

Till Damaschke, Kerstin Galler, Gabriel Krastl

Aktuelle Empfehlungen zur Vitalerhaltung der Pulpa

Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Endodontologie und zahnärztliche Traumatologie (DGET)



Einleitung

Definition und Ziele vitalerhaltender Maßnahmen

In den letzten Jahren ist das Thema Vitalerhaltung wieder zunehmend in das 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 vermeiden¹. 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 Füll-

lungsmaterialien) 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 vitalerhaltenden Maßnahmen ist es, bei vorgeschädigter Pulpa eine Situation zu schaffen, die die Ausbildung einer Hartgewebebarriere und eine Ausheilung des Gewebes ermöglicht, dieses funktionstüchtig erhält und somit langfristig den Verbleib eines vitalen Zahns in der Mundhöhle gewährleistet.

Funktion und Funktionsverlust des Pulpagewebes

Zu den wesentlichen Funktionen der Zahnpulpa gehören die Dentinbildung während der Zahnentwicklung sowie über die gesamte Lebensdauer des Zahns, die Reizweiterleitung über Proprio- und Schmerzrezeptoren. Außerdem besitzt die Pulpa eine Immunfunktion, um vor eindringenden Bakterien und deren Stoffwechselprodukten zu schützen. Sie bildet einen Abwehrmechanismus in Form von Reiz- oder Reparaturdentin gegen externe Stimuli aus. Bei jugendlichen Zähnen bildet sie die Wurzelpulpa und Wurzeldentin aus und schließt das Wurzelwachstum ab.

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 fünf Jahren erreicht werden können², 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 × höhere Belastung als ein vitaler Zahn zulässt, bevor eine propriozeptive Reaktion erfolgt³. 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^{4,5}. Weitere mögliche Probleme, die im Rahmen der Wurzelkanalbehandlung auftreten können, sind Zahnverfärbungen⁶ sowie eine erhöhte Kariesanfälligkeit, bedingt durch eine erhöhte Plaqueanlagerung und veränderte Mikroflora⁷ 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^{8,9}.

Indikation zur Vitalerhaltung

Das Eindringen von Mikroorganismen sowie deren Stoffwechselprodukte setzt einen Reiz, der zur Entstehung einer Entzündungsreaktion in der Pulpa führt. Vermittelt über Zellrezeptoren auf Odontoblasten, dendritische 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 charakterisiert¹⁰. 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 Gewebnekrosen, die von polymorphkernigen neutrophilen Granulozyten gesäumt sind, in der Peripherie finden sich entzündliche Infiltrate¹⁰. 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 Zahns von Seiten des Patienten. Irreversible Pulpitiden können jedoch auch asymptomatisch verlaufen¹¹. Vitalerhaltende Maßnahmen sind nur indiziert, wenn klinisch die Diagnose der reversiblen Pulpitis gestellt wird. Nach derzeitiger Lehrmeinung kann im Fall 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 Diagnosedstellung korrelieren¹⁰, soll hier erwähnt werden, dass die klinische Einteilung des Beschwerdebilds 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. Nachzeitigem Kenntnisstand sollen vitalerhaltende Maßnahmen nur an Zähnen durchgeführt werden, die keine ausgeprägte Schmerzsymptomatik aufweisen (re-



versible 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. Aufbissemempfindlichkeit, 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 gehört 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, sollte einer Wurzelkanalbehandlung (oder der Extraktion) der Vorzug gegeben werden.

Günstige Voraussetzungen für die Vitalerhaltung sind bei einer jungen Pulpa ohne Vorschädigung gegeben¹². Mit zunehmendem Alter ist mit einer reduzierten Regenerationsfähigkeit durch Pulpaveränderungen im Sinne einer zellärmeren und faserreicheren Pulpa zu rechnen^{13,14}. Trotzdem scheint das Patientenalter nur eine untergeordnete Rolle in Hinblick auf den Behandlungserfolg zu spielen¹⁵⁻²⁴. Gleiches gilt für Faktoren wie Zahnposition sowie Größe oder Lage der Pulpafreilegung²⁵.

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 eine irreversible Pulpitis und Pulpanekrosen entwickeln können, was zu postoperativen Schmerzen führen kann.

Indirekte Überkappung

Im deutschen Sprachgebrauch bezeichnet die indirekte Überkappung die medikamentöse Versorgung einer dünnen, pulpanah verbliebenen Schicht kariesfreien Dentins²⁶. Klinisch entsteht diese Situation zumeist bei der Exkavation einer tiefen Karies, sodass 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 2. Sitzung vollständig exkaviert wird^{27,28}. 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 werden²⁹. Diese Form des Tertiärdentins bezeichnet man auch als Reaktions- oder Reizdentin. Reaktionsdentin wird definitionsgemäß durch überlebende postmitotische primäre Odontoblasten gebildet³⁰. 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 Pulpahheilung 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 fehlt¹.

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 bis 5 %) oder Chlorhexidindigluconat (CHX; 2 %) zu desinfizieren.

Mikroorganismen und somit jeder sich in Richtung Pulpa ausbreitende kariöse Prozess stellen eine Gefährdung der Pulpa dar³¹. Daher sollte während der Kariesexkavation die Anzahl an Mikroorganismen in der Kavität und in Pulpanähe, soweit möglich, reduziert werden. Die Frage, wieviel verändertes Dentin belassen werden kann, um noch eine Ausheilung der Pulpa zu ermöglichen, ist derzeit nicht eindeutig geklärt¹.

Nach erfolgter Exkavation ist die Kavität mit NaOCl oder CHX und Wasserspray zu reinigen^{32,33}. Eine Schädigung des vitalen Pulpagewebes bei Anwendung von NaOCl muss nicht befürchtet werden³⁴. 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 anregen³⁵. Klassischerweise wird dafür seit den 1930er Jahren Kalziumhydroxid empfohlen³⁶. Aufgrund der Nachteile von wässrigen Kalziumhydroxidsuspensionen ist heutzutage die Verwendung von hydraulischen Kalziumsilikatzementen auch bei der indirekten Überkappung möglicherweise die bessere Alternative³⁷. 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 werden²⁹.

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 entsteht²⁹.

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^{19,38}.

Partielle Pulpotomie

Bei der partiellen Pulpotomie wird die Kronenpulpa von der exponierten Stelle ausgehend um



ca. 2 mm reduziert um potenziell entzündete und irreversibel geschädigte Pulpaanteile zu entfernen und die Restpulpa vital zu erhalten³⁹. Die partielle Pulpotomie wird vorzugsweise mit einem kleinen Präparationsdiamanten durchgeführt⁴⁰. Dabei werden die koronalen 2 mm der Pulpa hochtourig, idealerweise unter kontinuierlicher Spülung mit physiologischer Kochsalzlösung entfernt²⁷. Aus Gründen der Praktikabilität wird die Pulpaamputation allerdings häufig unter Wasserkühlung mit einem Winkelstück durchgeführt⁴¹. 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 Blutkoagulum verhindert wird, sind die gleichen Reparaturmechanismen der Pulpa wie bei der direkten Überkappung zu erwarten^{17,42}. Ist die verbliebene Pulpa gesund, ist mit einem Sistieren der Blutung innerhalb von fünf 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 diesem Fall kann eine vollständige Pulpotomie, also die Entfernung der gesamten Kronenpulpa, als letztmögliche vitalerhaltende Maßnahme in Erwägung gezogen werden³⁸.

Auf die artifiziell freigelegte Pulpaoberfläche wird eine Kalziumhydroxid-Suspension oder ein hydraulischer Kalziumsilikatzement aufgebracht und lokal mit einem erhärtenden Material dünn überschichtet⁴². 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 einzustufen³⁸. Die bakterien-dichte Restauration schließt sich an.

Vollständige Pulpotomie

Bei der vollständigen Pulpotomie wird die komplette Kronenpulpa entfernt und die zu erhaltende Wurzelpulpa anschließend auf Höhe der Kanalein-

gänge überkappt. Das weitere Vorgehen erfolgt analog zur partiellen Pulpotomie. Eine bakterien-dichte definitive Restauration schließt sich an³⁸.

Überkappungsmaterialien

Kalziumhydroxidhaltige 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 Wachstumsfaktoren⁴³. Kalziumhydroxid unterstützt somit die Hartgewebekonstruktion und Ausheilung der Pulpa^{44,45}. Nachteile sind in der mechanischen Instabilität sowie der Resorption des Materials über die Zeit zu sehen^{46,47}. Auch werden nach Kalziumhydroxid-Applikation im Reparaturdentin Porositäten („Tunneldefekte“) beobachtet, die als Eintrittspforten für Mikroorganismen dienen können⁴⁸. Der hohe pH-Wert wässriger Kalziumhydroxid-Suspensionen führt in direktem Gewebekontakt zur Liquefaktionsnekrose⁴⁹. Kalziumhydroxid sollte nur kleinflächig im Bereich der Pulpa freilegung bzw. im pulpanahen Bereich der Kavität aufgetragen werden^{46,49,50}. 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 auf⁵¹, eine kontinuierliche Desintegration unter der Hauptfüllung⁴⁶, sie induzieren eine langsamere und weniger dichte Hartgewebekonstruktion⁵² und einige Zusätze, die die Erhärtung des Materials bedingen, wirken möglicherweise pulpatoxisch⁵³.

Auch neuere, lichterhärtende Liner und Zemente mit Kalziumhydroxid- bzw. MTA-Zusatz (Produktbeispiele: Ultrablend Plus, Fa. Ultradent, South Jordan, USA; Calcimol LC, Fa. VOCO, Cuxhaven oder TheraCal LC, Fa. Bisco, Schaumburg, USA) sind kritisch zu sehen. Den Produkten fehlt die spezifische Bioaktivität auslösende Kalziumhydroxidwirkung^{54,55}. Eindeutig nachgewiesen ist eine



Zytotoxizität dieser Produkte, die auf den Monomeranteil zurückzuführen ist⁵⁶. Nach derzeitiger Datenlage ist von einer Überkappung der Pulpa mit lichtpolymerisierbaren kalziumhydroxid- oder kalziumsilikathaltigen Materialien abzuraten.

Dentinadhäsive und Komposite

Zwischenzeitlich wurde die Verwendung von Dentinadhäsiven als Überkappungsmaterialien propagiert^{57–59}, dem Gedanken folgend, dass der bakteriendichte Verschluss ausschlaggebend für den Erfolg vitalerhaltender Maßnahmen sei^{37,60}. Jedoch weisen Dentinadhäsive aufgrund der enthaltenen Monomere eine toxische Wirkung auf^{61,62}, die pulpanah durch die feuchtigkeitsbedingte unvollständige Polymerisation weitgehend bestehen bleibt⁶³. Auch wurde Bestandteilen von Dentinadhäsiven ein mineralisationshemmender Effekt auf Pulpazellen nachgewiesen⁶⁴. Dentinadhäsive und Komposite sind grundsätzlich nicht biokompatibel⁶¹ und daher als Überkappungsmaterial abzulehnen³⁷.

Hydraulische Zemente auf Kalziumsilikatbasis

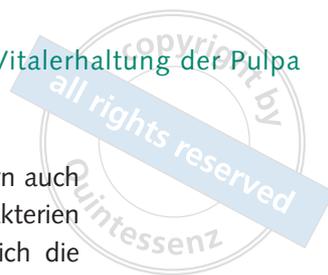
Mit der Einführung hydraulischer Kalziumsilikatzemente, wie Mineral Trioxid Aggregat (MTA), wird wässriges Kalziumhydroxid mittlerweile nicht mehr als Mittel der ersten Wahl zur Vitalerhaltung der Pulpa angesehen^{33,37}. Hydraulische Kalziumsilikatzemente sind werkstoffkundlich ähnlich den aus der Bauindustrie bekannten Portlandzementen. Sie werden als „hydraulisch“ bezeichnet, da sie sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärten und beständig sind⁶⁵. Kalziumsilikatzemente bestehen hauptsächlich aus Di- und Trikalziumsilikat und werden mit Wasser angemischt. Bei der Reaktion und der anschließenden Aushärtung wird über einen längeren Zeitraum Kalziumhydroxid freigesetzt⁶⁵, wodurch sich die anhaltenden antibakteriellen Eigenschaften erklären⁶⁶. Hydraulische Kalziumsilikatzemente sind biokompatibel und fördern die Hartgewebsbildung von Pulpazellen⁶⁷. Mineralanteile aus dem Zement interagieren mit dem Dentin⁶⁸, wodurch

sich eine Dentinhaftung ähnlich der von Glasionomerzementen ergibt⁶⁹. Der Vorteil im Vergleich zu Kalziumhydroxid-Produkten liegt in der höheren mechanischen Festigkeit, der geringeren Löslichkeit und dem dichteren Verschluss⁷⁰. 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^{37,71–73}.

Hydraulische Kalziumsilikatzemente können zu Verfärbungen der Zahnhartsubstanz führen, was besonders bei Frontzähnen, z. B. nach Trauma, problematisch sein kann⁷⁴. Ursächlich sind enthaltene Schwermetalle wie z. B. Bismuthoxid als Röntgenkontrastmittel^{75,76} oder auch Eisen⁷⁷. Dabei spielen v.a. die Oxidation dieser Metalle nach Kontakt mit Natriumhypochlorit oder die Aufnahme von Blutbestandteilen eine Rolle^{77–79}. 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 enthalten⁷³. So konnten unlängst Lipski et al. 18 Monate nach direkter Überkappung mit solch einem Zement in keinem Fall eine gräuliche Verfärbung der Zähne feststellen⁸⁰. In Anwesenheit von Blut wurden allerdings auch für diese Materialien in vitro Verfärbungen nachgewiesen⁷⁷. 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 sein⁷⁴.

Vitalerhaltung nach traumabedingter Pulpaexposition

Die Exposition der Pulpa nach Zahntrauma bietet in den meisten Fällen eine 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 blieben⁸¹. 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 kann⁸². Zu berücksichtigen ist, dass bei begleitender Dislokationsverletzung des frakturierten Zahns die Durchblutung und damit die Abwehrfähigkeit der Pulpa kompromittiert sein kann⁸³.

Vitalerhaltung nach kariesbedingter Pulpaexposition

Im Vergleich zu Zähnen mit traumatischer Schädigung ist nach kariöser Exposition stets eine Vor-schädigung 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, Keimpektrum 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 erhöhen³². Allerdings muss für Kalziumhydroxid beachtet werden, dass es bei großflächiger Applikation ggf. zu Desintegration und mechanischer Instabilität kommen kann^{46,47}. 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.

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 ist⁸⁴. 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 drei, sechs und zwölf Monaten, danach jährlich. Es eignet sich ein thermischer Sensibilitätstest mit Kältespray oder CO₂-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 empfohlen⁸⁵. Hierbei ist zu beachten, dass sich eine mögliche Hartsubstanzneubildung im Bereich der Eröffnungsstelle bzw. der Amputati-



onsstelle nicht eindeutig beurteilen lässt. Auch einer geringfügigen Verbreiterung des Parodontalspalts muss keine pathologische Bedeutung zukommen⁸⁶.

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 dar²⁵.

Die zur Verfügung stehenden Studien legen nahe, dass nach partieller Pulpotomie nicht mit einem höheren Risiko für Obliterationen des Wurzelkanals zu rechnen ist^{22,87–89}. 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^{90–92}, treten partielle Obliterationen in 30 % der Fälle nach einer mittleren Beobachtungszeit von drei Jahren und in knapp 40 % der Fälle nach einer mittleren Beobachtungszeit von 4,8 Jahren auf²³.

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 % bis 90 % angegeben^{93–95}. Die partielle Pulpotomie mit dem gleichen Material weist mit 86 % bis 100 % eine höhere Erfolgssicherheit auf^{12,15,16,18,95–97} 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

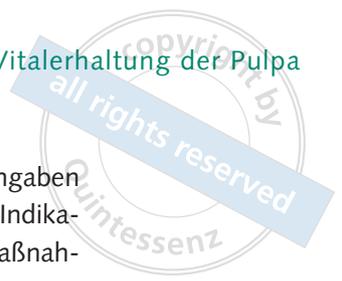
einen klinisch relevanten Betrag erhöht werden kann³⁸.

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 drei bis zehn Jahren zwischen 62 % und 98 %^{37,98}. Bezüglich hydraulischer Kalziumsilikatzemente und indirekter Überkappung finden sich derzeit kaum Studien in der Literatur, sodass weitere Untersuchungen diesbezüglich notwendig erscheinen⁹⁹. Klinisch und radiologisch zeigten Zähne nach indirekter Überkappung mit MTA nach drei Monaten höhere Erfolgsraten als nach Verwendung eines erhärtenden Kalziumsalicylatester-Zements (Dycal, Fa. Dentsply Sirona, Konstanz). Nach sechs Monaten relativierte sich dieses Ergebnis allerdings¹⁰⁰.

Die in der Literatur angeführten Erfolgsraten für die direkte Überkappung nach Pulpaexposition im Rahmen der Kariesexkavation schwanken stark^{71,72,101}. Unter der Voraussetzung der korrekten Indikationsstellung und technischen Durchführung kann die direkte Überkappung mit Kalziumhydroxid nach zehn Jahren Erfolgsraten von knapp 60 % erreichen^{72,102}. Nach Anwendung hydraulischer Kalziumsilikatzemente wie Mineral Trioxide Aggregat (MTA) liegen diese jedoch mit etwa 80 % höher^{71–73,80}.

Für die partielle Pulpotomie nach Kariesexkavation unter Verwendung hydraulischer Kalziumsilikatzemente werden die Erfolgsraten nach zwei Jahren mit 85 % bis 97 %^{103–105} und nach vier Jahren mit knapp 94 % angegeben⁸⁹.

Für die vollständige Pulpotomie unter Verwendung hydraulischer Kalziumsilikatzemente liegen die Erfolgsraten nach ein bis fünf Jahren bei 74 % bis 100 %^{20,23,24,90–92,106–108}. 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 geschä-



digten 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. 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 Fünf-Jahres-Erfolgsraten bei der selektiven Kariesexkavation bei 80 % und bei der schrittweisen Kariesexkavation bei 56 %¹⁰⁹. 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 Ein- und Fünf-Jahresdaten publiziert wurden^{110,111}. 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 fünf 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 anderen Studien. Als wahrscheinlichste Ursache wird diskutiert, dass in dieser klinischen Studie nach Überkappung bzw. partieller Pulpotomie die Kavität für die ersten acht bis zehn Wochen lediglich mit einem provisorischen Verschluss statt einer sofortigen definitiven Restauration versehen wurde¹¹¹. 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 ha-

ben. Die Daten decken sich nicht mit den Angaben in der restlichen Literatur, die bei korrekter Indikation und Durchführung vitalerhaltender Maßnahmen eine günstige Prognose bescheinigen.

Abschließende Bewertung

Das verbesserte Verständnis des Zusammenspiels von Mikroorganismen und Gewebeantwort hat in den letzten Jahren zur vermehrten Anwendung minimalinvasiver gewebeschonender Behandlungskonzepte in der Zahnerhaltung geführt. In diesem Sinne können vitalerhaltende Maßnahmen körpereigenes Pulpagewebe funktionsfähig erhalten und dessen Ersatz durch ein synthetisches Material vermeiden. Bei gegebener Indikation ist die Vitalerhaltung der Pulpa immer anzustreben. Die Einschätzung vitalerhaltender Maßnahmen als unsichere Behandlungsmaßnahmen 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 geschädigter Areale möglich ist.

Interessenkonflikte

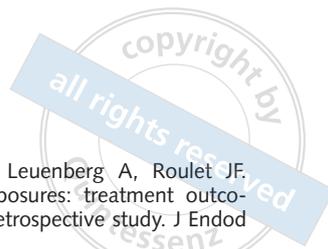
Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.



Literatur

1. Buchalla W, Frankenberger R, Galler KM et al. Aktuelle Empfehlungen zur Kariesexkavation. Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). *Dtsch Zahnärztl Z* 2017;72:484–494.
2. Friedman S, Abitbol S, Lawrence HP. Treatment outcome in endodontics: the Toronto Study. Phase 1: initial treatment. *J Endod* 2003;29:787–793.
3. Randow K, Glantz PO. On cantilever loading of vital and non-vital teeth. An experimental clinical study. *Acta Odontol Scand* 1986;44:271–277.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Merdad K, Sonbul H, Bukhary S, Reit C, Birkhed D. Caries susceptibility of endodontically versus non-endodontically treated teeth. *J Endod* 2011;37:139–142.
8. Hørsted-Bindslev P, Bergenholtz G. Vital pulp therapies. In: Bergenholtz G, Hørsted-Bindslev P, Erik-Reit C (eds). *Textbook of Endodontology*. Oxford: Blackwell Munksgaard Publishing, 2003:66–91.
9. 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.
10. Ricucci D, Loghin S, Siqueira JF jr. Correlation between clinical and histologic pulp diagnoses. *J Endod* 2014;40:1932–1939.
11. American Association of Endodontists. *Glossary of endodontic terms*. 9. ed., St. Louis: Mosby Elsevier Publishing, 2015.
12. 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.
13. 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.
14. Goodis HE, Kahn A, Simon S. Aging and the pulp. In: Hargreaves K, Goodis HE, Tay F (eds.). *Seltzer and Bender's dental pulp*. 2. ed., Hanover Park: Quintessence Publishing, 2012:421–446.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. de Blanco LP. Treatment of crown fractures with pulp exposure. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996;82:564–568.
19. 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.
20. Asgary S, Eghbal MJ, Fazlyab M, Baghban AA, Ghodousi 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Dammaschke T, Leidinger J, Schäfer 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.
26. 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;9:129–160.
27. European Society of Endodontology. *Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology*. *Int Endod J* 2006;39:921–930.
28. Babbush CA, Fehrenbach MJ, Emmons M (eds.). *Mosby's dental dictionary*. 2. ed., St. Louis: Mosby Elsevier Publishing, 2008.
29. Ricucci D, Loghin S, Lin LM, Spångberg 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.
30. Smith AJ. Formation and repair of dentin in the adult. In: Hargreaves K, Goodis H, Tay F (eds.). *Seltzer and Bender's dental pulp*. 2. ed., Hanover Park: Quintessence Publishing, 2012:27–46.
31. Ricucci D, Siqueira JF jr. *Vital pulp therapy*. In: Ricucci D, Siqueira JF jr. (eds). *Endodontology – an integrated biological and clinical view*. London: Quintessence Publishing, 2013:67–106.
32. Bogen B, Chandler N. *Vital pulp therapy*. In: Ingle J, Bakand L, Baumgartner J (eds.) *Ingle's endodontics*. 6. ed., Hamilton: BC Decker Publishing, 2008:1310–1329.
33. 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.
34. Rosenfeld EF, James GA, Burch BS. Vital pulp tissue response to sodium hypochlorite. *J Endod* 1978;4:140–146.
35. Maeglin B. Zur Behandlung der tiefen Karies mit alkalischen Kalksalzen. *Dtsch Zahnärztl Z* 1955;10:727–733.
36. Hermann B. Ein weiterer Beitrag zur Frage der Pulpenbehandlung. *Zahnärztl Rundsch* 1928;37:1327–1376.
37. 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.
38. Krastl G, Weiger R. *Vital pulp therapy after trauma*. *ENDO – Endod Pract Today (London)* 2014;8:293–300.
39. Bimstein E, Rotstein I. Cvek pulpotomy – revisited. *Dent Traumatol* 2016;32:438–442.
40. Granath LE, Hagman G. Experimental pulpotomy in human bicuspid with reference to cutting technique. *Acta Odontol Scand* 1971;29:155–163.
41. Fong CD, Davis MJ. Partial pulpotomy for immature permanent teeth, its present and future. *Pediatr Dent* 2002;24:29–32.
42. Cohenca N, Paranjpe A, Berg J. *Vital pulp therapy*. *Dent Clin North Am* 2013;57:59–73.
43. 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.
44. Duque C, Hebling J, Smith AJ, Giro EM, Oliveira MF, Costa CAS. 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.

45. Smith AJ, Cassidy N, Perry H, Begue-Kirn C, Ruch JV, Lesot H. Reactionary dentinogenesis. *Int J Dev Biol* 1995;39:273–280.
46. Barnes IE, Kidd EA. Disappearing Dycal. *Br Dent J* 1979;147:111.
47. 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.
48. Cox CF, Sübay RK, Ostro E, Suzuki S, Suzuki SH. Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp capping. *Oper Dent* 1996;21:4–11.
49. Staehle HJ. Calciumhydroxid in der Zahnheilkunde. München: Hanser Verlag, 1990.
50. Staehle HJ. Cp-Behandlung/Versorgung pulpanaher Dentins. Stellungnahme der DGZMK. *Dtsch Zahnärztl Z* 1998;53.
51. Staehle HJ, Pioch T. Zur alkalisierenden Wirkung von kalziumhaltigen Präparaten. *Dtsch Zahnärztl Z* 1988;43:308–312.
52. 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.
53. Liard-Dumtschin D, Holz J, Baume LJ. Le coiffage pulpaire direct – essai biologique sur 8 produits. *Schweiz Monatschr Zahnmed* 1984;94:4–22.
54. 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.
55. 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.
56. Hebling J, Lessa FC, Nogueira I, Carvalho RM, Costa CAS. Cytotoxicity of resin-based light-cured liners. *Am J Dent* 2009;22:137–142.
57. Cox CF, Keall CL, Keall HJ, Ostro E, Bergenholtz G. Biocompatibility of surface-sealed dental materials against ex-exposed pulps. *J Prosthet Dent* 1987;57:1–8.
58. Cox CF, Sübay RK, Suzuki S, Suzuki SH, Ostro E. Biocompatibility of various dental materials: pulp healing with a surface seal. *Int J Period Rest Dent* 1996;16:240–251.
59. 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):55–63.
60. Schuur AH, Gruythuysen RJ, Wesselink PR. Pulp capping with adhesive resin-based composite vs. calcium hydroxide: a review. *Endod Dent Traumatol* 2000;16:240–250.
61. Costa CAS, Hebling J, Hanks CT. Current status of pulp capping with dentin adhesive systems: a review. *Dent Mater* 2000;16:188–197.
62. Dammaschke T, Stratmann U, Fischer RJ, Sagheri D, Schäfer E. A histologic investigation of direct pulp capping in rodents with dentin adhesives and calcium hydroxide. *Quint Int* 2010;41:e62–e71.
63. 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.
64. Galler KM, Schweißl H, Hiller KA et al. TEGDMA reduces mineralization in dental pulp cells. *J Dent Res* 2011;90:257–262.
65. Berzins DW. Chemical properties of MTA. In: Torabinejad M (ed). *Mineral trioxide aggregate. Properties and clinical applications*. Ames: Wiley Blackwell Publishing, 2014:17–36.
66. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review – part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *J Endod* 2010;36:16–27.
67. 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.
68. 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.
69. Kaup M, Dammann CH, Schäfer 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.
70. Dammaschke T, Camp JH, Bogen G. MTA in Vital Pulp Therapy. In: Torabinejad M (ed.). *Mineral trioxide aggregate – properties and clinical applications*. Ames: Wiley Blackwell Publishing, 2014:71–110.
71. Hilton TJ, Ferracane JL, Mancl L, Northwest Practice-based Research Collaborative in Evidence-based Dentistry (NWP). Comparison of CaOH with MTA for direct pulp capping: a PBRN randomized clinical trial. *J Dent Res* 2013;92(7 Suppl):165–225.
72. 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.
73. 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.
74. Mozyńska 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.
75. Berger T, Baratz AZ, Gutmann JL. In vitro investigations into the etiology of mineral trioxide tooth staining. *J Conserv Dent* 2014;17:526–530.
76. 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.
77. Shokouhinejad N, Nekoofoar MH, Pirmoazen S, Shamshiri AR, Dummer PMH. 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.
78. 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.
79. Camilleri J. Color stability of white mineral trioxide aggregate in contact with hypochlorite solution. *J Endod* 2014;40:436–440.
80. 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.
81. 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.
82. Heide S, Mjör IA. Pulp reactions to experimental exposures in young permanent monkey teeth. *Int Endod J* 1983;16:11–19.
83. 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.
84. Ørstavik D, Pitt Ford T. *Essential endodontology: prevention and treatment of apical periodontitis*. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing, 2007.
85. Klimm W. *Endodontologie. Grundlagen und Praxis*. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2003:196–205.
86. Ahrens G, Reuver J. Eine Nachuntersuchung von direkten Pulpaüberkappungen aus der täglichen zahnärztlichen Praxis. *Dtsch Zahnärztl Z* 1973;28:862–865.
87. 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.
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. Mass E, Zilberman U. Long-term radiologic pulp evaluation after partial pulpotomy in young permanent molars. *Quintessence Int* 2011;42:547–554.
90. Asgary S, Eghbal MJ. Treatment outcomes of pulpotomy in permanent molars with irreversible pulpitis using bio-materials: a multi-center randomized controlled trial. *Acta Odontol Scand* 2013;71:130–136.
91. 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.
92. 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.
93. 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.
94. Ravn JJ. Follow-up study of permanent incisors with complicated crown fractures after acute trauma. *Scand J Dent Res* 1982;90:363–372.
95. Hecova H, Tzigkounakis V, Merglova V, Netolicky J. A retrospective study of 889 injured permanent teeth. *Dent Traumatol* 2010;26:466–475.
96. Cvek M. Partial pulpotomy in crown-fractured incisors – results 3–15 years after trauma. *Acta Stomatol Croat* 1993;27:167–173.
97. 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.
98. Ingle JJ, Taintor JF. *Endodontics*. Philadelphia: Lea & Febiger Publishing, 1985.
99. 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.
100. 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 randomized controlled trial. *Int Dent J* 2012;62:33–39.
101. 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.
102. Willershausen B, Willershausen I, Ross A, Velikonja S, Kasaj A, Blettner M. Retrospective study on direct pulp capping with calcium hydroxide. *Quintessence Int* 2011;42:165–171.
103. 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.
104. Özgür B, Uysal S, Güngör HC. Partial pulpotomy in immature permanent molars after carious exposures using different hemorrhage control and capping materials. *Pediatr Dent* 2017;39:364–370.
105. 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.
106. 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.
107. 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.
108. Asgary S, Hassanizadeh R, Torabzadeh H, Eghbal MJ. Treatment outcomes of 4 vital pulp therapies in mature molars. *J Endod* 2018;44:529–535.
109. 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.
110. 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;118:290–297.
111. 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.



Till Dammaschke
 Prof. Dr. med. dent.
 Poliklinik für Parodontologie und
 Zahnerhaltung
 Universitätsklinikum Münster
 Albert-Schweitzer-Campus 1
 Gebäude W 30
 48149 Münster



Kerstin Galler
 Prof. Dr. med. dent.
 Poliklinik für Zahnerhaltung und
 Parodontologie
 Universitätsklinikum Regensburg
 Franz-Josef-Strauß-Allee 11
 93053 Regensburg



Gabriel Krastl
 Prof. Dr. med. dent.
 Poliklinik für Zahnerhaltung und
 Parodontologie
 Universitätsklinikum Würzburg
 Pleicherwall 2
 97070 Würzburg