

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff



Digitale Behandlungskonzepte in der modernen zahnmedizinischen Prothetik

Habilitation
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Dr. med. dent. Dr. rer. biol. hum. Oliver Schubert, M. Sc.
aus Ingolstadt
2022

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Vorsitzender des Fachmentorats: Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff

Fachmentorat: Prof. Dr. med. dent. Andrea Wichelhaus
Prof. Dr. med. Wolfgang G. Locher

Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Marc Schmitter
Prof. Dr. med. dent. Bernd Wöstmann

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Für Katharina, Luis, Leopold & Carlotta

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Eigene Arbeiten	9
2.1 Digitale Abformung.....	9
2.1.1 Schubert O, Erdelt KJ, Tittenhofer R, Haito J, Bergmann A, Güth JF. Influence of direct intraoral digitization on quality of all-ceramic single crown preparations. Clin Oral Investig. 2020;24(12):4511–8. [IF: 3.573].....	9
2.1.2 Keul C, Runkel C, Güth JF, Schubert O. Accuracy of data obtained from impression scans and cast scans using different impression materials. Int J Comput Dent. 2020;23(2):129–38. [IF: 1.883].....	11
2.1.3 Kontis P, Güth JF, Schubert O, Keul C. Accuracy of intraoral scans of edentulous jaws with different generations of intraoral scanners compared to laboratory scans. J Adv. Prosthodont. 2021;13(5):316–26 [IF: 1.904].....	13
2.2 Digitale Kieferbewegungsanalyse.....	15
2.2.1 Goob J, Erdelt KJ, Schweiger J, Pho Duc JM, Schubert O, Güth JF. Reproducibility of a magnet-based jaw motion analysis system. Int J Comput Dent. 2020;23(1):39–48. [IF: 1.883].....	15
2.3 Digitale festsitzende, zahngetragene Prothetik.....	17
2.3.1 Schubert O*, Nold E*, Obermeier M, Erdelt KJ, Stimmelmayr M, Beuer F. Load bearing capacity, fracture mode, and wear performance of digitally veneered full-ceramic single crowns. Int J Comput Dent. 2017;20(3):245–62. [IF: 1.725] †	17
2.3.2 Güth JF, Liebermann A, Schubert O, Edelhoff D. Prospective clinical split- mouth study of two-wing retained resin-bonded anterior fixed dental prostheses with metallic and ceramic framework: 5-year results. Int J Prosthodont. 2022 Oct 21. [IF: 1.785]	19
2.4 Digitale herausnehmbare, zahn- und implantatgetragene Prothetik.....	21
2.4.1 Schweiger J, Güth JF, Erdelt KJ, Edelhoff D, Schubert O. Internal porosities, retentive force, and survival of cobalt-chromium alloy clasps fabricated by selective laser-sintering. J Prosthodont Res. 2020;64(2): 210–6. [IF: 4.642].....	21
2.4.2 Schubert O, Reitmaier J, Schweiger J, Erdelt KJ, Güth JF. Retentive force of PEEK secondary crowns on zirconia primary crowns over time. Clin Oral Investig. 2019;23(5):2331–8. [IF: 1.725].....	23
2.5 Digitale herausnehmbare Totalprothetik.....	24
2.5.1 Schubert O, Edelhoff D, Erdelt KJ, Nold E, Güth JF. Accuracy of surface adaptation of complete denture bases fabricated using milling, material jetting, selective laser sintering, digital light processing, and conventional injection molding. Int J Comput Dent. 2022 Jul 19;25(2):151-159. [IF: 1.883].....	24

2.6	Digitale Implantatprothetik.....	26
2.6.1	Schubert O, Schweiger J, Stimmelmayr M, Nold E, Güth JF. Digital implant planning and guided implant surgery – workflow and reliability –. Br Dent J. 2019;226:101–8. [IF: 1.306] [†]	26
2.6.2	Schubert O, Gaissmaier M, Graf T, Schweiger J, Güth JF. Digital veneering techniques for zirconia implant-supported single crowns - bond strength and clinical application. Int J Prosthodont. 2022 Jul-Aug;35(4):545-552. [IF: 1.785].....	27
2.6.3	Güth JF, Schweiger J, Graf T, Stimmelmayr M, Schubert O, Erdelt KJ. Short communication: In vitro pilot study: Are monolithic 3Y-TZP zirconia crowns too strong for titanium Implants? Int J Prosthodont., March 2021. [IF: 1.490]	29
2.6.4	Graf T, Güth JF, Diegritz C, Liebermann A, Schweiger J, Schubert O. Efficiency of occlusal and interproximal adjustments in CAD-CAM manufactured single implant crowns - cast-free vs 3D printed cast-based. J Adv Prosthodont. 2021 Dec;13(6):351-60. [IF: 1.904]	30
2.6.5	Schubert O, Beuer F, Güth JF, Nold E, Metz I. Two digital strategies in modern implantology – root-analogue implants and the digital one-abutment/one-time concept. Int J Comput Dent. 2018;21(2):115–31. [IF: 1.725] [†]	32
2.6.6	Schubert O, Beuer F, Schweiger J, Güth JF. Digital Tissue Preservation Concept: A Workflow for Guided Immediate Implant Placement and Restoration. J Prosthodont. 2019;28(6):613–7. [IF: 2.172] [†]	33
2.6.7	Schubert O, Edelhoff D, Schweiger J, Güth JF. Atraumatic intraoral scans and virtual hybrid casts for custom implant abutments and zirconia implants: Accuracy of the workflow. J Prosthet Dent. 2021 Sep 29;S0022-3913(21)00426-1. Online ahead of print. [IF: 3.426].....	34
2.6.8	Schubert O, Güth JF, Beuer F, Nold N, Edelhoff D, Schweiger. Double crown rescue concept – clinical and technical workflow. Int J Comput Dent. 2020;23(3):281–92. [IF: 1.883] [†]	36
3	Diskussion.....	37
3.1	Digitale Abformung.....	37
3.2	Digitale Kieferbewegungsanalyse.....	40
3.3	Digitale festsitzende, zahngetragene Prothetik.....	41
3.4	Digitale herausnehmbare, zahn- und implantatgetragene Prothetik.....	44
3.5	Digitale herausnehmbare Totalprothetik.....	47
3.6	Digitale Implantatprothetik.....	48
4	Zusammenfassung und Ausblick.....	58
5	Literaturverzeichnis.....	62
6	Gesamtpublikationsverzeichnis – Publikationen mit Impact Faktor.....	82
6.1	Originalarbeiten als Erst- oder Letztautor.....	82

6.2	Originalarbeiten als Koautor	83
6.2	Kasuistiken (Techniken/Anwendungen).....	84
6	Danksagung.....	85

Abkürzungsverzeichnis

AM	Additive manufacturing (additive bzw. generative Fertigung)
ASCII	American standard code for information interchange (7-Bit-Zeichencodierung)
BA	Benett angle (Bennettwinkel)
CAD/CAM	Computer-aided design/computer-aided manufacturing bzw. computer-aided machining (computergestützte Konstruktion/Gestaltung und Fertigung)
CNC	Computerized numerical control (computergestützte numerische Steuerung)
CT	Computertomografie
DICOM	Digital imaging and communications in medicine (digitale Bildgebung und -kommunikation in der Medizin)
DLP	Digital-Light-Processing
DVT	Digitale Volumetomografie (dreidimensionales Röntgenverfahren)
DMLS	Direct metal laser sintering (direktes Metalllasersintern)
DTPC	Digital Tissue Preservation Concept (digitales Konzept zum Weichgewebeerhalt um Implantatabutments/-kronen)
DVS	Digital Veneering System (digitales Verblendsystem)
FDM	Fused deposition modeling (Schmelzschichtung)
FEA	Finite element analysis (Finite-Elemente-Analyse, auch Finite-Elemente-Methode [FEM])
FFF	Fused filament fabrication (Schmelzschichtung)
IOS	Intraoralscanner
IQR	Interquartile Range (Interquartilsabstand)
KI	Künstliche Intelligenz

Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission)
LFS	Low force stereolithography
LRF	Laser rapid forming (additive Herstellungstechnologie, ähnlich dem selektiven Laserschmelzen)
LED	Light-emitting diode (lichtemittierende Diode)
MDP	10-Methacryloyloxydecyl-Dihydrogen-Phosphat (Monomer)
MIC	Münchener Implantatkonzept (digitales One-Abutment/One-Time-Konzept)
MMA	Methacrylsäuremethylester
NIRI	Near infrared imaging (Nahinfrarottechnologie)
PEEK	Polyetheretherketon
PICN	Polymer-infiltrated ceramic network (Polymerinfiltriertes keramisches Netzwerk)
PMMA	Polymethylmethacrylat
RAI	Root Analog Implant (wurzelanaloges Implantat)
RBFDP	Resin-Bonded Fixed Dental Prosthesis (Adhäsiv- oder Klebebrücke)
RNC	Resin nano-ceramic (auch: Nano-ceramic resin) (Kompositwerkstoff mit nanoskaligen Keramikfüllern)
RMSE	Root-Mean-Square-Error (Wurzel, die aus dem Mittelwert der Quadrate aller Abweichungen berechnet wird)
RP	Rapid prototyping (schneller Modellbau, Oberbegriff für additive Fertigungstechnologien)
SBS	Shear bond strength (Scherverbundfestigkeit)
sCPIA	sagittal Condylar Path Inclination Angle (sagittaler Kondylenbahnneigungswinkel)
SD	Standard deviation (Standardabweichung)

SLA	Stereolithografie
SLM	Selective laser melting (selektives Laserschmelzen)
SLS	Selective laser sintering (selektives Lasersintern)
STL	Stereolithografie, Backronym: „Standard Tessellation Language“, „Standard Triangle Language“ (ein Standardformat für 3-D-Geometrie, in ASCII- oder Binärformat)
3-DP	3D printing (3-D-Druck; de facto Oberbegriff für additive Fertigungstechnologien)

Aus urheberrechtlichen Gründen können die Originalpublikationen in der vorliegenden Habilitationsschrift nicht mit abgedruckt werden. Die DOI-Nummer bzw. ein entsprechender Link kennzeichnen daher die Quelle.

1 Einleitung

Die enormen Fortschritte der letzten Jahre auf dem Gebiet der computergestützten Konstruktion und Fertigung (computer-aided design/computer-aided manufacturing, CAD/CAM) haben die Arbeitsabläufe oder „Workflows“ in der zahnärztlichen und dentaltechnologischen Routine grundlegend verändert. Die modernen Verfahren bieten durch Prozessstandardisierungen vielversprechende Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz, Qualität und Sicherheit. Darüber hinaus lässt der Einsatz interessanter Werkstoffe in Form industriell gefertigter Materialrohlinge optimierte physikalische und chemische Eigenschaften des Zahnersatzes erwarten [24, 121]. Die digitale Archivierung von Oberflächen- und Konstruktionsdaten spart Lagerkapazitäten und erlaubt, falls nötig, eine ortsunabhängige Neuanfertigung mit oder ohne Änderungen binnen kürzester Zeit und mit minimalem Aufwand.

Lange fand die CAD/CAM-Technologie vor allem bei der Herstellung von Inlays, Kronen, Brücken und individuellen Implantataufbauten Anwendung und beschränkte sich vor allem auf die subtraktive, also frästechnische Verarbeitung von Keramiken und Metallen [84, 121]. Allerdings besitzt gerade die rasante Entwicklung im Bereich additiver Herstellungsvarianten – verallgemeinernd „3-D-Druck“ genannt – das Potenzial, eine Vielzahl innovativer Impulse zu setzen [71, 172]. Zwar sind die Anwendungsbereiche der additiven Fertigung in der Zahnmedizin noch begrenzt, und der sinnvolle klinische Einsatz beschränkt sich derzeit in erster Linie auf chirurgische Schablonen und Modelle [18, 162], doch der technische Fortschritt eröffnet immer neue Möglichkeiten [8, 146]. Vor allem bei der Herstellung großvolumiger Bauteile wie beispielsweise in der herausnehmbaren Teil- oder Totalprothetik scheint der Einsatz dieser Technologien vielversprechend.

Die dentale digitale Prozesskette umfasst drei grundlegende Arbeitsschritte: Nach der Erfassung der Oberflächendaten erfolgen die Datenverarbeitung und schließlich die Herstellung des eigentlichen Werkstücks [190]. Der Intraoralscan als logischer Einstieg in den dentalen digitalen Workflow hat sich zu einem ernst zu nehmenden Konkurrenten für die konventionelle Abformung entwickelt und seine klinische Alltagstauglichkeit bewiesen. Intraoralscanner (IOS) erreichen bereits heute für Scans bis zur Größe eines Quadranten dieselbe, teilweise sogar eine höhere Genauigkeit [53, 85]. Die Auswirkungen

des intraoralen Scannens, der digitalen Fertigung und der Güte der Präparation auf die Qualität von CAD/CAM-hergestellten Restaurationen waren bereits Gegenstand verschiedener Untersuchungen [20, 21, 132, 145]. Der „umgekehrte Effekt“, also der mögliche Einfluss des Digitalisierungsmodus auf die Qualität von Präparationen für vollkeramische Restaurationen, stand bisher nicht im Fokus des wissenschaftlichen Interesses, könnte sich aber als relevant erweisen.

Lässt die Situation einen Intraoralscan nicht zu, kann der Einstieg in den digitalen Workflow mittels eines Laborscans der Abformung, also der Negativform, oder des entsprechenden Gipsmodells erfolgen. Dies ist wesentlich, weil für die Anwendung des Intraoralscanners im Rahmen von Ganzkieferabformungen, Abformungen zahnloser Kiefer oder Abformungen mehrerer Implantate noch keine uneingeschränkte Empfehlung abgegeben werden kann [4, 54, 88, 186]. Darüber hinaus verfügt eine nicht unbedeutende Zahl von Zahnarztpraxen bis heute nicht über einen Intraoralscanner oder verwendet ihn nicht ausschließlich. Daher werden die konventionelle Abformung und die nachfolgende Digitalisierung der Abformung oder des Modells auch in absehbarer Zukunft ein elementarer Bestandteil der zahnärztlichen Routine sein. Da die Herstellung eines Gipsmodells und dessen anschließende Digitalisierung methoden- und materialbedingt einige Nachteile bergen [38, 137], könnte sich ein hybrider, „semidigitaler“ Workflow einer konventionellen Abformung mit anschließendem direktem Abformungsscan als nützlich erweisen.

Eine besondere Herausforderung bei der digitalen intraoralen Oberflächenerfassung stellt der Intraoralscan zahnloser Kieferabschnitte, insbesondere gänzlich unbezahnter Kiefer, dar. Für das korrekte Zusammenfügen der Einzelbilder beim Scan sind eindeutig erkennbare Oberflächenstrukturen erforderlich, um Überlagerungsfehler zu verringern und eine räumliche Verzerrung des dreidimensionalen virtuellen Modelldatensatzes zu vermeiden. Im Rahmen dieses Aneinanderheftens ist bei zahnlosen Kieferabschnitten demnach ein schlechteres Ergebnis zu erwarten als beim Vorhandensein sich morphologisch abhebender, unveränderlicher (Zahn-)Strukturen [10, 136]. In diesem Zusammenhang ergeben sich Fragestellungen in Bezug auf die grundsätzliche Eignung intraoraler Scanner für die Anwendung und auf die Überlegenheit spezifischer physikalischer Prinzipien bei der lichtoptischen Erfassung und somit bestimmter Scannersysteme.

Nach der Aufnahme der Oberflächendaten besteht der nächste logische Schritt in der dentalen digitalen Prozesskette in der Erfassung der individuellen Bewegungen des Unterkiefers, deren diagnostischer Auswertung und dem Transfer der gewonnenen Informationen in einen virtuellen Artikulator und somit den zukünftigen Zahnersatz oder ein anderes Therapiemittel, wie beispielsweise einen adjustierten Aufbissbehelf [3, 97, 106]. Die verfügbaren Systeme zur digitalen Erfassung von Unterkieferbewegungen nutzen optische und ultraschall- oder magnetfeldbasierte Technologien und haben jeweils methodische Vor- und Nachteile [97]. Grundsätzlich sollte es das Ziel der Entwicklung sein, möglichst verlässliche, leicht anwendbare Systeme zu schaffen, die sich komplikationsarm in den digitalen Workflow einbinden lassen.

Nach der umfassenden Akquise aller für den Behandlungserfolg relevanten Daten erfolgen das Design und schließlich die Herstellung des Zahnersatzes. Festsitzender vollkeramischer Einzelzahnersatz stellt einen wesentlichen Indikationsbereich der computergestützten Fertigung dar und ist in der zahnärztlichen Praxis längst zur bewährten Normalität geworden [9, 121]. Während monolithische Restaurationsvarianten aus Zirkonoxid oder Lithiumdisilikat gute Alternativen im Seitenzahnbereich bilden [115], ist eine Verblendung unter ästhetischen Aspekten, aber auch hinsichtlich einer effektiven Kombination vorteilhafter mechanischer, biologischer und optischer Materialeigenschaften in vielen Fällen sinnvoll. Bei klassisch im Schichtverfahren verblendeten zirkonoxidgestützten Restaurationen sind Verblendungsfrakturen die vorherrschende technische Komplikation und ein bedeutsames klinisches Problem [153]. Innovative digitale Konzepte könnten helfen, die Verblendungen langlebiger und die Arbeitsprozesse effizienter zu gestalten.

Neben Einzelzahnkronen werden auch Brückenversorgungen seit Langem erfolgreich im CAD/CAM-Verfahren aus verschiedenen Materialien wie Keramiken, kunststoffbasierten Werkstoffen oder Metallen gefertigt [122, 183, 211]. Eine Besonderheit stellen Adhäsiv- oder Klebebrücken dar, die sich zum Ersatz oberer lateraler und unterer Schneidezähne eignen. Diese interessante Alternative zu Implantaten und konventionellen prothetischen Versorgungen eignet sich besonders für den Einsatz bei jungen Patienten mit noch nicht abgeschlossenem Kieferwachstum, weil sie nur eine minimale Substanzreduktion im Zahnschmelz erfordert, zügig umzusetzen ist und dabei exzellente Ergebnisse und Überlebensraten aufweist [116,

120]. Digitale Technologien können bei der Herstellung dieser Adhäsivbrücken nutzbringend zum Einsatz kommen [156]. Bei der Gestaltung muss die Frage nach der Art des Restaurationsmaterials, also metallgestützt oder vollkeramisch, beantwortet werden und danach, ob die Brücke ein- oder zweiflügelig, also an einem oder an zwei Nachbarzähnen befestigt werden soll.

Während festsitzende Restaurationen auf Zähnen und Implantaten bereits seit Langem routinemäßig und in großer Zahl digital gefertigt werden, verlief die Transformation im Bereich der herausnehmbaren Klammerprothetik lange Zeit eher verhalten. Dass ein erheblicher Bedarf an einer effizienten Einbindung der Modellgussprothetik – als Regelversorgung der gesetzlichen Krankenkassen in Deutschland – in die digitale Prozesskette besteht, ist jedoch evident [34]. Die Schwierigkeiten liegen unter anderem darin, dass die bewährte digitale Herstellungsvariante, das CNC-Fräsen, die Herstellung komplexer, großer und zugleich graziler Bauteile wie Teilprothesengerüste aus harten Nichtedelmetalllegierungen nicht effizient leisten kann. Die in diesem Zusammenhang ökonomisch weitaus interessantere Herstellung mittels der Lasersinterertechnologie könnte in Zukunft das Produktionsverfahren der Wahl darstellen. Allerdings ist zu beachten, dass sich die metallurgischen Eigenschaften einer Legierung bei additiv gefertigten Objekten in vielerlei Hinsicht von denen bei konventionell hergestellten Bauteilen unterscheiden [155]. Daher müssen jeder digitale Fertigungsansatz und das Produkt dieser neuartigen Fertigung vor der klinischen Anwendung einer umfassenden In-vitro-Untersuchung unterzogen werden.

Neben Klammern bieten auch Doppelkronensysteme die Möglichkeit, Zahnersatz herausnehmbar an Zähnen und/oder Implantaten zu verankern [107, 143]. Ob Friktionsteleskop [30], Konuskrone [95] oder Galvanotechnik [45], Doppelkronen übertragen Kaukräfte effektiv in Achsrichtung des Pfeilerzahns oder der Implantatkomponenten. Darüber hinaus bieten sie Führung, sicheren Halt und Schutz vor Dislokation sowie einen breiten Indikationsbereich, gute Hygienefähigkeit und unkomplizierte Erweiterungsmöglichkeiten [102, 103]. Die digitale Transformation und der Einsatz innovativer Werkstoffe könnten auch im Rahmen der Doppelkronenprothetik helfen, Therapiekonzepte sinnvoll zu verändern und Arbeitsabläufe im Sinne einer modernen computergestützten Behandlungsstrategie zu optimieren. Seine ästhetischen Vorzüge, seine überlegenen physikalischen Eigenschaften und seine hohe

Biokompatibilität machen Zirkonoxid zu einem interessanten Material, das viele Anforderungen der modernen Zahnmedizin erfüllt [122]. Ein weiteres Material, das bereits seit Langem in der Medizin als thermoplastischer Hochleistungskunststoff mit günstigen physikalisch-chemischen Eigenschaften verwendet wird, ist PEEK [99]. Die Kombination der spezifischen Eigenschaften dieser Materialien bei der Herstellung von Primär- und Sekundärkronen könnte sich als sinnvoll erweisen [117], muss aber ihre Eignung für die Indikation zunächst noch unter Beweis stellen.

Die Totalprothetik wurde erst spät von der Digitalisierung in der Zahnmedizin und der dentalen Technologie erfasst und stellt diese vor beträchtliche Herausforderungen, die eine umfassende Implementierung in die zahnärztliche Routine bisher verhindert haben. Neben dem noch nicht realisierbaren „Funktionsintraoralscan“ [186] und Schwierigkeiten bei der Festlegung individueller ästhetischer und funktioneller Parameter [28] bestehen auch ökonomische Hemmnisse. Bei der Fertigung von Prothesenbasen kommt der möglichst exakten Formkongruenz mit dem mukosalen Prothesenlager eine besondere Bedeutung zu, weil diese den Halt der Versorgung und eine gleichmäßige Verteilung der Belastung auf die Schleimhaut gewährleistet und damit vor unerwünschten Effekten wie einer Reduktion der Saugwirkung oder schmerzhaften Druckstellen und Stomatopathien schützt [40, 49]. Während sich subtraktiv gefertigte digitale Totalprothesen werkstoffwissenschaftlich und klinisch verschiedentlich bewährt und als der konventionellen Fertigung teilweise überlegen gezeigt haben [13, 171], liegen diesbezüglich für additiv verarbeitete Materialien nur wenige Erkenntnisse vor.

Die Implantologie als integraler Bestandteil der modernen restaurativen Zahnheilkunde mit bemerkenswerten Erfolgsquoten [81, 126] und die Implantatprothetik profitieren besonders von fortschrittlichen digitalen Behandlungsstrategien, die zu besser vorhersagbaren Ergebnissen, geringerer Invasivität, niedrigeren Komplikationsraten und höherer Effizienz beitragen können [72, 128]. In diesem Zusammenhang sind ein stringentes prothetisch-implantologisches „Backward-Planning“ und eine schablonengeführte Implantatchirurgie auf Basis dreidimensionaler Röntgen- und intraoraler Oberflächendaten von großem Nutzen. Die schablonengeführte Implantatchirurgie birgt jedoch auch spezifische Risiken und Fehlerquellen, die erkannt und sorgfältig berücksichtigt werden müssen, um Komplikationen zu vermeiden.

Nicht nur die prothetisch-implantologische Planung und die chirurgische Intervention können sinnvoll in den digitalen Workflow eingebunden werden, sondern auch die Digitalisierung der Arbeitsprozesse in der Implantatprothetik bietet beträchtliche Vorteile, etwa durch die Senkung der Produktionskosten, die Steigerung der Zeiteffizienz und die Erfüllung der Erwartungen der Patienten an ein zeitgemäßes Behandlungskonzept [79, 128]. In diesem Zusammenhang gewinnt die Zirkonoxidkeramik immer mehr an Bedeutung, sei es als Gerüst oder als monolithisches Restaurationsmaterial, als alternatives Implantatmaterial oder, aufgrund seiner speziellen Eigenschaften, als idealer Werkstoff für Implantatabutments [130, 182]. Verblendetes Zirkonoxid ist anfällig für Verblendungsfrakturen, das sogenannte Chipping, weshalb sein Einsatz als monolithisches Restaurationsmaterial für implantatgetragene Einzelkronen vielversprechend scheint [141]. Er könnte jedoch die schwächste Stelle an die metallischen Komponenten des Implantat-Kronen-Komplexes verlagern und bei extremer Belastung das Implantat schädigen. Bewährt haben sich in der implantatgetragenen Einzelzahnprothetik sogenannte Hybridabutmentkronen, entweder aus monolithischem Lithiumdisilikat oder aus einer Lithiumdisilikatverblendung, die auf ein Zirkonoxidabutment aufgesintert wird. Eine Klebebasis aus Titan stellt die Verbindung zwischen dem Implantat und der Krone her [47]. Eine Alternative könnten Verblendungen bilden, die adhäsiv am Zirkonoxid befestigt werden. Der Verzicht auf das Sintern ermöglicht den Einsatz neuartiger Hybridmaterialien mit Kunststoffanteilen wie PICN (beispielsweise Vita Enamic, VITA Zahnfabrik) oder RNC (beispielsweise Lava Ultimate, 3M, Seefeld). Diese Werkstoffe mit der Zirkonoxidkeramik zu kombinieren und die verschiedenen Materialeigenschaften effektiv zu nutzen, könnte besonders in der Implantatprothetik interessante Optionen eröffnen.

Während sich die subtraktive Fertigung als zuverlässig erwiesen hat und weithin etabliert ist, wurde die additive Fertigung erst viel später für zahnmedizinische Indikationen übernommen [190]. Additiv hergestellte Modelle können als Arbeitsmodelle zur Bearbeitung und Fertigstellung von Zahnersatz dienen [146], allerdings reicht deren Genauigkeit noch nicht aus, um auf dieser Basis Restaurationen von Grund auf herzustellen [134, 146]. Insbesondere bei Implantatmodellen können sich Ungenauigkeiten des Modells selbst, aber auch der übertragenen Implantatposition zu

einer beträchtlichen Abweichung summieren [32], was sich ungünstig in der Passgenauigkeit der endgültigen Restauration niederschlagen könnte. Das führt zu der Überlegung, dass ein vollständig digitaler, modellfreier Workflow, der methodenbedingt viele potentielle Fehlerquellen ausschließt, dazu beitragen könnte, die Genauigkeit des Zahnersatzes zu verbessern und dabei die Effizienz zu steigern.

Digitale Technologien können nicht nur bei der umfassenden prothetisch-implantologischen Planung und der späteren Fertigung des Zahnersatzes von großem Nutzen sein, sondern auch helfen, klinische Protokolle im Sinne einer geringeren Invasivität bei gleichzeitig gesteigerter Effektivität zu optimieren. So können beispielsweise mit dem „digitalen One-Abutment/One-Time-Konzept“ (auch „Münchener Implantatkonzept“, MIC) häufige Abutmentwechsel und damit unnötige Traumatisierungen des Weichgewebes vermieden werden. Die Implantatposition wird mittels Intraoralscanner und Scanbody intraoperativ erfasst. Während der geschlossenen Einheilphase wird die Implantatkrone im CAD/CAM-Verfahren gefertigt und kann unmittelbar bei der Freilegungsoperation eingegliedert werden. Damit kann auf das Einbringen eines Gingivaformers und die anschließende Abformung verzichtet werden, und die Schleimhaut kann ungestört an die definitive Versorgung anliegend abheilen [23, 48, 160]. Weitere interessante Ansätze sind die Verwendung eines scanbaren Gingivaformers und die Eingliederung des definitiven Abutments unmittelbar bei der Implantation [1, 14, 161]. Wenn zuvor die Oberfläche des Abutments im Labor gescannt wurde oder die originalen CAD-Daten vorliegen, ist es möglich, mit diesen die Daten eines IOS zu fusionieren und ein virtuelles „Hybridmodell“ zu erzeugen, bei dem die fehlenden Anteile des Abutments entsprechend ergänzt werden. Dieses Protokoll, auch „Digital Tissue Preservation Concept“ [161] genannt, ermöglicht ein effizientes und minimalinvasives klinisches Vorgehen, weil es nicht mehr notwendig ist, das gesamte Abutment mit dem Intraoralscan zu erfassen, um ein Modell mit Abutmentoberfläche inklusive „Präparationsgrenze“ in bester Qualität und korrekter Lagebeziehung zu den übrigen Zähnen herzustellen. Wie viel der Abutmentoberfläche intraoral korrekt gescannt werden muss, um verlässlich präzise virtuelle Hybridmodelle zu generieren, sollte vor einer routinemäßigen klinischen Anwendung des Verfahrens geprüft werden.

Neben der Optimierung der Arbeitsprozesse und der Verwirklichung neuer Konzepte und Strategien kann die digitale Technologie in einigen Fällen auch dazu beitragen, die

Funktion von konventionell hergestelltem, hochwertigem Zahnersatz zu erhalten oder wiederherzustellen. Wenn beispielsweise in einer Doppelkronenprothese ein Pfeilerzahn verloren geht, wird die Sekundärkrone meist mit Kunststoff aufgefüllt, und die Prothese wird weitergetragen. Da sich durch die Veränderung der Abstützung aber die biomechanischen Belastungsverhältnisse verändern, können in der Folge Einbußen an Stabilität und Kaukomfort sowie negative Auswirkungen auf die verbleibenden Pfeiler nicht ausgeschlossen werden. Durch den Einsatz moderner computergestützter Verfahren könnte dies in vielen Fällen vermieden werden. Wird der verloren gegangene Pfeilerzahn mithilfe digitaler Planung und navigierter Implantation durch ein Implantat ersetzt, kann anschließend mittels eines CAD/CAM-gefertigten Mesoabutments die originale Primärkrone wieder befestigt werden. Dadurch kann die Funktionalität der Prothese erhalten und weiteren Schäden vorgebeugt werden.

Dieses Habilitationsprojekt soll im Folgenden einen Überblick und Aufschluss über die Entwicklung, die Erprobung und den Einsatz einiger innovativer digitaler Techniken in den Kernbereichen der modernen zahnmedizinischen Prothetik geben. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Praxisnähe sowohl der Konzepte als auch der wissenschaftlichen Prüfung im Sinne einer gegebenen oder perspektivischen praktischen Anwendbarkeit. Einige ausgewählte Anwendungsfälle sollen helfen, die klinische Relevanz und mögliche Applikationsbereiche zu konkretisieren.

2 Eigene Arbeiten

2.1 Digitale Abformung

2.1.1 **Schubert O**, Erdelt KJ, Tittenhofer R, Haito J, Bergmann A, Güth JF. Influence of direct intraoral digitization on quality of all-ceramic single crown preparations. Clin Oral Investig. 2020;24(12):4511–8. [IF: 3.573]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss des Intraoralscans auf die Präparationsqualität vollkeramischer Einzelkronen zu untersuchen.

Material und Methoden: 690 randomisiert ausgewählte und anonymisierte In-vivo-Präparationen für Einzelkronen wurden untersucht. 323 Präparationen wurden direkt mittels Intraoralscanner erfasst (Gruppe IS). Als Kontrollgruppe dienten Daten von Gipsmodellen von Präparationen, die mit einem Laborscanner digitalisiert wurden (Gruppe ID, n = 367). Die verglichenen Parameter beinhalteten den Konvergenzwinkel, das marginale Design, die marginale Substanzreduktion, die Homogenität der Präparationsgrenze und das Vorhandensein von Unterschnittsbereichen. Die Auswertung erfolgte unter Zuhilfenahme einer vollautomatisierten Spezialsoftware. Die Daten wurden mittels des Kolmogorow-Smirnow-Tests, des Mann-Whitney-U-Tests und des Exakten Fisher-Tests analysiert. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Ergebnisse: Der Konvergenzwinkel lag in beiden Gruppen oberhalb des vorgegebenen Maximums; der Unterschied trat in der Gruppe IS allerdings deutlicher zutage ($p < 0,001$). Das marginale Design war in der Gruppe IS hinsichtlich der Parameter „Tangentialpräparation“ ($p < 0,001$) und „aufsteigende Außenkante“ ($p = 0,211$) idealer. Die marginale Substanzreduktion war in der Gruppe IS näher an den Vorgaben für vollkeramische Präparationen ($p < 0,001$). Die Präparationsgrenzen in der Gruppe IS waren hinsichtlich der Gleichförmigkeit ihres Verlaufs homogener ($p < 0,001$). Unterschnittsbereiche traten in der Gruppe ID häufiger auf als in der Gruppe IS ($p < 0,001$).

Schlussfolgerungen: Intraorales Scannen wirkt sich hinsichtlich der marginalen Substanzreduktion, des marginalen Designs, des Vorhandenseins von Unterschnittsbereichen und der Homogenität der Präparationsgrenze positiv auf die Qualität von Einzelzahnpräparationen aus. Ein adäquates Präparationsdesign stellt eine grundlegende Voraussetzung für den Erfolg keramischer Einzelzahnkronen dar. Durch die unmittelbare visuelle Rückmeldung könnten Intraoralscanner helfen, die Qualität klinischer Präparationen zu verbessern.

Quelle: <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03316-2>

2.1.2 Keul C, Runkel C, Güth JF, **Schubert O**. Accuracy of data obtained from impression scans and cast scans using different impression materials. Int J Comput Dent. 2020;23(2):129–38. [IF: 1.883]

Zusammenfassung

Ziel: Trotz der zunehmenden Verbreitung von Intraoralscannern bleibt die indirekte Digitalisierung die gebräuchlichste Methode, um Daten intraoraler Oberflächen zu erzeugen. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Genauigkeit von Daten zu bewerten, die mittels Abformungs- und Modellscans generiert wurden, und dabei die Art des Abformmaterials und die Modellsituation zu berücksichtigen.

Material und Methoden: Ein Titanmodell, das einen präparierten Molar und einen Prämolare für eine viergliedrige Brücke simuliert, diente als Testmodell. Mittels Computertomografie wurde ein Referenzdatensatz erstellt. Es wurden vier Abformmaterialien verwendet (N = 12 pro Material): 1.) Impregum Penta (Polyether/Gruppe PE); 2.) Imprint 4 Penta Super Quick Heavy + Super Quick (Polyvinylsiloxane (PVS)/Gruppe PVS-I); 3.) Dimension Penta H Quick + L (PVS/Gruppe PVS-D); und 4.) Imprint Preliminary Penta Super Quick (PVS/Gruppe PVS-P). Anschließend wurden jeweils drei Abformungsscans (Gruppe IMP) sowie drei Modellscans am ungesägten (Gruppe UNSEC) und drei am gesägten Modell (Gruppe SEC) durchgeführt. Zur Ermittlung der Genauigkeit wurden die Daten mit dem Referenzdatensatz unter Verwendung eines Best-Fit-Algorithmus überlagert. Die statistische Auswertung erfolgte mittels des Kolmogorow-Smirnow-Tests, des Kruskal-Wallis-Tests und des Mann-Whitney-U-Tests (Signifikanzniveau: $p < 0,05$).

Ergebnisse: Imprint 4 Penta erreichte die höchste Gesamtgenauigkeit, während Imprint Preliminary Penta die schlechtesten Ergebnisse erzielte. Hinsichtlich der Modellsituation (Abformungsscan versus Modellscan) lieferten Abformungsscans in Kombination mit Impregum Penta und Imprint 4 Penta die besten Genauigkeitswerte.

Schlussfolgerungen: Aus den direkten Scans hochpräziser Abformungen lassen sich die genauesten Daten erzeugen.

Quelle: <https://www.quintessence-publishing.com/deu/en/article/833731>

2.1.3 Kontis P, Güth JF, **Schubert O**, Keul C. Accuracy of intraoral scans of edentulous jaws with different generations of intraoral scanners compared to laboratory scans. J Adv. Prosthodont. 2021;13(5):316–26 [IF: 1.904]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die Genauigkeit verschiedener Intraoral- und Laborscanner für die Digitalisierung von Modellen und Abformungen zahnloser Oberkiefer zu bestimmen.

Material und Methoden: Ein PEEK-Modell eines zahnlosen Oberkiefers mit vier halbkugelförmigen Referenzkörpern auf dem Kieferkamm in den Bereichen 13, 17, 23 und 27 wurde digitalisiert, um einen Referenzdatensatz (REF) zu erhalten. Es wurden Intraoralscans mit der Cerec Primescan AC (PRI) und der Cerec AC Omnicam (OMN) sowie konventionelle Abformungen (scanbares Polyvinylsiloxan) durchgeführt (n = 25). Konventionelle Abformungen (E5I) und entsprechende Gipsmodelle (E5M) wurden mit dem inEOS-X5-Laborscanner gescannt. Alle Datensätze wurden als STL-Dateien exportiert und analysiert (Geomagic Qualify). Lineare Unterschiede und Winkelabweichungen wurden aus virtuell konstruierten Messpunkten in den Zentren der Halbkugeln (P13, P17, P23 und P27) und Linien zwischen den Messpunkten (P17–P13, P17–P23 und P17–P27) berechnet. Der Kolmogorow-Smirnow-Test und der Shapiro-Wilk-Test wurden durchgeführt, um die Normalverteilung zu testen, der Kruskal-Wallis-H-Test und der Mann-Whitney-U-Test, um signifikante Unterschiede in der Richtigkeit zu erkennen, gefolgt von einem Zwei-Proben-Kolmogorow-Smirnow-Test, um signifikante Unterschiede in der Präzision zu ermitteln ($p < 0,008$).

Ergebnisse: Die Gruppe PRI zeigte die höchste Richtigkeit bei linearen Unterschieden und Winkelabweichungen ($p < 0,001$), während die Gruppe E5I die höchste Präzision ($p < 0,001$) aufwies.

Schlussfolgerungen: Intraorale Scandaten, die mit der Cerec Primescan AC gewonnen wurden, zeigten die höchste Richtigkeit, während die indirekte Digitalisierung von Abformungen die höchste Präzision aufwies. Um den Workflow zu verbessern, scheint die indirekte Digitalisierung des Abdrucks selbst eine sinnvolle Technik zu sein, weil sie

einen effizienten Einstieg in den digitalen Workflow mit der Möglichkeit einer echten funktionellen Abformung kombiniert.

Quelle: <https://doi.org/10.4047/jap.2021.13.5.316>

2.2 Digitale Kieferbewegungsanalyse

2.2.1 Goob J, Erdelt KJ, Schweiger J, Pho Duc JM, **Schubert O**, Güth JF. Reproducibility of a magnet-based jaw motion analysis system. Int J Comput Dent. 2020;23(1):39–48.

[IF: 1.883]

Zusammenfassung

Ziel: Das Dental-Motion-Decoder-System(DMD)-System ist ein auf der Magnetfeldtechnologie basierendes Funktionsanalyse-System, das Unterkieferbewegungen aufzeichnet. Die Daten können zur Programmierung eines analogen Artikulators verwendet oder direkt über eine CAD-Schnittstelle weiterverarbeitet werden. Die vorliegende Studie zielte darauf ab, die Reproduzierbarkeit dieses Systems in vitro und in vivo zu bewerten.

Material und Methoden: Es wurden Protrusions- und Laterotrusionsbewegungen in vitro unter Verwendung eines Artikulators (SAM SE) (Gruppe M) und in vivo an einer Testperson (Gruppe P) simuliert. Die Messungen wurden auf zwei Arten durchgeführt: 1) Die Messungen wurden nach einmaliger Initialisierung und Referenzierung des Systems unter Verwendung der Referenzpunkte (RPs) durchgeführt, gefolgt von 30 Protrusions- und Laterotrusionsbewegungen (M1 und P1); und 2) 30 Einzelmessungen wurden mit den RPs vor jeder Messung (M2 und P2) aufgezeichnet. Die Werte für den Neigungswinkel der sagittalen Kondylenbahn (sCPIA) und den Bennett-Winkel (BA) wurden exportiert und analysiert. Die Reproduzierbarkeit des Systems wurde anhand der Standardabweichungen (SD) der Messreihen (sCPIA und BA für M1, M2, P1 und P2) bewertet.

Ergebnisse: Die In-vitro-Tests M1 (SD: sCPIA = 0,08 Grad, BA = 0,06 Grad) und M2 (SD: sCPIA = 0,26 Grad, BA = 0,11 Grad) zeigten eine signifikant höhere Reproduzierbarkeit ($P < 0,001$) als die In-vivo-Messungen P1 (SD: sCPIA = 0,61 Grad, BA = 0,45 Grad) und P2 (SD: sCPIA = 1,4 Grad, BA = 0,65 Grad).

Schlussfolgerungen: Im Rahmen der vorliegenden Studie ist die Abweichung in vitro, die die Reproduzierbarkeit des DMD-Systems repräsentiert, geringer als die in vivo

beobachtete biologische Varianz. Daher darf von zuverlässigen Messungen unter klinischen Bedingungen ausgegangen werden.

Quelle: <https://www.quintessence-publishing.com/deu/en/article/833723>

2.3 Digitale festsitzende, zahngetrugene Prothetik

2.3.1 **Schubert O***, Nold E*, Obermeier M, Erdelt KJ, Stimmelmayr M, Beuer F. Load bearing capacity, fracture mode, and wear performance of digitally veneered full-ceramic single crowns. Int J Comput Dent. 2017;20(3):245–62. [IF: 1.725][†]

Zusammenfassung

Ziel: Computergestützte Technologien können helfen, klinische Komplikationen zirkonoxidbasierter Restaurationen – wie beispielsweise Frakturen der Verblendkeramik – zu vermeiden. Das Ziel dieser Studie war es, verschiedene Verblendverfahren für keramische Einzelzahnkronen aus Zirkonoxid auf Abrasionsverhalten, Bruchfestigkeit und Frakturmodus zu untersuchen.

Material und Methoden: Es wurden sechs verschiedene Gruppen digital designter Kronen hergestellt und konventionell auf jeweils zehn Metallstümpfe zementiert: drei Gruppen mit Zirkonoxidgerüst und CAD/CAM-generierter Verblendung (Digital Veneering System, DVS; CAD-on; Infix CAD), zirkonoxidbasierte Kronen mit gepressten Verblendkappen (Infix Press), Zirkonoxidgerüst mit lediglich aufgebracht Schmelzschicht („Dentinkern“) und konventionelles Gerüst mit geschichteter Verblendmasse („Schichttechnik“). Alle Prüfkörper unterlagen einem künstlichen Alterungsprozess (120 000 Kauzyklen, 50 N Belastung, 0,7 mm Gleitbewegung, 320 Thermolastwechsel). Nach der Lasermessung der Abrasion wurden die Bruchfestigkeit und die Versagensmuster mithilfe einer Universalprüfmaschine sowie eines Rasterelektronenmikroskops (REM) untersucht. Die statistische Analyse erfolgte auf einem Signifikanzniveau von 5 %.

Ergebnisse: Es konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede im Abrasionsverhalten der Restaurationen ermittelt werden ($p = 0,171$, ANOVA). Auch die Differenzen in der Bruchfestigkeit der Kronen waren statistisch nicht signifikant ($p = 0,112$, ANOVA). Bei der Fehleranalyse zeigten sich drei verschiedene Frakturmodi: kohäsive Verblendungsfraktur, adhäsive Delamination und vollständige Fraktur mit charakteristischer Verteilung zwischen den Prüfgruppen.

Schlussfolgerungen: Alle getesteten Prüfkörper überstanden den künstlichen Alterungsprozess und wiesen ein klinisch akzeptables Abrasions- und Bruchverhalten auf. Digitale Verblendtechniken ermöglichen einen vielversprechenden zeit- und kosteneffizienten Fertigungsprozess bei vollkeramischen Restaurationen und können den digitalen Workflow sinnvoll ergänzen.

Quelle: <https://www.quintessence-publishing.com/deu/en/article/833635>

** Beide Autoren haben im gleichen Umfang zur vorliegenden Arbeit beigetragen.*

† Diese Arbeit ist Teil des Projekts, aber formal nicht Teil der kumulativen Habilitationsleistung.

2.3.2 Güth JF, Liebermann A, **Schubert O**, Edelhoff D. Prospective clinical split-mouth study of two-wing retained resin-bonded anterior fixed dental prostheses with metallic and ceramic framework: 5-year results. Int J Prosthodont. 2022 Oct 21. [IF: 1.785]

Zusammenfassung

Ziel: In dieser prospektiven, randomisierten Split-Mouth-Studie wurde die klinische Bewährung zweiflügeliger, adhäsiv befestigter Frontzahnbrücken („two-wing retained Resin-Bonded Fixed Dental Prosthesis“, RBFDPs) nach fünf Jahren klinischer Tragedauer im Hinblick auf technische und biologische Komplikationen sowie Überlebens- und Erfolgsraten analysiert.

Material und Methoden: Die RBFDPs wurden entweder mit 3Y-TZP-Zirkonoxidgerüsten (Lava Frame, 3M; handverblendet mit Lava Ceram, 3M) oder mit Metallgerüsten (Remanium Star, Dentauro; handverblendet mit Reflex, Wieland) hergestellt. Die primären Endpunkte der Studie waren De-Bonding oder Frakturen, die sekundären Endpunkte die marginale Integrität, Randverfärbungen, die Abrasion des Antagonisten, die Patientenzufriedenheit, der Gingivaindex nach Silness und Löe sowie weitere unerwünschte Ereignisse. Die Parameter wurden zu Beginn und nach fünf Jahren erfasst. Die Überlebens- und Erfolgsraten wurden nach der Kaplan-Meier-Methode berechnet. Zum Vergleich der Überlebens- und Erfolgsraten der verschiedenen Materialvarianten wurde der Log-Rank-Test verwendet.

Ergebnisse: Die mittlere Beobachtungsdauer betrug sechs Jahre und zehn Monate. Die geschätzte kumulative Erfolgsquote nach fünf Jahren betrug $88,9 \pm 10\%$ für metallgestützte und $33 \pm 16\%$ für vollkeramische RBFDPs. Nach durch Komplikationen notwendig gewordenen Modifikationen und Umwandlungen in einflügelige RBFDPs lag die Überlebensrate in beiden Gruppen bei 100%. Die Hauptkomplikation war das De-Bonding eines der beiden Flügel. Ein Zirkonoxidgerüst frakturierte. Metallbasierte, zweiflügelige RBFDPs zeigten eine signifikant höhere Erfolgsrate bei einer niedrigeren ästhetischen Bewertung.

Schlussfolgerungen: Aufgrund der niedrigeren Rate technischer Komplikationen und der geringeren Invasivität der Behandlung sollten einflügelige RBFDPs gegenüber zweiflügeligen, wann immer möglich, bevorzugt werden.

Quelle: <https://doi.org/10.11607/ijp.7765>

2.4 Digitale herausnehmbare, zahn- und implantatgetragene Prothetik

2.4.1 Schweiger J, Güth JF, Erdelt KJ, Edelhoff D, **Schubert O**. Internal porosities, retentive force, and survival of cobalt-chromium alloy clasps fabricated by selective laser-sintering. J Prosthodont Res. 2020;64(2): 210–6. [IF: 4.642]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel dieser Studie war es, die Porosität, Haltekraft und Überlebensdauer von Klammern aus einer Kobalt-Chrom-Legierung (Co-Cr) zu untersuchen, die im direkten Metallasersinterverfahren (DMLS) hergestellt wurden, und sie mit konventionell gegossenen Klammern zu vergleichen.

Material und Methoden: Auf identischen Metallmodellen (N = 32) wurden digital für die Zähne 35 und 36 Bonwill-Klammern entworfen. 16 Klammern wurden im DMLS-Verfahren hergestellt (Gruppe DMLS), 16 weitere additiv aus Wachs gefertigt und anschließend aus einer Co-Cr-Legierung gegossen (Gruppe CAST). Die innere Porosität wurde mittels Mikrocomputertomografie (Mikro-CT) untersucht und statistisch mittels des Kolmogorow-Smirnow-Tests, des Mann-Whitney-U-Tests und des T-Tests (Signifikanzniveau: $p < 0,05$) analysiert. Mit einer Universalprüfmaschine wurden die Haltekraftwerte zu Beginn und nach 1095, 5475, 10 950 und 65 000 Zyklen simulierter Alterung ermittelt. Die Daten wurden mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test, einer einseitigen ANOVA und dem Scheffé-Post-hoc-Test analysiert (Signifikanzniveau: $p < 0,05$). Das Überleben wurde für 65 000 Zyklen künstlicher Alterung mittels der Kaplan-Meier-Kurve geschätzt.

Ergebnisse: Die Mikro-CT-Analyse ergab eine höhere Prävalenz ($p < 0,001$), aber eine homogenere Größe und ein signifikant geringeres mittleres ($p = 0,009$) und gesamtes Volumen ($p < 0,001$) der Porosität für die DMLS-Gruppe. Die Gruppen wiesen mittlere anfängliche Retentionskraftwerte von 13,57 N (CAST) und 15,74 N (DMLS) auf, die im Lauf der Alterung bei der CAST-Gruppe signifikant abnahmen ($p = 0,003$), nicht aber bei der DMLS-Gruppe ($p = 0,107$). Die Überlebensrate war nach 65 000 Alterungszyklen bei der DMLS-Gruppe (93,8 %) deutlich höher als bei der CAST-Gruppe (43,8 %).

Schlussfolgerungen: Im Lasersinterverfahren hergestellte Klammern könnten im Rahmen der Herstellung von Gerüsten für herausnehmbare Teilprothesen eine Alternative zu herkömmlichen gegossenen Klammern darstellen.

Quelle: <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2019.07.006>

2.4.2 **Schubert O**, Reitmaier J, Schweiger J, Erdelt KJ, Güth JF. Retentive force of PEEK secondary crowns on zirconia primary crowns over time. Clin Oral Investig. 2019;23(5):2331–8. [IF: 1.725]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel der vorliegenden Studie war es, die Retentionskräfte von CAD/CAM-gefertigten Polyetheretherketon(PEEK)-Sekundärkronen auf Zirkonoxidprimärkronen über einen simulierten Alterungszeitraum von zehn Jahren klinischer Tragedauer zu beobachten und sie mit galvanogeformten Sekundärkronen aus Gold zu vergleichen.

Material und Methoden: Implantatgetragene Zirkonoxidprimärkronen (N = 20) wurden CAD/CAM-gefräst und entweder mit galvanisch hergestellten Sekundärkronen (Gruppe ZE, N = 10) oder mit CAD/CAM-gefertigten PEEK-Sekundärkronen (Gruppe ZP, N = 10) versehen. Alle Sekundärkronen wurden an einer gegossenen Tertiärstruktur befestigt, um eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten. Mit einer Universalprüfmaschine wurden die Retentionskraftwerte zu Beginn und nach ein, drei, fünf und zehn Jahren simulierter Alterung in Gegenwart von künstlichem Speichel ermittelt. Die Daten wurden mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test, dem Kruskal-Wallis-Test und dem Mann-Whitney-U-Test analysiert. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Ergebnisse: Die Haltekräfte unterschieden sich zu Beginn der Simulation zwischen den Gruppen ZE und ZP nicht (Median: ZE 2,85 N, ZP 2,8 N, $p \leq 0,218$). Da sich die Retentionskraftwerte über die Simulationszeit in der Gruppe ZE signifikant veränderten (Kruskal-Wallis, $p \leq 0,028$), unterschieden sich die Werte zwischen den Testgruppen ZE und ZP nach fünf (ZE 3,03 N, ZP 2,76 N, Mann-Whitney-U-Test, $p \leq 0,003$) und zehn Jahren (ZE 3,1 N, ZP 2,78 N, Mann-Whitney-U-Test, $p \leq 0,011$) signifikant.

Schlussfolgerungen: PEEK-Sekundärkronen weisen über zehn Jahre simulierter Alterung stabile Haltekraftwerte auf und zeigen keine Anzeichen einer Verschlechterung, während die Haltekraftwerte galvanisch hergestellter Sekundärkronen mit der Zeit zunehmen.

Quelle: <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2657-x>

2.5 Digitale herausnehmbare Totalprothetik

2.5.1 **Schubert O**, Edelhoff D, Erdelt KJ, Nold E, Güth JF. Accuracy of surface adaptation of complete denture bases fabricated using milling, material jetting, selective laser sintering, digital light processing, and conventional injection molding. Int J Comput Dent. 2022 Jul 19;25(2):151-159. [IF: 1.883]

Zusammenfassung

Ziel: Während die frästechnische, subtraktive Fertigung in der digitalen Totalprothetik derzeit die digitale Herstellungsvariante der Wahl darstellt, könnten sich additive Technologien in Zukunft als erfolgversprechende Alternativen erweisen. Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Passgenauigkeit von Totalprothesenbasen zur Mukosa zu überprüfen, die unter Verwendung subtraktiver, additiver und konventioneller Herstellungstechniken gefertigt wurden.

Material und Methoden: Ein standardisierter zahnloser Oberkiefer wurde digital entworfen und subtraktiv gefertigt. Zwölf Gipsduplikate wurden gescannt und virtuelle Prothesenbasen dementsprechend entworfen. Die physischen Prothesenbasen wurden anhand verschiedener digitaler und konventioneller Fertigungsverfahren hergestellt. 1) CNC-Fräsen (MIL), 2) Material Jetting (MJ), 3) selektives Lasersintern (SLS) und 3) Digital Light Processing (DLP). Zwölf im Injektionsverfahren produzierte Prothesenbasen (INJ) dienten als Kontrollgruppe. Die Innenseiten der Prothesenbasen wurden digitalisiert, die gewonnenen Daten mit den Oberflächendaten der korrespondierenden Gipsmodelle mittels eines Best-Fit-Algorithmus überlagert, und die Passgenauigkeit wurde anhand der Abweichung der Daten ermittelt. Die statistische Analyse erfolgte mit SPSS ($p < 0,05$).

Ergebnisse: Die Passgenauigkeit der subtraktiv gefertigten Prothesenbasen erwies sich als den anderen Testgruppen überlegen ($p < 0,001$). Die übrigen Methoden, einschließlich der konventionellen Injektionstechnik, zeigten keine signifikanten Gesamtunterschiede.

Schlussfolgerungen: Alle untersuchten Fertigungsmöglichkeiten sind hinsichtlich der erreichbaren Passgenauigkeit für die Herstellung von Totalprothesenbasen geeignet, wobei das subtraktive Verfahren die besten Ergebnisse erzielt.

Quelle: <https://doi.org/10.3290/j.ijcd.b2588131>

2.6 Digitale Implantatprothetik

2.6.1 **Schubert O**, Schweiger J, Stimmelmayer M, Nold E, Güth JF. Digital implant planning and guided implant surgery – workflow and reliability –. Br Dent J. 2019;226:101–8. [IF: 1.306][†]

Zusammenfassung

Die moderne orale Implantologie und Implantatprothetik sind auf eine umfassende Diagnostik und präzise Planung angewiesen, um das angestrebte Ergebnis sicher zu erzielen und die Erwartungen des Patienten und des Zahnarztes zu erfüllen. In diesem Zusammenhang können die digitale Implantatplanung und die schablonengeführte Implantatchirurgie auf Basis dreidimensionaler Röntgendaten und der digitalisierten intraoralen Oberflächen hervorragende Dienste leisten. Sie liefern wertvolle Informationen und ermöglichen ein stringentes „Backward-Planning“. Damit wiederum lassen sich das implantologische und prothetische Ergebnis optimieren, die Sicherheit und Effizienz des chirurgischen Eingriffs steigern und lässt sich das restaurative Ergebnis in Bezug auf die Funktion, Biologie und Ästhetik vorhersagbarer machen. Die schablonengeführte Implantatchirurgie birgt jedoch auch spezifische Risiken in Form von Fertigungsungenauigkeiten und Anwendungsfehlern. Diese möglichen Fehlerquellen müssen erkannt und sorgfältig berücksichtigt werden, um Komplikationen zu vermeiden.

Quelle: <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2019.44>

[†] Diese Arbeit ist Teil des Projekts, aber formal nicht Teil der kumulativen Habilitationsleistung.

2.6.2 **Schubert O**, Gaissmaier M, Graf T, Schweiger J, Güth JF. Digital veneering techniques for zirconia implant-supported single crowns - bond strength and clinical application. Int J Prosthodont. 2022 Jul-Aug;35(4):545-552. [IF: 1.785]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel dieser Studie waren die Untersuchung des Haftverbunds verschiedener digitaler Verblendtechniken für Zirkonoxid und die kritische Diskussion der Eignung für die klinische Anwendung bei implantatgetragenen Einzelzahnkronen.

Material und Methoden: 112 quadratische Zirkonoxidplättchen wurden mit vier verschiedenen Verblendmaterialien kombiniert. Jeweils 28 Proben wurden mit einer Glaskeramik (Gruppe GLA), einer Feldspatkeramik (Gruppe FEL), einem polymerinfiltrierten Keramiknetzwerk (PICN, Gruppe PIC) und einer Resin-Nanokeramik (RNC, Gruppe RNC) verblendet. Die Scheiben der Gruppe GLA wurden auf das Kernmaterial aufgesintert, während alle anderen Probekörper adhäsiv befestigt wurden. Jeweils 14 Prüfkörper (GLA0, FEL0, PIC0, RNC0) pro Gruppe wurden vor und jeweils 14 weitere (GLA1, FEL1, PIC1, RNC1) nach dem Thermocycling (10 000 Zyklen) einer Scherfestigkeitsprüfung unterzogen. Die Daten wurden mit SPSS ausgewertet ($p < 0,05$). Die Oberflächen und die Bruchmuster der Proben wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

Ergebnisse: Die mittleren Scherfestigkeitswerte reichten von $14,09 \pm 3,87$ MPa (RNC1) bis $40,82 \pm 4,91$ MPa (GLA0). Die Gruppe GLA wies höhere Werte auf als alle anderen Gruppen ($p < 0,001$). Die Gruppen FEL, PIC und RNC zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede. Die Scherfestigkeit nahm nach dem Thermocycling ab; der Einfluss war jedoch nicht signifikant. Jede Gruppe wies ein charakteristisches Versagensmuster auf.

Schlussfolgerungen: Alle untersuchten digitalen Verblendtechniken wiesen klinisch akzeptable Scherfestigkeitswerte auf und könnten in der Implantatprothetik eine sinnvolle Alternative darstellen. Allerdings müssen einige der Techniken ihre langfristige klinische Eignung noch unter Beweis stellen. Gegenwärtig scheinen lithiumdisilikatverblendete Zirkonoxidabutments und monolithische

Hybridabutmentkronen aus Lithiumdisilikat eine bewährte und zuverlässige Restaurationsoption darzustellen.

Quelle: <https://doi.org/10.11607/ijp.7563>

2.6.3 Güth JF, Schweiger J, Graf T, Stimmelmayer M, **Schubert O**, Erdelt KJ. Short communication: In vitro pilot study: Are monolithic 3Y-TZP zirconia crowns too strong for titanium Implants? Int J Prosthodont., March 2021. [IF: 1.490]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel der vorliegenden Studie war die Durchführung einer Pilotuntersuchung für eine geplante Studie zu implantatgetragenen Einzelkronen aus verschiedenen Restaurationsmaterialien mithilfe der Finite-Elemente-Analyse (FEA) und von In-vitro-Belastungstests.

Material und Methoden: Im Rahmen dieser Pilotstudie wurde eine FEA mittels Ansys 2019 R2 durchgeführt, um Spannungen und Verformungen an implantatgetragenen Hybridabutmentkronen aus Lithiumdisilikatkeramik (Li₂S) und Zirkonoxid (3Y-TZP) zu simulieren. Zusätzlich wurden In-vitro-Belastungstests mit zwei Probekörpern pro Gruppe durchgeführt, um den Versagensmodus zu untersuchen und die Ergebnisse der FEA zu verifizieren.

Ergebnisse/Schlussfolgerungen: Die FEA ergab Spannungsspitzen an den palatinalen, zervikalen Bereichen der Kronen. Bei der Belastungsprüfung bis zum Versagen brachen beide Hybridabutmentkronen aus Lithiumdisilikatkeramik (410 N und 510 N), bevor es zu einer plastischen Verformung der metallischen Implantatkomponenten kam. Die monolithischen Hybridabutmentkronen aus 3Y-TZP-Zirkonoxidkeramik brachen erst, als die Tests bei einer okklusalen Belastung von 646 N und 690 N unterbrochen wurden und nachdem eine plastische Verformung der metallischen Implantatkomponenten beobachtet worden war.

Quelle: <https://doi.org/10.11607/ijp.7322>

2.6.4 Graf T, Güth JF, Diegritz C, Liebermann A, Schweiger J, **Schubert O**. Efficiency of occlusal and interproximal adjustments in CAD-CAM manufactured single implant crowns - cast-free vs 3D printed cast-based. J Adv Prosthodont. 2021 Dec;13(6):351-60. [IF: 1.904]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel dieser Studie war es, die Effizienz der okklusalen und approximalen Anpassungen implantatgetragener Einzelkronen (Single Implant Crowns, SIC) im Vergleich zwischen einem digitalen, modellfreien Workflow (Cast-Free, CF) und einem Protokoll mit 3-D-gedruckten Modellen (Printed Cast-based, PC) zu untersuchen.

Material und Methoden: In ein metallisches Unterkiefermodell wurde an Position 46 ein Titanimplantat eingesetzt. Die Implantatposition wurde mittels eines Intraoralscanners erfasst, und dementsprechend wurden implantatgetragene Einzelkronen hergestellt. Zehn Kronen (CF, n = 10) wurden in einem digitalen, modellfreien Arbeitsablauf ohne laborseitige okklusale und proximale Anpassungen gefertigt. Zehn identische Kronen (PC) wurden im Labor an 3-D-gedruckten Modellen angepasst. Anschließend wurden sie während der simulierten „klinischen“ Eingliederung am Testmodell angepasst. Untersucht wurden dabei die notwendigen Anpassungszeiten, die Quantität der Veränderungen und die daraus resultierende okklusale Kontaktbeziehung. Die Daten wurden mit SPSS analysiert ($p < 0,05$).

Ergebnisse: Der Median und der Interquartilsbereich (IQR) der klinischen Anpassungszeiten betragen 2 min 44 s (IQR: 45 s) in der Gruppe CF und 1 min 46 s (IQR: 21 s) in der Gruppe PC. Die Anpassungszeiten im Labor und die klinischen Anpassungszeiten in der Gruppe PC betragen insgesamt 4 min 25 s (IQR: 59 s). Der Mittelwert und die Standardabweichung (\pm SD) des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) der Quantität der klinischen Anpassungen betragen $45 \pm 7 \mu\text{m}$ in der Gruppe CF und $34 \pm 6 \mu\text{m}$ in der Gruppe PC. Der RMSE der gesamten Anpassungen betrug $61 \pm 11 \mu\text{m}$ in der Gruppe PC. Die Qualität der okklusalen Kontakte war in der Gruppe CF überlegen.

Schlussfolgerungen: Der Zeitaufwand für die klinischen Anpassungen war im modellfreien Protokoll höher, wobei der Gesamtaufwand und die Quantität der

Modifikationen geringer und die daraus resultierenden statischen okklusalen Kontaktbeziehungen vorteilhafter waren.

Quelle: <https://doi.org/10.4047/jap.2021.13.6.351>.

2.6.5 **Schubert O**, Beuer F, Güth JF, Nold E, Metz I. Two digital strategies in modern implantology – root-analogue implants and the digital one-abutment/one-time concept. Int J Comput Dent. 2018;21(2):115–31. [IF: 1.725][†]

Zusammenfassung

Der unumkehrbare Trend zur Digitalisierung in der Zahnmedizin und der Zahntechnik bringt technischen Fortschritt und eine kontinuierliche Veränderung der herkömmlichen Arbeitsabläufe mit sich. Insbesondere die Implantologie und die Prothetik haben von einer Vielzahl interessanter neuer Möglichkeiten profitiert. Das dreidimensionale (3-D-) Röntgen (Digitale Volumetomografie, DVT) und die digitale Erfassung von Oberflächen mittels Intraoralscan sind von unschätzbarem Wert, wenn es darum geht, ein sinnvolles „Backward-Planning“ zu betreiben und damit die Implantatchirurgie sowie die Herstellung von Zahnersatz vorhersehbarer zu machen. In diesem Zusammenhang werden zwei digitale implantatprothetische Behandlungsstrategien vorgestellt, die einen effizienten Arbeitsablauf ermöglichen und zugleich ein minimalinvasives chirurgisches Vorgehen gewährleisten. Das digitale One-Abutment/One-Time-Konzept ermöglicht durch intraoperatives Scannen der Implantatposition das Einsetzen von CAD/CAM-gefertigten Einzelkronen unmittelbar bei Freilegung des Implantats. Der zweite Ansatz nutzt 3-D-Röntgendaten, um präoperativ ein einteiliges wurzelanaloges Implantat (RAI) herzustellen und unmittelbar nach der Zahnextraktion einzusetzen. Beide Ideen versprechen einige Vorteile in Bezug auf die Qualität und den Erhalt der periimplantären Gewebe sowie eine spürbare Verkürzung der Gesamtbehandlungsdauer.

Quelle: <https://www.quintessence-publishing.com/deu/en/article/833659>

[†] *Diese Arbeit ist Teil des Projekts, aber formal nicht Teil der kumulativen Habilitationsleistung.*

2.6.6 **Schubert O**, Beuer F, Schweiger J, Güth JF. Digital Tissue Preservation Concept: A Workflow for Guided Immediate Implant Placement and Restoration. J Prosthodont. 2019;28(6):613–7. [IF: 2.172][†]

Zusammenfassung

Der hier vorgestellte digitale Arbeitsablauf ermöglicht die Herstellung und das Eingliedern eines definitiven individuellen Abutments unmittelbar nach der Zahnextraktion und der geführten Sofortimplantation, wodurch die Weichgewebeanatomie erhalten bleibt. Da das Design des Sofortabutments auf der Form des ursprünglichen Zahns basiert, stellt es de facto ein Emergenzanalogue dar, das eine ideale Weichgewebeunterstützung bietet. Der Ansatz, die Designdaten des individuellen Abutments mit Daten, die nach dem Einsetzen des Abutments mittels Intraoralscan gewonnen werden, zu überlagern und zu fusionieren, ermöglicht eine digitale Abformung ohne Gingivaretraktion und dem damit verbundenen Trauma. Die so generierten Daten erleichtern die Herstellung einer passgenauen Restauration während der Einheilphase des Implantats.

Quelle: <https://doi.org/10.1111/jopr.13089>

[†] *Diese Arbeit ist Teil des Projekts, aber formal nicht Teil der kumulativen Habilitationsleistung.*

2.6.7 **Schubert O**, Edelhoff D, Schweiger J, Güth JF. Atraumatic intraoral scans and virtual hybrid casts for custom implant abutments and zirconia implants: Accuracy of the workflow. J Prosthet Dent. 2021 Sep 29;S0022-3913(21)00426-1. Online ahead of print. [IF: 3.426]

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die Genauigkeit virtueller Hybridmodelle im Hinblick auf den Einfluss verschiedener Gingivasituationen zu bewerten. Der Workflow wurde so gestaltet, dass der Einsatz von Implantatabformpfosten und Scankörpern unnötig wird und ein Gingivamanagement vollständig vermieden werden kann.

Material und Methoden: Der rechte erste Unterkiefermolar an einem Zahnmodell wurde einerseits durch ein zweiteiliges Titanimplantat mit einem individuellen Abutment und andererseits durch ein einteiliges Zirkonoxidimplantat ersetzt. Es wurden drei Situationen mit unterschiedlichen Gingivahöhen simuliert, die die Abutments bedeckten. Für jede Situation wurden zwölf Intraoralscans durchgeführt, um die scanbaren Anteile der Abutments zu erfassen, und es wurden virtuelle Hybridmodelle hergestellt, indem die Intraoralscandaten mit zuvor erhobenen Laborscandaten der Abutments überlagert und fusioniert wurden. Die Hybridmodelle wurden anhand des Root-Mean-Square-Error (RMSE), auch „mittlerer quadratischer Gesamtfehler“ genannt, mit Referenzdatensätzen verglichen. Zum Vergleich wurden konventionelle digitale Arbeitsabläufe auf Basis von Scankörpern und der Digitalisierung von Gipsmodellen durchgeführt. Die statistische Analyse mittels des Kolmogorow-Smirnow-Tests, des Kruskal-Wallis-Tests und des Mann-Whitney-U-Tests mit Bonferroni-Korrektur erfolgte mithilfe einer Statistiksoftware ($p = 0,05$).

Ergebnisse: Die Abweichung bei den Hybridmodellen des individuellen Abutments war stets gering, egal ob das gesamte Abutment gescannt wurde ($6,5 \mu\text{m}$, IQR: $3,0 \mu\text{m}$), der Präparationsrand verdeckt war ($7,0 \mu\text{m}$, IQR: $1,0 \mu\text{m}$) oder die Hälfte des Abutments abgedeckt war ($8,0 \mu\text{m}$, IQR: $4,0 \mu\text{m}$). Bei dem einteiligen Zirkonoxidimplantat betrug die Genauigkeit $10,0 \mu\text{m}$ (IQR: $4,0 \mu\text{m}$), wenn die gesamte Oberfläche des Abutments sichtbar war, und $12,5 \mu\text{m}$ (IQR: $6,0 \mu\text{m}$), wenn nur der Präparationsrand verdeckt war. Wenn lediglich die Hälfte des Abutments gescannt wurde, ergab sich eine größere

Abweichung von 22,0 μm (IQR: 7,0 μm). Im Vergleich zu den Protokollen, die auf Scankörperscans (76,0 μm , IQR: 27,0 μm) und Scans von Gipsmodellen (23,0 μm , IQR: 15,0 μm) basierten, erreichte das Konzept der Hybridmodelle eine überlegene Genauigkeit.

Schlussfolgerungen: Das intraorale Scannen und die Konstruktion virtueller Hybridmodelle erreichen eine hohe Genauigkeit und eignen sich für die Herstellung implantatgetragener Einzelzahnrestaurationen. Das atraumatische Verfahren hilft, Gewebemanipulationen zu vermeiden und den klinischen Aufwand zu reduzieren.

Quelle: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.07.028>

2.6.8 **Schubert O**, Güth JF, Beuer F, Nold N, Edelhoff D, Schweiger. Double crown rescue concept – clinical and technical workflow. Int J Comput Dent. 2020;23(3):281–92. [IF: 1.883][†]

Zusammenfassung

Doppelkronen bewähren sich seit Jahrzehnten in verschiedenen Variationen als Verankerungselemente in der herausnehmbaren Prothetik. Abgestützt auf Zähnen und Implantaten, gewährleisten sie sicheren Halt, bieten ein hohes Maß an Kaukomfort und ermöglichen ein ästhetisch ansprechendes Erscheinungsbild. Ein breites Einsatzspektrum, optimale Hygienefähigkeit und eine nahezu unbegrenzte Erweiterbarkeit sind nur einige der Vorteile doppelkronenverankerter Prothesen. Zu den häufig auftretenden Komplikationen zählt unter anderem der Verlust von Pfeilerzähnen. Wenn ein Pfeilerzahn verloren geht, wird die Sekundärkrone meist mit Kunststoff aufgefüllt, und die Prothese kann weitergetragen werden. Da der Verlust eines oder mehrerer Pfeilerzähne aber die biomechanischen Belastungsverhältnisse verändert, können in der Folge Einbußen an Stabilität und Kaukomfort sowie eine Überbelastung der verbleibenden Pfeilerzähne und damit weitere Schäden nicht ausgeschlossen werden. Das vorgestellte Behandlungsprotokoll soll unter Einsatz computergestützter Technologien helfen, die Prothese weiterhin gemäß ihrer ursprünglichen Konzeption nutzen zu können. Hierzu wird ein verloren gegangener oder nicht erhaltungswürdiger Pfeilerzahn mithilfe digitaler Vorplanung und navigierter Implantation durch ein Implantat ersetzt, auf dem anschließend mittels eines CAD/CAM-gefertigten Mesoabutments die originale Primärkrone in ihrer exakten ursprünglichen Position wieder befestigt werden kann. Dadurch können mit vertretbarem Aufwand die Gesamtzahl der Pfeiler und somit die volle Funktionalität der Prothese erhalten und kann weiteren Schäden vorgebeugt werden.

Quelle: <https://www.quintessence-publishing.com/deu/en/article/833745>

[†] Diese Arbeit ist Teil des Projekts, aber formal nicht Teil der kumulativen Habilitationsleistung.

3 Diskussion

Die Digitalisierung im Bereich der Zahnmedizin und dentalen Technologie ist nicht gleichbedeutend mit einer bloßen Transformation vormals analoger Arbeitsprozesse. Vielmehr ermöglichen die computergestützten Verfahren die Optimierung von Prozessketten, die Implementierung neuer Materialien und die Entwicklung und Etablierung innovativer Techniken und Behandlungsmethoden. Alle Neuerungen müssen sich an den bestehenden fachlichen Standards und Leitlinien orientieren und sollten wissenschaftlich begründet werden.

3.1 Digitale Abformung

Der Intraoralscan einer Präparation bietet, neben der schlicht digitalen Version einer Abformung, durch das unmittelbare visuelle Feedback und bestimmte Softwarefeatures auch die Möglichkeit, die Präparation situations- und restaurationsspezifisch zu bewerten und die eigenen Fähigkeiten nachhaltig zu verbessern. Bei der Untersuchung von insgesamt 690 klinischen Präparationen für vollkeramische Einzelkronen, die einerseits indirekt mittels eines Laborscans des Modells und andererseits direkt durch einen Intraoralscan digitalisiert worden waren, konnte ein signifikant positiverer Einfluss des Intraoralscans auf die Qualität der Präparation nachgewiesen werden (2.1.1 *Influence of direct intraoral digitization on quality of all-ceramic single crown preparations*). Dieser Effekt zeigte sich unter anderem bei den untersuchten Parametern „marginaler Substanzabtrag“, „Präparationsrandgestaltung“ und „Vorhandensein von Unterschnitten“. Ein optimaler und gleichmäßiger marginaler Substanzabtrag ist entscheidend, weil er sich auf die Stabilität der Restauration und die Prognose des Pfeilerzahns auswirken kann. Auch ein homogener Verlauf des Präparationsrands, das Vorhandensein einer erkennbaren Präparationsgrenze und die Vermeidung einer aufsteigenden Außenkante korrelieren mit der Prognose der Krone [15, 145]. Lediglich in Bezug auf den Konvergenzwinkel zeigte sich die Präparation der indirekten Digitalisierung überlegen, was möglicherweise der – unbegründeten – Furcht des Zahnarztes zuzuschreiben ist, nicht alle Anteile der Präparation mit dem IOS erfassen zu können. Dass dabei in beiden Testgruppen mittlere Konvergenzwinkel von über 30

Grad nachgewiesen wurden, bezeugt die Probleme, die diesbezüglichen Vorgaben von etwa 6 bis 15 Grad unter klinischen Bedingungen umzusetzen [64], bildet aber die Ergebnisse aus vorangegangenen Untersuchungen und damit die Realität relativ präzise ab [6, 11, 203]. Die Untersuchung wurde mit einer eigens zu diesem Zweck an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Ludwigs-Maximilians-Universität München entwickelten vollautomatischen Analysesoftware (KE.PAS.02) durchgeführt. Die Software analysiert in kürzester Zeit 360 Schnitte pro Präparation und garantiert damit eine fast lückenlose Beurteilung und eine geringe Anfälligkeit für unentdeckte Fehler. Die so zu erreichende Objektivierbarkeit der Beurteilung der Präparationsqualität macht diese Methodik insbesondere für die zahnärztliche Aus- und Weiterbildung interessant [98]. Der Einsatz einer solchen Technologie in Intraoralscannern könnte helfen, Präparationsfehler zu vermeiden, prozedurale Lernerfahrungen zu vermitteln und damit nachhaltig das prothetische Ergebnis zu verbessern.

Falls die direkte intraorale Digitalisierung nicht sinnvoll möglich ist, kann der Laborscan der Abformung helfen, zusätzliche Arbeitsschritte und potenzielle Fehlerquellen bei der Herstellung von Gipsmodellen vor der Digitalisierung zu vermeiden. Die Voraussetzung für den routinemäßigen Einsatz dieses zeit- und kosteneffizienten Ansatzes ist ein angemessenes Maß an Genauigkeit der generierten Daten. Daher wurde untersucht, inwieweit Abformungsscans geeignet sind, hochpräzise Datensätze zu generieren, die die klinische Situation exakt wiedergeben. Die Ergebnisse wurden mit Daten verglichen, die mittels eines Laborscans von ungesägten Gipsmodellen und Sägeschnittmodellen gewonnen wurden (*2.1.2 Accuracy of data obtained from impression scans and cast scans using different impression materials*). Die abzuformende Situation bildete einen präparierten Molar und einen Prämolare für eine viergliedrige Brücke nach. Darüber hinaus wurden vier verschiedene Abformmaterialien verwendet und miteinander verglichen. Zur Ermittlung der Genauigkeit wurden die Scandaten mit dem Referenzdatensatz unter Verwendung eines Best-Fit-Algorithmus überlagert. Abformungsscans in Kombination mit hochpräzisen Polyether- und Polyvinylsiloxanmaterialien waren den Modellscans überlegen. Ob das ungesägte oder das gesägte Gipsmodell gescannt wurde, hatte in der vorliegenden Untersuchung keinen relevanten Einfluss auf das Ergebnis. Die Erkenntnisse aus ähnlichen Untersuchungen sind ambivalent. Einerseits bestätigten Runkel et al. in einem

vergleichbaren Versuchsaufbau die Überlegenheit von Abformungsscans [152], und auch andere Studien lieferten vielversprechende Daten [33, 114]. Andererseits zogen Autoren anderer Arbeiten auch gegenteilige Schlüsse [75, 168]. Den Scan von Abformungen können, neben der Eignung des Scanners [111, 152], auch anatomische Gegebenheiten, also Unterschnitte, limitieren [152]. Im Rahmen eines effizienten semidigitalen Workflows sollten hochpräzise Abformmaterialien, seien es Polyether oder Polyvinylsiloxane, zur Anwendung kommen, und die Abformung sollte anschließend mittels eines Laborscans in einen Datensatz überführt werden.

Die Digitalisierung zahnloser Kieferabschnitte und insbesondere gänzlich zahnloser Kiefer stellt intraorale Scansysteme vor spezifische Schwierigkeiten. Diese rühren in erster Linie daher, dass beim Intraoralscan mit einem kleinen Scanfeld gearbeitet wird und die entstehenden Aufnahmen aneinandergeheftet werden. Dieses „Stitching“ gelingt umso besser, je klarer die Oberflächen konturiert sind, was in zahnlosen Bereichen naturgemäß weniger der Fall ist als im bezahnten Kiefer [10, 136]. Um einen Eindruck von der Eignung von IOS-Systemen für den Intraoralscan zahnloser Oberkiefer zu gewinnen, wurden zwei Generationen von IOS-Geräten getestet und die gewonnenen Daten mit den Daten aus Laborscans konventioneller Abformungen und Gipsmodelle verglichen (*2.1.3 Accuracy of intraoral scans of edentulous jaws with different generations of intraoral scanners compared to laboratory scans*). Als Testmodell diente ein zahnloser Oberkiefer aus PEEK, der mit sphärischen Referenzgeometrien in den Bereichen 13, 17, 23 und 27 versehen war. Die beiden getesteten IOS-Systeme, die Cerec Omnicam AC (Softwareversion 4.5.2) und die Cerec Primescan AC (Softwareversion 5.0.2), beide Dentsply Sirona, repräsentieren zwei Generationen derselben Scannerfamilie. Neben Streckenabweichungen wurden auch die sagittale und transversale räumliche Verzerrung der Datensätze anhand von Winkelabweichungen ermittelt. Hinsichtlich der Gesamtgenauigkeit zeigte sich die Cerec Primescan AC der Cerec Omnicam AC überlegen, und auch der Vergleich mit den indirekten Digitalisierungsoptionen fiel zugunsten der Cerec Primescan AC aus. Der Abformungsscan erzielte hinsichtlich der metrischen Abweichungen bessere Ergebnisse als der Modellscan, während die Verzerrung etwas stärker ausfiel. Andere Forscher bestätigten bereits in vivo vergleichbar gute Ergebnisse von Intraoral- und Abformungsscans beim Digitalisieren zahnloser Kiefer [35]. Der signifikante Unterschied

zwischen den IOS-Geräten mag zu einem Teil von Unterschieden im physikalischen Aufnahmeprinzip herrühren. Während sich die ältere Cerec Omnicam AC (Softwareversion 4.5.2) die aktive Triangulation zunutze macht, basiert die Aufnahmetechnik der Cerec Primescan AC (Softwareversion 5.0.2) auf der konfokalen Mikroskopie und hat sich bereits als sehr leistungsfähig erwiesen [54, 89]. Trotz erkennbarer Fortschritte beim Intraoralscan zahnloser Kieferabschnitte ist es – methodenbedingt – nach wie vor unmöglich, eine digitale Funktionsrandabformung im Sinne einer myofunktionellen intraoralen Abformung des Kiefers durchzuführen [65, 186]. Daher muss im Rahmen der digitalen Totalprothesenherstellung derzeit der Scan einer konventionellen Funktionsabformung empfohlen werden.

3.2 Digitale Kieferbewegungsanalyse

Sind die relevanten Oberflächendaten erfasst, kann auf dieser Basis weiter geplant und im Folgenden der Zahnersatz gefertigt werden. Beim stomatognathen System handelt es sich um ein komplexes und fehleranfälliges Wechselspiel zwischen verschiedenen Strukturen und deren funktionellen, biomechanischen und neuromuskulären Eigenschaften. Die digitale Analyse von Unterkieferbewegungen stellt ein entscheidendes Diagnostikum dar, das helfen kann, Erkrankungen zu erkennen und zu behandeln, Therapieentscheidungen patientenindividuell richtig zu treffen und Zahnersatz komplikationsarm in die Gesamtheit des Zahn-, Mund- und Kiefersystems einzufügen [97]. Unter den zur Verfügung stehenden elektronischen Verfahren verspricht die Magnetfeldtechnologie eine unkomplizierte, das Ergebnis wenig beeinflussende und patientenfreundliche Anwendung. Damit sie sinnvoll in den digitalen klinischen Arbeitsablauf eingebunden werden kann, ist, neben einer adäquaten Messgenauigkeit, vor allem auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von entscheidender Bedeutung. Diese sollte für das Dental-Motion-Decoder (DMD)-System (Ignident GmbH, Ludwigshafen am Rhein) in vitro und in vivo bestimmt werden (2.2.1 *Reproducibility of a magnet-based jaw motion analysis system*). Hierzu wurden in einem Artikulator und am Patienten der sagittale Kondylenbahnneigungswinkel und der Bennett-Winkel in der Protrusions- und Laterotrusionsbewegung auf zwei Messarten wiederholt bestimmt. Die Standardabweichungen unter klinischen Bedingungen lagen

bei einem funktionsgesunden Patienten für den Kondylenbahnneigungswinkel bei 1,4 Grad und für den Bennett-Winkel bei 0,65 Grad, somit weit innerhalb der von der einschlägigen S2k-Leitlinie vorgegebenen Grenzen [188] und im Rahmen der Ergebnisse vorangegangener ähnlicher Untersuchungen zu anderen elektronischen Messverfahren [192]. Die in vitro gemessenen Abweichungen des untersuchten Systems waren signifikant geringer als die klinische Varianz, was für die Zuverlässigkeit der Technologie spricht. Die guten klinischen Ergebnisse belegen eine verlässliche Anwendbarkeit. Somit könnte das System, bei Vorliegen einer entsprechenden Schnittstellenanbindung, zur Programmierung eines virtuellen Artikulators genutzt werden und im Rahmen der digitalen Herstellung komplexer prothetischer Restaurationen unter funktionellen Aspekten eine sinnvolle Ergänzung darstellen [106].

3.3 Digitale festsitzende, zahngetragene Prothetik

Vollkeramische Einzelkronen, zunehmend monolithisch, aber meist in der Kombination von Zirkonoxid und Verblendung, machen mit über 50 % den größten Teil der Einzelzahnversorgungen in deutschen Zahnarztpraxen aus [43]. Bei zirkonoxidgestützten Restaurationen, die mit der konventionellen Schichttechnik verblendet werden, stellen Verblendungsfrakturen die dominierende klinische Komplikationsart dar und können die Ästhetik und Funktion einer Krone so stark beeinträchtigen, dass eine Neuanfertigung notwendig wird [153]. Moderne Verblendtechniken können helfen, diesen Nachteil zu überwinden und die Restauration widerstandsfähiger gegen eine mechanische Schädigung zu machen sowie optisch ansprechender zu gestalten. Daher sollten verschiedene digitale Verblendverfahren für Einzelkronen aus Zirkonoxid auf Abrasionsbeständigkeit, Bruchfestigkeit und Versagensmodus untersucht werden (*2.3.1. Load bearing capacity, fracture mode, and wear performance of digitally veneered full-ceramic single crowns*). Die Verfahren „Digital Veneering System“ (DVS) (3M Deutschland GmbH, Seefeld), „CAD-on“ (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Lichtenstein) und „Infix CAD“ (Biodentis GmbH, Leipzig) machen sich die „File-Split“-Technologie zunutze, bei der das Gerüst und die Verblendung gemeinsam digital konstruiert und getrennt aus verschiedenen Materialien CAD/CAM-gefertigt werden. Anschließend erfolgt die methodenspezifische Verbindung der Komponenten

mittels einer Fügekeramik („Glaslot“). Bei der „Infix-Press“-Technologie (Biodentis GmbH) wird ein gefrästes Zirkonoxidgerüst im Rahmen des Wachsausschmelzverfahrens mit einer Presskeramik überpresst. Die „Dentinkernkrone“ nach Schweiger bildet in ihrem Zirkonoxidgerüst den Dentinanteil des natürlichen Zahns anatomisch vollumfänglich nach und bedarf somit nur einer dünnen Schicht aus Verblendkeramik, die im Pulver-Flüssigkeit-Verfahren aufgebracht wird und den Schmelz- oder Schneideanteil imitiert. Als Kontrolle dienten konventionell verblendete vollanatomische Gerüste mit einer mittleren Zirkonoxidstärke von 0,8 mm. Nach sechsmonatiger künstlicher Alterung im Kausimulator und anschließendem Belastungstest wurden in dem Abrasionsverhalten und der Bruchfestigkeit der Kronen keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Die Ergebnisse in Bezug auf das Abrasionsverhalten waren mit Beobachtungen aus vorangegangenen Untersuchungen vergleichbar [69]. Hinsichtlich der Stabilität wurden die postulierten Mindestanforderungen an die Bruchlast von Zahnersatz von 500 bis 1000 N im Molarenbereich in allen Prüfgruppen deutlich überschritten, sodass auch nach längerer Tragedauer mit einer ausreichenden Festigkeit gerechnet werden kann [96, 166, 167]. Ähnliche Untersuchungen berichteten von teilweise deutlich höheren [25, 26], aber auch von geringeren Bruchlastwerten [158, 159] digital verblendeter Prüfkörper, wiesen aber überwiegend auf deren – auch langfristig – überlegene Belastbarkeit hin. Die Unterschiede können zu einem gewissen Grad auf Abweichungen im Versuchsaufbau zurückgeführt werden. Auffällig waren die hohen Belastbarkeitswerte der Dentinkernkronen, deren Schneideanteil zwar händisch, aber gleichmäßig dünn auf die optimal anatofom gestalteten und maximal dimensionierten Zirkonoxidgerüste aufgetragen wurde. Eine positive Korrelation des anatofomen Gerüstdesigns und der Gerüstschichtstärke mit der mechanischen Stabilität wurde in der Vergangenheit bereits wiederholt beschrieben [5, 36, 74, 94]. Die Frakturanalyse zeigte kohäsive und adhäsive Verblendungsfrakturen sowie vermehrt Totalversagen in einer charakteristischen Verteilung zwischen den Gruppen. Digitale Verblendungsverfahren erlauben demnach die effiziente Herstellung ästhetisch ansprechender vollkeramischer Restaurationen mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften.

Eine interessante Therapieoption im Spektrum der festsitzenden, zahngetragenen Prothetik stellen Adhäsivbrücken dar, die sich im Rahmen des digitalen Workflows

optimal realisieren lassen. Adhäsivbrücken werden gemäß der S3-Leitlinie für vollkeramische Restaurationen als Therapieoption im Frontzahnbereich empfohlen [118]. Der Vorteil dieser Versorgung liegt in der geringen Invasivität, die sie vor allem für den Einsatz bei jungen Patienten empfiehlt, bei denen Schneidezähne häufig aufgrund von Traumata oder Nichtanlage fehlen, Implantate aber altersbedingt kontraindiziert sind [116]. Je nach Designvariante weisen Klebebrücken gute bis exzellente Überlebensraten auf [116, 120]. Die Restauration kann verblendet – mit metallischem oder keramischem Gerüst – oder vollkeramisch aus Zirkonoxid- oder Lithiumdisilikatkeramik und sowohl als einflügelige als auch als zweiflügelige Variante gestaltet werden. Welche Konstruktionsoption inwiefern überlegen ist, lässt sich optimal im sogenannten Split-Mouth-Design in einer prospektiven, klinischen Untersuchung feststellen, also indem verschiedene Therapieoptionen an demselben Patienten, bestenfalls in spiegelgleichen Gebisssegmenten, randomisiert umgesetzt und untersucht werden. In der vorliegenden Untersuchung zu dem Thema (2.3.2. *Prospective clinical split-mouth study of two-wing retained resin-bonded anterior fixed dental prostheses with metallic and ceramic framework: 5-year results*) wurde die klinische Bewährung zweiflügeliger, adhäsiv befestigter Frontzahnbrücken nach fünf Jahren klinischer Tragedauer analysiert. Die Brücken wurden im CAD/CAM-Verfahren einerseits zirkonoxidgestützt (Lava Frame, 3M; handverblendet mit Lava Ceram, 3M, Seefeld) und andererseits mit Metallgerüsten (Remanium Star, Dentaforum; handverblendet mit Reflex, Wieland) gefertigt. Untersucht wurden das sogenannte De-Bonding, also das Versagen der Verklebung, und Frakturen sowie weitere klinische Parameter. Die kumulative Erfolgsquote betrug nach fünf Jahren $88,9 \pm 10 \%$ für metallgestützte und $33 \pm 16 \%$ für vollkeramische Adhäsivbrücken. Metallbasierte zweiflügelige Brücken zeigten eine signifikant niedrigere Komplikationsrate bei höherer Überlebensrate. Die Hauptkomplikation stellte die Ablösung („De-Bonding“) eines der beiden Klebeflügel dar. Eines der Zirkonoxidgerüste frakturierte. Nach Modifikationen und Umwandlungen in einflügelige Adhäsivbrücken lag die Überlebensrate in beiden Gruppen bei 100 %. Dass der Stress auf die Klebefuge bei der vollkeramischen Konstruktion durch die Rigidität des Werkstoffs deutlich größer als bei der metallischen Version ist, erklärt den Unterschied in den primären Überlebensraten. Die Zugfestigkeit bei Metallen ist im Vergleich zu Zirkonoxid deutlich höher, der Elastizitätsmodul ähnlich (ca. 200 GPa). Falls

bei der zweiflügeligen Designvariante nicht beide Pfeiler eine ähnliche Beweglichkeit aufweisen, kann die adhäsive Verbindung sich – meist an dem Pfeilerzahn mit der geringeren Beweglichkeit – langfristig lösen und damit den Gesamterfolg gefährden [101]. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Daten aus vorangegangenen Untersuchungen und festigen die Erkenntnis, dass das einflügelige Design einen substanziellen Vorteil bietet und die Brücken im Zusammenhang mit moderner Adhäsivtechnik eine hochwertige definitive Restaurationsalternative zu konventionellen Brücken und Implantaten darstellen [116, 120].

3.4 Digitale herausnehmbare, zahn- und implantatgetragene Prothetik

Der amerikanische Zahnarzt Dr. F. E. Roach stellte 1930 fest, dass „die Klammer das älteste und [...] noch immer und wahrscheinlich auch in Zukunft, praktischste und beliebteste Mittel zur Verankerung von herausnehmbaren Teilprothesen ist“ [150]. Diese Aussage ist im Kern heute so aktuell wie vor fast 100 Jahren. Allerdings besteht in diesem Bereich ein enormer Entwicklungsbedarf, unter anderem beim Einsatz digitaler Technologien und neuer Materialien [34]. CAD/CAM-gefertigte Teilprothesengerüste und Klammern sollten nicht weniger als alle vorteilhaften Eigenschaften gegossener Klammern bieten und darüber hinaus einige der Nachteile der herkömmlichen Technologie zu überwinden helfen. Daher muss ein neuer digitaler Ansatz wie das Lasersinterverfahren vor der klinischen Anwendung zunächst auf seine Eignung hinsichtlich essenzieller Eigenschaften wie der strukturellen Integrität des Materials oder der Retentionskraft und Überlebensdauer der Klammern *in vitro* geprüft werden (3.4.1 *Internal porosities, retentive force, and survival of cobalt-chromium alloy clasps fabricated by selective laser-sintering*). Hierzu wurden für die Zähne 35 und 36 auf Metallmodellen digital Bonwill-Klammern entworfen und mittels direkten Metalllasersinterns (DMLS) gefertigt. Zum Vergleich wurden Klammern additiv aus Wachs hergestellt und anschließend aus einer Co-Cr-Legierung gegossen. Die Integrität, genauer die innere Porosität, wurde mittels Mikrocomputertomografie (Mikro-CT) untersucht. Die Retentionskraftwerte wurden zu Beginn und nach simulierter Alterung ermittelt. Das Überleben wurde für 65 000 Zyklen künstlicher Alterung mittels der Kaplan-Meier-Kurve geschätzt. Die Prävalenz von Porosität war beim

Lasersinterverfahren signifikant höher, aber deren Größe einheitlicher, und das mittlere und das Gesamtvolumen waren deutlich geringer. Diese Erkenntnisse bestätigten die Beobachtungen von Alageel et al. aus dem Jahr 2018 [7]. Die mikroskopischen Unterschiede im Metallgefüge ergeben sich verfahrensbedingt. Während beim Guss Porosität hauptsächlich auf die Schrumpfung während der Erstarrung und den durch gelöste Gase verursachten Druck zurückzuführen ist [63], hängt die Porenbildung in lasergesinterten Klammern beispielsweise von der Laserbelichtungszeit [125] oder unvollständig geschmolzenen Metallpulvern ab [206] – und weist ein homogeneres Muster auf. Auf diese strukturellen Unterschiede ist vermutlich auch die mit 93,8 % deutlich höhere Überlebensrate bei den lasergesinterten Klammern (versus 43,8 % bei den gegossenen Klammern) zurückzuführen [7, 90]. Die Retentionskraftwerte der Prüfgruppen waren in der vorliegenden Untersuchung anfangs ähnlich, nahmen aber im Lauf der Alterung bei den gegossenen Klammern signifikant ab, während sie bei den lasergesinterten Klammern stabil blieben. Ähnliche Untersuchungen von Nakata et al. und Torii et al. bestätigen die überlegene Langzeitperformance lasergesinteter Klammern [129, 184]. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie lassen den Schluss zu, dass das Lasersinterverfahren in Zukunft eine wesentliche Rolle bei der Herstellung klammerretinierter Teilprothesen spielen könnte.

Neben den Klammerprothesen bieten auch Doppelkronensysteme die Möglichkeit, Zahnersatz sicher an Zähnen und/oder Implantaten zu verankern. Die Doppelkronentechnik wurde bereits 1886 beschrieben, als der amerikanische Zahnarzt R. Walter Starr mithilfe dieser Methodik eine abnehmbare Brücke befestigte [174], und hat sich seither in verschiedenen Variationen und Kombinationen bewährt [30, 45, 95]. Traditionell werden Primär- und Sekundärkronen aus Edelmetall-, Spar- und Nichtedelmetalllegierungen hergestellt und in der Regel im analogen Gussverfahren, vor allem im Wachsausschmelzverfahren, gefertigt [12, 102]. Zirkonoxid als Material für Primärkronen hat sich, insbesondere in Verbindung mit der Galvanotechnik, als vorteilhaft hinsichtlich der Ästhetik und als zuverlässig in Bezug auf die Retention und das Verschleißverhalten erwiesen [17, 22, 55]. Zur Eignung von PEEK als Doppelkronenmaterial gibt es nur wenige Berichte, die aber alle vielversprechende Ergebnisse lieferten [117, 179, 180, 196]. Ein entscheidendes Kriterium für den Erfolg doppelkronenverankerter Zahnersatzes sind angemessene und langzeitstabile

Retentionskräfte. Daher wurde die Kombination von CAD/CAM-gefertigten PEEK-Sekundärkronen auf Primärkronen aus Zirkonoxid über einen simulierten Alterungszeitraum von zehn Jahren Tragedauer getestet und mit Galvanosekundärkronen verglichen (2.4.2 *Retentive force of PEEK secondary crowns on zirconia primary crowns over time*). Hierzu wurden implantatgetragene Primärkronen aus Zirkonoxid entweder mit galvanisch hergestellten Sekundärkronen oder mit CAD/CAM-gefertigten PEEK-Sekundärkronen versehen. Die Höhe der Primärkronen betrug 7 mm [22, 55] und der Konuswinkel 1 Grad [117, 179, 180, 196]. Die Retentionskraft wurde nach null, ein, drei, fünf und zehn Jahren simulierter Alterung ermittelt. Die Werte unterschieden sich zu Beginn nicht, nahmen über die Simulationszeit bei den Galvanosekundärkronen aber zu und unterschieden sich nach fünf und zehn Jahren signifikant. Dieser Anstieg der Retentionskraft steht im Gegensatz zu anderen Untersuchungen, die meist abnehmende Haltekräfte [12, 55] oder keine Veränderungen beobachteten [17, 198]. In Übereinstimmung mit den vorliegenden Ergebnissen zeigten allerdings auch Dillschneider et al. leicht steigende Retentionskraftwerte für Galvanosekundärkronen auf Zirkonoxidprimärkronen, äußerten sich aber nicht zu den möglichen Ursachen [46]. Das Phänomen könnte auf die hohe Duktilität des Galvanogolds zurückzuführen sein; infolgedessen adaptieren sich die Sekundärkronen allmählich besser an die Primärkronen und verbessert sich die Passung. Folglich wird das hydraulische Funktionsprinzip stärker, und die Haftkraft nimmt zu. Zu PEEK-Sekundärkronen gibt es wenige Daten [117, 180, 196], und nur Merk et al. untersuchten ebenfalls die Kombination von Zirkonoxid und PEEK [117]. Die Retentionskraft lag bei 6,07 N und damit doppelt so hoch wie in der vorliegenden Untersuchung. Die Erklärung dafür könnte in den Einstellungen für die CAD/CAM-Fertigung liegen. So bemerkten die Autoren, dass einer der wichtigsten Aspekte der CAD/CAM-Fertigung die Definition der Softwareparameter für die Gestaltung der Sekundärkronen sei [117], was wiederum Gestaltungs- und Optimierungsmöglichkeiten eröffnet. Die Ergebnisse der Untersuchung deuten darauf hin, dass PEEK-Sekundärkronen eine geeignete Alternative zu Galvanosekundärkronen darstellen und dazu beitragen könnten, die Doppelkronenprothetik vollständig in den digitalen Workflow zu integrieren.

3.5 Digitale herausnehmbare Totalprothetik

Während die subtraktive Herstellung der Totalprothetik den Weg in das digitale Zeitalter geebnet hat und derzeit das digitale Herstellungsverfahren der Wahl darstellt, könnten sich additive Technologien in Zukunft als erfolversprechende Alternative erweisen [29, 165]. Die klinische Funktionalität einer Totalprothese hängt wesentlich von deren Formkongruenz mit dem Prothesenlager, also deren exakter Passung zur Schleimhaut, ab [40, 49]. Potenzielle additive Fertigungsarten müssen sich hinsichtlich dieses Parameters an den bewährten konventionellen und subtraktiven Herstellungswegen messen lassen (*2.5.1 Accuracy of surface adaptation of complete denture bases fabricated using milling, material jetting, selective laser sintering, digital light processing, and conventional injection molding*). Zu diesem Zweck wurden zwölf Gipsduplikate eines standardisierten zahnlosen Oberkiefers gescannt und virtuelle Prothesenbasen entworfen. Die physischen Prothesenbasen wurden im CNC-Fräsverfahren, mittels Material-Jetting, durch selektives Lasersintern und im Digital-Light-Processing-Verfahren hergestellt. Im konventionellen Injektionsverfahren produzierte Prothesenbasen dienten als Kontrollgruppe. Die Innenseiten der Prothesenbasen wurden digitalisiert und mit den Oberflächendaten der korrespondierenden Gipsmodelle überlagert. Die Passgenauigkeit wurde anhand der Abweichung der Daten (RMSE) ermittelt. Die Passgenauigkeit der gefrästen Prothesenbasen erwies sich als deutlich überlegen, während die additiven Verfahren und die konventionelle Injektionstechnik keine signifikanten Gesamtunterschiede zeigten. Die höhere Genauigkeit der subtraktiven Fertigung im Vergleich zu den konventionellen Herstellungsverfahren konnte bereits mehrfach belegt werden [50, 62, 177]. Wang et al. beschäftigten sich in einem systematischen Review mit der Herstellungsgenauigkeit und Passung von additiv und subtraktiv gefertigten Totalprothesen. Als Einflussfaktoren wurden allgemein die Herstellungstechnik, das spezifische Fertigungssystem und die Auswirkungen der Alterung ermittelt. Tendenziell erzielte die frästechnische Herstellung die besseren Ergebnisse. Jedoch konnte nicht mit Sicherheit geschlossen werden, dass eine der Technologien grundsätzlich überlegen ist [197]. Farbcodierte Differenzbilder aus der vorliegenden Untersuchung bestätigten in Übereinstimmung mit vorangegangenen Studien, dass die digitalen Verfahren, insbesondere das CNC-Verfahren, homogene

Abweichungsmuster liefern [62, 82, 177]. Wenn in einem computergestützten Fertigungsprozess technologiespezifische Abweichungsmuster, die durch einen kleinen Zufallsfehler gekennzeichnet sind, reproduzierbar auftreten, können diese im CAD berücksichtigt und kompensiert werden, was einen nennenswerten Vorteil darstellt. Insgesamt zeigten sich alle untersuchten Fertigungsmöglichkeiten hinsichtlich der Passgenauigkeit für die Herstellung von Totalprothesenbasen geeignet, wobei das subtraktive Verfahren die besten Ergebnisse erzielte.

3.6 Digitale Implantatprothetik

Die Erwartungen der Patienten an die Implantologie und die Implantatprothetik sind hoch, weil deren Interventionen in der Regel mit erheblichen Kosten verbunden sind und jeder chirurgische Eingriff eine nicht unerhebliche Belastung für die Patienten darstellt. Die digitale prothetisch-implantologische Planung bietet eine Vielzahl interessanter Aspekte hinsichtlich Diagnostik, individueller Behandlungsplanung und exakter chirurgischer und prothetischer Umsetzung, wenn die notwendigen Voraussetzungen gegeben sind [58, 157]. Fundiertes Wissen zum Arbeitsablauf und zur Zuverlässigkeit, insbesondere zu den möglichen Fehlerquellen und Komplikationen, sind in der dreidimensionalen Implantationsplanung und der schablonengeführten Implantatinsertion von entscheidender Bedeutung (*2.6.1 Digital implant planning and guided implant surgery – workflow and reliability*). Für das moderne prothetisch-implantologische „Backward-Planning“ sind grundsätzlich DICOM-Daten aus einer DVT-Aufnahme und intraorale STL-Oberflächendaten aus einem Intraoralscan, Abformungsscan oder Modellscan notwendig, die in einer geeigneten Planungssoftware zueinander referenziert und weiterverarbeitet werden [57, 104]. Restaurationsbedingte Artefakte, die Wahl des Bildausschnitts („Field of View“), die Voxelgröße, die Kontrastauflösung und Patientenbewegungen können die Genauigkeit der DICOM-Daten beeinflussen [67, 138, 169, 201]. Die Qualität der STL-Oberflächendaten hängt vom Intraoral- oder Laborscanner und von dessen korrekter Anwendung ab. Allerdings ist davon auszugehen, dass das notwendige Maß an Genauigkeit bei der Planung von Bohrschablonen geringer ist als für andere prothetische Indikationen. Daher wird der Intraoralscan in diesem Anwendungsbereich bereits seit

Längerem erfolgreich genutzt [57, 105]. Der Fehler durch die Überlagerung von DICOM- und STL-Daten liegt laut Ritter et al. zwischen 0,03 ($\pm 0,33$) und 0,14 ($\pm 0,18$) mm und damit in einem vertretbaren Bereich [149]. Bei der Fertigung der Schablonen hat sich die Frästechnik als genau [133], aber unökonomisch erwiesen, weshalb derzeit die additive Fotopolymerisation, genauer gesagt die SLA- und DLP-Technologien, die Herstellungsvariante der Wahl darstellt. Mit diesen Verfahren sind Schichtdicken von unter 50 bis 100 μm und damit eine ausreichende Genauigkeit zu realisieren [108, 173]. Das implantologische Endergebnis wird zusätzlich durch die Wahl des Implantatsystems und des chirurgischen Equipments [100, 189], das chirurgische Protokoll [31, 207], die Abstützung der Schablone – auf Zähnen, Schleimhaut oder Knochen [181, 189] – und die Erfahrung des Operateurs beeinflusst [56, 68]. Die Fehler bei der Planung, Herstellung und Verwendung digital gefertigter Führungsschablonen kumulieren sich, laut einem aktuellen Übersichtsartikel von Bover-Ramos et al., in dem Daten von 2244 in vivo gesetzten Implantaten ausgewertet wurden, zu einer mittleren horizontalen Abweichung von 1,4 mm an der Implantatspitze und einer axialen Abweichung von 3,98 Grad [31]. Insgesamt ist der schablonengeführte Ansatz dem freihändigen Platzieren von Implantaten hinsichtlich der Genauigkeit der erreichten Implantatposition deutlich überlegen [181, 194]. Die Erhebung der DICOM-Daten, die die obligatorische Grundlage für die dreidimensionale prothetisch-implantologische Planung und die schablonengeführte Implantatchirurgie bilden, ist mit einer Röntgenstrahlenexposition im Bereich von etwa 10 bis 1000 μSv verbunden [73]. Daher sollte vor dem Einstieg in die Behandlung immer eine individuelle Kosten-Nutzen-Abwägung im Sinne des Patienten erfolgen [19]. Die Kombination dreidimensionaler anatomischer Informationen und virtueller prothetischer Vorplanung ermöglicht die optimale Positionierung des Implantats entsprechend den prothetischen Bedürfnissen und kann, die entsprechende Expertise vorausgesetzt, das chirurgische und prothetische Ergebnis positiv beeinflussen [72].

Neben dem prothetisch-implantologischen „Backward-Planning“ und der geführten Implantatchirurgie bietet auch die anschließende Umsetzung des implantatgetragenen Zahnersatzes im digitalen Workflow Vorteile [79, 128]. Insbesondere Hybridabutmentkronen, die aus einer Titanklebebasis und einer zahnfarbenen, CAD/CAM-gefertigten Krone bestehen, haben sich in der Einzelzahnimplantatprothetik

seit einiger Zeit bewährt [59, 140]. Hybridwerkstoffe und Werkstoffkombinationen moderner Materialien mit spezifischen physikalischen Eigenschaften könnten in diesem Zusammenhang einen nützlichen Beitrag leisten. Im Rahmen dieses Projekts wurden neuartige adhäsive Verblendmöglichkeiten für Zirkonoxidabutments, die auf dem Einsatz einer Feldspatkeramik, eines polymerinfiltriertem keramischen Netzwerks (PICN) und einer Resin-Nanokeramik (RNC) basieren, auf ihre Verbundfestigkeit vor und nach künstlicher Alterung untersucht und mit einer Sinterverbundverblendung aus Lithiumdisilicat verglichen (2.6.2 *Digital veneering techniques for zirconia implant-supported single crowns - bond strength and clinical application*). Die im Sinterverbund gemäß der CAD-on-Technologie verblendeten Prüfkörper wiesen signifikant höhere SBS-Werte (40,82/37,76 MPa vor/nach Thermocycling) auf als alle adhäsiv befestigten Verblendungen (17,67–20,97/14,09–17,97 MPa vor/nach Thermocycling), die sich wiederum voneinander nicht bedeutend unterschieden. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen Beobachtungen aus ähnlichen Untersuchungen, sowohl die beim Sinterverbund [83, 208] als auch die bei der Adhäsivtechnik [187]. Ein signifikanter Einfluss der künstlichen Alterung, wie häufig beim adhäsiven Verbund zur Zirkonoxidkeramik zu beobachten [154, 185], konnte nicht bestätigt werden. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass in beiden verwendeten adhäsiven Befestigungskompositen ein MDP-basierter Primer enthalten ist und sie dadurch den negativen Effekten der Alterung besser widerstehen können [135, 205]. Während die aufgesinterten Verblendungen meist kohäsiv-adhäsive Frakturmuster aufwiesen, versagte der adhäsive Verbund überwiegend an der Grenze zwischen Befestigungskomposit und Zirkonoxidkeramik. Lediglich bei der RNC kam es häufiger zur Ablösung aufseiten des Verblendmaterials. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die RNC keine Ätzung der Oberfläche erlaubt, die beispielsweise dem PICN eine honigwabenartige, vergrößerte Oberfläche und damit ein größeres mikroretentives Potenzial verleiht [51]. Innovative Hybridmaterialien wie PICN und RNC sind weniger spröde und können dadurch optimal CNC-technisch bearbeitet werden [170]. Ein besonderer Vorteil moderner Hybridwerkstoffe könnte ihr Elastizitätsmodul sein, der es diesen Werkstoffen ermöglicht, bei implantatgetragenen Versorgungen eine Art „stoßdämpfende Wirkung“ zu entfalten und so das System Krone-Implantat-Knochen vor übermäßigen Belastungen zu schützen [16, 142]. Allerdings bergen sie auch

Nachteile wie eine erhöhte Verschleißanfälligkeit, Oberflächenrauigkeit und Antagonistenabrasion [16, 176, 210] sowie eine insgesamt möglicherweise eingeschränkte Langzeitprognose [148]. Auch modernes monolithisches Zirkonoxid stellt, aufgrund seiner verbesserten optischen Eigenschaften [175], seiner hohen Bioverträglichkeit [182], seiner Stabilität [140] und seiner effizienten Verarbeitbarkeit im digitalen Workflow, eine interessante Alternative für implantatgetragene Einzelzahnkronen dar. Die Verwendung monolithischen Zirkonoxids könnte jedoch die schwächste Stelle des Systems auf die Ebene der Titanbasis oder – was bei extremer Belastung noch nachteiliger wäre – auf die Ebene des Implantats selbst verlagern und dieses schädigen (*2.6.3 Short communication: In vitro pilot study: Are monolithic 3Y-TZP zirconia crowns too strong for titanium implants?*). In einer Finite-Elemente-Analyse konnte gezeigt werden, dass die Biegefestigkeit der Zirkonoxidkrone höher ist als die Streckgrenze der Komponenten aus Titan und die größten Spannungen im Übergangsbereich zwischen Keramik und Titan entstehen. Bei einem mechanischen Belastungstest versagten Kronen aus Lithiumdisilikatkeramik, bevor eine irreversible Schädigung der Titanbasis oder des Implantats auftrat, während die Kronen aus Zirkonoxid nicht frakturierten und der Test nach sichtbarer Deformation der metallischen Komponenten bei 646 N und 690 N abgebrochen wurde. Weitere Tests und klinische Untersuchungen sind notwendig, um die klinische Relevanz dieser theoretischen Berechnungen und In-vitro-Beobachtungen einzuordnen. Dennoch lässt sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen ableiten, dass aus monolithischer Lithiumdisilikatkeramik oder aus Zirkonoxidabutments mit aufgesinterten Lithiumdisilikatverblendungen bestehende Hybridabutmentkronen ein klinisch und wissenschaftlich erprobtes und bewährtes Konzept darstellen [47, 52, 151], das zum jetzigen Zeitpunkt als Goldstandard angesehen werden kann.

Da, wahrscheinlich aus Gewohnheit oder Tradition, viele Zahntechniker und Zahnärzte es bevorzugen, auf einem Modell zu arbeiten, und dem digitalen, modellfreien Workflow noch nicht vollständig vertrauen, werden nicht selten auch additiv gefertigte Modelle zur Fertigung oder Weiterbearbeitung von Zahnersatz verwendet. Dies könnte sich aber nicht nur in vielen Fällen als überflüssig, sondern aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Modellherstellung sogar als nachteilig erweisen. In der Implantatprothetik können sich Abweichungen am Modell unter anderem aus der Scanstrategie und der Art des

Scankörpers [127], den Softwareparametern, der Fertigungstechnologie [32, 146] oder dem verwendeten Laboranalog ergeben [113]. In einer Laboruntersuchung sollte daher überprüft werden, wie sich die Verwendung additiv hergestellter Modelle bei der Fertigung implantatgetragener Einzelkronen auf die Genauigkeit des Ergebnisses und die Effizienz des Workflows auswirkt (*2.6.4 Efficiency of occlusal and interproximal adjustments in CAD-CAM manufactured single implant crowns – cast-free vs. 3D printed cast-based*). Zu diesem Zweck wurden zehn Kronen in einem digitalen, vollständig modellfreien Produktionsprozess ohne laborseitige okklusale oder proximale Modifikationen hergestellt. Zehn identische Kronen wurden im Labor auf additiv hergestellten Modellen angepasst. Anschließend erfolgte die simulierte „klinische“ Eingliederung mit den notwendigen Adjustierungen. Untersucht wurden dabei die notwendigen Anpassungszeiten, die Quantität der Veränderungen und die daraus resultierende okklusale Kontaktbeziehung. Der gemessene Zeitaufwand für die simulierten klinischen Anpassungen war im modellfreien Protokoll höher, wobei der Gesamtzeitaufwand und die Quantität der Modifikationen geringer und die okklusalen Kontaktbeziehungen besser waren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Laboranaloge womöglich vertikal etwas höher positioniert waren als das Referenzimplantat. In Kombination mit einem rotatorischen Versatz der Analog im Modell und den daraus resultierenden Abweichungen bei der horizontalen Positionierung der Kontaktpunkte könnte dies zu teilweise inkorrekten Anpassungen im Labor und damit zu „Doppelanpassungen“ im weiteren Verlauf geführt haben. Dies wiederum lässt den größeren, vermutlich heterogenen Volumenabtrag und die schlechtere statische okklusale Kontaktbeziehung bei den im modellbasierten Workflow hergestellten Kronen plausibel scheinen. Damit wird die höhere klinische Zeiteffizienz im modellbasierten Ansatz zu einem gewissen Grad auf Kosten der Qualität der okklusalen Kontaktbeziehung erreicht, was als nachteilig betrachtet werden muss. Joda et al. hatten den wichtigen Aspekt der Effizienz in der Implantatprothetik früh adressiert und in mehreren Publikationen die Überlegenheit digitaler Arbeitsabläufe nachweisen können [76, 77, 80]. Andere Wissenschaftler bestätigten weitgehend diese Beobachtungen [44, 131, 209]. Während auch in einer In-vivo-Untersuchung von Pan et al. mehr klinische Modifikationen notwendig waren, wenn vorab keine Modelle verwendet worden waren [131], hielten Joda et al. [78] und Di Fiore et al. [44] den

modellfreien Workflow, im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung, hinsichtlich der Zeiteffizienz grundsätzlich für überlegen. Eine Einschränkung der Untersuchung besteht unter anderem in der Tatsache, dass nur ein Implantatsystem, eine Art von Modellen und ein Typ von Laboranaloga untersucht wurden. Diese Einschränkung wiederum unterstreicht einen immanenten Nachteil des modellbasierten Ansatzes, weil es unzählige Möglichkeiten der Kombination von Herstellungstechnologien, Systemen und Komponenten gibt, die sich in unterschiedlichster Weise und unterschiedlichem Umfang auf das Ergebnis auswirken können. Es scheint daher sinnvoll, sich auf die weitere Optimierung des modellfreien Protokolls zu konzentrieren, denn der Verzicht auf ein Modell lässt nicht nur die modellspezifischen Fehlerquellen methodisch gegenstandslos werden, sondern stellt auch den ressourcenschonenderen Ansatz dar.

Einige innovative prothetisch-implantologische Konzepte wie beispielsweise das digitale One-Abutment/One-Time-Konzept (auch „Münchener Implantatkonzept“, MIC) verzichten methodenbedingt bereits weitgehend auf die Verwendung physischer Modelle [23]. Neben den daraus resultierenden Vorteilen bieten moderne digitale prothetisch-implantologische Behandlungskonzepte auch interessante Optionen hinsichtlich der Rationalisierung des klinischen und technischen Vorgehens sowie der geringeren Invasivität des chirurgischen Protokolls. So ermöglicht der intraoperative Scan der Implantatposition im Rahmen des MIC die Eingliederung der CAD/CAM-gefertigten Krone unmittelbar nach Freilegung des Implantats [23, 48]. Die gesamte Behandlung lässt sich im Rahmen von nur zwei Behandlungsterminen abschließen, und die Weichgewebemanipulation beschränkt sich auf die Implantation und die Freilegungsoperation. Dadurch wird der Wechsel von Implantataufbauten, dem negative Effekte auf die periimplantären Gewebe zugeschrieben werden [2, 41, 42], vollständig vermieden. Auch der Verzicht auf die Verwendung eines konfektionierten Gingivaformers und die Tatsache, dass die Schleimhaut in direktem Kontakt zum definitiven Zahnersatz abheilen kann, versprechen langfristig positive Effekte auf Weichgewebe und Emergenzprofil [2, 23]. Noch einen Schritt weiter geht der Einsatz eines präfabrizierten Sofortabutments. Die Zahl der chirurgischen Interventionen wird auf das absolute Minimum von einem Eingriff bei der Implantatinsertion beschränkt. Darüber hinaus kann das Abutment auf Basis umfassender präoperativ erhobener Oberflächen- und 3-D-Röntgendaten derart gestaltet werden, dass es sich an seiner

Emergenz an dem nicht erhaltungswürdigen Zahn, alternativ an einer biogenerischen oder gespiegelten Kopie, orientieren kann. Im Rahmen einer Sofortimplantation kann dieses Vorgehen zum wünschenswerten Erhalt von Gewebevolumen und -architektur beitragen [27, 200]. Ein interessanter Ansatz, der ein emergenzförmiges Sofortabutment methodenbedingt enthält, sind wurzelförmige Implantate (*2.6.5 Two digital strategies in modern implantology – root-analogue implants and the digital one-abutment/one-time concept*). Die Idee, den zu entfernenden Zahn durch eine exakte Kopie zu ersetzen, die – anders als ein schraubenförmiges Implantat – passgenau in die leere Knochenalveole passt, scheint plausibel und ist daher nicht neu. Bereits in den 1950er-Jahren gab es Versuche, extrahierte Zahnwurzeln unmittelbar durch ein Duplikat aus Kunststoff zu ersetzen [195]. Unter anderem die rein bindegewebige Einheilung und die damit verbundenen Nachteile ließen das Konzept zunächst wieder verschwinden [70], bis in den 1990er-Jahren Versuche mit Titan als Implantatmaterial unternommen wurden [93, 110]. Nach ersten vielversprechenden Ergebnissen ermittelten Kohal et al. im Jahr 2002 Überlebensraten von lediglich 48 % und konnten daher die Methodik nicht für den praktischen Einsatz empfehlen [92, 93]. Bis zu diesem Zeitpunkt war immer die Wurzel oder die Alveole, analog oder digital, abgeformt und das Implantat post extractionem hergestellt worden. Daher erfolgte die Implantatinsertion mit einer gewissen zeitlichen Latenz. 2013 verarbeiteten Moin et al. erstmals DICOM-Daten und stellten auf deren Grundlage bereits präoperativ im Lasersinterverfahren wurzelförmige Sofortimplantate her [123, 124]. Auch im vorliegenden Fall wurden dreidimensionale radiologische Daten der Zahnwurzel und intraorale STL-Oberflächendaten verwendet. Das Implantat (Natural Dental Implants, Berlin, Deutschland) besteht aus einem subtraktiv hergestellten Wurzelanteil aus Titan und einem Abutment aus Zirkonoxidkeramik, die miteinander versintert sind. Die Implantation erfolgt nach schonender Extraktion als Sofortimplantation. Da das Implantat einteilig ist und jedes Abutment patientenindividuell gefertigt wird, ist nach der Osseointegration eine konventionelle Abformung vorgesehen. Gingivamanagement im Sinne des Fadenlegens, der Applikation chemischer Agenzien oder gar chirurgischer Maßnahmen erzeugt immer ein Trauma und infolgedessen entzündliche Reaktionen [191]. Dies ist am natürlichen Zahn unerwünscht und an einem Implantat, aufgrund der fehlenden Differenzierung der „marginalen“ Gingiva, noch kritischer zu betrachten. Um jede vermeidbare

Weichgewebemanipulation auszuschließen, kam erstmals eine neue Strategie zum Einsatz. Nach der Implantation wurde die Situation inklusive Implantatabutment intraoral gescannt. Auf die Darstellung und Erfassung der Präparationsgrenze wurde bewusst verzichtet. Die Oberflächendaten waren demzufolge für die Fertigung einer exakt passenden Krone nicht geeignet. Um dieser vorhersehbaren Problematik zu begegnen, waren die originalen Konstruktionsdaten des Zirkonoxidabutments vom Hersteller angefordert worden. Diese wurden zusammen mit den Intraoralscandaten in die Software Geomagic Qualify 2012 (3D Systems, Rock Hill, SC, USA) importiert und fusioniert. Die nicht zweifelsfrei im Intraoralscan erfassten Anteile des Abutments konnten so durch die CAD-Daten ersetzt werden. Auf dem entstandenen virtuellen „Hybridmodell“ wurde eine exakt passende, optimal an den Nachbarzähnen ausgerichtete Krone hergestellt. Die Idee, den Konstruktionsdatensatz oder die Laborscandaten des Abutments mit Daten eines Intraoralscans zu korrelieren, ist damit gleichbedeutend mit einer gänzlich atraumatischen Abformung, weil die Präparationsgrenze und andere Details nicht mehr zwangsläufig erfasst werden müssen. Die Systematik wurde anschließend mit individuellen, vorgefertigten Abutments für konventionelle zweiteilige Implantate weitergeführt. Digitales prothetisch-implantologisches „Backward-Planning“, ein emergenzförmiges Sofortabutment, die geführte Implantation und ein virtuelles Hybridmodell, das aus einem atraumatischen Intraoralscan und den Konstruktionsdaten des Abutments hergestellt wurde, bilden die Bestandteile des „Digital Tissue Preservation Concept“ (2.6.6 *Digital Tissue Preservation Concept: A Workflow for Guided Immediate Implant Placement and Restoration*). Dieses Vorgehen eignet sich ebenso gut im Rahmen einer Spätimplantation mit einem Sofortabutment und im Zusammenhang mit einteiligen Implantaten. Um abschätzen zu können, wie viel Oberfläche eines Abutments durch den Intraoralscan erfasst werden muss, um eine verlässliche Überlagerung und Fusion der Intraoralscandaten mit den Oberflächendaten des Abutments – und damit die Herstellung eines exakten Hybridmodells – zu gewährleisten, wurde diese Thematik in einer In-vitro-Untersuchung aufgegriffen (2.6.7 *Atraumatic intraoral scans and virtual hybrid casts for custom implant abutments and zirconia implants: Accuracy of the workflow*). An individuell gefertigten Hybridabutments und an Abutments einteiliger Zirkonoxidimplantate wurden drei Situationen mit unterschiedlichen Gingivahöhen

simuliert, die die Abutmentoberflächen bedeckten. Auf Basis von jeweils zwölf Intraoralscans wurden virtuelle Hybridmodelle hergestellt, indem die Intraoralscandaten mit zuvor gewonnenen Laborscandaten der Abutments fusioniert wurden. Zum Vergleich wurden konventionelle digitale Arbeitsabläufe auf Basis von Scankörperscans und, bei den einteiligen Implantaten, der Digitalisierung von Gipsmodellen mit Laboranaloga durchgeführt. Die Abweichung bei den Hybridmodellen des individuellen Abutments war sehr gering, egal ob das gesamte Abutment gescannt wurde, der Präparationsrand verdeckt war oder nur die obere Hälfte des Abutments zu erkennen war. Bei dem einteiligen Zirkonoxidimplantat war die Genauigkeit ebenfalls hoch, wenn die gesamte Oberfläche des Abutments sichtbar war und wenn nur der Präparationsrand verdeckt war. Wenn lediglich die Hälfte des Abutments gescannt wurde, war die Abweichung nach der Überlagerung größer, was an der kleineren und geometrisch einfachen Oberfläche liegen könnte. Im Vergleich zu den Protokollen, die auf Scankörperscans und Scans von Gipsmodellen basierten, erreichte das Konzept der Hybridmodelle immer die höhere Genauigkeit, auch in simuliert ungünstigen klinischen Situationen. Während im Zusammenhang mit dem wurzelanalogen Implantat und dem DTCP noch die originalen CAD-Daten des Abutments zum Einsatz gekommen waren, wurde nun auf Laborscandaten zurückgegriffen. Der Grund dafür war, dass die frästechnische Fertigung weniger genau als der Laborscan ist [91, 111] und somit CAD-Daten weiter von der tatsächlichen Geometrie des Abutments entfernt sind als dessen Scandaten. Positive Berichte über die Verwendung derartiger oder ähnlicher Hybridmodelle gibt es inzwischen sowohl für individuelle Abutments [37, 112, 144] als auch für Standardabutments [86, 87] und für einteilige Keramikimplantate [139]. Die Verwendung virtueller Hybridmodelle eignet sich demnach für die präzise Herstellung implantatgetragener Einzelzahnrestorationen, hilft, die Weichgewebe zu schonen, und vereinfacht dabei die Abformung.

Die Digitalisierung hilft nicht nur, die Effizienz, Qualität und Vorhersagbarkeit bewährter Prozesse zu steigern und neue Behandlungsoptionen zu etablieren, sondern kann auch dazu beitragen, die Funktion von konventionellem Zahnersatz wiederherzustellen oder zu erhalten. So verfolgt das „Doppelkronenrettungskonzept“ das Ziel, nicht erhaltungswürdige oder verloren gegangene Pfeilerzähne von Doppelkronenprothesen durch ein Implantat zu ersetzen und damit die vorhandene Primärkrone in ihrer

ursprünglichen Position zu erhalten (2.6.8 *Double crown rescue concept – clinical and technical workflow*). Das Prinzip der Doppelkrone in der Zahnmedizin ist über 100 Jahre alt und hat sich in Form von Friktionsteleskopkronen, Konuskronen, Resilienzteleskopkronen und Galvanodoppelkronen besonders im deutschsprachigen Raum, in Skandinavien und in Japan erfolgreich etabliert [30, 95]. Dieser funktionell und ästhetisch hochwertige Zahnersatz erfordert bei der Herstellung spezielle dentaltechnologische Expertise und ist mit nicht unerheblichen Kosten verbunden, erzeugt aber langfristig eine hohe Patientenzufriedenheit [178, 204]. Die Prognose der Pfeilerzähne ist nicht selten aufgrund von parodontalen Erkrankungen, Karies oder Zahnfrakturen, aber auch durch das restaurationsbedingt notwendige invasive Beschleifen eingeschränkt [193, 199]. Der Verlust von Pfeilerzähnen und seine biomechanischen Auswirkungen machen wiederum weitere Schäden an den verbleibenden Pfeilerzähnen wahrscheinlich. Anstatt die Sekundärkrone mit Kunststoff aufzufüllen, die Prothese also im Sinne des Konzepts zu „erweitern“, kann anstelle des fehlenden Pfeilerzahns ein Implantat gesetzt und mit einem Attachment versehen werden. Kugelkopfanker oder Locator-Attachments kommen infrage, haben aber, aufgrund ihres anderen Funktionsprinzips, gewisse Nachteile. Den bestmöglichen Ersatz für die verloren gegangene Primärkrone bietet ebendiese. Die intraoralen Flächen werden digitalisiert, ebenso die Außen- und Innenflächen der Prothese, wobei die von Zahnresten befreite Primärkrone in die Sekundärkrone eingesetzt wird. Daraufhin wird die Prothese virtuell „eingegliedert“, und somit werden die genaue Position und Form eines zukünftigen Hilfs- oder Mesoabutments definiert, die wiederum die Position des Implantats determinieren. Dieses muss anschließend – sinnvollerweise mittels geführter Chirurgie – präzise platziert werden. Das Mesoabutment wird CAD/CAM-gefertigt und auf dem Implantat befestigt. Dieses hat im Grunde genau die Form der Präparation des ursprünglichen Pfeilerzahns. Anschließend kann die Primärkrone einprobiert und schließlich wie gewohnt zementiert werden. Im Rahmen derartiger Konzepte können digitale Technologien helfen, die Funktionalität von konventionellem Zahnersatz zu erhalten. Da kombiniert implantat- und zahngetragene Doppelkronenprothesen eine gute Prognose aufweisen [107, 143], könnte sich diese „sekundäre Implantatprothetik“ langfristig sogar positiv auf die Prognose des Zahnersatzes auswirken.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die digitale Transformation in der Zahnmedizin und der Zahntechnik findet auf vielen Ebenen der klinischen Tätigkeit, im Dentallabor und in der Praxisorganisation statt. Digitale Abläufe eröffnen die Möglichkeit, Prozesse neu zu denken, Behandlungsstrategien zu optimieren und innovative Konzepte zu entwickeln. Standardisierung und Digitalisierung korrelieren positiv, wovon wiederum Effizienz und Qualität profitieren. Die Digitalisierung ist demnach kein Selbstzweck, sondern Mittel zum Zweck.

Ein Beispiel dafür, dass diese Transformation den Indikationsbereich einer Anwendung sinnvoll erweitern kann, ist die Digitalisierung der Abformung. Während Intraoralscanner lange eine exotische Randerscheinung mit marketingtechnischem Charakter waren, sind sie längst zu einer konkurrenzfähigen Alternative bei der Erfassung bezahnter Kieferabschnitte geworden. Auch beim technisch schwierig umzusetzenden Scan zahnloser Kiefer sind deutliche Fortschritte zu erkennen [60, 61, 109, 186], sodass die sinnvolle Erschließung dieses Indikationsbereichs – mit Einschränkungen – in einiger Zukunft abbildbar scheint. In der Zwischenzeit können Abformungsscans empfohlen werden, weil sie, bei reduziertem Aufwand, verlässliche Ergebnisse liefern.

Über die Erzeugung intraoraler Oberflächendaten hinaus entstehen in diesem Zusammenhang weitere interessante Optionen wie die Nahinfrarottechnologie (NIRI) zur Kariesdiagnostik [119] oder Softwaretools zur Zahnfarberkennung [39]. Im Rahmen einer KI-basierten Softwareanwendung könnte in Zukunft, unter automatisierter Berücksichtigung der Zahnstumpffarbe und -form, die optimale Komposition von Restaurationsmaterial und Befestigungskomposit berechnet werden. Eine weitere interessante Softwarefunktion wäre die restaurationsspezifische Analyse der Präparationsgeometrie mit unmittelbarem Feedback während des Intraoralscans.

Insbesondere Einzelkronen, zahn- oder implantatgetragen, werden seit Langem effizient mittels Frästechnik gefertigt. Während zunächst in erster Linie die Gerüste hergestellt und händisch verblendet wurden, bieten innovative digitale Verblendsysteme inzwischen eine effiziente Herstellungsmethode für Restaurationen mit angemessenen ästhetischen Ergebnissen und abgestimmten mechanischen Eigenschaften. Während sich aufgesinterte Verblendungen aus Lithiumdisilikatkeramik, auch im Rahmen dieses

Projekts, als verlässlich erwiesen haben, müssen sich adhäsiv befestigte digitale Verblendungen aus modernen Hybridwerkstoffen klinisch noch bewähren. Einen interessanten Ansatz bietet die „Dentinkerntechnik“ (auch „Micro-Layering-Technik“) nach Schweiger [164], die sich an der Natur orientiert und die Krone in einen Dentinkern, beispielsweise aus Zirkonoxid, und einen aufgeschichteten oder überpressten Schmelzanteil untergliedert. Dieses Verfahren wirkt sich positiv auf die Stabilität und das Erscheinungsbild des Zahnersatzes aus. Das Konzept könnte insbesondere durch die sich abzeichnende Möglichkeit der additiven Fertigung von Keramikrestorationen relevant werden, weil perspektivisch komplexe, mehrschichtige Strukturen in einem vollautomatisierten Verfahren hergestellt werden könnten [163].

Die Verwendung monolithischen Zirkonoxids für implantatgetragene Einzelkronen scheint vor allem wirtschaftlich interessant, sollte unter mechanischen Aspekten aber intensiv diskutiert werden. Gegenwärtig stellen lithiumdisilikatverblendete Zirkonoxidabutments und monolithische Hybridabutmentkronen aus Lithiumdisilikat eine bewährte und zuverlässige Restaurationsoption dar.

Die subtraktive Fertigung ermöglicht nicht nur eine optimierte Verarbeitung bekannter Werkstoffe in Form industriell hergestellter Rohlinge, sondern auch den Einsatz innovativer Materialien wie der genannten Hybridwerkstoffe oder von PEEK, das aufgrund seiner charakteristischen Eigenschaften vermehrt in der Zahnmedizin eingesetzt wird [66, 99, 202]. Im Rahmen der Untersuchung von CAD/CAM-gefertigten Sekundärkronen aus PEEK auf Zirkonoxidprimärkronen wiesen diese langfristig stabile Haltekraftwerte auf. Die Kombination der Hochleistungswerkstoffe Zirkonoxid und PEEK mithilfe der CAD/CAM-Technologie könnte demnach helfen, die Doppelkronentechnik digital zu transformieren und dabei die Kosten erheblich zu senken.

Die additive Fertigung ermöglicht die hochstandardisierte Herstellung komplexer Geometrien in kurzer Zeit, die zu einer erheblichen Ersparnis an Ressourcen führt. Anlässlich dieser Arbeit konnten für lasergesinterte Modellgussklammern im Vergleich zu gegossenen konstantere Haltekraftwerte und höhere Überlebensraten nachgewiesen werden. Da die Modellierung von Klammermodellgussgerüsten aufwendig ist und – im System der Festzuschüsse zum Zahnersatz in der deutschen gesetzlichen

Krankenversicherung – vergleichsweise schlecht honoriert wird, könnte eine Kombination von vollautomatisiertem Gerüstdesign und additiver Fertigung in Zukunft die Wirtschaftlichkeit und Qualität dieses Zahnersatzes deutlich steigern.

Aufgrund der unbestreitbaren Vorteile bei der Umsetzung großvolumiger Bauteile bietet sich die additive Fertigung für die digitale Herstellung von Totalprothesen an. In einer umfassenden In-vitro-Untersuchung konnte jedoch nachgewiesen werden, dass das Fräsen von Totalprothesenbasen hinsichtlich der Kongruenz mit der Kieferoberfläche, also der Passung, allen derzeit in der Zahnmedizin relevanten additiven Fertigungstechnologien und der konventionellen Injektionstechnik überlegen ist. Allerdings ist zu konstatieren, dass es bei den additiven Technologien noch enormes Entwicklungspotenzial gibt, während die konventionellen Techniken weitestgehend ausgereizt sind. In diesem Zusammenhang könnte der Multimaterialdruck einen Paradigmenwechsel herbeiführen und in Zukunft die Herstellung der Prothese – inklusive Schleimhaut- und Zahnanteilen – in einem Schritt ermöglichen [163]. Entscheidend ist dabei die Entwicklung ästhetisch ansprechender, chemisch und mechanisch resistenter, biokompatibler und langfristig dimensionsstabiler Werkstoffe.

Ein weiteres Einsatzgebiet additiver Technologien sind dentale Modelle. Während sich 3-D-gedruckte Modelle als Arbeitsmodelle oder in der Kieferorthopädie bewährt haben, sind sie für die Fertigung von Zahnersatz noch nicht geeignet [32, 134, 147]. Dennoch werden diese Modelle häufig genutzt, um beispielsweise approximale und okklusale Kontakte anzupassen. Im Zuge dieses Projekts wurde nachgewiesen, dass sich dieses Vorgehen, im Vergleich zu einem modellfreien Protokoll, zwar positiv auf die Arbeitszeit bei der Eingliederung von Implantatkronen auswirkt, allerdings auf Kosten der Qualität der Kontaktbeziehung. Darüber hinaus verlängert sich die Gesamtbearbeitungszeit in Labor und Praxis. Diese Erkenntnisse und ökonomische Überlegungen legen nahe, dass sich nachfolgende Anstrengungen auf die weitere Optimierung des modellfreien Workflows konzentrieren sollten.

Digitale prothetisch-implantologische Konzepte wie das „Münchener Implantatkonzept“ (MIC) [23, 48] oder das im Rahmen dieses Projekts entwickelte „Digital Tissue Preservation Concept“ können helfen, klinische und labortechnische Arbeitsabläufe zu optimieren, Behandlungstermine einzusparen und die Invasivität der chirurgischen

Intervention zu verringern. Insbesondere das Konzept der virtuellen „Hybridmodelle“, also der Fusion von Intraoralscandaten und vorab gewonnenen Oberflächendaten von Implantatabutments, ist gleichbedeutend mit einer völlig atraumatischen und unkomplizierten Abformung. Nachdem die überlegene Zuverlässigkeit der Methodik hat belegt werden können, stellt deren Integration in eine CAD-Software im Sinne eines automatischen Softwaretools den nächsten logischen Schritt dar.

Letztlich bieten die digitalen Technologien nicht nur einen Ersatz für herkömmliche Verfahren oder völlig neue Ansätze. Sie können auch nutzbringend eingesetzt werden, um die funktionelle Integrität und den Komfort von hochqualitativem konventionellem Zahnersatz zu erhalten. Als Beispiel kann das digitale „Doppelkronenrettungskonzept“ gelten, das durch den umfassenden Einsatz innovativer Technik die Restitutio ad integrum ermöglicht. Hierdurch ist langfristig ein ökonomischer Vorteil zu erwarten, weil Kosten für Neuanfertigungen vermieden werden können.

Der Umstieg auf digitale Technologien bedeutet für den Zahnarzt und den Zahntechniker nicht weniger als eine Abkehr von vertrauten Routinen in Praxis und Labor. Dies erfordert technische Veränderungen ebenso wie aktiven Wissenserwerb und stellt auch aus psychologischer Sicht eine nicht unbedeutende Hürde dar. Technologische Neuerungen sind häufig langwierige Prozesse und in der Regel auch mit Rückschlägen verbunden. Dennoch bietet die Etablierung neuer Konzepte, Prozesse und Strategien im Rahmen der Digitalisierung enorme Chancen. Nach der Überwindung bestehender Schwächen werden sich digitale Verfahren aufgrund ihrer unbestreitbaren Vorteile weiter in der zahnärztlichen Praxis etablieren – zum Wohl des Patienten.

5 Literaturverzeichnis

1. Abduo, J., et al., *The Effect of Coded Healing Abutments on Treatment Duration and Clinical Outcome: A Randomized Controlled Clinical Trial Comparing Encode and Conventional Impression Protocols*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2017. 32(5): p. 1172–1179.
2. Abrahamsson, I., T. Berglundh, and J. Lindhe, *The mucosal barrier following abutment dis/reconnection. An experimental study in dogs*. J Clin Periodontol, 1997. 24(8): p. 568–72.
3. Ahlers, M. O., et al., *Motion analysis of the mandible: guidelines for standardized analysis of computer-assisted recording of condylar movements*. Int J Comput Dent, 2015. 18(3): p. 201–23.
4. Ahlholm, P., et al., *Digital Versus Conventional Impressions in Fixed Prosthodontics: A Review*. J Prosthodont, 2018. 27(1): p. 35–41.
5. Akesson, J., A. Sundh, and G. Sjogren, *Fracture resistance of all-ceramic crowns placed on a preparation with a slice-formed finishing line*. J Oral Rehabil, 2009. 36(7): p. 516–23.
6. Al-Omari, W. M. and A. M. Al-Wahadni, *Convergence angle, occlusal reduction, and finish line depth of full-crown preparations made by dental students*. Quintessence Int, 2004. 35(4): p. 287–93.
7. Alageel, O., et al., *Removable partial denture alloys processed by laser-sintering technique*. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2018. 106(3): p. 1174–1185.
8. Alharbi, N., D. Wismeijer, and R. B. Osman, *Additive Manufacturing Techniques in Prosthodontics: Where Do We Currently Stand? A Critical Review*. Int J Prosthodont, 2017. 30(5): p. 474–484.
9. Alves de Carvalho, I. F., et al., *Clinical Performance of CAD/CAM Tooth-Supported Ceramic Restorations: A Systematic Review*. Int J Periodontics Restorative Dent, 2018. 38(4): p. e68–e78.

10. Andriessen, F. S., et al., *Applicability and accuracy of an intraoral scanner for scanning multiple implants in edentulous mandibles: a pilot study*. J Prosthet Dent, 2014. 111(3): p. 186–94.
11. Annerstedt, A., et al., *Axial wall convergence of full veneer crown preparations. Documented for dental students and general practitioners*. Acta Odontol Scand, 1996. 54(2): p. 109–12.
12. Arnold, C., et al., *Retention force of removable partial dentures with different double crowns*. Clin Oral Investig, 2017.
13. Arslan, M., et al., *Evaluation of flexural strength and surface properties of prepolymerized CAD/CAM PMMA-based polymers used for digital 3D complete dentures*. Int J Comput Dent, 2018. 21(1): p. 31–40.
14. Atieh, M. A., et al., *The One Abutment-One Time Protocol: A Systematic Review and Meta-Analysis*. J Periodontol, 2017. 88(11): p. 1173–1185.
15. Baltzer, A., *All-ceramic single-tooth restorations: choosing the material to match the preparation – preparing the tooth to match the material*. Int J Comput Dent, 2008. 11(3–4): p. 241–56.
16. Baumgart, P., et al., *Biomechanical properties of polymer-infiltrated ceramic crowns on one-piece zirconia implants after long-term chewing simulation*. Int J Implant Dent, 2018. 4(1): p. 16.
17. Bayer, S., et al., *Changes in retention force with electroplated copings on conical crowns: a comparison of gold and zirconia primary crowns*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2012. 27(3): p. 577–85.
18. Beguma, Z. and P. Chhedat, *Rapid prototyping – when virtual meets reality*. Int J Comput Dent, 2014. 17(4): p. 297–306.
19. Benavides, E., et al., *Use of cone beam computed tomography in implant dentistry: the International Congress of Oral Implantologists consensus report*. Implant Dent, 2012. 21(2): p. 78–86.
20. Beuer, F., et al., *Effect of preparation design on the fracture resistance of zirconia crown copings*. Dent Mater J, 2008. 27(3): p. 362–7.

21. Beuer, F., et al., *Effect of preparation angles on the precision of zirconia crown copings fabricated by CAD/CAM system*. Dent Mater J, 2008. 27(6): p. 814–20.
22. Beuer, F., et al., *Parameters affecting retentive force of electroformed double-crown systems*. Clin Oral Investig, 2010. 14(2): p. 129–35.
23. Beuer, F., et al., *The Digital One-Abutment/One-Time Concept. A Clinical Report*. J Prosthodont, 2015. 24(7): p. 580–85.
24. Beuer, F., J. Schweiger, and D. Edelhoff, *Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations*. British Dental Journal, 2008. 204(9): p. 505–11.
25. Beuer, F., et al., *High-strength CAD/CAM-fabricated veneering material sintered to zirconia copings – a new fabrication mode for all-ceramic restorations*. Dent Mater, 2009. 25(1): p. 121–8.
26. Beuer, F., et al., *In vitro performance of full-contour zirconia single crowns*. Dent Mater, 2012. 28(4): p. 449–56.
27. Bhola, M., A. L. Neely, and S. Kolhatkar, *Immediate implant placement: clinical decisions, advantages, and disadvantages*. J Prosthodont, 2008. 17(7): p. 576–81.
28. Bidra, A. S., T. D. Taylor, and J. R. Agar, *Computer-Aided Technology for Fabricating Complete Dentures: Systematic Review of Historical Background, Current Status, and Future Perspectives*. Journal of Prosthetic Dentistry, 2013. 109(6): p. 361–6.
29. Bilgin, M. S., et al., *A review of computer-aided design/computer-aided manufacture techniques for removable denture fabrication*. Eur J Dent, 2016. 10(2): p. 286–91.
30. Böttger, H., *Die prothetische Versorgung des Lückengebisses mit Teleskopprothesen*. Zahnärztl Rundsch 1953(62): p. 18–23.
31. Bover-Ramos, F., et al., *Accuracy of Implant Placement with Computer-Guided Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis Comparing Cadaver, Clinical, and In Vitro Studies*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2017.

32. Buda, M., M. Bratos, and J. A. Sorensen, *Accuracy of 3-dimensional computer-aided manufactured single-tooth implant definitive casts*. J Prosthet Dent, 2018. 120(6): p. 913–8.
33. Camardella, L. T., et al., *Effect of polyvinylsiloxane material and impression handling on the accuracy of digital models*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2016. 149(5): p. 634–44.
34. Campbell, S. D., et al., *Removable partial dentures: The clinical need for innovation*. J Prosthet Dent, 2017. 118(3): p. 273–80.
35. Chebib, N., et al., *Edentulous jaw impression techniques: An in vivo comparison of trueness*. J Prosthet Dent, 2019. 121(4): p. 623–30.
36. Cho, H. Y., et al., *Fracture Characteristics of Dental Ceramic Crown according to Zirconia Coping Design*. Procedia Engineering, 2011. 10: p. 1561–6.
37. Cho, W. T., et al., *Cordless digital workflow for scanning implant-supported prostheses at the abutment level: A dental technique*. J Prosthet Dent, 2020. 124(4): p. 428–30.
38. Christensen, G. J., *Will digital impressions eliminate the current problems with conventional impressions?* J Am Dent Assoc, 2008. 139(6): p. 761–3.
39. Czigola, A., et al., *Comparing the effectiveness of shade measurement by intraoral scanner, digital spectrophotometer, and visual shade assessment*. J Esthet Restor Dent, 2021. 33(8): p. 1166–74.
40. Darvell, B. W. and R. K. F. Clark, *The physical mechanisms of complete denture retention*. British Dental Journal, 2000. 189(5): p. 248–52.
41. Degidi, M., et al., *Nonremoval of immediate abutments in cases involving subcrestally placed postextractive tapered single implants: a randomized controlled clinical study*. Clin Implant Dent Relat Res, 2014. 16(6): p. 794–805.
42. Degidi, M., D. Nardi, and A. Piattelli, *One abutment at one time: non-removal of an immediate abutment and its effect on bone healing around subcrestal tapered implants*. Clin Oral Implants Res, 2011. 22(11): p. 1303–7.

-
43. Dettinger, J., et al., *Status Vollkeramik – jetzt im Praxisalltag*. AG Keramik, 2018: p. 14.
 44. Di Fiore, A., et al., *Digital vs Conventional Workflow for Screw-Retained Single-Implant Crowns: A Comparison of Key Considerations*. Int J Prosthodont, 2018. 31(6): p. 577–9.
 45. Diedrichs, G. and P. Rosenhain, *Galvano-Außenteleskope in der direkten Technik*. Quintessenz, 1991(42): p. 49–55.
 46. Dillschneider, T., et al., *In vitro-investigations on the wear behavior of different double crown systems*. Dental Materials, 2009. 25(5): p. e20.
 47. Edelhoff, D., et al., *Metal-free implant-supported single-tooth restorations. Part II: Hybrid abutment crowns and material selection*. Quintessence Int, 2019. 50(4): p. 260–9.
 48. Edinger, D. H. and F. Beuer, *Rehabilitation of one-piece screw-retained implant crowns placed at second-stage surgery-a retrospective patient series*. Clin Oral Investig, 2021. 25(3): p. 1345–51.
 49. Eichner, K. and H. F. Kappert, *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung – Band 1 Grundlagen und Verarbeitung*. Vol. 8. 2005, Stuttgart – New York City: Georg Thieme Verlag. 432.
 50. Einarsdottir, E. R., et al., *Dimensional stability of double-processed complete denture bases fabricated with compression molding, injection molding, and CAD-CAM subtraction milling*. J Prosthet Dent, 2020. 124(1): p. 116–21.
 51. Eldafrawy, M., et al., *Bonding to CAD-CAM Composites: An Interfacial Fracture Toughness Approach*. J Dent Res, 2018. 97(1): p. 60–7.
 52. Elsayed, A., et al., *Effect of fatigue loading on the fracture strength and failure mode of lithium disilicate and zirconia implant abutments*. Clin Oral Implants Res, 2018. 29(1): p. 20–7.
 53. Ender, A., et al., *In vivo precision of conventional and digital methods for obtaining quadrant dental impressions*. Clin Oral Investig, 2016. 20(7): p. 1495–504.

54. Ender, A., M. Zimmermann, and A. Mehl, *Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro*. *Int J Comput Dent*, 2019. 22(1): p. 11–9.
55. Engels, J., et al., *Wear behavior of different double-crown systems*. *Clin Oral Investig*, 2013. 17(2): p. 503–10.
56. Fernandez-Gil, A., et al., *An In Vitro Model to Evaluate the Accuracy of Guided Implant Placement Based on the Surgeon's Experience*. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2017. 32(3): p. 151–4.
57. Flugge, T., 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(9): p. 1113–8.
58. Ganz, S. D., *Cone beam computed tomography-assisted treatment planning concepts*. *Dent Clin North Am*, 2011. 55(3): p. 515–36, viii.
59. Gehrke, P., et al., *Retentive strength of two-piece CAD/CAM zirconia implant abutments*. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2014. 16(6): p. 920–5.
60. Goodacre, B. J. and C. J. Goodacre, *Using Intraoral Scanning to Fabricate Complete Dentures: First Experiences*. *Int J Prosthodont*, 2018. 31(2): p. 166–70.
61. Goodacre, B. J., C. J. Goodacre, and N. Z. Baba, *Using Intraoral Scanning to Capture Complete Denture Impressions, Tooth Positions, and Centric Relation Records*. *Int J Prosthodont*, 2018. 31(4): p. 377–81.
62. Goodacre, B. J., et al., *Comparison of denture base adaptation between CAD-CAM and conventional fabrication techniques*. *J Prosthet Dent*, 2016. 116(2): p. 249–56.
63. Gupta, A. K., et al., *Pore formation in cast metals and alloys*. *Journal of Materials Science*, 1992. 27(4): p. 853–62.
64. Guth, J. F., et al., *Computer-aided evaluation of preparations for CAD/CAM-fabricated all-ceramic crowns*. *Clin Oral Investig*, 2013. 17(5): p. 1389–95.
65. Hack, G., et al., *Computerized optical impression making of edentulous jaws – An in vivo feasibility study*. *J Prosthodont Res*, 2020. 64(4): p. 444–53.

66. Hahnel, S., et al., *Biofilm formation on the surface of modern implant abutment materials*. Clin Oral Implants Res, 2015. 26(11): p. 1297–301.
67. Hassan, B., et al., *Influence of scanning and reconstruction parameters on quality of three-dimensional surface models of the dental arches from cone beam computed tomography*. Clin Oral Investig, 2010. 14(3): p. 303–10.
68. Hinckfuss, S., et al., *Effect of surgical guide design and surgeon's experience on the accuracy of implant placement*. J Oral Implantol, 2012. 38(4): p. 311–23.
69. Hmaidouch, R. and P. Weigl, *Tooth wear against ceramic crowns in posterior region: a systematic literature review*. Int J Oral Sci, 2013. 5(4): p. 183–90.
70. Hodosh, M., et al., *Implants of Acrylic Teeth in Human Beings and Experimental Animals; Clinical and Microscopic Studies*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1964. 18: p. 569–79.
71. Hofmann, M., *3D Printing Gets a Boost and Opportunities with Polymer Materials*. ACS Macro Letters, 2014. 3: p. 382–386.
72. Hultin, M., K. G. Svensson, and M. Trulsson, *Clinical advantages of computer-guided implant placement: a systematic review*. Clin Oral Implants Res, 2012. 23 Suppl 6: p. 124–35.
73. Jacobs, R. and M. Quirynen, *Dental cone beam computed tomography: justification for use in planning oral implant placement*. Periodontol 2000, 2014. 66(1): p. 203–13.
74. Jang, G. W., et al., *Fracture Strength and Mechanism of Dental Ceramic Crown with Zirconia Thickness*. Procedia Engineering, 2011. 10(10): p. 1556–60.
75. Jeon, J. H., et al., *Trueness and precision of scanning abutment impressions and stone models according to dental CAD/CAM evaluation standards*. J Adv Prosthodont, 2018. 10(5): p. 335–9.
76. Joda, T. and U. Bragger, *Digital vs. conventional implant prosthetic workflows: a cost/time analysis*. Clin Oral Implants Res, 2015. 26(12): p. 1430–5.

77. Joda, T. and U. Bragger, *Time-Efficiency Analysis Comparing Digital and Conventional Workflows for Implant Crowns: A Prospective Clinical Crossover Trial*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2015. 30(5): p. 1047–53.
78. Joda, T. and U. Bragger, *Time-efficiency analysis of the treatment with monolithic implant crowns in a digital workflow: a randomized controlled trial*. Clin Oral Implants Res, 2016. 27(11): p. 1401–6.
79. Joda, T., et al., *Digital technology in fixed implant prosthodontics*. Periodontol 2000, 2017. 73(1): p. 178–92.
80. Joda, T., J. Katsoulis, and U. Bragger, *Clinical Fitting and Adjustment Time for Implant-Supported Crowns Comparing Digital and Conventional Workflows*. Clin Implant Dent Relat Res, 2016. 18(5): p. 946–54.
81. Jung, R. E., et al., *Systematic review of the survival rate and the incidence of biological, technical, and aesthetic complications of single crowns on implants reported in longitudinal studies with a mean follow-up of 5 years*. Clin Oral Implants Res, 2012. 23 Suppl 6: p. 2–21.
82. Kalberer, N., et al., *CAD-CAM milled versus rapidly prototyped (3D-printed) complete dentures: An in vitro evaluation of trueness*. J Prosthet Dent, 2019.
83. Kanat, B., et al., *Effect of various veneering techniques on mechanical strength of computer-controlled zirconia framework designs*. J Prosthodont, 2014. 23(6): p. 445–55.
84. Kattadiyil, M. T., C. J. Goodacre, and N. Z. Baba, *CAD/CAM complete dentures: a review of two commercial fabrication systems*. J Calif Dent Assoc., 2013. 41(6): p. 407–16.
85. Keul, C., et al., *Fit of 4-unit FDPs made of zirconia and CoCr-alloy after chairside and labside digitalization – a laboratory study*. Dent Mater, 2014. 30(4): p. 400–7.
86. Kim, J. E., et al., *Accuracy of Scanned Stock Abutments Using Different Intraoral Scanners: An In Vitro Study*. J Prosthodont, 2019. 28(7): p. 797–803.

87. Kim, J. E., et al., *Simplified digital workflow for dental implant restoration on a stock abutment using an intraoral scanner: A dental technique*. J Prosthet Dent, 2017. 118(3): p. 268–272.
88. Kim, K. R., K. Y. Seo, and S. Kim, *Conventional open-tray impression versus intraoral digital scan for implant-level complete-arch impression*. J Prosthet Dent, 2019.
89. Kim, R. J. Y., G. I. Benic, and J. M. Park, *Trueness of ten intraoral scanners in determining the positions of simulated implant scan bodies*. Sci Rep, 2021. 11(1): p. 2606.
90. Kim, S. Y., S. Y. Shin, and J. H. Lee, *Effect of cyclic bend loading on a cobalt-chromium clasp fabricated by direct metal laser sintering*. J Prosthet Dent, 2018. 119(6): p. 1027 e1–7.
91. Kirsch, C., et al., *Trueness of four different milling procedures used in dental CAD/CAM systems*. Clin Oral Investig, 2017. 21(2): p. 551–8.
92. Kohal, R., G. Klaus, and J. R. Strub, *Clinical investigation of a new dental immediate implant system. The Reimplant-System*. Dtsch Zahnärztl Z, 2002(57): p. 495–7.
93. Kohal, R. J., et al., *Wurzelanalogue Titanimplantate (Bio-Design-Implantate) für die Sofortimplantation – das Re-Implant-System*. Implantologie 1996. Implantologie 4(2).
94. Kokubo, Y., et al., *The influence of zirconia coping designs on the fracture load of all-ceramic molar crowns*. Dent Mater J, 2011. 30(3): p. 281–5.
95. Körber, K., *Konuskronen – ein physikalisch definiertes Teleskopsystem*. Dtsch Zahnärztl Z, 1968. 23: p. 619–30.
96. Körber, K. and K. Ludwig, *Maximale Kaukraft als Berechnungsfaktor zahntechnischer Konstruktionen*. Dent Lab, 1983. 31: p. 55–60.
97. Kordass, B., et al., *Current technologies for functional diagnostics and CAD/CAM*. Int J Comput Dent, 2013. 16(2): p. 163–71.

98. Kunkel, T. C., R. L. Engelmeier, and N. H. Shah, *A comparison of crown preparation grading via PrepCheck versus grading by dental school instructors*. *Int J Comput Dent*, 2018. 21(4): p. 305–11.
99. Kurtz, S. M. and J. N. Devine, *PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants*. *Biomaterials*, 2007. 28(32): p. 4845–69.
100. Laederach, V., et al., *Deviations of different systems for guided implant surgery*. *Clin Oral Implants Res*, 2017. 28(9): p. 1147–51.
101. Lally, U., *Resin-bonded fixed partial dentures past and present – an overview*. *J Ir Dent Assoc*, 2012. 58(6): p. 294–300.
102. Langer, A., *Telescope retainers and their clinical application*. *J Prosthet Dent*, 1980. 44(5): p. 516–22.
103. Langer, A., *Telescope retainers for removable partial dentures*. *J Prosthet Dent*, 1981. 45(1): p. 37–43.
104. Lanis, A. and O. Alvarez Del Canto, *The combination of digital surface scanners and cone beam computed tomography technology for guided implant surgery using 3Shape implant studio software: a case history report*. *Int J Prosthodont*, 2015. 28(2): p. 169–78.
105. Lee, C. Y., et al., *Use of cone beam computed tomography and a laser intraoral scanner in virtual dental implant surgery: part 1*. *Implant Dent*, 2012. 21(4): p. 265–71.
106. Lepidi, L., et al., *Virtual Articulators and Virtual Mounting Procedures: Where Do We Stand?* *J Prosthodont*, 2021. 30(1): p. 24–35.
107. Lian, M., et al., *Prognosis of Combining Remaining Teeth and Implants in Double-Crown-Retained Removable Dental Protheses: A Systematic Review and Meta-Analysis*. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2018. 33(2): p. 281–97.
108. Ligon, S. C., et al., *Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing*. *Chem Rev*, 2017. 117(15): p. 10212–90.
109. Lo Russo, L., et al., *Digital dentures: A protocol based on intraoral scans*. *J Prosthet Dent*, 2020.

110. Lundgren, D., et al., *Healing-in of root analogue titanium implants placed in extraction sockets. An experimental study in the beagle dog.* Clin Oral Implants Res, 1992. 3(3): p. 136–43.
111. Mandelli, F., et al., *Evaluation of the accuracy of extraoral laboratory scanners with a single-tooth abutment model: A 3D analysis.* J Prosthodont Res, 2017. 61(4): p. 363–70.
112. Mangano, F., B. Margiani, and O. Admakin, *A Novel Full-Digital Protocol (SCAN-PLAN-MAKE-DONE((R))) for the Design and Fabrication of Implant-Supported Monolithic Translucent Zirconia Crowns Cemented on Customized Hybrid Abutments: A Retrospective Clinical Study on 25 Patients.* Int J Environ Res Public Health, 2019. 16(3).
113. Maria, R., et al., *Accuracy of Implant Analogs in 3D Printed Resin Models.* J Prosthodont, 2021. 30(1): p. 57–64.
114. Matta, R. E., et al., *Accuracy of impression scanning compared with stone casts of implant impressions.* J Prosthet Dent, 2017. 117(4): p. 507–12.
115. Mazza, L. C., et al., *Survival and complications of monolithic ceramic for tooth-supported fixed dental prostheses: A systematic review and meta-analysis.* J Prosthet Dent, 2021.
116. Mendes, J. M., et al., *Survival Rates of Anterior-Region Resin-Bonded Fixed Dental Prostheses: An Integrative Review.* Eur J Dent, 2021. 15(4): p. 788–97.
117. Merk, S., et al., *Suitability of Secondary PEEK Telescopic Crowns on Zirconia Primary Crowns: The Influence of Fabrication Method and Taper.* Materials (Basel), 2016. 9(11).
118. Meyer, G., S. Ahsbahs, and M. Kern. *Vollkeramische Kronen und Brücken – S3-Leitlinie (AWMF-Registernummer 083-012).* 2015 [cited 2021; Available from: <http://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/083-012.html>].
119. Michou, S., et al., *Intraoral scanner featuring transillumination for proximal caries detection. An in vitro validation study on permanent posterior teeth.* J Dent, 2022. 116: p. 103841.

120. Mine, A., et al., *Critical review about two myths in fixed dental prostheses: Full-Coverage vs. Resin-Bonded, non-Cantilever vs. Cantilever*. Jpn Dent Sci Rev, 2021. 57: p. 33–8.
121. Miyazaki, T., et al., *A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience*. Dental Materials Journal, 2009. 28(1): p. 44–56.
122. Miyazaki, T., et al., *Current status of zirconia restoration*. J Prosthodont Res, 2013. 57(4): p. 236–61.
123. Moin, D. A., et al., *Designing a novel dental root analogue implant using cone beam computed tomography and CAD/CAM technology*. Clin Oral Implants Res, 2013. 24 Suppl A100: p. 25–7.
124. Moin, D. A., et al., *Accuracy of preemptively constructed, cone beam CT-, and CAD/CAM technology-based, individual Root Analogue Implant technique: an in vitro pilot investigation*. Clin Oral Implants Res, 2014. 25(5): p. 598–602.
125. Monroy, K., J. Delgado, and J. Ciurana, *Study of the Pore Formation on CoCrMo Alloys by Selective Laser Melting Manufacturing Process*. Procedia Engineering, 2013. 63: p. 361–9.
126. Moraschini, V., et al., *Evaluation of survival and success rates of dental implants reported in longitudinal studies with a follow-up period of at least 10 years: a systematic review*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2015. 44(3): p. 377–88.
127. Motel, C., et al., *Impact of Different Scan Bodies and Scan Strategies on the Accuracy of Digital Implant Impressions Assessed with an Intraoral Scanner: An In Vitro Study*. J Prosthodont, 2020. 29(4): p. 309–14.
128. Mühlemann, S., et al., *Is the use of digital technologies for the fabrication of implant supported reconstructions more efficient and/or more effective than conventional techniques: A systematic review*. 2018. 29: p. 18T 195.
129. Nakata, T., H. Shimpo, and C. Ohkubo, *Clasp fabrication using one-process molding by repeated laser sintering and high-speed milling*. J Prosthodont Res, 2017. 61(3): p. 276–82.

130. Naveau, A., C. Rignon-Bret, and C. Wulfman, *Zirconia abutments in the anterior region: A systematic review of mechanical and esthetic outcomes*. J Prosthet Dent, 2019. 121(5): p. 775–81 e1.
131. Pan, S., et al., *Time efficiency and quality of outcomes in a model-free digital workflow using digital impression immediately after implant placement: A double-blind self-controlled clinical trial*. Clin Oral Implants Res, 2019. 30(7): p. 617–26.
132. Papadiochou, S. and A. L. Pissiotis, *Marginal adaptation and CAD-CAM technology: A systematic review of restorative material and fabrication techniques*. J Prosthet Dent, 2018. 119(4): p. 545–51.
133. Park, J. M., et al., *Comparison of five-axis milling and rapid prototyping for implant surgical templates*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2014. 29(2): p. 374–83.
134. Park, M. E. and S. Y. Shin, *Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers*. J Prosthet Dent, 2018. 119(5): p. 861 e1–7.
135. Passia, N., et al., *Bond strength of a new generation of universal bonding systems to zirconia ceramic*. J Mech Behav Biomed Mater, 2016. 62: p. 268–74.
136. Patzelt, S. B., et al., *Assessing the feasibility and accuracy of digitizing edentulous jaws*. J Am Dent Assoc, 2013. 144(8): p. 914–20.
137. Peluso, M. J., et al., *Digital models: An introduction*. Seminars in Orthodontics, 2004. 10(3): p. 226–38.
138. Pettersson, A., et al., *Accuracy of virtually planned and template guided implant surgery on edentate patients*. Clin Implant Dent Relat Res, 2012. 14(4): p. 527–37.
139. Pieralli, S., et al., *Digitization of One-Piece Oral Implants: A Feasibility Study*. Materials (Basel), 2020. 13(8).
140. Pitta, J., et al., *Mechanical stability of zirconia meso-abutments bonded to titanium bases restored with different monolithic all-ceramic crowns*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2019. 34(5): p. 1091–7.
141. Pjetursson, B. E., et al., *A systematic review and meta-analysis evaluating the survival, the failure, and the complication rates of veneered and monolithic all-*

- ceramic implant-supported single crowns*. Clin Oral Implants Res, 2021. 32 Suppl 21: p. 254–88.
142. Preis, V., et al., *In-vitro fatigue and fracture testing of CAD/CAM-materials in implant-supported molar crowns*. Dent Mater, 2017. 33(4): p. 427–33.
143. Rammelsberg, P., et al., *Prognosis of implants and abutment teeth under combined tooth-implant-supported and solely implant-supported double-crown-retained removable dental prostheses*. Clin Oral Implants Res, 2014. 25(7): p. 813–8.
144. Reich, S., et al., *Monolithic restorations on customized titanium abutments – a cast-free approach without the necessity of gingiva management for impression taking*. Int J Comput Dent, 2019. 22(4): p. 381–8.
145. Renne, W., et al., *Predicting marginal fit of CAD/CAM crowns based on the presence or absence of common preparation errors*. J Prosthet Dent, 2012. 108(5): p. 310–5.
146. Revilla-Leon, M. and M. Ozcan, *Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry*. J Prosthodont, 2019. 28(2): p. 146–58.
147. Revilla-León, M. and M. Özcan, *Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry*. J Prosthodont, 2019. 28(2): p. 146–58.
148. Riedel, C., et al., *In vitro lifetime of zirconium dioxide-based crowns veneered using Rapid Layer Technology*. Eur J Oral Sci, 2019. 127(2): p. 179–86.
149. Ritter, L., et al., *Registration accuracy of three-dimensional surface and cone beam computed tomography data for virtual implant planning*. Clin Oral Implants Res, 2012. 23(4): p. 447–52.
150. Roach, F. E., *Principles and Essentials of Bar Clasp Partial Dentures*. The Journal of the American Dental Association 1930. 17(1): p. 124–38.
151. Roberts, E. E., et al., *Fracture Resistance of Titanium-Based Lithium Disilicate and Zirconia Implant Restorations*. J Prosthodont, 2018. 27(7): p. 644–50.

152. Runkel, C., et al., *Digital impressions in dentistry-accuracy of impression digitalisation by desktop scanners*. Clin Oral Investig, 2020. 24(3): p. 1249–57.
153. Sailer, I., et al., *All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs)*. Dent Mater, 2015. 31(6): p. 603–23.
154. Samran, A., et al., *Bond strength durability of self-adhesive resin cements to zirconia ceramic: An in vitro study*. J Prosthet Dent, 2019. 121(3): p. 477–84.
155. Sander, G., et al., *Corrosion of additively manufactured alloys: a review*. 2018. 74(12): p. 1318–50.
156. Sasse, M. and M. Kern, *CAD/CAM single retainer zirconia-ceramic resin-bonded fixed dental prostheses: clinical outcome after 5 years*. Int J Comput Dent, 2013. 16(2): p. 109–18.
157. Scherer, M. D., *Presurgical implant-site assessment and restoratively driven digital planning*. Dent Clin North Am, 2014. 58(3): p. 561–95.
158. Schmitter, M., D. Mueller, and S. Rues, *Chipping behaviour of all-ceramic crowns with zirconia framework and CAD/CAM manufactured veneer*. J Dent, 2012. 40(2): p. 154–62.
159. Schmitter, M., et al., *Effect on in vitro fracture resistance of the technique used to attach lithium disilicate ceramic veneer to zirconia frameworks*. Dent Mater, 2014. 30(2): p. 122–30.
160. Schubert, O., et al., *Two digital strategies in modern implantology – root-analogue implants and the digital one-abutment/one-time concept*. Int J Comput Dent, 2018. 21(2): p. 115–31.
161. Schubert, O., et al., *Digital Tissue Preservation Concept: A Workflow for Guided Immediate Implant Placement and Restoration*. J Prosthodont, 2019. 28(6): p. 613–7.
162. Schubert, O., et al., *Digital implant planning and guided implant surgery – workflow and reliability*. Br Dent J, 2019. 226(2): p. 101–8.

163. Schweiger, J., D. Edelhoff, and J. F. Güth, *3D Printing in Digital Prosthetic Dentistry: An Overview of Recent Developments in Additive Manufacturing*. J Clin Med, 2021. 10(9).
164. Schweiger, J., et al., *Automatisierte Fertigung von mehrschichtigem Frontzahnersatz mithilfe digitaler Dentinkerne*. Quintessenz Zahntech, 2014. 40: p. 1248–66.
165. Schweiger, J., et al., *Systematics and concepts for the digital production of complete dentures: risks and opportunities*. Int J Comput Dent, 2018. 21(1): p. 41–56.
166. Schwickerath, H., *Fatigue Limit of Ceramic Materials*. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 1986. 41(2): p. 264–6.
167. Schwickerath, H., *Neue Keramiksysteme unter Dauerbeanspruchung*. Quintessence Zahntech, 1994. 20: p. 1495–501.
168. Shembesh, M., et al., *An In Vitro Comparison of the Marginal Adaptation Accuracy of CAD/CAM Restorations Using Different Impression Systems*. J Prosthodont, 2017. 26(7): p. 581–6.
169. Spin-Neto, R., E. Gotfredsen, and A. Wenzel, *Impact of voxel size variation on CBCT-based diagnostic outcome in dentistry: a systematic review*. J Digit Imaging, 2013. 26(4): p. 813–20.
170. Spitznagel, F. A., et al., *Resin bond to indirect composite and new ceramic/polymer materials: a review of the literature*. J Esthet Restor Dent, 2014. 26(6): p. 382–93.
171. Srinivasan, M., et al., *CAD/CAM milled complete removable dental prostheses: An in vitro evaluation of biocompatibility, mechanical properties, and surface roughness*. Dent Mater J, 2018. 37(4): p. 526–33.
172. Stansbury, J. W. and M. J. Idacavage, *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*. Dental Materials, 2016. 32(1): p. 54–64.
173. Stansbury, J. W. and M. J. Idacavage, *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*. Dent Mater, 2016. 32(1): p. 54–64.

174. Starr, W., *Removable Bridge-Work – Porcelain Cap-Crowns*. The Dental cosmos; a monthly record of dental science, 1886. 28(1): p. 17–9.
175. Stawarczyk, B., et al., *Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I*. Quintessence Int, 2017. 48(5): p. 369–80.
176. Stawarczyk, B., et al., *Evaluation of mechanical and optical behavior of current esthetic dental restorative CAD/CAM composites*. J Mech Behav Biomed Mater, 2015. 55: p. 1–11.
177. Steinmassl, O., et al., *CAD/CAM produces dentures with improved fit*. Clin Oral Investig, 2018. 22(8): p. 2829–35.
178. Stober, T., et al., *Improvement of oral health-related quality-of-life by use of different kinds of double-crown-retained removable partial dentures*. Acta Odontol Scand, 2016. 74(1): p. 1–6.
179. Stock, V., et al., *PEEK Primary Crowns with Cobalt-Chromium, Zirconia and Galvanic Secondary Crowns with Different Tapers-A Comparison of Retention Forces*. Materials (Basel), 2016. 9(3).
180. Stock, V., et al., *Retention force of differently fabricated telescopic PEEK crowns with different tapers*. Dental Materials Journal, 2016. 35(4): p. 594–600.
181. Tahmaseb, A., et al., *Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2014. 29 Suppl: p. 25–42.
182. Tete, S., et al., *Proliferation and adhesion capability of human gingival fibroblasts onto zirconia, lithium disilicate and feldspathic veneering ceramic in vitro*. Dent Mater J, 2014. 33(1): p. 7–15.
183. Tobar, C., et al., *Influence of Digital Technologies and Framework Design on the Load to Fracture of Co-Cr Posterior Fixed Partial Denture Frameworks*. J Prosthodont, 2021.
184. Torii, M., et al., *Fitness and retentive force of cobalt-chromium alloy clasps fabricated with repeated laser sintering and milling*. J Prosthodont Res, 2018. 62(3): p. 342–6.

185. Tzanakakis, E. G., I. G. Tzoutzas, and P. T. Koidis, *Is there a potential for durable adhesion to zirconia restorations? A systematic review*. J Prosthet Dent, 2016. 115(1): p. 9–19.
186. Unkovskiy, A., et al., *Intraoral scanning to fabricate complete dentures with functional borders: a proof-of-concept case report*. BMC Oral Health, 2019. 19(1): p. 46.
187. Üstün, Ö., I. K. Büyükhatipoğlu, and A. Seçilmiş, *Shear Bond Strength of Repair Systems to New CAD/CAM Restorative Materials*. J Prosthodont, 2018. 27(8): p. 748–54.
188. Utz, K. H., et al., *Instrumentelle zahnärztliche Funktionsanalyse, S2k-Leitlinie (Langversion) AWMF-Registernummer: 083-017, Dezember 2015. Gültig bis Dezember 2020*.
189. Van Assche, N., et al., *Accuracy of computer-aided implant placement*. Clin Oral Implants Res, 2012. 23 Suppl 6: p. 112–23.
190. van Noort, R., *The future of dental devices is digital*. Dental Materials, 2012. 28(1): p. 3–12.
191. Veitz-Keenan, A. and J. R. Keenan, *To cord or not to cord? That is still a question*. Evid Based Dent, 2017. 18(1): p. 21–2.
192. Verch, S., *Vergleichende Untersuchung der Messergebnisse der sagittalen Kondylenbahnneigung und des Bennettwinkels dreier Registrierverfahren. Inaugural Dissertation. Medizinische Fakultät. Freie Universität Berlin*.
193. Verma, R., et al., *A systematic review of the clinical performance of tooth-retained and implant-retained double crown prostheses with a follow-up of ≥ 3 years*. J Prosthodont, 2013. 22(1): p. 2–12.
194. Vermeulen, J., *The Accuracy of Implant Placement by Experienced Surgeons: Guided vs Freehand Approach in a Simulated Plastic Model*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2017. 32(3): p. 617–24.
195. Waerhaug, J. and H. A. Zander, *Implantation of acrylic roots in tooth sockets*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol, 1956. 9(1): p. 46–54.

196. Wagner, C., et al., *Retention Load of Telescopic Crowns with Different Taper Angles between Cobalt-Chromium and Polyetheretherketone Made with Three Different Manufacturing Processes Examined by Pull-Off Test*. J Prosthodont, 2018. 27(2): p. 162–8.
197. Wang, C., et al., *Accuracy of digital complete dentures: A systematic review of in vitro studies*. J Prosthet Dent, 2020.
198. Weigl, P., L. Hahn, and H. C. Lauer, *Advanced biomaterials used for a new telescopic retainer for removable dentures*. J Biomed Mater Res, 2000. 53(4): p. 320–36.
199. Wenz, H. J., K. Hertrampf, and K. M. Lehmann, *Clinical longevity of removable partial dentures retained by telescopic crowns: outcome of the double crown with clearance fit*. Int J Prosthodont, 2001. 14(3): p. 207–13.
200. Wheeler, S. L., R. E. Vogel, and R. Casellini, *Tissue preservation and maintenance of optimum esthetics: a clinical report*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2000. 15(2): p. 265–71.
201. Widmann, G. and R. J. Bale, *Accuracy in computer-aided implant surgery – a review*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2006. 21(2): p. 305–13.
202. Wimmer, T., et al., *Two-body wear rate of PEEK, CAD/CAM resin composite and PMMA: Effect of specimen geometries, antagonist materials and test set-up configuration*. Dent Mater, 2016. 32(6): p. e127–36.
203. Winkelmeyer, C., S. Wolfart, and J. Marotti, *Analysis of tooth preparations for zirconia-based crowns and fixed dental prostheses using stereolithography data sets*. J Prosthet Dent, 2016. 116(5): p. 783–9.
204. Wostmann, B., et al., *Dental impact on daily living of telescopic crown-retained partial dentures*. Int J Prosthodont, 2008. 21(5): p. 419–21.
205. Yagawa, S., et al., *Effect of priming agents on shear bond strengths of resin-based luting agents to a translucent zirconia material*. J Prosthodont Res, 2018. 62(2): p. 204–9.

206. Yan, X., et al., *Effect of two heat treatments on mechanical properties of selective-laser-melted Co-Cr metal-ceramic alloys for application in thin removable partial dentures*. J Prosthet Dent, 2018. 119(6): p. 1028 e1–6.
207. Younes, F., et al., *A randomized controlled study on the accuracy of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients*. J Clin Periodontol, 2018. 45(6): p. 721–32.
208. Zaher, A. M., et al., *Shear bond strength of zirconia-based ceramics veneered with 2 different techniques*. J Prosthet Dent, 2017. 118(2): p. 221–7.
209. Zhang, Y., et al., *Quantitative clinical adjustment analysis of posterior single implant crown in a chairside digital workflow: A randomized controlled trial*. Clin Oral Implants Res, 2019. 30(11): p. 1059–66.
210. Zhi, L., T. Bortolotto, and I. Krejci, *Comparative in vitro wear resistance of CAD/CAM composite resin and ceramic materials*. J Prosthet Dent, 2016. 115(2): p. 199–202.
211. Zimmermann, M., et al., *Fracture load of three-unit full-contour fixed dental prostheses fabricated with subtractive and additive CAD/CAM technology*. Clin Oral Investig, 2020. 24(2): p. 1035–42.

6 Gesamtpublikationsverzeichnis – Publikationen mit Impact Faktor

6.1 Originalarbeiten als Erst- oder Letztautor

1. Schubert, O.; Gaissmaier, M.; Graf, T.; Schweiger, J.; Güth, J.F.: Digital veneering techniques for zirconia implant-supported single crowns - bond strength and clinical application. *Int J Prosthodont.* 2022 Jul-Aug;35(4):545-552. doi: 10.11607/ijp.7563. [IF: 1.785]
2. Schubert, O.; Edelhoff, D.; Erdelt, K.J.; Nold E.; Güth, J.F.: Accuracy of surface adaptation of complete denture bases fabricated using milling, material jetting, selective laser sintering, digital light processing, and conventional injection molding. *Int J Comput Dent.* 2022 Jul 19;25(2):151-159. doi: 10.3290/j.ijcd.b2588131. [IF: 1.883]
3. Graf, T.; Güth, J.F.; Diegritz, C.; Liebermann, A.; Schweiger, J.; Schubert, O.: Efficiency of occlusal and interproximal adjustments in CAD-CAM manufactured single implant crowns - cast-free vs 3D printed cast-based. *J Adv Prosthodont.* 2021 Dec;13(6):351-60. [IF: 1.904]
4. Schubert, O.; Edelhoff, D.; Schweiger, J.; Güth, J.F.: Atraumatic intraoral scans and virtual hybrid casts for custom implant abutments and zirconia implants: Accuracy of the workflow. *J Prosthet Dent.* 2021 Sep 29;S0022-3913(21)00426-1. Online ahead of print. [IF: 3.426]
5. Keul, C.; Runkel, C.; Güth, J.F.; Schubert, O.: Accuracy of data obtained from impression scans and cast scans using different impression materials. *Int J Comput Dent.* 2020;23(2):129-138. [IF: 1.883]
6. Schubert, O.; Erdelt, K.J.; Tittenhofer, R.; Haito, J.; Bergmann, A.; Güth, J.F.: Influence of direct intraoral digitization on quality of all-ceramic single crown preparations. *Clin Oral Invest* (2020). <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03316-2>. [IF: 3.573]
7. Schweiger, J.; Güth, J.F.; Erdelt, K.J.; Edelhoff, D.; Schubert, O.: Internal porosities, retentive force, and survival of cobalt-chromium alloy clasps fabricated by selective laser-sintering. *J Prosthodont Res.* 2020 Apr;64(2): 210-16. doi: 10.1016/j.jpor.2019.07.006. Epub 2019 Nov 1. [IF: 4.642]

8. Schubert, O.; Reitmaier, J.; Schweiger, J.; Erdelt, K.J.; Güth, J.F.: Retentive force of PEEK secondary crowns on zirconia primary crowns over time. Clin Oral Investig., 2019 May;23(5):2331-2338. doi: 10.1007/s00784-018-2657-x. Epub 2018 Oct 6. [IF: 2.812]
9. Schubert O.*; Nold E.*; Obermeier M.; Erdelt K.; Stimmelmayr M.; Beuer F.: Load bearing capacity, fracture mode, and wear performance of digitally veneered full-ceramic single crowns. Int J Comput Dent. 2017;20(3):245-262. [IF: 1.725]

6.2 Originalarbeiten als Koautor

1. Edelhoff, D.; Liebermann, A.; Schubert, O.; Güth, J.F.: Prospective clinical split-mouth study of two-wing retained resin-bonded anterior fixed dental prostheses with metallic and ceramic framework: 5-year results. Int J Prosthodont. 2022 Oct 21. doi: 10.11607/ijp.7765. Online ahead of print. [IF: 1.785]
2. Graf, T.; Kraus, V.; Erdelt, K.J.; Schubert, O.; Edelhoff, D.; Stimmelmayr, M.: Up to 10-Year Incidence of Complications in Fixed vs Removable Implant-Supported Restorations for Edentulous Arches. Int J Prosthodont. 2022 May-Jun;35(3):269-277. doi: 10.11607/ijp.7650. [IF: 1.490]
3. Graf, T.; Schweiger, J.; Güth, J-F.; Sciuk, T.; Schubert. O.; Erdelt, K.: Arithmetic relationship between fracture strength and material thickness of resin-based CAD-CAM restorative materials. Polymers. 2021 Dec 14(1):58, doi: 10.3390/polym14010058. [IF: 4.329]
4. Panagiotis, K.; Güth, J.F., Schubert, O.; Keul, C.: Accuracy of intraoral scans of edentulous jaws with different generations of intraoral scanners compared to laboratory scans. J Adv Prosthodont. 2021 Oct;13(5):316-26. [IF: 1.904]
5. Schweiger, J.; Güth, J-F.; Schubert. O.; Sciuk, T.; Beuer, F.; Erdelt, K.: Predictable esthetics in all-ceramic restorations: Translucency as a function of material thickness. Int J Comput Dent. 2021 Jun 4;24(2):147-155. [IF: 1.883]
6. Güth, J-F.; Schweiger, J.; Graf, T.; Stimmelmayr, M.; Schubert, O.; Erdelt, K.: Short communication: In vitro pilot study: Are monolithic 3Y-TZP zirconia crowns too strong for titanium Implants? Int J Prosthodont., March 2021, doi: 10.11607/ijp.7322. [IF: 1.490]

7. Bergmann, A.; Edelhoff, D.; Schubert, O.; Erdelt, K.J.; Pho Duc, J.M.: Effect of treatment with a full-occlusion biofeedback splint on sleep bruxism and TMD pain: randomized controlled clinical trial. Clin Oral Invest (2020).
<https://doi.org/10.1007/s00784-020-03270-z>. [IF: 3.573]
8. Goob, J.; Erdelt, K.J.; Schweiger, J.; Pho Duc, J.M.; Schubert, O.; Güth, J.F.: Reproducibility of a magnet-based jaw-motion-analysis-system. Int J Comput Dent. 2020; 23(1): 39-48. [IF: 1.883]
9. Engels, J.; Schubert, O.; Güth, J.F.; Hoffmann, M.; Jauernig, C.; Erdelt, K.J.; Stimmelmayer, M.; Beuer, F.: Wear behavior of different double-crown systems. Clin Oral Investig. 2013; 17(2): p. 503-10. [IF: 2,2]

6.2 Kasuistiken (Techniken/Anwendungen)

1. Schubert, O.; Güth, J.F.; Beuer, F.; Nold, E.; Edelhoff, D.; Schweiger, J.: Double crown rescue concept – clinical and technical workflow. Int J Comput Dent. 2020;23(3):281-292. [IF: 1.883]
2. Schubert, O.; Beuer, F.; Schweiger, J.; Güth, J.F.: Digital Tissue Preservation Concept: A Workflow for Guided Immediate Implant Placement and Restoration. J Prosthodont. 2019 Jul;28(6):613-617. doi: 10.1111/jopr.13089. Epub 2019 Jun 7. [IF: 2.172]
3. Schubert, O.; Schweiger, J.; Stimmelmayer M.; Nold E.; Güth, J.F.: Digital implant planning and guided implant surgery - workflow and reliability -. Br Dent J. 2019 Jan 25;226(2):101-108. doi: 10.1038/sj.bdj.2019.44. [IF: 1.306]
4. Schubert, O.; Beuer, F.; Güth, J.F.; Nold, E.; Edelhoff, D.; Metz, I.: Two digital strategies in modern implantology - root-analogue implants and the digital one-abutment/one-time concept. Int J Comput Dent. 2018;21(2):115-131. [IF: 1.725]

6 Danksagung

Mein ganz herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr. Daniel Edelhoff, dem Direktor der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, meinen langjährigen Chef und Vorsitzenden des Fachmentorats, für das Ermöglichen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit sowie die stets professionelle Betreuung und sehr freundliche Unterstützung.

Besonderer Dank geht an Frau Professor Dr. Andrea Wichelhaus und Herrn Professor Dr. Wolfgang Locher, die sich freundlicherweise bereit erklärt haben, mit Herrn Professor Dr. Daniel Edelhoff das Fachmentorat zu bilden und dieses Projekt zu unterstützen.

Des Weiteren danke ich Herrn Dr. Ephraim Nold, M. Sc., Herrn Prof. Dr. Jan-Frederik Güth und Herrn Prof. Dr. Florian Beuer, MME, für ihre Freundschaft und ihre Unterstützung, weit über dieses Projekt hinaus. Danke Euch, Ephi, Jan und Flo.

Herrn Josef Schweiger, M. Sc. danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit und dafür, dass ich von seinem beispiellosen Fachwissen und Enthusiasmus profitieren darf. Merci Dir, Sepp.

Auch Herrn Dipl.-Ing. Dr. Kurt Erdelt, Herrn Prof. Dr. Michael Stimmelmayer und Herrn Dr. Tobias Graf danke ich für die überaus produktive und freundschaftliche Zusammenarbeit. Danke Kurt, Michl und Tobi.

Frau ZFA Karin Neumeier danke ich für viele Jahre vertrauensvolle Zusammenarbeit, für ihren enormen Einsatz und ihre Loyalität. Ein riesengroßes Dankeschön, liebe Karin.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei all jenen, die Teil dieses Projekts waren. Danke an Alex, Anja, Cornelius, Christian, Janosch, Jean-Marc, Jörg, Josef R., Matthias, Michi, Panos, Roland, Thomas, Tine und an alle, die ich an dieser Stelle nicht erwähnt habe.

Ich möchte allen Mitarbeitern der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU München meinen Respekt zum Ausdruck bringen. Danke für die gute Zusammenarbeit.

Von Herzen danke ich meiner gesamten Familie, insbesondere meiner Mutter Vera Schubert, für ihre Unterstützung.

Der allergrößte Dank aber gilt meiner Frau Katharina für ihre Liebe und meinen Kindern Luis Ferdinand, Leopold Valentin und Carlotta Emilia für das unbeschreibliche Glück, ihr Vater sein zu dürfen. Ich liebe Euch sehr!