

Diplomarbeit

**Die Verbreitung der CAD/CAM-Technologie in
österreichischen Zahnarztpraxen – eine Online-Umfrage**

eingereicht von

Tihomir Yordanov Krastev

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Zahnheilkunde

(Dr. med. dent.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheit

Klinischen Abteilung für Orale Chirurgie und Kieferorthopädie

unter der Anleitung von

Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. Dr. med. dent. et scient. med. Michael

Payer

und

Dr. med. dent. PhD. Daniel Csaba Vegh

Graz, 09.11.2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 09.11.2022

Tihomir Yordanov Krastev eh.

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meines gesamten Studiums sowie bei der Anfertigung dieser Diplomarbeit tatkräftig unterstützt und zu jeder Zeit motiviert haben.

Ein besonderer Dank gilt vor allem Dr. med. dent. PhD. Daniel Csaba Vegh für seine vorbildhafte Diplomarbeitsbetreuung und seinen außerordentlichen Einsatz als Entwickler sowie treibende Kraft der vorliegenden Pilotstudie. Außerdem möchte ich ihm für sein außergewöhnliches Engagement bei der Erstellung dieser Arbeit, sein offenes Ohr für meine Fragen und dafür, dass ich auf ihn als äußerst kompetenten Ansprechpartner zählen konnte, danken.

Herzlichen Dank auch an Assoz. Prof. Priv.-Doz. Dr. med. univ. Dr. med. dent. et scient. med. Michael Payer für die Unterstützung und Hilfestellung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich auch Dipl. Ing.in Irene Mischak für die Unterstützung bei der Auswertung der Daten.

Abschließend möchte ich mich noch von ganzem Herzen bei meiner Familie bedanken, die mich immer uneingeschränkt unterstützt und mir meinen Studienweg ermöglicht hat.

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	1
Inhaltsverzeichnis	2
Abkürzungen	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
Abstract.....	9
Angaben von bereits erfolgten Veröffentlichungen	10
1 Einleitung	11
1.1 Geschichtlicher Überblick	11
1.2 Komponenten des digitalen Arbeitsablaufs	12
1.2.1 Digital Workflow.....	12
1.2.2 Datenerfassung und Digitalisierung	14
1.2.3 Datenverarbeitung und Planung	15
1.2.4 Herstellung	17
1.3 CAD/CAM-Prinzipien	18
1.3.1 Chairside-Systeme	18
1.3.1.1 Inoffice	18
1.3.1.2 Outoffice.....	18
1.3.2 Labside-Systeme.....	19
1.3.3 Systeme zur zentralen Herstellung im Fertigungszentrum.....	19
1.4 CAD/CAM-Geräte.....	20
1.4.1 Intraorale Scanner.....	20
1.4.2 CAD-Software.....	22
1.4.3 3D-Drucker.....	23
1.4.3.1 SLA	24
1.4.3.2 PPJ.....	24
1.4.3.3 PBP.....	25
1.4.3.4 SLS.....	25
1.4.3.5 FDM	26
1.4.4 Dentale Fräsmaschinen.....	27
1.4.5 Sinteröfen	28
1.5 CAD/CAM-Materialien	28
1.5.1 Keramische Werkstoffe	29
1.5.1.1 Silikatkeramik	29
1.5.1.2 Oxidkeramiken	31
1.5.2 Polymer-Werkstoffe	31
1.5.2.1 PMMA.....	31
1.5.2.2 Komposite	32
1.5.2.3 Hochleistungspolymere.....	32
1.5.2.4 Infiltrierte Keramiken bzw. Kunststoffe	33
1.5.3 Metallische Werkstoffe.....	33
1.6 Anwendung der CAD/CAM-Technologie in der Zahnmedizin	33
1.6.1 Anwendung in der Prothetik.....	34
1.6.1.1 Festsitzende Prothetik	34
1.6.1.2 Anwendung in der abnehmbaren Prothetik.....	35
1.6.2 Anwendung in der oralen Chirurgie	36

1.6.3	Anwendung in der Kieferorthopädie	39
1.6.3.1	Aligner.....	40
1.6.3.2	Übertragungstray für indirektes Bonding.....	41
1.6.3.3	Metallgedruckte Apparaturen.....	42
2	Material und Methoden	43
2.1	Studiendesign.....	43
2.2	Datenerhebung.....	44
2.3	Statistische Analyse	45
2.4	Ziel der Studie.....	45
3	Studienergebnisse	45
3.1	Demografische Daten	45
3.2	Antworten der CAD/CAM- Anwender/Anwenderinnen.....	47
3.3	Antworten der Nichtanwender/Nichtanwenderinnen	53
3.4	Statistische Zusammenhänge.....	53
4	Diskussion	55
4.1	Studiendesign.....	55
4.2	Demografische Daten	56
4.3	Antworten der CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen.....	56
4.4	Antworten der Nichtanwender/Nichtanwenderinnen	58
4.5	Limitationen der Studie	59
5	Konklusion	59
	Literaturverzeichnis	61

Abkürzungen

bzw.	Beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CT	Computertomographie
DVT	Digitale Volumentomographie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
STL	Standard Tessellation Language
JPEG	Joint Photographic Experts Group
KI	Künstliche Intelligenz
SLA	Stereolithographie
PPJ	Photopolymer - Jetting
SLS	Selektives Lasersintern
FDM	Fused Deposition Modeling
3D	Dreidimensional
PMMA	Polymethylmethacrylat
PEEK	Polyetheretherketon
CEREC	Chairside Economical Restoration of Esthetic Ceramics
%	Prozent
et al.	et alii (und andere)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Komponenten des digitalen Workflows	14
Abbildung 2: Tätigkeitsschwerpunkte der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen	47
Abbildung 3: Verteilung der Abschlussjahre	47
Abbildung 4: Gründe für die Anschaffung eines CAD/CAM-Geräts	48
Abbildung 5: Am häufigsten verwendete Aspekte des digitalen Workflows	49
Abbildung 6: Am häufigsten hergestellte Restaurationen mit CAD/CAM.....	50
Abbildung 7: Am häufigsten verwendete Materialien	50
Abbildung 8: Zufriedenheit mit den CAD/CAM-Restaurationen	51
Abbildung 9: Häufigste Gründe für die Nichtnutzung der CAD/CAM-Technologie.....	53
Abbildung 10: Fragebogen Teil 1.....	69
Abbildung 11: Fragebogen Teil 2.....	69
Abbildung 12: Fragebogen Teil 3.....	70
Abbildung 13: Fragebogen Teil 4.....	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittelwertstabelle	52
Tabelle 2: Tabelle mit statistischen Zusammenhängen	54

Zusammenfassung

Studienziel: Die rasante Entwicklung der digitalen Technologien in den letzten Jahren hat sich in sämtlichen Bereichen der Medizin, auch der Zahnmedizin, bemerkbar gemacht. Die Fortschritte in den Bereichen computergestützte Designs sowie computergestützte Fertigung resultierten in einem breiteren Anwendungsspektrum von CAD/CAM-Systemen, einer verbesserten Qualität der Endprodukte und einer anwenderfreundlichen Bedienung. Aktuell ist die Datenlage hinsichtlich der Nutzung von CAD/CAM in österreichischen Zahnarztpraxen unzureichend. Daher wird die Verbreitung dieser Technologien unter österreichischen Zahnmedizinern/Zahnmedizinerinnen im Rahmen dieser Arbeit mithilfe einer Online-Umfrage evaluiert. Der Fokus dieser Studie liegt auf der Zufriedenheit mit mithilfe von CAD/CAM-Systemen angefertigten Restaurationen.

Material und Methoden: Die Online-Umfrage mit 27 Fragen wurde mit Google Forms erstellt. Die Fragen wurden in drei Abschnitte untergliedert: allgemeine Fragen, Fragen für CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen und Fragen für Nichtanwender/Nichtanwenderinnen. Der Fragebogen wurde nach dem Zufallsprinzip per E-Mail und Instagram an österreichische Zahnärzte/Zahnärztinnen verteilt. Es wurden insgesamt 115 Antworten akquiriert.

Ergebnisse: Die Mehrheit der Befragten (52,6 %; n = 60) praktizierte zum Zeitpunkt der Umfrage als Zahnärzte/Zahnärztinnen, gefolgt von Oralchirurgen/Oralchirurginnen (17,5 %, n = 20) und Kieferorthopäden/Kieferorthopädinnen (12,3 %, n = 14). Insgesamt 69,6 % (n = 80) der Befragten nutzten mindestens einen Aspekt des digitalen Workflows. Die meisten Anwender/Anwenderinnen der CAD/CAM-Technologie beurteilten die Qualität und Genauigkeit der digital hergestellten Restaurationen positiv. Insgesamt 72,7 % (n = 56) der CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen waren der Meinung, dass die Technologie zur Steigerung des Patientenaufkommens in der Zahnarztpraxis beitragen kann. Nichtanwender/Nichtanwenderinnen (30,4 %; n = 35) nannten die hohen Kosten für die Anschaffung eines CAD/CAM-Geräts (54,3 %; n = 19) sowie den Mangel an wahrgenommenen Vorteilen gegenüber konventionellen Herstellungsmethoden (31,4 %; n = 11) als häufigste Gründe für die Nichtverwendung dieser Technologie.

Schlussfolgerung: Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Pilotstudie sind ein hohes

Maß an Zufriedenheit sowie eine positive Einstellung der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen hinsichtlich des Einsatzes der CAD/CAM-Technologie im dentalen Bereich ersichtlich geworden. Die CAD/CAM-Technologie hat sich mittlerweile fest in den Arbeitsabläufen vieler österreichischer Zahnarztpraxen etabliert und es scheint, dass sie künftig in einem noch höheren Ausmaß eingesetzt werden wird. Dieser Digitalisierungstrend sollte in der Curriculum-Gestaltung des Zahnmedizinstudiums berücksichtigt werden, um angehende Zahnärzte/Zahnärztinnen auf ihren beruflichen Alltag vorzubereiten.

Abstract

Objective: CAD/CAM-Technology in dentistry has become noticeably more significant in recent years. The further development of CAD/CAM-Systems has led to a broader range of applications, more user-friendly operation, and improved accessibility. The present online survey aimed to investigate CAD/CAM-Technology utilization among Austrian dentists as the first online survey from Austria on this specific topic.

Materials and methods: For this purpose, an online survey consisting of 27 questions was created using Google Forms. The questions were divided into 3 sections: general inquiries, questions for CAD/CAM users and questions for non-users. The questionnaire was randomly distributed to Austrian dentists via E-Mail and Instagram. A total of 115 responses were submitted.

Results: The vast majority of respondents, 52.6 % (n = 60), practiced as general dentists. Furthermore, a significant proportion of participants specialized in oral surgery, 17.5 % (n = 20), and orthodontics, 12.3 % (n = 14). 69.6 % (n = 80) of the respondents utilized at least one aspect of the digital workflow. Most of the users of dental CAD/CAM-Technology indicated an extremely positive opinion regarding the quality and accuracy of the digitally fabricated restorations. Among the CAD/CAM users, 72.7 % (n = 56) believed that CAD/CAM is important in increasing the number of patients visiting the dental practice. Among non-users, representing 30.4 % (n = 35) of the respondents, the high cost of purchasing a CAD/CAM device 54,3 % (n = 19), as well as the lack of perceived advantages over conventional manufacturing methods 31,4% (n = 11), were the most common reasons for not utilizing this technology.

Conclusions: CAD/CAM-Technology appears to have infiltrated the workflow of Austrian dentists with predictions of growing implementation among dental practices in the future. Furthermore the findings of this online survey show a high level of satisfaction and positive attitude among Austrian dentists regarding the use of CAD/CAM technology. Digital technologies need to play a key role in dental education in the future.

Angaben von bereits erfolgten Veröffentlichungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Pilotstudie wurden bereits in IDJ (International dental journal) unter <https://doi.org/10.1016/j.identj.2022.09.004> publiziert.

1 Einleitung

1.1 Geschichtlicher Überblick

Die Anfertigung zahnärztlicher Restaurationen, die hauptsächlich zur Rekonstruktion bzw. zum Ersatz geschädigter oder fehlender Zähne eingesetzt werden, ist ein Prozess, bei dem bei der Ausführung der einzelnen Schritte ein hohes Maß an Genauigkeit erforderlich ist. Da der gesamte Arbeitsablauf bei der konventionellen Herstellungsmethode aus mehreren aufeinanderfolgenden Schritten besteht, können sich kleinere Fehler summieren, durch die die gewünschte Restauration hinsichtlich Präzision und Passgenauigkeit kompromittiert wird. Um diesen fehleranfälligen Workflow zu verfeinern, wurde bereits in den 1970er-Jahren versucht, diese Komponente der Herstellungskette zu digitalisieren (Tinschert/Natt 2007).

Die erste Entwicklung eines dentalen CAD/CAM-Geräts ist auf Dr. Duret zurückzuführen. Bereits im Jahr 1971 experimentierte „der Vater der digitalen Zahnmedizin“ mit der Herstellung von Einzelzahnkronen mithilfe eines digitalen Abdrucks der jeweiligen Pfeilerzähne (Duret/Preston 1991). Die Ergebnisse seiner experimentellen sowie theoretischen Forschungsarbeiten präsentierte er im Jahr 1985 beim internationalen Kongress der französischen Zahnärztekammer, in dessen Rahmen es ihm gelang, innerhalb einer Stunde eine Krone für seine Frau anzufertigen. Er stellte die Krone im Seitenzahnbereich mithilfe einer numerisch gesteuerten Fräsmaschine her. Duret war später in die Entwicklung des ersten dentalen CAD/CAM-Systems, das unter dem Namen *Sopha* bekannt wurde, involviert (Duret/Preston 1991).

Allerdings gelang die Kommerzialisierung der CAD/CAM-Technologie in der Zahnheilkunde erst durch die Einführung der CEREC-Methode (Chairside-Economical-Restoration-of-Ceramics-Methode) im Jahr 1985. Dieses CAD/CAM-System konzipierten Dr. Werner Mörmann und Dr. Marco Brandestini an der Universität Zürich bereits zu Beginn der 1980er-Jahre. Das erste CEREC-Inlay wurde im Jahr 1985 mithilfe einer Kombination aus einem optischen Scanner und einer Fräsmaschine hergestellt. In den darauffolgenden Jahren wurde das Verfahren kontinuierlich weiterentwickelt, so dass auch die Anfertigung von Kronen, Brücken und Onlays möglich war.

Ein weiteres Konzept zur Digitalisierung in der Zahnmedizin erarbeiteten Dr. Rekow sowie dessen Kollegen/Kolleginnen Mitte der 1980er-Jahre an der Universität von

Minnesota. Mit diesem CAD/CAM-System wurden die Datenerfassung mithilfe von Fotos und hochauflösenden Scannern sowie das Fräsen von Restaurationen mit einer 5-achsigen Maschine möglich. Dr. Andersson entwickelte im Jahr 1983 die Procera-Methode, die zur Herstellung hochpräziser CAD/CAM-Kronen geeignet war. Außerdem setzte er erstmals die CAD/CAM-Technologie zur Anfertigung kunststoffverblendeter Restaurationen ein (Davidowitz/Kotick 2011).

Anfänglich konnten mit der CAD/CAM-Technologie nur unkomplizierte Restaurationen wie Inlays, Onlays, Veneers, Kronen und Brücken angefertigt werden. Durch den rasanten Fortschritt der digitalen Zahnmedizin vergrößerte sich das Anwendungsspektrum jedoch. Zum heutigen Zeitpunkt ist auch die Herstellung von Teil- und Totalprothesen in einem digitalen Arbeitsablauf möglich. Aufgrund der Weiterentwicklung der bildgebenden Verfahren (Rekow 2020) und des 3D-Drucks in den letzten Jahren wird die CAD/CAM-Technologie zunehmend zur Planung komplexer Implantationen sowie zur Anfertigung von Bohrschablonen eingesetzt. Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Kieferorthopädie, in der die digitale Technologie primär zur Produktion von Alignern infrage kommt.

1.2 Komponenten des digitalen Arbeitsablaufs

1.2.1 Digital Workflow

Der digitale Arbeitsablauf in der Zahnmedizin ist ein aus drei Komponenten bestehender Prozess. Die Gesamtheit der einzelnen Arbeitsschritte wird auch als *Digital Workflow* bezeichnet. Der erste Schritt ist die Datenakquisition, gefolgt von der Datenverarbeitung und Planung sowie der Herstellung der gewünschten Restauration (Ahmed 2018).

Zur Datenerfassung sind zahlreiche Technologien verfügbar. Das Ziel dieser ersten Phase des digitalen Arbeitsablaufs ist es, die Patientendaten zu digitalisieren. Die gewonnenen Datensätze werden anschließend zur Analyse, Behandlungsplanung und weiteren Datenverarbeitung verwendet. Zu den möglichen Akquisitionsmethoden gehören unter anderem elektronische Patientenakten (ePA), intraorale Scanner, digitales Röntgen, digitale Fotografie und Videoaufnahmen. Die digitale Fotografie wird z. B. als ein Instrument der Datenerfassung zu Dokumentations- und Kommunikationszwecken eingesetzt. In Verbindung mit einer geeigneten Software können die Fotos im Rahmen der Behandlungsplanung und Ästhetik-Analyse als Hilfsmittel zur Verbesserung der

Kommunikationsqualität zwischen Zahnarzt/Zahnärztin, Dentallabor und Patient/Patientin dienen. Unter Berücksichtigung der patientenindividuellen Gegebenheiten kann der/die Zahntechniker/Zahntechnikerin anhand der vorhandenen Fotos die Herstellung der erwünschten Restaurationen hinsichtlich der Ästhetik optimieren. Dadurch kann die Behandlungszeit bei der Ästhetikprobe-Sitzungen verkürzt werden. Darüber hinaus ist aufgrund der Digitalisierung der intraoralen Situation mithilfe eines Intraoralscanners ein problemlos reproduzierbares Ergebnis möglich, das als Grundlage für die Anfertigung dentaler Restaurationen dienen kann (Att et al. 2019).

Die zweite Komponente des digitalen Arbeitsablaufs, die mit CAD bezeichnet wird, beinhaltet die Verarbeitung der erfassten Daten mit dem Ziel, einen Zahnersatz zu konzipieren bzw. einen individuellen Behandlungsplan zu erstellen. Datensätze aus verschiedenen Quellen können mithilfe einer entsprechenden CAD-Software zusammengeführt werden. Dieser Prozess wird als Matching bezeichnet. Die virtuellen Modelle aus dem Intraoralscan können dadurch beispielsweise mit den Daten aus der DVT überlagert werden. Dies resultiert in einer Steigerung der Informationsqualität. Einige Software-Hersteller arbeiten intensiv an der Entwicklung von Systemen, mit denen gleichzeitig Datensätze aus mehr als zwei Informationsquellen kombiniert werden können. Das Ziel der digitalen Zahnmedizin ist es, einen/eine vollständig virtuellen/virtuelle Patienten/Patientin zu erschaffen. Dadurch könnte die gesamte digitale Prozesskette beschleunigt werden (Att et al. 2019).

Der letzte Schritt des digitalen Workflows ist die CAM-Phase. Nachdem die virtuelle Designphase abgeschlossen ist, werden die Datensätze zur Anfertigung des geplanten Objektes an ein CAM-Gerät übermittelt. Bei der Herstellung von Restaurationen wird zwischen subtraktiven und additiven Verfahren unterschieden (Uzun 2008). Obwohl erstere seit Jahren erfolgreich zur Zahnersatzproduktion genutzt werden, ist der zunehmende Einsatz additiver Verfahren, z. B. des 3D-Drucks, im Bereich der Zahnheilkunde erwähnenswert. Die Gesamtheit der Prozessschritte ist in Abbildung 1 dargestellt:



Abbildung 1: Komponenten des digitalen Workflows

1.2.2 Datenerfassung und Digitalisierung

Wie bereits in Kapitel 1.2.1 erläutert, stellt die Datenakquisition den ersten Schritt des digitalen Arbeitsablaufs dar. Obwohl zahlreiche Technologien zur Datenerfassung existieren, werden überwiegend Patientendatenmanagementsysteme, darunter Software zur Speicherung und Verarbeitung zahnärztlicher Dokumentationen und dentaler Röntgenaufnahmen, verwendet. Inzwischen haben die meisten Zahnarztpraxen und zahnmedizinischen Fakultäten die digitale Datenerfassung in ihren klinischen Arbeitsablauf integriert. Zu diesem Zweck werden kommerziell erhältliche Softwareprogramme, die mit EPHI-Informationen arbeiten, angewandt. Damit können geschützte Patienteninformationen gespeichert und bei Bedarf übertragen werden. In der Regel werden Anamnesebögen, Krankengeschichten und Röntgenaufnahmen gespeichert. Große Kliniken und Gesundheitseinrichtungen verfügen über Computerprogramme, mit denen der Zugang zu Krankenakte von mehreren Arbeitsplätzen aus möglich ist. Es bestehen jedoch nach wie vor Bedenken hinsichtlich der Datensicherheit dieser Systeme. Deswegen gilt es, die notwendige Sicherheit zu gewährleisten sowie eine Software zu verwenden, die mit der Datenschutz-Grundverordnung der Europäischen Union konform ist (Att et al. 2019).

Auch der 3D-Scan zählt zur Datenakquisition und dient vor allem der Digitalisierung von

Modellen sowie der intraoralen Situation des/der jeweiligen Patient/Patientin. Die Datenerfassung variiert zwischen handelsüblichen CAD/CAM-Systemen. Das CEREC-System umfasst zum Beispiel ein intraorales digitales 3D-Scan-Gerät, mit dem die Zahngeometrie in digitale Daten umgewandelt wird, die ein Computer verarbeiten kann. In den meisten Fällen ist der zur Datenerfassung verwendete Scanner fester Bestandteil des CAD/CAM-Systems und kann nur in Verbindung mit einer speziellen Software verwendet werden (Uzun 2008).

Weitere Methoden der Datenakquisition sind Gesichtsscan, digitale Röntgenbilder, digitale Fotos und Videoaufnahmen.

1.2.3 Datenverarbeitung und Planung

In einigen Softwareprodukten sind zwar Datenerfassungs- sowie Verarbeitungs- und Planungsfunktionen integriert, allerdings trennen die meisten Entwickler/Entwicklerinnen diese Komponenten des digitalen Arbeitsablauf, um die Komplexität des Prozesses zu verringern und Unübersichtlichkeit zu vermeiden. Grundsätzlich kann der/die Hersteller/Herstellerin eines Datenerfassungstools auch das entsprechende CAD-Programm anbieten. Dies ist jedoch nicht verpflichtend. Die CAD-Software kann auch von einem/einer anderen Anbieter/Anbieterin stammen. Bei Sirona- und 3Shape-Systemen stammen die Erfassungs- und CAD-Software von dem/der gleichen Hersteller/Herstellerin. Alternativ kann ein Bearbeitungsprogramm verwendet werden, das von einem anderen Händler entwickelt wurde. Ein Beispiel dafür ist die Übertragung von Datensätzen aus dem CT bzw. DVT in eine Implantatplanungssoftware eines/einer anderen Entwicklers/Entwicklerin. Um die Interoperabilität zwischen Systemen verschiedener Firmen zu gewährleisten, müssen die Daten in einem universellen Format vorliegen. Dies führte zur Standardisierung der Datenformate. Häufig genutzte Datenformate sind DICOM, STL, JPEG und OBG.

Prinzipiell wird zwischen einem offenen und einem geschlossenen System unterschieden. Können Daten aus dem Akquisitions-Tool barrierefrei in eine andere Software zur Weiterverarbeitung bzw. Planung importiert werden, handelt es sich um ein offenes Verfahren. Im Gegensatz dazu ist die weitere Verarbeitung der Datensätze beim geschlossenen System nur mit einem kompatiblen Programm möglich, das von dem/der gleichen Hersteller/Herstellerin entwickelt wurde. Einige Entwickler/Entwicklerinnen

bieten allerdings die Möglichkeit, von einem geschlossenen in ein offenes System überzugehen. Für die Konvertierung der Daten in ein Standardformat verlangen die jeweiligen Hersteller/Herstellerinnen in der Regel Gebühren (Att et al. 2019).

Verarbeitungs- und Planungssoftware kann in vielen Bereichen der Zahnheilkunde eingesetzt werden, z. B. in der Kariesanalyse und -diagnose, der Behandlungsplanung, darunter virtuelle Mock-ups, Implantatplanung und virtuelle Planung einer kieferorthopädischen Behandlung, sowie CAD. Zur Erkennung kariöser Läsionen arbeiten einige Firmen gegenwärtig an der Einführung einer künstlichen Intelligenz (KI), die Kariesläsionen sowie andere pathologische Veränderungen automatisch anhand radiologischer Datensätze identifiziert. Die KI wird außerdem zur automatischen Kennzeichnung schonungspflichtiger anatomischer Strukturen eingesetzt, z. B. n. alveolaris inferior und Sinus maxillaris. Darüber hinaus gibt es aktuelle Ansätze zur automatischen Erkennung und Segmentierung von Zähnen aus DVT-Aufnahmen mit der anschließenden Überführung in separate STL-Dateien. Durch die Einführung dieser Technologien können der digitale Arbeitsablauf beschleunigt und die Diagnose des Zahnarztes verbessert werden, was letztendlich in einer optimierten Versorgung der Patienten/Patientinnen resultiert (Att et al. 2019).

Die Datenverarbeitung und Planung sind bedeutsame Schritte im digitalen Workflow. Durch die virtuelle Behandlungsplanung kann einerseits die Vorhersagbarkeit der jeweiligen Therapie gesteigert werden, andererseits wird die Kommunikation zwischen Patienten/Patientinnen und Behandler/Behandlerinnen verbessert., z. B. durch eine Simulation des Endergebnisses. Eine Implantatplanungssoftware verwendet z. B. DICOM-Datensätze aus CT oder DVT sowie STL-Daten aus dem Intraoralscan, um im Rahmen eines Backwards Plannings die optimale Implantatposition für die spätere prothetische Versorgung zu bestimmen. Schonungspflichtige anatomische Strukturen werden markiert sowie berücksichtigt, wodurch die Implantatinsertion erleichtert und vorhersagbarer gemacht wird (Schubert et al. 2018). Durch Überlagerung von Gesichtsfotografien und Intraoralscan-Daten sind eine exakte Analyse und Planung der gewünschten ästhetischen Rehabilitation in Bezug auf Zahnproportionen und -farbe mit einer Smile-Design-Software möglich.

Die letzte Komponente der zweiten Phase des digitalen Workflows ist CAD. Die gewünschten Objekte, darunter Kronen, Brücken, Bohrschablonen und Wax-ups, werden mit einem entsprechenden Computerprogramm in einer virtuellen Umgebung entworfen

und modifiziert (Uzun 2008). Auf die Designphase folgt die letzte Komponente des digitalen Arbeitsablaufs, nämlich die Herstellung des geplanten Objektes.

1.2.4 Herstellung

Der letzte Schritt des digitalen Arbeitsablaufs beinhaltet die Durchführung der geplanten Behandlung sowie die Anfertigung virtuell konzipierter Objekte. Die computergestützte Fertigung (CAM) ist ein Prozess, in dessen Rahmen die Datensätze aus der Designphase an eine CAM-Software übermittelt werden. In diesem Zusammenhang können weitere Details, die den Produktionsprozess betreffen, bestimmt werden, z. B. die Platzierung von Stützstrukturen sowie die Simulation des Fräsprozesses (Att et al. 2019).

Grundsätzlich wird bei der computergestützten Herstellung von Restaurationen zwischen additiven und subtraktiven Fertigungstechnologien unterschieden. Letztere werden wiederum in Fräsen und Schleifen untergliedert. Bei subtraktiven Methoden wird die gewünschte Restauration durch Materialabtrag aus einem vorgefertigten Block hergestellt.

Bei der additiven Technologie erfolgt die Herstellung des geplanten Objektes hingegen durch das geschichtete Zusammenfügen von Materialien (Uzun 2008). Das subtraktive Verfahren gilt als die am meisten verbreitete Fertigungstechnologie in der Zahnmedizin.

Entsprechende Fertigungsmaschinen können in Chairside- und Labside-Geräte unterschieden werden. Erstere wurden primär zur Herstellung kleinerer Restaurationen konzipiert. Für die Produktion anspruchsvollerer Objekte werden Labside-Anfertigungen oder die Herstellung in einer zentralen Fertigungseinrichtung vorgezogen (Att et al. 2019).

In den letzten Jahren hat die additive Fertigung zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Durch den rasanten Fortschritt des 3D-Drucks vergrößerte sich das Anwendungsspektrum der additiven Technologien in der Zahnheilkunde. Zum heutigen Zeitpunkt sind zahlreiche Druckverfahren für die dentale Anwendung geeignet, z. B. SLA, PPJ, SLS und FDM.

Ersteres gilt seit langem als die Methode der Wahl für die zentrale Herstellung von Bohrschablonen oder Modellen mit einer hohen Genauigkeit. Zur Herstellung von Gerüsten aus Nichtedelmetalllegierungen sowie Kronen und festsitzenden Teilprothesen wird hingegen SLS eingesetzt.

Obwohl bereits viele Techniken existieren, dürften in den nächsten Jahren noch mehr Technologien und Materialien für die additive Fertigung eingeführt werden (Att et al. 2019).

1.3 CAD/CAM-Prinzipien

1.3.1 Chairside-Systeme

1.3.1.1 Inoffice

Der Begriff *Inoffice* bedeutet, dass alle Schritte der Prozesskette, die zur Anfertigung der dentalen Restauration erforderlich sind, innerhalb der zahnärztlichen Ordination ohne Beteiligung eines Dentallabors stattfinden. Die intraoralen Strukturen werden mithilfe eines Scanners digitalisiert. Durch diesen Scanvorgang wird der konventionelle Abdruck ersetzt. Die gewonnenen Datensätze können in einer virtuellen Umgebung visualisiert und mit einer entsprechenden Software bearbeitet werden. Mit diesen Konstruktionsprogrammen ist eine exakte Rekonstruktion okklusaler Flächen möglich. Nach dem Entwurf der gewünschten Restauration erfolgt deren Herstellung in der gleichen Behandlungssitzung mittels einer Fräsmaschine. Vorteile dieses Systems sind Zeitersparnis und ein erhöhter Patientenkomfort, die auf den Ersatz der konventionellen Abformung durch einen Intraoralscan zurückzuführen sind (teamwork media GmbH 2017). Inoffice-Systeme werden von mehreren Firmen, z. B. Sirona, Carestream und Planmeca, angeboten. Mit den meisten Chairside-Geräten kann eine breite Palette an Materialien, von Glas- bis hin zu Hochleistungskeramik, bearbeitet werden.

1.3.1.2 Outoffice

Bei der Outoffice-Methode wird nur der erste Schritt des digitalen Workflows in der zahnärztlichen Praxis durchgeführt. Nach Erfassung der intraoralen Strukturen mit dem Scangerät werden die gewonnenen Datensätze im STL-Format an ein Dentallabor weitergeleitet. Das Labor verfügt über die notwendige CAD-Software, die zur Visualisierung und Verarbeitung der Daten erforderlich ist. Anschließend kann der/die Zahntechniker/Zahntechnikerin entscheiden, ob er die gewünschte Restauration selbst herstellt oder die Konstruktionsdaten für die Anfertigung an ein Fertigungszentrum weiterleitet (teamwork media GmbH 2017).

1.3.2 Labside-Systeme

Beim Labside – System erfolgt die Kommunikation zwischen der zahnärztlichen Ordination und dem Dentallabor auf herkömmliche Weise, d. h., dass der Abdruck nach der konventionellen Abdrucknahme durch den Behandler an das Labor geschickt wird. Dort werden zunächst Gipsmodelle hergestellt. Diese werden erst im Anschluss daran mithilfe eines 3D-Scanners digitalisiert und in einer CAD-Software bearbeitet. Anhand des dreidimensionalen Entwurfs wird der gewünschte Zahnersatz mithilfe von Fräsmaschinen, die ebenfalls im Dentallabor vorhanden sind, produziert. Vorteil dieses Systems ist, dass die Präzision und Passgenauigkeit der gefertigten Restauration direkt anhand des vorhandenen Modells überprüft werden kann (teamwork media GmbH 2017).

1.3.3 Systeme zur zentralen Herstellung im Fertigungszentrum

Alternativ kann die computergestützte Restaurationsherstellung in speziell dafür vorgesehenen Fertigungszentren erfolgen. Das Fertigungszentrum stellt in den meisten Fällen dem Dentallabor *Satelliten Scanner* zur Verfügung, die über ein Netzwerk mit dem Zentrum direkt verknüpft sind. Über dieses Netzwerk erfolgt der Datenaustausch zwischen Labor und Fertigungszentrum. Nach der Übermittlung der Datensätze an die Fertigungsstelle wird der erwünschte Zahnersatz dort produziert (teamwork media GmbH 2017).

Vorteilhaft diesbezüglich ist vor allem, dass auf diese Weise ein Zugriff auf mehrere Fertigungstechnologien sowie Unabhängigkeit bestehen. Darüber hinaus entfallen die hohen Anschaffungskosten für ein CAD/CAM-Fertigungsgerät. Das Labor muss nur über einen 3D-Scanner sowie eine entsprechende CAD-Software verfügen. Die ersten Arbeitsschritte des digitalen Workflows, Datenerfassung und digitale Designphase, führt der/die Zahntechniker/Zahntechnikerin durch. Nur der letzte Schritt erfolgt in der zentralen Fertigungsstelle. Bei vielen zentralisierten CAD/CAM-Verfahren handelt es sich allerdings um geschlossene Systeme, d. h., dass das Dentallabor ausschließlich Zugriff auf die Produktpalette des/der jeweiligen Herstellers/Herstellerin hat, der den 3D-Scanner zur Verfügung gestellt hat. Außerdem bedeutet die zentralisierte Produktion von Gerüsten im Fertigungszentrum einen geringeren Umsatz für das Dentallabor.

Verfügt das Dentallabor über keinen eigenen Scanner, ist es möglich, die Meistermodelle zur Weiterverarbeitung direkt an das Fertigungszentrum zu schicken. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit der direkten Kommunikation zwischen Behandler und Fertigungszentrum. Diese erfolgt entweder durch das Versenden der Abdrücke oder durch die direkte Übermittlung der digitalen Datensätze an die Fertigungsstelle (teamwork media GmbH 2017).

Durch die vollständige Digitalisierung der Verfahrenskette, die zur Anfertigung dentaler Restaurationen notwendig ist, sind Kostenreduktionen sowie eine optimierte Qualität möglich. Letztere wird vor allem durch die Reduktion und Reproduzierbarkeit der einzelnen Arbeitsschritte der Prozesskette gewährleistet. Außerdem können Präparationen direkt nach dem Scanvorgang, sofern in der Praxis ein Scanner vorhanden ist, beurteilt und gegebenenfalls nachgebessert werden, bevor die Daten zur Weiterverarbeitung an ein Labor oder eine zentrale Fertigungsstelle gesendet werden (teamwork media GmbH 2017).

1.4 CAD/CAM-Geräte

1.4.1 Intraorale Scanner

Die Digitalisierung in der Zahnmedizin schreitet seit dem ersten Einsatz der CAD/CAM-Technologie zur Anfertigung eines Zahnersatzes im Jahr 1980 ununterbrochen voran (Mörmann et al. 1987). Mittlerweile ist es möglich, die intraorale Situation anhand eines Scanners zu erfassen oder Gipsmodelle, die mithilfe eines konventionellen Abdrucks hergestellt wurden, indirekt zu digitalisieren (Christensen 2009). Das virtuelle Arbeitsmodell wird mithilfe der Datensätze, die im STL-Format gespeichert sind, generiert., d. h., die STL-Datensätze des Scans können zur Herstellung physischer Modelle mittels 3D-Drucks verwendet werden. Die Verwendung von Intraoralscannern führte zu einer Veränderung der täglichen Routine, sowohl für Zahnärzte/Zahnärztinnen als auch für Zahntechniker/Zahntechnikerinnen (Imburgia et al. 2017).

Die gegenwärtig auf dem Markt verfügbaren intraoralen Scanner nutzen Lichtstrahlen zur Aufnahme dreidimensionaler Objekte. Infolgedessen werden ausschließlich Bereiche abgebildet, die zugänglich für Licht sind und vom Sensor des Scannerkopfs erfasst werden können. Um Niveauunterschiede zu erkennen, werden diverse Methoden der Optik angewandt. In den meisten Fällen handelt es sich dabei entweder um das

Triangulationsverfahren oder die konfokale parallele Mikroskopie. Beim Triangulationsverfahren wird ein gerichteter Lichtstrahl in Abhängigkeit vom Höhenunterschied in einem unterschiedlichen Winkel reflektiert. Beim Intraoralscanner wird hingegen nicht ein einziger Lichtstrahl zur Oberflächenerfassung verwendet, sondern ein Streifenmuster. Abweichungen im Streifenmuster werden zur Registrierung der Höhe der Diskrepanzen herangezogen. Dadurch wird eine Erhöhung der Aufnahmegeschwindigkeit erzielt. Das aufgenommene Bild kann mit dem Einsatz eines wandernden Streifenmusters zusätzlich präzisiert werden (Rosentritt et al. 2018).

Intraoralscanner der neueren Generation nutzen die Methode der konfokalen parallelen Mikroskopie. Bei diesem Verfahren werden parallele Lichtstrahlenbündel auf ein Objekt gerichtet. Die reflektierten Strahlen werden anschließend mithilfe eines optischen Strahlenteilers umgelenkt und auf verschiedene Schärfentiefebene projiziert. Jeder Punkt wird als reflektierter Lichtstrahl auf diese Ebenen projiziert. Der schärfste Punkt, der auf der Tiefenschärfenebene liegt, die dem Fokus-Abstand entspricht, wird beibehalten und als Referenz für die Berechnung des 3D-Objekts verwendet. Die übrigen Punkte werden ignoriert (Reich et al. 2021).

Beim Großteil der Scansysteme ist eine Vorkonditionierung der zu scannenden Oberflächen nur bei einer starken Spiegelung oder subgingivalen Präparationen für die Aufnahmequalität von Vorteil. Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung des 3D-Modells am Bildschirm annähernd in Echtfarben. Sie kann daher als Hilfe für Farbanalysen herangezogen werden. Einige Modelle bieten durch Anwendung von Fluoreszenz- und bzw. oder Transilluminationsverfahren Unterstützung bei der Diagnostik von Karies. Abhängig vom verwendeten Scanner kann es in diesem Kontext erforderlich sein, einen separaten Scan durchzuführen (Reich et al. 2021).

Der digitale Abdruck hat zu einer Effizienzsteigerung in der zahnärztlichen Ordination geführt. Einerseits kann der Behandler die Kosten für Abformmaterial und -löffel einsparen. Andererseits ist der digitale Workflow zeitsparend und weniger aufwendig, da die Modelle nicht erst physisch in ein Labor geschickt werden müssen, sondern die STL-Datensätze direkt per Computer an das Dentallabor übermittelt werden (Patzelt et al. 2013). Darüber hinaus wird eine wiederholte Abformung aufgrund von Abdruck- Ungenauigkeiten vermieden. Der Intraoralscan hat sich auch für empfindliche Patienten/Patientinnen mit einem ausgeprägten Würgereiz als vorteilhaft erwiesen und erfreut sich daher einer hohen Patientenakzeptanz (Joda et al. 2017).

Aktuellen Studien zufolge ist die Genauigkeit des Intraoralscanners mit der des konventionellen Abdrucks vergleichbar. Im Rahmen einer Studie aus dem Jahr 2019 wurde die Genauigkeit verschiedener Intraoralscanner untereinander als auch im Vergleich zum konventionellen Abdruck untersucht. Die Autoren/Autorinnen kamen zu dem Schluss, dass die digitale Abformung dem konventionellen ebenbürtig ist. Darüber hinaus wurde über eine erhöhte Zuverlässigkeit der CAD/CAM-gefertigten Restaurationen hinsichtlich Faktoren wie Passgenauigkeit und marginaler Integrität berichtet (Ferrini et al. 2019).

1.4.2 CAD-Software

Hersteller/Herstellerinnen bieten spezielle Software für die Gestaltung unterschiedlicher Zahnrestaurationen. Mithilfe des entsprechenden Programms können verschiedene Designs implementiert werden, darunter Käppchen, Kronen, Brücken, Inlays, Onlays, Veneers, Gerüste, Teleskope, Teilprothesen, Table-Tops und Provisorien. Weitere Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der oralen Chirurgie sind computergestützt hergestellte Abutments, Navigationsschienen, Implantate und Stege. Mittlerweile wird die CAD/CAM-Technologie auch in der Kieferorthopädie erfolgreich zur Behandlungsplanung eingesetzt. In einer virtuellen Umgebung können orthodontische Apparaturen entworfen und mittels 3D-Druck angefertigt werden. Durch bestimmte CAD-Programme ist zudem eine Simulation des Behandlungsergebnisses möglich, wodurch sich die Vorhersagbarkeit einer Therapie verbessert (Alghazzawi 2016).

Die meisten Softwareprodukte verfügen über eigene virtuelle Datenbanken mit diversen Zahnformen. Es sind dennoch stets patientenspezifische Modifikationen erforderlich, um ein optimales Ergebnis zu erzielen (van Noort 2012).

Alternativ dazu bieten bestimmte Hersteller/Herstellerinnen eine automatische Berechnung der Zahnmorphologie anhand biogenerischer Modelle an. Als biogenerisches Modell wird eine virtuelle Kauflächensimulation bezeichnet, die unter Berücksichtigung von Antagonisten, Nachbarzähnen und okklusalen Kontakten computergestützt hergeleitet wird (Biogenerik - Enzyklopädie Marjorie-Wiki o. D.). Die von der Software vorgeschlagene Morphologie kann der/die Behandler/Behandlerin der Situation entsprechend anpassen oder direkt übernehmen. Die Modelle können am Bildschirm gedreht, vergrößert sowie verkleinert werden, wodurch die exakte Analyse und Behandlungsplanung erleichtert werden.

CAD-Programme zur Implantatplanung verfügen zudem häufig über eigene digitale Bibliotheken mit diversen Implantatsystemen. Infolgedessen kann die optimale Implantatposition unter Beachtung individueller anatomischer Gegebenheiten wie Knochenqualität und -quantität sowie Abstand zu schonungspflichtigen Strukturen festgelegt und auf die Navigationsschiene übertragen werden (Schubert et al. 2018).

1.4.3 3D-Drucker

Mit dem Begriff *3D-Druck* wird ein Prozess bezeichnet, bei dem Objekte schichtweise konstruiert werden. Dafür wird ein 3D-Drucker benötigt, mit dem das gewünschte Endprodukt durch Auflagerung einzelner Materialschichten aufeinander hergestellt werden kann. Dieses Verfahren wird als additive Fertigung bezeichnet. Ein anderer Begriff für diese Methode, vor allem im englischsprachigen Raum, lautet „rapid prototyping“ (Dawood et al. 2015).

Mit einer CAD-Software sind der Entwurf und die Gestaltung von Objekten in einer virtuellen Umgebung möglich. In der Zahnmedizin wird diese Designphase um Daten aus dem intraoralen Scan und DVT ergänzt. Nach entsprechender Anpassung und Modifikation der digitalen Objekte im Programm können die Datensätze an den Drucker übermittelt und die gewünschten Produkte schichtweise hergestellt werden (Miyazaki/Hotta 2011).

Das Anwendungsspektrum der additiven Fertigungsmethode in der Zahnheilkunde ist breit (Hegedus et al. 2022). Bei komplexen Fällen können Studienmodelle des Kiefers beispielsweise direkt anhand der Datensätze aus der DVT angefertigt werden. Dadurch wird die Planung oralchirurgischer Eingriffe im Hinblick auf Faktoren wie ungewöhnliche Anatomie und patientenspezifische Gegebenheiten erleichtert. Durch den 3D-Druck von Bohrschablonen anhand digitaler Daten können die Präzision und Vorhersagbarkeit einer Implantation gesteigert werden (Schubert et al. 2018). Rapid Prototyping hat sich auch im Bereich der Prothetik etabliert. Der/die Behandler/Behandlerin erfasst die intraoralen Zahnpräparationen mit dem Intraoralscanner und gestaltet die gewünschten Restaurationen, darunter Kronen, Brücken und Implantatabutments, in einem speziellen CAD-Programm. Anschließend werden diese gedruckt. Darüber hinaus kann die 3D-Drucktechnologie im Bereich der Kieferorthopädie zur Herstellung von Aligners eingesetzt werden. In rezenten Publikationen wird des Weiteren die direkte Anfertigung

orthodontischer Apparaturen beschrieben (Graf et al. 2017).

Heutzutage existieren mehrere 3D-Druckverfahren, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Gemein sind diesen jedoch Aspekte wie hohe Anschaffungs-, Material-, Wartungs- und Reparaturkosten sowie aufwendige Reinigungsvorgänge (Dawood et al. 2015).

1.4.3.1 SLA

Bei der Stereolithografie handelt es sich um die älteste dokumentierte additive Fertigungsmethode (Wikipedia-Autoren 2003), bei der ein Kunststoff mithilfe eines Lasers schichtweise ausgehärtet wird. Beim verwendeten Material handelt es sich um ein Photopolymer wie Epoxidharz. Nach der Verfestigung einer dünnen Materialschicht wird die Grundplatte des Druckers um eine Schichtdicke abgesenkt und ein neues Flüssigharz über die Oberfläche gewischt. Dieser Vorgang ist beliebig oft wiederholbar, bis die endgültige Schichtdicke erreicht wird, und das fertiggestellte Objekt aus dem Drucker entnommen werden kann. Bei der virtuellen Designphase ist auf die Herstellung von Stützstrukturen zu achten, mit denen das Objekt beim Druckvorgang gegen die Schwerkraft unterstützt wird. Diese Stützen können nach Fertigstellung des Teils beseitigt werden. Die Nachbearbeitung umfasst die Entfernung des überschüssigen Harzes und das Nachhärten in einem UV-Ofen. Aufgrund der hohen Kosten dieses Verfahrens, die bei der Herstellung größerer Objekte entstehen, wird es in der Zahnmedizin vorwiegend zur Herstellung von Bohrschablonen angewandt (Dawood et al. 2015).

1.4.3.2 PPJ

Bei dieser Drucktechnik kommen polymerisierbare Kunststoffe und Druckköpfe, die eine Ähnlichkeit zu den Druckköpfen eines herkömmlichen Tintenstrahldruckers aufweisen, zum Einsatz. Der Druckvorgang basiert wie beim SLA-Verfahren auf dem Prinzip der Photopolymerisation. Der Unterschied besteht darin, dass der Druckkopftträger über mehrere kleinere Druckköpfe verfügt, mit denen diverse Materialien tropfenweise auf die Grundplatte appliziert werden können. Die 3D-Drucker sind entweder mit einer feststehenden Grundplatte und einem mobilen Druckkopf oder mit einer beweglichen Grundplatte und einem feststehenden Druckkopf ausgestattet. Nach Applikation werden die

Tropfen sie ausgehärtet. Das Endprodukt entsteht durch Wiederholung dieses Vorgangs. Mithilfe der Verwendung verschiedener Materialien können die Objekte farblich gestaltet und deren Eigenschaften je nach Material beeinflusst werden. Die Material-Jetting-Methode eignet sich beispielsweise zur Herstellung zahnmedizinischer und anatomischer Studienmodelle. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Anfertigung von Navigationsschablonen in der Implantologie (Dawood et al. 2015).

1.4.3.3 PBP

Bei diesem Verfahren werden die Objekte, wie bei allen additiven Fertigungsverfahren, Schicht für Schicht angefertigt. Die einzelnen Schichtgeometrien werden anhand von Datensätzen aus der CAD-Software ermittelt. Auf eine höhenverstellbaren Plattform wird ein pulverförmiges Material appliziert, das anschließend durch ein spezielles Bindemittel an bestimmten Stellen infiltriert wird. Die verklebten Bereiche gehören zum späteren Endprodukt. Das Bindemittel wird dem Pulverbett mittels eines Druckkopfs hinzugefügt. Nach der Verklebung wird die Grundplatte des Druckers um eine Schichtdicke abgesenkt. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis das Objekt fertig ist. Ein Vorteil dieser Fertigungsverfahren ist der Verzicht auf Stützstrukturen, da das gedruckte Objekt durch das nicht infiltrierte Pulver unterstützt wird (Dawood et al. 2015). Der Anwendungsbereich in der Zahnheilkunde liegt in der Herstellung von Studienmodellen. Aufgrund der begrenzten Präzision des Binder-Jettings (Ciuffolo et al. 2006) findet diese Methode keine Anwendung im Bereich der Prothetik.

1.4.3.4 SLS

Diese Technologie ist bereits seit den 1980er-Jahren verfügbar. Mit einem Laser, der als Energiequelle fungiert, wird selektiv ein pulverförmiges Material geschmolzen, das auf einer Druckplattform aufgebracht wurde. Nach Absenken der Plattform um eine Schichtstärke wird die nächste Schicht des Materials geschmolzen. Das gewünschte Objekt entsteht durch Addition der einzelnen Schichten. Auch bei dieser Methode sind keine Stützstrukturen erforderlich, da die gedruckten Formen durch das umgebende Pulver gestützt werden (Melchels et al. 2010). Diese 3D-Druck-Technologie weist eine hohe Genauigkeit auf. Die verwendeten Polymere haben zudem einen hohen Schmelzpunkt, der

oberhalb der Sterilisationstemperatur in Autoklaven liegt, und ausgezeichnete Materialeigenschaften (Ono et al. 2000). Aus diesem Grund eignen sich die mit SLS-Verfahren hergestellten Produkte als anatomische Studienmodelle, Bohrschablonen und Dentalmodelle (Williams et al. 2006). Nachteile dieser Technologie sind die hohen Anschaffungs- und Wartungskosten eines SLS-Geräts.

Aktuell gibt es verschiedene Materialien, die sich zum SLS-Druck eignen, darunter Nylon sowie metallhaltige Polyamidgemische und Polyetheretherketon (PEEK). Letzteres eignet sich aufgrund seiner biokompatiblen und knochenähnlichen Eigenschaften zur Anfertigung medizinischer Implantate, z. B. Wirbelsäulenimplantate, und wird außerdem in der Kranioplastik eingesetzt. Auch Dentalimplantate können damit hergestellt werden. Selektives Lasersintern findet auch im 3D-Druck aus Metall Anwendung. Damit lässt sich eine Vielzahl an Metallen und Metalllegierungen, darunter Titan sowie Titan-, Kobalt- und Chrom-Legierungen sowie rostfreier Stahl verarbeiten. Diese Technologie, auch selektives Laserschmelzen genannt, kann zum dreidimensionalen Druck von Teilprothesen, Prothesengerüsten und Kappchen verwendet werden (Dawood et al. 2015).

1.4.3.5 FDM

Bei FDM handelt es sich um eine der frühesten 3D-Druck-Technologien. Sie wurde bereits in den 1980er-Jahren entwickelt. Als Ausgangsmaterial für diese Methode dienen thermoplastische Filamente, die durch Hitze verflüssigt und anschließend durch eine Düse auf die Arbeitsfläche extrudiert werden. Dadurch entsteht ein Punktraster auf der Arbeitsplatte, das durch Zerlegung des geplanten Objektes in einer CAD-Software bereits vorgegeben wurde. Nach dem Abkühlen und Aushärten des extrudierten Materials werden weitere Schichten des thermoplastischen Stoffs appliziert. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die geplante Struktur fertig ist. Abhängig von der Objektgeometrie können auch Stützstrukturen indiziert sein. Bei FDM-Verfahren kommen verschiedene Wachse, Thermoplaste und thermoplastische Elastomere zum Einsatz. Diese Methode kommt vor allem bei kostengünstigen 3D-Druckern im Privatgebrauch zum Einsatz. Auch die Herstellung grober anatomischer sowie nicht zu komplexer Modelle, z. B. eines zahnlosen Unterkiefers, ist möglich (Dawood et al. 2015).

1.4.4 Dentale Fräsmaschinen

Zum heutigen Zeitpunkt ist eine große Anzahl an kompakten Fräsmaschinen auf dem Markt verfügbar, die primär für Anwendung in der Zahnarztpraxis konzipiert wurden und mit denen diverse Arten von Materialblöcken zur Herstellung dentaler Restaurationen bearbeitet werden können. Mit diesen kompakten Geräten ist eine prothetische Versorgung des/der Patienten/Patientin innerhalb einer einzigen Sitzung im Rahmen der Chairside-Methode möglich.

Bei dieser Art von Fräsmaschinen handelt es sich in der Regel um ein 4-achsiges System, wobei sich der Fräsbohrer in den drei Achsen x, y sowie z bewegt und der Materialblock in einer zusätzlichen Achse rotieren kann. Diese Geräte werden auch als 3+1-Fräsmaschinen bezeichnet. Bei manchen Systemen kommen zwei Schleifkörper sowie zwei separate Antriebsmotoren zum Einsatz, mit denen ein Materialblock gleichzeitig bearbeitet werden kann. Mit einer durchschnittlichen Fräszeit von acht Minuten für eine einzelne Krone und einer Genauigkeit von 25 Mikrometern wird eine Beschleunigung des Prozesses gewährleistet.

Die Präzision und die Bearbeitungszeit können von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden wie der Anzahl der Achsen und Spindel, der Größe und Abrasivität der Bohrer, der Fräsgeschwindigkeit und der Art des verwendeten Materials. Keramiken auf Siliziumdioxidbasis werden in den meisten Fällen in einer feuchten Umgebung gefräst, während Komposit- und Zirkonoxidrohlinge trocken bearbeitet werden. Nicht alle verfügbaren Geräte verfügen über beide Schleifmethoden. Vor der Anschaffung eines Fräsgerätes gilt es daher die spezifischen Materialanforderungen und Präferenzen sorgfältig zu berücksichtigen (Lebon et al. 2015).

Vier-Achsen-Fräsanlagen werden zur Herstellung kleinerer prothetischer Arbeiten in der Praxis verwendet und dienen der Anfertigung von Veneers, Onlays, Inlays, Kronen und festsitzendem Zahnersatz wie Brücken. Fräsgeräte mit fünf oder mehr Achsen können den Werkstoffblock in zusätzlichen Drehachsen rotieren, wodurch das Fräsen komplexer Konstruktionen möglich ist. Auf diese Weise könne auch Objekte mit Unterschnitten angefertigt werden, beispielsweise Implantat Suprakonstruktionen, bei denen der Schraubenkanal in unterschiedlichen Richtungen abgewinkelt werden kann. Diese Fräsmaschinen scheinen rezenten Publikationen zufolge über eine höhere Genauigkeit im Vergleich zu konventionellen Vier-Achsen-Geräten zu verfügen.

Um die Präzision gefertigter Restaurationen zu steigern, können des Weiteren rotierende Instrumente mit einem kleineren Durchmesser verwendet werden. Dies führt allerdings zu längeren Bearbeitungszeiten (Bosch et al. 2014).

Mit handelsüblichen Chairside-Geräten können Materialblöcke mit der Größe 20 mm, 40 mm und 85 mm verarbeitet werden. Im Vergleich dazu sind 5-achsige Fräser in der Lage, Polymere und Zirkonoxid sowie Hybrid-, Glas- und Silikarkeramik aus Blöcken mit einem Durchmesser von bis zu 98,5 mm und einer Dicke von bis zu 30 mm zu bearbeiten. Um eine Steigerung der Produktivität und Effizienz des Fräsvorgangs zu erzielen, können zusätzlich Multiblockhalter verwendet werden, durch die das simultane Fräsen von bis zu sechs Werkstoffblöcken möglich ist.

Eine weitere Möglichkeit des Fräsens ist das Laserfräsen. Bei dieser Methode werden kurze, hochintensive Laserimpulse zum Abtragen kleiner Materialmengen von einem Standardblock eingesetzt. Aufgrund der kleinen Laserpunktgröße ist eine hohe Detailauflösung erzielbar, wodurch die Makro- und Mikrostruktur der gefertigten Restauration optimiert werden. Die Vorteile des Laserfräsverfahrens bei der Herstellung von Zahnersatz liegen einerseits in der Kostenreduktion durch den Verzicht auf Schleifkörper sowie Kühlmittel und andererseits in der prozessbegleitenden Qualitätskontrolle mit einem integrierten 3D-Scanner (Blatz/Conejo 2019).

1.4.5 Sinteröfen

Sinteröfen werden für Materialien benötigt, die nach der Fertigstellung gesintert oder keramisch glasiert werden müssen. Beispiele für solche Geräte sind *CEREC Speedfire* und *Programat CS4*. Die meisten Chairside-Öfen können sowohl für das Sintern von Zirkonoxid und das Glasieren von Keramik als auch für die Kristallisation von Lithiumdisilikat verwendet werden. Die zügige Weiterverarbeitung und Fertigstellung der gewünschten Vollkeramikrestaurationen wird durch die gerätespezifische Verkürzung der Sinterzyklen ermöglicht (Blatz/Conejo 2019).

1.5 CAD/CAM-Materialien

1.5.1 Keramische Werkstoffe

1.5.1.1 Silikatkeramik

Die dentale Silikatkeramik auf Siliziumdioxidbasis (SiO_2) enthält eine glasartige Matrix und weist daher eine hohe Transluzenz auf. Dadurch können die optischen Eigenschaften von Schmelz und Dentin imitiert werden, weshalb sie sich für dentale Restaurationen im ästhetischen Bereich der Mundhöhle eignen. Die Silikatkeramik besitzt allerdings spröde Eigenschaften und eine geringe Bruchfestigkeit, die jedoch zu einem bestimmten Grad durch deren adhäsive Befestigung kompensiert werden können. Die herkömmliche Feldspatkeramik verfügt über optimale optische Eigenschaften, gilt aber als die schwächste glasbasierte Keramik. Durch Beimengung von Leuzit können die physischen Eigenschaften der Feldspatkeramik geringfügig verbessert werden. Bei einer mit Leuzit verstärkten Keramik (z. B. IPS Impress) wurde eine minimale Erhöhung der Bruchfestigkeit dokumentiert. Deswegen eignet sich diese Art für den ästhetischen Frontzahnbereich, jedoch nicht für den Seitenzahnbereich, der kontinuierlich größeren Belastungskräften ausgesetzt ist. Erst durch die Einführung der Lithium-Disilikat - Keramik, die bis zu 72 % Lithium und Silikatoxide enthält, wurde eine signifikante Steigerung der Bruchfestigkeit erzielt, ohne die optischen Eigenschaften zu beeinträchtigen. Durch die verbesserten mechanischen Eigenschaften der Disilikat-Keramik wurde auch die Herstellung 3-gliedriger Brücken und Implantatabutments möglich (Sulaiman 2020).

- ***Feldspatkeramik***

Die Feldspatkeramik gehört zu den ältesten Werkstoffen, die in der CAD/CAM-Zahnmedizin verwendet werden. Marken sind beispielsweise *CEREC* und *VITABLOC*. Die Feldspatkeramik wird in verschiedenen Farb- und Transluzenzgradienten angeboten, um natürlichen Zähnen möglichst optimal zu entsprechen. Indikationen für Feldspatkeramik sind Veneers, Inlays, Onlays und Frontzahnkronen (Sulaiman 2020). Klinische Studien zeigen akzeptable Erfolgsraten für feldspathhaltige CAD/CAM-Restaurationen, die zwischen 84 % und 95 % über einen Zeitraum von neun bis 18 Jahren liegen (Reiss 2006). Die Hauptursache für Misserfolge war die Fraktur der Restauration. Eine günstige Prognose für diese Art von Keramik ergibt sich, wenn Größe und Lage der Restauration

bei der Planung berücksichtigt werden.

- ***Leuzitverstärkte Glaskeramik***

Erstmals von Ivoclar als IPS Empress CAD eingeführt und mit verbesserten mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur herkömmlichen Feldspatkeramik, besitzt diese Keramik eine hohe Transluzenz, wodurch sie für ästhetisch anspruchsvolle Fälle eingesetzt werden kann. Dieser Keramikart zeigt gute klinische Erfolge, allerdings nur bei der Verwendung in nicht tragenden Bereichen (Sulaiman 2020).

- ***Lithium-Disilikat-Keramik***

Blöcke aus Lithium-Disilikat-Keramik (z. B. IPS e.max) haben eine kristalline Phase, die aus Lithiumdisilikat und Lithiumorthophosphat besteht. Aufgrund der verbesserten mechanischen Eigenschaften kann dieser Keramikart ab einer bestimmten Schichtstärke auch in tragenden Bereichen der Mundhöhle eingesetzt werden. Dabei werden die hervorragenden optischen Eigenschaften beibehalten, die für alle Silikatkeramiken typisch sind. Lithiumdisilikat eignet sich zur Anfertigung von Inlays, Onlays, Kronengerüsten und Einzelzahnkronen. Außerdem können aufgrund der hohen Bruchfestigkeit auch Brückenkonstruktionen hergestellt werden, die jedoch maximal 3-gliedrig sein sollten. Die Verarbeitung der Blöcke erfolgt in einer teilkristallinen Phase, wodurch der Substanzabtrag erleichtert wird. Anschließend erfolgt der Kristallisationsbrand, um die endgültige Festigkeit zu erreichen. Rezente Publikationen zufolge ist der klinische Langzeiterfolg von Lithium-Disilikat-Einzelzahnkronen zufriedenstellend. Allerdings wurde über eine langfristig ungünstige Prognose festsitzender Brücken berichtet, die auf einer erhöhten Anhäufung von Frakturen an der Verbindungsstelle beruht (Pieger et al. 2014). Erwähnenswert sind vollkristallisierte Disilikat-Keramiken, die keinen zusätzlichen Kristallisationsbrand erfordern, z. B. Celtra Duo. Diese Keramikarten sind zirkonoxidverstärkt und besitzen hervorragende mechanische Eigenschaften (Sulaiman 2020).

1.5.1.2 Oxidkeramiken

Hochfeste polykristalline CAD/CAM-Keramiken auf Metalloxidbasis wie Zirkoniumdioxid zeichnen sich im Gegensatz zu Silikatkeramiken durch hervorragende mechanische Eigenschaften aus. Die hohe Festigkeit resultiert aus dem geringen Glasanteil bei dieser Keramikart. Die Biegefestigkeit herkömmlicher Yttriumoxid-stabilsierter Zirkonoxide liegt zwischen 1000 und 1500 MPa. Aufgrund der hohen Festigkeit ist eine konventionelle Zementierung ausreichend dimensionierter Restaurationen möglich. Die ersten Generationen der Zirkonoxide verfügten über eine begrenzte Transluzenz und wurden deshalb nur zur Herstellung von Kappchen und Gerüsten verwendet, die anschließend mit einer Feldspatkeramik verblendet wurden. Die Erfolgsquoten waren ähnlich hoch wie bei Verblendmetallkeramik-Restaurationen. Aktuell besteht jedoch eine Tendenz zu monolithischen Keramikversorgungen. Aktuelle Generationen von Zirkoniumdioxid verfügen über bessere optische Eigenschaften. Insbesondere vorgefärbte, mehrschichtige, hochtransluzente Zirkonoxid-Materialien bieten ein erweitertes Behandlungsspektrum hinsichtlich der Ästhetik. Aufgrund der Verbesserung der Transluzenz, die aus einer Änderung des Yttriumoxidanteils resultierte, sind bei der neueren Materialgeneration auch ästhetisch anspruchsvolle Frontzahnrestaurationen möglich. Seit kurzem sind hochtransluzente Zirkonoxidblöcke für Chairside-Systeme auf dem Markt, z. B. CEREC Zirconia (Dentsply Sirona) und IPS e.max ZirCAD (Ivoclar Vivadent). Die Oxidkeramiken werden aus vorgesinterten Blöcken gefräst und in einem Ofen dichtgesintert (Blatz/Conejo 2019).

1.5.2 Polymer-Werkstoffe

1.5.2.1 PMMA

Polymethylmethacrylat (PMMA) ist ein synthetisches Material, das durch Polymerisation von Methylmethacrylat hergestellt wird. Fräsbare Blöcke aus PMMA werden vor allem zur Anfertigung von Langzeitprovisorien verwendet, darunter Einzelzahnkronen und Brücken. Rezente Publikation zufolge sind die mechanischen Eigenschaften und der Randschluss von PMMA-Inlays mit Glaskeramik-Inlays vergleichbar. Durch das zunehmende Interesse an PMMA-Restaurationen wird die Entwicklung von PMMA-Blöcken mit verbesserten

optischen und physikalischen Eigenschaften gefördert (z. B. Telio CAD von Ivoclar Vivadent). Die PMMA-Restaurationen sind polierbar, was in einer zufriedenstellenden Ästhetik resultiert. Darüber hinaus ist PMMA das Material der Wahl bei der subtraktiven Anfertigung von Totalprothesen, die anschließend, ähnlich wie konventionelle Prothesen, gefärbt und poliert werden müssen. Die Festigkeits- und Oberflächeneigenschaften von CAD/CAM-PMMA-Prothesen sind mit denen herkömmlicher wärmegehärteter PMMA vergleichbar. Die Passgenauigkeit von CAD/CAM-Prothesen ist allerdings besser als die konventioneller Prothesen, was in einer besseren Retention und einer Minimierung traumatischer Geschwüre resultiert (Sulaiman 2020).

1.5.2.2 Komposite

Komposite bestehen aus anorganischen oder organischen Füllern, die in eine organische Matrix, die Initiatoren, Stabilisatoren und Pigmente enthält, eingebettet sind. Direkte Komposite werden intraoral appliziert, modelliert und polymerisiert, während indirekte Komposite aus vorpolymerisierten Blöcken extraoral gefräst und anschließend polymerisiert werden, um die Nachteile direkter Kompositrestaurationen wie Polymerisationsschrumpfung zu überwinden. Diese Materialklasse erfordert nur minimale Nachbearbeitungsschritte sowie ggf. die Zugabe von Malfarben zur Individualisierung von Restaurationen wie Veneers, Inlays, Onlays und Kronen. Die Festigkeit sowie andere Eigenschaften wurden mit denen von Keramikblöcken verglichen, ohne dass ein Konsens darüber erzielt werden konnte, welches Material überlegen ist (Magne et al. 2010). Beispiele für CAD/CAM-Kompositkunststoffe sind Paradigm MZ100, 3M ESPE (St. Paul, Minnesota) und BRILLIANT Crios (Coltene, Altstätten, Schweiz) (Sulaiman 2020).

1.5.2.3 Hochleistungspolymere

Hochleistungspolymere besitzen hervorragende mechanische, physikalische und biokompatible Eigenschaften. Polyetheretherketon, thermoplastisches Polyaryletherketon (Pekkton) und faserverstärkte Kompositblöcke (z. B. Trinia, Shofu und Japan) werden zur Anfertigung von abnehmbarem Zahnersatz sowie Kronen, dreigliedrigen Brücken, individuellen Implantatabutments, implantatgetragenen Suprakonstruktionen und Teleskopen verwendet (Sulaiman 2020). Die Passgenauigkeit abnehmbarer Teilprothesen,

die mit konventionellen Techniken und in einem digitalen Arbeitsablauf mit PEEK hergestellt wurden, wurde verglichen, wobei letztere eine vergleichbare, in einigen Fällen sogar eine bessere Passgenauigkeit als konventionelle Techniken aufwiesen (Negm et al. 2019).

1.5.2.4 Infiltrierte Keramiken bzw. Kunststoffe

Diese Kategorie *CAD/CAM-Materialien* umfasst zwei Stoffklassen: Materialien, die eine Polymermatrix enthalten, die mit keramischen Füllstoffpartikeln infiltriert ist (z. B. Lava Ultimate), und Materialien, die ein mit einem Polymer infiltriertes Keramiknetzwerk aufweisen (z. B. VITA Enamic). Diese Materialklasse besitzt Eigenschaften wie eine hohe Belastbarkeit und Ermüdungsbeständigkeit sowie günstige Fräseigenschaften. Keramikinfiltrierte Blöcke werden für Veneers, Inlays und Onlays empfohlen, während polymerinfiltrierte Keramikblöcke auch für Einzelkronen verwendet werden können. Es mangelt jedoch noch an klinischen Studien, um diese Keramiken als praktikable Option für indirekte Restaurationen in Betracht zu ziehen (Sulaiman 2020).

1.5.3 Metallische Werkstoffe

Auch Chrom-Kobalt-Legierungen, Titan und edle sowie hochedle Metalle werden zur Anfertigung dentaler Restaurationen im digitalen Workflow eingesetzt. Chrom-Kobalt ist ein kostengünstiges, korrosionsbeständiges Metall, das als Gerüst für Kronen und festsitzende Teilprothesen mit anschließender Schichtung von Porzellan verwendet wird. Titanblöcke können gefräst werden, um individuelle Abutments herzustellen, die für ästhetisch anspruchsvolle Fälle geeignet sind. Edle sowie hochedle Legierungen können auch gefräst werden, wodurch Komplikationen im Zusammenhang mit Anguss, Ausbrennen und Gießen eliminiert werden können (Sulaiman 2020).

1.6 Anwendung der CAD/CAM-Technologie in der Zahnmedizin

1.6.1 Anwendung in der Prothetik

1.6.1.1 Festsitzende Prothetik

Durch die Einführung und den Fortschritt der CAD/CAM-Technologie in der Zahnheilkunde wurde der Bereich der festsitzenden Prothetik revolutioniert. Das Indikationsspektrum digital angefertigter Restaurationen reicht von Inlays über Onlays und Kronen bis hin zu mehrgliedrigen Brücken. Außerdem sind individuelle Implantat-Abutments mehrerer Firmen im Angebot (Tinschert/Natt 2007), die aufgrund des geringeren Materialverlusts häufig mithilfe der subtraktiven Fertigung hergestellt werden. Ein weiteres Einsatzgebiet der CAD/CAM-Technologie ist die Herstellung individueller Stege. Diese Konstruktionen werden sowohl mithilfe additiver als auch subtraktiver Verfahren produziert. Die computergestützte Herstellungstechnologie bietet eine konsistente Präzision und Reproduzierbarkeit des Endergebnisses. Darüber hinaus werden Arbeitsabläufe vereinfacht und der Personaleinsatz verringert (Dawood et al. 2010). Es besteht die Möglichkeit, mithilfe von CAD/CAM hergestellte vollanatomische Restaurationen und Gerüste in der CAD-on-Technik miteinander zu verbinden. Bei der IPS-e.max-CAD-on-Herstellungsmethode werden softwaregestützt ein Grundgerüst aus Zirkonoxid und eine Verblendstruktur aus Lithium-Disilikat entworfen und anschließend in einem Schleifprozess kongruent angefertigt. Die Verbindung der beiden Restaurationskomponenten erfolgt anschließend mit einer speziellen Glaskeramik, parallel zum Sinterungsvorgang, im Sinterofen. Das optimale prothetische Ergebnis wird durch die Kombination aus analogen und digitalen Arbeitsabläufen erzielt. Das Design der geplanten prothetischen Versorgung wird mit einer speziellen Software entworfen und anschließend mithilfe additiver oder subtraktiver Verfahren hergestellt. Gegenwärtig sind diverse Softwareanwendungen und CAD/CAM-Geräte zahlreicher Unternehmen im Angebot. Das Behandlungsteam, bestehend aus Zahnarzt/Zahnärztin und Zahntechniker/Zahntechnikerin, muss sich entscheiden, ob es digital oder konventionell vorgehen möchten. In der Realität gibt es jedoch keine klassischen oder volldigitalisierten Arbeitsabläufe. Der Workflow besteht vielmehr aus einer Kombination beider Prozesse (Miyazaki/Hotta 2011). Rezenten Publikationen zufolge wird die Produktion zahn- bzw. implantatgetragener Einzelzahnkronen von der fortschreitenden Digitalisierung in der Zahnmedizin beeinflusst.

Die Qualität monolithischer, computergestützt konstruierter Kronen im Seitenzahnbereich ist mit der konventionell hergestellter Kronen vergleichbar (Joda et al. 2016). Die Vorteile der CAD/CAM-Technologie liegen vielmehr in der schnellen sowie kostengünstigen Neuanfertigung der Restauration bei Bedarf, im vereinfachten Workflow sowie in der Nichtnotwendigkeit einer Lagerstätte für Gipsmodelle. Darüber hinaus resultieren digitale Arbeitsabläufe in geringeren Produktionskosten, Zeitersparnis sowie einer Erhöhung der Patientenzufriedenheit aufgrund eines zeitgemäßen Therapiekonzepts (Joda et al. 2017).

1.6.1.2 Anwendung in der abnehmbaren Prothetik

Trotz der rückläufigen Inzidenz von Zahnlosigkeit in heutigen Generationen nimmt die Anzahl zahnloser Patienten/Patientinnen aufgrund der höheren Lebenserwartung zu. Die Versorgung unbezahnter Patienten/Patientinnen mit einer Totalprothese ist fest in der Zahnheilkunde etabliert. Herausnehmbare Totalprothesen erfüllen die Mindestbedürfnisse der Betroffenen hinsichtlich Ästhetik sowie Funktion. Allerdings haben sie sich in den letzten Jahrzehnten kaum weiterentwickelt (Srinivasan et al. 2021).

Aufgrund der rasanten Entwicklung der digitalen Zahnmedizin gewinnt auch die computergestützte Anfertigung von Totalprothesen zunehmend an Bedeutung. Im Jahr 1994 wurde der erste Versuch unternommen, ein CAD/CAM-System zur Herstellung eines herausnehmbaren Zahnersatzes zu entwickeln. Der Durchbruch in der digitalen Prothesenkonstruktion gelang Goodacre et al. im Jahr 2012.

Grundsätzlich existieren zwei Methoden zur Anfertigung eines herausnehmbaren Zahnersatzes: subtraktive und additive Verfahren. Bei ersterer wird die Prothesenbasis aus einem vorgefertigten Rohling herausgefräst. Systemabhängig werden anschließend entweder präfabrizierte oder gefräste Zähne auf die Basis geklebt. Neuerdings ist es zudem möglich, die Prothese sowie die Zähne aus einem einzigen Rohling herzustellen. Der größte Nachteil des subtraktiven Verfahrens ist der Materialverbrauch, da ein großer Teil des Materials ungenutzt bleibt und verworfen wird. Eine weitere Einschränkung sind die einfarbigen sowie wenig ästhetischen Zähne, obwohl es mittlerweile Hersteller/Herstellerinnen gibt, die eine verbesserte Ästhetik durch zweischichtige Zähne anbieten.

Bei additiven Verfahren werden die Objekte schichtweise hergestellt. Seit seiner Einführung vor kurzer Zeit hat der 3D-Druck in vielen Gebieten der Medizin, einschließlich der Zahnheilkunde, sein großes Potenzial unter Beweis gestellt.

Gegenwärtig verfügbare 3D-Drucksysteme zur Herstellung eines vollständig herausnehmbaren Zahnersatzes sind FotoDenta denture (Dentamid, Deutschland) und Dentca 3D Printed Denture (Dentca, USA). Die begrenzte Auflösung und Reproduzierbarkeit der erhältlichen Drucker sowie deren technische Einschränkungen stellen bis dato Hindernisse bei der Herstellung eines herausnehmbaren Zahnersatzes dar. Durch die aufkommenden 3D-Druck-Technologien werden klinische sowie labortechnische Prozesse bei der Fabrikation von Totalprothesen zunehmend verändert (Anadioti et al. 2020).

Durch die Einführung eines vollständig digitalisierten Arbeitsablaufs kann eine Prothese innerhalb von zwei Behandlungssitzungen angefertigt und eingesetzt werden. Die anatomischen Strukturen der Mundhöhle werden in der ersten Sitzung mithilfe eines Intraoralscanners erfasst und anschließend digitalisiert. Das Prothesendesign wird anschließend in einer CAD-Software entworfen und in den meisten Fällen an einen 3D-Drucker übermittelt. Nach der Fertigstellung wird die prothetischen Restauration dem/der Patienten/Patientin in der zweiten Sitzung eingesetzt. Die verkürzten Behandlungszeiten können im Hinblick auf den Patientenkomfort einen Vorteil für ältere und wenig belastbare Patienten/Patientinnen darstellen. Außerdem ist durch den digitalen Workflow im Fall eines Verlustes die sofortige Anfertigung einer Ersatzprothese möglich, was insbesondere in Altersheimen vorteilhaft sein kann. Darüber hinaus wurde in einigen Studien über eine verbesserte Passgenauigkeit sowie biokompatiblere Materialien im Zusammenhang mit CAD/CAM-fabrizierten Totalprothesen berichtet. Allerdings muss bei der digitalen Prothesenherstellung auf die Einprobe verzichtet werden. Bei ästhetisch anspruchsvollen Patienten/Patientinnen ist eine Wachseinprobe vorzuziehen, da notwendige Korrekturen rechtzeitig vor der Fertigstellung der Totalprothese vorgenommen werden können (Buser et al. 2020).

1.6.2 Anwendung in der oralen Chirurgie

Computergestützte Verfahren sind im Bereich der dentalen Implantologie etabliert. Sie werden im Rahmen der navigierten Implantation zur dreidimensionalen Planung von Implantaten sowie Herstellung von Bohrschablonen und Implantabutments angewandt. Im Vergleich zur konventionellen Implantatinsertion ist durch die digitale Volumetomographie (DVT) eine genauere Vorhersagbarkeit der geplanten Restauration im Sinn eines Backwards Plannings möglich, in dessen Rahmen das prothetische

Endergebnis mithilfe einer speziellen Software visualisiert werden kann. Dementsprechend orientiert sich die Implantationsplanung am späteren Zahnersatz. Auf diese Weise kann der Behandler anatomische Gegebenheiten berücksichtigen und eine individuell auf den/die Patienten/Patientin abgestimmte Wahl im Hinblick auf das Implantat treffen, was in einer prognostisch günstigen Prothetik resultiert.

Für die digitale Implantationsplanung sind grundsätzlich ein dreidimensionales Röntgenbild sowie ein Intraoral-Scan erforderlich. Die 3D-Daten, z. B. aus der DVT, werden heutzutage standardisiert als DICOM-Datensätze gespeichert. Der DICOM ist ein Standard zur Speicherung sowie zum Transfer medizinischer Informationen, der von den meisten Herstellern/Herstellerinnen bildgebender Technologien angewandt wird. Dadurch wird die Interoperabilität zwischen Geräten verschiedener Herstellungsfirmen im klinischen Alltag gewährleistet. Die Daten aus der digitalen Abformung des Mundinnenraumes werden im STL-Format gespeichert. Durch Überlagerung der dreidimensionalen Daten aus der DVT mit den Oberflächendaten des intraoralen Scans (Matching) wird die notwendige Voraussetzung für die chirurgische Planung geschaffen. Zu diesem Zweck werden die zwei Datensätze, DICOM und STL, in eine Planungssoftware importiert und gematcht. Die Mehrheit der Planungsprogramme benötigt Referenzpunkte an bestimmten intraoralen Strukturen, um die Daten räumlich zuordnen zu können. Anschließend kontrolliert der Behandler die Datenüberlagerung anhand einer farbcodierten Differenzdarstellung sowie Schnittbilder der überlagerten Datensätze. Liegt eine Diskrepanz zwischen den Planungsdaten vor, muss ggf. eine sorgfältige Fehleranalyse erfolgen, um vorhandene Fehlerquellen und Störfaktoren zu beseitigen. Ansonsten könnte die Abweichung in einer ungenauer Bohrschablone resultieren und möglicherweise weitreichende Schäden an benachbarten anatomischen Strukturen nach sich ziehen. Um das Überlagerungsergebnis zu optimieren, muss auf eine ausreichende Qualität der Daten geachtet werden. Durch Streuungsartefakte aufgrund von Restaurationen mit einer hohen Röntgenopazität sowie Bewegungsartefakten kann das Matching in bestimmten Situationen erschwert sein.

Nach der Überlagerung der Daten aus der DVT und dem Intraoral-Scan kann der Operateur mithilfe einer CAD-Software ein digitales Wax-up erstellen, mit dem die Implantatposition unter Berücksichtigung funktioneller und ästhetischer Faktoren sowie der patientenspezifischen anatomischen Situation bestimmt werden kann. Die frühzeitige Erkennung prothetischer Limitationen ist vorteilhaft, da der Behandler seine Planung bei Bedarf entsprechend verändern kann. In bestimmten Fällen bietet sich die Anfertigung

eines CAD/CAM-Mock-ups an, um die geplante Restauration intraoral einzuprobieren (Schubert et al. 2018).

Durch die Beachtung der digital ermittelten Sicherheitsabstände zu bedeutsamen anatomischen Strukturen wie dem n. Alveolaris inferior wird das Risiko einer Verletzung minimiert. Zu diesem Zweck besteht bei der Planungsphase die Möglichkeit, den Nervverlauf farblich darzustellen und die Distanz zum virtuell geplanten Implantat auszumessen. Außerdem werden durch die dreidimensionale Darstellung der Knochenverhältnisse unter sich gehende Stellen erkannt, wodurch ein Durchbruch der lingualen Kompakta im Seitenzahnbereich bei der Implantatausrichtung verhindert werden kann. Dadurch wird die Wahl der Form, des Durchmessers und der Länge des Implantats erleichtert.

Die CAD-Software verfügt in der Regel über Datenbanken bekannter Implantatfirmen (Schubert et al. 2018). Unter Beachtung der lokalen Knochenbeschaffenheit, schonungspflichtiger anatomischer Strukturen und herstellerspezifischer Indikationen kann das optimale Implantat ausgewählt werden. Zusätzlich bietet die Planungssoftware die Möglichkeit, den individuellen Bedarf einer Augmentation abzuschätzen.

Nach der CAD-Phase werden die virtuell bestimmten Implantatpositionen auf eine Bohrschablone übertragen. Prinzipiell gibt es zwei Arten der geführten Implantation: teil- und vollnavigiert. Bei der teilnavigierten Implantation wird nur die Pilotbohrung mithilfe einer Bohrschablone durchgeführt, bei der vollnavigierten erfolgt auch die Aufbereitung des Implantatlagers schablonengeführt. Zu diesem Zweck sind systemspezifische Führungshülsen in die Schablone integriert. Die Insertion des Implantats kann auch durch die Führungshülsen vorgenommen werden, sofern dies vom gewählten Implantatsystem vorgesehen ist (Schubert et al. 2018).

Operationsschablonen werden überwiegend mithilfe additiver Verfahren wie 3D-Druck oder RP angefertigt. Subtraktive CAD-Methoden wie das Fräsen eignen sich aufgrund des höheren Ressourcenaufwands weniger.

Zu Beginn der Operation kontrolliert der/die Behandler/Behandlerin die intraorale Passung der Führungsschablone. Die Implantation kann nur bei einem stabilen Sitz und optimaler Passung der Schablone durchgeführt werden. Nach der Lappenpräparation erfolgt die Aufbereitung des Knochenlagers gemäß dem gewählten Bohrprotokoll. Die korrekte Position der Bohrschablone kann währenddessen immer wieder kontrolliert werden. Nach der Insertion des Implantats wird die weitere Vorgehensweise durch das gewählte implantatprothetische Konzept vorgegeben (Schubert et al. 2018).

1.6.3 Anwendung in der Kieferorthopädie

Die Anwendungsmöglichkeiten der CAD/CAM-Technologie im Bereich der Kieferorthopädie sind vielfältig. Der Einsatz der Intraoralscanner führte zu einem Paradigmenwechsel. Im Gegensatz zu konventionellen Abdrücken bietet die digitale Datenerfassung der Alveolarbögen zahlreiche Vorteile. Einerseits werden die Behandlungszeiten verkürzt, andererseits entfällt die von vielen Patienten/Patientinnen als unangenehm empfundene Abformung. Vorteilhaft sind zudem die präzise Reproduzierbarkeit sowie die hohe Präzision der 3D-Modelle. Ungenauigkeiten sind bei üblichen Gipsmodellen häufiger anzutreffen, die auf die techniksensitiven Schritte bei deren Herstellung zurückzuführen sind (Tarraf/Ali 2018).

Die intraoralen Strukturen werden beim Scan meist mithilfe des Triangulationsprinzips erfasst und digital im STL-Format gespeichert. Die Datensätze können anschließend direkt an ein Dentallabor weitergeleitet oder in eine geeignete CAD-Software importiert werden. Nach der Segmentierung der 3D-Modelle im Planungsprogramm hat der Behandler die Möglichkeit, eine genaue kieferorthopädische Analyse durchzuführen. In deren Rahmen werden Faktoren wie okklusale Stopps, proximale Kontaktpunkte, vorhandene Platzverhältnisse sowie Overjet und Overbite ermittelt. Außerdem sind nach einer Überlappung mit den Datensätzen aus der DVT eine genaue Wurzelanalyse hinsichtlich Inklination, Angulation und Wurzelform sowie eine exakte Beurteilung der Knochenverhältnisse möglich (Tarraf/Ali 2018).

Durch 3D-Simulationen des Behandlungsziels können potenzielle Limitationen darüber hinaus rechtzeitig erkannt werden. Mithilfe vorprogrammierter Algorithmen berechnet die CAD-Software selbstständig verschiedene Therapieoptionen, mit denen die Behandlung hinsichtlich Sicherheit und Vorhersagbarkeit optimiert werden kann. Auch das Einfügen der Behandlungsvorschläge in einen dreidimensionalen Gesichtsscan ist möglich.

In der Kieferorthopädie werden überwiegend additive Fertigungsverfahren eingesetzt, z. B. die Stereolithografie (Tarraf/Ali 2018).

Demnächst werden häufige Anwendungsbereiche der CAD/CAM-Technologie in der Kieferorthopädie erläutert.

1.6.3.1 Aligner

Ein Einsatzbereich der CAD/CAM-Technologie in der Kieferorthopädie sind die Alignerbehandlungen. Diese Kunststoffschienen wurden primär zur Feineinstellung der Dentition nach einer orthodontischen Behandlung oder zur Korrektur geringfügiger Zahnfehlstellungen entwickelt. Erst durch den technologischen Fortschritt im Bereich der digitalen Zahnmedizin vergrößerte sich das Anwendungsspektrum der Alignertherapie. Dadurch wurde auch die Korrektur komplizierter Malokklusionen möglich (Barreto/Santos 2018).

Die für die Alignerherstellung notwendigen Set-ups wurden ursprünglich manuell in einem Dentallabor angefertigt. Zu diesem Zweck stellte der/die Zahntechniker/Zahntechnikerin in einem aufwendigen Vorgang einzelne Zähne aus dem Gipsmodell heraus und repositionierte sie später in der für die Therapie gewünschten Position. Zum Schluss wurde eine thermoplastische Folie auf dem Set-up-Modell in Form gebracht und ausgearbeitet. Die einzelnen Schritte des manuellen Arbeitsablaufs sind fehleranfällig und resultieren häufig in Ungenauigkeiten. Dadurch kann unter anderem die Alignerbehandlung erschwert werden (Barreto/Santos 2018).

Daher wurde die Digitalisierung der beschriebenen Vorgänge vorangetrieben. Vorteilhafter als fehleranfällige Gipsmodelle für die Herstellung der einzelnen Schienen im Rahmen der Alignertherapie ist die Anfertigung 3D-gedruckter Set-ups. Die Modelle werden anhand STL-Datensätze, die mithilfe eines Intraoralscans gewonnen wurden, gedruckt. Dadurch wird eine Reduktion der notwendigen Arbeitsschritte erzielt, was in einer geringeren Fehleranfälligkeit, einer optimierten Reproduzierbarkeit und einer erhöhten Genauigkeit resultiert (Co. Kg o. D.).

Der 3D-Druck könnte auch für den direkten Druck von Alignern in einem einzigen Arbeitsschritt verwendet werden. Trotz aktueller Optimierungen, zahlreicher Patente und des zunehmenden Einsatzes verschiedener 3D-Drucktechnologien existiert nur eine begrenzte Anzahl an Studien, in denen der direkte 3D-Druck kieferorthopädischer Aligner oder geeignete Materialien für einen solchen Druck untersucht wurden (Tartaglia et al. 2021). In einer Publikation aus dem Jahr 2019 wurde die direkte Herstellung von Kunststofffolien beschrieben und anhand von Kriterien wie mechanischen Eigenschaften und Dimensionsstabilität mit der konventionellen thermoplastischen Aligneranfertigung verglichen. Die Autoren/Autorinnen stellten eine höhere Passgenauigkeit der 3D-gedruckten Aligner fest, die auf eine bessere Kongruenz der Folie mit den entsprechenden

Zahnflächen zurückzuführen war, was zu einer leichteren Folieneingliederung durch den/die Patienten/Patientin führte. Außerdem zeigten die resinbasierten Schienen im Vergleich eine geringere Verschiebung bei Höchstbelastung sowie mehr Elastizität bei kleineren Verformungen. Im Hinblick auf mechanische Eigenschaften bei der nichtlinearen Kompression während des Kauvorgangs wurden keine signifikanten Unterschiede zu konventionellen Materialien festgestellt (Jindal et al. 2019).

Einer anderen Studie zufolge kommt es beim 3D-Druck oft zu Diskrepanzen zwischen der geplanten und der tatsächlichen Foliendicke. Als Grund dafür wurde eine mangelnde Präzision des digitalen Workflows bei der Umsetzung der geplanten Materialstärke genannt. Durch die Änderung der Folienstärke verändern sich auch die Materialeigenschaften, was negative Auswirkungen auf die klinische Umsetzung der geplanten Aligner-Behandlung haben kann (Edelmann et al. 2020). Die Passgenauigkeit der gedruckten Aligner wird durch Faktoren wie Druckausrichtung und Aushärtungsdauer nach dem Druck beeinflusst. Der richtige Nachhärtungsprozess ist entscheidend für eine ausreichende Festigkeit und Biokompatibilität des endgültigen 3D-Druckprodukts. Durch eine zusätzliche Vernetzung des Polymers können die mechanischen Eigenschaften des gedruckten Materials verbessert und mögliche Restspannungen verringert werden. Dimensionsabweichungen resultieren meist in unerwünschten Zahnbewegungen (Tartaglia et al. 2021).

Für den 3D-Druck in der Zahnmedizin wird gegenwärtig eine Vielzahl an farblosen Harzen verwendet. Allerdings sind diese nicht primär für die Herstellung von Alignern vorgesehen. Aktuell existiert kein auf dem Markt zugelassenes Harz, das für den Direktdruck von Folien geeignet ist. Trotz des Mangels an zertifizierten Materialien für den 3D-Druck von Alignern wurden bereits experimentelle Studien mit modifizierten Resinen an freiwilligen Patienten/Patientinnen durchgeführt. Aufgrund der geringen Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen diesbezüglich ist die Aussagekräftigkeit dieser Studien hinsichtlich Biokompatibilität, Dimensionsstabilität und Elastizität der Materialien jedoch begrenzt (Tartaglia et al. 2021).

1.6.3.2 Übertragungstray für indirektes Bonding

Die Methode des indirekten Bondings in der Kieferorthopädie wurde bereits im Jahr 1970 konzipiert. Der Unterschied zur konventionellen Klebung besteht darin, dass die Brackets zunächst extraoral an einem Modell positioniert und anschließend mithilfe eines

Übertragungstrays intraoral geklebt werden. Dabei wird die Sicht durch die anatomischen Strukturen der Mundhöhle nicht beeinträchtigt und die Brackets können ohne Störfaktoren exakt an den Gipszähnen platziert werden. Darüber hinaus ist es mithilfe des indirekten Bondings möglich, alle Brackets in einem einzigen Schritt zu kleben, was in kürzeren Stuhlzeiten und infolgedessen in einem höheren Komfort für Patienten/Patientinnen und Behandler/Behandlerinnen resultiert. Allerdings erfordert diese Methode eine hohe Präzision bei der Modellherstellung und umständliche Laborverfahren. Außerdem ist der intraorale Transferprozess techniksensitiv und wird maßgeblich von der Erfahrung des Behandlers sowie den Materialeigenschaften der Übertragungsschiene beeinflusst. Infolgedessen kam es nie zu einer Massen Anwendung der indirekten Methode. Durch die Einführung der Straight-Wire- und Lingualtechnik hat die indirekte Klebemethode aufgrund der besseren Sicht bei der Klebung sowie der Passgenauigkeit des erhöhten Patientenkomfort wieder an Bedeutung gewonnen. Eine Optimierung des Prozesses der indirekten Klebung wurde durch die Weiterentwicklung der CAD/CAM-Technologie ermöglicht. Mithilfe eines Scans wird der Abdruck digitalisiert. Das virtuelle Bracket-Set-up wird anschließend mit einem Softwareprogramm erstellt. Anhand dieser Aufstellung wird eine Transferschablone im 3D-Druckverfahren angefertigt. Die Bracket-Positionierung kann durch einen direkten Intraoralscan präzisiert werden. Dabei wird die Dentition des/der Patienten/Partientin direkt am Behandlungsstuhl erfasst. Es werden keine Abdrücke benötigt. Durch die Reduktion der notwendigen Schritte wird eine höhere Genauigkeit des Prozesses gewährleistet. Außerdem bieten die meisten CAD-Programme die Möglichkeit, Zahnbewegungen anhand des virtuell erstellen Bracket-Set-ups zu simulieren, wodurch sich die Vorhersagbarkeit der Behandlung verbessert (Park et al. 2021).

1.6.3.3 Metallgedruckte Apparaturen

Mittlerweile können kieferorthopädische Apparaturen wie Lingual- und Transpalatinalbögen vollständig digitalisiert hergestellt werden. Auch die Anfertigung komplexer Geräte wie Expander ist der rezenten Literatur zufolge möglich. Außer der Dehnschraube, die mit der gegenwärtig verfügbaren 3D-Technologie nicht gedruckt werden kann, werden alle Teile der Erweiterungsgeräte mithilfe des digitalen Workflows angefertigt (Graf et al. 2021).

Nach der Erfassung der oralen Strukturen mit dem Intraoralscan kann die virtuelle Gerüstplanung der kieferorthopädischen Apparatur in einer speziell dafür vorgesehenen Software durchgeführt werden. Anschließend wird die entsprechende Datei an den 3D-Metalldrucker übermittelt und die einzelnen Teile werden gedruckt. Ein häufig verwendetes Metalldruckverfahren ist das selektive Laserschmelzen (SLM), in dessen Rahmen ein pulverförmiges Material auf eine Platte aufgetragen und lokal durch einen Laserstrahl geschmolzen wird. Nach der Verfestigung des geschmolzenen Pulvers entsteht eine feste Schicht. Anschließend wird die Platte abgesenkt und neues Pulver hinzugefügt. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die benötigte Schichtdicke erreicht ist. Zu guter Letzt wird das überschüssige Pulver entfernt und das gedruckte Objekt aus dem Drucker entnommen.

Die Vorteile des direkten Metalldrucks kieferorthopädischer Apparaturen sind eine verbesserte Koordination mit dem Dentallabor, eine erleichterte Individualisierung der Geräte, eine geringere Materialverschwendung sowie eine erhöhte Passgenauigkeit. Allerdings sind die Anschaffungskosten für einen 3D-Drucker hoch. Dementsprechend wird der Metalldruck überwiegend in geeigneten Dentallabors ausgeführt (Graf et al. 2021).

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Im Rahmen der vorliegenden Pilotstudie wurde eine Online-Umfrage durchgeführt, die vom 09.02.2022 bis zum 19.03.2022 verfügbar war. Die Zielgruppe der Umfrage bestand aus allen derzeit in Österreich praktizierenden Zahnärzten/Zahnärztinnen, unabhängig von Aspekten wie Alter, Geschlecht und Spezialisierungsgrad. Der Fragebogen bestand aus insgesamt 27 Fragen, die in drei Gruppen untergliedert waren. Bei den meisten Fragen handelte es sich um geschlossene Multiple-Choice-Fragen, allerdings waren auch Kommentarmöglichkeiten vorgesehen. Einige der Fragen zur Beurteilung der Qualität und Zufriedenheit mit CAD/CAM-Restaurationen waren von 1 (*sehr zufrieden*) bis 10 (*überhaupt nicht zufrieden*) skaliert.

Zur Orientierung bei der Erstellung der Fragen wurden Fragebögen, die bereits in ähnlichen Studien angewandt worden waren, herangezogen. Die Validität der einzelnen Fragen wurde von einer aus Fachpersonen bestehenden Gruppe von Vertretern/Vertreterinnen der Medizinischen Universität Graz sowie der Semmelweis-Universität in Budapest überprüft. Der Fragebogen wurde in deutscher Sprache verfasst. Allerdings wurde zusätzlich eine zweite Version in englischer Sprache angefertigt, die für künftige Pilotstudien im Rahmen einer multizentrischen Untersuchung vorgesehen ist. Der erste Teil der Umfrage umfasste Fragen zu demografischen Faktoren wie dem Land, in dem Zahnmedizinstudium abgeschlossen wurde, dem Spezialisierungsgrad und der Erfahrung mit der CAD/CAM-Technologie. Der zweite Teil der Studie war an CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen gerichtet. Als Anwender/Anwenderinnen wurden alle Zahnärzte/Zahnärztinnen identifiziert, die mindestens einen Aspekt des digitalen Arbeitsablaufs nutzen. Unter anderem wurden Fragen zur klinischen Erfahrung der Befragten mit der CAD/CAM-Technologie, angewendeten Aspekten des digitalen Workflows sowie Behandler-/Behandlerin- und Patientenzufriedenheit mit den digital gefertigten Restaurationen gestellt. Auch die häufigsten Gründe für die Anschaffung eines CAD/CAM-Geräts wurden erfragt. Der dritte Teil der Umfrage betraf Nichtanwender/Nichtanwenderinnen. In diesem Zusammenhang wurden die häufigsten Gründe für den Nichterwerb eines CAD/CAM-Geräts erhoben.

2.2 Datenerhebung

Die Erstellung der Online-Umfrage erfolgte mithilfe von Google Forms. Die Zielgruppe der Studie wurde per E-Mail sowie auf Instagram kontaktiert. Zu diesem Zweck wurde eine anhand online verfügbarer Information im Internet recherchierte datenschutzkonforme E-Mail-Liste angefertigt, die aus 1000 Emailadressen bestand. Zusätzlich wurden 100 österreichische Zahnärzte/Zahnärztinnen auf Instagram angeschrieben, mit der Aufforderung zur Teilnahme an der Umfrage. Der Fragebogen wurde in Form eines Weblinks verbreitet. Die Anonymität der Studie wurde in beiden Fällen explizit betont. Summa summarum wurde der Fragebogen an 1100 österreichische Zahnärzte/Zahnärztinnen verschickt, d. h. ungefähr 1/5 aller derzeit in Österreich tätigen Stomatologen. Die Umfrage war im Zeitraum vom 09.02.2022 bis zum 19.03.2022 verfügbar. Nach einer dreiwöchigen Wartezeit wurde eine erneute Aufforderung zur

Teilnahme verschickt. Insgesamt konnten 115 Antworten akquiriert werden. Demzufolge betrug die Ausschöpfungsquote der Pilotstudie ca. 10 %.

2.3 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung der vorliegenden Online-Umfrage erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS. Die erhobenen Daten wurden entweder als Mittelwerte mit den dazugehörigen Standardabweichungen oder als absolute Zahlen (n) mit Prozentanteilen (%) angegeben. Statistisch signifikante Zusammenhänge wurden mit dem Chi²- oder Fisher-Exact-Test analysiert. Als statistisch signifikant wurden Werte erachtet, die unterhalb des definierten Signifikanzniveau von 5 % ($p = 0,05$) liegen. Um die Ergebnisse darzustellen, kamen Microsoft Excel, SPSS und Canva (Canva Inc.) zur Anwendung.

2.4 Ziel der Studie

Die rasante Entwicklung der digitalen Technologien in den letzten Jahren hat sich in allen Bereichen der Medizin, auch der Zahnmedizin, bemerkbar gemacht. Die Fortschritte in den Bereichen computergestützte Designs und computergestützte Fertigung resultierten in einem breiteren Anwendungsspektrum von CAD/CAM-Systemen, einer verbesserten Qualität der Endprodukte und einer anwenderfreundlichen Bedienung. Aktuell ist die Datenlage hinsichtlich der Nutzung von CAD/CAM in österreichischen Zahnarztpraxen unzureichend. Infolgedessen wurde in dieser Arbeit die Verbreitung dieser Technologien unter österreichischen Zahnmedizinern evaluiert. Der Fokus lag auf der Zufriedenheit mit den CAD/CAM-Restorationen.

Die vorliegende Arbeit stellt eine Pilotstudie dar, die als Grundlage für eine bevorstehende multizentrische Studie dienen wird.

3 Studienergebnisse

3.1 Demografische Daten

Insgesamt 72,6% (n = 82) der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen absolvierten ihr

Zahnmedizinstudium an österreichischen Universitäten. Weitere 8 % (n = 9) der Teilnehmer/Teilnehmerinnen schlossen ihre zahnärztliche Ausbildung in Deutschland und 7,1 % (n = 9) in Ungarn ab, gefolgt von Rumänien mit 3,5 % (n = 4), Bulgarien mit 3,5 % (n = 4) und Südafrika mit 1,8 % (n = 2).

Die klinische Erfahrung der Befragten variierte zwischen einem Jahr und 46 Jahren, wobei der Mittelwert 18,8 Jahre beträgt und die Standardabweichung bei +/- 11,5 Jahren liegt.

Die Verteilung der Abschlussjahre wurde in Abbildung 3 geschildert.

An der Umfrage nahmen 52,6 % (n = 60)

Allgemeinzahnmediziner/Allgemeinzahnmedizinerinnen, 17,5 % (n = 20)

Oralchirurgen/Oralchirurginnen und 12,3 % (n = 14)

Kieferorthopäden/Kieferorthopädinnen teil. Weitere 4,4 % (n = 5) der Zahnärzte/Zahnärztinnen gaben an, als

Parodontologiespezialisten/Parodontologiespezialistinnen zu arbeiten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die Mehrheit der Studienteilnehmer/Studienteilnehmerinnen (71,3 %; n = 82) berichtete, dass sie bereits Erfahrungen mit der CAD/CAM-Technologie gemacht bzw. ein CAD/CAM-System in der Vergangenheit bedient hat. Insgesamt 51,8 % (n = 59) gaben an, an ihrem derzeitigen Arbeitsplatz über ein CAD/CAM-Gerät zu verfügen. Die Zahnärzte/Zahnärztinnen, die nicht im Besitz eines CAD/CAM-Gerät sind (58,7 %; n = 44), gaben an, auch nicht die Absicht zu haben, zukünftig eines zu erwerben.

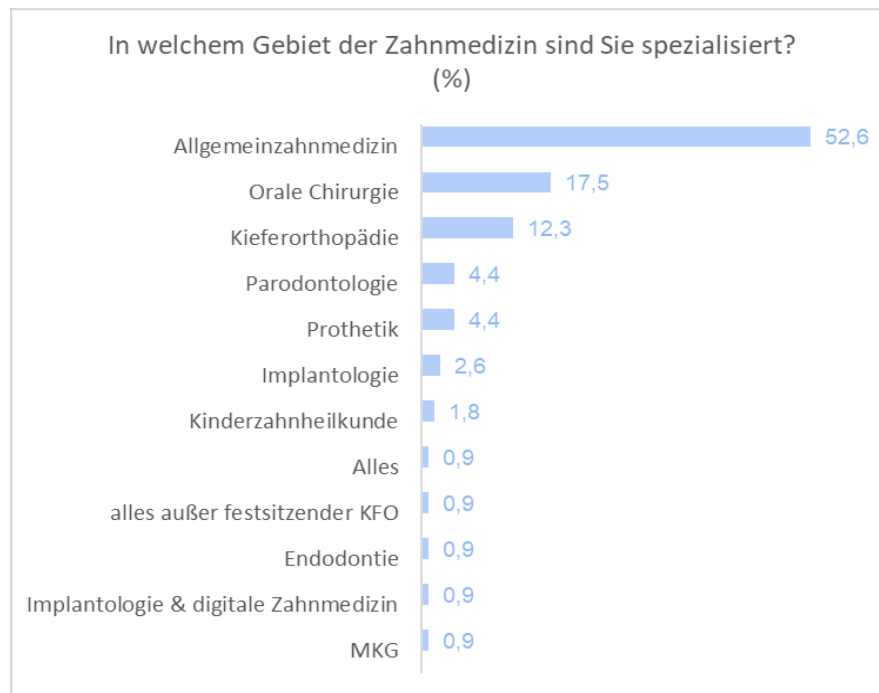


Abbildung 2: Tätigkeitsschwerpunkte der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen

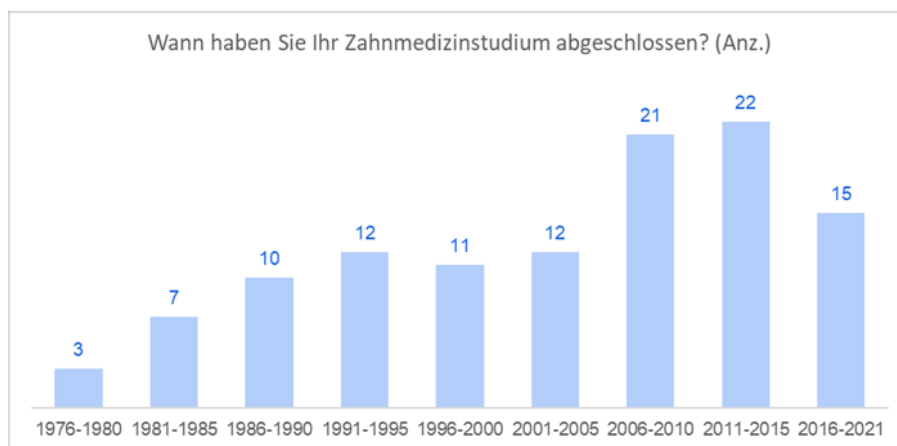


Abbildung 3: Verteilung der Abschlussjahre

3.2 Antworten der CAD/CAM- Anwender/Anwenderinnen

Die CAD/CAM- Anwender/Anwenderinnen wurden mithilfe folgender Frage identifiziert: *Welche Aspekte des digitalen Workflows werden von Ihnen verwendet?* Um als CAD/CAM- Nutzer/Nutzerin identifiziert zu werden, musste mindestens ein Aspekt des digitalen Arbeitsablauf genutzt werden. Diese Gruppe umfasste 69,6 % (n = 80) der Teilnehmer/Teilnehmerinnen.

Mehr als die Hälfte der befragten Nutzer/Nutzerinnen (52,6 %; n = 60) wurde erstmalig im Internet auf die CAD/CAM-Technologie aufmerksam. Weitere 17,5 % (n = 20) kamen im Rahmen einer Dentalmedizin-Messe zum ersten Mal in Berührung damit. Insgesamt

16,7 % (n = 19) der Anwender/Anwenderinnen gaben an, entweder in einem Dentallabor oder bei einem/einer Kollegen/Kollegin erstmalig einem CAD/CAM-Gerät begegnet zu sein. Die Mehrheit der teilnehmenden Zahnärzte/Zahnärztinnen (84,4 %; n = 65) hat die digitale Technologie im Verlauf der letzten zehn Jahre in ihren Arbeitsablauf integriert, während 15,6 % (n = 12) seit einer längeren Zeit Aspekte von CAD/CAM verwenden. Die häufigsten Gründe für die Anschaffung eines CAD/CAM-Geräts waren der Wunsch, auf dem aktuellen technologischen Stand zu sein (58,8 %; n = 47), gefolgt vom Streben nach einer Steigerung der Produktivität (38,8 %; n = 31) und Qualität (36,3 %; n = 29) der Behandlungen sowie einer Reduktion der Herstellungskosten (27,5 %; n = 22) und dem Wunsch nach einer besseren Vermarktung der eigenen Ordination (22,5 %; n = 18). Die erhobenen Gründe sind in Abbildung 4 dargestellt:

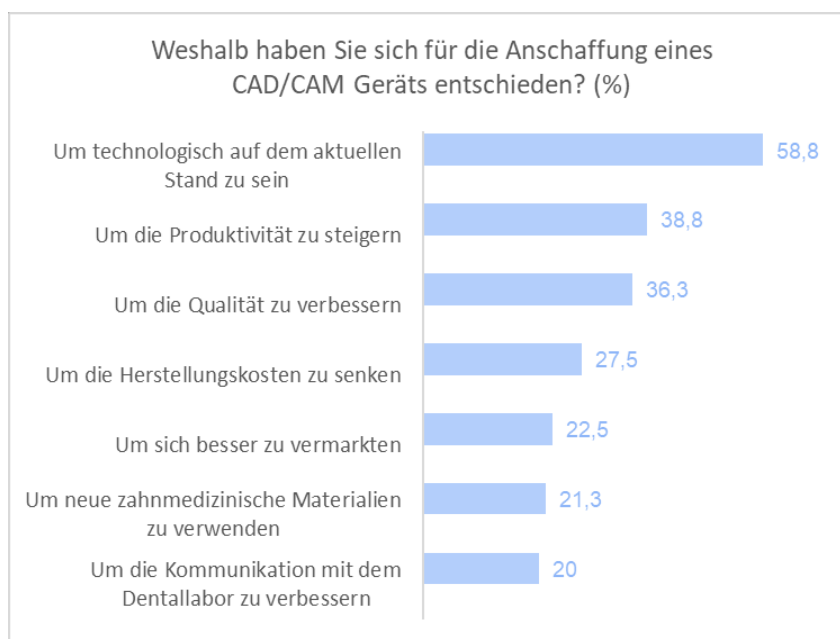


Abbildung 4: Gründe für die Anschaffung eines CAD/CAM-Geräts

Ungefähr die Hälfte der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen (57,3 %; n = 43), die über ein CAD/CAM-Gerät verfügen, absolvierte eine entsprechende Ausbildung. Intraorale Scanner waren mit 78,8 % (n = 63) der am häufigsten verwendete Aspekt des digitalen Arbeitsablaufs. Weitere 42,5 % (n = 34) der Befragten gaben an, über ein Full-Chairside-Gerät an ihrem derzeitigen Arbeitsplatz zu verfügen. Darüber hinaus gaben 41,3 % (n = 33) der teilnehmenden Zahnärzte/Zahnärztinnen an, eine Keramik-Brennofen zu besitzen. Des Weiteren wurden CAD-Software zur Implantatplanung (32,5 %; n = 26), die computergestützte Restaurationsherstellung in einem Dentallabor (32,5 %; n = 26) und CAD-Software zur prothetischen Planung in der Ordination (28,8 %; n = 23) genannt. Die

Digitalisierung von Abdrücken und Modellen sowie deren anschließende virtuelle Bearbeitung mithilfe einer CAD-Software im Labor nehmen 28,8 % (n = 23) der CAD/CAM- Nutzer/Nutzerinnen in Anspruch. Weitere 22,5 % (n = 18) der Befragten erwähnten, ein 3D-Druck-Gerät zu besitzen. Die prozentuelle Verteilung der CAD/CAM-Aspekte der digitalen Prozesskette sind in Abbildung 5 dargestellt.

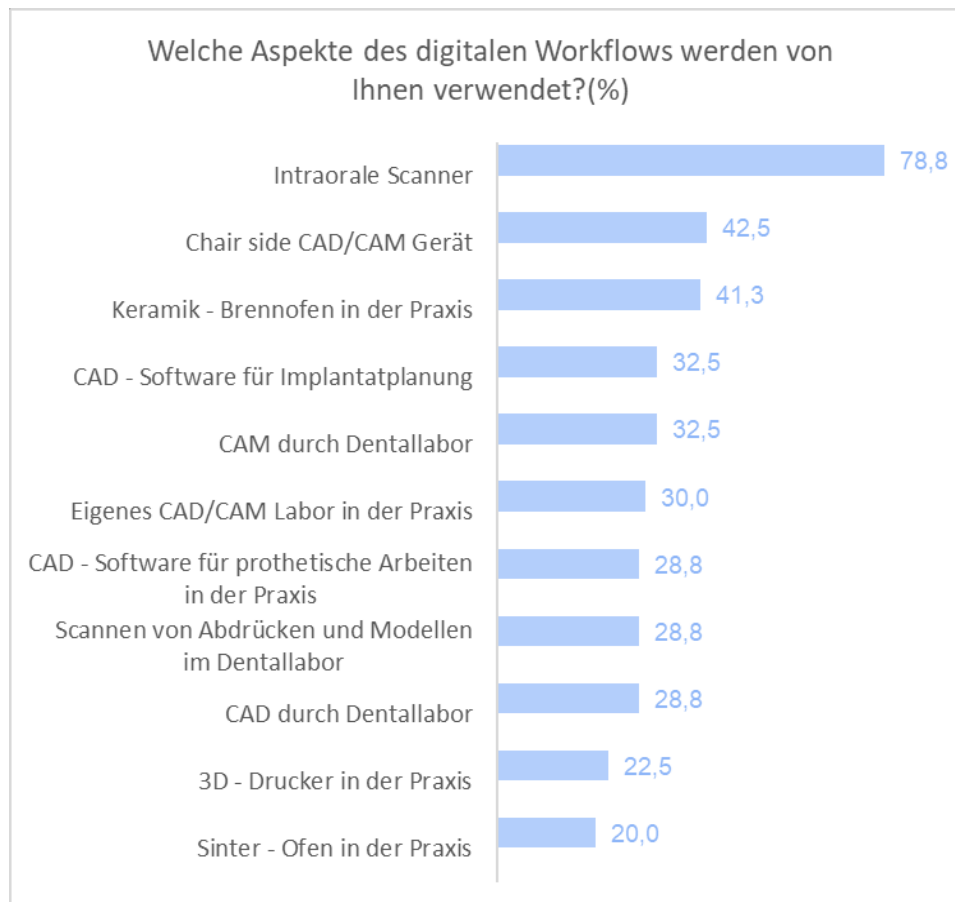


Abbildung 5: Am häufigsten verwendete Aspekte des digitalen Workflows

Die Mehrheit der teilnehmenden Anwender/Anwenderinnen (61,0 %; n = 47) gab an, dass ihre klinischen Entscheidungen zu einem bestimmten Grad durch die Verfügbarkeit der CAD/CAM-Technologie beeinflusst werden. Die am meisten verwendeten Materialien zur computergestützten Restaurationsanfertigung sind Zirkonoxid (61,3 %; n = 49), z. B. CEREC Zirconia, Lithium-Disilikat-Keramik (55,0 %; n = 44), z. B. EPS e.max und Kunststoffe (41,3 %; n = 33), z. B. Multilayer PMMA. Weitere häufig verwendete Werkstoffe sind Hybridkeramik (33,8 %; n = 27), z. B. Vita ENAMIC, 3D-Druckmaterialien (31,3 %; n = 25), z. B. Resins und zirkonverstärkte Glaskeramik (30,0 %; n = 24), z. B. Celtra Duo. Die am wenigsten zur Anwendung kommenden Materialien waren der Umfrage zufolge Leuzit- und Feldspat-Glaskeramik mit 18,8 % (n = 15), z. B. Vita MARC II, Nanokeramik mit 11,3 % (n = 9), z. B. Lava Ultimate und

Metalle mit 10,0 % (n = 8), z. B. Colorado CAD. Die prozentuale Verteilung ist in Abbildung 7 dargestellt:

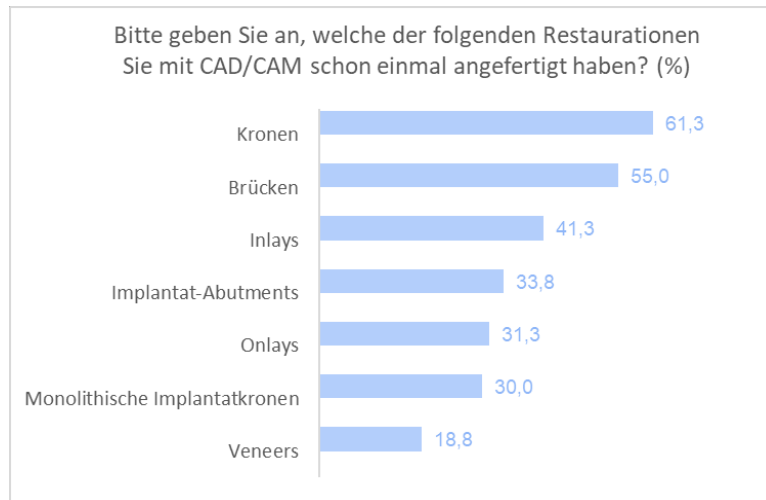


Abbildung 6: Am häufigsten hergestellte Restaurationen mit CAD/CAM

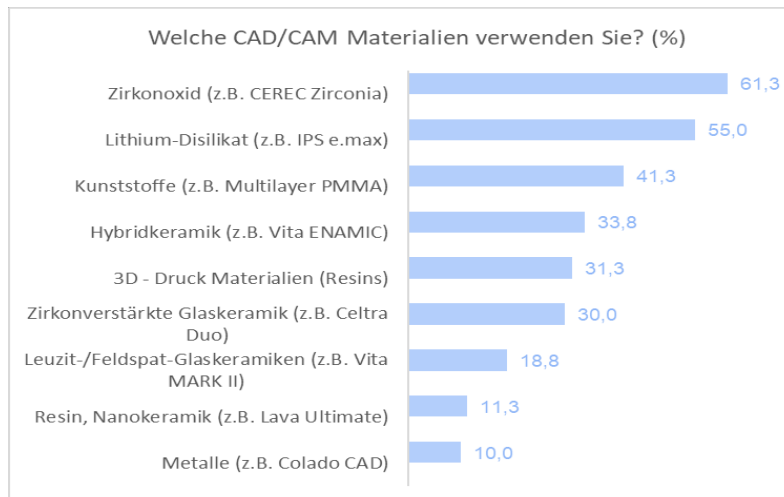


Abbildung 7: Am häufigsten verwendete Materialien

Im Hinblick auf die klinische Anwendung der CAD/CAM-Technologie nutzen 86,3 % (n = 69) der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen den digitalen Arbeitsablauf für die Herstellung von Zahnkronen, gefolgt von Brücken mit 67,5 % (n = 54), Inlays mit 65,0 % (n = 52), Implantat-Abutments mit 63,8 % (n = 51), Onlays mit 58,8 % (n = 47), monolithischen Implantatkronen mit 57,5 % (n = 46) und Veneers mit 41,3 % (n = 33). Weitere 42,9 % (n = 33) der Anwender/Anwenderinnen gaben an, den digitalen Arbeitsablauf bereits zur Herstellung einer Bohrschablone im Rahmen einer Implantation angewandt zu haben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt.

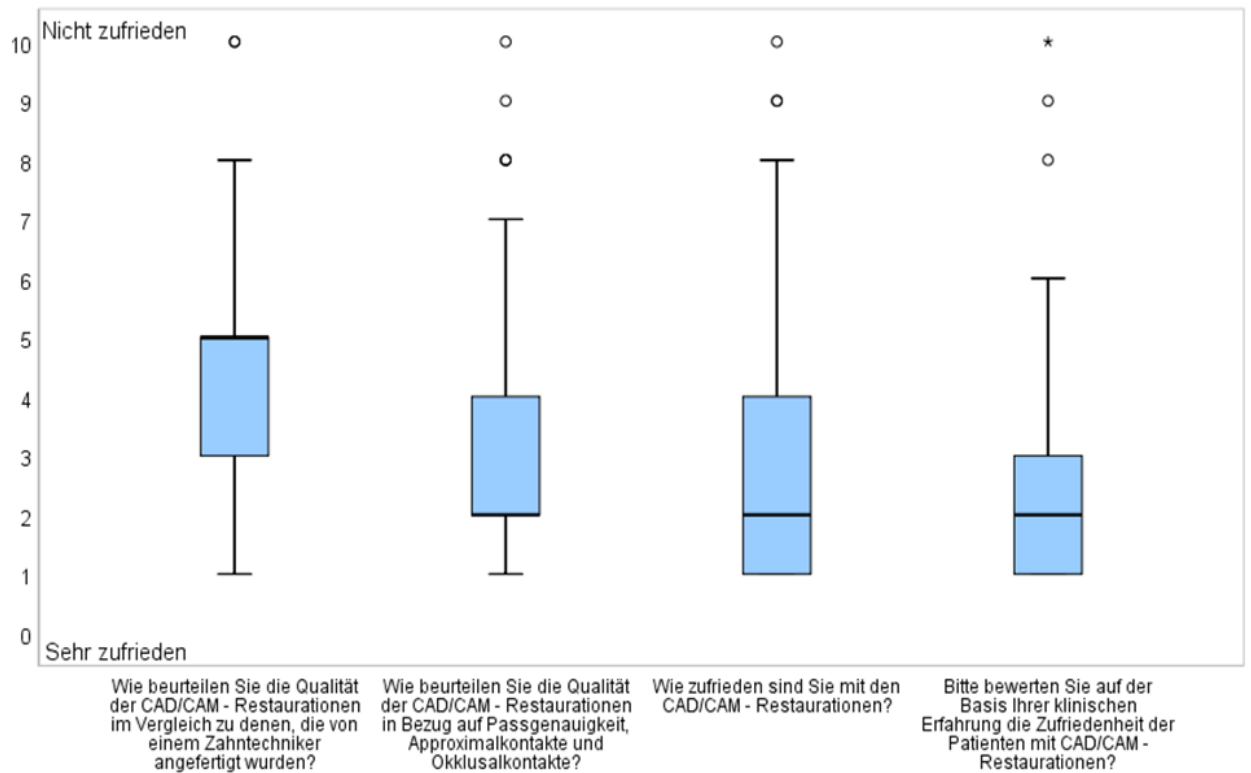


Abbildung 8: Zufriedenheit mit den CAD/CAM-Restaurationen

Um die Gesamtzufriedenheit mit den CAD/CAM-Restaurationen zu erfassen, wurden die Teilnehmer/Teilnehmerinnen aufgefordert, diese auf einer Skala von 1 (*sehr zufrieden*) bis 10 (*überhaupt nicht zufrieden*) zu bewerten. Die Beurteilung der Qualität und Passgenauigkeit des computergestützt hergestellten Zahnersatzes sowie der Behandler- und Patientenzufriedenheit basierte auf vier Fragen. Die erfassten Daten wurden zugunsten der Übersichtlichkeit als Boxplots visualisiert, die in Abbildung 8 dargestellt sind:

Tabelle 1: Mittelwertstabelle

	N	Min	Max	Median	Mittelw.	Stabw.
Wie beurteilen Sie die Qualität der CAD/CAM-Restaurationen im Vergleich zu denen, die von einem/einer Zahntechniker/Zahntechnikerin angefertigt wurden?	70	1	10	5	4,49	1,96
Wie beurteilen Sie die Qualität der CAD/CAM-Restaurationen in Bezug auf Passgenauigkeit, Approximalkontakte und Okklusalkontakte?	70	1	10	2	3,21	2,28
Wie zufrieden sind Sie mit den CAD/CAM-Restaurationen?	70	1	10	2	2,90	2,12
Bitte bewerten Sie auf der Basis Ihrer klinischen Erfahrung die Zufriedenheit der Patienten/Patientinnen mit CAD/CAM-Restaurationen?	69	1	10	2	2,30	1,93

Beim Vergleich der Qualität von CAD/CAM-Restaurationen mit von einem Zahntechniker/Zahntechnikerin angefertigten Restaurationen betrug der Mittelwert der Bewertungen 4,49 (SD +/- 1,96). Der Median lag bei 5. In Bezug auf Faktoren wie Passgenauigkeit sowie Okklusal- und Approximalkontakte wurde ein Mittelwert von 3,21 (SD +/- 2,28) erfasst. Der Medianwert lag bei 2. Im Hinblick auf die Behandler- und Patientenzufriedenheit mit dem digital angefertigten Zahnersatz wurde mit den dazugehörigen Durchschnittswerten von 2,90 (SD +/- 2,12) und 2,30 (SD +/- 1,93) eine positive Einstellung gegenüber CAD/CAM-Restaurationen festgestellt. Der Median lag in beiden Fällen bei 2. Die vorgestellten Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Nahezu alle Anwender/Anwenderinnen 96,2 % (n = 75) würden CAD/CAM einem/einer Freund/Freundin oder Kollegen/Kollegin empfehlen. Insgesamt 62,0 % (n = 49) der befragten Nutzer/Nutzerinnen erachten die Digitalisierung des Arbeitsablaufs als Möglichkeit der Zeitersparnis in einer Ordination. Zugleich sind 72,7 % (n = 56) davon überzeugt, dass CAD/CAM zu einem erhöhten Patientenaufkommen führen kann. Die Mehrheit der Befragten 65,8 % (n = 52) vertritt die Ansicht, dass die Anwendung der CAD/CAM-Technologie eine Erhöhung des Einkommens bewirken könnte. Auf die Frage, welche Herstellungsmethode Anwender/Anwenderinnen für prothetische Restaurationen präferieren, wurde der digitale Arbeitsablauf mit 73,0 % (n = 54) dem konventionellen vorgezogen.

3.3 Antworten der Nichtanwender/Nichtanwenderinnen

Die Nichtanwender/Nichtanwenderinnen wurden anhand folgender Frage identifiziert: *Warum verwenden Sie die CAD/CAM-Technologie nicht?* Diese Gruppe stellte 30,4 % (n = 35) aller befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen dar.

Bei den Personen, die kein CAD/CAM in ihrem Arbeitsablauf verwenden, waren die hohen Anschaffungskosten eines Geräts (54,3 %; n = 19) sowie der vermeintliche Mangel an Vorteilen im Vergleich zu konventionellen Herstellungsverfahren (31,4 %; n = 11) die am häufigsten genannten Gründe für die Nichtnutzung. An der Umfrage teilnehmende Zahnärzte/Zahnärztinnen, die zu einem früheren Zeitpunkt die CAD/CAM-Technologie genutzt hatten, sie mittlerweile jedoch nicht mehr verwenden, nannten die hohe Kosten (17,1 %; n = 6), die mangelnde Vorteile gegenüber herkömmliche Herstellungsmethoden (14,3 %; n = 5) sowie eine nicht zufriedenstellende Qualität der Restaurationen (11,4 %; n = 4) als häufigste Gründe für das Aufgeben von CAD/CAM. Die Gründe für den Nichterwerb eines CAD/CAM-Geräts sind in Abbildung 9 dargestellt:

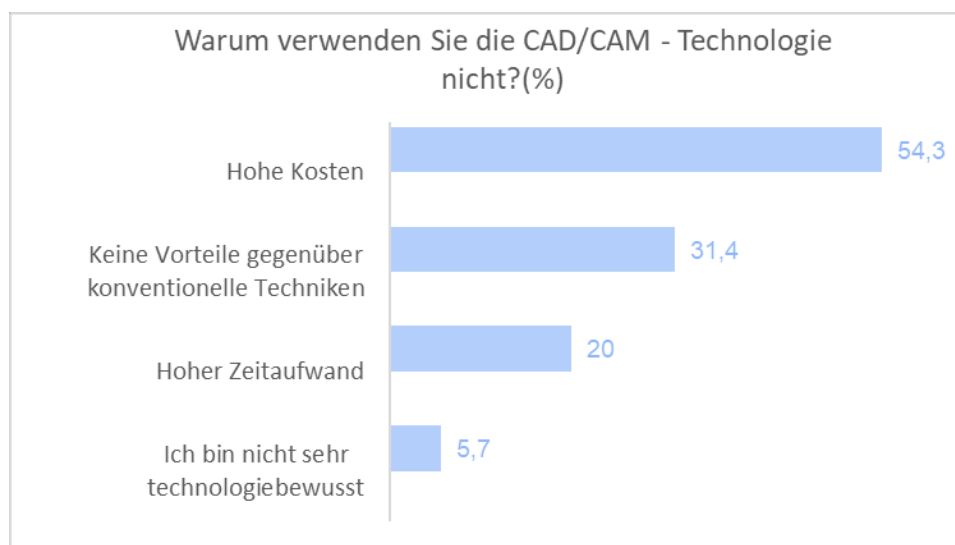


Abbildung 9: Häufigste Gründe für die Nichtnutzung der CAD/CAM-Technologie

3.4 Statistische Zusammenhänge

Der Chi-Quadrat-Statistik zufolge nutzt ein deutlich höherer Anteil an Oralchirurgen/Oralchirurginnen den digitalen Workflow im Vergleich zu Allgemein Zahnmediziner/Allgemein Zahnmedizinerinnen (p = 0,030). Ein statistisch

signifikanter Zusammenhang zwischen dem Jahr des Studienabschlusses und der Nutzung von CAD/CAM konnte nicht ermittelt werden ($p = 0,288$). Allerdings waren die CAD/CAM- Anwender/Anwenderinnen jünger als die Nichtanwender/Nichtanwenderinnen. Außerdem wurde eine Korrelation zwischen dem Land des Studienabschlusses und der CAD/CAM-Nutzung festgestellt. Anhand des exakten Tests von Fisher ist ersichtlich geworden, dass ungarische Zahnärzte/Zahnärztinnen CAD/CAM mit einer höheren Wahrscheinlichkeit nutzen als Kollegen/Kolleginnen, die ihr Studium in Österreich absolvierten ($p = 0,033$). Es wurde kein signifikanter Zusammenhang zwischen der abgeschlossenen CAD/CAM-Schulung und der klinischen Erfahrung eines/einer Zahnarztes/Zahnärztin festgestellt ($p = 0,981$). Die vorgestellten sowie weitere statistische Korrelationen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Tabelle mit statistischen Zusammenhängen

	n (%)		p-Wert
CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen	Training 43 (57,3)	Kein Training 32 (42,7)	0,102
Abschluss vor 2010	Anwender/Anwenderinnen 35 (61,4)	Nichtanwender/Nichtanwenderinnen 39 (71,9)	
Abschluss nach 2010	22 (38,6)	16 (29,1)	0,288
Abschluss vor 2010	Training 26 (61,9)	Kein Training 23 (62,2)	
Abschluss nach 2010	16 (38,1)	14 (37,8)	0,981
Chairside-Gerät	Allgemeinzahnärzte/Allgemeinzahnärztinnen 16 (44,4)	Spezialisten/Spezialistinnen 18 (40,9)	
Kein Chairside Gerät	20 (55,6)	26 (59,1)	0,463
CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen	Österreich 52 (63,4)	Ungarn 8 (100)	
Nichtanwender/Nichtanwenderinnen	30 (36,6)	0 (0)	0,033
Oralchirurgen/Oralchirurginnen	Anwender/Anwenderinnen 17 (32,7)	Nichtanwender/Nichtanwenderinnen 3 (10,7)	
Allgemeinzahnmediziner/Allgemeinzahnmedizinerinnen	35 (67,3)	25 (89,3)	0,03
Allgemeinzahnmediziner/Allgemeinzahnmedizinerinnen	Intraoralscanner 11 (31,4)	Andere Aspekte 24 (68,6)	
Kieferorthopäden/Kieferorthopädinnen	10 (90,9)	1 (9,1)	0,001

4 Diskussion

4.1 Studiendesign

Trotz der zunehmenden Bedeutung der CAD/CAM-Technologie in der modernen Zahnmedizin gibt es bis zum heutigen Zeitpunkt keine verfügbaren Studien über deren aktuelle Verbreitung in österreichischen Zahnarztpraxen sowie die Einstellung der Zahnärzte/Zahnärztinnen hinsichtlich dieser innovativen Technologie. Das Ziel der vorliegenden Studie war es daher, einen Überblick über die gegenwärtige Anwendung von CAD/CAM in den österreichischen Zahnarztpraxen zu schaffen und die Behandler-/Behandlerin- bzw. Patientenzufriedenheit mit den digital gefertigten Restaurationen zu ermitteln.

Umfragen sind eine bedeutsame Informationsquelle für jedes Untersuchungsprojekt. Es wird davon ausgegangen, dass die Validität und Zuverlässigkeit der Daten sowie deren Interpretation durch die Anwendung verschiedener Verfahren zur Datenerhebung sowie die Generierung von Informationen aus unterschiedlichen Quellen verbessert werden können (Zohrabi 2013). Um ein möglichst breites Spektrum an Teilnehmern/Teilnehmerinnen zu erreichen, wurde die vorliegende CAD/CAM-Umfrage per E-Mail verschickt und auf Instagram gepostet. Dennoch war die Rücklaufquote dieser Pilotstudie mit 10 % niedriger im Vergleich zu in anderen Staaten veröffentlichten Umfragen (Nassani et al. 2021; Tran et al. 2016). Die Gründe dafür können vielfältig sein. Einerseits kann dies im mangelnden Interesse im Hinblick auf die Teilnahme an der Online-Umfrage begründet liegen, andererseits aber auch in unbenutzten oder veralteten E-Mail-Adressen. Zwar bestehen verschiedene Möglichkeiten, die Antwortquote zu verbessern, jedoch ist unklar, inwieweit dies tatsächlich sinnvoll gewesen wäre. Dazu gehören beispielsweise Anreize oder Verlosungen für die Befragten, das mehrfache Versenden von Erinnerungs-E-Mails und die Verlängerung der Umfragedauer. Obwohl die Rücklaufquote nicht hoch war, sind aufgrund der Anzahl der Antworten und der Tatsache, dass es sich um die erste Umfrage dieser Art in Österreich handelt, aussagekräftige Schlussfolgerungen möglich, wobei die Aussagekräftigkeit ausschließlich auf die österreichische Zahnärztespopulation beschränkt ist.

4.2 Demografische Daten

Die Mehrheit der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen (72,6 %; n = 82) absolvierte ihr Zahnmedizinstudium an österreichischen Universitäten. Von den Teilnehmern/Teilnehmerinnen studierten 8 % (n = 9) in Deutschland und 7,1 % (n = 8) in Ungarn. Interessanterweise hat der exakte Test nach Fisher ergeben, dass ungarische Zahnärzte/Zahnärztinnen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit CAD/CAM verwenden als Kollegen/Kolleginnen, die ihre zahnärztliche Ausbildung in Österreich abschlossen ($p = 0,033$). Obwohl dieser Signifikanztest auch bei kleineren Stichproben verlässliche Werte liefert, sind weitere Studien mit größeren Stichproben erforderlich, um die Korrektheit dieser Aussage zu überprüfen. Im Rahmen einer multizentrischen Studie wäre es möglich, die Ergebnisse dieser Online-Umfrage mit ähnlichen Pilotstudien aus benachbarten Ländern wie Ungarn oder umfassend digitalisierten Staaten wie Japan zu vergleichen, was weitere Schlussfolgerungen hinsichtlich der gegenwärtigen CAD/CAM-Nutzung in Österreich erlauben würde.

Der Mittelwert der klinischen Erfahrung der Teilnehmer/Teilnehmerinnen lag bei 18,8 (SD +/- 11,5). Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Mehrheit der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen bis zu einem bestimmten Grad um erfahrene Individuen handelte. Obwohl mit dem Chi²-Test keine statistische Signifikanz zwischen CAD/CAM-Anwendung und klinischer Erfahrung nachgewiesen werden konnte ($p = 0,288$), waren die CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen etwas jünger als die Nichtanwender/Nichtanwenderinnen, was möglicherweise auf die höhere Technikaffinität der neueren Zahnärztegeneration zurückzuführen ist.

Annähernd die Hälfte der teilnehmenden Zahnärzten (51,8 %; n = 59) verfügt an ihrem derzeitigen Arbeitsplatz über ein CAD/CAM-Gerät. Erstaunlicherweise war die Mehrheit 58,7 % (n = 44) der Befragten, die nicht im Besitz eines CAD/CAM-Gerät sind, nicht an einem Erwerb in der Zukunft interessiert. Dafür können verschiedene Gründe vorliegen wie eine mangelnde Überzeugung im Hinblick auf die Qualität und Vorteile digital gefertigter Restaurationen im Vergleich zu herkömmlichen Herstellungsmethoden oder die hohen Anschaffungskosten für ein Gerät.

4.3 Antworten der CAD/CAM-Anwender/Anwenderinnen

Die meisten Anwender/Anwenderinnen (84,4 %; n = 65) haben die CAD/CAM-

Technologie im Verlauf der letzten zehn Jahren in ihre Arbeitsabläufe integriert. Diese Tatsache kann mit der rasanten Entwicklung der digitalen Zahnmedizin in den letzten Jahren zusammenhängen (Baroudi/Ibraheem 2015). Eine kanadische Forschungsgruppe stellte im Jahr 2014 fest, dass der dentale CAD/CAM-Markt trotz der Wirtschaftskrise ein erhebliches Wirtschaftswachstum verzeichnet (The Global Dental CAD/CAM-System Market Will See Strong Growth to Reach a Value of Over \$ 760 Million in 2022; 2014). Als Ursache nannte die Gruppe das zunehmende Interesse an der digitalen Zahnheilkunde. Aufgrund des technologischen Fortschritts ist zudem eine Vergrößerung des Anwendungsspektrums von CAD/CAM im dentalen Bereich möglich. Dies ist unter anderem auf die erleichterte Handhabung, die geringeren Anschaffungskosten und die Qualitätssteigerung digital gefertigter Objekte zurückzuführen.

Der am häufigsten angewandte Aspekt des digitalen Arbeitsablauf in dieser Pilotstudie war der Intraoralscan mit 78,8 % (n = 63). Von dem teilnehmenden Anwendern/Anwenderinnen sind 42,5 % (n = 34) im Besitz eines kompletten Chairside-Geräts. In einer britischen Umfrage aus dem Jahr 2016 konnte eine Korrelation zwischen dem Spezialisierungsgrad der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen und der Anwendung der CAD/CAM-Technologie festgestellt werden. Allgemein Zahnärzte/Allgemein Zahnärztinnen nutzen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ein komplettes Chairside-Gerät (Tran et al. 2016). Ein ähnlicher Zusammenhang ($p = 0,463$) konnte in der vorliegenden Online-Umfrage nicht ermittelt werden (siehe Tabelle 2). Die geringere Anzahl an Teilnehmern/Teilnehmerinnen in dieser Studie könnte einen möglichen Erklärungsansatz dafür darstellen.

In der vorliegenden Pilotstudie konnte eine positive Wahrnehmung der CAD/CAM-Technologie hinsichtlich der Qualität der digital gefertigten Restaurationen sowie der Behandler- und Patientenzufriedenheit beobachtet werden. Die erhobenen Daten wurden zugunsten der Übersicht mithilfe von Boxplots (siehe Abbildung 8) visualisiert.

Die Ergebnisse der Umfrage sind mit ähnlichen Studien, die in Saudi-Arabien und dem Vereinigten Königreich durchgeführt wurden, vergleichbar (Tran et al. 2016; Nassani et al. 2021). In diesen Publikationen konnte ebenfalls eine weitgehende Zufriedenheit und positive Einstellung gegenüber CAD/CAM ermittelt werden. Im Vergleich zur britischen Studie, in der die Mehrheit der Befragten Nichtanwender/Nichtanwenderinnen der CAD/CAM-Technologie waren, wurden in der vorliegenden Untersuchung 69,6 % (n = 80) der Probanden/Probandinnen als Anwender/Anwenderinnen identifiziert (Tran et al. 2016).

Basierend auf den im Rahmen der vorliegenden Umfrage erhobenen Daten kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit behauptet werden, dass die CAD/CAM-Technologie mittlerweile zu einem festen Bestandteil in vielen österreichischen Zahnarztpraxen geworden ist.

Die zunehmende Tendenz in Richtung Digitalisierung der Arbeitsabläufe in der Zahnmedizin kann nicht nur in Österreich, sondern vielmehr global beobachtet werden. Dies ist unter anderem auf das größer werdende Interesse an CAD/CAM und den fortwährenden Fortschritt der digitalen Technologien zurückzuführen. Daher sollte die Implementierung von CAD/CAM im Curriculum des Zahnmedizinstudiums vorangetrieben werden. Die Einführung digitaler Technologien in zahnmedizinische Lehrpläne weltweit hat bereits begonnen und je nach lokalen Ressourcen und Anforderungen einen unterschiedlichen Grad an Durchdringung erreicht (Fernandez et al. 2015). Eine der größten Herausforderungen im Rahmen der digitalen Ausbildung ist die Notwendigkeit, sich kontinuierlich an die technologischen Entwicklungen anzupassen und diese im klinischen Alltag anzuwenden.

4.4 Antworten der Nichtanwender/Nichtanwenderinnen

Erwartungsgemäß waren die hohen Anschaffungskosten für ein CAD/CAM-Gerät (54,3 %; n = 19) sowie der wahrgenommene Mangel an Vorteilen gegenüber konventionellen Herstellungsmethoden (31,4 %; n = 11) die häufigsten Gründe für den Nichterwerb eines CAD/CAM-Geräts. Auch in der wissenschaftlichen Literatur besteht bislang Einigkeit darüber, der digitale Arbeitsablauf und die konventionelle Prozesskette zur Herstellung zahnärztlicher Restaurationen im Hinblick auf die Qualität ebenbürtig sind (Kapos/Evans 2014; Güth et al. 2012), mit Ausnahme einer möglichen Zeit- und Kostenreduktion (Joda/Brägger 2014).

Im Rahmen ihrer Studie stellten Tran et al. (2016) eine Korrelation zwischen dem Tätigkeitsschwerpunkt der teilnehmenden Zahnärzte/Zahnärztinnen und der mangelnden Anwendung der CAD/CAM-Technologie fest. Die Allgemeinzahnärzte/Allgemeinzahnärztinnen gaben im Vergleich zu Behandlern mit einer postgraduellen Ausbildung häufiger die hohen Kosten für den Kauf eines CAD/CAM-Systems als Grund für die Nichtanwendung an (Tran et al. 2016). In der vorliegenden Studie konnte mit dem Chi²-Test kein signifikanter Zusammenhang zwischen diesen

beiden Variablen ($p = 0,654$) ermittelt werden. Es hatten allerdings nur wenige spezialisierte Nichtanwender/Nichtanwenderinnen an der Umfrage teilgenommen. Einige der befragten Zahnärzten/Zahnärztinnen gaben an, dass geschichtete Keramiken im Hinblick auf die Ästhetik besser seien.

4.5 Limitationen der Studie

Aufgrund der geringen TeilnehmerInnenzahl und der niedrigen Rücklaufquote von 10 % ist die Aussagekraft der vorliegenden Pilotstudie limitiert. Außerdem gilt es zu berücksichtigen, dass die Mehrheit der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen in dieser Online-Umfrage als Anwender/Anwenderinnen der CAD/CAM-Technologie identifiziert wurde oder bereits Erfahrungen mit CAD/CAM gemacht hat. Daher ist es möglich, dass im Rahmen dieser Studie ein Teil der österreichischen Zahnärzte/Zahnärztinnen vernachlässigt wurde, insbesondere Nichtanwender/Nichtanwenderinnen, die noch keine Erfahrungen mit CAD/CAM aufweisen.

5 Konklusion

Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Pilotstudie sind ein hohes Maß an Zufriedenheit sowie eine positive Einstellung der befragten Zahnärzte/Zahnärztinnen im Hinblick auf den Einsatz der CAD/CAM-Technologie im dentalen Bereich ersichtlich geworden. Die CAD/CAM-Technologie ist mittlerweile in den Arbeitsabläufen vieler österreichischer Zahnarztpraxen etabliert und es scheint, dass sie zukünftig in einem noch höheren Ausmaß eingesetzt werden wird. Dies ist unter anderem auf den technologischen Fortschritt von CAD/CAM sowie das zunehmende Interesse an der digitalen Zahnmedizin zurückzuführen.

Der Digitalisierungstrend sollte in der Curriculum-Gestaltung des Zahnmedizinstudiums berücksichtigt werden, um angehende Zahnärzte/Zahnärztinnen auf ihren beruflichen Alltag vorzubereiten. Des Weiteren besteht die Notwendigkeit, allgemein akzeptierte digitale Ausbildungsstandards zwischen den verschiedenen zahnmedizinischen Universitäten zu etablieren.

Die Aussagekraft der vorliegenden Pilotstudie ist jedoch aufgrund der niedrigen Rücklaufquote von 10 % sowie der geringen TeilnehmerInnenzahl ($n = 115$) limitiert. Die

Herausforderung, im Rahmen einer Online-Umfrage eine akzeptable Stichprobengröße zu erreichen, konnte aufgezeigt werden. Die Unzulänglichkeiten dieser Datensammlungsmethode wurden erkannt. Um die dargelegten Probleme zu überwinden, sollten Konzepte zur Optimierung der Studienergebnisse entwickelt sowie diskutiert werden.

Darüber hinaus sind im Rahmen der zukünftigen multizentrischen Studie weitere Pilotstudien aus benachbarten Ländern wie Ungarn und umfassend digitalisierten Länder wie Japan erforderlich, um die wissenschaftliche Aussagekraft zu erhöhen.

Außerdem gilt es zu bedenken, dass die Studienpopulation bei der vorliegenden Online-Umfrage vermutlich aus Zahnärzten bestand, die bereits Erfahrungen mit CAD/CAM aufwiesen, wodurch die Ergebnisse beeinflusst worden sein könnten.

Literaturverzeichnis

Ahmed, Khaled E (2018): We're Going Digital: The Current State of CAD/CAM Dentistry in Prosthodontics, in: *Primary Dental Journal*, SAGE Publications, Bd. 7, Nr. 2, S. 30–35, [online] doi:10.1177/205016841800700205.

Alghazzawi, Tariq F. (2016): Advancements in CAD/CAM-Technology: Options for practical implementation, in: *Journal of Prosthodontic Research*, Japan Prosthodontic Society, Bd. 60, Nr. 2, S. 72–84, [online] doi:10.1016/j.jpor.2016.01.003.

Anadioti, Eva/Leen Musharbash/Markus B. Blatz/George Papavasiliou/Phophi Kamposiora (2020): 3D printed complete removable dental prostheses: a narrative review, in: *BMC Oral Health*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 20, Nr. 1, [online] doi:10.1186/s12903-020-01328-8.

Att, Wael/Siegbert Witkowski/Jörg Strub (2019): *Digital Workflow in Reconstructive Dentistry*, 1st Edition, Quintessence Publishing.

Baroudi, K/SN Ibraheem (2015): Assessment of Chair-side Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing Restorations: A Review of the Literature, in: *Journal of international oral health*, Bd. 7, Nr. 4, S. 96–104, [online] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25954082/>.

Barreto, Felipe Augusto M./João Roberto R. da Costa Santos (2018): Virtual orthodontic setup in orthodontic camouflage planning for skeletal Class III malocclusion, in: *Dental Press Journal of Orthodontics*, FapUNIFESP (SciELO), Bd. 23, Nr. 2, S. 75–86, [online] doi:10.1590/2177-6709.23.2.075-086.bbo.

Biogenerik - Enzyklopädie Marjorie-Wiki (o. D.): [online] <https://marjorie-wiki.de/wiki/Biogenerik> [abgerufen am 25.09.2022].

Blatz, Markus B./Julian Conejo (2019): The Current State of Chairside Digital Dentistry and Materials, in: *Dental Clinics of North America*, Elsevier BV, Bd. 63, Nr. 2, S. 175–197, [online] doi:10.1016/j.cden.2018.11.002.

Bosch, Gabriel/Andreas Ender/Albert Mehl (2014): A 3-dimensional accuracy analysis of chairside CAD/CAM milling processes, in: *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Elsevier BV, Bd. 112, Nr. 6, S. 1425–1431, [online] doi:10.1016/j.prosdent.2014.05.012.

Buser, R./P. Müller/B. Stawarczyk (2020): Computergestützte Herstellung von Totalprothesen, in: *wissen kompakt*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 14, Nr. 4, S. 129–138, [online] doi:10.1007/s11838-020-00119-9.

Christensen, Gordon J. (2009): Impressions Are Changing, in: *The Journal of the American Dental Association*, Elsevier BV, Bd. 140, Nr. 10, S. 1301–1304, [online] doi:10.14219/jada.archive.2009.0054.

Ciuffolo, Fabio/Ettore Epifania/Gianni Duranti/Valentina De Luca/Daniele Raviglia/Silvia Rezza/Felice Festa (2006): Rapid prototyping: A new method of preparing trays for indirect bonding, in: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, Elsevier BV, Bd. 129, Nr. 1, S. 75–77, [online] doi:10.1016/j.ajodo.2005.10.005.

Co. Kg, Spitta Verlag GmbH (o. D.): Der digitale Ablauf bei der Herstellung von Alignern | Kollegentipp | ZTM-aktuell.de, ZTM-Aktuell, [online] https://www.ztm-aktuell.de/kollegentipp/funktion/story/der-digitale-ablauf-bei-der-herstellung-von-alignern__2545.html [abgerufen am 26.09.2022].

Davidowitz, Gary/Philip G. Kotick (2011): The Use of CAD/CAM in Dentistry, in: *Dental Clinics of North America*, Elsevier BV, Bd. 55, Nr. 3, S. 559–570, [online] doi:10.1016/j.cden.2011.02.011.

Dawood, A./B. Marti Marti/V. Sauret-Jackson/A. Darwood (2015): 3D printing in dentistry, in: *British Dental Journal*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 219, Nr. 11, S. 521–529, [online] doi:10.1038/sj.bdj.2015.914.

Dawood, A/S Purkayastha/S Patel/F MacKillop/S Tanner (2010): Microtechnologies in implant and restorative dentistry: A stroll through a digital dental landscape, in: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, SAGE Publications, Bd. 224, Nr. 6, S. 789–796, [online] doi:10.1243/09544119jeim660.

Duret, F/JD Preston (1991): CAD/CAM imaging in dentistry, in: *Current opinion in dentistry*, Bd. 1, Nr. 2, S. 150–154, [online] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1777659/>.

Edelmann, Alexander/Jeryl D. English/Stephen J. Chen/F. Kurtis Kasper (2020): Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners, in: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, Elsevier BV, Bd. 158, Nr. 5, S. e91–e98, [online] doi:10.1016/j.ajodo.2020.07.029.

Fernandez, Monica A./Arthur Nimmo/Linda S. Behar-Horenstein (2015): Digital Denture Fabrication in Pre- and Postdoctoral Education: A Survey of U.S. Dental Schools, in: *Journal of Prosthodontics*, Wiley, Bd. 25, Nr. 1, S. 83–90, [online] doi:10.1111/jopr.12287.

Ferrini, Francesco/Gianpaolo Sannino/Carlo Chiola/Paolo Capparé/Giorgio Gastaldi/Enrico Gherlone (2019): Influence of Intra-Oral Scanner (I.O.S.) on The Marginal Accuracy of CAD/CAM Single Crowns, in: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, MDPI AG, Bd. 16, Nr. 4, S. 544, [online] doi:10.3390/ijerph16040544.

Graf, Simon/Marie A. Cornelis/Gustavo Hauber Gameiro/Paolo M. Cattaneo (2017): Computer-aided design and manufacture of hyrax devices: Can we really go digital?, in: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, Elsevier BV, Bd. 152, Nr. 6, S. 870–874, [online] doi:10.1016/j.ajodo.2017.06.016.

Graf, Simon/Nour E. Tarraf/Neal D. Kravitz (2021): Three-dimensional metal printed orthodontic laboratory appliances, in: *Seminars in Orthodontics*, Elsevier BV, Bd. 27, Nr. 3, S. 189–193, [online] doi:10.1053/j.sodo.2021.09.005.

Güth, Jan-Frederik/Christine Keul/Michael Stimmelmayer/Florian Beuer/Daniel Edelhoff (2012): Accuracy of digital models obtained by direct and indirect data capturing, in: *Clinical Oral Investigations*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 17, Nr. 4, S. 1201–1208, [online] doi:10.1007/s00784-012-0795-0.

Hegedus, Tamas/Patrik Kreuter/Aron Attila Kismarci-Antalffy/Tamas Demeter/Dorottya Banyai/Adam Vegh/Zoltan Geczi/Peter Hermann/Michael Payer/Akos Zsembery/Ahmad Al-Hassiny/Khaled Mukaddam/Valentin Herber/Norbert Jakse/Daniel Vegh (2022): User Experience and Sustainability of 3D Printing in Dentistry, in: *International Journal of*

Environmental Research and Public Health, MDPI AG, Bd. 19, Nr. 4, S. 1921, [online] doi:10.3390/ijerph19041921.

Imburgia, Mario/Silvia Logozzo/Uli Hauschild/Giovanni Veronesi/Carlo Mangano/Francesco Guido Mangano (2017): Accuracy of four intraoral scanners in oral implantology: a comparative in vitro study, in: *BMC Oral Health*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 17, Nr. 1, [online] doi:10.1186/s12903-017-0383-4.

Jindal, Prashant/Mamta Juneja/Francesco Luke Siena/Divya Bajaj/Philip Breedon (2019): Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners, in: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, Elsevier BV, Bd. 156, Nr. 5, S. 694–701, [online] doi:10.1016/j.ajodo.2019.05.012.

Joda, Tim/Urs Brägger (2014): Digital vs. conventional implant prosthetic workflows: a cost/time analysis, in: *Clinical Oral Implants Research*, Wiley, Bd. 26, Nr. 12, S. 1430–1435, [online] doi:10.1111/clr.12476.

Joda, Tim/Marco Ferrari/German O. Gallucci/Julia-Gabriela Wittneben/Urs Brägger (2016): Digital technology in fixed implant prosthodontics, in: *Periodontology 2000*, Wiley, Bd. 73, Nr. 1, S. 178–192, [online] doi:10.1111/prd.12164.

Joda, Tim/Fernando Zarone/Marco Ferrari (2017a): The complete digital workflow in fixed prosthodontics: a systematic review, in: *BMC Oral Health*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 17, Nr. 1, [online] doi:10.1186/s12903-017-0415-0.

Joda, Tim/Fernando Zarone/Marco Ferrari (2017b): The complete digital workflow in fixed prosthodontics: a systematic review, in: *BMC Oral Health*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 17, Nr. 1, [online] doi:10.1186/s12903-017-0415-0.

Joda, Tim/Fernando Zarone/Marco Ferrari (2017c): The complete digital workflow in fixed prosthodontics: a systematic review, in: *BMC Oral Health*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 17, Nr. 1, [online] doi:10.1186/s12903-017-0415-0.

Kapos, Theodoros/Christopher Evans (2014): CAD/CAM-Technology for Implant Abutments, Crowns, and Superstructures, in: *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, Quintessence Publishing, Bd. 29, Nr. Supplement, S. 117–136, [online] doi:10.11607/jomi.2014suppl.g2.3.

Lebon, N/L Tapie/F Duret/JP Attal (2015): Understanding dental CAD/CAM for restorations - dental milling machines from a mechanical engineering viewpoint. Part A: Chairside milling machines, in: *International journal of computerized dentistry*, Bd. 19, Nr. 1, [online] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27027102/>.

Magne, Pascal/Luís Henrique Schlichting/Hamilton Pires Maia/Luiz Narciso Baratieri (2010): In vitro fatigue resistance of CAD/CAM composite resin and ceramic posterior occlusal veneers, in: *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Elsevier BV, Bd. 104, Nr. 3, S. 149–157, [online] doi:10.1016/s0022-3913(10)60111-4.

Melchels, Ferry P.W./Jan Feijen/Dirk W. Grijpma (2010): A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, in: *Biomaterials*, Elsevier BV, Bd. 31, Nr. 24, S. 6121–6130, [online] doi:10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.

Miyazaki, T/Y Hotta (2011a): CAD/CAM-Systems available for the fabrication of crown and bridge restorations, in: *Australian Dental Journal*, Wiley, Bd. 56, S. 97–106, [online] doi:10.1111/j.1834-7819.2010.01300.x.

Miyazaki, T/Y Hotta (2011b): CAD/CAM-Systems available for the fabrication of crown and bridge restorations, in: *Australian Dental Journal*, Wiley, Bd. 56, S. 97–106, [online] doi:10.1111/j.1834-7819.2010.01300.x.

Mörmann, WH/M Brandestini/F Lutz (1987): The Cerec system: computer-assisted preparation of direct ceramic inlays in 1 setting, in: *Die Quintessenz*, Bd. 38, Nr. 3, S. 457–470, [online] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3474683/>.

Nassani, Mohammad Zakaria/Shukran Ibraheem/Enass Shamsy/Mahmoud Darwish/Asmaa Faden/Omar Kujan (2021): A Survey of Dentists' Perception of Chair-Side CAD/CAM-Technology, in: *Healthcare*, MDPI AG, Bd. 9, Nr. 1, S. 68, [online] doi:10.3390/healthcare9010068.

Negm, Enas Elhamy/Faten Ahmed Aboutaleb/Ahmed M. Alam-Eldein (2019): Virtual Evaluation of the Accuracy of Fit and Trueness in Maxillary Poly(etheretherketone) Removable Partial Denture Frameworks Fabricated by Direct and Indirect CAD/CAM-Techniques, in: *Journal of Prosthodontics*, Wiley, Bd. 28, Nr. 7, S. 804–810, [online] doi:10.1111/jopr.13075.

van Noort, Richard (2012): The future of dental devices is digital, in: *Dental Materials*, Elsevier BV, Bd. 28, Nr. 1, S. 3–12, [online] doi:10.1016/j.dental.2011.10.014.

Ono, Ichiro/Keita Abe/Shingo Shiotani/Yasuhiko Hirayama (2000): Producing a Full-Scale Model From Computed Tomographic Data with the Rapid Prototyping Technique Using the Binder Jet Method, in: *Journal of Craniofacial Surgery*, Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health), Bd. 11, Nr. 6, S. 527–537, [online] doi:10.1097/00001665-200011060-00004.

Park, Jae Hyun/Gye-Hyeong Lee/Da-Nal Moon/Kyungmin Clara Lee (2021): A completely digital indirect bonding technique using a customized virtual orthodontic bracket setup and 3-dimensional printing technology, in: *AJO-DO Clinical Companion*, Elsevier BV, Bd. 1, Nr. 3, S. 198–206, [online] doi:10.1016/j.xaor.2021.05.003.

Patzelt, Sebastian B. M./Archontia Emmanouilidi/Susanne Stampf/Joerg R. Strub/Wael Att (2013): Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners, in: *Clinical Oral Investigations*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 18, Nr. 6, S. 1687–1694, [online] doi:10.1007/s00784-013-1132-y.

Pieger, S/A Salman/AS Bidra (2014): Clinical outcomes of lithium disilicate single crowns and partial fixed dental prostheses: a systematic review, in: *The journal of prosthetic dentistry*, Bd. 112, Nr. 1, S. 22–30, [online] doi:10.1016/j.prosdent.2014.01.005.

Reich, S./Regina Reich/Christina Alexa Kühne (2021): Intraoralscan für zahngetragene Restaurationen, in: *wissen kompakt*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 15, Nr. 4, S. 149–157, [online] doi:10.1007/s11838-021-00141-5.

Reiss, B (2006): Clinical results of Cerec inlays in a dental practice over a period of 18 years, in: *International journal of computerized dentistry*, Bd. 9, Nr. 1, [online] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16608051/>.

Rekow, E. Dianne (2020): Digital dentistry: The new state of the art — Is it disruptive or destructive?, in: *Dental Materials*, Elsevier BV, Bd. 36, Nr. 1, S. 9–24, [online] doi:10.1016/j.dental.2019.08.103.

Rosentritt, Martin/Nicoleta Ilie/Ulrich Lohbauer (2018): *Werkstoffkunde in der Zahnmedizin*, 1. Aufl., Thieme.

Schubert, O./J. Schweiger/J. -F. Güth (2018a): Digitale Implantationsplanung und navigierte Implantation, in: *Der Freie Zahnarzt*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 62, Nr. 4, S. 76–84, [online] doi:10.1007/s12614-017-6779-3.

Schubert, O./J. Schweiger/J. -F. Güth (2018b): Digitale Implantationsplanung und navigierte Implantation, in: *Der Freie Zahnarzt*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 62, Nr. 4, S. 76–84, [online] doi:10.1007/s12614-017-6779-3.

Srinivasan, Murali/Porawit Kamnoedboon/Gerald McKenna/Lea Angst/Martin Schimmel/Mutlu Özcan/Frauke Müller (2021): CAD-CAM removable complete dentures: A systematic review and meta-analysis of trueness of fit, biocompatibility, mechanical properties, surface characteristics, color stability, time-cost analysis, clinical and patient-reported outcomes, in: *Journal of Dentistry*, Elsevier BV, Bd. 113, S. 103777, [online] doi:10.1016/j.jdent.2021.103777.

Sulaiman, Taiseer A. (2020): Materials in digital dentistry—A review, in: *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, Wiley, Bd. 32, Nr. 2, S. 171–181, [online] doi:10.1111/jerd.12566.

Tarraf, Nour Eldin/Darendeliler M. Ali (2018): Present and the future of digital orthodontics☆, in: *Seminars in Orthodontics*, Elsevier BV, Bd. 24, Nr. 4, S. 376–385, [online] doi:10.1053/j.sodo.2018.10.002.

Tartaglia, Gianluca M./Andrea Mapelli/Cinzia Maspero/Tommaso Santaniello/Marco Serafin/Marco Farronato/Alberto Caprioglio (2021): Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities, in: *Materials*, MDPI AG, Bd. 14, Nr. 7, S. 1799, [online] doi:10.3390/ma14071799.

teamwork media GmbH (2017): *CAD/CAM in der digitalen Zahnheilkunde*, 1. Aufl., Teamwork Media.

The Global Dental CAD/CAM-System Market Will See Strong Growth to Reach a Value of Over \$760 Million in 2022 (2014): in: <https://www.prnewswire.com/>, 24.06.2014, [online] <https://www.prnewswire.com/news-releases/the-global-dental-cadcam-system-market-will-see-strong-growth-to-reach-a-value-of-over-760-million-in-2022-264396261.html>.

Tinschert, Joachim/Gerd Natt (2007): *Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien: Atlas für Klinik, Labortechnik und Werkstoffkunde*, 1., Deutscher Ärzteverlag.

Tran, D./M. Nesbit/H. Petridis (2016): Survey of UK dentists regarding the use of CAD/CAM-Technology, in: *British Dental Journal*, Springer Science and Business Media LLC, Bd. 221, Nr. 10, S. 639–644, [online] doi:10.1038/sj.bdj.2016.862.

Uzun, G. (2008): An Overview of Dental CAD/CAM-Systems, in: *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, Informa UK Limited, Bd. 22, Nr. 1, S. 530–535, [online] doi:10.1080/13102818.2008.10817506.

Wikipedia-Autoren (2003): Stereolithografie, [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Stereolithografie> [abgerufen am 26.09.2022].

Williams, R.J./Richard Bibb/Dominic Eggbeer/John Collis (2006): Use of CAD/CAM-Technology to fabricate a removable partial denture framework, in: *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Elsevier BV, Bd. 96, Nr. 2, S. 96–99, [online] doi:10.1016/j.prosdent.2006.05.029.

Zohrabi, Mohammad (2013): Mixed Method Research: Instruments, Validity, Reliability and Reporting Findings, in: *Theory and Practice in Language Studies*, Academy Publication, Bd. 3, Nr. 2, [online] doi:10.4304/tpls.3.2.254-262.

Anhang

Fragebogen:

CAD/CAM Umfrage

Umfrage unter österreichischen Zahnärzten über den Einsatz der CAD/CAM-Technologie

Allgemeine Fragen

Wo haben Sie Ihr Zahnmedizinstudium abgeschlossen?

Auswählen

Wann haben Sie Ihr Zahnmedizinstudium abgeschlossen?

Auswählen

In welchem Gebiet der Zahnmedizin sind Sie spezialisiert?

- Allgemeinzahnmedizin
- Prothetik
- Orale Chirurgie
- Endodontie
- Kinderzahnheilkunde
- Parodontologie
- Orale Medizin
- Kieferorthopädie
- Sonstiges:

Haben Sie schon einmal ein CAD/CAM-System bedient?

- Ja
- Nein

Haben Sie ein CAD/CAM-Gerät an Ihrem derzeitigen Arbeitsplatz?

- Ja
- Nein

Wenn Sie über kein CAD/CAM Gerät verfügen, möchten Sie sich in der Zukunft eines akquirieren?

- Ja
- Nein

Fragen für CAD/CAM Anwender

Wie sind Sie auf die CAD/CAM Technologie zum ersten Mal aufmerksam geworden?

- Online
- bei einer Dentalmedizin - Messe
- in einem Dentallabor
- bei einem Kollegen

Abbildung 10: Fragebogen Teil 1

Seit wann arbeiten Sie mit CAD/CAM?

- 0 - 5 Jahre
- 6 - 10 Jahre
- 11 - 15 Jahre
- über 15 Jahre

Weshalb haben Sie sich für die Anschaffung eines CAD/CAM Geräts entschieden? (Zutreffendes bitte auswählen)

- Um die Herstellungskosten zu senken
- Um die Qualität zu verbessern
- Um die Produktivität zu steigern
- Um neue zahnmedizinische Materialien zu verwenden
- Um technologisch auf dem aktuellen Stand zu sein
- Um die Kommunikation mit dem Dentallabor zu verbessern
- Um sich besser zu vermarkten
- Sonstiges:

Haben Sie eine Ausbildung zur Anwendung von CAD/CAM absolviert?

- Ja
- Nein

Sind Sie der Meinung, dass Ihre CAD/CAM Ausbildung ausreichend war?

- Ja
- Nein

Welche Aspekte des digitalen Workflows werden von Ihnen verwendet? (Zutreffendes bitte auswählen)

- Chair side CAD/CAM Gerät
- Intraorale Scanner
- Eigenes CAD/CAM Labor in der Praxis
- CAD - Software für prothetische Arbeiten in der Praxis
- CAD - Software für Implantatplanung
- Keramik - Brennofen in der Praxis
- Sinter - Ofen in der Praxis
- 3D - Drucker in der Praxis
- Scannen von Abdrücken und Modellen im Dentallabor
- CAD durch Dentallabor
- CAM durch Dentallabor

Haben Sie das Gefühl, dass die Verfügbarkeit von CAD/CAM Ihre klinischen Entscheidungen beeinflusst hat?

- Ja
- Nein

Abbildung 11: Fragebogen Teil 2

Welche CAD/CAM Materialien verwenden Sie? (Zutreffendes bitte auswählen)

- Resin, Nanokeramik (z.B. Lava Ultimate)
- Hybridkeramik (z.B. Vita ENAMIC)
- Zirkonverstärkte Glaskeramik (z.B. Celtra Duo)
- Leuzit-/Feldspat-Glaskeramiken (z.B. Vita MARK II)
- Lithium-Disilikat (z.B. IPS e.max)
- Zirkonoxid (z.B. CEREC Zirconia)
- Metalle (z.B. Colado CAD)
- Kunststoffe (z.B. Multilayer PMMA)
- 3D - Druck Materialien (Resins)
- Sonstiges:

Bitte geben Sie an, welche der folgenden Restaurationen Sie mit CAD/CAM schon einmal angefertigt haben?

- Kronen
- Brücken
- Veneers
- Inlays
- Onlays
- Implantat-Abutments
- Monolithische Implantatkronen

Haben Sie jemals CAD/CAM zur Anfertigung einer Bohrschablone im Rahmen einer Implantation angewendet?

Ja
 Nein

Wie beurteilen Sie die Qualität der CAD/CAM - Restaurationen im Vergleich zu denen, die von einem Zahntechniker angefertigt wurden?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Viel besser Viel schlechter

Wie beurteilen Sie die Qualität der CAD/CAM - Restaurationen in Bezug auf Passgenauigkeit, Approximalkontakte und Okklusalkontakte?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sehr gut Sehr schlecht

Wie zufrieden sind Sie mit den CAD/CAM - Restaurationen?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sehr zufrieden Nicht zufrieden

Abbildung 12: Fragebogen Teil 3

Bitte bewerten Sie auf der Basis Ihrer klinischen Erfahrung die Zufriedenheit der Patienten mit CAD/CAM - Restaurationen?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sehr zufrieden Nicht zufrieden

Würden Sie CAD/CAM einem Freund bzw. Kollegen empfehlen?

Ja
 Nein

Glauben Sie, dass CAD/CAM wichtig für die Zeitersparnis in der Zahnarztpraxis ist?

Ja
 Nein

Glauben Sie, dass CAD/CAM zu einem erhöhten Patientenaufkommen führen kann?

Ja
 Nein

Glauben Sie, dass CAD/CAM zu einer Erhöhung des Einkommens führen kann?

Ja
 Nein

Welche Methode würden Sie für die Herstellung prothetischer Restaurationen bevorzugen?

CAD/CAM
 Konventionelle Herstellungsmethoden

Fragen für Nicht-Anwender

Warum verwenden Sie die CAD/CAM - Technologie nicht?

- Hohe Kosten
- Keine Vorteile gegenüber konventionelle Techniken
- Ich bin nicht sehr technologiebewusst
- Hoher Zeitaufwand
- Sonstiges:

Aus welchem Grund haben Sie aufgehört CAD/CAM zu verwenden?

- Hohe Kosten
- Nicht zufriedenstellende Qualität der Restaurationen
- Schwierigkeiten bei der Anwendung
- keine Vorteile gegenüber konventionelle Techniken
- Hoher Zeitaufwand
- Sonstiges:

Link abrufen

Geben Sie niemals Passwörter über Google Formulare weiter.

Abbildung 13: Fragebogen Teil 4