

Zahnmedizin *up2date*

6 · 2019

Implantologie 2

Die digitale Prozesskette in der Implantologie

Tabea Flügge

DOI: 10.1055/a-0655-8104

Zahnmedizin up2date 2019; 13 (6): 507–530

ISSN 1865-0457

© 2019 Georg Thieme Verlag KG

Unter dieser Rubrik sind bereits erschienen:

Implantationsassoziierte Nervschädigungen D. Kreuziger, T. Weischer Heft 5/2019

Keramikimplantate: Was wissen wir? S. Pieralli, R. Kohal, M. Bruhnke, B. Spies Heft 5/2018

Kurze und durchmesserreduzierte Implantate C. Walter Heft 2/2018

Implantatprothetische Rehabilitationen im Oberkiefer M. Fröhlich, F. Nagel Heft 6/2015

Keramische Zahnimplantate S. Röhling, M. Gahlert Heft 5/2015

Identifikation von inserierten Implantattypen C. Müller, J. Röckl Heft 3/2015

Computergestützte Implantation M. Stoetzer, B. Rahlf, N.-C. Gellrich Heft 1/2015

Indikationen zur dreidimensionalen Röntgendiagnostik in der oralen Implantologie J. Fleiner, A. Stricker Heft 4/2014

Implantologie im Alter F. Kloss, I. Grunert Heft 6/2013

Periimplantäre Infektionen G. John, F. Schwarz Heft 1/2013

Sinuslift – wann, wie und womit? C. Prechtel, K. Schlegel Heft 3/2012

Implantations- und Belastungszeitpunkt G. Wahl Heft 1/2012

Implantat-Abutment-Verbund M. Stiesch, P.-C. Pott, M. Eisenburger Heft 5/2011

Provisorische Versorgung bei Einzelzahnimplantaten T. Joda, S. Pieger, G. Heydecke Heft 2/2011

Die Extraktionsalveole als potenzielles Implantatbett M. Fröhlich Heft 6/2009

Sofortversorgung und Sofortbelastung von Implantaten M. Abboud, G. Wahl Heft 3/2009

Periimplantäre Entzündungen F. Schwarz, J. Becker Heft 1/2008

ALLES ONLINE LESEN



Mit der eRef lesen Sie Ihre Zeitschrift: online wie offline, am PC und mobil, alle bereits erschienenen Artikel. Für Abonnenten kostenlos! <https://eref.thieme.de/zahn-u2d>

JETZT FREISCHALTEN



Sie haben Ihre Zeitschrift noch nicht freigeschaltet? Ein Klick genügt: www.thieme.de/eref-registrierung

Die digitale Prozesskette in der Implantologie

Tabea Flügge, Florian Kernen, Katja Nelson



Die zahnärztliche Implantologie wurde durch die Einführung digitaler Technologien revolutioniert. Die Verbindung digitaler Bildgebung (Datenakquise), computergestützter Behandlungsplanung (CAD) und Herstellung (CAM) funktioniert als digitale Prozesskette und ermöglicht einen vorhersagbaren und effizienten Behandlungsablauf. Dieser Artikel beleuchtet diagnostische, prothetische und chirurgische Aspekte der digitalen Implantologie bis hin zur Anfertigung von provisorischen implantatgetragenen Restaurationen.

ABKÜRZUNGEN

CT	Computertomografie
DLP	Digital Light Processing
DVT	digitale Volumentomografie
SLA	Stereolithografie
SLM	selektives Laserschmelzen

Digitale Bildgebung

Die allgemeine digitale Prozesskette ist in ► **Abb. 1** dargestellt.

Mit der digitalen Bildgebung werden virtuelle Bilder bzw. Modelle eines Patienten für die Behandlungsplanung in der zahnärztlichen Implantologie erstellt. Für die Darstellung der knöchernen Strukturen werden Röntgentechniken angewendet. Die dreidimensionale Röntgentechnik umfasst die Computertomografie (CT) oder die digitale Volumentomografie (DVT). Die DVT gilt als Goldstandard in der implantologischen Behandlungsplanung. Bildartefakte können in der CT und in der DVT zu einer unzureichenden Darstellung der Zahnoberfläche führen. Weiterhin ist die Darstellung der Schleimhautoberfläche nicht möglich. Für eine vollständige virtuelle Darstellung des Kieferknochens und der Zähne werden daher **dreidimensionale Röntgentechniken** mit der **optischen Oberflächenbildung** kombiniert.

Merke

Für die digitale Implantatplanung sind immer eine DVT/CT und ein Oberflächenmodell der Zähne und Schleimhaut erforderlich.

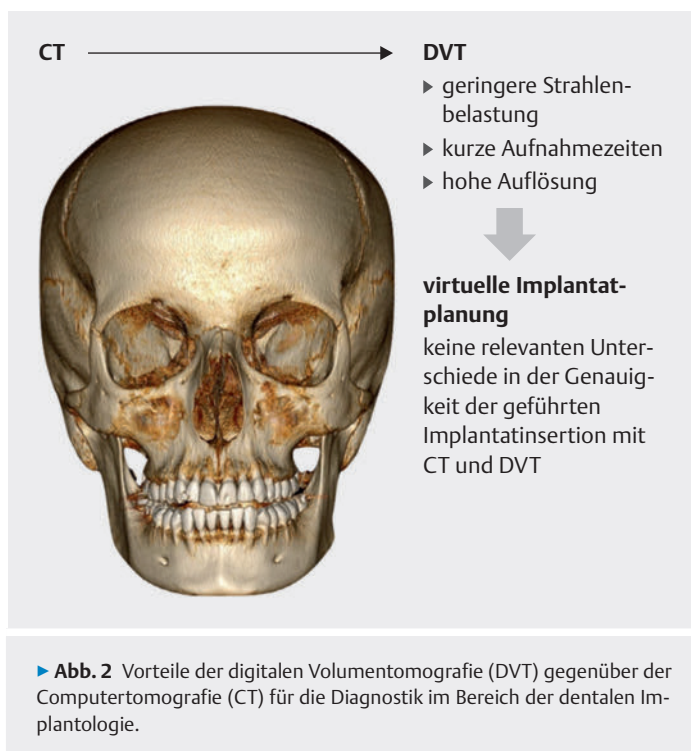
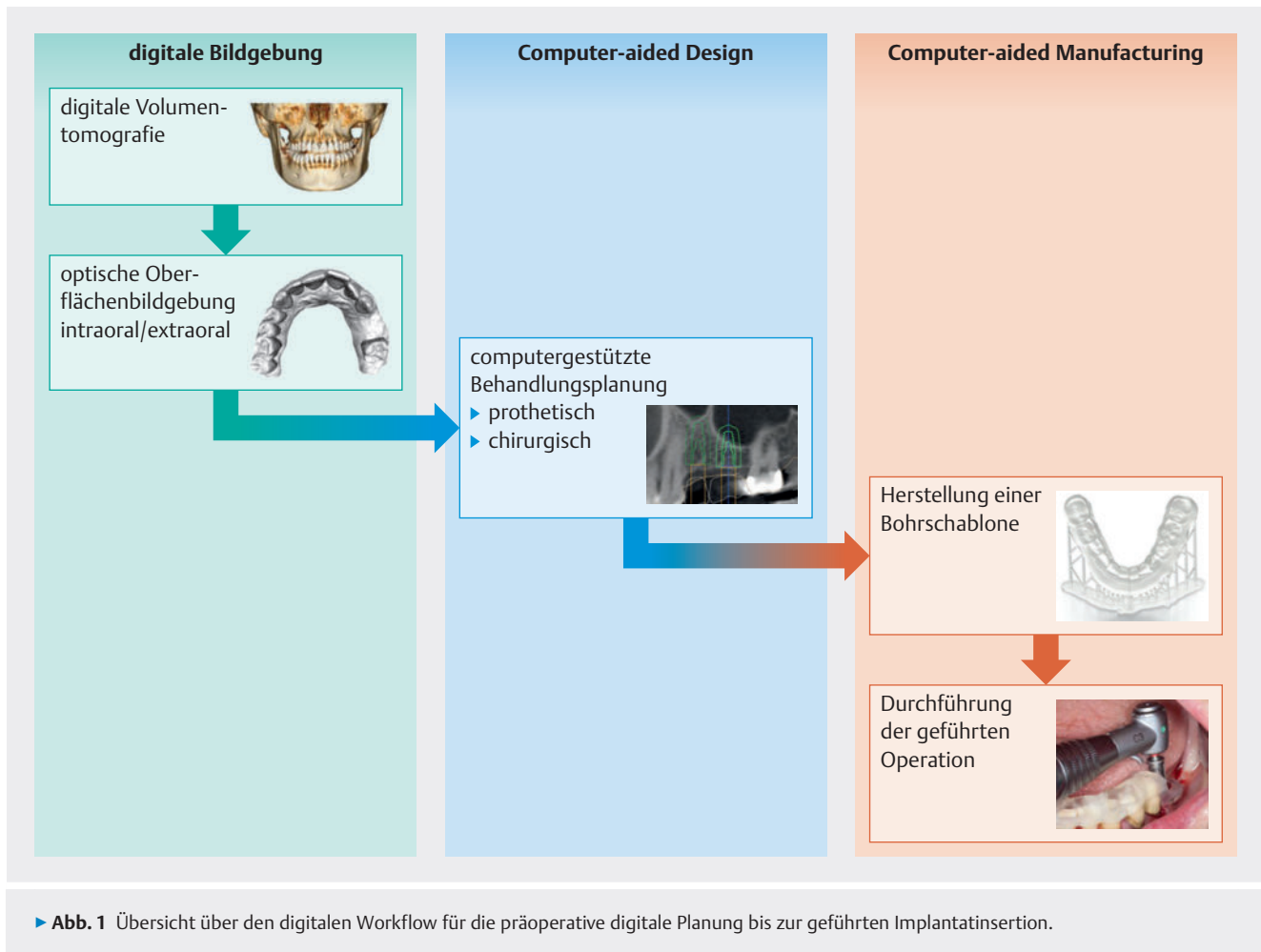
Die dreidimensionale Darstellung der Zahn- und Schleimhautoberfläche in einem virtuellen Modell wird mit optischen Techniken aufgenommen. Diese virtuellen Oberflächenmodelle können mit **Intraoralscannern** unmittelbar intraoral generiert werden. Alternativ werden extraorale optische Aufnahmen von Gipsmodellen mit dem **Modellscanner** digitalisiert, die mit einer konventionellen Situationsabformung hergestellt wurden. Anhand dieser Daten ist es dem Zahnarzt bzw. dem Zahntechniker in Rücksprache mit dem Zahnarzt schon vor der Implantatinsertion möglich, eine prothetische Planung virtuell durchzuführen.

Digitale Volumentomografie

In welchen Indikationen wird die dreidimensionale Bildagnostik mit der DVT empfohlen?

Die Anfertigung einer DVT exponiert die Patienten mit ionisierender Strahlung. Deren potenziell schädliche Wirkung bedingt, dass die Auswahl der rechtfertigenden Indikation für eine DVT von großer Bedeutung ist. Folgende Indikationen werden u. a. für die DVT empfohlen [1]:

- bei deutlichen anatomischen Abweichungen in der sagittalen/transversalen/vertikalen Ebene in Form bzw. Kieferrelation (unter sich gehende Alveolarfortsatzbereiche, Alveolarfortsatzatrophie, Kieferhöhlensepten),
- bei speziellen chirurgischen/prothetischen Therapiekonzepten wie Sofortversorgung, navigationsgestützte Implantologie, komplexe interdisziplinäre Therapiekonzepte,
- bei unsicherer (2-D-)Darstellung anatomisch wichtiger Nachbarstrukturen oder bei pathologischen Veränderungen mit weitergehendem Klärungsbedarf,
- bei Komplikationen nach Implantation oder Augmentation,

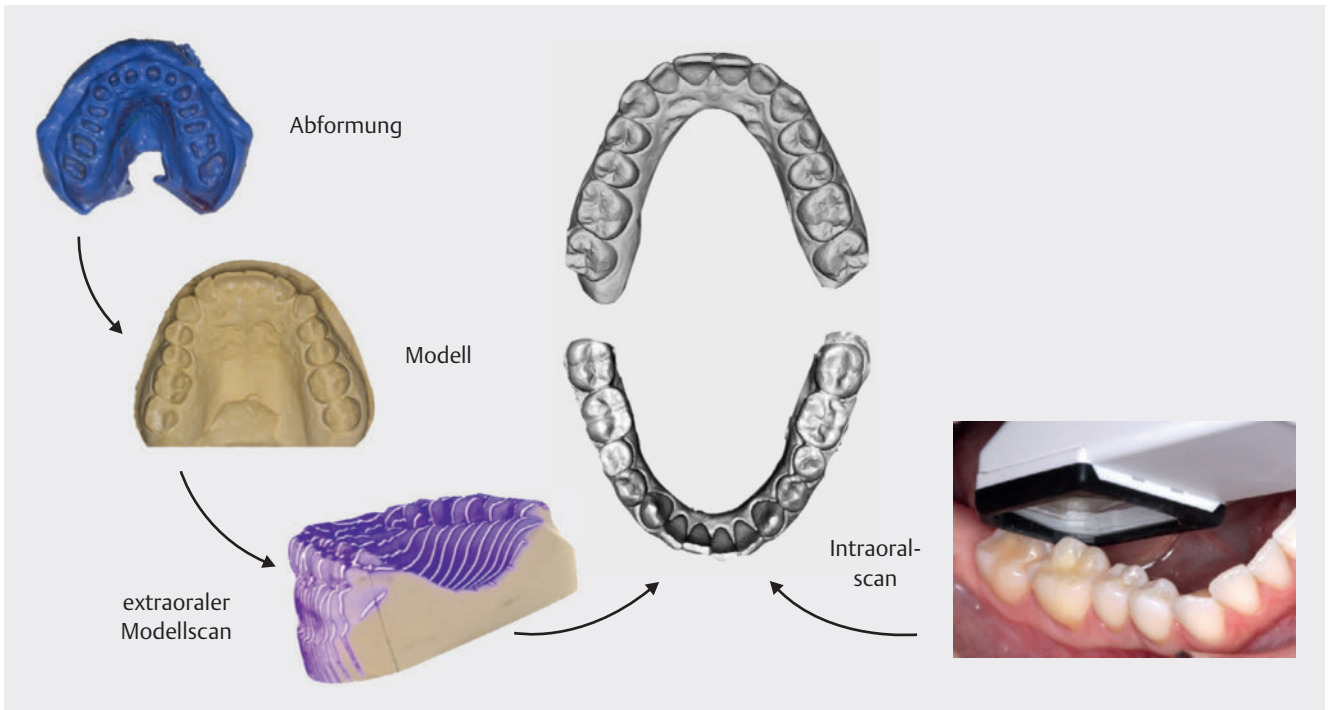


- bei Vorerkrankungen oder Voroperationen der Kieferhöhle mit möglichem Einfluss auf die Implantatversorgung im Oberkieferseitenzahnbereich.

Die DVT wird in der Zahnheilkunde häufiger als die CT genutzt, da sie eine geringere Strahlenbelastung als die CT, kurze Aufnahmezeiten und eine hohe Auflösung bietet. Durch die individuelle Anpassung des Aufnahmevolumens, der Rotation der Gantry (Röntgen- und Detektor-einheit) und der Voxelgröße können diese Parameter zusätzlich beeinflusst werden. DVT-Geräte benötigen weniger Platz als CT-Geräte und ermöglichen die Aufnahme in einer sitzenden, liegenden oder stehenden Position des Patienten (▶ **Abb. 2**).

Relevante Dimensionen der DVT – was ist genau?

Die Darstellungsqualität der DVT ist durch Artefakte limitiert, die durch Bewegungen des Patienten und durch die Streuung von Strahlen im Bereich von Metallrestaurationen entstehen. Die Auflösung einer DVT entspricht in der klinischen Anwendung aufgrund von Artefakten nicht der einstellbaren Größe einer Volumeneinheit (Voxelgröße). Unter Berücksichtigung der genannten Artefakt-



► **Abb. 3** Virtuelle Modelle der Zahn- und Zahnfleischoberfläche werden durch das Scannen von Gipsmodellen oder durch einen direkten intraoralen Scan erstellt.

bildung können Strukturen von mind. 0,5 mm Größe mit der DVT dargestellt werden [2].

Die DVT ermöglicht im Vergleich zur CT keine qualitative Auswertung von Grauwerten. In der CT können Hounsfield-Einheiten angewendet werden, die für viele Gewebe standardisiert sind. In der DVT sind die Grauwerte nicht standardisiert und werden von vielen Faktoren beeinflusst [3].

Die systematische Auswertung von Arbeiten, die den Messfehler in der DVT untersucht haben, hat durchschnittliche Abweichungen von ca. 1 mm dokumentiert. Daraus wird die Empfehlung abgeleitet, bei der Implantatplanung einen Sicherheitsabstand von 2 mm zwischen vitalen anatomischen Strukturen und geplanten Implantaten einzuhalten [4]. Neben der DVT werden auch die optische Oberflächenbildung, Softwaresysteme für die virtuelle Implantatplanung und die Herstellung von Bohrschablonen als Faktoren für Ungenauigkeiten bei der geführten Implantatinsertion betrachtet [5].

Merke

Bei der Implantatplanung in der DVT sollte ein Sicherheitsabstand von 2 mm zwischen den Implantaten und vitalen anatomischen Strukturen eingehalten werden.

Optische Oberflächenbildung

Für die Herstellung von virtuellen Modellen wird die Zahn- und Schleimhautoberfläche mit optischen Technologien aufgenommen. Intraorale Scanner realisieren die direkte Aufnahme in der Mundhöhle. Alternativ können Gipsmodelle, die mit konventionellen Abformungen hergestellt wurden, mit Modellscannern aufgenommen werden (► **Abb. 3**).

Digitale intraorale Abformung

Digitale intraorale Abformungen werden mit Intraoral-scannern aufgenommen, unmittelbar nach der Aufnahme auf dem Bildschirm angezeigt und können auf diese Weise direkt kontrolliert, ggf. durch weitere Aufnahmen ergänzt und an das Labor weitergeleitet werden. Entgegen der konventionellen Abformungen mit Löffeln und Abformmassen entfallen bei der digitalen Abformung die Auswahl eines Löffels, eine mögliche Verwindung des Abformmaterials während oder nach der Abformung und eine Ungenauigkeit des Modells durch die Expansion des Gipses. Weiterhin entfällt der Versand von Abformungen und Modellen. Die intraorale digitale Abformung beinhaltet wie die konventionelle Abformung Ungenauigkeiten. Diese Ungenauigkeiten treten patientenspezifisch durch einen eingeschränkten Platz in der Mundhöhle, durch Feuchtigkeit, Speichelfluss und den Schluckreflex auf.

► **Tab. 1** Gegenüberstellung Intraoralscan – konventionelle Abformung.

Intraoralscan	konventionelle Abformung
direkte Aufnahme ohne labortechnische Zwischenschritte und elektronischer Versand an Labor	labortechnische Modellherstellung und ggf. Versand von Abformungen und Modellen zw. Labor und Behandler
Korrekturmöglichkeiten durch unmittelbare Darstellung eines virtuellen Modells	keine Korrektur einer Abformung möglich, ggf. vollständige Wiederholung notwendig
kostenintensives Equipment	geringe Kosten für Abformmaterialien
Erlernen einer neuen Technik erforderlich	Technik der konventionellen Abformung liefert mit Erfahrung zuverlässige Ergebnisse
Genauigkeit von Intraoralscans in vivo für viele Indikationen nicht belegt	Genauigkeit von konventionellen Abformungen für viele Indikationen nachgewiesen

Das Scanprotokoll des Intraoralscans umfasst den Pfad, mit dem das Handstück über die Zahnreihe geführt wird, und weitere Besonderheiten, wie z. B. die Puderapplikation oder die Verwendung eines Lippenretraktors.

Scanpfad Für jeden Intraoralscanner wird vom Hersteller ein spezieller Scanpfad empfohlen, der grundsätzlich eingehalten werden sollte. Die Software des Scanners reiht der Vorgabe entsprechend die aufgenommenen Einzelbilder zu einem gesamten Bild des Kiefers zusammen. Durch das Absetzen und erneute Ansetzen des Scanners wird die Aneinanderreihung erschwert, sodass der durchgängige Scan empfohlen wird. Von vielen Anwendern wird eine Lernkurve des Intraoralscans beschrieben, die sich insbesondere auf das Handling des Scanners und die Einhaltung des Scanpfads bezieht. Es sind bisher keine wissenschaftlichen Arbeiten publiziert, in denen die Genauigkeit intraoraler Scans mit unterschiedlichen Scanpfaden in vivo untersucht wurde.

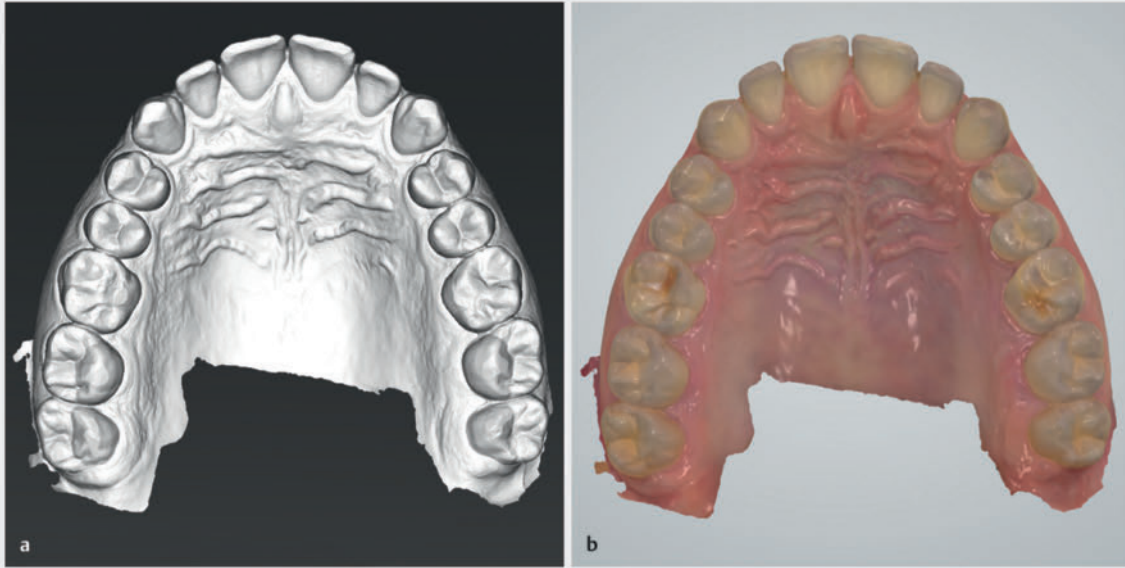
Puderapplikation/Oberflächenkonditionierung Die Notwendigkeit zur Puderapplikation wird durch die optische Scantechnologie des Systems vorgegeben. Das Scanpulver besteht aus Titanoxidpartikeln, die durch ihren mattierenden Effekt eine gleichmäßigere Reflexion des vom Intraoralscanner projizierten Lichtstrahls erreichen. Hierfür ist es erforderlich, dass eine gleichmäßige, deckende Puderschicht vorhanden ist (Scantechnologie: Passive Triangulation, System: Cerec Bluecam, Sirona). Für eine andere Intraoralscantechnologie wirken die Partikel als zufällig verteilte Landmarken auf der Zahn- und Zahnfleischoberfläche, sodass hier keine deckende Schicht, sondern nur ein dünner Film erforderlich ist (Scantechnologie: Wave Front Sampling, System: True Definition, 3M Espe). Die Wahl zwischen Puderapplikation oder Scannen der unkonditionierten Oberfläche sollte entsprechend der Vorgaben des jeweiligen Intraoralscansystems erfolgen. Intraoralscanner der neueren Generation verwenden zunehmend Technologien, bei denen keine Puderapplikation mehr erforderlich ist.

Dateiformate Intraoralscans nehmen ein Modell der Zahn- und Zahnfleischoberfläche auf, das entweder einfarbig ist oder die Farbe der intraoralen Strukturen wiedergibt (► **Abb. 4**). Systeme, die eine Puderapplikation voraussetzen, zeigen ein einfarbiges Modell, während puderfreie Systeme auch Farbinformationen aufnehmen können. Die Technologie zur Aufnahme der Farbinformation ist jedoch nicht bei allen puderfreien Systemen verfügbar. Durch die Farbinformation wird ein fotorealistisches Bild angezeigt, in dem Software-gestützt auch die Zahnfarbe bestimmt werden kann. Eine Validierung der Genauigkeit dieser Art der Zahnfarbenbestimmung ist bisher nicht verfügbar.

Ein universelles Format für Oberflächenmodelle ist das STL-Format. Wenn die Farbe der Oberfläche (Textur) mitgespeichert wird, ist ein anderes universelles Dateiformat erforderlich (z. B. OBJ-Format). Bei den jeweiligen Intraoralscannern sind ggf. systemspezifische Dateiformate vorhanden.

Genauigkeit von Intraoralscans Beim Intraoralscan werden viele einzelne Bilder der Zahnoberfläche aufgenommen, die anhand von übereinstimmenden Bereichen zu einem gesamten Modell des Zahnbogens zusammengefügt werden. Die Genauigkeit des gesamten Modells, also die Übereinstimmung des Scans mit der tatsächlichen Situation im Mund, ist von der Genauigkeit der Überlagerung der Einzelbilder abhängig.

Bisherige Studien haben in vivo insbesondere die Wiederholungsgenauigkeit (Präzision) von Intraoralscans untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass Intraoralscans größerer Areale (ganze Kiefer) eine geringere Präzision hatten (Abweichungen 43–83 µm) als Intraoralscans von einzelnen Quadranten (Abweichungen 22–49 µm). Dieses Ergebnis wurde damit erklärt, dass für ein größeres Areal eine höhere Anzahl von Einzelbildern überlagert wird [6, 7].



► **Abb. 4** Intraoralscan des Oberkiefers, der entweder monochrom oder mit Textur aufgenommen werden kann. Der monochrome Intraoralscan enthält Oberflächeninformationen, die im STL-Format gespeichert werden. Für die Speicherung von Farbinformationen sind spezielle Dateiformate erforderlich.
 a Monochrome Aufnahme.
 b Aufnahme mit Textur.

Indikationen Neben der Herstellung von virtuellen Situationsmodellen (Oberflächenmodellen) werden optische Verfahren auch für die Aufnahme der Implantatposition (virtuelles Implantatmodell) verwendet. Die optische Oberflächenbildgebung ermöglicht die Aufnahme eines Scankörpers, der im Implantat verankert ist und somit die intraossäre Position des Implantats anzeigt. Zähne und Scankörper können durch ihre charakteristische Oberfläche von einem Intraoralscanner erkannt und abgebildet werden. Die Schleimhaut, insbesondere die bewegliche Schleimhaut des Vestibulums und des Mundbodens, wird mit Intraoralscannern nicht reproduzierbar aufgenommen [8].

Die Indikationen für eine digitale intraorale Abformung in der Implantologie umfassen somit die Herstellung von Situationsabformung für die Behandlungsplanung und die Anfertigung von implantatgetragenen Zahnersatz auf Einzelzahnimplantaten. Für einen quadranten- bzw. kieferübergreifenden Zahnersatz auf Implantaten gibt es derzeit keine evidenzbasierten Empfehlungen [9].

Merke

Intraoralscans können in der Implantologie derzeit für die Erstellung von Situationsmodellen für die Behandlungsplanung und für die digitale Abformung und Versorgung von Einzelzahnimplantaten mit adäquater Genauigkeit verwendet werden.

Extraorale optische Aufnahme von Modellen

Für die Nutzung der digitalen Prozesskette müssen keine Intraoralscans angefertigt werden. Alternativ können Gipsmodelle mit konventionellen Abformungen hergestellt werden, die in einem weiteren Schritt mit einem Modellscanner digitalisiert werden. Die daraus entstehenden virtuellen Modelle stehen wie Intraoralscans in einem universellen Dateiformat (STL-Format) zur Verfügung und können somit in den digitalen Arbeitsablauf integriert werden. Die Vorteile des Intraoralscans, die durch die direkte intraorale Digitalisierung entstehen, werden auf diesem Weg nicht genutzt. Ungenauigkeiten, die sich durch die konventionelle Abformung und Modellherstellung ergeben, werden nicht umgangen. Die Aufnahme eines Modells im Modellscanner (Abweichung $\approx 10 \mu\text{m}$) ist jedoch im Vergleich zum Intraoralscan (Abweichung $\approx 50 \mu\text{m}$) genauer [10].

Digitale intraorale Abformung von Implantaten

Durch die konventionelle Implantatabformung mit Abformpfosten wird die Position des Implantats mit dem periimplantären Weichgewebe auf das Meistermodell übertragen. Die optische Oberflächenbildgebung ermöglicht die Aufnahme eines Referenz- bzw. Scankörpers, der analog zu einem Abformpfosten die intraossäre Position eines Implantats anzeigt. Für den weiteren Arbeitsablauf kann die Herstellung des Zahnersatzes digital in einer Software erfolgen, ohne dass ein physisches Modell hergestellt wird. Alternativ wird auf der Basis der

digitalen Abformung ein Meistermodell gedruckt oder gefräst und das Implantatanalog eingesetzt. Der weitere Herstellungsprozess kann auf diese Weise am Modell erfolgen.

Intraoralscans von Implantaten in Einzelzahnlücken weisen eine hohe Genauigkeit auf und sind hierzu mit konventionellen Abformmethoden vergleichbar.

Ein kritischer Punkt bei der digitalen Abformung von Implantaten ist das periimplantäre Weichgewebe – das Emergenzprofil. Bei der konventionellen Implantatabformung wird das vorgeformte Emergenzprofil durch individualisierte Abformpfosten auf das Meistermodell übertragen. Scankörper für die digitale Implantatabformung sind konfektioniert und haben häufig eine zylindrische Form, die keine Unterstützung des Emergenzprofils ermöglicht. Das ursprünglich ausgeformte Weichgewebe kollabiert nach kurzer Zeit und wird daher in veränderter Form optisch aufgenommen. Im ästhetischen Bereich oder bei komplex ausgeformtem Weichgewebe ist die Indikation für eine digitale Abformung des Implantats mit einem Scankörper ohne vorherige Individualisierung eingeschränkt [11].

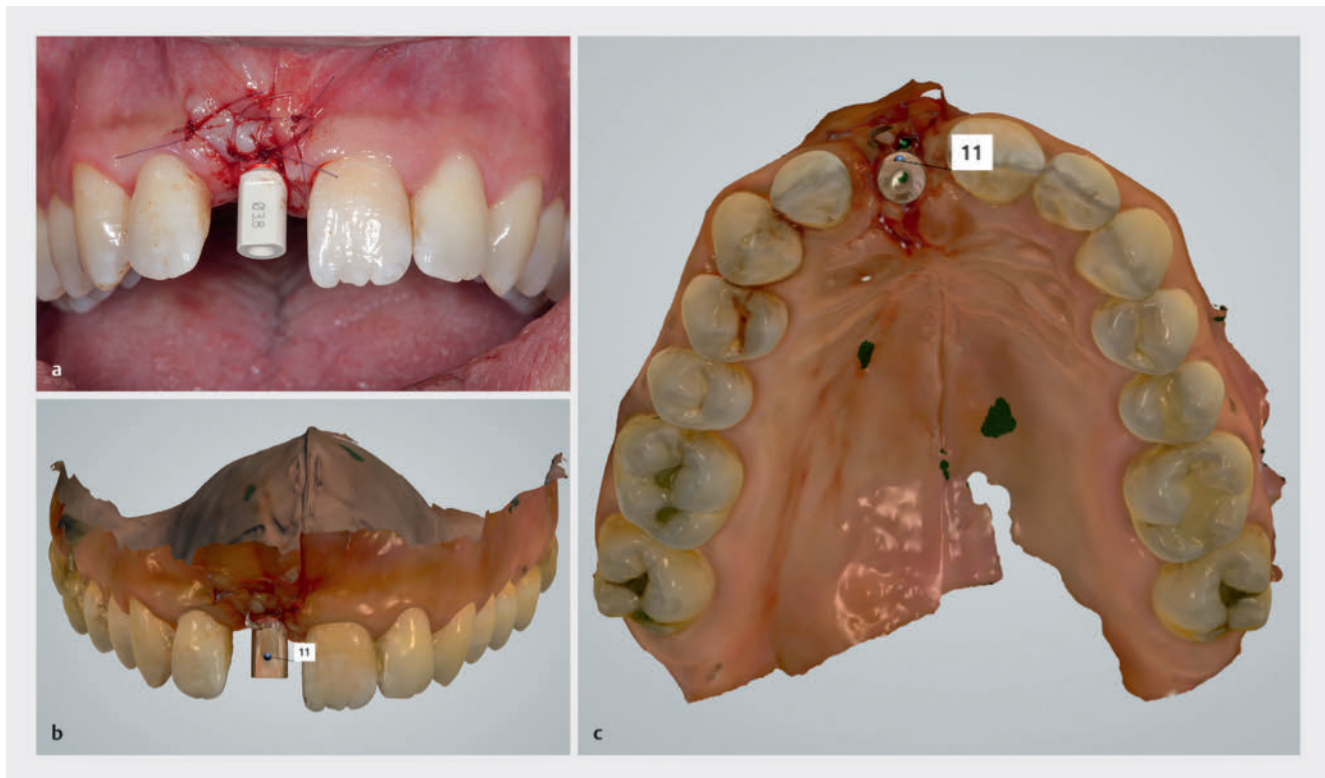
Digitale Implantatabformungen können unmittelbar nach der Implantatinserterion oder während bzw. nach der Freilegung erfolgen (► **Abb. 5**). Da optische Verfahren berührungslos sind, wird kein Abformmaterial in den Operationssitus eingebracht. Die intraoperative digitale Abformung kann ausschließlich mit puderfreien Intraoralscannern durchgeführt werden. Bei persistierender Blutung können jedoch Ungenauigkeiten bei der optischen Abformung auftreten.

Merke

Implantate werden mit Scankörpern analog zu Abformpfosten optisch abgeformt. Nach der individuellen Ausformung des Emergenzprofils sollten Scankörper individualisiert werden, um die Schleimhautkontur im digitalen Modell wiederzugeben. Puderfreie Intraoralscansysteme ermöglichen die intraoperative optische Implantatabformung.

Computergestützte Implantatplanung

Siehe Fallbeispiel 1.



► **Abb. 5** Situation nach Freilegung des Implantats in Regio 11 und Fixierung eines Scankörpers für die digitale Abformung.
 a Intraoperative Ansicht.
 b En-face-Ansicht des Intraoralscans mit Scankörper.
 c Okklusale Ansicht des Intraoralscans mit Scankörper.

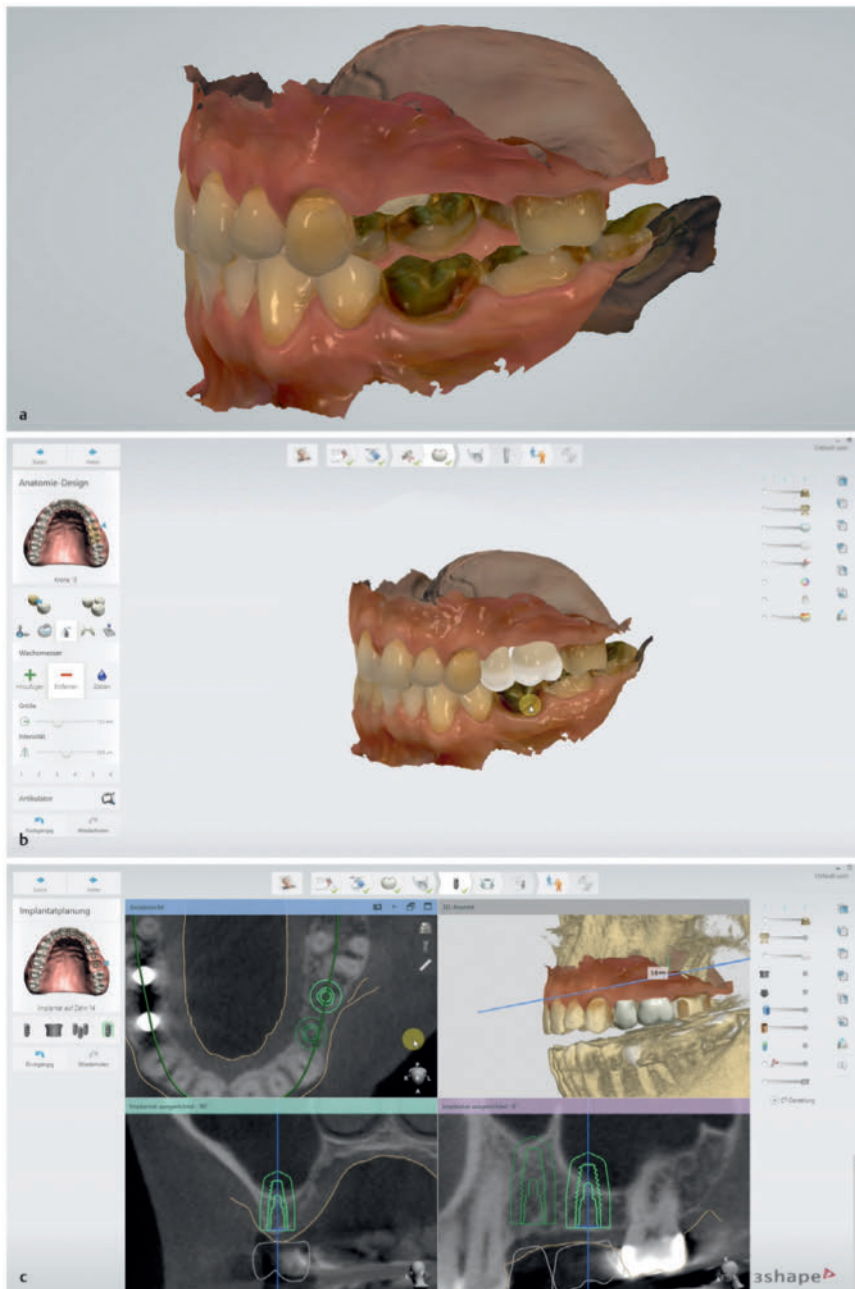
FALLBEISPIEL 1

Implantatplanungssoftwares und Schnittstellen zu Dental-CAD-Software

Die computergestützte Implantatplanung kann mit unterschiedlichen Programmen/Softwarelösungen durchgeführt werden. In Abhängigkeit vom verwendeten Implantatsystem wird eine firmeneigene Lösung oder jene eines Drittanbieters ausgewählt.

Die Firma Dental Wings (Dental Wings Inc., Montreal, Kanada) bietet die Implantatplanungssoftware coDiagnostiX® an. Sie umfasst die Planung von Implantaten und das Design von Bohrschablonen. Die Schnittstelle zur Software für die prothetische Planung DWOS CAD wird durch DWOS Synergy angeboten. Die Implantatplanung in coDiagnostiX und die prothetische Planung in DWOS CAD können simultan auf zwei Benutzeroberflächen bearbeitet und wechselseitig aneinander angepasst werden.

Eine ähnliche Lösung bietet die Software Implant Studio® von 3Shape (3Shape A/S, Kopenhagen, Dänemark). Das prothetische Design wird mit der Laborsoftware Dental System® von 3Shape durchgeführt, exportiert und mit der Implantatplanungssoftware Implant Studio importiert. Nach der Implantatplanung wird mit einfachen Werkzeugen eine Bohrschablone gestaltet und an die Produktion (CAM) weitergeleitet (► **Abb. 6**).



► **Abb. 6** Fallbeispiel 1.

a Darstellung der Situationsmodelle eines Patienten mit einer zahnbegrenzten Lücke in Regio 24–25.

b Mit der Laborsoftware Dental System® von 3Shape wird eine digitale Aufstellung angefertigt.

c Diese Aufstellung wird in der Implantatplanungssoftware Implant Studio® für die Implantatplanung berücksichtigt.

Nach der Datenakquisition beginnt die softwaregestützte Planung von Implantaten. Hierfür steht eine Vielzahl von Softwaresystemen zur Verfügung. Die Planung folgt einem festgelegten Ablauf, der mit Modifikationen in jeder Software enthalten ist. Die Implantatplanung kann vom behandelnden Zahnarzt, von einem Zahntechniker oder von einem spezialisierten Zentrum in Zusammenarbeit mit dem Behandler durchgeführt werden. Bei der Übergabe der Patientendaten an einen Zahntechniker oder einen externen Spezialisten obliegt die Verantwortung dem behandelnden Zahnarzt, der die Arbeitsschritte kontrolliert und freigibt:

- prothetische Implantatplanung,
- Darstellung eines Oberflächenmodells der DVT-Daten (Segmentierung),
- Überlagerung von DVT und Intraoralscan (Registrierung),
- Darstellung von zweidimensionalen Schnittbildern in axialer, transversaler und tangentialer implantatzentrierter Ansicht,
- Auswahl und Positionierung des Implantats und Messung der Abstände zu relevanten anatomischen Strukturen,
- Auswahl des gewünschten chirurgischen Protokolls (geführte Pilotbohrung, vollständig geführte Implantatbettaufrbereitung und Implantatinsertion),
- virtuelle Gestaltung der Bohrschablone,
- computergestützte Herstellung der Bohrschablone.

Digitale prothetische Implantatplanung

Die digitale Prozesskette bietet unterschiedliche Möglichkeiten für die Planung einer implantatgetragenen Restauration. Die prothetische Planung erfolgt vor der eigentlichen Implantatplanung, da die Implantatposition sowohl nach der Anatomie des Knochens als auch nach der prothetischen Restauration ausgerichtet sein sollte.

Folgende Möglichkeiten stehen für die prothetische Implantatplanung zur Verfügung (► **Tab. 2**):

- Optischer Scan eines bestehenden suffizienten Provisoriums,
- Anfertigung eines Duplikats des bestehenden Provisoriums in röntgenopakem Material zur Verwendung als Röntgenschablone. Beim zahnlosen Patienten kann dies mukosagetragen sein oder durch (provisorische) Implantate unterstützt werden.
- Wachsaufstellung und optischer Scan einer Wachsaufstellung,
- Anfertigung einer Wachsaufstellung, Überführung der Aufstellung in eine Röntgenschablone für die DVT,
- digitale Zahnaufstellung.

Wenn ein optischer Scan eines bestehenden Provisoriums für die Implantatplanung genutzt wird, kann dieses entweder mit einem Intraoralscan oder mit einem Modellscan aufgenommen werden. Beim Modellscan wird eine konventionelle Abformung mit eingegliedertem Proviso-

► **Tab. 2** Darstellung der Voraussetzungen und Arbeitsschritte für die virtuelle prothetische Planung.

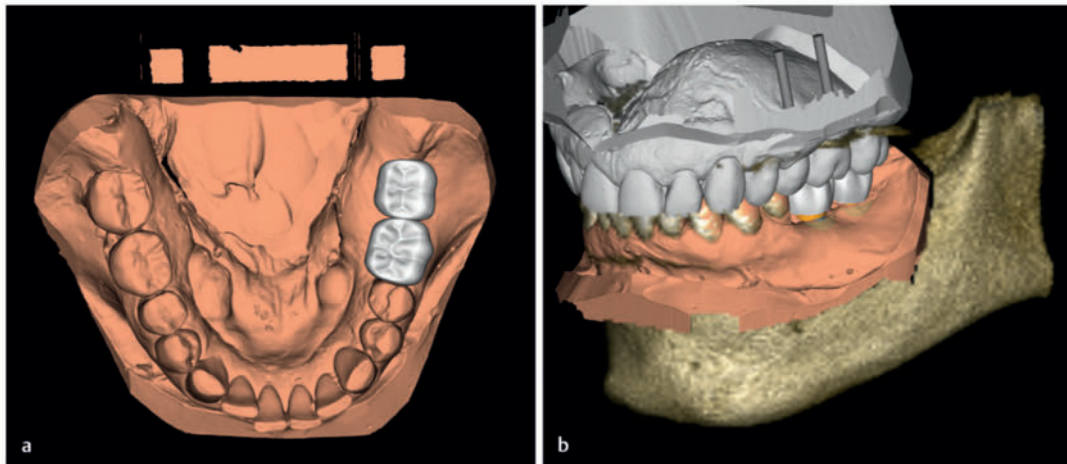
Voraussetzungen		Arbeitsschritte			
optischer Scan des Provisoriums	ästhetisch u. funktionell adäquates Provisorium	Intraoralscan der Situation	Intraoralscan mit Provisorium		
		Abformung/Modellherstellung/Modellscan Situationsmodell	Abformung/Modellherstellung/Modellscan mit Provisorium		
Überführung Provisorium in Röntgenschablone	ästhetisch u. funktionell adäquates Provisorium	Intraoralscan der Situation	Doublieren des Provisoriums in röntgenopakem Kunststoff		
Abformung/Modellherstellung/Modellscan Situationsmodell					
optischer Scan der Wachsaufstellung	–	Abformung/Modellherstellung	Wachsaufstellung	Einprobe Wachsaufstellung	Modellscan mit/ohne Wachsaufstellung
Überführung Wachsaufstellung in Röntgenschablone	–	Abformung/Modellherstellung/Modellscan Situationsmodell	Wachsaufstellung	Einprobe Wachsaufstellung	Überführung Wachsaufstellung in röntgenopakem Kunststoff (Röntgenschablone)
digitale Zahnaufstellung	Software für prothetische Planung/Implantatplanungssoftware mit Tool für digitale Zahnaufstellung	Intraoralscan der Situation, Okklusionsscan	digitale Aufstellung der prothetischen Restauration		

FALLBEISPIEL 2

Die Behandlungs- bzw. Implantatplanung kann mit der Software ICX-Magellan (3Diagnosys, 3DIEMME) von der Firma Medentis (medentis medical GmbH, Bad Neuenahr/Ahrweiler, Deutschland) durchgeführt werden. Das DVT (DICOM-Daten) und die Situationsmodelle (ggf. die Wachsauflage) werden über eine geschützte Plattform für die Datenübertragung in ein Planungszentrum übermittelt. Das Modell der Zahn- und Schleimhautoberfläche wird mit der DVT überlagert (► **Abb. 7 – 10**).



► **Abb. 7** Fallbeispiel 2. Auf Basis der in Okklusion importierten Modelle wird eine prothetische Aufstellung digital durchgeführt.



► **Abb. 8** Fallbeispiel 2. Das gewünschte Implantatsystem wird aus einer Bibliothek ausgewählt und die Implantatdimension in axialen, transversalen und tangentialen Schnittbildern angepasst. Der Behandler kann die Planung entweder eigenständig durchführen oder an das Planungszentrum weitergeben. In diesem Fall wird die vollständige Planung zur Überprüfung an den Behandler geschickt, der nach der Durchsicht die Freigabe zur Produktion der Bohrschablone gibt.

rium angefertigt und ein Gipsmodell hergestellt, das mit einem Modellscanner digitalisiert wird. Sowohl für den Intraoralscan als auch für den Modellscan sollte sowohl eine Situationsabformung ohne Provisorium und eine zweite Abformung mit Provisorium erfolgen. Die Voraussetzung dafür, dass das Provisorium für die Implantatplanung genutzt wird, ist dessen unter ästhetischen und funktionellen Aspekten betrachtete, korrekte Position und Ausformung.

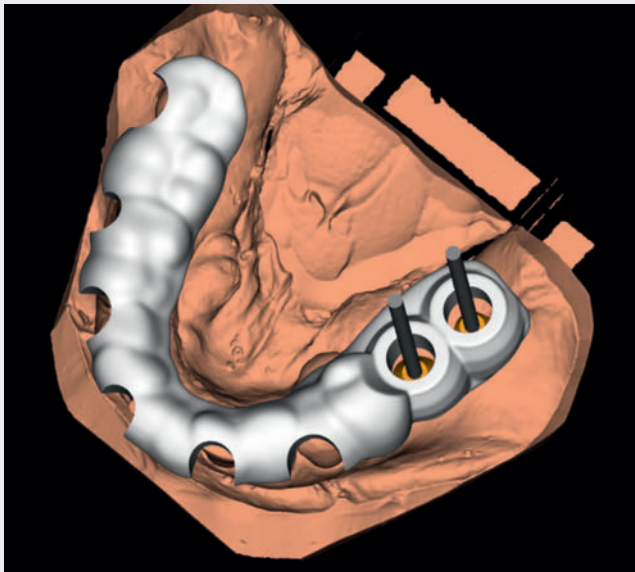
Bei einer notwendigen Korrektur des Provisoriums sollte eine Wachsauflage angefertigt werden und die korrekte Position und Ausformung der Aufstellung im Mund des Patienten überprüft werden. Danach kann der optische Modellscan der Wachsauflage auf dem Patientenmodell erfolgen.

Alternativ zum optischen Scan kann durch das Doppelieren des Provisoriums oder der Wachsauflage eine

FALLBEISPIEL 2 (FORTSETZUNG)



► **Abb. 9** Fallbeispiel 2. Die Bohrschablone wird auf dem Oberflächenmodell gestaltet und ist bei einem ausreichenden Restzahnbestand auf den Nachbarzähnen der Implantatregion abgestützt. In die Implantatposition werden Hülsen für die geführte Implantatinsertion eingesetzt.



► **Abb. 10** Fallbeispiel 2.

Röntgenschablone hergestellt werden. Eine Röntgenschablone wird aus Kunststoff hergestellt, der im Bereich der Zahnkronen mit röntgenopakem Bariumsulfat angereichert ist. Die Röntgenschablone wird während der DVT getragen und sollte eine gute Passung und Stabilität aufweisen. Die Position und Ausformung des geplanten Zahnersatzes werden in der DVT angezeigt und können im weiteren Arbeitsablauf für die Implantatplanung genutzt werden.

Eine vollständige digitale Zahnaufstellung kann ggf. in der Implantatplanungssoftware oder in einer damit verbundenen Software erfolgen.

Darstellung eines Oberflächenmodells der DVT-Daten (Segmentierung)

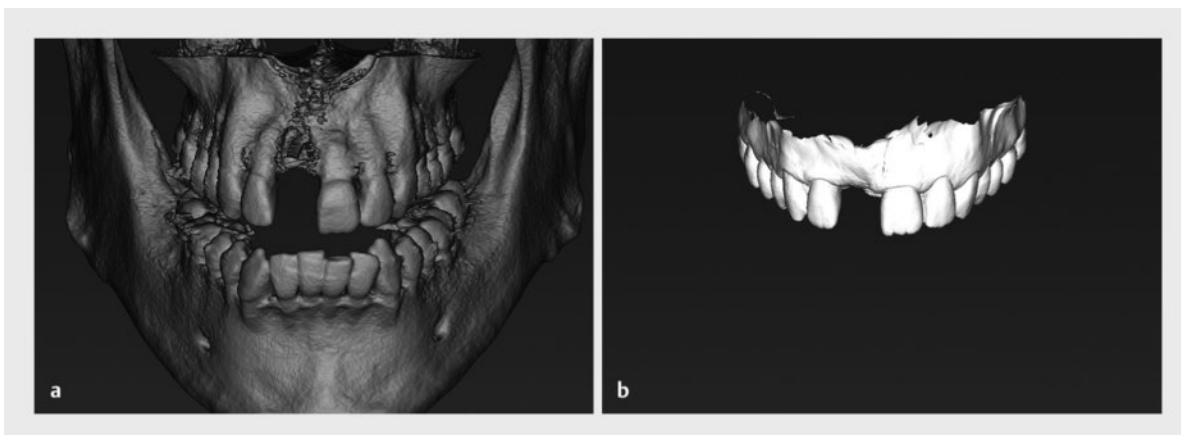
In jeder Implantatplanungssoftware wird auf der Basis der DICOM-Daten der DVT ein Oberflächenmodell dargestellt. Das Oberflächenmodell entsteht durch die selektive Darstellung einer begrenzten Spanne von Grauwerten (**Segmentierung**). Bei der Durchstrahlung wird jedem Gewebe entsprechend seiner Dichte bzw. Strahlenabsorption einer bestimmter Grauwert zugeordnet. Die Zuordnung von Gewebequalitäten zu einer gewissen Spanne von Grauwerten stammt aus der Computertomografie und wurde von Hounsfield eingeführt (Hounsfield-Einheiten). In der DVT ist die eindeutige Zuordnung von Gewebequalitäten zu Grauwerten nicht möglich. Eine Annäherung ist jedoch möglich. In der Implantatplanungssoftware kann nach automatisch vorgegeben Grauwertspannen und/oder individuell ein Oberflächenmodell des Knochens und der Zähne dargestellt werden (► **Abb. 11**).

Überlagerung von DVT und Oberflächenmodellen sowie Planungsdaten (Registrierung)

Siehe Fallbeispiel 3.

Durch die Überlagerung von DVT und Intraoralscan werden die Zahnoberfläche, das Knochenangebot in der Implantatregion und die Zahnfleischoberfläche dargestellt. Die räumliche Überlagerung von DVT und Oberflächen-scan (**Registrierung**) ist eine Voraussetzung für die weitere Implantatplanung. Die Positionierung des Implantats erfolgt unter Berücksichtigung der Informationen, die in der DVT dargestellt werden. Die Abstützung der Oberfläche auf den Zähnen bzw. der Schleimhaut wird auf der Basis des Oberflächenmodells gestaltet. Zur Vermeidung von Ungenauigkeiten bei der Übertragung der Implantatposition müssen DVT und Oberflächenmodelle daher richtig räumlich überlagert sein.

Die Überlagerung von DVT und Oberflächenmodellen erfolgt anhand der Zahnoberfläche, die in beiden Bildmodalitäten dargestellt wird (► **Abb. 15**). Der Nutzer der Implantatplanungssoftware markiert hierfür korrespondierende Bereiche auf der dargestellten Zahnoberfläche in der DVT und den Oberflächenmodellen der Zähne. Die Software kann in der Folge die räumliche Zuordnung durchführen. Bildartefakte, die in der DVT durch metallische Restaurationen entstehen, können die Identifizierung von korrespondierenden Flächen erschweren. Insbesondere bei einem geringen Restzahnbestand bzw. einer großen Anzahl von zahnärztlichen metallischen Restaurationen kann die räumliche Zuordnung nicht oder nicht genau durchgeführt werden [12]. Der hier ggf. entstehende Fehler wirkt sich direkt auf die Genauigkeit der Übertragung der geplanten Implantatposition in den operativen Situs aus.

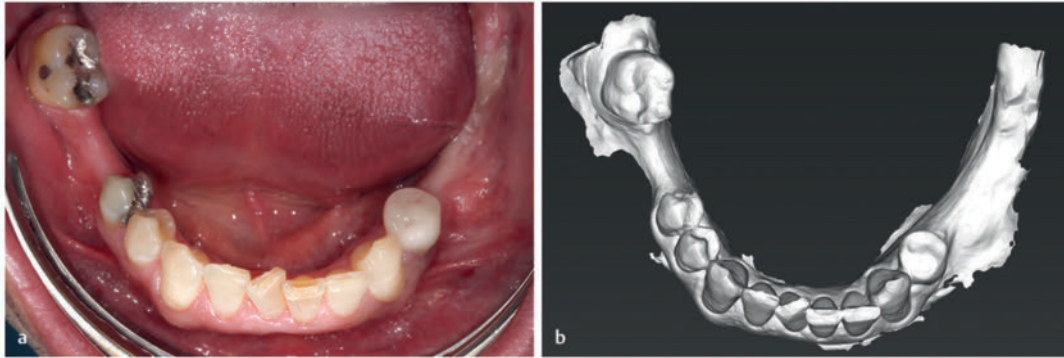


► **Abb. 11** Darstellung eines Oberflächenmodells.
a Oberflächenmodell der DVT-Daten.
b Oberflächenmodell der Zähne und Schleimhaut.

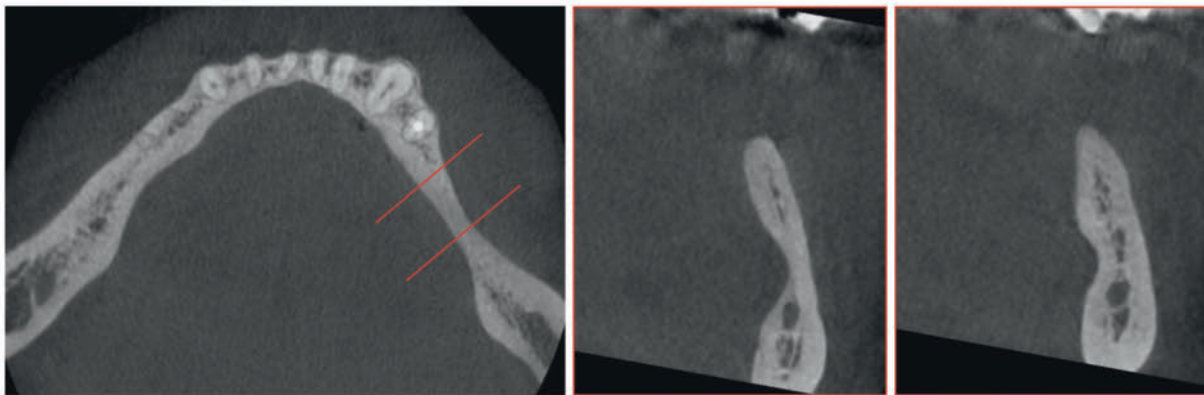
FALLBEISPIEL 3

Für die digitale Implantatplanung und geführte Implantatinsertion im Unterkiefer wurde ein vollständig digitales Vorgehen mit Intraoralscans und digitaler prothetischer Planung gewählt. Für die Freundsituation in Regio 35–37 wurde die Insertion von zwei Implantaten in Regio 35 und 36 geplant (► **Abb. 12**, **Abb. 13**).

Die Darstellung der zweidimensionalen Schnittbilder zeigt in axialer Schnittführung und in transversaler Schnittführung ein ausgeprägtes Knochendefizit im Molarenbereich des linken Unterkiefers. Insbesondere zeigt die DVT den linguale Unterschnitt des Unterkiefers, der im Molarenbereich häufig stark ausgeprägt ist und in der Panoramaschichtaufnahme nicht dargestellt werden kann (► **Abb. 14**). Der Verlauf des N. alveolaris inferior steht in den Regiones 35 und 36 nicht in Konflikt mit den geplanten Implantaten.



► **Abb. 12** Fallbeispiel 3. a Intraorale Situation. b Intraoralscan des Unterkiefers mit Zahnlosigkeit in Regio 35–37 und 46.



► **Abb. 13** Fallbeispiel 3. Darstellung zweidimensionaler Schnittbilder in axialer und transversaler Richtung, die eine ausgeprägte Alveolar-kamatrophie in Regio 35 und den unter sich gehenden linguale Anteil des Alveolarfortsatzes zeigen.



► **Abb. 14** Fallbeispiel 3. Panoramaschichtaufnahme der Ausgangssituation des Patienten mit einer Freundsituation in Regio 35–37 und einer Einzelzahn-lücke in Regio 46. Der linguale Unterschnitt wird in der Panoramaschichtaufnahme nicht sichtbar.

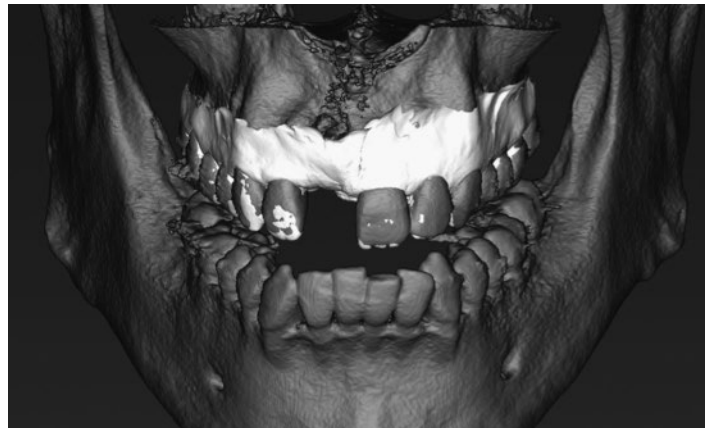
Merke

Für die Implantatplanung werden Oberflächenmodelle des Knochens und der Zähne dargestellt (Segmentierung). Nach der Segmentierung wird das Oberflächenmodell der Zahn- und Schleimhautoberfläche mit den DVT-Daten anhand der Zahnoberfläche überlagert (Registrierung).

Darstellung von zweidimensionalen Schnittbildern in axialer, transversaler und tangentialer Ansicht

Siehe Fallbeispiel 4.

In zweidimensionalen Schnittbildern wird die Implantatposition in Relation zu den relevanten anatomischen Nachbarstrukturen ausgerichtet. Die Ausrichtung der Schnittbilder erfolgt zunächst in axialer, koronaler und sagittaler Richtung (► **Abb. 19**). Hier werden das sagitta-



► **Abb. 15** Überlagerung von DVT und Intraoralscan.

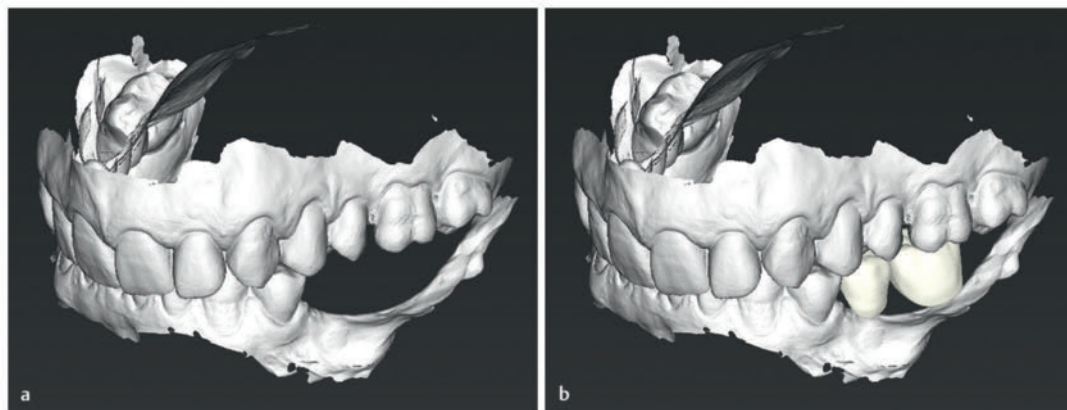
FALLBEISPIEL 4

Für die digitale prothetische Aufstellung wurden ein Situationsmodell des Unterkiefers, ein Modell des Oberkiefers sowie ein Okklusionsscan angefertigt.

Die digitale Aufstellung erfolgte durch die Auswahl von virtuellen Modellzähnen aus einer Bibliothek. Die Zähne aus der Bibliothek können in allen drei Dimensionen an die Größe der Zahnücke angepasst werden. Eine weitere Individualisierung der Zähne ist in den meisten Implantatplanungsprogrammen nicht enthalten (► **Abb. 16**).

Die zweite DVT-Aufnahme wurde nach der Knochenblockaugmentation in Regio 35–36 durchgeführt. Nach der prothetischen Planung erfolgen die Darstellung eines Oberflächenmodells der DVT und die Überlagerung von Intraoralscan und dem DVT-Oberflächenmodell anhand anatomischer Landmarken (► **Abb. 17**, **Abb. 18**).

Die Erhöhung des orovestibulären Knochenangebots wurde in axialen und transversalen Schnittbildern überprüft. In Regio 35 wurde ein Implantat mit einem Durchmesser von 4,1 mm und einer Länge von 8 mm, in Regio 36 mit einem Durchmesser von 4,1 mm und einer Länge von 10 mm (Bone Level Tapered, Straumann) ausgewählt. Die Abstände von mindestens 1,5 mm zur Knochenaußenkontur wurden überprüft. In den Schnittbildern wurde die Kronenposition eingeblendet, um eine zentrale Platzierung der Implantatachse und des Schraubenkanals für eine verschraubte implantatgetragene Prothetik zu ermöglichen.



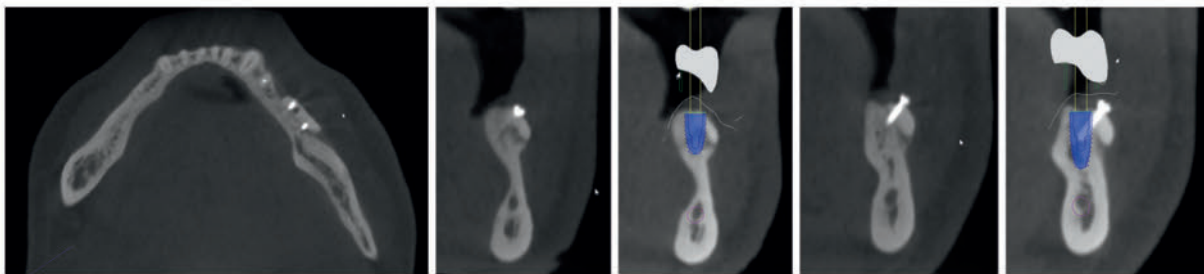
► **Abb. 16** Fallbeispiel 4.

- a Die virtuellen Situationsmodelle des Ober- und Unterkiefers in Okklusion.
- b Die Aufstellung von Modellzähnen aus einer Bibliothek in der Implantatplanungssoftware.

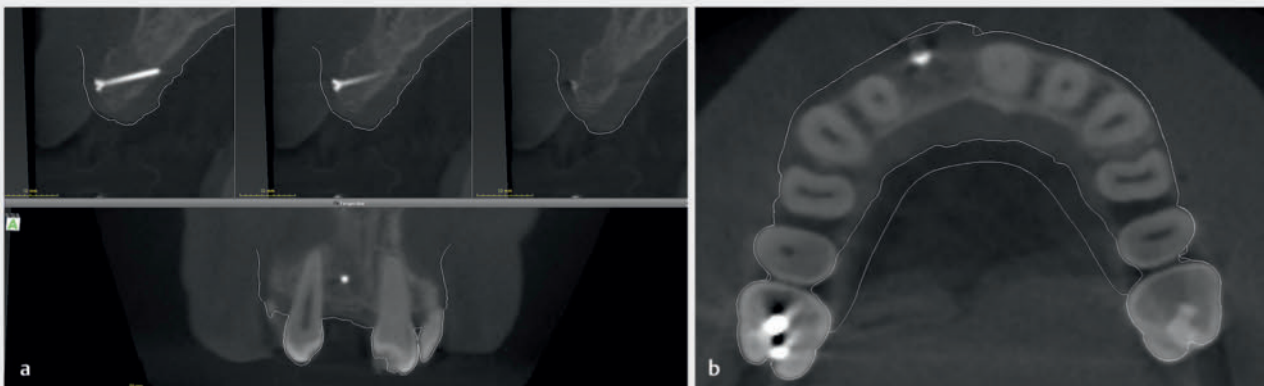
FALLBEISPIEL 4 (FORTSETZUNG)



► **Abb. 17** Fallbeispiel 4.
 a Darstellung eines Oberflächenmodells der DVT-Daten.
 b Überlagerung von DVT und Intraoralscan.



► **Abb. 18** Fallbeispiel 4. Auswahl und Positionierung des Implantats und Messung der Abstände zu relevanten anatomischen Strukturen.



► **Abb. 19** Darstellung von zweidimensionalen Schnittbildern in transversaler, tangentialer und axialer Richtung. Die weißen Linien zeigen das Oberflächenmodell der intraoralen Situation mit und ohne Provisorium in Regio 11.
 a Transversale (oben) und tangentiale (unten) Richtung. b Axiale Richtung.

le und koronale Schnittbild in transversaler und tangentialer Richtung durch den Alveolarfortsatz geführt, sodass die relevanten Knochendimensionen sichtbar werden. Im transversalen Schnittbild wird die vestibulär-orale Knochendimension evaluiert. Das tangential Schnittbild richtet sich nach einer zuvor festgelegten Panoramakurve und zeigt somit die mesiodistale Knochenausdehnung und insbesondere die mesiodistale Angulation der Nachbarzähne. Das axiale Schnittbild zeigt ebenfalls die mesiodistale und orovestibuläre Knochenausdehnung.

Bestimmung des Augmentationsbedarfs, Auswahl und Positionierung des Implantats, implantatzentrierte Darstellung und Messung der Abstände zu relevanten anatomischen Strukturen

Siehe Fallbeispiel 5.

Für die Bestimmung der Implantatposition sind die Auswahl des geeigneten Implantats und die dimensionsgetreue Darstellung der Implantatdimensionen erforderlich. Der Nutzer kann in jeder Implantatplanungssoftware aus einer Bibliothek von Implantatsystemen auswählen und das Implantat mit den adäquaten Dimensionen einsetzen. Bei der Auswahl einer Implantatplanungssoftware sollte man prüfen, ob die verwendeten Implantate in der Bibliothek enthalten sind. In der dargestellten Situation wird ein Implantat mit einem Durchmesser von 3,8 mm und einer Länge von 11 mm ausgewählt (Camlog ScrewLine, Camlog Biotechnologies AG, Basel, Schweiz).

Nach der Auswahl des Implantats können die Ansichten implantatzentriert dargestellt werden. Das Implantat wird für die Ausrichtung der transversalen, tangentialen und axialen Schnittbilder verwendet, sodass das Knochenangebot in der ausgewählten Implantatposition verzerrungsfrei dargestellt werden kann.

ZUSATZINFO

Implantatzentrierte Schnittbilder zeigen das Knochenangebot um das Implantat in allen drei Dimensionen:

- Axiale Schnittbilder zeigen einen Querschnitt durch das Implantat und die mesiodistale sowie orovestibuläre Knochendimension.
- Transversale Schnittbilder zeigen einen Längsschnitt durch das Implantat und die orovestibuläre Angulation.
- Tangentiale Schnittbilder zeigen einen Längsschnitt durch das Implantat und die mesiodistale Angulation.

Eine Mindestknochenbreite von 1,5–2 mm zirkulär um das Implantat sollte eingehalten werden. Zu diesem Zeitpunkt kann durch die Bilddiagnostik ein ggf. notwendiger Bedarf für eine vorherige oder mit der Implantatinserterion durchzuführende Knochenaugmentation festgestellt werden. In der in ► **Abb. 22** dargestellten Situation war vor der geplanten Implantatinserterion eine Knochenblockaugmentation erfolgt. In den transversalen und tangentialen Schnittbildern ist die Osteosyntheschraube sichtbar, mit der die Fixation des Knochenblocks erfolgte.

Auswahl des gewünschten chirurgischen Protokolls

Nachdem die finale Position des Implantats festgelegt ist, werden das gewünschte chirurgische Protokoll und die Lagerung der Bohrschablone ausgewählt.

Für die **geführte Pilotbohrung** wird eine Hülse geplant, die den Pilotbohrer mit systemspezifischem Durchmesser führt. Alle darauffolgenden Bohrungen werden nicht geführt und das Implantat wird ebenfalls freihändig eingesetzt. Bei der geführten Pilotbohrung ist kein Tiefenstopp der Bohrung vorhanden (► **Abb. 23**).

Bei der **geführten Implantatbettauflbereitung** (guided surgery) werden alle Bohrer und Gewindeschneider geführt. Um die Bohrer mit unterschiedlichen Durchmessern zu führen, werden Hilfsteile in die Bohrhülse eingesetzt, die für jeden Bohrer gewechselt werden müssen. Andere Systeme arbeiten ohne Hilfsteile und haben im nicht schneidenden Teil der Bohrer einen gleichbleibenden Durchmesser, der auf die Hülse abgestimmt ist. Bei der geführten Implantatbettauflbereitung wird der Bohrer ebenfalls vertikal gestoppt.

Die Implantate können entweder freihändig ohne Bohrschablone oder durch die Hülse in der Bohrschablone geführt eingesetzt (guided implant placement) werden. Bei einigen Systemen sind für die geführte Implantatinserterion spezielle Implantate mit abgestimmten Einbringpfosten bzw. Einbringhilfen erforderlich (► **Abb. 24**).

ZUSATZINFO

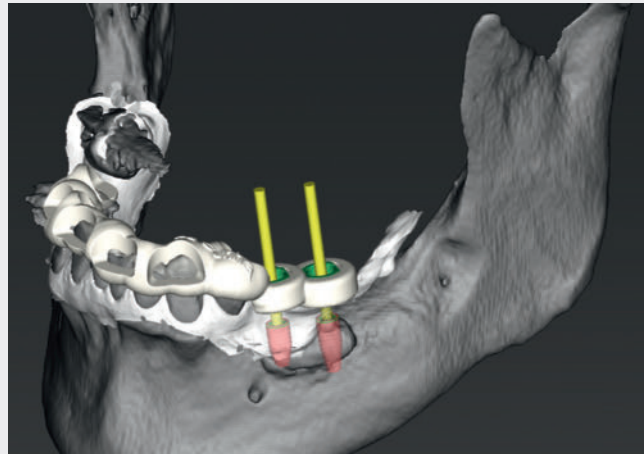
Chirurgische Protokolle mit Bohrschablone

- geführte Pilotbohrung
- geführte Implantatbettauflbereitung (guided surgery)
- geführte Implantatbettauflbereitung und geführte Implantatinserterion (fully guided implant surgery)

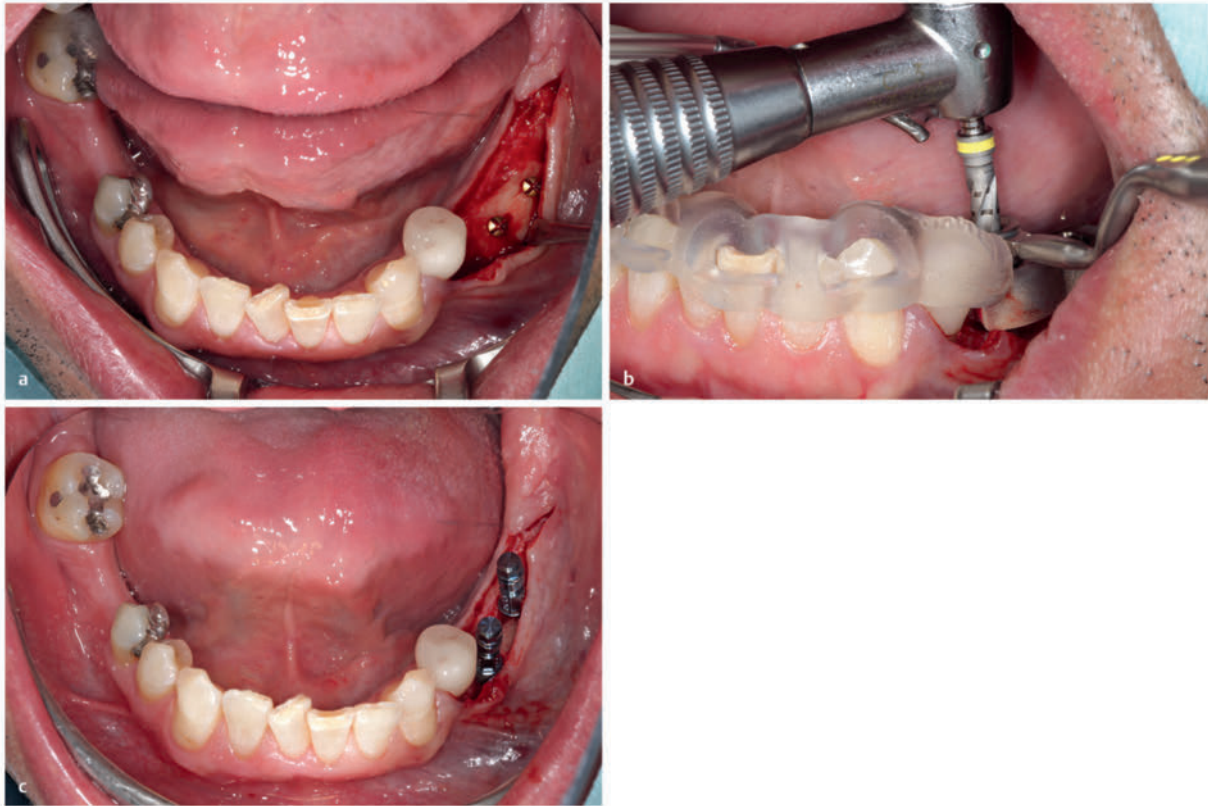
FALLBEISPIEL 5

Für den Transfer der geplanten Implantatposition wurde eine vollständig geführte Implantatbettaufrbereitung mit einer zahngetragenen Bohrschablone geplant. Die Implantatplanung und das Bohrschablonendesign wurden mit der Software coDiagnostiX (DentalWings, Montreal, Kanada) durchgeführt (► **Abb. 20**).

Die intraorale Situation nach Präparation eines Mukoperiostlappens zeigt einen vollständig eingehheilten Knochenblock in Regio 35–36. Die Bohrschablone wird auf den Nachbarzähnen abgestützt und deren Passung durch die Aussparungen kontrolliert. Das gewählte Implantatsystem verwendet Übertragungslöffel, die in die Bohrhülse eingesetzt werden und somit den Durchmesser an jeden Bohrer in der Implantatbettaufrbereitung anpassen (► **Abb. 21**).



► **Abb. 20** Fallbeispiel 5. Die Bohrschablone wird virtuell auf der Basis des Situationsmodells des Unterkiefers geplant und enthält Aussparungen für die Bohrhülsen in den geplanten Implantatpositionen.

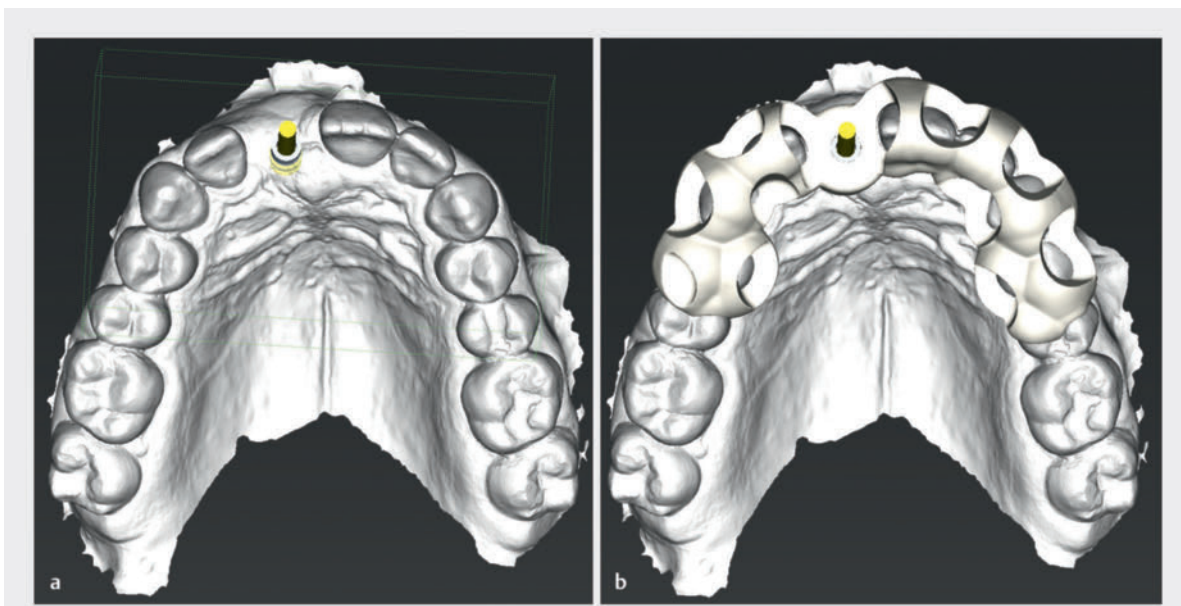


► **Abb. 21** Fallbeispiel 5.

- a Intraorale Situation nach Knochenblockaugmentation.
- b Eingesetzte Bohrschablone und Instrumentarium für die geführte Implantatinsertion.
- c Insetierte Implantate in Regio 35 und 36.



► **Abb. 22** Dimensionsgetreue Darstellung des ausgewählten Implantats in Regio 11 (Camlog ScrewLine, Durchmesser 3,8 mm und Länge 11 mm) bei Z. n. Knochenblockaugmentation mit einer Osteosyntheseschraube. Die implantatzentrierten tangentialen Schnittbilder (oben) zeigen das vertikale Knochenangebot und die orovestibuläre Knochendimension. Die implantatzentrierte tangentiale Ansicht (unten) zeigt ebenfalls das vertikale Knochenangebot und die mesiodistale Knochendimension sowie die Nachbarzahnwurzeln.



► **Abb. 23** Geführte Pilotbohrung und Lagerung der Bohrschablone.
 a Für das hier geplante Implantat in Regio 11 wurde die Pilotbohrung in einer Hülse mit einem Innendurchmesser von 2,2 mm geplant.
 b Die Bohrschablone wurde auf den Nachbarzähnen (Regio 14–24) abgestützt.



► **Abb. 24** Bohrschablonen, die mit einem 3-D-Drucker nach dem Polyjet-Verfahren hergestellt wurden.

a In Regio 21 ist eine Führungshülse aus Titan mit einem Innendurchmesser von 2,3 mm eingebracht. Der erste Bohrer der Implantatbettaufräsbereitung (Durchmesser 2,2 mm) wird in der Hülse ohne einen Tiefenstopp geführt.

b In Regio 36, 34, 33, 43, 44, 46 sind Hülsen für die vollständige Implantatbettaufräsbereitung mit speziell abgestimmten Bohrern bzw. Instrumenten für die Führung der Bohrer in den Hülsen eingebracht. Sowohl die Implantatbettaufräsbereitung als auch die Implantatinserterion wird durch die Hülsen geführt. Durch die zwei seitlichen Schäfte kann die Schablone mithilfe von Pins im Mund fixiert werden.

► **Tab. 3** Durchschnittliche Abweichungen der Implantatpositionen bei vollständig geführter Implantatinserterion [13].

	Abweichung an Implantatschulter	Abweichung an Implantatspitze	Winkelabweichung
teilweise Zahnlosigkeit	0,9 mm	1,2 mm	3,3°
vollständige Zahnlosigkeit	1,3 mm	1,5 mm	3,3°
gesamt	1,2 mm	1,4 mm	3,5°

Lagerung von Bohrschablonen

Bohrschablonen können auf Nachbarzähnen bzw. Restzähnen im Zahnbogen, auf temporären Implantaten, auf dem Alveolarknochen und auf der Schleimhaut abgestützt sein. Die Abstützung kann ebenfalls kombiniert werden, sodass eine Bohrschablone z. B. auf der Schleimhaut abgestützt ist und in der unmittelbaren Nachbarschaft eine zusätzliche Abstützung auf dem Knochen erhält. Das Ziel ist ein reproduzierbarer und stabiler Sitz der Bohrschablone. Insbesondere bei schleimhautgelagerten Bohrschablonen können zusätzliche Stabilisierungspins oder -schrauben eingebracht werden, die außerhalb der Implantationsregion eine Verankerung im Knochen ermöglichen.

Eine Schablonenlagerung auf dem Knochen erfordert eine ausgedehnte Präparation der Weichgewebe. Weiterhin beruht die Auflagerung auf der Qualität der Segmentierung des Knochens, die aufgrund von Artefakten erschwert sein kann. Die Schleimhautabstützung ermöglicht das Vorgehen nach einem Flapless-Protokoll, bei

dem die Schleimhaut vollständig auf dem Knochen belassen und in den Implantatregionen perforiert wird.

Eine zahngetragene Bohrschablone ist bei der Genauigkeit der Übertragung der geplanten Implantatposition in den chirurgischen Situs überlegen. Die Voraussetzung ist eine ausreichende Zahl und Verteilung von Zähnen im Zahnbogen. In einem kürzlich veröffentlichten systematischen Review der aktuellen Literatur wurden mittlere Abweichungen der Implantatposition bei teilweise zahnlosen Patienten von 0,9 mm an der Implantatschulter und 1,2 mm an der Implantatspitze dokumentiert. Bei vollständig zahnlosen Patienten und einer daraus folgenden Abstützung auf der Schleimhaut bzw. auf dem Knochen lagen die Abweichungen bei 1,3 mm an der Implantatschulter und 1,5 mm an der Implantatspitze (► **Tab. 3** [13]).

Computergestützte Herstellung

Additive Herstellungsverfahren – 3-D-Druck

In der Implantologie werden 3-D-Druckverfahren für die Anfertigung von Bohrschablonen und von provisorischen Versorgungungen angewendet. Die Auswahl der Materialien, die hierfür zur Verfügung steht, wird zunehmend größer. Eine wichtige Anforderung ist die Biokompatibilität, die den Einsatz in der Mundhöhle erlaubt.

Verschiedene Drucktechnologien werden beim 3-D-Druck eingesetzt. Diese umfassen Digital Light Processing (DLP), Stereolithografie (SLA), Polyjet und selektives Laserschmelzen (SLM). Das SLM-Verfahren wird vor allem für metallische Werkstoffe eingesetzt.

Für die Herstellung von Bohrschablonen-Provisorien können in der Praxis vor allem 3-D-Drucker mit dem SLA- und DLP-Verfahren eingesetzt werden. Die Herstellung einer Bohrschablone erfolgt je nach deren Größe in einem Zeitraum von 30–60 Minuten. Größere Werkstücke können mit dem DLP-Verfahren schneller gedruckt werden, da eine flächige Aushärtung anstatt einer punktförmigen Polymerisation wie beim SLA-Verfahren erfolgt. Für kleinere Werkstücke wird der Zeitunterschied geringer.

Bei allen 3-D-Druckverfahren werden Stützstrukturen bzw. Stützmaterialien verwendet. Daher ist immer eine Nachbearbeitung des Werkstücks erforderlich. Bei SLA- und DLP-Verfahren werden Stützpfiler und eine Basisplatte mitgedruckt. Diese müssen nach der Fertigstellung des Werkstücks durch Fräsen entfernt werden und ggf. die Ansatzpunkte nachbearbeitet und die Oberfläche poliert werden. Bei Polyjet-Verfahren wird das Werkstück von einer nicht polymerisierten wasser- oder öllös-

ZUSATZINFO

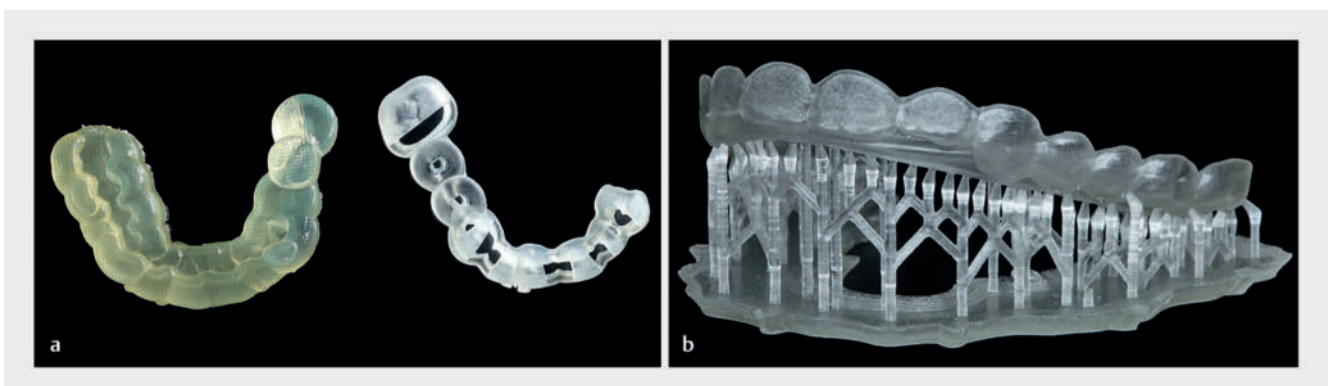
3-D-Drucktechnologie – Welche Verfahren werden in der Zahnheilkunde angewendet?

- **Digital Light Processing (DLP):** Das Werkstück wird flächenartig durch die Projektion eines Bildes jeder Schicht aus einem Flüssigkeitstank aufgebaut. Das Bild jeder Schicht entsteht durch die Anordnung von Spiegeln auf einem Halbleiterchip.
- **Stereolithografie (SLA):** Das Werkstück wird durch Fotopolymerisation mit einem punktförmigen Laser Schicht für Schicht aus einem Flüssigkeitstank aufgebaut.
- **Selektives Laserschmelzen (SLM):** Das Material wird schichtweise in Pulverform auf eine Plattform aufgetragen und durch einen punktförmigen Laser geschmolzen. Nach Erkalten des Metalls einer Schicht wird erneut Pulver aufgetragen, selektiv geschmolzen und erhärtet.
- **Polyjet:** Flüssiges Fotopolymer wird auf eine Plattform aufgetragen und mit UV-Licht ausgehärtet. Das Werkstück besteht aus übereinanderliegenden Schichten des ausgehärteten Polymers.

lichen Materialschicht umgeben. Diese kann durch Abstrahlen oder Einlage in die entsprechende Flüssigkeit entfernt werden (► **Abb. 25**).

Subtraktive Herstellungsverfahren

Zu den subtraktiven Herstellungsverfahren zählen Schleifen, Fräsen und Drehen. Seit der Verfügbarkeit vollkeramischer Werkstoffe in der Zahnheilkunde haben subtraktive Verfahren an Bedeutung gewonnen. Durch eine



► **Abb. 25** 3-D-Druckverfahren.

a Bei der Herstellung nach dem Polyjet-Verfahren ist die Bohrschablone mit einem gelartigen Supportmaterial umgeben (links), das wasserlöslich ist und mit einem Wasserstrahl entfernt wird. Die ausgearbeitete Bohrschablone (rechts) bedarf nach dem Abstrahlen keiner weiteren Nachbearbeitung.

b Bei der Herstellung nach dem SLA-Verfahren ist die Bohrschablone nach der Fertigung mit ausgehärteten Stützstrukturen umgeben, die in der Nachbearbeitung durch Fräsen bzw. Polieren entfernt werden.

stetige Erweiterung der Auswahl subtraktiv bearbeitbarer Materialien ist die Indikationsbreite dieser Verfahren gewachsen. Eine Vielzahl von Materialien wie z. B. Wachs, PEEK, PMMA, Titan, Kobalt-Chrom-Legierung, Glaskeramiken und Zirkonoxid kann gefräst werden. Die Indikationen in der Implantologie umfassen die Herstellung von individuellen Abutments und von prothetischen Suprakonstruktionen. Im Vergleich zu additiven Herstellungsverfahren ist bei der subtraktiven Fertigung der Materialverbrauch bzw. Verwurf aus ökonomischer und ökologischer Sicht nachteilig.

Beim Fräsen von Werkstücken wird ein Materialrohling in die Fräsmaschine eingespannt und von einem Schneidwerkzeug bearbeitet. Das Schneidwerkzeug bewegt sich entweder in 3 (3-Achs-Bearbeitung), 4 (4-Achs-Bearbeitung) oder in 5 Raumrichtungen beziehungsweise Rotationsachsen (5-Achs-Bearbeitung). Mit 5-Achs-Fräsmaschinen können Restaurationen mit komplizierten Geometrien wie Unterschnitten, individuelle Abutments mit Schraubenkanal oder Stege präzise hergestellt werden. Die Genauigkeit der gefrästen Werkstücke liefert vergleichbare Ergebnisse zu den konventionellen Herstellungsarten [14].

In Abhängigkeit vom Materialrohling sind verschiedene Protokolle für die Bearbeitung von Werkstücken notwendig. Dichtgesinterte Materialien, Legierungen und Kunst-

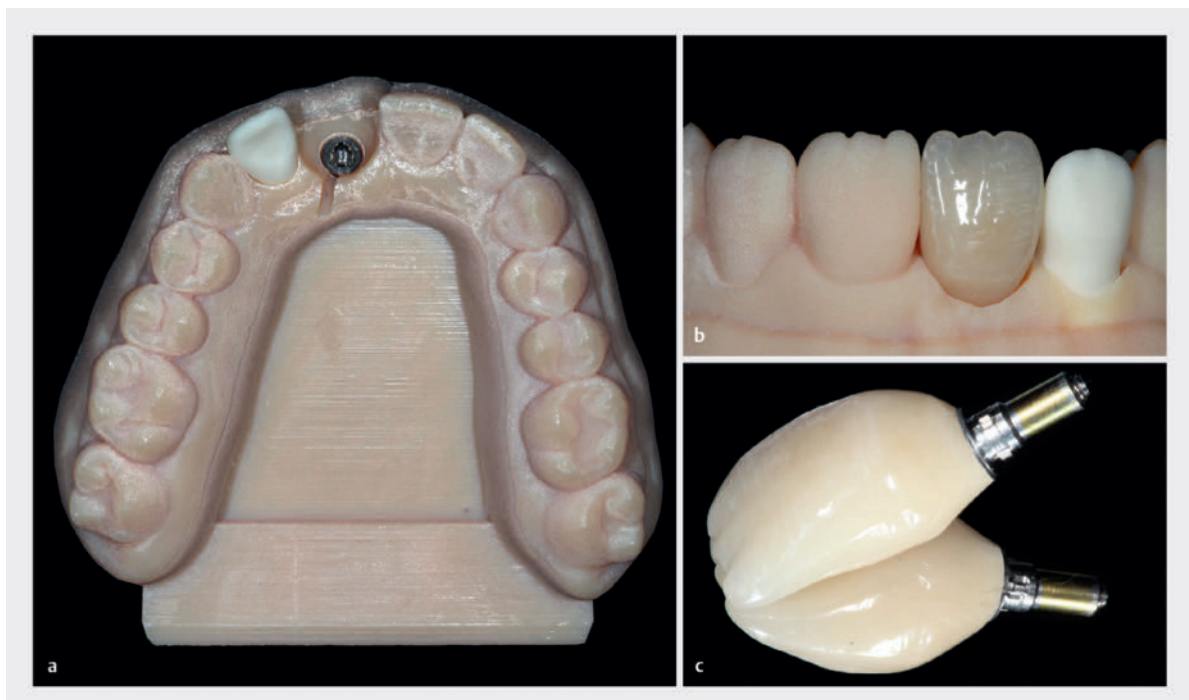
stoffe werden direkt einer Hartbearbeitung (Schleifen, Funkenerosion, Laserverarbeitung) unterzogen und benötigen keine weitere Bearbeitung. Teilgesinterte Materialien oder poröse Keramiken werden geschliffen oder gefräst und nachbearbeitet (Sintern, Glasinfiltration). Je nach Material kommt außerdem eine Nass- oder Trockenbearbeitung zur Anwendung.

Für die Herstellung kann der Behandler zwischen einem externen Fräszentrum, dem zahntechnischen Labor mit entsprechender Ausstattung oder einer Chairside-Produktion entscheiden.

Herstellung eines implantatgetragenen Langzeitprovisoriums

Für die vollständig digitale Versorgung eines Implantats werden additive und subtraktive Verfahren kombiniert. Auf Basis der digitalen intraoralen Implantatabformung wird ein Modell mit einem 3-D-Druckverfahren hergestellt und ein Implantatanalog in das Modell eingesetzt.

Das implantatgetragene Langzeitprovisorium wird aus Kunststoff (PMMA) gefräst und adhäsiv auf der Titanbasis befestigt. Alternativ kann das Kronenprovisorium additiv gefertigt werden. Nach dem Fräsen erfolgt die Individualisierung durch einen dünnen Lackauftrag (Premio Temp) (► **Abb. 26**).



► **Abb. 26** Herstellung eines implantatgetragenen Langzeitprovisoriums.
 a Modellherstellung mit einem 3-D-Druckverfahren in einem externen Zentrum (3D medical print, Lenzing, Österreich).
 b Modell mit eingesetztem Langzeitprovisorium Regio 11.
 c Implantatgetragenes Langzeitprovisorium Regio 11.

KERNAUSSAGEN

- Für eine vollständige virtuelle Darstellung des Kieferknochens und der Zähne werden dreidimensionale Röntgentechniken (CT und DVT) mit einer optischen Oberflächenbildgebung kombiniert. Diese virtuellen Oberflächenmodelle können unmittelbar intraoral mit Intraoralscannern generiert werden.
- Für die Diagnostik im Bereich der dentalen Implantologie wird die DVT häufiger als die CT genutzt, da sie eine geringere Strahlenbelastung, kurze Aufnahmezeiten und eine hohe Auflösung bietet.
- Bei der Implantatplanung in der DVT sollte zwischen den Implantaten und vitalen anatomischen Strukturen ein Sicherheitsabstand von 2 mm eingehalten werden.
- Die Indikationen für eine digitale intraorale Abformung in der Implantologie umfassen somit die Herstellung von Situationsabformung für die Behandlungsplanung und die Anfertigung von implantatgetragenen Zahnersatz auf Einzelzahnimplantaten.
- In jeder Implantatplanungssoftware wird auf der Basis der DICOM-Daten der DVT ein Oberflächenmodell dargestellt. Das Oberflächenmodell entsteht durch die selektive Darstellung einer begrenzten Spanne von Grauwerten (Segmentierung). Die räumliche Überlagerung von DVT und Oberflächenscan (Registrierung) ist eine Voraussetzung für die weitere Implantatplanung.
- Für die Bestimmung der Implantatposition sind die Auswahl des geeigneten Implantats und die dimensionsgetreue Darstellung der Implantatdimensionen erforderlich.
- Nach der Auswahl des Implantats können die Ansichten implantatzentriert dargestellt werden. Eine Mindestknochenbreite von 1,5–2 mm zirkulär um das Implantat sollte eingehalten werden.
- Bohrschablonen können auf Nachbarzähnen bzw. Restzähnen im Zahnbogen, auf temporären Implantaten, auf dem Alveolarknochen und auf der Schleimhaut abgestützt sein.
- In der Implantologie werden 3-D-Druckverfahren für die Anfertigung von Bohrschablonen und von provisorischen Versorgungen angewendet.

Interessenkonflikt

Erklärung zu finanziellen Interessen

Forschungsförderung erhalten: nein; Honorar/geldwerten Vorteil für Referententätigkeit erhalten: nein; Bezahler Berater/interner Schulungsreferent/Gehaltsempfänger: nein; Patent/Geschäftsanteile/Aktien (Autor/Partner, Ehepartner, Kinder) an Firma: nein. Patent/Geschäftsanteile/Aktien (Autor/Partner, Ehepartner, Kinder) an Firma (Nicht-Sponsor der Veranstaltung): nein.

Erklärung zu nichtfinanziellen Interessen

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Autorinnen/Autoren



Tabea Flügge

PD Dr. Studium der Zahnheilkunde an der Charité, Berlin. 2013 Promotion. 2016 Fachärztin für Oralchirurgie. 2018 Habilitation. Fachärztin für Oralchirurgie an der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsklinikum Freiburg. Klinische Schwerpunkte:

digitale Bildgebung und digitale Behandlungskonzepte in der Implantologie.



Florian Kernen

Dr. Studium der Zahnheilkunde an der Universität Basel. 2014 Promotion. 2017 Master of Dental Science und zertifizierter Prothetiker (American Board of Prosthodontics). Zahnarzt und wissenschaftlicher Mitarbeiter, Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie –

translationale Implantologie, Universitätsklinikum Freiburg. Klinische Schwerpunkte: Digitale Implantologie und Datenakquisition, komplexe prothetische Rehabilitationen.



Katja Nelson

Prof. Dr. Studium und Promotion, Freie Universität Berlin, Habilitation Humboldt Universität Berlin. Fachzahnarztausbildung Oralchirurgie in der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Virchow Klinikum, Berlin. Seit 2003 Leitung der Abteilung Implantologie und

Spezialprothetik, Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Humboldt Universität Berlin. 2010–2017 Leitung Sektion Implantologie, Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsklinikum Freiburg. 2017 W3-Professur Translationale Implantologie, Universitätsklinikum Freiburg. Forschungsschwerpunkte: Knochenphysiologie, Implantathardware, Digitale Implantologie. Klinischer Schwerpunkt: Ästhetische und komplexe Implantat-Rehabilitationen, Augmentationen.

Korrespondenzadresse

PD Dr. Tabea Flügge

Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
Universitätsklinikum Freiburg
Hugstetter Straße 55
79106 Freiburg
tabea.fluegge@uniklinik-freiburg.de

Wissenschaftlich verantwortlich gemäß Zertifizierungsbestimmungen

Wissenschaftlich verantwortlich gemäß Zertifizierungsbestimmungen für diesen Beitrag ist PD Dr. Tabea Flügge, Freiburg.

Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften. S2k-Leitlinie: Dentale digitale Volumentomographie. 05.08.2013. https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/083-005l_S2k_Dentale_Volumentomographie_2013-10-abgelaufen.pdf; Stand: 28.10.2019
- [2] Brüllmann D, Schulze RK. Spatial resolution in CBCT machines for dental/maxillofacial applications-what do we know today? Dentomaxillofac Radiol 2015; 44: 20140204
- [3] Pauwels R, Jacobs R, Singer SR et al. CBCT-based bone quality assessment: are Hounsfield units applicable? Dentomaxillofac Radiol 2015; 44: 20140238
- [4] Fokas G, Vaughn VM, Scarfe WC et al. Accuracy of linear measurements on CBCT images related to presurgical implant treatment planning: A systematic review. Clin Oral Implants Res 2018; 29 (Suppl. 16): 393–415
- [5] Bornstein MM, Horner K, Jacobs R. Use of cone beam computed tomography in implant dentistry: current concepts, indications and limitations for clinical practice and research. Periodontol 2000 2017; 73: 51–72
- [6] Ender A, Zimmermann M, Attin T et al. In vivo precision of conventional and digital methods for obtaining quadrant dental impressions. Clin Oral Investig 2015; 115: 313–320
- [7] Ender A, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. J Prosthet Dent 2016; 115: 313–320
- [8] Patzelt SB, Emmanouilidi A, Stampf S et al. Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. Clin Oral Investig 2014; 18: 1687–1694
- [9] Flügge T, van der Meer WJ, Gonzalez BG et al. The accuracy of different dental impression techniques for implant-supported dental prostheses: A systematic review and meta-analysis. Clin Oral Implants Res 2018; 29 (Suppl. 16): 374–392
- [10] Flügge TV, Schlager S, Nelson K et al. Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2013; 144: 471–478
- [11] Joda T, Wittneben JG, Brägger U. Digital implant impressions with the “Individualized Scanbody Technique” for emergence profile support. Clin Oral Implants Res 2014; 25: 395–397
- [12] Flügge T, Derksen W, te Poel J et al. Registration of cone beam computed tomography data and intraoral surface scans – A prerequisite for Guided Implant Surgery with CAD/CAM drilling guides. Clin Oral Implants Res 2017; 28: 1113–1118
- [13] Tahmaseb A, Wu V, Wismeijer D et al. The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. Clin Oral Implants Res 2018; 29 (Suppl. 16): 416–435
- [14] Papadichou S, Pissiotis AL. Marginal adaptation and CAD-CAM technology: A systematic review of restorative material and fabrication techniques. J Prosthet Dent 2018; 119: 545–551

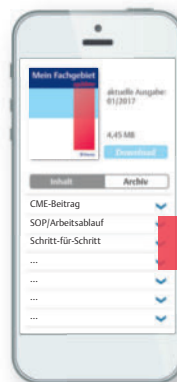
Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/a-0655-8104>
Zahnmedizin up2date 2019; 13: 507–530
© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 1865-0457

Service für unsere Leser

**up2date
immer dabei!**

Online und offline im Thieme
Wissensportal eRef plus App.



Jetzt downloaden:

www.thieme.de/eref-app

up2date – Fortbildung mit dem roten Faden

Punkte sammeln auf CME.thieme.de



Diese Fortbildungseinheit ist in der Regel 12 Monate online für die Teilnahme verfügbar. Den genauen Einsendeschluss finden Sie unter <https://cme.thieme.de>. Sollten Sie Fragen zur Online-Teilnahme haben, finden Sie unter <https://cme.thieme.de/hilfe> eine ausführliche Anleitung. Wir wünschen viel Erfolg beim Beantworten der Fragen!

Unter <https://eref.thieme.de/CXB6W5I> oder über den QR-Code kommen Sie direkt zur Startseite des Wissenstests.



Frage 1

Was ist *keine* rechtfertigende Indikation für die Anfertigung einer digitalen Volumentomografie in der Implantologie?

- A geplante Implantatinsertion im Unterkieferseitenzahnbereich
- B geplante Implantatinsertion im Oberkieferseitenzahnbereich
- C deutliche anatomische Abweichungen in der sagittalen/transversalen/vertikalen Ebene
- D Diagnose einer Periimplantitis
- E weitergehender Klärungsbedarf der knöchernen Ausheilung einer klinisch unauffälligen Extraktionsalveole

Frage 2

Welche Aussage über die digitale Volumentomografie (DVT) im Vergleich zur Computertomografie trifft für die Bilddiagnostik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde zu?

- A Die DVT ist nicht als bildgebendes Verfahren in der zahnärztlichen Praxis verfügbar.
- B Die DVT hat eine geringere Strahlenbelastung als die CT.
- C Die CT hat in der Regel eine verkürzte Aufnahmezeit und wird von Zahnärzten daher bevorzugt angefertigt.
- D Die DVT-Diagnostik beruht auf Hounsfield-Einheiten.
- E Die DVT kann bei der Planung einer schleimhautgetragenen Bohrschablone für die Darstellung der Schleimhautoberfläche verwendet werden.

Frage 3

Was sind die Indikationen für einen Intraoralscan?

- A Situationsmodelle von teilbezahnten Kiefern für die Implantatplanung
- B prothetische Versorgungen von Implantaten bei vollständiger Zahnlosigkeit
- C Funktionsabformungen für die Totalprothetik
- D Situationsmodelle bei vollständiger Zahnlosigkeit
- E ausgedehnte Defektsituationen, z. B. bei Zustand nach Tumoresektion im Kiefer

Frage 4

Was sind die Vorteile des Intraoralscans gegenüber der konventionellen Abformung?

- A Ungenauigkeiten können bei Intraoralscans ausgeschlossen werden.
- B Der Einstieg in den digitalen Arbeitsablauf gelingt mit Intraoralscans durch mehr Zwischenschritte im Vergleich zu konventionellen Abformungen.
- C Intraoralscans können unmittelbar nach der Aufnahme einer visuellen Kontrolle unterzogen und ggf. ergänzt werden.
- D Bei Intraoralscans mit einem System zur Akquisition von Farbinformationen entfällt grundsätzlich die konventionelle Farbwahl für die Herstellung einer Restauration.
- E Intraoralscans sind der konventionellen Abformung vor allem bei eingeschränkter Mundöffnung und ausgeprägtem Speichelfluss überlegen.

Frage 5

Nach der Insertion eines Implantats in einer zahnbegrenzten Lücke in Regio 11 wird die prothetische Restauration virtuell geplant und für die computergestützte Herstellung virtuell designed. Welches Verfahren ist für die Anfertigung des verschraubten, implantatgetragenen Zahnersatzes am besten geeignet?

- A Stereolithografie (SLA)
- B selektives Laserschmelzen (SLM)
- C Frästechnik
- D Drehtechnik
- E Polyjet-Verfahren

Frage 6

Welcher Technologie kann die Stereolithografie (SLA) zugeordnet werden?

- A Frästechnologie
- B Magnetresonanztomografie
- C optische Scantechnologie
- D 3-D-Druck
- E keiner der oben genannten Technologien

► Weitere Fragen auf der folgenden Seite ...

Punkte sammeln auf CME.thieme.de

Fortsetzung...

Frage 7

Bei welcher Indikation weisen digitale Implantatabformung und konventionelle Implantatabformungen vergleichbare Ergebnisse auf?

- A Implantatabformung einer Freundsituation Regio 35 und 36
- B Einzelzahnücke Regio 21 mit eingesetztem Gingivaformer
- C inseriertes Langzeitprovisorium mit ausgeformtem periimplantären Weichgewebe
- D Emergenzprofil eines Frontzahimplantats
- E Scankörper auf vier gleichmäßig verteilten Implantaten im zahnlosen Unterkiefer

Frage 8

Wie lange dauert der 3-D-Druck einer virtuell geplanten Bohrschablone?

- A 7–15 Minuten
- B 30–60 Minuten
- C 3 Stunden
- D über 5 Stunden
- E Die Dauer ist variabel und hängt von der Raumtemperatur ab.

Frage 9

Welche Aussage über die Genauigkeit der schablonengeführten Implantatchirurgie trifft zu?

- A Die Genauigkeit der tatsächlichen Implantatposition im Vergleich zur geplanten Implantatposition ist an der Implantatspitze höher als an der Implantatschulter.
- B Die Winkelabweichung zwischen tatsächlicher und geplanter Implantatposition bewegt sich zwischen 10–12°.
- C Die Genauigkeit der schablonengeführten Implantatchirurgie ist bei teilbezahnten Patienten in der Regel höher als bei zahnlosen Patienten.
- D Klinische Studien zeigen maximale Abweichungen von 1 mm zwischen geplanter und tatsächlicher Implantatposition.
- E Je größer der Implantatdurchmesser, desto ungenauer die schablonengeführte Implantologie.

Frage 10

Was beinhaltet das Scanprotokoll beim Intraoralscan?

- A Das Scanprotokoll ist eine Patientenaufklärung, welche beinhaltet, dass Patientendaten in einer herstellerbasierten Daten-Cloud gespeichert werden.
- B Das Scanprotokoll beschreibt den Pfad, mit dem das Handstück eines Intraoralscanners über die Zahnreihe geführt wird.
- C Das Scanprotokoll beinhaltet eine Checkliste, mit welcher man die 3-D- und Farbkalibrierung, die Datensicherung und die Hygiene des jeweiligen Geräts kontrolliert.
- D Das Scanprotokoll bezieht sich auf die 2018 in Kraft getretene EU-Datenschutzgrundverordnung (DSGVO).
- E Das Scanprotokoll umfasst den Scanpfad und weitere Besonderheiten, wie z.B. die Puderapplikation oder die Verwendung eines Lippenretraktors.