten Beschleunigung der Zahnbewegung zu beachten, da durch eine überschießende, unkontrollierte Entzündungsreaktion und Osteoklastogenese als Nebenwirkung auch parodontale Knochenverluste und Zahnwurzelresorptionen an den orthodontisch bewegten Zähnen auftreten [27, 28] und auch z.T. mit Schmerzen für den Patienten verbunden sein können [6].

Die derzeit verfügbaren Verfahren zur Beschleunigung der Zahnbewegung werden in chirurgische Verfahren und nicht-chirurgische Verfahren eingeteilt. Sie sollen im Folgenden bezüglich der verfügbaren Datenlage (Stand 04/2017) betrachtet werden.

### Chirurgische Verfahren

#### Osteotomie und Kortikotomie

Unter einer Osteotomie versteht man das kontrollierte chirurgische Durchtrennen der knöchernen Kortikalis und Spongiosa, während bei einer Kortikotomie lediglich die Kortikalis durchtrennt, perforiert oder mechanisch verändert wird [5]. Letztere kann invasiv durch Bildung eines mukoperiostalen Lappens, aber auch minimalinvasiv ohne Lappenbildung als Kortikozision/Osteoperforation erfolgen [19]. Durch die Intervention wird lokal im zahntragenden Alveolarknochen ein Postaggressionsstoffwechsel in Gang gesetzt. Hierdurch kommt es zum sogenannten „Regional Acceleratory Phenomenon“ (RAP) [43], d.h. einer lokal im Bereich der Osteotomie/Kortikotomie erreichten Beschleunigung der Zahnbewegung durch eine überschießende Antwort des Organismus auf die Verletzung, um den Heilungsprozess und den Knochen turnover zu beschleunigen.

*Effizienz:* Osteotomien und Kortikotomien können die Behandlungszeit nach derzeitiger Studienlage reduzieren [5]. Mittels einer Kortikotomie kann voraussichtlich eine 2-4-fache Beschleunigung der Zahnbewegung für einen Zeitraum von ca. 4-6 Monaten (Zeitdauer des RAP) erreicht werden [5, 6, 14, 18, 31, 35] mit einem Maximum 2-3 Wochen post operationem [30]. Das Verfahren kann zudem mit Maßnahmen der gesteuerten Geweberegeneration (GTR) wie einem autogenen Knochentransplantat kombiniert werden [24, 34], die ebenfalls potentiell den Knochen turnover stimulieren können.

*Sicherheit:* Bei vertikalen und horizontalen Osteotomien ist in Abhängigkeit des Umfangs der Intervention mit einem erhöhten Risiko für parodontale Schäden, Zahnwurzelresorptionen, postoperative Devitalisierungen von Zähnen und auch Knochennekrosen zu rechnen, die bei der weniger invasiven Kortikotomie nicht oder nur in Ausnahmefällen

zu beobachten sind [5, 14, 18, 20, 30, 31, 35]. Allgemein können mit zunehmendem Umfang der Intervention vermehrt chirurgische Komplikationen wie postoperative Schmerzen auftreten, die z.T. als nicht unerheblich angegeben werden [6], sowie Schwellungen und subkutane Hämatome im Gesichts- und Halsbereich, was die Akzeptanz von Patientenseite vermindert [5].

*Bewertung:* Die bisher verfügbare Datenlage bezüglich einer Kortikotomie muss als moderat betrachtet werden [5, 14, 17, 20, 30, 31, 35]. Im Vergleich zur Gesamtbehandlungszeit ist die Phase des RAP relativ kurz [35], sodass momentan keine valide Aussage zur tatsächlichen Effektivität bezüglich der Gesamtbehandlungszeit getroffen werden kann, insbesondere, da auch die Qualität des Behandlungsergebnisses in verfügbaren Studien meist nicht evaluiert wurde [5]. Auch stellt das Verfahren einen zusätzlichen finanziellen und zeitlichen Aufwand dar, der mit operativen Risiken und Schmerzen einhergeht. Im Sinne einer Nutzen-Aufwand-Risiko-Analyse muss daher im Einzelfall eine individuelle Abwägung bezüglich der Anwendung dieser Methode erfolgen.

#### Kortikozision/Piezozision und Osteoperforation /Piezopunktion

Hierbei handelt es sich um minimal-invasive Alternativen zur Kortikotomie ohne Hebung eines Mukoperiostlappens. Es werden kleine vertikale Schnitte oder punktuelle Bohrungen durch die Gingiva und das Periost entweder konventionell (verstärktes Skalpell und Hammer, chirurgischer Bohrer) oder mittels eines Piezogerätes bis in die Kortikalis getrieben, jedoch ohne Perforation der Spongiosa.

*Effizienz:* Die Datenlage bezüglich der Effizienz der Kortikozision und Osteoperforation ist derzeit als limitiert anzusehen [2, 19, 33]. Trotz einer beschriebenen 1,5-2,3-fachen Beschleunigung der Zahnbewegung wurde in verfügbaren Studien oftmals nicht eindeutig in Relation zu einer Kontrollgruppe oder -seite quantifiziert oder die beschleunigende Wirkung relativiert sich innerhalb der Gesamtbehandlung [19, 46]. Zudem ist unklar, ob sich die Wirkung bei notwendiger wiederholter konsekutiver Anwendung reproduzieren lässt [33].

*Sicherheit:* Das Verfahren ist potentiell weniger traumatisch als eine Osteotomie/Kortikotomie. Die beschriebenen Nebenwirkungen sind vergleichbar mit der Kortikotomie/Osteotomie, aber in voraussichtlich geringerer Häufigkeit und Ausprägung [2, 5, 34, 46].

*Bewertung:* Die Datenlage bei den chirurgischen Verfahren der Kortikozision/Osteoperforation bezüglich Effizienz und Sicherheit ist derzeit limitiert, jedoch besteht hier aufgrund des günstigeren Nebenwirkungsprofils und der Minimalinvasivität ein mögliches Potential für die breitere klinische Anwendung.

#### Surgery-First

Unmittelbar nach einer Dysgnathie-Operation kann in dem Kiefer, in dem eine Osteotomie durchgeführt wurde, eine Beschleunigung der Zahnbewegung festgestellt werden, die auf ein „Regional Acceleratory Phenomenon“ (RAP) zurückzuführen ist, das ca. 4-6 Monate andauert [5, 8]. Daraus hat sich ein chirurgisches Konzept namens „Surgery-First“ entwickelt, bei dem eine orthodontische Vorbehandlung nicht oder nur in geringem Umfang erfolgt, um dieses RAP für die Durchführung der orthodontischen Stellungskorrekturen optimal zu nutzen.

*Effizienz:* Nach gegenwärtiger Studienlage wird durch das „Surgery-First“-Konzept bei korrekter Indikationsstellung ein vergleichbares Behandlungsergebnis bezüglich Qualität, Gesichtsästhetik, Okklusion und Stabilität bei verkürzter Gesamtbehandlungszeit erreicht [5, 8, 21, 36, 38]. Zudem werden funktionelle Vorteile und die unmittelbare Verbesserung der Gesichtsästhetik als positive Effekte beschrieben [5, 8].

*Sicherheit:* Bei sorgfältiger Indikationsstellung, Behandlungsplanung, ausreichender Erfahrung des interdisziplinären Teams und Beachten der Ausschlusskriterien bestehen im Vergleich zum konventionellen Vorgehen keine zusätzlichen Risiken [5, 36, 38].

*Bewertung:* Die derzeit verfügbare Datenlage bezieht sich überwiegend auf retrospektive Studien und Fallserien, die klinisch gute Resultate mit Verkürzung der Behandlungszeit bei hoher Patientenakzeptanz zeigen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Surgery-First-Ansatz eine Indikationsausweitung erfahren wird.

#### **Nicht-chirurgische Verfahren**

##### Low-Intensity/Level-Lasertherapie (LILT/LLLT)

Für die Bestrahlung von Gewebe mit einem Low-Intensity-Laser konnten biostimulatorische Wirkungen beobachtet werden. Beschriebene Effekte sind eine verbesserte Wundheilung, eine erhöhte Proliferation von Fibroblasten und Chondroblasten und eine erhöhte Kollagensynthese und Nervenregeneration [4, 7]. Der Aluminium-Gallium-Arsenid-Laser (GaAlAs, 805

nm) wird aufgrund seiner höheren Penetrationstiefe am häufigsten angewandt [4, 7]. Daneben finden Helium-Neon- (632,8nm), Semikonduktor- (780-950nm) und Gallium-Arsenid-Laser (904nm) Anwendung [7].

*Effizienz:* Die Datenlage bezüglich der Wirksamkeit zur Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung ist widersprüchlich [3, 4, 9, 16, 17, 31, 33, 34, 40, 41]. Diese Heterogenität ist vermutlich auf unterschiedliche teils effektive oder ineffektive Anwendungsprotokolle, Laserfrequenzen und übertragene Energiedosen zurückzuführen. Dabei scheint eine geringere Energiedichte (2,5, 5 und 8J/cm<sup>2</sup>) effektiver zu sein als höhere Energiedichten (ab 20 J/cm<sup>2</sup>) [16].

*Sicherheit:* Es werden in der derzeit verfügbaren Literatur keine adversen Reaktionen auf eine Low-Intensity-Lasertherapie berichtet [16, 31]. Die verfügbare wissenschaftliche Evidenz hierzu ist jedoch gering, da in vielen Studien mögliche Nebenwirkungen nicht explizit untersucht wurden.

*Bewertung:* Trotz der bereits klinischen Verfügbarkeit von Low-Intensity-Lasern sind aufgrund der begrenzten Datenlage und bisher nur moderaten Evidenz [3, 4, 9, 16, 17, 31, 33, 34, 40, 41] weitere Untersuchungen bezüglich der Effizienz und Sicherheit der Low-Intensity-Laser-Therapie erforderlich. Insbesondere besteht Klärungsbedarf hinsichtlich eines geeigneten Anwendungsprotokolls (Frequenz, Energiedosis, Lasertyp, Häufigkeit der Applikation).

#### Photobiomodulation

Bei diesem Verfahren wird statt eines kohärenten Lasers normales inkohärentes (LED-)Licht verwendet, um zelluläre Funktionen zu stimulieren. Es basiert auf der Überlegung, dass die Zytochromoxidase C bzw. Komplex IV der Atmungskette in Mitochondrien und damit die Synthese von ATP als Energielieferant in Zellen durch infrarotes Licht hochreguliert und auch die vaskuläre Aktivität gesteigert wird [4, 9].

*Effizienz:* Die wenigen verfügbaren Studien zur Photobiomodulation liefern keine klare Aussage in Hinblick auf die Effizienz zur Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung [4, 9, 26, 33].

*Sicherheit:* Aufgrund des niedrigenergetischen Charakters der Strahlung (Licht) sind voraussichtlich kaum unerwünschte Wirkungen durch eine Photobiomodulation zu erwarten. Studien hierzu stehen jedoch bislang noch aus.

*Bewertung:* Eine klinische Anwendung ist derzeit nicht von wissenschaftlicher Evidenz gestützt.

#### Vibrationstherapie

Beim Verfahren der Vibration wird mittels eines intraoralen Vibrators, meist verbunden mit einer bimaxillären, herausnehmbaren Kunststoffschiene, in regelmäßigen Intervallen eine Schwingung auf die orthodontisch zu bewegenden Zähne appliziert. Diese kann entweder der natürlichen Schwingungsfrequenz der Zähne entsprechen und damit die größte Schwingungsamplitude hervorrufen (Resonanz-Vibration) oder aber in einer wesentlich höheren Frequenz (LIPUS, low intensity pulsed ultrasound) sowie niedrigeren Frequenzen (z.B. 4Hz) eingesetzt werden [4, 7, 37].

*Effizienz:* Tierexperimentelle Ergebnisse sprechen der Resonanzvibration, als auch der Anwendung von Ultraschall eine beschleunigende Wirkung auf die Geschwindigkeit der Zahnbewegung zu [4, 7, 37]. Aktuelle klinische Studien höherer Evidenz zeigen allerdings keine klinisch signifikante Beschleunigung der Zahnbewegung durch Vibrationstherapie [12, 13, 33, 37, 44].

*Sicherheit:* Durch Applikation von physiologischer Niedrig- oder Resonanzfrequenz-Vibration sind keine Schäden am Zahnhalteapparat, Zahnwurzelresorptionen oder weitere Nebenwirkungen beschrieben worden [4, 7, 11, 13]. Bei der Nutzung von Ultraschall werden thermische Schäden an der Zahnpulpa diskutiert [4].

*Bewertung:* Obwohl das Verfahren der Vibration bereits klinisch verfügbar ist, zeigen randomisierte, kontrollierte klinische Studien keine Effizienz dieses Verfahrens zur Beschleunigung der kieferorthopädischen Zahnbewegung [1, 12, 13, 33, 37, 44].

#### Elektrischer Strom

Während der orthodontischen Zahnbewegung werden durch die Kraftübertragung auf den Knochen und dessen Deformation bereits physiologischerweise piezoelektrische Potentiale erzeugt [32]. Daher wurde versucht, elektrischen Strom zur gezielten Beeinflussung der Zahnbewegung einzusetzen.

*Effizienz:* Es wurde experimentell beobachtet, dass über in den Knochen inserierte Elektroden bei einer Stromstärke von 5-20 µA eine Osteogenese an der negativen Elektrode und eine Knochenresorption an der positiven Elektrode (Anode) induziert werden konnte [4, 33]. Untersuchungen zur Applikation von Strom zur Beschleunigung der kieferortho-

pädischen Zahnbewegung haben überwiegend experimentellen Charakter. Die verfügbaren Daten sehen ein gewisses Potential, dass eine kontinuierliche oder gepulste elektrische Stimulation die orthodontische Zahnbewegung beschleunigen kann [4, 10, 34].

*Sicherheit:* Bislang sind keine Untersuchungen bezüglich der Sicherheit elektrischen Stroms für eine Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung verfügbar.

*Bewertung:* Die derzeit verfügbare wissenschaftliche Evidenz bezüglich Effizienz und Sicherheit von elektrischem Strom für eine Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung ist stark limitiert [31].

#### Statisches oder gepulstes magnetisches Feld

Bei diesem Verfahren werden lokal an den orthodontisch zu bewegenden Zähnen statische oder gepulste Magnetfelder appliziert.

*Effizienz:* Die Datenlage bezüglich der Wirksamkeit zur Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung ist widersprüchlich. Die Evidenz der verfügbaren Studien ist als gering anzusehen [4, 33].

*Sicherheit:* Die Datenlage ist derzeit zu gering, um eine Aussage bezüglich der Sicherheit des Verfahrens treffen zu können [4].

*Bewertung:* Aufgrund der limitierten Datenlage bezüglich Effizienz und Sicherheit [31] sind weitere Studien notwendig, bevor eine Beurteilung erfolgen kann.

#### Systemische Administration bzw. lokale Injektion von Biomodulatoren

Dieses Verfahren nutzt eine Begleitmedikation pharmakologisch aktiver Substanzen oder aber eine gezielte lokale Applikation dieser Substanzen im Parodontalligament (intraalveolär) bzw. submukös/subperiostal im Bereich des Alveolarfortsatzes, um eine Beschleunigung der orthodontisch zu bewegenden Zähne zu erreichen. Zahlreiche körpereigene Signalmoleküle und Hormone, aber auch Pharmaka wurden bereits zellbiologisch und tierexperimentell auf ihre potentielle Wirksamkeit untersucht. Hierzu gehören u.a. der epidermale Wachstumsfaktor EGF, M-CSF, Zytokine, Parathormon, Vitamin D, L-Thyroxin, Osteokalzin, Relaxin, Prostaglandine und Nikotin [4, 28, 29, 34, 39].

*Effizienz:* Für viele Substanzen wurde in zellbiologischen und tierexperimentellen Studien bei systemischer oder auch lokaler Applikation eine Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung beobachtet [4, 28, 29, 34, 39]. Zu vielen Biomodulatoren

existieren jedoch widersprüchliche Ergebnisse. Die derzeitige Datenlage ist als limitiert zu betrachten.

*Sicherheit:* Einige der pharmakologisch aktiven Substanzen wurden bereits unter anderer Indikationsstellung beim Menschen eingesetzt, so dass das Nebenwirkungsprofil bei systemischer Applikation teilweise bekannt ist [4, 29]. Das lokale Nebenwirkungsprofil ist bislang unzureichend untersucht, ebenso wie die systemischen Nebenwirkungen, die bei lokaler Applikation durch Auswaschphänomene entstehen können.

*Bewertung:* Aufgrund der ungelösten Problematik pharmakologischer Nebenwirkungen, geeigneter „Drug-Delivery-Systeme“ und mangelnder evidenzbasierter, insbesondere klinischer Studien, auch bezüglich möglicher Langzeitwirkungen der Substanzen [29], ist derzeit noch kein Biomodulator zur klinischen Anwendung für eine Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung zugelassen.

#### Gentherapie

Die somatische Gentherapie bietet die Möglichkeit, gezielt ein Gen für einen Biomodulator lokal in einer Gruppe körpereigener Zellen (z.B. parodontale Ligamentfibroblasten) dauerhaft zur Expression zu bringen [4, 7].

*Effizienz:* Lediglich im Tiermodell wurde bereits erfolgreich ein Gentransfer von RANKL, das die Osteoklastogenese induzieren kann, durchgeführt und eine entsprechende Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung beobachtet, die effektiver als bei chirurgischen Verfahren (Kortikotomie) war [23, 25].

*Sicherheit:* Das Nebenwirkungsprofil entspricht dem anderer Anwendungsbereiche der somatischen Gentherapie und hat ein hohes Risikopotential.

*Bewertung:* Der lokale Gentransfer stellt ein rein experimentelles Verfahren zur Beschleunigung der Zahnbewegung dar und ist derzeit Gegenstand aktueller Forschung.

#### **Zusammenfassung**

Die verfügbaren Studien zeigen, dass mittels der chirurgischen Verfahren klinisch eine signifikante Beschleunigung der orthodontischen Zahnbewegung erreicht werden kann, wenn auch die verfügbare Evidenz nur als moderat einzustufen ist [5, 19, 20, 30]. Hinsichtlich möglicher kurz- und v.a. langfristiger unerwünschter Begleiterscheinungen besteht Klärungsbedarf [15, 33]. Sie

bieten sich daher bei Patienten an, bei denen eine Extraktionstherapie bleibender Zähne oder eine parodontale bzw. orthognathe Chirurgie geplant ist, da in diesen Fällen bereits die Notwendigkeit eines chirurgischen Eingriffes gegeben ist. Dies ist insbesondere beim Surgery-First-Ansatz der Fall, der gute Ergebnisse zeigt. Es ist jedoch bei der Anwendung chirurgischer Verfahren im Einzelfall abzuwägen, ob das Risiko eines chirurgischen Eingriffes mit möglichen Nebenwirkungen allein zum Zwecke einer Verkürzung der Behandlungsdauer gerechtfertigt ist.

Aufgrund der wenig-invasiven Natur der nicht-chirurgischen Verfahren werden sie von Patienten meist besser akzeptiert und sind daher Gegenstand aktueller Forschung [4, 29, 45]. Alle Verfahren basieren entweder auf einer physikalischen oder chemisch-pharmakologischen Steigerung der molekularen Prozesse, welche der orthodontischen Zahnbewegung zugrunde liegen. Potentielle Anwendungsrisiken, aber auch die tatsächliche Effektivität vieler dieser Verfahren sind bislang nur unzureichend untersucht [12, 34, 45].

## Literaturverzeichnis

- Aldrees AM (2016) Do customized orthodontic appliances and vibration devices provide more efficient treatment than conventional methods? *Korean J Orthod* 46(3):180–185. doi:10.4041/kjod.2016.46.3.180
- Alfawal AMH, Hajeer MY, Ajaj MA, Hamadah O, Brad B (2016) Effectiveness of minimally invasive surgical procedures in the acceleration of tooth movement. A systematic review and meta-analysis. *Prog Orthod* 17(1):33. doi:10.1186/s40510-016-0146-9
- Almeida VL de, Andrade Gois VL de, Andrade RNM, Cesar CPHAR, Albuquerque-Junior RLC de, Mello Rode S de, Paranhos LR (2016) Efficiency of low-level laser therapy within induced dental movement. A systematic review and meta-analysis. *J Photochem Photobiol B* 158:258–266. doi:10.1016/j.jphotobiol.2016.02.037
- Alpani K, Kantarci A (2016) Nonsurgical Methods for the Acceleration of the Orthodontic Tooth Movement. *Front Oral Biol* 18:80–91. doi:10.1159/000382048
- Alpani K, Kantarci A (2016) Surgical Methods for the Acceleration of the Orthodontic Tooth Movement. *Front Oral Biol* 18:92–101. doi:10.1159/000382051
- Al-Naoum F, Hajeer MY, Al-Jundi A (2014) Does alveolar corticotomy accelerate orthodontic tooth movement when retracting upper canines? A split-mouth design randomized controlled trial. *J Oral Maxillofac Surg* 72(10):1880–1889. doi:10.1016/j.joms.2014.05.003
- Andrade I, JR, Sousa ABdS, da Silva GG (2014) New therapeutic modalities to modulate orthodontic tooth movement. *Dental Press J Orthod* 19(6):123–133. doi:10.1590/2176-9451.19.6.123-133.sar
- Camacho AD, Velasquez Cujar SA (2014) Dental movement acceleration. Literature review by an alternative scientific evidence method. *World J Methodol* 4(3):151–162. doi:10.5662/wjm.v4.i3.151
- Chiari S (2016) Photobiomodulation and Lasers. *Front Oral Biol* 18:118–123. doi:10.1159/000351906
- Davidovitch Z, Finkelson MD, Steigman S, Shanfeld JL, Montgomery PC, Korostoff E (1980) Electric currents, bone remodeling, and orthodontic tooth movement. II. Increase in rate of tooth movement and periodontal cyclic nucleotide levels by combined force and electric current. *Am J Orthod* 77(1):33–47
- DiBiase AT, Woodhouse NR, Papageorgiou SN, Johnson N, Slipper C, Grant J, Alsaleh M, Cobourne MT (2016) Effect of supplemental vibrational force on orthodontically induced inflammatory root resorption. A multicenter randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 150(6):918–927. doi:10.1016/j.ajodo.2016.06.025
- El-Angbawi A, McIntyre GT, Fleming PS, Bearn DR (2015) Non-surgical adjunctive interventions for accelerating tooth movement in patients undergoing fixed orthodontic treatment. *Cochrane Database Syst Rev* (11):CD010887. doi:10.1002/14651858.CD010887.pub2
- Falkensammer F, Arnhart C, Krall C, Schaden W, Freudenthaler J, Bantleon H-P (2014) Impact of extracorporeal shock wave therapy (ESWT) on orthodontic tooth movement—a randomized clinical trial. *Clin Oral Investig* 18(9):2187–2192. doi:10.1007/s00784-014-1199-0
- Fernandez-Ferrer L, Montiel-Company J-M, Candel-Marti E, Almerich-Silla J-M, Penarrocha-Diago M, Bellot-Arcis C (2016) Corticotomies as a surgical procedure to accelerate tooth movement during orthodontic treatment. A systematic review. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 21(6):e703-e712
- Fleming PS, Fedorowicz Z, Johal A, El-Angbawi A, Pandis N (2015) Surgical adjunctive procedures for accelerating orthodontic treatment. *Cochrane Database Syst Rev* (6):CD010572. doi:10.1002/14651858.CD010572.pub2
- Ge MK, He WL, Chen J, Wen C, Yin X, Hu ZA, Liu ZP, Zou SJ (2015) Efficacy of low-level laser therapy for accelerating tooth movement during orthodontic treatment. A systematic review and meta-analysis. *Lasers Med Sci* 30(5):1609–1618. doi:10.1007/s10103-014-1538-z
- Gkantidis N, Mistakidis I, Kouskoura T, Pandis N (2014) Effectiveness of non-conventional methods for accelerated orthodontic tooth movement. A systematic review and meta-analysis. *J Dent* 42(10):1300–1319. doi:10.1016/j.jdent.2014.07.013
- Hassan AH, Al-Saeed SH, Al-Maghlouth BA, Bahammam MA, Linjawi AI, El-Bialy TH (2015) Corticotomy-assisted orthodontic treatment. A systematic review of the biological basis and clinical effectiveness. *Saudi Med J* 36(7):794–801. doi:10.15537/smj.2015.7.12437

19. Hoffmann S, Papadopoulos N, Visel D, Visel T, Jost-Brinkmann P-G, Prager TM (2017) Einfluss von Piezotomie und Osteoperforation des Alveolarfortsatzes auf die Geschwindigkeit der orthodontischen Zahnbewegung. Ein systematisches Review. *J Orofac Orthop*. doi:10.1007/s00056-017-0085-1
20. Hoogeveen EJ, Jansma J, Ren Y (2014) Surgically facilitated orthodontic treatment. A systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 145(4 Suppl):S51-64. doi:10.1016/j.ajodo.2013.11.019
21. Huang CS, Hsu SS-P, Chen Y-R (2014) Systematic review of the surgery-first approach in orthognathic surgery. *Biomed J* 37(4):184–190. doi:10.4103/2319-4170.126863
22. Huang H, Williams RC, Kyrkanides S (2014) Accelerated orthodontic tooth movement. Molecular mechanisms. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 146(5):620–632. doi:10.1016/j.ajodo.2014.07.007
23. Iglesias-Linares A, Moreno-Fernandez AM, Yanez-Vico R, Mendoza-Mendoza A, Gonzalez-Moles M, Solano-Reina E (2011) The use of gene therapy vs. corticotomy surgery in accelerating orthodontic tooth movement. *Orthod Craniofac Res* 14(3):138–148. doi:10.1111/j.1601-6343.2011.01519.x
24. K S, M S, D R, Gowd P (2014) Wilckodontics - a novel synergy in time to save time. *J Clin Diagn Res* 8(1):322–325. doi:10.7860/JCDR/2014/7576.3978
25. Kanzaki H, Chiba M, Arai K, Takahashi I, Haruyama N, Nishimura M, Mitani H (2006) Local RANKL gene transfer to the periodontal tissue accelerates orthodontic tooth movement. *Gene Ther* 13(8):678–685. doi:10.1038/sj.gt.3302707
26. Kau CH, Kantarci A, Shaughnessy T, Vachiramon A, Santiwong P, La Fuente A de, Skrenes D, Ma D, Brawn P (2013) Photobiomodulation accelerates orthodontic alignment in the early phase of treatment. *Prog Orthod* 14:30. doi:10.1186/2196-1042-14-30
27. Kirschneck C, Fanghänel J, Wahlmann U, Wolf M, Roldán JC, Proff P (2017) Interactive effects of periodontitis and orthodontic tooth movement on dental root resorption, tooth movement velocity and alveolar bone loss in a rat model. *Ann Anat* 210:32–43. doi:10.1016/j.aanat.2016.10.004
28. Kirschneck C, Proff P, Maurer M, Reicheneder C, Römer P (2015) Orthodontic forces add to nicotine-induced loss of periodontal bone. An in vivo and in vitro study. *J Orofac Orthop* 76(3):195–212. doi:10.1007/s00056-015-0283-7
29. Kouskoura T, Katsaros C, Gunten S von (2017) The Potential Use of Pharmacological Agents to Modulate Orthodontic Tooth Movement (OTM). *Front Physiol* 8:67. doi:10.3389/fphys.2017.00067
30. Liem AML, Hoogeveen EJ, Jansma J, Ren Y (2015) Surgically facilitated experimental movement of teeth. Systematic review. *Br J Oral Maxillofac Surg* 53(6):491–506. doi:10.1016/j.bjoms.2015.03.009
31. Long H, Pyakurel U, Wang Y, Liao L, Zhou Y, Lai W (2013) Interventions for accelerating orthodontic tooth movement. A systematic review. *Angle Orthod* 83(1):164–171. doi:10.2319/031512-224.1
32. Meikle MC (2006) The tissue, cellular, and molecular regulation of orthodontic tooth movement. 100 years after Carl Sandstedt. *Eur J Orthod* 28(3):221–240. doi:10.1093/ejo/cjl001
33. Miles P (2017) Accelerated orthodontic treatment - what's the evidence? *Aust Dent J* 62 Suppl 1:63–70. doi:10.1111/adj.12477
34. Nimeri G, Kau CH, Abou-Kheir NS, Corona R (2013) Acceleration of tooth movement during orthodontic treatment—a frontier in orthodontics. *Prog Orthod* 14:42. doi:10.1186/2196-1042-14-42
35. Patterson BM, Dalci O, Darendeliler MA, Papadopoulou AK (2016) Corticotomies and Orthodontic Tooth Movement. A Systematic Review. *J Oral Maxillofac Surg* 74(3):453–473. doi:10.1016/j.joms.2015.10.011
36. Peiro-Guijarro MA, Guijarro-Martinez R, Hernandez-Alfaro F (2016) Surgery first in orthognathic surgery. A systematic review of the literature. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 149(4):448–462. doi:10.1016/j.ajodo.2015.09.022
37. Qamruddin I, Alam MK, Khamis MF, Husein A (2015) Minimally Invasive Techniques to Accelerate the Orthodontic Tooth Movement. A Systematic Review of Animal Studies. *Biomed Res Int* 2015:608530. doi:10.1155/2015/608530
38. Sharma VK, Yadav K, Tandon P (2015) An overview of surgery-first approach. Recent advances in orthognathic surgery. *J Orthod Sci* 4(1):9–12. doi:10.4103/2278-0203.149609
39. Sodagar A, Donyavi Z, Arab S, Kharrazifard MJ (2011) Effect of nicotine on orthodontic tooth movement in rats. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 139(3):e261-5. doi:10.1016/j.ajodo.2010.08.018
40. Sonesson M, Geer E de, Subraian J, Petren S (2016) Efficacy of low-level laser therapy in accelerating tooth movement, preventing relapse and managing acute pain during orthodontic treatment in humans. A systematic review. *BMC Oral Health* 17(1):11. doi:10.1186/s12903-016-0242-8
41. Sousa MVS, Pinzan A, Consolaro A, Henriques JFC, Freitas MR de (2014) Systematic literature review. Influence of low-level laser on orthodontic movement and pain control in humans. *Photomed Laser Surg* 32(11):592–599. doi:10.1089/pho.2014.3789
42. Spielmann T, Wieslander L, Hefti AF (1989) Beschleunigung einer orthodontisch induzierten Zahnbewegung durch lokale Applikation von Prostaglandin (PGE1). *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 99(2):162–165
43. Verna C (2016) Regional Acceleratory Phenomenon. *Front Oral Biol* 18:28–35. doi:10.1159/000351897
44. Woodhouse NR, DiBiase AT, Johnson N, Slipper C, Grant J, Alsaleh M, Donaldson ANA, Cobourne MT (2015) Supplemental vibrational force during orthodontic alignment. A randomized trial. *J Dent Res* 94(5):682–689. doi:10.1177/0022034515576195
45. Yi J, Xiao J, Li H, Li Y, Li X, Zhao Z (2017) Effectiveness of adjunctive interventions for accelerating orthodontic tooth movement. A systematic review of systematic reviews. *J Oral Rehabil*. doi:10.1111/joor.12509
46. Yi J, Xiao J, Li Y, Li X, Zhao Z (2017) Efficacy of piezocision on accelerating orthodontic tooth movement. A systematic review. *Angle Orthod*. doi:10.2319/01191-751.1