Gültigkeit ist abgelaufen

Deutsche Gesellschaft für Endodontologie und zahnärztliche Traumatologie

Wissenschaftliche Stellungnahme: Aktuelle Empfehlungen zur Vitalerhaltung der Pulpa

Till Dammaschke

Poliklinik für Parodontologie und Zahnerhaltung
Universitätsklinikum Münster
Albert-Schweitzer-Campus 1, Gebäude W 30
48149 Münster
Deutschland
E-Mail: tillda@uni-muenster.de

Kerstin Galler

Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
Universitätsklinikum Regensburg
Franz-Josef-Strauß-Allee 11
93053 Regensburg
Deutschland
E-Mail: kerstin.galler@ukr.de

Gabriel Krastl

Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
Universitätsklinikum Würzburg
Pleicherwall 2
97070 Würzburg
Deutschland
E-Mail: Krastl_G@ukw.de

(in alphabetischer Reihenfolge)

Gliederung

1. Einleitung
    1.1. Definition und Ziele vitalerhaltender Maßnahmen
    1.2. Funktion und Funktionsverlust des Pulpagewebes
2. Indikation zur Vitalerhaltung
3. Indirekte Überkappung
4. Direkte Überkappung
5. Pulpotomie
    5.1. Partielle Pulpotomie
    5.2. Vollständige Pulpotomie
6. Überkappungsmaterialien
    6.1. Kalziumhydroxid-haltige Präparate
    6.2. Dentinadhäsive und Komposite
    6.3. Hydraulische Zemente auf Kalziumsilikatbasis
7. Vitalerhaltung nach traumabedingter Pulpaexposition
8. Vitalerhaltung nach kariesbedingter Pulpaexposition
9. Nachkontrolle und Erfolgsraten
10. Abschließende Bewertung

1. Einleitung

1.1. Definition und Ziele vitalerhaltender Maßnahmen

In den letzten Jahren ist das Thema Vitalerhaltung wieder zunehmend ins Bewusstsein der Zahnärzteschaft gerückt. Bei der Exkavation einer *Caries profunda* ist ein Augenmerk auf die verbleibende Dentinschicht über der Pulpa zu richten. Während über viele Jahre gelehrt wurde, Karies bis in das gesunde und sondenharte Dentin zu exkavieren (*cri dentinaire*), wird mittlerweile in Kauf genommen, selektiv pulpanah infiziertes Dentin zu belassen, um eine Exposition des Pulpagewebes zu vermeiden [19]. Auch die klassischen Maßnahmen zur Vitalerhaltung, die direkte Überkappung und die Pulpotomie, werden thematisiert. Die standardisierte Einteilung in reversible und irreversible Pulpitis mit dem daran geknüpften Therapieentscheid zu Vitalerhalt oder Vitalexstirpation wird derzeit hinterfragt, und eine Ausweitung der Indikationsstellung in Richtung Pulpotomie zeichnet sich ab. Die vorliegende wissenschaftliche Mitteilung beleuchtet den aktuellen Wissensstand zu vitalerhaltenden Maßnahmen der Pulpa und gibt darauf basierende Empfehlungen zum klinischen Vorgehen.

Unter dem Sammelbegriff vitalerhaltende Maßnahmen werden konservative Behandlungsmaßnahmen zusammengefasst, die dazu dienen, exponierte Dentin- und Pulpaareale durch Applikation eines Überkappungsmaterials und Legen einer bakteriendichten Restauration vor weiteren externen Reizen zu schützen und ein Vordringen von Mikroorganismen (und/oder Bestandteilen von Füllungsmaterialien) zu verhindern. Dabei ist zum einen der Status der Pulpa zum Zeitpunkt des Eingriffes entscheidend, zum anderen das Ausmaß der Läsion bzw. der Infektionsgrad des Dentins. Zu den vitalerhaltenden Maßnahmen zählen die Versorgung pulpanahen Dentins (*Caries profunda*-Behandlung bzw. indirekte Überkappung), die direkte Überkappung sowie die Pulpotomie oder Vitalamputation.

Ziel aller vitalerhaltender Maßnahmen ist es, bei vorgeschädigter Pulpa eine Situation zu schaffen, die die Ausbildung einer Hartgewebsbarriere und eine Ausheilung des Gewebes ermöglicht, dieses funktionstüchtig erhält und somit langfristig den Verbleib eines vitalen Zahnes in der Mundhöhle gewährleistet.

1.2. Funktion und Funktionsverlust des Pulpagewebes

Zu den wesentlichen Funktionen der Zahnpulpa gehören die Dentinbildung während der Zahnentwicklung sowie über die gesamte Lebensdauer des Zahnes, die Reizweiterleitung über Proprio- und Schmerzrezeptoren, die Immunfunktion gegen eindringende Bakterien und deren Stoffwechselprodukte, die Bildung von Reiz- oder Reparaturdentin als Abwehrmechanismus gegen externe Stimuli sowie im Sonderfalle des jugendlichen Zahnes die Bildung von Wurzelpulpa und –dentin und damit der Abschluss des Wurzelwachstums.

Den vitalerhaltenden Maßnahmen gegenübergestellt ist die Wurzelkanalbehandlung, bei der noch vorhandenes Pulpagewebe möglichst vollständig entfernt, das Kanalsystem erweitert und desinfiziert und schließlich mittels Wurzelkanalfüllmaterialien obturiert wird. Obgleich bei sorgfältigem Vorgehen nach Vitalexstirpation Erfolgsraten von über 90 % nach etwa 5 Jahren erreicht werden können [42], tritt damit stets der vollständige Funktionsverlust des Pulpagewebes ein, der durchaus mit Nachteilen verbunden ist. Somit geht der propriozeptive

Schutzmechanismus teilweise verloren. Es wurde beschrieben, dass ein wurzelkanalbehandelter Zahn eine 2,5-mal höhere Belastung als ein vitaler Zahn zulässt, bevor eine propriozeptive Reaktion erfolgt [89]. Eine daraus resultierende höhere Frakturgefahr ist zwar nicht nachgewiesen, aber denkbar. Darüber hinaus können Veränderungen der Wurzelkanalgeometrie (Schwächung des Wurzelkanalwanddentins durch Aufbereitung), die im Zuge der Wurzelkanalbehandlung unvermeidlich sind, zu einer höheren Inzidenz von Frakturen führen [45,67]. Weitere mögliche Probleme, die im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung auftreten können, sind Zahnverfärbungen [62] sowie eine erhöhte Kariesanfälligkeit, bedingt durch eine erhöhte Plaqueanlagerung und veränderte Mikroflora [77] oder aufgrund der fehlenden Abwehrleistung des Pulpa-Dentin-Komplexes und des fehlenden Schmerzwarnsystems. Auch kann sich eine Wurzelkanalbehandlung als komplexer darstellen als zunächst angenommen. Verfahren zur Vitalerhaltung der Pulpa sind konservative sowie vergleichsweise einfach durchführbare und kostengünstige Maßnahmen [57,98].

2. Indikation zur Vitalerhaltung

Das Eindringen von Mikroorganismen sowie deren Stoffwechselprodukten setzt einen Reiz, der zur Entstehung einer Entzündungsreaktion in der Pulpa führt. Vermittelt über Zellrezeptoren auf Odontoblasten, dendritischen Zellen und Pulpafibroblasten wird die Immunantwort initiiert. Dabei kommt es initial zur Hyperämie, die entstehende Entzündungsreaktion ist durch eine Abnahme der Zellzahl, ein Abflachen der Odontoblasten sowie das Einwandern von Lymphozyten und Plasmazellen charakterisiert [92]. Klinisch korreliert damit zunächst die Ausbildung einer reversiblen Pulpitis, bei der davon ausgegangen wird, dass eine Ausheilung des Gewebes durch das therapeutische Eingreifen ermöglicht werden kann. Bei fortdauerndem Reiz sind in der Folge Bakterien im Pulpakavum nachweisbar, es kommt zu Mikroabszessen und Gewebsnekrosen, die von polymorphkernigen neutrophilen Granulozyten gesäumt sind, in der Peripherie finden sich entzündliche Infiltrate [92]. Dieses Stadium wird als irreversible Pulpitis bezeichnet.

Für die reversible Pulpitis sprechen ein positiver Sensibilitätstest sowie ein reizgebundener Schmerz. Eine irreversible Pulpitis wird diagnostiziert bei (verstärkt) positiver Sensibilitätsprobe, bei ausstrahlendem, reizüberdauerndem Schmerz oder Dauerschmerz, Schmerz auf Wärme und möglicherweise unzureichender Lokalisierbarkeit des schmerzauslösenden Zahnes von Seiten des Patienten. Irreversible Pulpitiden können jedoch auch asymptomatisch verlaufen [1]. Vitalerhaltende Maßnahmen sind nur indiziert, wenn klinisch die Diagnose der reversiblen Pulpitis gestellt wird. Nach derzeitiger Lehrmeinung kann im Falle der irreversiblen Pulpitis eine Ausheilung des Gewebes nach Entfernung des auslösenden Reizes nicht vorhersagbar erreicht werden, weshalb die Diagnose „irreversible Pulpitis“ das Einleiten der Wurzelkanalbehandlung bedingt. Obgleich es Hinweise darauf gibt, dass die oben beschriebenen histologischen Beobachtungen gut mit der klinischen Diagnosestellung korrelieren [92], soll hier erwähnt werden, dass die klinische Einteilung des Beschwerdebildes wenig über die Regenerationsfähigkeit des Gewebes aussagt. Sie erleichtert lediglich dem Behandler den Therapieentscheid, da schematisch vorgegangen

werden kann. Das Diagnose- und Therapieschema über den Zustand der Pulpa und die ableitbare Therapie werden zunehmend in Frage gestellt. Daher befindet sich die Indikationsstellung zur Pulpotomie bei irreversibler Pulpitis derzeit im Fluss und wird in klinischen Studien untersucht.

Vitalerhaltende Maßnahmen können nur dann erfolgreich verlaufen, wenn eine Infektion der Pulpa während und nach der Therapie ausgeschlossen werden kann. Nach derzeitigem Kenntnisstand sollen vitalerhaltende Maßnahmen nur an Zähnen durchgeführt werden, die keine ausgeprägte Schmerzsymptomatik aufweisen (reversible Pulpitis). Vitalerhaltende Maßnahmen sollen oder können nicht durchgeführt werden bei fehlender Reaktion auf die Sensibilitätsprobe (hierbei muss der Pulpastatus nach Eröffnung des Pulpakavums verifiziert werden), bei Klopf- bzw. Aufbissempfindlichkeit, bei Spontan- oder Dauerschmerz, sowie bei radiologischen Anzeichen für eine periapikale Osteolyse. Des Weiteren sind Ausschlusskriterien nach Eröffnung des Kavums eine starke, nicht zu stoppende Blutung oder der Austritt serösen oder putriden Exsudates sowie bei nekrotischem, nicht mehr durchblutetem Gewebe. Ausgeschlossen werden sollten Zähne, bei denen ein bakteriendichter Verschluss aufgrund eingeschränkter Restaurierbarkeit nicht gewährleistet ist. Um eine Infektion des exponierten Pulpagewebes während oder nach der Überkappung auszuschließen, müssen weitere Voraussetzungen erfüllt sein, dazu gehören die Verwendung steriler Instrumente, das Legen von Kofferdam, die vollständige Exkavation der Karies sowie die Möglichkeit zum sofortigen und definitiven bakteriendichten Verschluss. Sind diese Voraussetzungen nicht alle zweifelsfrei erfüllt, so sollte einer Wurzelkanalbehandlung (oder der Extraktion) der Vorzug gegeben werden.

Günstige Voraussetzungen für die Vitalerhaltung sind bei einer jungen Pulpa ohne Vorschädigung gegeben [109]. Mit zunehmendem Alter ist mit einer reduzierten Regenerationsfähigkeit durch Pulpaveränderungen im Sinne einer zellärmeren und faserreicheren Pulpa zu rechnen [48,80]. Trotzdem scheint das Patientenalter nur eine untergeordnete Rolle in im Hinblick auf den Behandlungserfolg zu spielen [6,30,33,37,44,59,65,70,75,107]. Gleiches gilt für Faktoren wie Zahnposition sowie Größe oder Lage der Pulpafreilegung [35].

Generell ist anzumerken, dass die in der Literatur angegebenen Erfolgsraten vitalerhaltender Maßnahmen stark variieren, insbesondere bei der direkten Überkappung nach Kariesexkavation. Frühe klinische Misserfolge (innerhalb von Tagen oder Wochen) sind multifaktoriell, korrelieren jedoch sicherlich mit unsachgemäßer Diagnostik des Pulpastatus. Diese kann im Unterschätzen des Entzündungsstatus der Pulpa resultieren, wodurch sich irreversible Pulpitis und Pulpanekrose entwickeln können, was zu postoperativen Schmerzen führen kann.

3. Indirekte Überkappung

Im deutschen Sprachgebrauch bezeichnet die indirekte Überkappung die medikamentöse Versorgung einer dünnen, pulpanah verbliebenen Schicht kariesfreien Dentins [96]. Klinisch entsteht diese Situation zumeist bei der Exkavation einer profunden Karies, so dass die

indirekte Überkappung auch *Caries-profunda*-Behandlung genannt wird. In der englischsprachigen Literatur ist der Begriff „indirect pulp capping“ etwas anders definiert, nämlich als die dauerhafte Überkappung einer dünnen, pulpanahen, kariös veränderten Dentinschicht, ohne dass die Karies in einer zweiten Sitzung vollständig exkaviert wird [9,40]. Weil über dem vitalen Pulpagewebe nur eine minimale Dentinschicht verbleibt, besteht die Gefahr, dass es über die Dentintubuli zu einer irreversiblen Entzündung der Pulpa kommt: einerseits durch verbliebene oder bereits in das Gewebe eingedrungene Mikroorganismen, andererseits durch zytotoxische Bestandteile aus den Füllungsmaterialien, die durch das dünne Restdentin diffundieren können. Mit einem Überkappungsmaterial sollte das pulpanahe Dentin desinfiziert und bakteriendicht versiegelt sowie die Pulpa zur Bildung von Tertiärdentin angeregt werden [91]. Diese Form des Tertiärdentins bezeichnet man auch als Reaktions- oder Reizdentin. Reaktionsdentin wird definitionsgemäß durch überlebende postmitotische primäre Odontoblasten gebildet [101]. Die indirekte Überkappung dient somit dem Schutz der vitalen Pulpa vor allem nach Kariesentfernung. Besteht im Vorfeld bereits eine reversible Pulpitis, sollten durch die indirekte Überkappung die Voraussetzungen für eine Pulpaheilung geschaffen werden. Trotz nachvollziehbarer Gründe, die für eine gesonderte Versorgung des pulpanahen Dentins im Sinne der direkten Überkappung sprechen, soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass ein Beleg für diese Maßnahme durch klinische Studien derzeit fehlt [19].

Auch eine indirekte Überkappung sollte nach Möglichkeit unter kontrollierter Trockenlegung mit Kofferdam erfolgen. Zur Vermeidung einer Keimverschleppung empfiehlt es sich, die klinische Krone vor der Exkavation mit Natriumhypochlorit (NaOCl; 1 - 5 %) oder Chlorhexidindigluconat (CHX; 2 %) zu desinfizieren.

Mikroorganismen und somit jeder sich in Richtung Pulpa ausbreitende kariöse Prozess stellt eine Gefährdung der Pulpa dar [93]. Daher sollte während der Kariesexkavation die Anzahl an Mikroorganismen in der Kavität und in Pulpanähe soweit möglich reduziert werden. Die Frage, wie viel verändertes Dentin belassen werden kann, um noch eine Ausheilung der Pulpa zu ermöglichen, ist derzeit nicht eindeutig geklärt [19].

Nach erfolgter Exkavation ist die Kavität mit NaOCl oder CHX und Wasserspray zu reinigen [18,22]. Eine Schädigung des vitalen Pulpagewebes bei Anwendung von NaOCl muss nicht befürchtet werden [95]. Materialien für die indirekte Überkappung sollten möglicherweise pulpanah verbliebene Mikroorganismen abtöten, das durch den kariösen Defekt saure Gewebe neutralisieren, Dentin remineralisieren sowie die Pulpa zur Tertiärdentinbildung anregen [72]. Klassischerweise wird dafür seit den 1930er Jahren Kalziumhydroxid empfohlen [55]. Aufgrund der Nachteile von wässrigen Kalziumhydroxidsuspensionen ist heutzutage die Verwendung von hydraulischen Kalziumsilikatzementen auch bei der indirekten Überkappung möglicherweise die bessere Alternative [3]. Eine definitive adhäsive Füllung sollte bei jeder Art von Überkappungsmaterial in der gleichen Sitzung erfolgen. Nach indirekter Überkappung kann eine Reizdentinbildung erfolgen, je nach Schädigungsgrad der Odontoblasten kommt es jedoch wahrscheinlicher zur Reparatur und zur Deposition einer atubulären Mineralstruktur. Reiz- und Reparaturdentin können histologisch auch nebeneinander vorgefunden werden [91].

4. Direkte Überkappung

Die direkte Überkappung ist definiert als Abdeckung der freiliegenden Pulpa. Ursächlich können Karies, präparatorische Maßnahmen oder traumatische Exposition sein. Die Indikationsstellung ist bei der Diagnosestellung „reversible Pulpitis“ gegeben.

Nach klinischem und ggf. radiologischem Befund wird der Zahn mit Kofferdam isoliert und die klinische Krone desinfiziert. Es ist auf die Verwendung eines sterilen Instrumentariums zu achten. Die vollständige Kariesexkavation wird mit langsam rotierenden Rosenbohrern und Handinstrumenten von peripher nach zentral, idealerweise unter Verwendung optischer Vergrößerungshilfen (Lupenbrille, Mikroskop), durchgeführt. Zur Blutstillung und Desinfektion empfiehlt sich ein mit NaOCl getränktes Wattepellet. Anschließend erfolgt die Applikation einer Kalziumhydroxid-Suspension oder eines hydraulischen Kalziumsilikatzements auf die eröffnete Pulpa sowie das umgebende Dentin, wobei ein ausreichend breiter Dentinsaum für die adhäsive Restauration frei bleiben muss. Um ein ungewolltes Entfernen des Überkappungsmaterials beim Kavitätenverschluss zu vermeiden, empfiehlt sich das Überschichten mit einem erhärtenden Präparat. Anschließend sollte das Dentin zur Minimierung negativer Einflüsse der Desinfektionslösung auf den adhäsiven Verbund gründlich mit Wasser abgesprüht werden. Der definitive adhäsive Verschluss sollte in der gleichen Sitzung erfolgen. Da die Exposition der Pulpa mit dem Untergang der ortsständigen Odontoblasten einhergeht, ist die durch die Überkappung induzierte Hartgewebsbildung ein Reparaturprozess, bei dem meist ein von Fibroblasten gebildetes, amorphes Mineralisationsgewebe entsteht [91].

5. Pulpotomie

Die Pulpotomie (Pulpaamputation) ist eine Therapiemethode zur Vitalerhaltung der Pulpa nach artifizieller Eröffnung der Kronenpulpa (iatrogen, traumatisch). Dabei wird die Kronenpulpa teilweise (partielle Pulpotomie) oder bis zum Wurzelkanaleingang (vollständige bzw. zervikale Pulpotomie) amputiert und nach erfolgreicher Blutstillung analog zum Vorgehen bei der direkten Überkappung versorgt [1,63].

5.1. Partielle Pulpotomie

Bei der partiellen Pulpotomie wird die Kronenpulpa von der exponierten Stelle ausgehend um ca. 2 mm reduziert um potentiell entzündete und irreversibel geschädigte Pulpaanteile zu entfernen und die Restpulpa vital zu erhalten [15]. Die partielle Pulpotomie wird vorzugsweise mit einem kleinen Präparationsdiamanten durchgeführt [51]. Dabei werden die koronalen 2 mm der Pulpa hochtourig, idealerweise unter kontinuierlicher Spülung mit physiologischer Kochsalzlösung entfernt [40]. Aus Gründen der Praktikabilität wird die Pulpaamputation allerdings häufig unter Wasserkühlung mit einem Winkelstück durchgeführt [41]. Ob bei der Verwendung korrekt aufbereiteter Winkelstücke Nachteile im Sinne einer geringeren Erfolgssicherheit zu erwarten sind, ist nicht belegt.

Wie bei der direkten Überkappung wird bei der partiellen Pulpotomie die Spülung der Amputationsstelle mit NaOCl empfohlen bis die Blutung sistiert. Sofern die Entstehung eines Blutkoagulums verhindert wird, sind die gleichen Reparaturmechanismen der Pulpa wie bei der direkten Überkappung zu erwarten [24,33]. Ist die verbliebene Pulpa gesund, ist mit einem Sistieren der Blutung innerhalb von 5 Minuten zu rechnen. Gelingt die Blutstillung nicht innerhalb dieser Zeit, wird dies als Hinweis gewertet, dass die Pulpa nicht bis auf ein gesundes Niveau reduziert wurde. In diesen Fall kann eine vollständige Pulpotomie, also die Entfernung der gesamten Kronenpulpa, als letztmögliche vitalerhaltende Maßnahme in Erwägung gezogen werden [63].

Auf die artifiziell freigelegte Pulpaoberfläche wird eine Kalziumhydroxid-Suspension oder ein hydraulischer Kalziumsilikatzement aufgebracht und lokal mit einem erhärtenden Material dünn überschichtet [24]. Da bei der partiellen Pulpotomie das Überkappungsmaterial in größerer Menge als bei der direkten Überkappung verwendet wird, wäre bei Verwendung hydraulischer Kalziumsilikatzemente auch das Risiko der Zahnverfärbung als höher einzustufen [63]. Die bakteriendichte Restauration schließt sich an.

5.2. Vollständige Pulpotomie

Bei der vollständigen Pulpotomie wird die komplette Kronenpulpa entfernt und die zu erhaltende Wurzelpulpa anschließend auf Höhe der Kanaleingänge überkappt. Das weitere Vorgehen erfolgt analog zur partiellen Pulpotomie. Eine bakteriendichte definitive Restauration schließt sich an [63].

6. Überkappungsmaterialien

6.1. Kalziumhydroxid-haltige Präparate

Als Überkappungsmaterial wird Kalziumhydroxid auch heutzutage noch vielfach verwendet. In wässriger Suspension weist es einen hohen pH-Wert auf, es wirkt bakterizid, kann bakterielle Säuren sowie Lipopolysaccharide im Dentin neutralisieren und führt zudem zur Freisetzung von im Dentin gebundenen Wachstumsfaktoren [50]. Kalziumhydroxid unterstützt somit die Hartgewebsbildung und Ausheilung der Pulpa [39,102]. Nachteile sind in der mechanischen Instabilität sowie der Resorption des Materials über die Zeit [10,49] zu sehen. Auch werden nach Kalziumhydroxid-Applikation im Reparaturdentin Porositäten („Tunneldefekte“) beobachtet, die als Eintrittspforten für Mikroorganismen dienen können [28]. Der hohe pH-Wert wässriger Kalziumhydroxid-Suspensionen führt in direktem Gewebekontakt zur Liquidationsnekrose [103]. Kalziumhydroxid sollte nur kleinflächig im Bereich der Pulpafreilegung bzw. im pulpanahen Bereich der Kavität aufgetragen werden [10,103,104]. Kalziumhydroxid in wässriger Suspension ist vor anderen Kalziumhydroxid-Kombinationen (Kalziumsalicylatester-Zemente, Liner oder Kitte) der Vorzug zu geben. Diese weisen eine wesentlich geringere Freisetzung von Hydroxyl-Ionen auf [105], eine kontinuierliche Desintegration unter der Hauptfüllung [10], sie induzieren eine langsamere und weniger dichte

Hartgewebsbildung [86] und einige Zusätze, die die Erhärtung des Materials bedingen, wirken möglicherweise pulpatoxisch [69].

Auch neuere, lichthärtende Liner und Zemente mit Kalziumhydroxid- bzw. MTA-Zusatz (Produktbeispiele: Ultrablend Plus, Ultradent, South Jordan, USA; Calcimol LC, VOCO, Cuxhaven oder TheraCal LC, Bisco, Schaumburg, USA) sind kritisch zu sehen. Den Produkten fehlt die spezifische, Bioaktivität auslösende Kalziumhydroxidwirkung [21,106]. Eindeutig nachgewiesen ist eine Zytotoxizität dieser Produkte, die auf den Monomeranteil zurückzuführen ist [52]. Nach derzeitiger Datenlage ist von einer Überkappung der Pulpa mit lichtpolymerisierbaren Kalziumhydroxid- oder Kalziumsilikat-haltigen Materialien abzuraten.

6.2. Dentinadhäsive und Komposite

Zwischenzeitlich wurde die Verwendung von Dentinadhäsiven als Überkappungsmaterialien propagiert [26,27,29], dem Gedanken folgend, dass der bakteriendichte Verschluss ausschlaggebend für den Erfolg vitalerhaltender Maßnahmen sei [3,97]. Jedoch weisen Dentinadhäsive aufgrund der enthaltenen Monomere eine toxische Wirkung auf [25,36], die pulpanah durch die feuchtigkeitsbedingte unvollständige Polymerisation weitgehend bestehen bleibt [78]. Auch wurde Bestandteilen von Dentinadhäsiven ein mineralisationshemmender Effekt auf Pulpazellen nachgewiesen [47]. Dentinadhäsive und Komposite sind grundsätzlich nicht biokompatibel [25] und daher als Überkappungsmaterial abzulehnen [3].

6.3. Hydraulische Zemente auf Kalziumsilikatbasis

Mit der Einführung hydraulischer Kalziumsilikatzemente wie Mineral Trioxid Aggregat (MTA) wird wässriges Kalziumhydroxid mittlerweile nicht mehr als Mittel der 1. Wahl zur Vitalerhaltung der Pulpa angesehen [3,22]. Hydraulische Kalziumsilikatzemente sind werkstoffkundlich ähnlich den aus der Bauindustrie bekannten Portlandzementen. Sie werden als „hydraulisch“ bezeichnet, da sie sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärten und beständig sind [14]. Kalziumsilikat-Zemente bestehen hauptsächlich aus Di- und Trikalziumsilikat und werden mit Wasser angemischt. Bei der Reaktion und der anschließenden Aushärtung wird über einen längeren Zeitraum Kalziumhydroxid freigesetzt [14], wodurch sich die anhaltenden antibakterielle Eigenschaften erklären [84]. Hydraulische Kalziumsilikatzemente sind biokompatibel und fördern die Hartgewebsbildung von Pulpazellen [111]. Mineralanteile aus dem Zement interagieren mit dem Dentin [8], wodurch sich eine Dentinhaftung ähnlich der von Glasionomerzementen ergibt [60]. Der Vorteil im Vergleich zu Kalziumhydroxid-Produkten liegt in der höheren mechanischen Festigkeit, der geringeren Löslichkeit und dem dichteren Verschluss [34]. Auch wenn mehr klinische Langzeitstudien zur Vitalerhaltung der Pulpa mit hydraulischen Kalziumsilikatzementen wünschenswert wären, scheinen diese nach bisheriger Datenlage für die Überkappung der Pulpa besser geeignet als Kalziumhydroxid [3,56,64,76].

Hydraulische Kalziumsilikatzemente können zu Verfärbungen der Zahnhartsubstanz führen, was besonders bei Frontzähnen, z. B. nach Trauma, problematisch sein kann [79]. Ursächlich sind enthaltene Schwermetalle wie z. B. Bismuthoxid als Röntgenkontrastmittel [13,38] oder

auch Eisen [99]. Dabei spielt v. a. die Oxidation dieser Metalle nach Kontakt mit Natriumhypochlorit oder die Aufnahme von Blutbestandteilen eine Rolle [20,66,99]. Bei hydraulischen Kalziumsilikatzementen, die weniger oder kaum Schwermetalle enthalten, fällt die mögliche Zahnverfärbung geringer aus. Besonders farbstabil erscheinen Kalziumsilikatzemente, die Zirkonoxid oder Tantaloxid als Röntgenkontrastmittel enthalten. So konnten Lipski et al. (2018) 18 Monate nach direkter Überkappung mit solch einem Zement in keinem Fall eine gräuliche Verfärbung der Zähne feststellen. In Anwesenheit von Blut wurden allerdings auch für diese Materialien *in vitro* Verfärbungen nachgewiesen [99]. Bei vitalerhaltenden Maßnahmen nach Pulpafreilegung ist der Kontakt dieser Überkappungsmaterialien zu Blut zwar unvermeidbar, allerdings scheint deren Verwendung aus ästhetischer Sicht zumindest im Seitenzahngebiet unproblematisch zu sein [79].

7. Vitalerhaltung nach traumabedingter Pulpaexposition

Die Exposition der Pulpa nach Zahntrauma bietet in den meisten Fällen ideale Voraussetzung für vitalerhaltende Maßnahmen, sofern diese korrekt durchgeführt werden und keine Vorschädigung der Pulpa vorliegt. Zur Simulation der Bedingungen nach dentalem Trauma wurden in einer älteren tierexperimentellen Studie an Affen Kronenfrakturen mit Pulpafreilegung induziert. Die drei Stunden, zwei sowie sieben Tage in direktem Kontakt zur Mundhöhle stehenden Pulpen wurden anschließend histologisch untersucht. In Abhängigkeit von der Zeitdauer der Exposition wurden entzündliche Pulpaveränderungen festgestellt, die jedoch auch nach bis zu sieben Tagen auf die koronalen 2 mm beschränkt blieben [32]. Die Ergebnisse konnten 1983 durch Heide und Mjör bestätigt werden und legen nahe, dass die partielle Pulpotomie mit Entfernung von 2 mm Pulpagewebe im koronalen Bereich auch nach mehreren Tagen in Kontakt zur Mundhöhle noch erfolgreich sein kann [54]. Zu berücksichtigen ist, dass bei begleitender Dislokationsverletzung des frakturierten Zahns die Durchblutung und damit die Abwehrfähigkeit der Pulpa kompromittiert sein kann [94].

8. Vitalerhaltung nach kariesbedingter Pulpaexposition

Im Vergleich zu Zähnen mit traumatischer Schädigung ist nach kariöser Exposition stets eine Vorschädigung der Pulpa durch den bereits seit mehr oder weniger langer Zeit bestehenden Kontakt zu bakteriellen Toxinen oder sogar den Bakterien selbst gegeben. Dabei wirken sich Läsionsgröße, Keimspektrum sowie Geschwindigkeit des Fortschreitens der Läsion auf den Pulpastatus aus. Bei der Versorgung des pulpanahen Dentins im Sinne einer indirekten Überkappung sind die Übergänge zur direkten Überkappung fließend. Selbst bei einer verbleibenden Dentinschicht wird über das Anschneiden von Odontoblastenfortsätzen im pulpanahen Dentin die Pulpa in Mitleidenschaft gezogen. Auch kann das Pulpagewebe punktförmig freigelegt sein, ohne dass dies klinisch bemerkt wird, weswegen sich die sorgfältige Inspektion der Kavität mit einer Lupenbrille empfiehlt.

Da auch nach vollständiger Kariesexkavation und sorgfältiger Desinfektion Mikroorganismen zurückbleiben können, ist es empfehlenswert, das Überkappungsmaterial nicht nur im Bereich der Eröffnungsstelle zu applizieren, sondern auch auf das umgebende Dentin, um diese Bakterien wirksam zu bekämpfen. Dadurch lässt sich die Erfolgsrate der Pulpaüberkappung insbesondere bei Zähnen mit profunder Karies erhöhen (Bogen und Chandler 2008). Allerdings muss für Kalziumhydroxid beachtet werden, dass es bei großflächiger Applikation ggf. zu Desintegration und mechanischer Instabilität kommen kann [10,49]. Des Weiteren ist nach Eröffnung der Pulpa im kariösen Dentin eine Kontamination des Gewebes mit infizierten Dentinspänen wahrscheinlich. Ist abzusehen, dass es zur Eröffnung der Pulpa kommt, ist daher pulpanah die Verwendung eines neuen, sterilen Rosenbohrers empfehlenswert. Da die Überkappung des Pulpagewebes nur nach vollständiger Exkavation der Karies indiziert ist, kann bei Exposition im kariösen Dentin nach Exkavation die Pulpotomie erwogen werden. Dadurch können bereits in die Pulpa transportierte infizierte Dentinspäne sowie geschädigte Gewebeanteile entfernt und somit die Voraussetzungen für eine Ausheilung verbessert werden.

9. Nachkontrollen und Erfolgsraten

Der Misserfolg vitalerhaltender Maßnahmen wird durch eine Infektion verursacht, die entweder auf verbliebene Mikroorganismen oder das Eindringen von neuen Bakterien entlang eines Spalts zwischen Zahn und Füllungsmaterial bei defekten Restaurationen zurückzuführen ist [82]. Dabei kann es auch unbemerkt zur Pulpanekrose und zur Ausbildung periapikaler Entzündungsprozesse kommen. Daher sollte die Sensibilität nach vitalerhaltenden Maßnahmen regelmäßig getestet werden, zunächst nach 3, 6 und 12 Monaten, danach jährlich. Es eignet sich ein thermischer Sensibilitätstest mit Kältespray oder CO_2-Schnee. Dabei ist die eingeschränkte Reaktion nach partieller und insbesondere nach zervikaler Pulpotomie zu erwarten und nicht als Misserfolgskriterium zu werten. Eine röntgenologische Überprüfung wird nur für den Fall einer negativen Sensibilitätstestung empfohlen [61]. Hierbei ist zu beachten, dass sich eine mögliche Hartsubstanzneubildung im Bereich der Eröffnungsstelle bzw. der Amputationsstelle nicht eindeutig beurteilen lässt. Auch einer geringfügigen Verbreiterung des Parodontalspalts muss keine pathologische Bedeutung zukommen [2].

Ein klinischer Behandlungserfolg nach vitalerhaltenden Maßnahmen der Pulpa liegt vor, wenn die Zähne als „klinisch unauffällig" einzustufen sind, d.h. wenn diese auf die Sensibilitätsprobe reagieren, kein Spontanschmerz, Schmerzen auf Palpation oder Perkussion auftreten und keine Schwellung zu beobachten ist. Röntgenologisch dürfen keine Veränderungen, wie z. B. periapikale Läsionen, sichtbar sein. Reagiert ein Zahn nicht auf die Sensibilitätsprobe bzw. mit Schmerzen auf Perkussion und/oder Palpation oder zeigt sich im Röntgenbild eine periradikuläre Radioluzenz, so ist von einem Misserfolg der Behandlung auszugehen. Auch Zähne, an denen nach Überkappung eine Wurzelkanalbehandlung indiziert ist oder die extrahiert werden müssen, stellen einen klinischen Misserfolg dar (Duda und Dammaschke 2009).

Die zur Verfügung stehenden Studien legen nahe, dass nach partieller Pulpotomie nicht mit einem höheren Risiko für Obliterationen des Wurzelkanals zu rechnen ist [11,59,74,88]. Im Vergleich dazu ist bei der vollständigen Pulpotomie längerfristig das Risiko für Obliterationen erhöht. Während in den ersten zwei Jahren das Risiko als sehr gering eingestuft wird [5,46,100], treten partielle Obliterationen in 30 % der Fälle nach einer mittleren Beobachtungszeit von 3 Jahren [70] und in knapp 40 % der Fälle nach einer mittleren Beobachtungszeit von 4,8 Jahren auf.

Vitalerhaltende Maßnahmen nach Trauma bieten eine hohe Erfolgssicherheit, sofern die Pulpa nicht vorgeschädigt oder die Durchblutung durch eine begleitende Dislokationsverletzung kompromittiert ist. Für die direkte Überkappung mit Kalziumhydroxid wird die Prognose mit 54 % - 90 % angegeben [43,53,90]. Die partielle Pulpotomie mit dem gleichen Material weist mit 86 - 100 % eine höhere Erfolgssicherheit auf [4,30,31,33,37,53,109] und ist somit zu favorisieren. Es bleibt abzuwarten, ob die bereits mit Kalziumhydroxidsuspension erzielte hohe Erfolgssicherheit bei der partiellen Pulpotomie nach traumatischer Pulpafreilegung bei Einsatz hydraulischer Kalziumsilikatzemente um einen klinisch relevanten Betrag erhöht werden kann [63].

Obwohl die Bedingungen für die **Vitalerhaltung nach Pulpaexposition im Rahmen der Kariesexkavation** ungünstiger erscheinen als nach traumatischer Exposition, sind dennoch gute Erfolgsraten möglich. Diese liegen bei der indirekten Überkappung bei Verwendung von Kalziumhydroxidpräparaten nach 3 bis 10 Jahren zwischen 62 und 98 % [3,58]. Bezüglich hydraulischer Kalziumsilikatzemente und indirekter Überkappung finden sich derzeit kaum Studien in der Literatur, so dass weitere Untersuchungen diesbezüglich notwendig erscheinen [85]. Klinisch und radiologisch zeigten Zähne nach indirekter Überkappung mit MTA nach 3 Monaten höhere Erfolgsraten als nach Verwendung eines erhärtenden Kalziumsalicylatester-Zements (Dycal, Dentsply Sirona, Konstanz). Nach 6 Monaten relativierte sich dieses Ergebnis allerdings [68].

Die in der Literatur angeführten Erfolgsraten für die direkte Überkappung nach Pulpaexposition im Rahmen der Kariesexkavation schwanken stark [12,56,76]. Unter der Voraussetzung der korrekten Indikationsstellung und technischen Durchführung kann die direkte Überkappung mit Kalziumhydroxid nach 10 Jahren Erfolgsraten von knapp 60 % erreichen [76,110]. Nach Anwendung hydraulischer Kalziumsilikatzemente wie Mineral Trioxide Aggregat (MTA) liegen diese jedoch mit etwa 80 % höher [56,64,71,76].

Für die partielle Pulpotomie nach Kariesexkavation unter Verwendung hydraulischer Kalziumsilikatzemente werden die Erfolgsraten nach 2 Jahren mit 85 – 97 % [23,83,108] und nach 4 Jahren mit knapp 94 % angegeben [74].

Für die vollständige Pulpotomie unter Verwendung hydraulischer Kalziumsilikatzemente liegen die Erfolgsraten nach 1 bis 5 Jahren bei 74 – 100 % [5-7,46,70,81,87,100,107]. Besonders hervorzuheben ist, dass in den erwähnten Studien zur vollständigen Pulpotomie auch Zähne mit der Diagnose irreversible Pulpitis eingeschlossen wurden. Sollten weitere Studien diese ersten Daten auch über längere Zeiträume bestätigen, könnte man zukünftig die Indikation für vitalerhaltende Maßnahmen auf Zähne mit bereits irreversibel geschädigten Pulpaarealen (Diagnose irreversible Pulpitis) erweitern, und im Zuge einer partiellen oder vollständigen

Pulpotomie diese Areale gezielt entfernen um einen Vitalerhalt der verbleibenden Pulpa zu ermöglichen.

Trotz insgesamt günstiger Daten für vitalerhaltende endodontische Maßnahmen nach Pulpaexposition im Rahmen der Kariesexkavation steht mit der selektiven bzw. der zweizeitigen Kariesexkavation eine weitere Behandlungsalternative zur Verfügung, die möglicherweise vergleichbare Erfolge aufweist. Verglichen mit den oben genannten vitalerhaltenden Maßnahmen nach Pulpafreilegung im Zuge der Kariesexkavation liegen die 5-Jahres-Erfolgsraten bei der selektiven Kariesexkavation bei 80 % und bei der schrittweisen Kariesexkavation bei 56 % [73]. Ein klinisch relevanter Unterschied hinsichtlich der Erfolgswahrscheinlichkeit einer Pulpaüberkappung oder Pulpotomie gegenüber der selektiven und auch der schrittweisen Kariesexkavation lässt sich demnach nicht feststellen.

Zum direkten Vergleich der beiden Behandlungsstrategien existiert derzeit lediglich eine klinische Untersuchung, deren 1- und 5-Jahresdaten publiziert wurden [16,17]. In dieser Studie wurde die Prognose der zweizeitigen Exkavation mit der Prognose nach vollständiger Exkavation mit anschließender direkter Überkappung bzw. partieller Pulpotomie verglichen. Während nach zweizeitiger Kariesexkavation eine Vitalerhaltung der Pulpa nach 5 Jahren in 60 % der Fälle möglich war, lag die Prognose nach direkter Überkappung mit 6 % und nach partieller Pulpotomie mit 11 % im gleichen Zeitraum weit unter den Erfolgsraten vitalerhaltender Maßnahmen in den anderen Studien. Als wahrscheinlichste Ursache wird diskutiert, dass in dieser klinischen Studie nach Überkappung bzw. partieller Pulpotomie die Kavität für die ersten 8-10 Wochen lediglich mit einem provisorischen Verschluss statt einer sofortigen definitiven Restauration versehen wurde [16]. Weiterhin sind die fehlende Desinfektion nach Eröffnung der Pulpa sowie die Wahl des Überkappungsmaterials (Dycal) als problematisch anzusehen. Diese Faktoren mögen zu den niedrigen Erfolgsraten in dieser Studie beigetragen haben. Die Daten decken sich nicht mit den Angaben in der restlichen Literatur, die bei korrekter Indikation und Durchführung vitalerhaltenen Maßnahmen eine günstige Prognose bescheinigen.

10. Abschließende Bewertung

Das verbesserte Verständnis des Zusammenspieles von Mikroorganismen und Gewebsantwort hat in den letzten Jahren zur vermehrten Anwendung minimalinvasiver gewebsschonender Behandlungskonzepte in der Zahnerhaltung geführt. In diesem Sinne können vitalerhaltende Maßnahmen körpereigenes Pulpagewebe funktionsfähig erhalten und dessen Ersatz durch ein synthetische Material vermeiden. Bei gegebener Indikation ist die Vitalerhaltung der Pulpa immer anzustreben. Die Einschätzung vitalerhaltender Maßnahmen als unsichere Behandlungsmaßnahme ist nach derzeitigem Kenntnisstand überholt. Unter der Voraussetzung der sorgfältigen Diagnostik und adäquaten Umsetzung aller erforderlichen Behandlungsschritte ist die Prognose vitalerhaltender Maßnahmen als sehr gut einzuschätzen, wodurch die Voraussetzung für den langfristige Zahnerhalt verbessert werden kann.

Eine höhere Erfolgswahrscheinlichkeit der derzeit propagierten selektiven oder schrittweisen Kariesexkavation gegenüber den vitalerhaltenden Maßnahmen nach Freilegung der Pulpa lässt sich nicht feststellen. Es ist Aufgabe zukünftiger, gut geplanter klinischer Studien herauszufinden, welche Vorgehensweise langfristig bessere Voraussetzungen für den Vitalerhalt der Pulpa schafft. Ebenso gilt es zukünftig zu evaluieren, ob auch bei der Diagnosestellung „irreversible Pulpitis“ unter Anwendung einer partiellen oder vollständigen Pulpotomie eine langfristige Vitalerhaltung durch gezielte Entfernung irreversibel geschädigte Areale möglich ist.

Literaturverzeichnis

1. American Association of Endodontists (2015): Glossary of Endodontic Terms. 9th ed.
2. Ahrens G, Reuver J. Eine Nachuntersuchung von direkten Pulpaüberkappungen aus der täglichen zahnärztlichen Praxis. Dtsch Zahnärztl Z 1973; 28: 862-865
3. Akhlaghi N, Khademi A. Outcomes of vital pulp therapy in permanent teeth with different medicaments based on review of the literature. Dent Res J (Isfahan) 2015; 12: 406-417
4. Alqaderi H, Lee CT, Borzangy S, Pagonis TC. Coronal pulpotomy for cariously exposed permanent posterior teeth with closed apices: A systematic review and meta-analysis. J Dent 2016; 44: 1-7
5. Asgary S, Eghbal MJ. Treatment outcomes of pulpotomy in permanent molars with irreversible pulpitis using biomaterials: a multi-center randomized controlled trial. Acta Odontol Scand 2013; 71: 130-136
6. Asgary S, Eghbal MJ, Fazlyab M, Baghban AA, Ghoddusi J. Five-year results of vital pulp therapy in permanent molars with irreversible pulpitis: a non-inferiority multicenter randomized clinical trial. Clin Oral Investig 2015; 19: 335-341
7. Asgary S, Hassanizadeh R, Torabzadeh H, Eghbal MJ. Treatment Outcomes of 4 Vital Pulp Therapies in Mature Molars. J Endod 2018; 44: 529-535
8. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement interfacial interaction: calcium silicates and polyalkenoates. J Dent Res 2012; 91: 454-459
9. Babbush C, Fehrenbach M, M. E. Mosby's dental dictionary. St. Louis: Mosby Elsevier, 2008.
10. Barnes IE, Kidd EA. Disappearing Dycal. Br Dent J 1979; 147: 111
11. Barrieshi-Nusair KM, Qudeimat MA. A prospective clinical study of mineral trioxide aggregate for partial pulpotomy in cariously exposed permanent teeth. J Endod 2006; 32: 731-735
12. Barthel CR, Rosenkranz B, Leuenberg A, Roulet JF. Pulp capping of carious exposures: treatment outcome after 5 and 10 years: a retrospective study. J Endod 2000; 26: 525-528
13. Berger T, Baratz AZ, Gutmann JL. In vitro investigations into the etiology of mineral trioxide tooth staining. J Conserv Dent 2014; 17: 526-530
14. Berzins DW. Chemical properties of MTA. In: (Hrsg) Mineral Trioxide Aggregate. Properties and clinical applications. Ames: Wiley Blackwell Publishing, 2014, 17-36
15. Bimstein E, Rotstein I. Cvek pulpotomy - revisited. Dent Traumatol 2016; 32: 438-442
16. Bjørndal L, Fransson H, Bruun G, et al. Randomized Clinical Trials on Deep Carious Lesions: 5-Year Follow-up. J Dent Res 2017; 96: 747-753
17. Bjørndal L, Reit C, Bruun G, et al. Treatment of deep caries lesions in adults: randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. Eur J Oral Sci 2010;

18. Bogen B, Chandler N. Vital pulp therapy. In: Ingle J, Bakand L, Baumgartner J (Hrsg) Ingle's endodontics. Hamilton: BC Decker, 2008, 1310-1329

19. Buchalla W, Frankenberger R, Galler KM, et al. Aktuelle Empfehlungen zur Kariesexkavation. Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 2017; 72: 484-494

20. Camilleri J. Color stability of white mineral trioxide aggregate in contact with hypochlorite solution. J Endod 2014; 40: 436-440

21. Camilleri J, Laurent P, About I. Hydration of Biodentine, Theracal LC, and a prototype tricalcium silicate-based dentin replacement material after pulp capping in entire tooth cultures. J Endod 2014; 40: 1846-1854

22. Cao Y, Bogen G, Lim J, Shon WJ, Kang MK. Bioceramic Materials and the Changing Concepts in Vital Pulp Therapy. J Calif Dent Assoc 2016; 44: 278-290

23. Chailertvanitkul P, Paphangkorakit J, Sooksantisakoonchai N, et al. Randomized control trial comparing calcium hydroxide and mineral trioxide aggregate for partial pulpotomies in cariously exposed pulps of permanent molars. Int Endod J 2014; 47: 835-842

24. Cohenca N, Paranjpe A, Berg J. Vital pulp therapy. Dent Clin North Am 2013;57:59-73

25. Costa CA, Hebling J, Hanks CT. Current status of pulp capping with dentin adhesive systems: a review. Dent Mater 2000; 16: 188-197

26. Cox CF, Hafez AA, Akimoto N, Otsuki M, Suzuki S, Tarim B. Biocompatibility of primer, adhesive and resin composite systems on non-exposed and exposed pulps of non-human primate teeth. Am J Dent 1998; 11 Spec No:S55-63

27. Cox CF, Keall CL, Keall HJ, Ostro E, Bergenholtz G. Biocompatibility of surface-sealed dental materials against exposed pulps. J Prosthet Dent 1987; 57: 1-8

28. Cox CF, Subay RK, Ostro E, Suzuki S, Suzuki SH. Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp capping. Oper Dent 1996; 21: 4-11

29. Cox CF, Subay RK, Suzuki S, Suzuki SH, Ostro E. Biocompatibility of various dental materials: pulp healing with a surface seal. Int J Periodontics Restorative Dent 1996; 16: 240-251

30. Cvek M. A clinical report on partial pulpotomy and capping with calcium hydroxide in permanent incisors with complicated crown fracture. J Endod. 1978; 4: 232-237

31. Cvek M. Partial pulpotomy in crown-fractured incisors - results 3-15 years after trauma. Acta Stomatol Croat 1993; 27: 167-173

32. Cvek M, Cleaton-Jones PE, Austin JC, Andreasen JO. Pulp reactions to exposure after experimental crown fractures or grinding in adult monkeys. J.Endod. 1982; 8: 391-397

33. Cvek M, Lundberg M. Histological appearance of pulps after exposure by a crown fracture, partial pulpotomy, and clinical diagnosis of healing. J.Endod. 1983; 9: 8-11

34. Dammaschke T, Camp JH, Bogen G. MTA in Vital Pulp Therapy. In: Torabinejad M (Hrsg) Mineral Trioxide Aggregate – Properties and Clinical Applications. Ames: Wiley Blackwell Publishing, 2014, 71-110

35. Dammaschke T, Leidinger J, Schafer E. Long-term evaluation of direct pulp capping--treatment outcomes over an average period of 6.1 years. Clin Oral Investig 2010; 14: 559-567

36. Dammaschke T, Stratmann U, Fischer RJ, Sagheri D, Schafer E. A histologic investigation of direct pulp capping in rodents with dentin adhesives and calcium hydroxide. Quint Int 2010;41:e62-71

37. de Blanco LP. Treatment of crown fractures with pulp exposure. Oral Surg.Oral Med.Oral Pathol.Oral Radiol.Endod. 1996; 82: 564-568

38. Dettwiler CA, Walter M, Zaugg LK, Lenherr P, Weiger R, Krastl G. In vitro assessment of the tooth staining potential of endodontic materials in a bovine tooth model. Dent Traumatol 2016; 32: 480-487

39. Duque C, Hebling J, Smith AJ, Giro EM, Oliveira MF, de Souza Costa CA. Reactionary dentinogenesis after applying restorative materials and bioactive dentin matrix molecules as liners in deep cavities prepared in nonhuman primate teeth. J Oral Rehabil 2006; 33: 452-461

40. European Society of E. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. Int Endod J 2006; 39: 921-930

41. Fong CD, Davis MJ. Partial pulpotomy for immature permanent teeth, its present and future. Pediatr Dent 2002; 24: 29-32

42. Friedman S, Abitbol S, Lawrence HP. Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study. Phase 1: initial treatment. J Endod 2003; 29: 787-793

43. Fuks AB, Bielak S, Chosak A. Clinical and radiographic assessment of direct pulp capping and pulpotomy in young permanent teeth. Pediatr Dent. 1982; 4: 240-244

44. Fuks AB, Cosack A, Klein H, Eidelman E. Partial pulpotomy as a treatment alternative for exposed pulps in crown-fractured permanent incisors. Endod Dent Traumatol. 1987; 3: 100-102

45. Fuss Z, Lustig J, Katz A, Tamse A. An evaluation of endodontically treated vertical root fractured teeth: impact of operative procedures. J Endod 2001; 27: 46-48

46. Galani M, Tewari S, Sangwan P, Mittal S, Kumar V, Duhan J. Comparative Evaluation of Postoperative Pain and Success Rate after Pulpotomy and Root Canal Treatment in Cariously Exposed Mature Permanent Molars: A Randomized Controlled Trial. J Endod 2017; 12: 1953-1962

47. Galler KM, Schweikl H, Hiller KA, et al. TEGDMA reduces mineralization in dental pulp cells. J Dent Res 2011; 90: 257-262

48. Goodis HE, Kahn A, Simon S. Aging and the Pulp. In: Hargreaves K, Goodis HE, Tay F (Hrsg) Seltzer and Bender's Dental Pulp. Berlin: Quintessenz, 2012

49. Goracci G, Mori G. Scanning electron microscopic evaluation of resin-dentin and calcium hydroxide-dentin interface with resin composite restorations. Quintessence Int 1996; 27: 129-135

50. Graham L, Cooper PR, Cassidy N, Nor JE, Sloan AJ, Smith AJ. The effect of calcium hydroxide on solubilisation of bio-active dentine matrix components. Biomaterials 2006; 27: 2865-2873

51. Granath LE, Hagman G. Experimental pulpotomy in human bicuspids with reference to cutting technique. Acta Odontol Scand 1971; 29: 155-163

52. Hebling J, Lessa FC, Nogueira I, Carvalho RM, Costa CA. Cytotoxicity of resin-based light-cured liners. Am J Dent 2009; 22: 137-142

53. Hecova H, Tzigkounakis V, Merglova V, Netolicky J. A retrospective study of 889 injured permanent teeth. Dent Traumatol 2010; 26: 466-475

54. Heide S, Mjor IA. Pulp reactions to experimental exposures in young permanent monkey teeth. Int Endod J 1983; 16: 11-19

55. Hermann B. Ein weiterer Beitrag zur Frage der Pulpenbehandlung. Zahnärztl Rundsch 1928; 37: 1327-1376

56. Hilton TJ, Ferracane JL, Mancl L, Northwest Practice-based Research Collaborative in Evidence-based D. Comparison of CaOH with MTA for direct pulp capping: a PBRN randomized clinical trial. J Dent Res 2013; 92: 16S-22S

57. Hørsted-Bindslev P, Bergenholtz G. Vital pulp therapies. In: Bergenholtz G, Hørsted-Bindslev P, Erik-Reit C (Hrsg) Textbook of endodontology. Oxford: Blackwell Munksgaard, 2003, 66 - 91.

58. Ingle JI, Taintor JF. Endodontics. Philadelphia: Lea&Febiger, 1985

59. Kang CM, Sun Y, Song JS, et al. A randomized controlled trial of various MTA materials for partial pulpotomy in permanent teeth. J Dent 2017; 60: 8-13

60. Kaup M, Dammann CH, Schafer E, Dammaschke T. Shear bond strength of Biodentine, ProRoot MTA, glass ionomer cement and composite resin on human dentine ex vivo. Head Face Med 2015; 11: 14

61. Klimm W. Endodontologie. Grundlagen und Praxis. In: (Hrsg) Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2003; 196-205

62. Krastl G, Allgayer N, Lenherr P, Filippi A, Taneja P, Weiger R. Tooth discoloration induced by endodontic materials: a literature review. Dent Traumatol 2013; 29: 2-7

63. Krastl G, Weiger R. Vital pulp therapy after trauma. Endod Pract Today 2014; 8: 293-300

64. Kundzina R, Stangvaltaite L, Eriksen HM, Kerosuo E. Capping carious exposures in adults: a randomized controlled trial investigating mineral trioxide aggregate versus calcium hydroxide. Int Endod J 2017; 50: 924-932

65. Kunert GG, Kunert IR, da Costa Filho LC, de Figueiredo JAP. Permanent teeth pulpotomy survival analysis: retrospective follow-up. J Dent 2015; 43: 1125-1131

66. Lenherr P, Allgayer N, Weiger R, Filippi A, Attin T, Krastl G. Tooth discoloration induced by endodontic materials: a laboratory study. Int Endod J 2012; 45: 942-949

67. Lertchirakarn V, Palamara JE, Messer HH. Patterns of vertical root fracture: factors affecting stress distribution in the root canal. J Endod 2003; 29: 523-528

68. Leye Benoist F, Gaye Ndiaye F, Kane AW, Benoist HM, Farge P. Evaluation of mineral trioxide aggregate (MTA) versus calcium hydroxide cement (Dycal) in the formation of a dentine bridge: a randomised controlled trial. Int Dent J 2012; 62: 33-39

69. Liard-Dumtschin D, Holz J, Baume LJ. [Direct pulp capping--a biological trial of 8 products]. Schweiz Monatsschr Zahnmed 1984 1984; 94: 4-22

70. Linsuwanont P, Wimonsutthikul K, Pothimoke U, Santiwong B. Treatment Outcomes of Mineral Trioxide Aggregate Pulpotomy in Vital Permanent Teeth with Carious Pulp Exposure: The Retrospective Study. J Endod 2017; 43: 225-230

71. Lipski M, Nowicka A, Kot K, et al. Factors affecting the outcomes of direct pulp capping using Biodentine. Clin Oral Investig 2018; 22: 2021-2029

72. Maeglin B. Zur Behandlung der tiefen Karies mit alkalischen Kalksalzen. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 1955; 10: 727-733

73. Maltz M, Koppe B, Jardim JJ, et al. Partial caries removal in deep caries lesions: a 5-year multicenter randomized controlled trial. Clin Oral Investig 2018; 22: 1337-1343

74. Mass E, Zilberman U. Long-term radiologic pulp evaluation after partial pulpotomy in young permanent molars. Quintessence Int 2011; 42: 547-554

75. Mente J, Geletneky B, Ohle M, et al. Mineral trioxide aggregate or calcium hydroxide direct pulp capping: an analysis of the clinical treatment outcome. J Endod 2010; 36: 806-813

76. Mente J, Hufnagel S, Leo M, et al. Treatment outcome of mineral trioxide aggregate or calcium hydroxide direct pulp capping: long-term results. J Endod 2014; 40: 1746-1751

77. Merdad K, Sonbul H, Bukhary S, Reit C, Birkhed D. Caries susceptibility of endodontically versus nonendodontically treated teeth. J Endod 2011; 37: 139-142

78. Modena KC, Casas-Apayco LC, Atta MT, et al. Cytotoxicity and biocompatibility of direct and indirect pulp capping materials. J Appl Oral Sci 2009; 17: 544-554

79. Mozynska J, Metlerski M, Lipski M, Nowicka A. Tooth Discoloration Induced by Different Calcium Silicate-based Cements: A Systematic Review of In Vitro Studies. J Endod 2017; 43: 1593-1601

80. Murray PE, Stanley HR, Matthews JB, Sloan AJ, Smith AJ. Age-related odontometric changes of human teeth. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2002; 93: 474-482

81. Nosrat A, Seifi A, Asgary S. Pulpotomy in caries-exposed immature permanent molars using calcium-enriched mixture cement or mineral trioxide aggregate: a randomized clinical trial. Int J Paediatr Dent 2013; 23: 56-63

82. Orstavik D, Pitt Ford T. Essential Endodontology: Prevention and Treatment of Apical Periodontitis. Oxford: Wiley-Blackwell, 2007

83. Ozgur B, Uysal S, Gungor HC. Partial Pulpotomy in Immature Permanent Molars After Carious Exposures Using Different Hemorrhage Control and Capping Materials. Pediatr Dent 2017; 39: 364-370

84. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. J Endod 2010; 36: 16-27

85. Parirokh M, Torabinejad M, Dummer PMH. Mineral trioxide aggregate and other bioactive endodontic cements: an updated overview - part I: vital pulp therapy. Int Endod J 2018; 51: 177-205

86. Phaneuf RA, Frankl SN, Ruben MP. A comparative histological evaluation of three calcium hydroxide preparations on the human primary dental pulp. J Dent Child 1968; 35: 61-76

87. Qudeimat MA, Alyahya A, Hasan AA. Mineral trioxide aggregate pulpotomy for permanent molars with clinical signs indicative of irreversible pulpitis: a preliminary study. Int Endod J 2017; 50: 126-134

88. Qudeimat MA, Barrieshi-Nusair KM, Owais AI. Calcium hydroxide vs mineral trioxide aggregates for partial pulpotomy of permanent molars with deep caries. Eur Arch Paediatr Dent 2007; 8: 99-104

89. Randow K, Glantz PO. On cantilever loading of vital and non-vital teeth. An experimental clinical study. Acta Odontol.Scand. 1986; 44: 271-277

90. Ravn JJ. Follow-up study of permanent incisors with complicated crown fractures after acute trauma. Scand.J.Dent.Res. 1982; 90: 363-372

91. Ricucci D, Loghin S, Lin LM, Spangberg LS, Tay FR. Is hard tissue formation in the dental pulp after the death of the primary odontoblasts a regenerative or a reparative process? J Dent 2014; 42: 1156-1170

92. Ricucci D, Loghin S, Siqueira JF, Jr. Correlation between clinical and histologic pulp diagnoses. J Endod 2014; 40: 1932-1939

93. Ricucci D, Siqueira JF, Jr. Vital pulp therapy. In: Ricucci D, Siqueira JF, Jr. (Hrsg) Endodontology – an integrated biological and clinical view. London: Quintessence, 2013, 67-106

94. Robertson A, Andreasen FM, Andreasen JO, Noren JG. Long-term prognosis of crown-fractured permanent incisors. The effect of stage of root development and associated luxation injury. Int J Paediatr Dent 2000; 10: 191-199

95. Rosenfeld EF, James GA, Burch BS. Vital pulp tissue response to sodium hypochlorite. J Endod 1978; 4: 140-146

96. Schäfer E, Hickel R, Geurtsen W, et al. Offizielles Endodontologisches Lexikon - mit einem Anhang für Materialien und Instrumente - der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung. Endodontie 2000 2: 129-1660

97. Schuurs AH, Gruythuysen RJ, Wesselink PR. Pulp capping with adhesive resin-based composite vs. calcium hydroxide: a review. Endod Dent Traumatol 2000; 16: 240-250

98. Schwendicke F, Stolpe M. Direct pulp capping after a carious exposure versus root canal treatment: a cost-effectiveness analysis. J Endod 2014; 40: 1764-1770

99. Shokouhinejad N, Nekoofar MH, Pirmoazen S, Shamshiri AR, Dummer PM. Evaluation and Comparison of Occurrence of Tooth Discoloration after the Application of Various Calcium Silicate-based Cements: An Ex Vivo Study. J Endod 2016; 42: 140-144

100. Simon S, Perard M, Zanini M, et al. Should pulp chamber pulpotomy be seen as a permanent treatment? Some preliminary thoughts. Int Endod J 2013; 46: 79-87

101. Smith AJ. Formation and repair of dentin in the adult. In: Hargreaves K, Goodis H, Tay F (Hrsg) Seltzer and Bender´s Dental Pulp. Chicago: Quintessence Publishing 2012, 27-46

102. Smith AJ, Cassidy N, Perry H, Begue-Kirn C, Ruch JV, Lesot H. Reactionary dentinogenesis. Int J Dev Biol 1995; 39: 273-280

103. Staehle HJ. Calciumhydroxid in der Zahnheilkunde. München: Hanser, 1990.

104. Staehle HJ. Cp-Behandlung/Versorgung pulpanahen Dentins. Stellungnahme der DGZMK. . Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 1998; 53

105. Staehle HJ, Pioch T. Zur alkalisierenden Wirkung von kalziumhaltigen Präparaten. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 1988; 43: 308-312

106. Subramaniam P, Konde S, Prashanth P. An in vitro evaluation of pH variations in calcium hydroxide liners. J Indian Soc Pedod Prev Dent 2006; 24: 144-145

107. Taha NA, Ahmad MB, Ghanim A. Assessment of Mineral Trioxide Aggregate pulpotomy in mature permanent teeth with carious exposures. Int Endod J 2017; 50: 117-125

108. Taha NA, Khazali MA. Partial Pulpotomy in Mature Permanent Teeth with Clinical Signs Indicative of Irreversible Pulpitis: A Randomized Clinical Trial. J Endod 2017; 43: 1417-1421

109. Wang G, Wang C, Qin M. Pulp prognosis following conservative pulp treatment in teeth with complicated crown fractures-A retrospective study. Dent Traumatol 2017; 33: 255-260

110. Willershausen B, Willershausen I, Ross A, Velikonja S, Kasaj A, Blettner M. Retrospective study on direct pulp capping with calcium hydroxide. Quint Int 2011; 42: 165-171

111. Zanini M, Sautier JM, Berdal A, Simon S. Biodentine induces immortalized murine pulp cell differentiation into odontoblast-like cells and stimulates biomineralization. J Endod 2012; 38: 1220-1226