

Norbert Enkling

Osseoperzeption: Tastempfinden an dentalen Implantaten?*

Osseoperception: tactile sensibility of dental implants?



Zähne als Sinneswerkzeuge

„Die Zähne als Sinneswerkzeug“, so titelten Münch und Schriever schon 1931 und standen damit in der Tradition von Peaslee (1857) und Sigmund (1867), denen bereits die feine Tastsensibilität der Zähne bekannt war (zitiert nach Utz, 1982 [65]). Das komplexe stomatognathe System verfügt über einen Schutzreflex, der beim Biss auf ein hartes Objekt ein unangenehmes Gefühl erzeugt, das zur reflexhaften Mundöffnung führt und damit schädigende Einflüsse auf das System vermindert [76]. Neben den Aufgaben, die die Zähne beim Sprechen und bei der Nahrungsaufnahme und -verarbeitung erfüllen, sowie ihrer ästhetischen Funktion sind sie somit auch in den neuroreflektorischen Regelkreis des stomatognathen Systems eingebunden: Zähne dienen zum Ertasten von Fremdkörpern und zur Gewährleistung der Kieferhaltung [65].

Die Arten räumlicher Wahrnehmung über die Zähne sind in verschiedenen Studien untersucht worden [75]:

- die Wahrnehmung von interokklusalen Testkörpern = aktive taktile Sensitivität
- die Wahrnehmung von axialen und/oder horizontalen Berührungen der Zähne = passive taktile Sensitivität = Druckempfinden

- das interokklusale Dickenunterscheidungsvermögen = Diskriminationsvermögen
- die Fähigkeit, Formen in der Mundhöhle zu erkennen oder zwei Berührungspunkte voneinander abzugrenzen (Stereognosis).

Jacobs betonte, dass bei der Untersuchung des passiven Tastempfindens nur Reizlimen einzelner neuronaler Rezeptoren getestet werden könnten, dass hingegen das aktive Tastempfinden die normale Funktion repräsentiere und daran alle Arten von Rezeptoren wie Muskel-, Gelenk- oder tegumentale Rezeptoren beteiligt seien [23].

Wenn also die Sensibilität des Zahns in ihrer Funktion als Kontrollmechanismus untersucht werden soll, ist es sinnvoll, methodisch das aktive Tastempfinden heranzuziehen.

Das aktive Tastempfinden natürlicher Zähne ist interindividuell sehr unterschiedlich: In der Studie von Utz wiesen natürliche Zähne im Median ein Tastempfinden von ca. 15–30 µm auf, mit Ausnahme der Eckzähne mit einem Tastempfinden von 60 µm. Die Werte schwankten jedoch interindividuell zwischen 2 µm und 425 µm [65, 66]. In neueren Studien schwankten die absoluten Werte für das Tastempfinden der natürlichen Zähne interindividuell zwi-

schen 2 µm und 77 µm bei einem Mittelwert von 17 µm [14].

Der Einfluss des Geschlechts auf die Tastsensibilität ist allenfalls gering [61]: Die meisten Autoren konnten keine Abhängigkeit feststellen [4, 14, 65]. Es scheint jedoch eine Abhängigkeit des Tastempfindens vom Lebensalter zu bestehen: Mit zunehmendem Alter nimmt das Tastvermögen ab [18]. Im Mittel erhöht sich der Schwellenwert für das interokklusale Tastvermögen alle zehn Altersjahre um ca. 2,2 µm. Zudem zeigen die Probanden mit höheren individuellen Tastsensibilitätsschwellen größere Unsicherheiten im Tastempfinden [14].

Osseoperzeption

Untersuchungen an osseointegrierten orthopädischen Prothesen nach Amputationen von Armen oder Beinen haben gezeigt, dass eine solche Versorgung zu einer Wiederkehr des Gefühls infolge mechanischer Stimulation führte [10, 34]. Diese Wiederherstellung der somatosensorischen Regelkreise erlaubt einen natürlicheren Umgang mit der Prothese und vermindert das Risiko der Überlastung von Prothesen und Implantat [24]. Patienten konnten verschiedenartige mechanische Stimuli, die auf die osseointegrierten Prothesen einwirkten, unterscheiden [10, 56]. Diese Fähig-

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften, Medizinische Fakultät, Universität Bonn, und Klinik für Rekonstruktive Zahnmedizin und Gerodontologie, Universität Bern/Schweiz; Prof. Dr. med. dent. Norbert Enkling, MAS

* Deutsche Version der englischen Erstveröffentlichung Enkling N: Osseoperception: tactile sensibility of dental implants? Dtsch Zahnärztl Z Int 2022; 4: 3–10

Zitierweise: Enkling N: Osseoperception: Tastempfinden an dentalen Implantaten? Dtsch Zahnärztl Z 2022; 77: 12–19

DOI.org/10.53180/dzz.2022.0002

keit war im Vergleich zu Patienten mit konventionellen Röhrenprothesen um 27 % größer [24]. Als Ursache für die stärkere Empfindlichkeit wird eine Aktivierung von Rezeptoren im Knochen, im Periost, in der Gelenkkapsel oder in weiteren Geweben vermutet [29].

Fehlende Zähne können heute mit einer großen Überlebenswahrscheinlichkeit durch alloplastische Implantate ersetzt werden. Diese Versorgung kommt einer „restitutio ad integrum“ nahe [38]. Offen ist jedoch die Frage, inwieweit dentale Implantate in den bestehenden stomatognathen Regelkreis integriert werden [2]: Muss der „Fremdkörper Implantat“ besonders geschützt [31] werden, oder kann er als „vollwertiger Ersatzzahn“ mit eigener Sinneswahrnehmung betrachtet werden [60]? Mühlbradt et al. stellten schon früh fest, dass auch über dentale Implantate sensorische Informationen übertragen werden können [45, 46]. Die Fähigkeit von alloplastischen und damit nicht vitalen, ankylotisch verankerten Titanimplantaten, eine gewisse Sensibilität auszubilden, war in den vergangenen zwei Jahrzehnten Gegenstand zahlreicher Publikationen. Für sie wurde von Bränemark der Begriff „Osseoperzeption“ geprägt [5, 6, 41].

Physiologie der Sinneswahrnehmung an Zähnen

Für die Tastempfindungen der Zähne sind Propriozeptoren und Exterozeptoren verantwortlich: Propriozeptoren, etwa Muskelspindeln und Gelenkrezeptoren, die – aktiviert über Stimuli aus dem Körperinneren – Informationen über die relative Position und über Bewegungen von Körpergliedern liefern, werden von Exterozeptoren unterschieden, die von externen Reizen stimuliert werden und in der Haut, in der Mukosa, im Periost, im Knochen, in der Gingiva und im parodontalen Ligament liegen. Die Exterozeptoren informieren das zentrale Nervensystem über externe Belastungen und spielen eine bedeutende Rolle für das Tastempfinden [23].

Beim interokklusalen Tastempfinden natürlicher Zähne spielen – abhängig von der Mundöffnung – so-



Abbildung 1 Schematische Darstellung eines Querschnitts durch einen natürlichen Zahn mit parodontalem Gewebe

wohl Propriozeptoren als auch Exterozeptoren eine Rolle: Bei weiter Mundöffnung lässt sich das interokklusale Tastvermögen vor allem auf die Muskelspindeln und die Gelenkrezeptoren des Kiefergelenks zurückführen [8, 9, 33].

Bei geringerer interokklusaler Distanz, also bei geringeren Dicken der interponierten Fremdkörper, wird die Tastempfindlichkeit feiner und von den Exterozeptoren bestimmt [26, 71]. Diese Mechanorezeptoren liegen in der Gingiva, der alveolaren Mukosa und vor allem im parodontalen Ligament, das offensichtlich bereits auf geringe auf die Zähne ausgeübte Kräfte reagiert. Van Steenberghe stellte fest, dass die funktionellen Eigenschaften der Parodontalrezeptoren mit denen der Rezeptoren der übrigen Körperhaut vergleichbar seien [71]. Die Vermutung, dass Nervenendigungen der Zahnpulpa nicht nur im Rahmen der Nozizeption, sondern auch als Rezeptoren in die Tastsensibilität involviert sein könnten [35], ließ sich in der Folge nicht

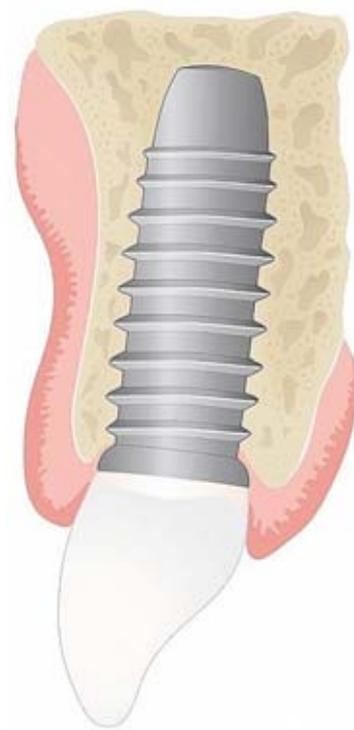


Abbildung 2 Schematische Darstellung eines Querschnitts durch ein osseointegriertes Implantat mit periimplantärem Hart- und Weichgewebe

bestätigen. Endodontisch versorgte Zähne weisen das gleiche Tastvermögen wie sensible Zähne auf [65].

Die aufgezeichneten EMG-Reflexantworten reduzieren sich unter Lokalanästhesie des untersuchten Zahns um ca. 90 % [69]. Daraus wurde auf die dominierende Funktion der parodontalen Mechanorezeptoren geschlossen; die Gelenk- und Muskelrezeptoren spielen demnach nur eine untergeordnete Rolle [43, 72]. Die Feststellung, dass ein vermindertes Parodontium nach einer Parodontitis nicht zu einer Reduzierung des Tastvermögens führe, stellt jedoch die dominierende Rolle des Parodonts infrage [39]. Der neurophysiologische Rezeptorapparat, der bei Belastung des Zahns durch Intrusion in seiner Alveole aktiviert wird, fehlt beim Implantat (Abb. 1 und 2).

Die physiologische Beweglichkeit des Zahns unterscheidet sich von der des Implantats. Es werden zwei Phasen in der Zahnbewegung unterschieden: In der ersten Phase wird die Zahnbeweglichkeit bei nur geringer



Abbildung 3a Versuchsablauf zum interokklusalen Tastvermögen/aktiven Tastempfinden: Mundwinkel mit Fotohaken abgehalten und Testfolie interokklusal eingebracht



Abbildung 3b Testposition: Nach Aufforderung durch den Untersuchenden hat der Proband zusammengebissen.

Belastung des Zahns durch die Fasern des Desmodonts bestimmt bzw. begrenzt. Bei stärkerer Belastung findet in der zweiten Bewegungsphase eine elastische Deformation des Knochens statt, sobald die Kapazität des Desmodonts ausgeschöpft ist [32, 48, 60]. Die Beweglichkeit des osseointegrierten Implantats ist ausschließlich auf eine elastische Deformation des Knochens zurückzuführen und erreicht sowohl unter horizontaler als auch unter axialer Belastung nur ein Zehntel der Beweglichkeit natürlicher Zähne [52, 59]. Richter rekonstruierte jedoch ein anderes Verhalten natürlicher Zähne: Das hydraulische System des Parodontiums wird unter physiologischen Belastungen, z. B. beim Sprechen und Kauen, nur sehr kurzzeitigen Kräften ausgesetzt; eine Verdrängung der Gewebsflüssigkeit aus dem Desmodontalspalt kann nicht erfolgen, weil dafür länger einwirkende Kräfte notwendig wären. Bei normaler Funktion verhalten sich natürliche Zähne in ihrem Bewegungsmuster also sehr ähnlich wie Implantate. Die große Intrusionskapazität der Zähne wird erst bei Parafunktionen ausgeschöpft [54].

Untersuchungsmethodik der Tastsensitivität

Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Untersuchungsansätze zur Bestimmung der Reizschwelle von Rezeptoren [23]:

1. die neurophysiologische Untersuchungsmethodik und
2. die psychophysische Untersuchungsmethodik

Bei der neurophysiologischen Untersuchungsmethodik kann invasiv

über Mikroelektroden und noninvasiv über eine Aufnahme von somatosensorisch evozierten Potenzialen eine objektive Auswertung der Reizantwort der Rezeptoren vorgenommen werden. Alternativ können mittels einer funktionellen Magnetresonanzaufnahme (fMRI) Veränderungen im Gehirn bei Reizung des Zahns/Implantats aufgenommen werden [36].

Bei der psychophysischen Methodik wird der einwirkende Reiz der subjektiven Empfindung des Probanden gegenübergestellt. Wenn sie sorgfältig in einem standardisierten Versuchsaufbau angewendet wird, lässt sich mit der psychophysischen Methodik im Rahmen einer Untersuchung der Empfindungsschwelle von Rezeptoren eine Korrelation zwischen physiologischen Funktionen von Rezeptoren und subjektiven Antworten der Probanden herstellen, und sie erbringt ebenso valide Ergebnisse im Vergleich zu den stärker invasiven, neurophysiologischen Untersuchungsmethoden. Die psychophysische Vorgehensweise kann zudem bei größeren Probandenpopulationen angewendet werden als die neurophysiologische und damit zu besser gesicherten Aussagen führen [68].

Bei der Untersuchung des aktiven Tastempfindens werden die Probanden gebeten, auf interokklusale Fremdkörper unterschiedlicher Stärke zu beißen. Zur Kontrolle der Aussagen der Probanden werden sogenannte „Leerproben“ (Mock-Trials) in die Untersuchung eingebunden (Abb. 3a, 3b). Die Testung kann somit zu folgenden Ergebnissen kommen:

richtig positiv = Anwesenheit eines Fremdkörpers wurde vom Probanden richtig erkannt.

richtig negativ = Fehlen eines Fremdkörpers wurde richtig erkannt.

falsch positiv = Trotz Fehlens eines Fremdkörpers wurde ein solcher als anwesend angegeben.

falsch negativ = Ein anwesender Fremdkörper wurde nicht erkannt.

Als Definition des Tastempfindens hat sich der 50%-Wert (Anteil richtiger Antworten = 50%) etabliert [64]. Da dieser 50%-Wert bei mehreren Fremdkörperdicken erreicht werden kann, wird der interpolierte 50%-Wert angegeben [26] (vgl. Abb. 4). Neuere Literatur empfiehlt die Auswertung mittels einer logistischen Regression oder – noch präziser – mittels einer asymmetrischen Weibull-Verteilung als Annäherung an die Tastempfindungskurve. Diese Modellierung hat den Vorteil, dass sie neben dem 50%-Wert auch das Unterstützungsbereich (10%- bis 90%-Intervall) oder die Steigung der Kurve im 50%-Wert als Maß für die individuelle Sicherheit der Aussagen ermitteln kann: Eine steile Kurve bzw. ein kleines Intervall gibt eine hohe Sicherheit und eine flache Steigung bzw. ein großes Intervall eine geringere Sicherheit/größere Unsicherheit im Er tasten der Fremdkörper an [13, 14].

Als Maß für die Definition eines gleichartigen (äquivalenten) Tastempfindens ($\pm 0,008$ mm) hat sich die Stärke der dünnsten gebräuchlichen Okklusionsfarbfolie mit einer Dicke von 8 μ m etabliert [15].

Ergebnisse zum Tastempfinden von Implantaten

Das aktive Tastempfinden ist bei Totalprothesen 10-mal schlechter im Vergleich zu natürlichen Zähnen [67]. Das Tastempfinden an Implantaten hingegen ähnelt dem natürlicher Zähne [16, 51]. Die Stereognosis ist bei natürlichen Zähnen jedoch weiterhin besser als bei Implantatversorgungen [4]. Zahnlose Patienten mit festsitzenden, keramisch ver-

blendeten Implantatversorgungen im Ober- und Unterkiefer beschreiben den Aufbiss z.T. als sehr hart, wie „Beißen auf Granit“ [37]. Das aktive Tastempfinden über dentale Implantate wird von den Probanden im Vergleich zu natürlichen Zähnen als eher dumpf und weniger genau lokalisierbar beschrieben [47].

Bei den passiven Testungen zeigten osseointegrierte Implantate kein Druckempfinden bei sehr geringen statischen Belastungen, sehr wohl aber bei stärkeren statischen und dynamischen (= Vibrationen) Belastungen (axialen und horizontalen). Dabei zeigten Implantate in der Maxilla im Vergleich zu Implantaten in der Mandibula eine höhere Reizschwelle. Dies kann auf eine Beteiligung der Muskel-, Sehnen- und Gelenkrezeptoren bei der Reizeinleitung an den Mandibula-Implantaten zurückgeführt werden [78].

Beim aktiven Tastempfinden, das am ehesten der natürlichen Funktion entspricht, konnte gezeigt werden, dass im intraindividuellen Vergleich zwischen Einzelzahnimplantat und natürlichem kontralateralen Zahn das Tastempfinden gleich ist [15]. Selbst unter Anästhesie des natürlichen Antagonisten des Implantats und des kontralateralen Zahns ist das Tastempfinden weiterhin sehr fein und zwischen Implantat und Zahn intraindividuell äquivalent [13].

Das aktive Tastempfinden von Implantaten ist jedoch interindividuell unterschiedlich und schwankt zwischen 2 µm und 54 µm bei einem Mittelwert von 21 µm [15]. Die Steigung der Tastempfindungskurven bei Implantaten ist im Vergleich zu der an den Kontrollzähnen im intraindividuellen Vergleich flacher. Dies bedeutet, dass das Tastempfinden an Implantaten etwas weniger sicher ist als das an natürlichen Zähnen [16].

Die Implantatoberfläche und die Implantatgeometrie, also Implantatlänge und -dicke, und damit verbunden die Größe der knöchernen Anlagerung an das Implantat haben keine Auswirkung auf das Tastempfinden. Ebenso haben das Geschlecht und das Lebensalter keinen Einfluss [15, 16]. In Bezug auf die Abhängigkeit des Tastempfindens vom Lebensalter differenzierte Wedig [75] als ers-

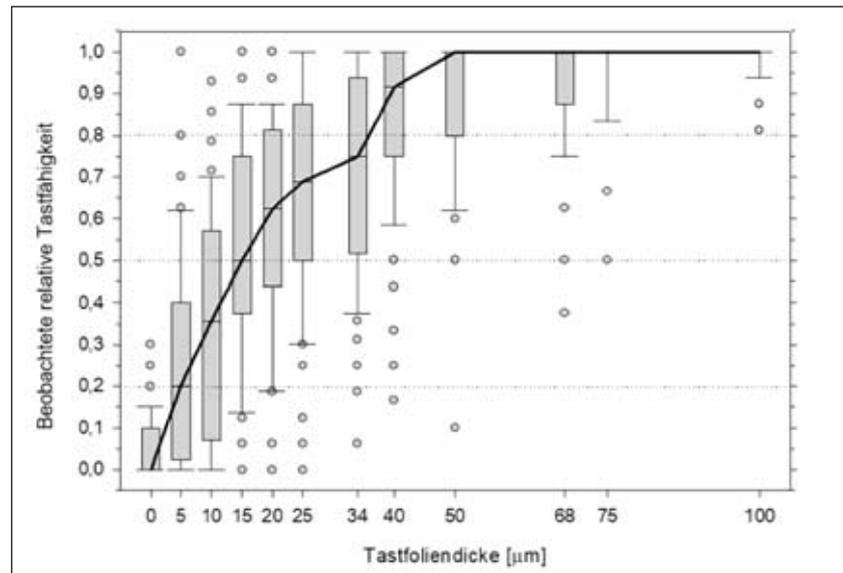


Abbildung 4 Darstellung der Ergebnisse einer Stichprobe zum aktiven Tastempfinden von Implantaten. Der 50%-Wert richtiger Ergebnisse wird als Schwelle des Tastempfindens definiert. Die 50%-Schwelle wird mit der 15-µm-Folie erreicht.

ter zwischen Implantaten und natürlichen Zähnen: Bei natürlichen Zähnen steigen die Tastempfindungsschwellen mit dem Probandenalter. Bei Implantaten hingegen zeigt sich keine Abhängigkeit des Tastvermögens vom Alter. Das interokklusale Tastempfinden bei Implantaten entspricht demjenigen an Zähnen von älteren Probanden [15].

Der Unterschied zwischen aktivem und passivem Tastempfinden bei Implantaten ist durch die Tatsache zu erklären, dass beim aktiven Test verschiedene Rezeptorgruppen aktiviert werden, während bei der passiven Methode selektiv die Rezeptoren im parodontalen Ligament angesprochen werden sollen, die nach Zahnextraktion in der Implantatregion fehlen [25]. Die unter Funktion auftretenden Kräfte, die z. B. beim Kauen auf die Implantate einwirken, liegen größtmäßig deutlich über den geringeren Kräften, die bei passiven Tastsensibilitätsuntersuchungen als Grenzwerte ermittelt werden konnten [40].

Bei festsitzendem Zahnersatz war das aktive Tastempfinden bei zwei gegeneinander okkludierenden Implantaten geringfügig schlechter, als wenn ein Implantat gegen einen natürlichen Zahn funktionierte [1]. Einige Autoren beschreiben, dass es mit zunehmender Funktionsdauer

der Implantate zu einer deutlichen Verbesserung des Tastempfindens komme [1, 40, 44]; andere Studien mit Vibrationsversuchen fanden diese Unterschiede jedoch nicht [24]. Es scheint beim Tastempfinden somit eine Phase der individuellen Adaptation zu geben, was auch von umfangreichen prothetischen Behandlungen bekannt ist [36, 40, 50].

Erklärungsansätze zur Physiologie des Tastempfindens bei Implantaten

Die physiologischen Grundlagen des Tastempfindens von osseointegrierten Implantaten, die unter dem Begriff der „Osseoperzeption“ zusammengefasst werden, sind noch nicht abschließend geklärt. Es existieren grundsätzlich zwei verschiedene Theorien:

1. Aktivierung von lokalen, im Knochen befindlichen Rezeptoren
2. Aktivierung von weiter entfernt liegenden Rezeptoren

Zu 1.: Die Beteiligung der Knocheninnervation an mechanischen Empfindungen bleibt umstritten [20]. Die Funktion der Innervation des Knochens ist eventuell nur auf vasoregulatorische und Knochenumbauprozesse beschränkt. Die meisten Nervenfasern weisen freie Nervenendigungen im Knochen auf, die mit dem Endost,

mit Gefäßen oder mit Bindegewebsanteilen in Verbindung stehen. Diese freien Nervenendigungen können eventuell auch auf Druck- und Schmerzstimulationen reagieren. Sissak et al. fanden im Knochenmark eine hohe Dichte von Neuropeptiden [62]. In Versuchen an Hunden konnte gezeigt werden, dass Implantatmaterialien im Bereich des Implantat-Knochen-Verbundes reichlich mit Nervenfasern umgeben sind [21, 74]. Ebenso konnten im Menschen an explantierten dentalen Implantaten zahlreiche unmyelinisierte und myelinisierte Nervenfasern gefunden werden [11]. Im Bereich des periimplantären Knochens waren mehr Nervenfasern vorhanden als im übrigen entzahnten Kieferareal [20]. Bei Sofortimplantation und Sofortbelastung scheint im Vergleich zu den verzögerten Implantatkonzepten eine erhöhte Nervenlagerung am Implantat zu erfolgen [21]. Daraus entstand die Hypothese, dass die Nerven aus den Parodontienresten der extrahierten Zähne stammen, sodass nach länger zurückliegender Zahnextraktion ein geringeres Tastempfinden des Implantats zu erwarten wäre [74]. Die postulierte Abhängigkeit des Tastempfindens vom zeitlichen Abstand zwischen Zahnextraktion und Implantatinsertion konnte jedoch in aktuellen Studien nicht bestätigt werden [16]. Die Reste der parodontalen nervalen Strukturen scheinen letztlich keine Relevanz für das Tastempfinden der Implantate zu haben. Denn Implantate, die in Beckenkammtransplantate inseriert waren, in denen keine parodontalen Strukturen vorliegen konnten, erzielten Ergebnisse, die denen von Implantaten im ortständigen Knochen entsprechen [49].

Bei der Testung des passiven Tastempfindens mit und ohne Infiltrationslokanalanästhesie des periimplantären Gewebes sowie mit abgeschraubtem Abutment – was jeglichen Kontakt zum Weichgewebe ausschloss – zeigten sich bei statischen und dynamischen Belastungen der Implantate keine Auswirkungen auf die Empfindungsschwellen. Bei natürlichen Zähnen wurde die Tastempfindung unter Anästhesie des Weichgewebes jedoch signifikant schlechter. Durch die Anästhesie wur-

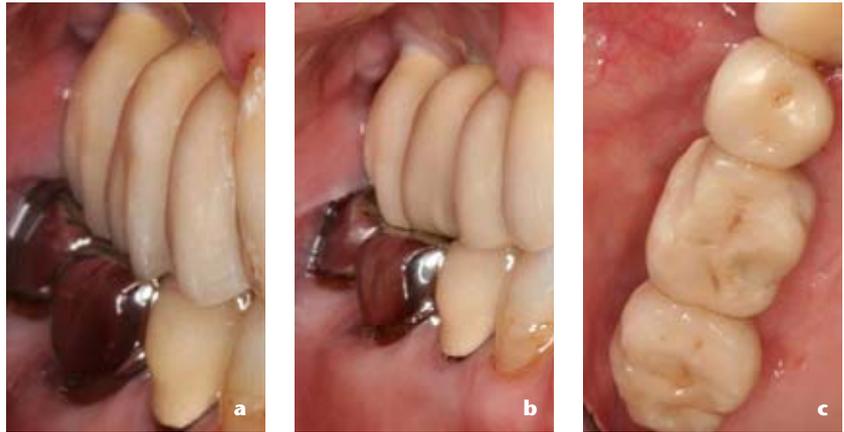


Abbildung 5a Klinisches Beispiel zum Zusammenhang von Okklusion und Keramikchipping. Ausgangssituation: Kopfbiss an Implantatkrone 16 zu Zahnkrone 46

Abbildung 5b Bukkale Ansicht der Situation nach Verblendkeramikchipping an der mesiobukkalen Höckerspitze 16

Abbildung 5c Okklusale Ansicht der Situation nach Verblendkeramikchipping an der mesiobukkalen Höckerspitze 16

Abb. 1–5: Norbert Enkling

den periimplantär die Rezeptoren der Gingiva, der Mukosa und des Periosts ausgeschaltet, sodass die unveränderte Tastempfindung auf eine Reaktion weiter entfernt liegender Rezeptoren hindeutet. Bei einer statischen Belastung erreichten die Ergebnisse bei anästhesierten Zähnen und Implantaten ungefähr die gleichen Werte, nämlich ca. 6 Ncm [78]. Bei einem neurophysiologischen Versuchsaufbau am Menschen, bei dem die Implantate elektrisch stimuliert wurden, konnte im Elektroenzephalogramm (EEG) eindeutig eine Antwort im Gehirn ermittelt werden, die auch nicht durch eine Oberflächenanästhesie der periimplantären Mukosa reduziert werden konnte. Die periimplantäre Mukosa scheint für das Phänomen der Osseoperzeption somit keine oder nur einen untergeordnete Rolle zu spielen [70].

Beim Einzelzahnimplantat tragen wahrscheinlich parodontale Strukturen der natürlichen Antagonisten und auch die natürlichen Nachbarzähne zum Tastvermögen bei: Bonte et al. fanden in einem Tierversuch heraus, dass eine Berührung von osseointegrierten Implantaten zu einer Trigeminusreflexantwort führte, die von der Anwesenheit von Restzähnen abhängig war. Sie schlossen daraus, dass der Ursprung der Inhibitionsreflexe der Kaumuskelatur nach Belastung der Implantate auf eine Ak-

tivierung der parodontalen Rezeptoren der benachbarten Restzähne zurückgeführt werden könnte [3, 63]. Die Relevanz der parodontalen Rezeptoren der natürlichen Antagonisten für die Osseoperzeption wird jedoch durch andere Studienergebnisse wieder infrage gestellt: Beim Vergleich des aktiven Tastempfindens der Einzelzahnimplantate mit natürlichen Zähnen auf der kontralateralen Seite ergab sich bei der Anästhesie der natürlichen Antagonisten ein vergleichbares Tastempfinden des Implantats wie bei nicht anästhesierten Antagonisten [13].

Zu 2.: Jacobs et al. vermuten als Ursache für die Osseoperzeption Reaktionen von weiter entfernten Proprio- und Exterorezeptoren, die über die Aktivierung des Knochens hervorgerufen werden [23].

Die subjektive Druckempfindung von Implantaten wird bei Testung der passiven Tastempfindlichkeit im Vergleich zu dem natürlicher Zähne anscheinend weniger genau lokalisiert und von den Probanden als weiter in den Schädel übertragen empfunden. Daher führte die Arbeitsgruppe von Schulte aus Tübingen das Tastvermögen der ankylosierten Implantate auf eine Deformation des periimplantären Knochens und eine damit verbundene Dehnung des Periosts zurück [60].

Eine Weiterleitung von mechanischen Reizen kann neben einer Deformation des Knochens auch über einen Shift der interstitiellen Flüssigkeit in den feinen Kanälchen und Lakunen der Knochenpongiosa erfolgen [7]. Das Periost ist stark innerviert und die Substanz P, die für ein Schmerzempfinden mitverantwortlich gemacht wird, ist in hohem Maße im Periost vorhanden [73]. Das Periost enthält viele freie Nervenendigungen, die für die Schmerzweiterleitung von Bedeutung sind, sowie Golgi-Mazzonische Körperchen, die auf Drucksensationen reagieren [58]. Das Periost des facialen Knochens enthält Mechanorezeptoren, die auf Druck und Dehnung des Periosts, der Kaumuskulatur und der Haut reagieren [57]. Zusätzlich sind für das Tastempfinden auch die Sehnen- und Muskelspindeln [55] sowie jene Rezeptoren im Kiefergelenk zu berücksichtigen, die dem Pacini-Typ entsprechen [79].

Das sehr feine aktive Tastempfinden von Zahnimplantaten ist zusammengefasst wahrscheinlich durch die Aktivierung von Muskel- und Sehenspindeln und Rezeptoren im benachbarten Periost bedingt [2]. Über neurophysiologische Untersuchungen mit dem fMRI konnte das Phänomen der Osseoperzeption weiter nachvollzogen werden: Bei der passiven Belastung von Zähnen und Implantaten unter 1 Hz mit gleichzeitiger MRI-Aufzeichnung wurden Aktivierungszustände im Gehirn dokumentiert und miteinander verglichen. Nach Zahnextraktion und Implantation schien eine plastische Veränderung im Gehirn einzutreten: Reizungen am Implantat aktivierten dann Anteile sowohl im primären als auch im sekundären somatosensorischen Kortex-Areal [19, 77].

Klinische Relevanz

Für den klinisch praktizierenden Zahnarzt ist das Maß der aktiven Tastempfindlichkeit interessanter als das des passiven Tastempfindens; mit Angaben in „mm“ lässt sich in der Praxis besser arbeiten als mit Druckangaben in „Ncm“ [65].

Okklusale Vorkontakte und daraus resultierende Überbelastungen werden als mögliche Ursache für Misserfolge von Implantaten dis-

kutiert [12, 22, 30, 31]. Entsprechend den Untersuchungen von Falk et al. [17] sowie Richter [53] können okklusale Vorkontakte ab einem Ausmaß von etwa 100 µm eine klinisch schädliche Krafteinwirkung zur Folge haben. Diese negative Auswirkung okklusaler Vorkontakte auf die Osseointegration eines Implantats wird allerdings von anderen Studien bestritten: Miyata et al. fanden bei künstlich gesetzten Interferenzen von bis zu 250 µm in einem Implantatversuch an Affen keine negativen Auswirkungen auf den Knochen [42].

Jedoch können statische und dynamische okklusale Vorkontakte unter Kraftspitzen stehen, die die mechanischen Eigenschaften der Verblendkeramik übersteigen und somit ein Chipping der Keramikverblendungen begünstigen (vgl. Abb. 5a–5c). Zur Erkennung dieser Vorkontakte wird färbendes Okklusionspapier oder Okklusionsfolie verwendet. Das Anfärben von okklusalen Vorkontakten und die Interpretation der Färbemarkierungen sind jedoch klinisch nicht trivial: Vor allem auf glatten Keramikoberflächen ist es schwierig, Okklusionskontakte anzufärben [76]. Zudem korreliert die Intensität der Anfärbung okklusaler Kontakte nicht zwangsläufig mit der Stärke bzw. Kraft des Okklusionskontakts. Sehr starke Kontakte färben sich nicht an, sondern versprühen die Farbpigmente eher in die Peripherie der Kontaktzone [28].

Da das interokklusale Tastvermögen von natürlichen Zähnen und Implantaten sehr fein ist – teilweise sogar feiner als das der dünnsten Okklusionsfolie (8 µm) –, scheint es ratsam, die Patientin/den Patienten bei der Anprobe der Restauration nach dem Komfort, d. h. nach dem subjektiven Gefühl zu fragen, ob also der Zahnersatz die richtige Höhe aufweist oder nicht [27]. Das interokklusale Tastempfinden an Zähnen und Implantaten, d. h. die Osseoperzeption, gibt somit einen Hinweis darauf, bis zu welchem Grad Zähne und Zahnersatz okkusal einzuschleifen sind, damit vom Patienten keine Störkontakte mehr gefühlt werden. Der vorliegenden Untersuchung zufolge ist dabei eine Präzisierung bis deutlich unter 100 µm erforderlich.

Danksagung

Diesen Artikel zum Tastempfinden von Zähnen und Implantaten möchte ich meinem Freund und Lehrer Prof. Dr. med. dent. Karl-Heinz Utz widmen.

Interessenkonflikt

In der Vergangenheit hat Prof. Dr. Norbert Enkling entgeltliche Vorträge auf wissenschaftlichen Konferenzen und Vorträge mit Workshops für Implantatfirmen wie Nobel Biocare, SIC Invent, Dentaurum Implants, 3M Espe und Condent gehalten.

Literatur

1. Bakshi PV, Thakur S, Kulkarni S: Perception by osseointegrated dental implants supporting a fixed prosthesis: a prospective study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2017; 32: 1346–1350
2. Bhatnagar VM, Karani JT, Khanna A, Badwaik P, Pai A: Osseoperzeption: An implant mediated sensory motor control – a review. *J Clin Diagn Res* 2015; 9: Ze18–20
3. Bonte B, van Steenberghe D: Masticatory post-stimulus EMG complex following mechanical stimulation of osseointegrated oral implants. *J Oral Rehabil* 1991; 18: 221–229
4. Bou Serhal C, Jacobs R, van Steenberghe D: Stereognostic ability of teeth and implants: a comparison between various prosthetic superstructures. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperzeption*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 199–220
5. Brånemark PI: How the concept of osseoperzeption evolved. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperzeption*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 43–46
6. Brånemark PI, Rydevik B, Skalak R: *Osseointegration in skeletal reconstruction and joint replacement*. Chicago, London, Berlin, Rio de Janeiro, Tokyo: 1997
7. Burger EH, Klein-Nulend J: Responses of bone cells to biomechanical forces in vitro. *Adv Dent Res* 1999; 13: 93–98
8. Christensen LV, Levin AC: Periodontal discriminatory ability in human subjects with natural dentitions, overlay dentures and complete dentures. *J Dent Ass S Afr* 1976; 31:

9. Christensen LV, Morimoto T: Dimension discrimination at two different degrees of mouth opening and the effect of anaesthesia applied to the periodontal ligaments. *J of Oral Rehabilitation* 1977; 4: 157–164
10. Clemente F, Håkansson B, Cipriani C et al.: Touch and hearing mediate osseoperception. *Sci Rep* 2017; 7: 45363
11. Corpas Ldos S, Lambrichts I, Quiry-nen M et al.: Peri-implant bone innervation: histological findings in humans. *Eur J Oral Implantol* 2014; 7: 283–292
12. Duyck J, Naert I: Failure of oral implants: aetiology, symptoms and influencing factors. *Clin Oral Investig* 1998; 2: 102–114
13. Enkling N, Heussner S, Nicolay C, Bayer S, Mericske-Stern R, Utz KH: Tactile sensibility of single-tooth implants and natural teeth under local anaesthesia of the natural antagonistic teeth. *Clin Implant Dent Relat Res* 2012; 14: 273–280
14. Enkling N, Nicolay C, Bayer S, Mericske-Stern R, Utz KH: Investigating interocclusal perception in tactile teeth sensibility using symmetric and asymmetric analysis. *Clin Oral Investig* 2010; 14: 683–690
15. Enkling N, Nicolay C, Utz KH, Johren P, Wahl G, Mericske-Stern R: Tactile sensibility of single-tooth implants and natural teeth. *Clin.Oral Implants.Res.* 2007; 18: 231–236
16. Enkling N, Utz KH, Bayer S, Stern RM: Osseoperception: active tactile sensibility of osseointegrated dental implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2010; 25: 1159–1167
17. Falk H, Laurell L, Lundgren D: Occlusal interferences and cantilever joint stress in implant-supported prostheses occluding with complete dentures. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1990; 5: 70–77
18. Gerr F, Letz R: Vibrotactile threshold testing in occupational health: a review of current issues and limitations. *Environ Res* 1993; 60: 145–159
19. Habre-Hallage P, Dricot L, Jacobs R, van Steenberghe D, Reyckler H, Grandin CB: Brain plasticity and cortical correlates of osseoperception revealed by punctate mechanical stimulation of osseointegrated oral implants during fMRI. *Eur J Oral Implantol* 2012; 5: 175–190
20. Huang Y, Jacobs R, Van Dessel J, Bornstein MM, Lambrichts I, Politis C: A systematic review on the innervation of peri-implant tissues with special emphasis on the influence of implant placement and loading protocols. *Clin Oral Implants Res* 2015; 26: 737–746
21. Huang Y, van Dessel J, Martens W et al.: Sensory innervation around immediately vs. delayed loaded implants: a pilot study. *Int J Oral Sci* 2015; 7: 49–55
22. Isidor F: Loss of osseointegration caused by occlusal load of oral implants A clinical and radiographic study in monkeys. *Clin Oral Impl Res* 1996; 7: 143–152
23. Jacobs R: Neurological versus psychophysical assessment of osseoperception. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperception*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 75–88
24. Jacobs R, Brånemark R, Olmarker K, Rydevik B, van Steenberghe D, Brånemark PI: Psychophysical detection thresholds for vibrotactile and pressure stimulation of prosthetic limbs using bone-anchorage or soft tissue support. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperception*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 125–141
25. Jacobs R, van Steenberghe D: Comparison between implant-supported prostheses and teeth regarding passive threshold level. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1993; 8: 549–554
26. Jacobs R, van Steenberghe D: Role of periodontal ligament receptors in the tactile function of teeth: a review. *J Periodont Res* 1994; 29: 153–167
27. Jacobs R, van Steenberghe D: From osseoperception to implant-mediated sensory-motor interactions and related clinical implications. *J Oral Rehabil.* 2006; 33: 282–292
28. Kelleher M (1978): A laboratory investigation of marking materials used for the detection of occlusal contacts. University of London
29. Klineberg I, Murray G: Osseoperception: sensory function and proprioception. *Adv.Dent.Res.* 1999; 13: 120–129
30. Klineberg IJ, Trulsson M, Murray GM: Occlusion on implants – is there a problem? *J Oral Rehabil* 2012; 39: 522–537
31. Koyano K, Esaki D: Occlusion on oral implants: current clinical guidelines. *J Oral Rehabil* 2015; 42: 153–161
32. Kulikov J: Untersuchungen über die physiologische und pathologische Zahnbeweglichkeit. *Zahnärztl Praxis* 1980; 31: 439
33. Laine P, Siirilä HS: The effect of muscle function in discriminating thickness differences interocclusally and the duration of the perceptive memory. *Acta Odont.Scand.* 1976; 35: 147–153
34. Li Y, Kulbacka-Ortiz K, Caine-Winterberger K, Brånemark R: Thumb amputations treated with osseointegrated percutaneous prostheses with up to 25 years of follow-up. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev* 2019; 3: e097
35. Loewenstein WR, Rathkamp R: A study on the pressoreceptive sensibility of the tooth. *J Dent Res* 1955; 34: 287–294
36. Luraschi J, Korgaonkar MS, Whittle T, Schimmel M, Müller F, Klineberg I: Neuroplasticity in the adaptation to prosthodontic treatment. *J Orofac Pain* 2013; 27: 206–216
37. Luraschi J, Schimmel M, Bernard JP, Gallucci GO, Belser U, Müller F: Mechanosensation and maximum bite force in edentulous patients rehabilitated with bimaxillary implant-supported fixed dental prostheses. *Clin Oral Implants Res* 2012; 23: 577–583
38. Mayer TM, Hawley CE, Gunsolley JC, Feldmann S: The single-tooth implant: a viable alternative for single-tooth replacement. *J Periodontol* 2002; 73: 687–693
39. Mela F, Pretti F: Tactile sensitivity of natural and artificial teeth. *Minerva Stomat.* 1965; 14: 653
40. Mericske-Stern R: Oral tactile function in relation to other functions after rehabilitation with implant supported prostheses. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperception*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 169–185
41. Mishra SK, Chowdhary R, Chrcanovic BR, Brånemark PI: Osseoperception in dental implants: a systematic review. *J Prosthodont* 2016; 25: 185–195
42. Miyata T, Kobayashi Y, Araki H, Oh-to T, Shin K: The influence of controlled occlusal overload on peri-implant tissue. Part 4: a histologic study in monkeys. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2002; 17: 384–390
43. Morimoto T, Takebe H, Hamada T, Kawamura Y: Oral kinaesthesia in patients with Duibenne muscular dystrophy. *J Neurol Sci* 1981; 49: 285–291
44. Mühlbradt L, Meyle J, Lukas D, Schulte W: Die Tastsensibilität Tübinger Sofortimplantate. *Dtsch Zahnärztl Z* 1980; 35: 334–338
45. Mühlbradt L, Möhlmann H: Qualitative und quantitative Empfindungsmerkmale bei natürlichen Zähnen und Tübinger Implantaten. *Z Zahnärztl Implantol* 1987; 3: 29–36
46. Mühlbradt L, Ulrich R, Möhlmann H, Schmid H: Mechanoperception of natural teeth versus endosseous implants revealed by magnitude estimation. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1989; 4: 125–130
47. Mühlbradt L, Ulrich R, Möhlmann H, Schmid H, Wendler K: Die Wahrnehmung von überschwelligem Kräften an enossalenen Implantaten und natürlichen Zähnen. *Z Zahnärztl Implantol* 1990; 6: 161–165
48. Mühlemann HR: 10 years of tooth-mobility measurements. *J Periodontol* 1960; 31: 110–122
49. Müller F, Horn M, Wahlmann U, Kunkel M: Interocclusal tactile sensibility in patients with implant-supported super-

structures after alveolar ridge augmentation using iliac crest bone grafts. In: rd C (Hrsg) Leuven, Belgium: Society of Oral Physiology, 2003, 44

50. Müller F, Link I, Fuhr K, Utz KH: Studies on adaptation to complete dentures. Part II: Oral stereognosis and tactile sensibility. *J Oral Rehabil* 1995; 22: 759–767

51. Negahdari R, Ghavimi M, Ghanizadeh M, Bohlouli S: Active tactile sensibility of three-unit implant-supported FPDs versus natural dentition. *J Clin Exp Dent* 2019; 11: e636–e641

52. Ney T (1986): Vergleichende Untersuchungen über die vertikale Beweglichkeit des Tübinger Implantates und natürlicher Zähne. Univ.-Tübingen

53. Richter EJ: In vivo vertical forces on implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1995; 10: 99–108

54. Richter EJ: Quantitative Messung der Verankerungsfestigkeit von Zähnen und Implantaten. *Dtsch Zahnärztl Z* 1995; 50: 204

55. Roll JP, Vedel JP, Ribot E: Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res* 1989; 76: 213–222

56. Rydevik B: The role of osseoperzeption in limb amputees with bone-anchored prostheses. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperzeption*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 47–54

57. Sakada S: Mechanoreceptors in fascia, periosteum and periodontal ligament. *Bull Tokyo Med Dent Univ* 1974; 21: 11–13

58. Sakada S, Aida H: Electrophysiological studies of the Golgi-Mazzoni corpuscles in the periosteum of the cat facial bones. *Bull Tokyo Dental Coll* 1971; 12: 255–272

59. Scholz F, Holzwarth W, Lukas D, Schulte W: Die Dämpfungseigenschaften des Parodontiums im Vergleich zum Tübinger Sofortimplantat. *Dtsch Zahnärztl Z* 1980; 35: 709–712

60. Schulte W: Implants and the periodontium. *International Dental Journal* 1995; 45: 16–26

61. Siirilä H, Laine P: The relation of periodontal sensory appreciation to oral stereognosis and oral motor ability. *Suomi Hammaslaak Toim* 1967; 63: 207–211

62. Sisask G, Bjurholm A, Ahmed M, Kreicberger A: The development of autonomic innervation in bone and joints of the rat. *J Auton Nerv Syst* 1996; 10: 27–33

63. Stuge U, Brodin P, Bjornland T: Masseter muscle reflex evoked by tapping on osseointegrated Frialit implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1993; 8: 650–654

64. Tryde G, Frydenberg O, Brill N: An assessment of the tactile sensibility in human teeth, an evaluation of a quantitative method. *Acta Odont.Scand.* 1962; 20 233–256

65. Utz KH (1982): Die taktile Feinsensibilität natürlicher Zähne: Eine klinisch-experimentelle Untersuchung. Bonn, Germany: University of Bonn

66. Utz KH: Untersuchung über die interokklusale taktile Feinsensibilität natürlicher Zähne mit Hilfe von Kupferfolien. *Dtsch Zahnärztl Z* 1986; 41: 1097–1100

67. Utz KH, Wegmann U: Die interokklusale Tastsensibilität bei Vollprothesenträgern. *Dtsch Zahnärztl Z* 1986; 41: 1174–1177

68. Vallbo AB, Johansson RS: Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiol* 1984; 3: 3–14

69. Van der Glas HW, De Laat A, van Steenberghe D: Oral pressure receptors mediate a series of inhibitory and excitatory periods in the masseteric poststimulus electromyographic complex following tapping of a tooth in man. *Brain Res* 1985; 37: 117–125

70. Van Loven K, Jacobs R, Swinnen A, Van Huffel S, Van Hees J, van Steenberghe D: Sensations and trigeminal somatosensory-evoked potentials elicited by electrical stimulation of endosseous oral implants in humans. *Arch. Oral Biol.* 2000; 45: 1083–1090

71. Van Steenberghe D (1979): The role and funktion of periodontal neural receptors in man. Leuven, Belgium: University of Leuven

72. Van Willigen JD, Broekhuysen ML: On the self-perception of jaw position in man. *Archs Oral Biol* 1983; 28: 117–122

73. Vandenaabee F, Creemers J, Lambrechts I: Innervation of the human fetal periosteum. An immunohistochemical study. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperzeption*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 21–26

74. Wang YH, Kojo T, Ando H et al.: Nerve regeneration after implantation in peri-implant area. A histological study on different implant materials in dogs. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperzeption*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 3–11

75. Wedig AM (1999): Studie zur oralen taktilen Sensibilität bei Prothesenträgern mit natürlichen Wurzeln oder Implantaten: Ein Vergleich. Univ.-Bern

76. Wise MD: Failure in the restored dentition: management and treatment. London, Berlin, Chicago, Tokyo: Quintessence Publishing Co. Ltd., 1995

77. Yan C, Ye L, Zhen J, Ke L, Gang L: Neuroplasticity of edentulous patients with implant-supported full dentures. *Eur J Oral Sci* 2008; 116: 387–393

78. Yoshida K: Tactile threshold for static and dynamic loads in tissue surrounding osseointegrated implants. In: Jacobs R (Hrsg) *Osseoperzeption*. Leuven: Catholic University Leuven, Department of Periodontology, 1998, 143–156

79. Zimny ML: Mechanoreceptors in articular tissues. *Am J Anat* 1988; 182: 16–32



Foto: Norbert Enkling

**PROF. DR. NORBERT ENKLING,
 MAS**

Leiter der Forschungsgruppe „Orale Implantologie und Biomaterialien“,
 Abteilung für Prothetik, präklinische
 Lehre und zahnärztliche
 Werkstoffkunde, Med. Fakultät,
 Universität Bonn;
 Abteilung für Rekonstruktive
 Zahnheilkunde und Gerodontologie,
 Universität Bern (CH);
 c/o Eichenklinik – Praxisklinik für
 Zahnmedizin, Eichener Straße 69,
 57223 Kreuztal, Germany
 enkling@uni-bonn.de