

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
(Prof. Dr. med. dent. R. Bürgers)
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

**Klinische Nachuntersuchung von
implantatgestützten Einzelkronen mit
CAD/CAM gefertigten Abutments
– 5-Jahres-Ergebnisse**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
für Zahnheilkunde
der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Christoph Brack

aus

Oldenburg

Göttingen 2021

Dekan: Prof. Dr. med. W. Brück

Betreuungsausschuss

Betreuer/in: Apl. Prof. Dr. med. dent. S. Rinke

Ko-Betreuer/in: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Prüfungskommission

Referent/in: Apl. Prof. Dr. med. dent. S. Rinke

Ko-Referent/in: Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann

Drittreferent/in: Prof. Dr. mult. T. Meyer

Datum der mündlichen Prüfung: 09.08.2022

Hiermit erkläre ich, die Dissertation mit dem Titel "Klinische Nachuntersuchung von implantatgestützten Einzelkronen mit CAD/CAM gefertigten Abutments – 5-Jahres-Ergebnisse" eigenständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Göttingen, den

.....
(Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Implantate	4
1.2.1 Indikationen und Anwendungssicherheit	4
1.2.2 Implantatmaterialien und Implantatgestaltung.....	5
1.2.3 Biologische Komplikationen und Implantatfrakturen	7
1.3 Abutments.....	8
1.3.1 Abutmentformen	8
1.3.2 Gegenüberstellung von individuellen und konfektionierten Abutments.....	11
1.3.3 Verfahren zur Herstellung individueller Abutments	14
1.3.4 Materialien für die Herstellung individueller Abutments	16
1.3.5 Befestigung von Einzelkronen auf Abutments	18
1.4 Überlebens- und Komplikationsraten implantatgetragener Einzelzahnrestorationen.....	20
1.4.1 Überlebensraten dentaler Einzelzahnimplantate	20
1.4.2 Überlebensraten implantatgetragener Einzelzahnrestorationen aus Übersichtsarbeiten.....	22
1.4.3 Technische Komplikationen implantatgetragener Einzelzahnrestorationen aus Übersichtsarbeiten	24
1.5 Zielsetzung.....	28
2 Patienten, Material und Methoden	29
2.1 Studiendesign.....	29
2.2 Patienten.....	29
2.2.1 Einschlusskriterien.....	29
2.2.2 Ausschlusskriterien	30
2.3 Material	31
2.3.1 Implantat	31
2.3.2 Zirkonoxidkeramikabutments.....	32
2.3.3 Titanabutments	34
2.3.4 Abutmentdesign	35
2.3.5 Einzelkronen.....	36
2.4 Behandlungsverlauf	37
2.5 Zahnärztliche Nachuntersuchungen.....	39
2.6 Datenerfassung.....	41
2.7 Statistische Auswertung	42

3	Ergebnisse	45
3.1	Studienpopulation.....	45
3.2	Komplikationen und Verluste.....	48
3.3	Ereigniszeitanalyse mittels Kaplan-Meier-Methode	49
3.3.1	Geschätzte Überlebenswahrscheinlichkeiten	49
3.3.2	Geschätzte Erfolgswahrscheinlichkeiten	51
3.4	Risikoanalyse mittels Cox-Regression.....	54
4	Diskussion	55
4.1	Zusammenfassung der Kernaussagen	55
4.2	Vergleich der Studienergebnisse mit relevanter Literatur.....	56
4.2.1	Überlebensraten von Implantaten.....	56
4.2.2	Überlebensraten von Abutments	56
4.2.3	Überlebensraten von implantatgetragenen Einzelkronen	58
4.3	Technische Komplikationen und Verluste	59
4.3.1	Verblendkeramikfrakturen	59
4.3.2	Retentionsverluste von Einzelkronen.....	64
4.3.3	Abutmentfrakturen und Abutmentschraubenlockerungen.....	68
4.3.4	Approximalkontaktverlust.....	69
4.4	Risikofaktoren Implantatposition und Zahnform	70
4.5	Stärken und Limitationen der vorliegenden Studie	70
4.5.1	Stärken der vorliegenden Studie	70
4.5.2	Limitationen.....	71
4.6	Klinische Relevanz.....	72
5	Zusammenfassung	74
6	Literaturverzeichnis.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtübersicht implantatgetragene Einzelkrone.....	1
Abbildung 2: (links) Einzelkrone mit Nicht-/Edelmetallgerüst und Verblendkeramik, (Mitte) Einzelkrone mit Gerüst aus Zirkonoxid und Verblendkeramik, (rechts) Vollkeramikkrone ohne Gerüst	2
Abbildung 3: (links) Zweiteiliges Implantat, (rechts) einteiliges Implantat.....	6
Abbildung 4: (links) Zweiteiliges individuelles Abutment, (rechts) konfektioniertes einteiliges Abutment. Beide Abutments weisen eine interne Anschlussgeometrie auf	9
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Implantates mit externer Implantat-Abutment- Verbindung und hexagonförmiger Anschlussgeometrie (rechts) sowie konischer interner Implantat-Abutment-Verbindung mit und ohne Rotationssicherung/Indexierung (links) mit jeweils zugehörigem schematischem Querschnitt (schwarz = Implantat, blau = Abutment).....	10
Abbildung 6: Schemazeichnung eines konfektionierten Abutments mit tief submukosal liegendem Zementspalt (links) und eines individuellen Abutments (rechts)	13
Abbildung 7: Materialien für die Herstellung von individuellen Abutments im CAD/CAM- Verfahren.....	17
Abbildung 8: Befestigungsvariante zementierte Einzelkrone (links), Befestigungsvariante verschraubte Einzelkrone (rechts).....	18
Abbildung 9: Kombination aus zweiteiligem Zirkonoxidkeramikabutment und vollkeramischer Krone	30
Abbildung 10: Kombination aus einteiligem Titanabutment und metallkeramischer Krone.....	30
Abbildung 11: Schematische Darstellung Implantattyp Ankylos® mit Designmerkmalen	31
Abbildung 12: Darstellung der Implantatschulter links mit Platform-Switching und rechts ohne Platform-Switching	32
Abbildung 13: Aufbau der Titanbasis des zweiteiligen individuellen Zirkonoxidkeramikabutments.....	32
Abbildung 14: Zweiteiliges Zirkonoxidkeramikabutment.....	33
Abbildung 15: Individuelles zweiteiliges Zirkonoxidkeramikabutment mit vollkeramischer Einzelkrone	34
Abbildung 16: Individuelle einteilige Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen	35
Abbildung 17: Virtuelle Gestaltung eines individuellen Abutments.....	35
Abbildung 18: Metallkeramische (links) und vollkeramische Einzelkrone (rechts).....	36
Abbildung 19: Individueller Abformlöffel (links), Implantat ohne verschraubten Abformpfosten (Mitte) und mit verschraubten Abformpfosten (rechts)	38
Abbildung 20: Abformpfosten mit Abformlöffel und Abformmaterial im Patientenmund (links) sowie Abformlöffel mit im Abformmaterial fixierten Abformpfosten außerhalb des Patientenmundes (rechts).....	38
Abbildung 21: Ursprüngliche Studienpopulation	45
Abbildung 22: Patientenanzahl der bis zum letzten Untersuchungstermin nachbeobachteten Patienten.....	45
Abbildung 23: Verteilung der Restaurationen nach Materialien.....	46
Abbildung 24: Überlebensraten von einteiligen Titanabutments und zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments.....	50
Abbildung 25: Gesamterfolgsrate der Titan- und Zirkonoxidkeramikabutments mit Suprakonstruktion.....	51
Abbildung 26: Geschätzte Erfolgsraten für einteilige Titanabutments und zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments mit Suprakonstruktion im Vergleich	51
Abbildung 27: Übersicht der Erfolgsraten der Komplikation Verblendkeramikfraktur von Einzelkronen beider Gruppen im Vergleich.....	52

Abbildung 28: Prothetische Erfolgsrate in terminaler und zahnbegrenzter Implantatposition	53
Abbildung 29: Prothetische Erfolgsraten von Molaren und Prämolaren	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überlebensraten von Einzelzahimplantaten	21
Tabelle 2: Überlebensraten implantatgetragener Einzelzahnrestorationen aus Übersichtsarbeiten	23
Tabelle 3: Technische Komplikationen implantatgetragener Einzelzahnrestorationen aus Übersichtsarbeiten	26
Tabelle 4: Beschreibung der Verluste	40
Tabelle 5: Beschreibung der Komplikationen	40
Tabelle 6: Gesamtüberblick über die Verteilung aller Titan- und Zirkonoxidkeramikabutments	47
Tabelle 7: Verteilung der Titanabutments.....	47
Tabelle 8: Verteilung der Zirkonoxidkeramikabutments.....	47
Tabelle 9: Übersicht Komplikationen und Verluste mit implantatbezogener Prävalenz.....	48
Tabelle 10: Zusammenfassung 6-Jahres-Überlebensraten der vorliegenden Studie.....	50
Tabelle 11: Zusammenfassung der 6-Jahres-Erfolgsraten der vorliegenden Studie.....	54
Tabelle 12: Risikovariablen mit dazugehörigen Konfidenzintervall und Signifikanz.....	54

Abkürzungsverzeichnis

API	Approximalraum-Plaque-Index
BOP	Bleeding on Probing (Blutung auf Sondierung)
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CRF	Case Report Form
DGI	Deutsche Gesellschaft für Implantologie
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
FDI	Fédération Dentaire Internationale
KI	Konfidenzintervall
UPT	Unterstützende parodontale Therapie
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
Y-TZP	Yttriumoxid-stabilisiertes tetragonales polykristallines Zirkoniumdioxid

1 Einleitung

1.1 Einführung

Immer weniger Menschen erwartet im steigenden Alter laut der fünften deutschen Mundgesundheitsstudie eine komplette Zahnlosigkeit, die sich in der Altersgruppe der jungen Senioren (65-74 Jahre) im Vergleich zum Jahre 1997 zu 2014 halbiert hat (Nitschke und Stark 2016). Die Versorgung von zahnlosen Patienten in der zahnärztlichen Praxis nimmt somit ab, während die Zahl der zu versorgenden teilbezahnten Patienten mit zu ersetzenden Einzelzähnen steigt (Jung et al. 2012).

Eine Möglichkeit, um einen einzelnen Zahn zu ersetzen, ist die Versorgung mit implantatgestützten Restaurationen. Hierbei werden künstliche Verankerungen im Kieferknochen in Form von Implantaten als Ersatz der natürlichen Zahnwurzel geschaffen, wobei im optimalen Fall eine direkte strukturelle und funktionelle Verbindung zwischen der Implantatoberfläche und dem Knochen entsteht (Abbildung 1) (Branemark et al. 1977; Adell et al. 1981; Rupp et al. 2018).

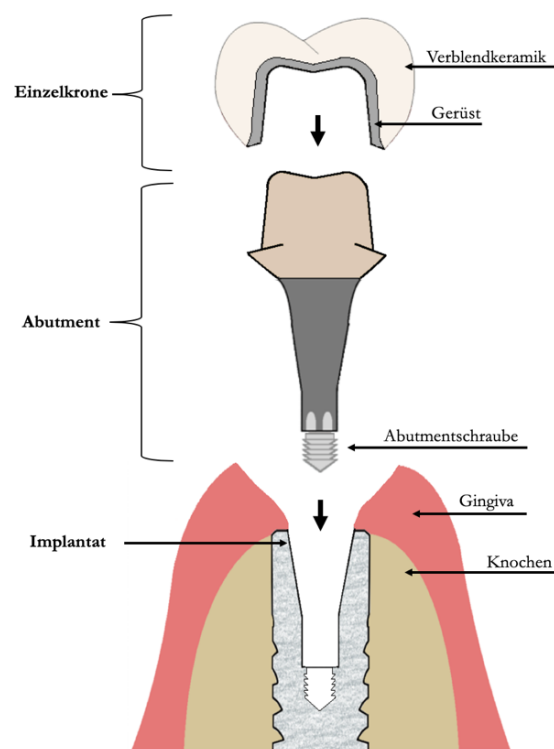


Abbildung 1: Gesamtübersicht implantatgetragene Einzelkrone

Auf dem Implantat wird ein prothetischer Aufbaupfosten (Abutment) als Verbindungsstück und zur Aufnahme der prothetischen Restauration wie Einzelkronen, Brücken oder herausnehmbarer Zahnersatz befestigt (Wachtel et al. 2016). Abutments können konfektioniert erworben oder individuell für eine Patientensituation hergestellt werden (Priest 2005). Einer der Technologien zur Herstellung von individuellen Abutments ist das Computer Aided Design (CAD) und Computer Aided Manufacturing (CAM) -Verfahren, welches sich in den letzten zehn Jahren stetig weiterentwickelte (Kapos und Evans 2014). Die implantatprothetische Restauration wird hierbei erst mithilfe eines Computers konstruiert und anschließend computergestützt aus einem Material herausgefräst. Diese Entwicklung ermöglicht unter anderem die Verarbeitung von hochfesten Oxidkeramiken im dentalen Bereich (Miyazaki et al. 2009; Abduo und Lyons 2013).

Implantatgetragene Einzelkronen können aus unterschiedlichen Materialien hergestellt werden (Shirakura et al. 2009). Die Ausführung als metallkeramische Einzelkrone wurde wissenschaftlich sehr gut dokumentiert (Pjetursson et al. 2018b). Diese besitzt ein Gerüst aus Nichtedelmetall oder Edelmetall und wird mit Keramik verblendet. Vollkeramische Kronen können monolithisch oder aus einem keramischen Gerüst mit zusätzlicher keramischer Verblendung aus z. B. Feldspatkeramik hergestellt werden (Abbildung 2) (Shirakura et al. 2009). Für vollkeramische Einzelkronen werden unter anderem monolithische oder verblendete Oxidkeramiken (Zirkonoxid, Aluminiumoxid) und Glaskeramiken als auch neuere Resin-Nanokeramiken verwendet (Rabel et al. 2018).

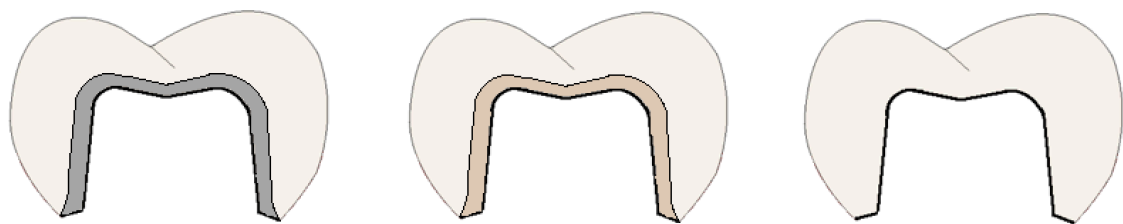


Abbildung 2: (links) Einzelkrone mit Nicht-/Edelmetallgerüst und Verblendkeramik, (mitte) Einzelkrone mit Gerüst aus Zirkonoxid und Verblendkeramik, (rechts) Vollkeramikkrone ohne Gerüst

Systematische Übersichtsarbeiten untersuchten Implantate, Abutments und implantatgetragene Einzelkronen hinsichtlich ihrer Erfolgs- und Überlebensraten. Dafür wird in der Literatur der Erfolg (Success) und das Überleben (Survival) von Implantat, Abutment und Restauration wie folgt definiert. Es wird von einem prothetischen Erfolg gesprochen, wenn im gesamten Beobachtungszeitraum keine Komplikationen auftreten und somit keine zahnärztliche Intervention nötig ist. Das Überleben ist davon abhängig, ob die zu untersuchende

Implantatkomponente bei den Nachuntersuchungen ohne ein absolutes Versagen in situ vorgefunden wurde (Pjetursson et al. 2012; Abou-Ayash et al. 2017; Sailer et al. 2018a). In Übersichtsarbeiten wurden hohe Überlebensraten von Implantaten und dessen Restaurationen über einen Zeitraum von 5-10 Jahren dokumentiert (Sailer et al. 2009a; Jung et al. 2012; Pjetursson et al. 2014; Pjetursson et al. 2018b; Rabel et al. 2018). Trotz langjähriger wissenschaftlicher Forschung und Durchführung der Therapie mittels Implantaten, gibt es jedoch noch regelmäßig auftretende ästhetische, technische und biologische Komplikationen auf Ebenen der Abutments, Restaurationen und Implantate (Albrektsson und Donos 2012; Jung et al. 2012).

Es existieren derzeit nur wenige Studien, die individuelle CAD/CAM-Abutments mit implantatgetragenen Einzelkronen im Seitenzahnbereich im Hinblick auf die technischen Komplikationen untersuchten (Vigolo et al. 2006; Zembic et al. 2013; Hsu et al. 2017; Guljé et al. 2019; Hsu et al. 2019). Der Unterschied der Einflussnahme von individuell hergestellten CAD/CAM-Abutments auf die Komplikationsraten von Einzelkronen im Vergleich zu der Verwendung von konfektionierten Abutments wurde bisher unzureichend untersucht.

In der vorliegenden prospektiven und praxisbasierten Studie sollen deshalb zwei Arten von individuell hergestellten CAD/CAM-Abutments mit provisorisch zementierten vollkeramischen und metallkeramischen Einzelkronen auf Einzelzahnimplantaten im Seitenzahnbereich hinsichtlich technischer Komplikationen in einem Beobachtungszeitraum von > 5 Jahren nachuntersucht werden. Rinke et al. (2015) untersuchten in einer retrospektiven und praxisbasierten Vorläuferstudie, bei fast identischen Voraussetzungen, die Komplikationen bei konfektionierten Abutments auf Einzelzahnimplantaten im Seitenzahnbereich (Rinke et al. 2015). Die Ergebnisse dieser Studie sollen mit den Ergebnissen aus der Vorläuferstudie und die der aktuellen Literatur verglichen werden.

1.2 Implantate

1.2.1 Indikationen und Anwendungssicherheit

Die Implantologie wurde in Deutschland im Jahre 1982 durch eine Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Zahn- Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) wissenschaftlich anerkannt. Die deutsche Mundgesundheitsstudie kam zu dem Ergebnis, dass Patienten im Jahr 2014 im Vergleich zu 1997 zehn Mal häufiger mit Implantaten versorgt wurden (Nitschke und Stark 2016).

Die DGZMK und die Deutsche Gesellschaft für Implantologie (DGI) gaben im Jahr 2005 eine überarbeitete Stellungnahme für die Indikationen für Implantate heraus. Dabei wird als medizinische Voraussetzung für die enossale Implantatversorgung ein ausreichendes oder neu aufgebautes lokales Hart- und Weichgewebeangebot genannt. Als Indikationen für die Implantatversorgung werden Situationen (z. B. große Knochendefekte nach Operationen, Freirandsituationen, Schalllücken) beschrieben, in denen die Versorgung mittels Implantate funktionelle Vorteile bietet oder bei der die konventionelle prothetische Versorgung unzureichende Funktion ermöglicht. Darüber hinaus stellen spezielle lokale Befunde sowie subjektive Gründe ebenfalls Indikationen für eine Versorgung mit Implantaten dar (Richter 2005).

Der Anwendungsbereich der Implantattherapie reicht von implantatgetragenen Einzelkronen (Pjetursson et al. 2018b) und Brücken (Sailer et al. 2018a) bis hin zur Versorgung von teilweise und komplett zahnlosen Patienten mit feststehendem und herausnehmbarem implantatgetragenen Zahnersatz (Daudt Polido et al. 2018; Pieralli et al. 2018; Storelli et al. 2018). Systematische Übersichtsarbeiten, die sich mit den Überlebensraten von Implantaten beschäftigten, dokumentieren hohe und zuverlässige Überlebensraten $> 95\%$ über einen Beobachtungszeitraum von bis zu zehn Jahren (Jung et al. 2012; Rabel et al. 2018). Zufriedenstellende klinische Ergebnisse wurden auch für implantatgetragene Einzelkronen und mehrgliedrige implantatgetragene Brücken dargelegt, welche auf die konventionell hergestellten metallkeramischen Restaurationen zurückzuführen war (Sailer et al. 2018b). Ferner konnte in weiteren Übersichtsarbeiten gezeigt werden, dass derzeit auch für implantatgetragene vollkeramische Einzelkronen hohe Überlebensraten zu erwarten sind. Als häufige Komplikation bei metallkeramischen und vollkeramischen Restaurationen wird das Frakturieren der Verblendkeramik als technische Komplikation beschrieben (Pjetursson et al. 2018b; Rabel et al. 2018). Weitere technische Komplikationen auf Ebene der implantatgetra-

genen Einzelkronen und Abutments sind unter anderem der Retentionsverlust von Einzelkronen, Abutmentschraubenlockerungen sowie Abutmentschraubenbrüche. Auch biologische Komplikationen auf Implantatebene wie die Erkrankungen Mukositis und Periimplantitis werden häufig ermittelt (Jung et al. 2008; Jung et al. 2012; Pjetursson et al. 2018b; Rabel et al. 2018; Sailer et al. 2018a).

1.2.2 Implantatmaterialien und Implantatgestaltung

Enossale Implantate wurden bisher aus verschiedenen Metallen (Titan, Titanlegierungen) oder aus Keramiken (Zirkonoxid, Aluminiumoxid) hergestellt. Titan und Titanlegierungen (Ti-6Al-4V/Ti-6Al-7Nb) haben sich als Implantatmaterial aufgrund der großen Bruchfestigkeit, Biokompatibilität und Korrosionsfestigkeit durchgesetzt (Wagner und Al Nawas 2004; Liu et al. 2017). Implantate aus Aluminiumoxid hingegen fanden aufgrund der hohen Frakturnrate nur kurzzeitig Anwendung (Andreietelli et al. 2009). Die Verwendung von Hochleistungskeramiken als Implantatmaterial ist Gegenstand aktueller Forschungen (Roehling et al. 2019). Übersichtsstudien zeigten für Implantate aus Zirkonoxid zufriedenstellende Überlebensraten, welche jedoch nur für einen kurzen Beobachtungszeitraum vorliegen. Weitere klinische Langzeitergebnisse sind abzuwarten, bevor diese für den routinemäßigen klinischen Gebrauch empfohlen werden können (Hashim et al. 2016; Pieralli et al. 2017; ArRejaie et al. 2019).

Das enossale Implantat besitzt häufig einen rotationssymmetrischen, wurzelförmigen Implantatkörper und kann nach der rotationssymmetrischen Lageraufbereitung des Knochenbettes mittels rotierendem Instrumentariums in diesen eingefügt werden (Grössner-Schreiber und Terheyden 2004). Dentale Implantate besitzen einen enossalen (innerhalb des Knochens) und enoralen (innerhalb der Mundhöhle) befindlichen Anteil. Bei zweiteiligen Implantatsystemen werden Abutment und Implantat nach Implantation durch Verschraubung zusammengefügt (Fretwurst et al. 2016). Bei den einteiligen Implantaten lassen sich enossaler und enoraler Teil nicht trennen, wodurch das Abutment ein Teil des Implantates selbst darstellt (Abbildung 3) (Karunagaran et al. 2013).

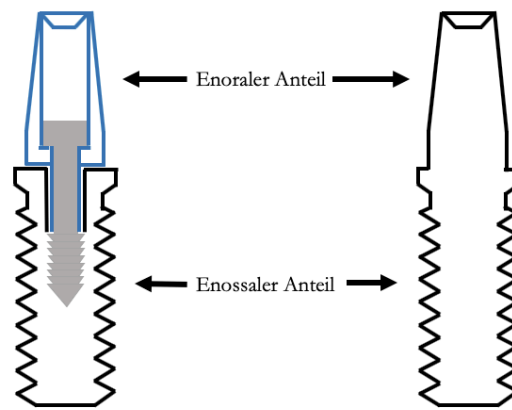


Abbildung 3: (links) Zweiteiliges Implantat, (rechts) einteiliges Implantat

Jokstad et al. ermittelten im Jahre 2003 insgesamt 80 Hersteller mit 220 Implantatmarken (Jokstad et al. 2003). Heute gibt es dazu im Vergleich 500 Hersteller mit 4000 verschiedenen Implantatmarken (Jokstad und Ganeles 2018). Die Implantatformen sind in den meisten Fällen Abwandlungen zylinderförmiger Implantatkörper (Grössner-Schreiber und Terheyden 2004), die z. B. konisch, gerade, ovoid, trapezförmig oder gestuft sind (Binon 2000; Jokstad et al. 2003). Fast 50 % aller Implantate besitzen derzeit eine konische Implantatform (Jung et al. 2018). Implantate gibt es in unterschiedlichen Längen und Breiten. Eine vor Kurzem erschienene Meta-Analyse bezüglich der Implantatüberlebensraten mit Implantaten unterschiedlicher Längen, definierte Implantate mit einer Länge von ≤ 6 mm als kurz und > 6 mm als lang (Papaspriidakos et al. 2018). Die Standardbreite von Implantaten beträgt häufig zwischen 3,5 mm bis 4,5 mm. Von durchmesserreduzierten Implantaten spricht man in der Literatur bei einem Durchmesser von $\leq 3,5$ mm (Klein et al. 2014; Jung et al. 2018).

Moderne Implantate besitzen Makrostrukturen wie z. B. Schraubenwindungen. Die Makrostrukturen führen zu einer Verbesserung der Primärstabilität, die nach Implantation mechanisch durch Kompression des umliegenden Knochens zur initialen Stabilisierung des Implantates beitragen. Durch diese sofortige Stabilisierung werden übermäßige Mikrobewegungen während der Einheilung vermieden, da es sonst bei Wundheilungsstörungen zur Bildung unerwünschten fibrösen Narbengewebes führen könnte und nicht zur angestrebten Osseointegration (Brunski 1992; Raghavendra et al. 2005). Die Mikrostruktur in Form von Oberflächenrauigkeiten des Implantates steht in einem positiven Zusammenhang mit einem verbesserten Kontakt zwischen Implantat und Knochen (Shalabi et al. 2006). Dahingehend wurden über viele Jahrzehnte unterschiedliche Verfahren entwickelt, um die Implantatoberfläche zu modifizieren. Es kommen ablativ Verfahren wie z. B. das Ätzen mit mineralischen Säuren,

anodisches Ätzen, Bestrahlen oder Kombinationen dessen zum Einsatz. Durch die Säurebehandlung der Implantatoberfläche entstehen raue Oberflächen im Mikrometerbereich und sollen den Osteoblastenausläufern als Verankerung dienen. Additive Oberflächenmodifikationen hingegen beziehen sich zum Beispiel auf das Verfahren der Titan- oder Hydroxylapatitbeschichtung (Wagner und Al Nawas 2004; Cacaci et al. 2006). Forschungen untersuchten die Wechselwirkungen der Oberflächenstrukturen bei z.B. mikro- und nanostrukturierten Oberflächen und die damit verbundenen Benetzungseigenschaften der mit dem Knochen in Kontakt stehenden Implantatoberfläche (Rupp et al. 2018).

1.2.3 Biologische Komplikationen und Implantatfrakturen

Die Erkrankungen des periimplantären Gewebes werden in die periimplantäre Mukositis und Periimplantitis eingeteilt (Romanos et al. 2015). Eine Übersichtsarbeit ermittelte aus 15 Studien eine durchschnittliche Prävalenz für die periimplantäre Mukositis von 43 % und für die Periimplantitis von 22 % (Derks und Tomasi 2015).

Die periimplantäre Mukositis wird als entzündliche Läsion der periimplantären Mukosa ohne fortdauernden marginalen Knochenverlust definiert. Klinische Zeichen für das Vorliegen einer Mukositis sind Rötung, Schwellung, Eiterung oder erhöhte Blutungsneigung nach dem Sondieren des periimplantären Weichgewebes (Berglundh et al. 2018; Heitz-Mayfield und Salvi 2018; Hirooka und Renvert 2019; Barootchi et al. 2020). Klinische Studien konnten nachweisen, dass die Mukositis durch Plaque induziert wird (Zitzmann et al. 2001; Salvi et al. 2012) und nach Durchführung oraler Mundhygiene klinisch als auch biochemisch reversibel sind (Meyer et al. 2017). In einer Übersichtsarbeit über mögliche Risikoindikatoren wurden die orale Plaqueakkumulation und das Rauchen eindeutig identifiziert. Weitere Risikoindikatoren wie Oberflächenrauigkeit des Abutments, Bestrahlungstherapie, keratinisierte Gingiva um das Implantat, Diabetes, Geschlecht, Genetik und Zementreste wurden ebenfalls genannt (Renvert und Polyzois 2015).

Die Periimplantitis ist ein mit Plaque assoziierter pathogener Zustand, welcher das periimplantäre Gewebe um das Implantat betrifft. Charakteristisch ist dabei die Entzündung der periimplantären Mukosa und der Verlust von periimplantären Knochen (Berglundh et al. 2018). Klinische Zeichen für das Vorliegen einer Periimplantitis sind die klassischen Entzündungszeichen wie bei der periimplantären Mukositis sowie gegebenenfalls erhöhte Sondierungstiefen in Kombination mit röntgenologisch nachweisbarem Knochenabbau (Hirooka und Renvert 2019). Es wird vermutet, dass die periimplantäre Mukositis der Periimplantitis vorangeht (Barootchi et al. 2020). Der genaue histopathologische Mechanismus, wie die periimplantäre Mukositis in eine Periimplantitis übergehen könnte, ist noch nicht verstanden.

Es gibt Hinweise darauf, dass eine unzureichende Plaqueentfernung und ausbleibende Implantatnachsorge Risiken für die Entstehung der Periimplantitis darstellen (Berglundh et al. 2018; Schwarz et al. 2018; Fu und Wang 2020). Zudem wurden in Übersichtsarbeiten Risikoindikatoren wie Parodontitis, Rauchen, genetischer Polymorphismus, Diabetes, kardiovaskuläre Erkrankungen und Zementreste nach der Befestigung mit Befestigungszement in Betracht gezogen (Renvert und Quirynen 2015; Fu und Wang 2020).

Auf der Ebene des Implantates kann es zu Frakturen am Implantat selbst kommen. Beim Auftreten von Implantatfrakturen handelt es sich um eine schwerwiegende Komplikation, die häufig mit der anschließenden Explantation des Implantates einhergeht (Sanchez Perez et al. 2010). Klinische Zeichen, die auf eine Implantatfraktur hindeuten, sind Blutungen, Mobilität von Implantat/ Implantatprothetik und periimplantärer Knochenverlust (Gupta et al. 2015). In der Literatur werden unter anderem Risikofaktoren für Implantatfrakturen wie Überbelastung (z.B. Bruxismus), parodontaler Knochenverlust, Implantate mit einem Durchmesser < 4 mm, Längenverhältnis Krone zu Implantat > 1 , die Implantatgestaltung, Lockerung von prothetischen Schrauben und Keramikfrakturen aufgeführt (Sanchez Perez et al. 2010; Gupta et al. 2015). In einer Übersichtsarbeit von Goiato et al. (2019) wurden aus zwölf Studien mit 3134 Implantaten insgesamt 65 Implantatfrakturen (2 %) ermittelt. Die meisten Implantatfrakturen ereigneten sich nach 3-4 Jahren. Bei 80 % der Frakturen handelte es sich um Titanimplantate und bei 20 % der Frakturen um Implantate aus Zirkonoxid (Goiato et al. 2019).

1.3 Abutments

1.3.1 Abutmentformen

Das Abutment ist die Schnittstelle zwischen dem Implantat und der prothetischen Restauration (Edelhoff et al. 2019) und besitzt an einem Ende eine Abutmentbasis für die entsprechende Implantat-Abutment-Verbindung und auf der anderen Seite befindet sich der Aufbau zur Aufnahme der Restauration wie Einzelkronen, Brücken oder herausnehmbarer Zahnersatz (Abbildung 4). Das Abutment wird durch eine Abutmentschraube mit dem Implantat verbunden (Wachtel et al. 2016; Sim et al. 2017). Der Zahnersatz wird anschließend mit einer Befestigungsschraube oder einem Dentalzement auf dem Abutment fixiert (Wittneben et al. 2017b).

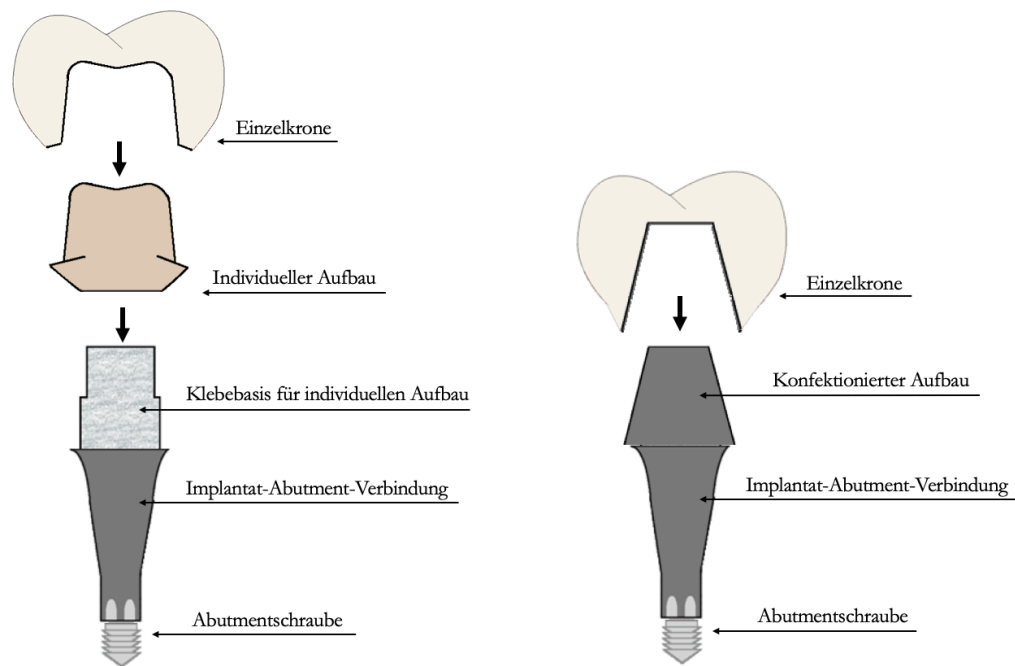


Abbildung 4: (links) Zweiteiliges individuelles Abutment, (rechts) konfektioniertes einteiliges Abutment. Beide Abutments weisen eine interne Anschlussgeometrie auf

Abutments werden hinsichtlich der Anschlussgeometrie in interne und externe Implantat-Abutment-Verbindungen, der Form in einteilige/zweiteilige sowie der Herstellungsweise in konfektionierte und individuelle Abutments unterschieden.

Die interne Implantat-Abutment-Verbindung kann konisch oder mit parallelen Flächen ausgestaltet sein (Tsuruta et al. 2018). Bei der externen Implantat-Abutment-Verbindung liegt das Abutment auf einer externen Aufnahme dem Implantat oben auf. Diese Aufnahme entspricht häufig der geometrischen Form eines Hexagons (Abbildung 5) (Caricasulo et al. 2018). Diese Formgebung dient auch der prothetischen Indexierung und als Rotationsschutz (Muley et al. 2012). Bei den internen Implantat-Abutment-Verbindungen steckt z. B. eine hexagon-, oktagon- oder konusförmige Innenverbindung des Abutments im Implantat (Abbildung 5) (Ceruso et al. 2017; Caricasulo et al. 2018). Bei der konusförmigen Implantat-Abutment-Verbindung fügt sich der konusförmige Anteil des Abutments in die gleichförmige Anschlussgeometrie des Implantates. Hierbei entsteht eine erhebliche Friktion zwischen den Flächen des Implantates und Abutments (Macedo et al. 2016). Bei der internen Rotationssicherung kann im Inneren des Implantates eine z. B. nutenförmige, achtkant- oder sechskantförmige Verbindung vorliegen (Richter 2004; Strub et al. 2011).

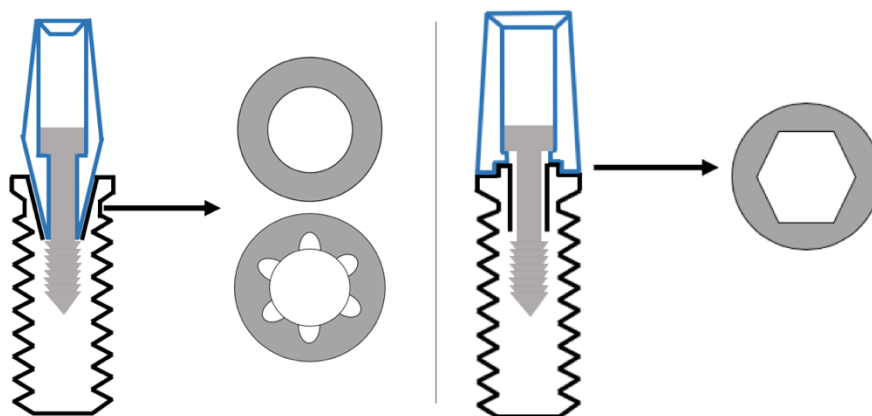


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Implantates mit externer Implantat-Abutment-Verbindung und hexagonförmiger Anschlussgeometrie (rechts) sowie konischer interner Implantat-Abutment-Verbindung mit und ohne Rotationssicherung/Indexierung (links) mit jeweils zugehörigem schematischem Querschnitt (schwarz = Implantat, blau = Abutment)

Bei einteiligen Abutments ist der Teil für die Aufnahme der Restauration und der Abutmentbasis für die entsprechende Implantat-Abutment-Verbindung aus einem Materialstück gefertigt. Bei zweiteiligen Abutments hingegen können die Abutmentbasis und der Teil für die Aufnahme der Restauration aus unterschiedlichen Materialien bestehen und werden nach Fertigung des Aufbauteils zusammengefügt (Abbildung 4) (Sailer et al. 2009b; Bagis und Kutsal 2018). Bei der Herstellung von Abutments stehen Materialien wie Zirkonoxid, Aluminiumoxid, Titan und anderen Legierungen sowie Kombinationen dessen zur Verfügung (Gehrke et al. 2015).

Bei den Herstellungsformen unterscheidet man konfektionierte und individuelle Abutments. Konfektionierte Abutments werden von den Herstellern vorgefertigt und passend zum Implantatsystem mit unterschiedlichen Formen, Größen und Neigungen angeboten (Edelhoff et al. 2019). Konfektionierte Abutments können durch den Zahnarzt oder das zahntechnische Labor mittels Beschleifen angepasst werden. Um diesen Aufwand gering zu halten, werden auch konfektionierte Abutments angeboten, die dem natürlichen Durchtrittsprofil durch das Weichgewebe eines Zahnes ähnlich sind (Karunagaran et al. 2013).

Individuelle Abutments werden durch Herstellungsverfahren wie die Gusstechnik oder der CAD/CAM-Technologie hergestellt. Durch die Verwendung des CAD/CAM-Verfahrens ist es möglich, das Abutment individuell für die jeweilige Patientensituation herzustellen. Dazu werden die Implantatkomponenten virtuell mit dem Computer geplant und anschließend aus einem Materialblock herausgefräst (Patzelt et al. 2015). Bei einteiligen individuellen Abutments werden sowohl der Abutmentaufbau als auch die Abutmentbasis zur passenden

Implantat-Abutment-Verbindung individuell durch ein Fertigungszentrum gefräst. Bei individuellen zweiteiligen Abutments sind die zum passenden Implantatsystem vorgefertigte Abutmentbasis und der individuell herzustellende Abutmentaufbau vorerst getrennt und werden erst nach Herstellung miteinander verklebt (Abbildung 4) (Gehrke et al. 2015).

1.3.2 Gegenüberstellung von individuellen und konfektionierten Abutments

1.3.2.1 Technische Komplikationen

Konfektionierte Abutments müssen meist unter erhöhtem Zeitaufwand durch Beschleifen an die vorhandene Patientensituation angepasst werden. Dies wiederum könnte zu einer Verringerung der Retention für die Restauration und Minderung der Bruchfestigkeit des Abutments führen (Priest 2005). Durch die Verwendung der CAD/CAM-Technologie können Abutments und Gerüste in einer ausreichenden Materialstärke und individueller Form hergestellt werden, was wiederum die Bruchfestigkeit erhöht und weniger Anpassungsmaßnahmen des Abutments nötig macht (Abduo und Lyons 2013). Die Einflussnahme auf die Häufigkeit des Retentionverlustes bei Einzelzahnkronen von konfektionierten Abutments im Vergleich zu individuellen Abutments wurde bisher in Übersichtsarbeiten nicht untersucht. In einer retrospektiven Studie von Korsch und Walther (2015) ergaben sich potentielle Hinweise, dass durch die Verwendung von CAD/CAM-Abutments die Retention der Einzelkronen im Vergleich zu konventionellen Abutments erhöht werden kann (Korsch und Walther 2015).

In einer systematischen Übersichtsarbeit von Kapos und Evans (2014) wurden sechs Studien mit insgesamt 138 implantatgetragenen Einzelkronen auf CAD/CAM-Abutments mit durchschnittlichen Beobachtungszeit von 12-67 Monaten im Front- und Seitenzahnbereich nachuntersucht. In den untersuchten Studien sind keine Retentionsverluste von Einzelkronen, Abutmentschraubenlockerungen und Abutmentfrakturen aufgetreten. Die durchschnittliche Überlebensrate für CAD/CAM-Abutments beträgt 100 %. Es wurde eine niedrige Inzidenz für die Komplikation der Verblendkeramikfraktur von Einzelkronen ermittelt (geschätzte jährliche Verblendkeramikfrakturnrate von 0-3 %). Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass im CAD/CAM-Verfahren hergestellte Abutments in kurzen und mittellangen Beobachtungszeiträumen mit ausreichender klinischer Sicherheit angewendet werden können. Zudem könnten, unter Berücksichtigung der damaligen aktuellen Literatur, durch die Verwendung der CAD/CAM-Technologie im Vergleich zur konventionellen Herstellungsverfahren vergleichbare Überlebensraten, technische sowie biologische Komplikationsraten für Implantate, Abutments und Einzelkronen ermittelt werden (Kapos und Evans 2014).

Long et al. (2017) untersuchten im Rahmen einer systematischen Übersichtsarbeit, ob die Art des Herstellungsverfahrens von Abutments (individuell oder konfektioniert) einen Einfluss auf die klinischen Ergebnisse von Abutments nimmt. Von 13 untersuchten Studien berichteten vier Studien über Überlebensraten und sechs über Erfolgsraten von CAD/CAM-Abutments. Nach einer einjährigen Beobachtungszeit wurden hohe Überlebensraten (95,2-100 %) und Erfolgsraten (82-100 %) für CAD/CAM-Abutments ermittelt. Im direkten Vergleich zu konfektioniert hergestellten Abutments konnte kein signifikanter Unterschied ermittelt werden. Die Autoren kamen zu der Schlussfolgerung, dass die klinischen Ergebnisse im Vergleich zu den konventionellen Abutments gleich gut oder leicht überlegen sind (Long et al. 2017). In dieser Studie wurde keine Aussage zur Lokalisation der Abutments oder technischen Komplikationen von Einzelkronen gemacht.

In einer vor Kurzem erschienenen systematischen Übersichtsarbeit wurden 20 Studien mit konfektionierten und individuellen CAD/CAM-Abutments aus Zirkonoxid mit Einzelkronen im Frontzahnbereich aus ästhetischer Sicht und hinsichtlich technischer Komplikationen untersucht. Zwölf der Studien berücksichtigten in ihren Untersuchungen technische Komplikationen auf Ebene der Abutments (Abutmentschraubenlockerung/ Abutmentfraktur). Ein Ergebnis dieser Studie ist, dass CAD/CAM-Abutments und konfektionierte Abutments sich hinsichtlich der technischen Komplikationen über einen Zeitraum von ein bis zwölf Jahren im Frontzahnbereich nicht unterscheiden (Naveau et al. 2019).

Studien, die derzeit CAD/CAM-Abutments mit konventionellen Abutments vergleichen, sind selten und weisen nur kurze Nachbeobachtungszeiträume auf (Long et al. 2017). Es werden mehr klinische Studien benötigt, um einen potentiellen Vorteil durch die Verwendung von CAD/CAM hergestellten Implantatkomponenten im Vergleich zu konfektionierten darzulegen (Abduo und Lyons 2013; Patzelt et al. 2015). Daten aus klinischen Langzeitbeobachtungen zu individuellen Abutments im Seitenzahnbereich fehlen. Genauere Differenzierungen wie sich die Position der CAD/CAM-Abutments (posterior/anterior) auf die Überlebens- und Komplikationsraten von implantatgetragenen Einzelkronen auswirken, wurde in systematischen Übersichtsarbeiten bisher nicht thematisiert.

1.3.2.2 Entfernung von Zementresten

Submukosale Zementreste, welche nach der Zementierung von implantatgetragenen Restaurationen auf Abutments nicht vollständig entfernt wurden, stellen ein Risikoindikator für biologische Komplikationen wie Mukositis und Periimplantitis dar (Renvert und Polyzois 2015; Fu und Wang 2020). Deshalb ist bei der Verwendung von konfektionierten Abutments, die weit submukosal liegende Kronen-Abutment-Grenze und der damit verbundene

schwer zugängliche Zementspalt von Nachteil (Abbildung 6) (Parpaiola et al. 2013). Aus diesem Grund wird zugunsten der besseren Entfernung von Zementresten und Verringerung von biologischen Komplikationen empfohlen, die Kronen-Abutment-Grenze und somit auch den Zementspalt auf Höhe der marginalen Mukosa zu planen (Jepsen et al. 2015; Staubli et al. 2017).

Linkevicius et al. (2013) kamen in einer prospektiven klinischen Studie zu dem Ergebnis, dass umso tiefer submukosal die Kronen-Abutment-Grenze liegt, desto mehr Zementreste unentdeckt verbleiben. In der Studie wurden implantatgestützte Einzelkronen auf konfektionierten Abutments hinsichtlich verbliebener Zementreste untersucht. Es wurden bei 100 % von 53 Restaurationen Zementreste ermittelt (Linkevicius et al. 2013). Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch eine weitere Studie, in der 65 Restaurationen, überwiegend im Seitenzahnbereich, im Hinblick auf Zementreste untersucht wurden (Vindasiute et al. 2015).

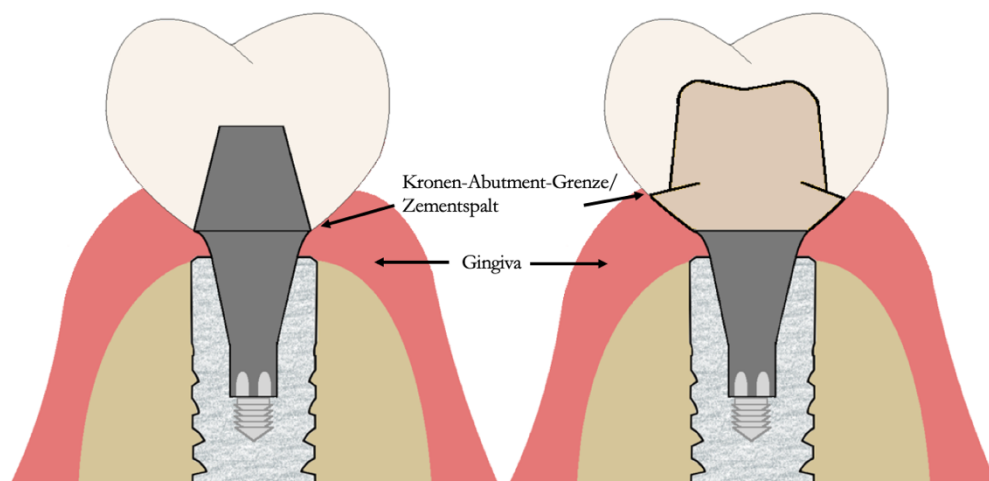


Abbildung 6: Schemazeichnung eines konfektionierten Abutments mit tief submukosal liegendem Zementspalt (links) und eines individuellen Abutments (rechts)

Durch die Verwendung von individuellen Abutments können unter Berücksichtigung der individuellen Patientensituation die Abutmentform und Höhe der Kronen-Abutment-Grenze geplant werden (Parpaiola et al. 2013). Die Verwendung von individuellen CAD/CAM-Abutments ist jedoch keine Garantie für die Vermeidung von submukosalen Zementresten. In einer prospektiven Studie wurden verbleibende Zementreste bei der Zementierung von Einzelkronen im Seitenzahnbereich auf individuellen CAD/CAM-Abutments hin untersucht. In der Studie wurde die Kronen-Abutment-Grenzen 1 mm subgingival geplant. Nach Entfernung der Restaurationen wurden bei 73,3 % von 60 Restaurationen Zementreste vorgefunden. CAD/CAM-Abutments sind konventionellen Abutments

hinsichtlich der besseren Entfernbarkeit von Zementresten nur geringfügig überlegen (Wasiluk et al. 2017).

1.3.2.3 Ästhetik

Verantwortlich für eine natürliche Ästhetik von implantatgestützten Restaurationen ist die Ausbildung des Emergenzprofils. Das Emergenzprofil wird im Wesentlichen durch die Ausbildung der interdentalen Papille zwischen den Restaurationen/Zähnen mitbestimmt. Die interdental Papille ist wiederum abhängig von der Ausformung des Abutments, die Höhe des Kontaktpunktes zwischen den Zähnen/Restaurationen sowie der Knochenhöhe benachbarter Strukturen (Abichandani et al. 2013).

Ein Nachteil von konfektionierten Abutments ist die häufig verwendete zylindrische Abutmentform, welche nicht dem Durchtrittsprofil des natürlichen Zahnes entspricht. Somit beginnt die Ausbildung des Emergenzprofils auf Höhe der Kronen-Abutment-Grenze und nicht mit dem Austritt des Abutments aus dem Implantat wie bei individuellen Abutments (Priest 2005). Während bei konfektionierten Abutments die Weichgewebe durch die Restauration geformt werden, übernimmt dies bei individuellen Lösungen die Außenkontur des Abutments (Abbildung 6) (Chee und Jivraj 2006a). Die Verwendung der CAD/CAM-Technik bietet den Vorteil, die Abutmentform komplett individuell anzupassen und ungünstige Implantatachsen durch die Anpassung des individuellen Abutments zu kompensieren (Kapos und Evans 2014; Schepke et al. 2017).

Es gibt Erkenntnisse, dass im Vergleich zu konfektionierten Abutments durch die Individualisierbarkeit von Abutments mittels CAD/CAM-Verfahren eine bessere Ausformung der Interdentalpapille (Borges et al. 2014) und eine bessere Weichgewebestabilität um das Implantat (Naveau et al. 2019) zu realisieren ist. Die Lage der Abutmentschulter und damit verbundenen Kronen-Abutment-Grenze lassen sich individuell anpassen (Wasiluk et al. 2017), wodurch ästhetische Planbarkeit realisierbar ist (Pietruski et al. 2018).

1.3.3 Verfahren zur Herstellung individueller Abutments

Die Herstellung individueller Abutments kann im konventionellen Verfahren unter Nutzung der Gusstechnik oder mittels CAD/CAM-Technologie erfolgen.

Bei der Gusstechnik werden die individuellen Abutments durch das zahntechnische Labor vorerst mit Wachs für die jeweilige Patientensituation modelliert und anschließend konventionell gegossen (Abduo und Lyons 2013). Eine spezielle Form der durch die Gusstechnik

hergestellten individuellen Abutments wird als UCLA-Abutments bezeichnet. In der ursprünglichen Form wurde eine ausbrennfähige Kunststoffhülse mit Anschlussgeometrie für ein bestimmtes Implantatsystem durch den Zahntechniker im Bereich des Aufbauteils mit Wachs individualisiert. Anschließend wurde die Modellation mitsamt der Kunststoffhülse ausgebrannt und in Metall umgesetzt (Lewis et al. 1992). Dieses Gussverfahren führte zu Passungsungenauigkeiten (Prisco et al. 2001). Durch die Entwicklung von angussfähigen Abutments sollte die Passung zwischen den Implantatkomponenten verbessert werden (Abduo und Lyons 2013). Bei der Weiterentwicklung der UCLA-Abutments wird deshalb die Abutmentbasis konfektioniert und angussfähig angeboten. Hierbei wird der individuelle Abutmentaufbau in Wachs modelliert und anschließend der konfektionierten Abutmentbasis angegossen (Prisco et al. 2001). Der konventionelle Herstellungsprozess von implantatgetragenen Restaurationen im zahntechnischen Labor setzt eine Vielzahl an komplexen Arbeitsschritten und manuellen Fähigkeiten voraus.

Das CAD/CAM-Verfahren der computergestützten Konstruktion und Fertigung hat in den letzten zehn Jahren immer häufiger Anwendung in der Zahnmedizin gefunden (Kapos und Evans 2014; Wismeijer et al. 2014). Bis Anfang der 1990er Jahre beschränkte sich die Herstellung vor allem auf Kronen und keramische Inlays bis die CAD/CAM-Technologie auch bei Implantatabutments angewendet wurde (Priest 2005). Die Einführung der CAD/CAM-Technik ermöglichte unter anderem die Verwendung industriell hergestellter Hochleistungswerkstoffe, eine Standardisierung des Herstellungsprozesses und Software zur Überwachung und Kontrolle von Materialmindeststärken (Lee et al. 2016; Edelhoff et al. 2019). Neue Technologien wie die Verwendung von digitaler Abformung und CAD/CAM-Fertigungsverfahren sollen den Arbeitsablauf unter anderem effizienter gestalten (Mühlemann et al. 2018; Sailer et al. 2018b). In einer aktuellen Übersichtsarbeit konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung digitaler Technologien die Zeiteffizienz bei der laborgefertigten Herstellung von implantatgetragenen Restaurationen erhöht werden könnte (Mühlemann et al. 2018).

Das CAD/CAM-Verfahren setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen: Scaneinheit, CAD-Software, CAM-Fräsmaschine (Alghazzawi 2016). Zuerst wird ein Scanvorgang durchgeführt, um z. B. den präparierten Zahn oder die Implantatinformationen in ein digitales 3D-Modell für die CAD-Software auf den Computer zu überführen. Die Informationen können durch einen rein optischen Abdruck mittels Scanner direkt aus dem Patientenmund (CAI = Computer Aided Impressioning) oder durch das Abscannen eines Scankörpers auf einem Modell aus Gips erfolgen, welches mithilfe eines konventionellen Abdrucks hergestellt wurde. Mittels CAD-Software wird die gewünschte Restauration (z. B.

Krone, Abutment) am Computer auf dem virtuellen Modell konstruiert. Diese kann ebenfalls durch eine Wachsmodellation vorgeplant, erneut eingescannt und anschließend auf dem Computer mit dem virtuellen Modell zusammengefügt und angepasst werden. Abschließend wird die Restauration mithilfe des CAM-Verfahrens maschinell aus einem Material herausgefräst (Miyazaki et al. 2009; Abduo und Lyons 2013; Karunagaran et al. 2013).

Das CAD/CAM-Fertigungsverfahren kann in der Zahnarztpraxis, vom zahntechnischen Labor oder durch ein industrielles Fertigungszentrum durchgeführt werden. Der wesentliche Unterschied liegt hierbei in der räumlichen Trennung der Einzelkomponenten Scanner, CAD-Software und der CAM-Produktionseinheit (Beuer et al. 2008).

1.3.4 Materialien für die Herstellung individueller Abutments

Die heute am meisten verwendeten Materialien für die Herstellung von individuellen Abutments durch das CAD/CAM-Verfahren sind Titan/Titanlegierungen und Zirkonoxid. Titan ist ein metallisches Element und weist hohe Biokompatibilität, Korrosionsbeständigkeit, mechanische Festigkeit, niedrige Wärmeleitfähigkeit, hohe elektrische Leitfähigkeit und niedrige Dichte auf (Jorge et al. 2013). Bei der Verwendung von Titan als Abutmentmaterial spiegeln sich diese Eigenschaften unter anderem in einer Abrasionsbeständigkeit sowie einer hohen Frakturresistenz wider (Lee et al. 2016). Ein Nachteil von Abutments aus Metall ist die charakteristische metallische Optik, die bei zu dünnen Weichgewebeverhältnissen einen grünlich-blauen Effekt des Durchscheinens im Bereich der periimplantären Mukosa bewirkt (Park et al. 2007; Martinez-Rus et al. 2017). Abutments aus Zirkonoxid können deshalb bei Patienten mit einem dünnen Gingivatyp für eine natürlichere Farbe der umliegenden Weichgewebe bevorzugt werden (Glauser et al. 2004; Linkevicius und Vaitelis 2015). In Abbildung 7 sind weitere Materialien für die Herstellung einteiliger und zweiteiliger individueller Abutments aufgeführt (Boudrias et al. 2001; Brodbeck 2003; Att et al. 2006; Kohal et al. 2008; Lee et al. 2016; Çömlekoğlu et al. 2018).

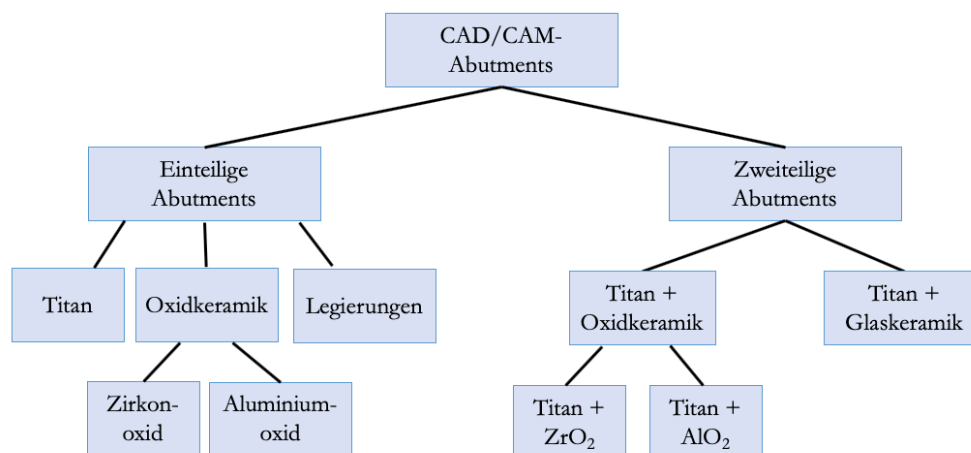


Abbildung 7: Materialien für die Herstellung von individuellen Abutments im CAD/CAM-Verfahren

Abutments aus Zirkonoxid besitzen eine hohe Biegefestigkeit von 900-1200 MPa (Christel et al. 1989). Im Vergleich dazu ist die Biegefestigkeit von Aluminiumoxid mit >500 MPa nur halb so groß. Aufgrund der hohen chemischen Stabilität, mechanischen Eigenschaften, der natürlichen Farbe und Biokompatibilität findet Zirkonoxid vermehrt Anwendung als Abutmentmaterial (Lughi und Sergo 2010). Zirkonoxid hat Eigenschaften wie eine herausragende Zähigkeit (toughness), Festigkeit (strength), Ermüdungswiderstand (fatigue resistance) und Biokompatibilität, die im dentalen Bereich eine besondere Rolle spielen (Della Bona et al. 2015). Zirkonoxid besitzt bei verschiedenen Temperaturen unterschiedliche Kristallstrukturen. Von Raumtemperatur bis 1170 °C liegt eine monokline Kristallstruktur, von 1170-2370 °C eine tetragonale Kristallstruktur und bei Temperaturen über 2680 °C eine kubische Kristallstruktur vor. Durch das Zusetzen von Oxiden (z. B. Magnesiumoxid, Calciumoxid oder Yttriumoxid) kann die Phasenumwandlung bei der Abkühlung des Zirkonoxids bis zur Raumtemperatur von der tetragonalen Form zur monoklinen Form zurückgehalten werden. Die Oxide wirken an dieser Stelle wie Stabilisatoren. Kommt es zu einer Umwandlung von der tetragonalen Phase zur monoklinen Phase resultiert dies in einer Volumenzunahme von 4-5 % (Lughi und Sergo 2010; Stawarczyk et al. 2017). Zirkonoxid im dentalen Bereich wird häufig mit 2-3 mol % Yttrium (Y_2O_3) versetzt. Man spricht dann auch von yttriumoxid-stabilisierten tetragonalen polykristallinen Zirkoniumdioxid (Y-TZP) (Hannink et al. 2000; Della Bona et al. 2015).

Zwei Mechanismen beeinflussen die Zähigkeit (toughness) des Zirkonoxids. Zum einen verursacht die lokale und spontane Umwandlung von der tetragonalen zur monoklinen Phase eine Volumenzunahme innerhalb des Materials, wodurch Mikrorisse entstehen. Tritt ein Riss im Materialgefüge auf, läuft dieser in den entstandenen Mikrorissen aus oder wird auf die

Zirkonoxidpartikel umgeleitet (Stawarczyk et al. 2017). Des Weiteren bewirkt die Zugspannung in der Rissspitze ebenfalls eine Umwandlung von der tetragonalen Phase zur monoklinen Phase. Hieraus resultiert eine Volumenzunahme, wodurch es innerhalb der Rissspitze zu einer Druckspannung kommt und einer weiteren Rissbildung entgegenwirken kann (Chevalier et al. 2004; Lughì und Sergo 2010; Stawarczyk et al. 2017). Dieser Prozess wird auch als Transformationsverstärkung (transformation toughening) beschrieben (Hannink et al. 2000). Aufgrund der besonderen mechanischen Eigenschaften des Y-TZP findet dieses im Vergleich zu anderen dentalen Keramiken nicht nur vermehrt Anwendung als Abutmentmaterial, sondern wird auch für die Herstellung von Einzelzahnrestorationen sowie Brückenkonstruktionen genutzt (Denry und Kelly 2008).

1.3.5 Befestigung von Einzelkronen auf Abutments

Die Kronenverankerung von Einzelkronen auf Abutments können durch zwei Varianten ermöglicht werden. Eine Variante besteht darin, die Einzelkrone mit Befestigungszement auf dem zuvor mit dem Implantat verschraubten Abutment zu zementieren. Eine andere Möglichkeit stellt dar, die Einzelkrone mit einer Befestigungsschraube zu fixieren (Chee und Jivraj 2006b). Bei der verschraubten Befestigungsvariante wird beispielsweise eine Titanbasis mit einer vollkeramischen Einzelkrone verklebt. Anschließend wird die Kombination aus Einzelkrone und Titanbasis mit dem Implantat verschraubt (Priest 2017). Durch dieses Verfahren entstehen eine Schraubenkanalöffnung und ein Schraubenkanal in der Restauration (Abbildung 8).

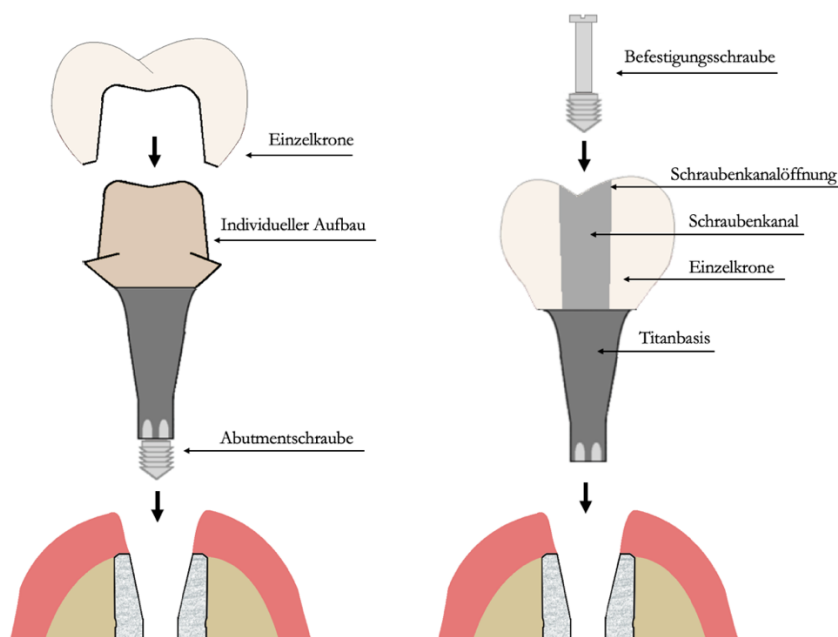


Abbildung 8: Befestigungsvariante zementierte Einzelkrone (links), Befestigungsvariante verschraubte Einzelkrone (rechts)

Ein Vorteil von verschraubten Restaurationen – im Vergleich zur zementierten Befestigungsvariante – ist die einfachere Entfernung der Einzelkrone beim Auftreten einer Komplikation (Ma und Fenton 2015). Bei prothetisch nicht optimal im Kieferknochen ausgerichteten Implantaten, kann es jedoch zum ungünstigen Austritt der Zugangsöffnung des Schraubenkanals im ästhetisch sichtbaren Bereich kommen (Chee und Jivraj 2006b). Zudem wird die Keramik im Bereich der Schraubenkanalöffnung geschwächt (Vigolo et al. 2012). Um dies zu vermeiden, stellt die zementierte Befestigungsvariante eine Therapiealternative dar. Diese Alternative bietet durch die fehlende Zugangsöffnung einen ästhetischen Vorteil und kann zudem im Seitenzahnbereich eine bessere Planung der okklusalen Kaufläche ermöglichen (Wittneben et al. 2017a). Bei der Zementierung von Restaurationen auf Abutments werden definitive und provisorische Zemente verwendet (Hebel und Gajjar 1997). Definitive Zemente wie Kompositzement, Zink-Phosphat-Zement und kunststoffmodifiziertes Glasionomermzement ermöglichen eine höhere Retention zwischen der Krone und dem Abutment im Vergleich zum provisorischem Zement (z.B. auf Zinkoxid-Basis) (Squier et al. 2001; Carnaggio et al. 2012; Safari et al. 2018). In Situationen, in denen sich die Abutmentschraube lockert oder Reparaturen durchgeführt werden müssen, bedarf es der Entfernbarkeit der Restauration. Bei einer zu großen Retention zwischen Einzelkrone und Abutment kann es bei der Entfernung der Restauration zu einer Beschädigung kommen (Vigolo et al. 2012). Um eine nachträgliche Entfernung von Restaurationen zu ermöglichen, können provisorische Zemente verwendet werden (Hebel und Gajjar 1997; Michalakis et al. 2003). Durch die gute Passung zwischen Einzelkrone und Abutment kann sich auch bei der Verwendung von provisorischen Zement die Entfernung der Einzelkrone schwierig gestalten (Taylor et al. 2000; Ma und Fenton 2015).

Ein häufiger Nachteil von zementierten Restaurationen ist die Komplikation des Retentionsverlustes von Einzelkronen, besonders wenn Einzelkronen mit provisorischen Zement auf kurzen Abutments befestigt werden (Chaar et al. 2011; Ma und Fenton 2015). In einer Übersichtsarbeit wurden Studien ermittelt, in denen Komplikationen bei implantatgetragenen zementierten Einzelkronen untersucht wurden. Hierbei wurden Häufigkeiten für Retentionsverluste von provisorisch zementierten Einzelkronen mit bis zu 22 % über einen Beobachtungszeitraum von fünf bis zehn Jahren konstatiert (Chaar et al. 2011).

Übersichtsarbeiten untersuchten unter anderem die Überlebensraten sowie die technischen und biologischen Komplikationsraten von verschraubten und zementierten Restaurationen. Für zementierte und verschraubte Einzelkronen ergaben sich 5-Jahres-Überlebensraten von 96,37 % und 91,16 % (Wittneben et al. 2014) sowie 96,5 % und 89,3 % (Sailer et al. 2012). Sailer et al. (2012) ermittelten die 5-Jahres-Inzidenz von technischen Komplikationen bei

implantatgetragenen Einzelzahnrestorationen. Dabei ergaben sich statistisch signifikant häufiger technische Komplikationen bei verschraubten Einzelkronen 24,4 % (95 % KI: 15,4 - 37,3) als bei zementierten Einzelkronen 11,9 % (95 % KI: 8,8 - 16,0). Bei den verschraubten Einzelkronen wurden häufiger Lockerungen der Befestigungsschraube und Verblendkeramikfrakturen ermittelt. Zementierte Restaurationen zeigten deutlich häufiger biologische Komplikationen (z. B. Implantatverlust, Knochenverlust > 2 mm) (Sailer et al. 2012).

1.4 Überlebens- und Komplikationsraten implantatgetragener Einzelzahnrestorationen

1.4.1 Überlebensraten dentaler Einzelzahnimplantate

In der systematischen Übersichtsarbeit von Jung et al. (2012) wurden 46 Studien (27 prospektiv/19 retrospektiv) aus den Jahren 1996-2012 ausgewertet. Die Überlebensraten der Einzelzahnimplantate beträgt nach Auswertung der Studien 97,2 % für fünf Jahre und 95,2 % für eine Beobachtungszeit von zehn Jahren (Jung et al. 2012).

Zembic et al. (2014) ermittelten in einer Übersichtsarbeit mit 24 Studien (17 prospektiv/7 retrospektiv) aus den Jahren 1996-2012 eine 5-Jahres-Überlebensrate für Implantate von 96,9 % (95 % KI: 95,6 - 97,8). Implantate, die mit Abutments aus Metall versorgt wurden, zeigten 5-Jahres-Überlebensraten von 96,9 % (95 % KI: 95,6 - 97,8) und mit Abutments aus Keramik 95,8 % (95 % KI: 83,7 - 99,0) (Zembic et al. 2014).

Pjetursson et al. (2014) kamen in ihrer systematischen Übersichtsarbeit zu dem Ergebnis, dass sich die 5-Jahres-Überlebensrate von Implantaten, welche Einzelkronen stützen, in den veröffentlichten Studien vor 2000 mit 97,1 % (95 % KI: 95,6 - 98,1) im Vergleich zu den Studien nach 2000 mit 97,2 % (95 % KI: 96,2 - 98,0) nicht wesentlich unterscheiden (Pjetursson et al. 2014).

In der systematischen Übersichtsarbeit von Moy et al. (2016) wurden Implantate im posterioren Bereich des Ober- und Unterkiefers hinsichtlich der Überlebensraten untersucht. Insgesamt wurden 36 Studien berücksichtigt. Für Einzelzahnimplantate, die sofort implantiert wurden, ergab sich eine durchschnittliche Überlebensrate von 96,1 %. Für Einzelzahnimplantat mit verzögerter Implantatinsertion ergab sich eine durchschnittliche Überlebensrate von 97,5 %. Die durchschnittliche Beobachtungszeit beider Gruppen beträgt 3,3 Jahre (Moy et al. 2016).

Tabelle 1: Überlebensraten von Einzelzahnimplantaten

Autor	Überlebensraten für Jahre	Anzahl der Studien	Überlebensraten dentaler Implantate mit Einzelkronen
Jung et al. 2012	5 Jahre und 10 Jahre	46 Studien aus den Jahren 1996-2012	für 5 Jahre: 97,2 % für 10 Jahre: 95,2 %
Zembic et al. 2014	5 Jahre	24 Studien aus den Jahren 1996-2012	96,9 %
Pjetursson et al. 2014	5 Jahre	Vergleich zwischen Studien vor dem Jahr 2000 und den Jahren 2000-2012	vor Jahr 2000: 97,1 % Jahr 2000-2012: 97,2 %
Moy et al. 2016	3,3 Jahre	36 Studien	Sofortimplantation: 96,1 % Verzögerte Implantation: 97,5 %
Pjetursson et al. 2018a	5 Jahre	60 Studien	Implantate mit Abutments aus Metall und interner Anschlussgeometrie: 97,2 % Implantate mit Abutments aus Keramik und interner Anschlussgeometrie: 99 %
Rabel et al. 2018	5 Jahre und 10 Jahre	41 Studien aus den Jahren 2003-2017	für 5 Jahre: 95,3 % für 10 Jahre: 96,2 %
Cao et al. 2019	5 Jahre	8 Studien aus den Jahren 2009-2019	für 5 Jahre: 96 %

Pjetursson et al. (2018a) ermittelten die 5-Jahres-Verlustrate von Implantaten mit Einzelkronen bei der Verwendung von Abutments mit unterschiedlicher Anschlussgeometrie und Abutmentmaterialien. Für Implantate mit Abutments aus Metall und interner Anschlussgeometrie wurden 5-Jahres-Verlustraten von 2,8 % (95 % KI: 1,8 - 4,4) ermittelt. Bei der Verwendung von keramischen Abutments mit interner Anschlussgeometrie wurde eine 5-Jahres-Verlustrate von 1,0 % (95 % KI: 0,2 - 3,9) festgestellt (Pjetursson et al. 2018a).

Rabel et al. (2018) ermittelten aus insgesamt 41 Studien aus den Jahren 2003-2017 eine 5-Jahres-Überlebensrate für Einzelzahnimplantate von 95,3 % (95 % KI: 90,6 - 97,7) und einer 10-Jahres-Überlebensrate von 96,2 % (95 % KI: 95,1 - 97,1) (Rabel et al. 2018).

Cao et al. (2019) ermittelten aus acht Studien aus den Jahren 2009-2019 mit insgesamt 471 Titanimplantaten und einer durchschnittlichen Beobachtungszeit von fünf Jahren eine Überlebensrate von 96 % (95 % KI: 94,0 - 98,0). Alle Implantate wurden mit Zirkonoxidkeramikabutments sowie metallkeramischen und vollkeramischen Einzelkronen versorgt (Cao et al. 2019).

Insgesamt zeigen die vorgestellten Übersichtsstudien hohe und zuverlässige Überlebensraten für Einzelzahnimplantate in Beobachtungszeiträumen von 5 und 10 Jahren (Tabelle 1) (Jung et al. 2012; Pjetursson et al. 2014; Rabel et al. 2018).

1.4.2 Überlebensraten implantatgetragener Einzelzahnrestorationen aus Übersichtsarbeiten

In einem systematischen Review mit 46 eingeschlossenen Studien aus den Jahren 1996-2012 wurden die Überlebensraten von implantatgestützten Einzelkronen untersucht und dabei eine 5-Jahres-Überlebensrate von 96,3 % (95 % KI: 94,2 - 97,6) und 10-Jahres-Überlebensrate von 89,4 % (95 % KI: 82,8 - 93,6) ermittelt. Es wurde kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die 5-Jahres-Überlebensraten von metallkeramischen und vollkeramischen Einzelkronen festgestellt (Jung et al. 2012).

Tabelle 2: Überlebensraten implantatgetragener Einzelzahnrestaurationen aus Übersichtsarbeiten

Autor	Überlebensraten für Jahre	Anzahl der Studien	Überlebensraten von Einzelkronen
Jung et al. 2012	5 Jahre und 10 Jahre	46 Studien aus den Jahren 1996-2012	für 5 Jahre: 96,3 % für 10 Jahre: 89,4 %
Abou-Ayash et al. 2017	5 Jahre	46 Studien	Metallkeramische Einzelkronen: 97 % Vollkeramische Einzelkronen: 95 %
Pjetursson et al. 2018b	5 Jahre	36 Studien aus den Jahren 1998-2017	Metallkeramische Einzelkronen: 98,3 % Vollkeramische Einzelkronen: 97,6 %
Rabel et al. 2018	5 Jahre	41 Studien aus den Jahren 2003-2017	Vollkeramische Einzelkronen: 93,0 %

Abou-Ayash et al. (2017) untersuchten 46 Studien hinsichtlich der 5-Jahres-Überlebensraten von implantatgetragenen metallkeramischen und vollkeramischen Einzelkronen. Die Autoren ermittelten für metallkeramische Einzelkronen 97 % (95 % KI: 94,0 - 97,0) und vollkeramische Einzelkronen 95 % (95 % KI: 96,0 - 98,0) (Abou-Ayash et al. 2017).

Rabel et al. (2018) eruierten in einer systematischen Übersichtsarbeit aus 41 Studien aus den Jahren 2003-2017 die 5-Jahres-Überlebensraten für vollkeramische implantatgestützte Einzelkronen. Für vollkeramische Einzelkronen ergab sich eine Überlebensrate von 93,0 % (95 % KI: 86,6 - 96,4). Zusätzlich wurden für unterschiedliche vollkeramische Ausführungen die 5-Jahres-Überlebensraten ermittelt: Verblendetes Aluminiumoxid 96,8 % (95 % KI: 93,0 - 98,5); verblendetes Zirkonoxid 91,6 % (95 % KI: 82,5 - 96,1); monolithisches Lithiumdisilikat 91 % (95 % KI: 51,3 - 98,7) und Resin-Nano-Keramiken 67,0 % (95 % KI: 35,9 - 89,7) (Rabel et al. 2018).

In einer systematischen Übersichtsarbeit von Pjetursson et al. (2018b) wurden aus 36 Studien aus den Jahren 1998-2017 die 5-Jahres-Überlebensraten von implantatgetragenen metallkeramischen und vollkeramischen (verblendetes Zirkonoxid) Einzelzahnrestorationen ermittelt. Für die metallkeramischen und vollkeramischen Einzelzahnrestorationen wurden Überlebensraten von 98,3 % (95 % KI: 96,8 - 99,1) sowie 97,6 % (95 % KI: 94,3 - 99,0) festgestellt (Pjetursson et al. 2018b).

Implantatgetragene metallkeramische und vollkeramische Einzelkronen zeigen hohe Überlebensraten (>90 %) in einem Beobachtungszeitraum von fünf und zehn Jahren (Tabelle 2). Übersichtsarbeiten und Metaanalysen ermittelten, dass sich die Überlebensraten von metallkeramischen und vollkeramischen implantatgetragenen Einzelkronen nicht wesentlich unterscheiden (Lemos et al. 2019; Alqutaibi et al. 2020; Hu et al. 2020).

1.4.3 Technische Komplikationen implantatgetragener Einzelzahnrestorationen aus Übersichtsarbeiten

Technische und biologische Komplikationen sind trotz der hohen Überlebensraten implantatgetragener Einzelkronen häufig vertreten (Jung et al. 2012; Pjetursson et al. 2014).

Jung et al. (2012) ermittelten in einer systematischen Übersichtsarbeit die 5-Jahres-Komplikationsraten aus 19 retrospektiven und 27 prospektiven Studien mit insgesamt 3199 implantatgetragenen Einzelkronen aus den Jahren 1996-2012. Unter den Einzelkronen wurden 30 % auf dem Abutment verschraubt und 70 % zementiert. Dabei sind als häufigste Komplikationen die Abutmentschraubenlockerung mit einer kumulativen Inzidenz von 8,8 %, der Retentionsverlust mit 4,1 % und die Verblendkeramikfraktur mit 3,5 % aufgetreten (Jung et al. 2012).

In einer weiteren Übersichtsarbeit mit 24 Studien aus den Jahren 1996-2012 wurden technische Komplikationsraten bei implantatgestützten Einzelkronen untersucht. Nach fünf Jahren wurde eine technische Komplikationsrate von 8,9 % bei der Verwendung von keramischen Abutments und 12,0 % bei Abutment aus Metall verzeichnet. Die technischen Komplikationsraten beider Gruppen zeigten im Vergleich keinen signifikanten Unterschied. Die in der Studie ermittelten technischen Komplikationsraten sind die Abutmentschraubenlockerung (4,6 %), Retentionsverlust der Einzelkrone (4,3 %), Verblendkeramikfraktur (2,7 %) sowie Abutmentfraktur und Abutmentschraubenfraktur (jeweils 0,2 %) (Zembic et al. 2014).

In einem systematischen Review von Pjetursson et al. (2014) wurden Komplikations- und Überlebensraten von implantatgetragenen Einzelkronen aus prospektiven und retrospektiven Studien vor dem Jahr 2000 und aus den Jahren 2000-2012 verglichen. Dabei traten am

häufigsten die Abutment-/Schraubenlockerung mit 5-Jahres-Komplikationsraten von 24,4 % (95 % KI: 5,8 - 72,9) vor dem Jahre 2000 und 5,6 % (95 % KI: 3,2 - 9,6) in der Zeit von 2000-2012 auf. Bei Komplikationen wie der Abutment-/Schraubenfraktur vor 2000 von 0,8 % (95 % KI: 0,3 - 2,4) und zwischen 2000 bis 2012 von 0,3 % (95 % KI: 0,1 - 1,0). Die 5-Jahres-Komplikationsrate der Frakturen von Verblendmaterialien bei implantatgetragenen Einzelkronen belief sich vor 2000 auf 6,2 % (95 %, KI: 3,3 - 11,4) und zwischen 2000-2012 auf 3,2 % (95 % KI: 2,1 - 4,7). Die Komplikation des Retentionsverlustes vor 2000 bei 7,3 % (95 % KI: 2,7 - 18,8) und in den Jahren 2000-2012 bei 3,1 % (95 % KI: 1,5 - 6,3) (Pjetursson et al. 2014).

Rabel et al. (2018) untersuchten 41 Studien aus den Jahren 2003-2017 und ermittelten technische Komplikationen von implantatgetragenen vollkeramischen Einzelkronen. Dabei wurden folgende 5-Jahres-Komplikationsraten eruiert: Verblendkeramikfrakturen 9,0 % (95 % KI: 5,4 - 14,8), Gerüstfrakturen 1,9 % (95 % KI: 0,7 - 4,9), Abutmentschraubenlockerungen 3,6 % (95 % KI: 1,6 - 8,4) und Dezementierungen der Einzelkronen 1,1 % (95 % KI: 0,4 - 2,8) (Rabel et al. 2018).

In einer systematischen Übersichtsarbeit von Pjetursson et al. (2018b) wurden aus 36 Studien aus den Jahren 1998-2017 die 5-Jahres-Komplikationsraten von implantatgetragenen metallkeramischen und vollkeramischen Einzelzahnrestaurationen ermittelt. Bei allen vollkeramischen Restaurationen handelte es sich um verblendetes Zirkonoxid. Die Komplikationsraten für die metallkeramischen und vollkeramischen Einzelzahnrestaurationen sind in der Tabelle 3 zusammengefasst (Pjetursson et al. 2018b).

Die am häufigsten in der Literatur ermittelten technischen Komplikationen bei implantatgetragenen Einzelkronen sind die Verblendkeramikfrakturen, Retentionsverluste von Einzelkronen und Abutmentschraubenlockerungen. Andere technische Komplikationen wie Abutmentschraubenfrakturen, Abutmentfrakturen, Gerüstfrakturen von Einzelkronen werden ebenfalls genannt (Tabelle 3). Übersichtsarbeiten und Metaanalysen ermittelten, dass sich die technischen Komplikationsraten zwischen den implantatgetragenen metallkeramischen und den vollkeramischen Einzelkronen nicht wesentlich unterscheiden (Lemos et al. 2019; Alqutaibi et al. 2020).

Auch bei zahngetragenen Einzelkronen werden Verblendkeramikfrakturen und Retentionsverluste häufig beobachtet. Sailer et al. (2015) untersuchten in einer systematischen Übersichtsarbeit zahngetragene vollkeramische und metallkeramische Einzelkronen. Die 5-Jahres-Überlebensraten von zahngetragenen metallkeramischen Einzelkronen lag bei 95,7 %

und je nach verwendetem keramischem Material zwischen 90,7-96,6 %. Die 5-Jahres-Komplikationsrate für technische Komplikationen liegen für die Verblendkeramikfrakturen bei 2,1 % und für die Retentionsverluste bei 1,0 %. Die häufigste aufgetretene Komplikation bei metallkeramischen und vollkeramischen Einzelkronen auf natürlichen Zähnen ist die Verblendkeramikfraktur (Sailer et al. 2015). Kinsel und Lin (2009) ermittelten, dass das Risiko einer Verblendkeramikfraktur bei implantatgestützten Einzelkronen und Brücken größer als bei der gleichen Versorgung auf natürlichen Zähnen ist (Kinsel und Lin 2009).

Tabelle 3: Technische Komplikationen implantatgetragener Einzelzahnrestaurationen aus Übersichtsarbeiten

Autor	Komplikationsraten für Jahre	Anzahl der Studien	Technische Komplikationen
Jung et al. 2012	5 Jahre	46 Studien aus den Jahren 1996-2012	<ul style="list-style-type: none"> • Abutmentschraubenlockerung: 8,8 % • Retentionsverlust: 4,1 % • Verblendmaterialfraktur: 3,5 %
Zembic et al. 2014	5 Jahre	24 Studien aus den Jahren 1996-2012	<ul style="list-style-type: none"> • Komplikationen bei Abutments aus Metall: 12,0 % • Komplikationen bei Abutments aus Keramik: 8,9 % • Abutmentschraubenlockerung: 4,6 % • Retentionsverlust: 4,3 % • Verblendkeramikfraktur: 2,7 % • Abutmentfrakturen: 0,2 % • Abutmentschraubenfrakturen: 0,2 %
Pjetursson et al. 2014	5 Jahre	Vergleich zwischen Studien vor dem Jahr 2000 und den Jahren 2000-2012	<ul style="list-style-type: none"> • Abutmentschraubenlockerung: vor 2000: 24,4 % / 2000-2012: 5,6 % • Abutment- oder Schraubenfraktur: vor 2000: 0,8 % / 2000-2012: 0,3 % • Verblendmaterialfraktur: vor 2000: 6,2 % / 2000-2012: 3,2 % • Retentionsverlust: vor 2000: 7,3 % / 2000-2013: 3,1 %

Autor	Komplikationsraten für Jahre	Anzahl der Studien	Technische Komplikationen
Rabel et al. 2018	5 Jahre	41 Studien aus den Jahren 2003-2017	<ul style="list-style-type: none"> • Verblendmaterialfraktur: 9,0 % • Gerüstfraktur: 1,9 % • Abutmentschraubenlockerung: 3,6 % • Retentionsverlust: 1,1 %
Pjetursson et al. 2018b	5 Jahre	36 Studien aus den Jahren 1998-2017	<ul style="list-style-type: none"> • MC/AC= metallkeramische Einzelkronen/ Zirkonoxid Einzelkronen • Abutment- oder Einzelkronenschraubenfraktur: MC: 0,05 %/AC: 0,1 % • Abutment- oder Einzelkronenschraubenlockerung: MC: 3,6 %/AC: 1,0 % • Verblendkeramikfraktur: MC: 2,9 %/AC: 2,8 % • Retentionsverlust: MC: 2,0 %/AC: 0 % • Abutmentfraktur: MC: 0,2 %/AC: 0,4 %

1.5 Zielsetzung

Studien, die sich mit individuellen CAD/CAM-Abutments beschäftigen, thematisieren häufig die Vorteile und Auswirkungen auf die umliegenden periimplantären Weichgewebe und die Ästhetik. Es existieren derzeit nur wenige Studien, die einen möglichen Vorteil von CAD/CAM-Abutments auch im Hinblick auf die technischen Komplikationen zulassen.

Ziel der vorliegenden prospektiven Studie ist es, die ermittelten Erfolgsraten von provisorisch zementierten vollkeramischen und metallkeramischen Einzelkronen auf einteiligen CAD/CAM-Abutments aus Titan und zweiteiligen CAD/CAM-Abutments aus Zirkonoxid im Seitenzahnbereich mit den bislang in der wissenschaftlichen Literatur publizierten Daten zu vergleichen. Aus diesen Ergebnissen soll abgeleitet werden, ob sich durch die Verwendung von individuell gefertigten CAD/CAM-Abutments eine Verringerung der technischen Komplikationen erzielen lässt. Aus der formulierten Zielsetzung ergibt sich folgende Fragestellung:

Welchen Einfluss nimmt die Verwendung von individuell hergestellten CAD/CAM-Abutments auf die technischen Komplikationen von provisorisch zementierten Einzelkronen im Seitenzahnbereich?

2 Patienten, Material und Methoden

2.1 Studiendesign

In der vorliegenden prospektiven Studie wurden Patienten in einer privaten zahnärztlichen Praxis (Hanau, Deutschland) mit Einzelzahnimplantaten und individuell CAD/CAM gefertigten einteiligen Titan- oder zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments versorgt und nachuntersucht. Die Patientengruppe mit Titanabutments wurde mit metallkeramischen Einzelkronen und die Gruppe mit Zirkonoxidkeramikabutments mit vollkeramischen Einzelkronen versorgt. Über die gesamte Beobachtungszeit wurden regelmäßig Nachkontrollen durchgeführt und technische Komplikationen sowie Verluste dokumentiert. Sämtliche Teilnehmer erteilten die schriftliche Einwilligung zur freiwilligen Teilnahme an der klinischen Studie. Der Ethikantrag der vorliegenden Studie (Antragsnummer: 9/5/13) wurde durch die Ethikkommission der Universitätsmedizin Göttingen geprüft und genehmigt.

2.2 Patienten

2.2.1 Einschlusskriterien

Patienten, die die nachfolgenden Einschlusskriterien in allen Punkten erfüllen, wurden in die vorliegende Studie eingeschlossen:

- Jede Implantatinsertion und die anschließende prothetische Versorgung wurden durch einen einzigen Behandler in einer privaten Zahnarztpraxis in Hanau durchgeführt.
- Einzelzahnimplantate desselben Typs (Ankylos®, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) als Ersatz für fehlende Zähne im Bereich der Prämolaren/Molaren im Oberkiefer und Unterkiefer. Ein Patient konnte mit einem oder mehreren Implantaten versorgt werden.
- In der Studie verwendete Kombinationen von Abutment und Einzelkrone: Kombination 1 (Abbildung 9), Kombination 2 (Abbildung 10).
- Einzelkronen wurden mit provisorischem Befestigungszement (TempBond, Fa. Kerr Hawe GmbH, Karlsruhe) eingegliedert.
- Die Patienten sollten mindestens einmal jährlich nachuntersucht werden.
- Vorhandene und vollständige Dokumentation über Verluste und aufgetretene Komplikationen des Implantates, Abutment und Einzelkronen.
- Die Patienten erteilten eine schriftliche Einwilligung zur Studienteilnahme.

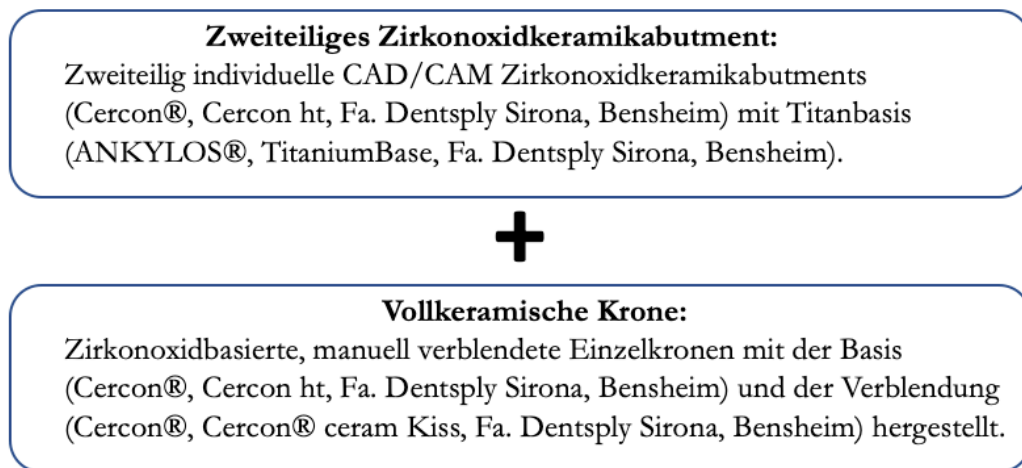


Abbildung 9: Kombination aus zweiteiligem Zirkonoxidkeramikabutment und vollkeramischer Krone

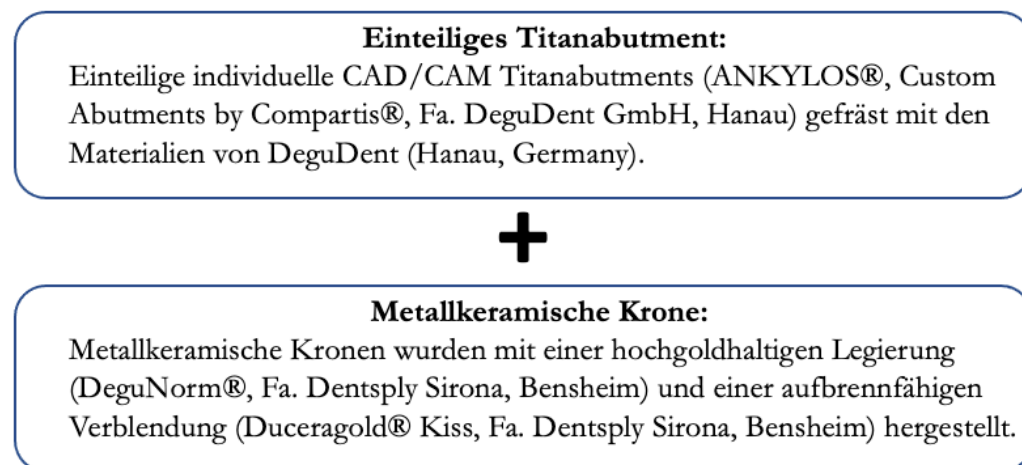


Abbildung 10: Kombination aus einteiligem Titanabutment und metallkeramischer Krone

2.2.2 Ausschlusskriterien

Für die Studie galten folgende Ausschlusskriterien:

- Keine regelmäßigen Nachuntersuchungen möglich.
- Patienten, die sich keiner Abschlussuntersuchung unterzogen haben.
- Fehlende Dokumentation aufgetretener Komplikationen und Verluste.
- Fehlender antagonistischer Kontakt mit feststehendem Zahnersatz oder natürlichem Zahn.

2.3 Material

2.3.1 Implantat

Die Patienten in dieser Studie wurden alle mit dem Implantatsystem (Ankylos®, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) versorgt. Das Ankylos®-Implantat besteht aus Titan Grade 2 und besitzt eine interne konusförmige Implantat-Abutment-Verbindung (Nentwig 2004) mit oder ohne Indexierung (Krebs et al. 2015). Die Oberfläche des Implantates wurde sandgestrahlt und hochtemperaturgeätzt. Diese Oberflächenbehandlung ist ebenfalls auf der Implantatschulter vorzufinden (Krebs et al. 2015). Das Makrodesign des Implantates weist äußerlich eine zylindrische Außengeometrie mit konischem Kern auf und besitzt hierdurch eine progressive Gewindeform (Abbildung 11) (Morris et al. 2004). Die Implantatschulter wurde nach dem Prinzip des Platform-Switching gestaltet. Dabei wird der Übergang vom Implantat zum Aufbau nach zentral verlagert (Abbildung 12) (Nentwig 2004). Es wurden nur Implantate mit einer Mindestlänge von 9,5 mm und einem Implantatdurchmesser von 3,5 mm oder 4,5 mm verwendet.

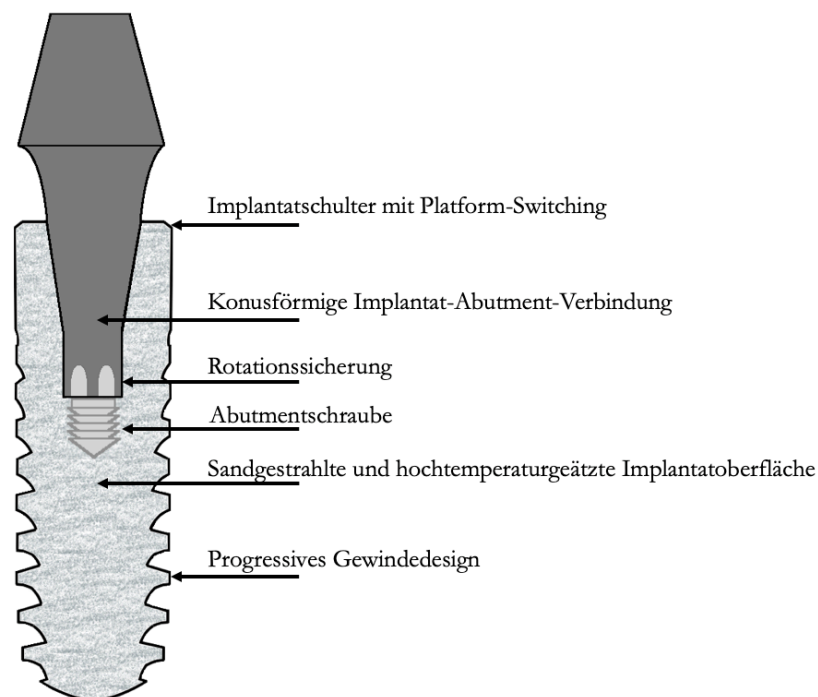


Abbildung 11: Schematische Darstellung Implantattyp Ankylos® mit Designmerkmalen

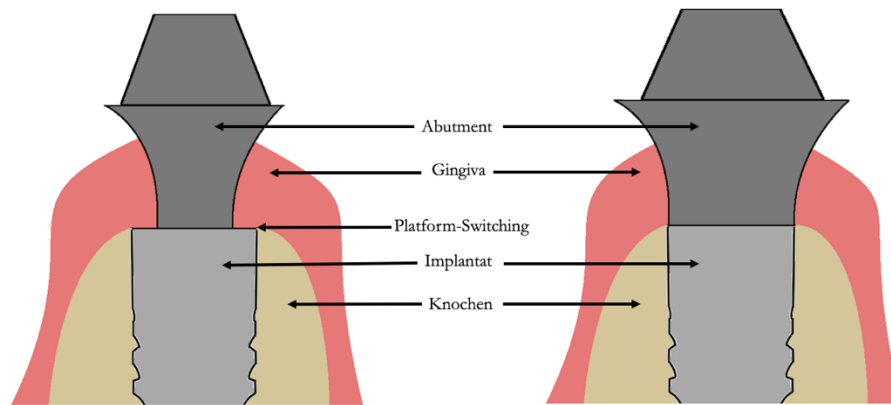


Abbildung 12: Darstellung der Implantatschulter links mit Platform-Switching und rechts ohne Platform-Switching

2.3.2 Zirkonoxidkeramikabutments

In der vorliegenden Studie wurden die Patienten sowohl mit individuellen zweiteiligen CAD/CAM hergestellten Zirkonoxidkeramikabutments (Abbildung 15) als auch mit individuellen einteiligen CAD/CAM-Titanabutments (Abbildung 16) versorgt.

Zweiteilige individuelle Zirkonoxidkeramikabutments bestehen aus einer Basis und einem individuell gefrästen Aufbau. Die Basis besitzt an einem Ende eine Implantat-Abutment-Verbindung und eine Abutmentschraube sowie an der anderen Seite eine Klebefläche zum Befestigen des individuell gefrästen Zirkonoxidaufbaus (Abbildung 13,14).

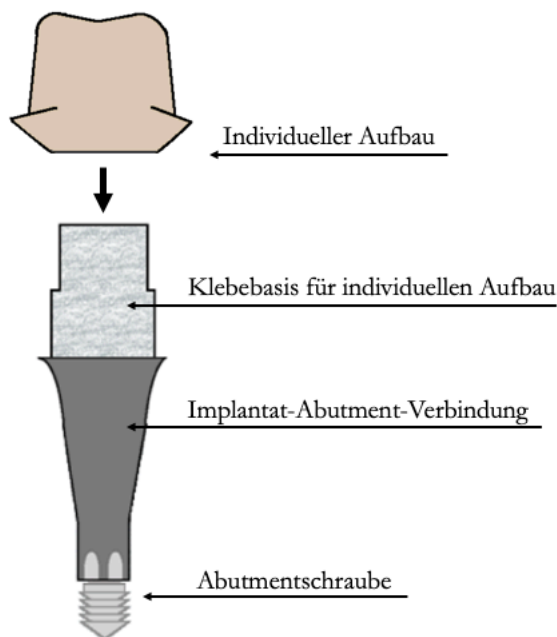


Abbildung 13: Aufbau der Titanbasis des zweiteiligen individuellen Zirkonoxidkeramikabutments

Die zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments in dieser Studie bestehen aus einer konfektionierten Titanbasis (Ankylos®, TitaniumBase, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) mit einer präfabrizierten Implantat-Abutment-Verbindung passend zum Ankylos®-Implantatsystem und einem individuell CAD/CAM gefrästen (Cercon® brain expert, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) Zirkonoxidkeramikaufbau (Cercon®, Cercon ht, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) (Abbildung 14).

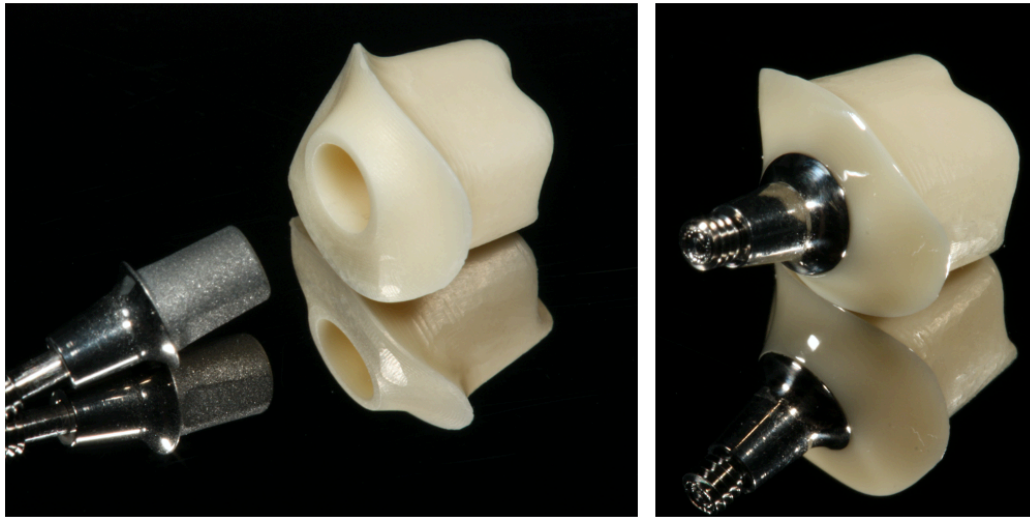


Abbildung 14: Zweiteiliges Zirkonoxidkeramikabutment

Cercon® ht besteht aus yttriumoxid-stabilisiertem Zirkonoxid nach Typ II, Klasse 5 entsprechend der DIN EN ISO 6872:2015 und erreicht laut Hersteller Biegefestigkeiten bis ca. 1200 MPa in der 3-Punkt-Biegeprüfung. Die Zusammensetzung für Cercon® ht beträgt (in Massen-%): Hauptbestandteil Zirkonoxid mit Yttriumoxid 5 %, Hafniumoxid < 3 % und Aluminiumoxid, Siliziumoxid < 1 % (gesamt 100 %). Dieses Material ist nach Herstellerangaben für den Front- und Seitenzahnbereich zugelassen und kann zum Beispiel als Krone, primäre Teleskopkronen, mehrgliedrige Brücken und zweiteiligen Abutments eingesetzt werden. Die Titanbasis des zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments besteht aus Titan Grade 5.

Nach einer Abformung mittels Pick-Up-Technik (Kapitel 2.4) wurde das entstandene Modell mit einer Scaneinheit (Cercon® eye, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) eingescannt. Das individuelle Zirkonoxidkeramikabutment wurde daraufhin mit einer Bearbeitungssoftware (Cercon® art, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) virtuell gestaltet. Nach der virtuellen Modellation des individuellen Aufbauteils wurde dieses mit einer Fräseinheit (Cercon® brain expert, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) gefräst, anschließend gesintert und auf der Titanbasis aufgepasst.

Die Titanbasis und der individuelle Aufbau aus Zirkonoxidkeramik wurden durch das zahn-technische Labor mithilfe eines Befestigungssystem (ResiCem, Fa. SHOFU Dental GmbH, Ratingen) verklebt. Die Abutmentschraube der Titanbasis wurde durch den Hersteller in das Abutment eingelasert.

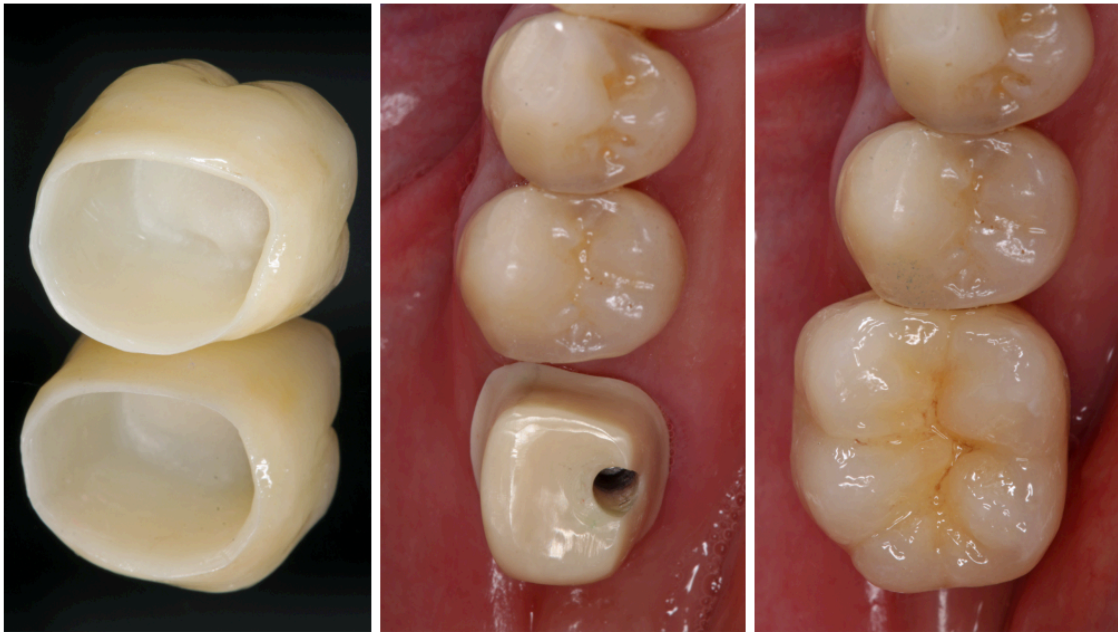


Abbildung 15: Individuelles zweiteiliges Zirkonoxidkeramikabutment mit vollkeramischer Einzelkrone

2.3.3 Titanabutments

Beim individuellen einteiligen CAD/CAM hergestellten Titanabutment werden sowohl die Implantat-Abutment-Verbindung zum passenden Implantatsystem als auch die patientenindividuelle Aufbauseite aus einem Stück Titan gefräst. Die Abutmentschraube wurde in den Schraubenkanal eingefügt und eine Gewindehülse mit dem Schraubenschaft durch den Hersteller verlasert. Eine Verklebung von Basis und Aufbau wie bei der Herstellung der zweiteiligen Abutments entfällt an dieser Stelle.

Nach einer Abformung mittels Pick-Up-Technik wurde das entstandene Modell mit einer Scaneinheit (Cercon® eye, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) eingescannt und das individuelle Aufbauteil mit der Bearbeitungssoftware (Cercon® art, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) modelliert. Der Datensatz wurde anschließend zur Fertigstellung an die Firma Compartis weitergeleitet. Die einteiligen patientenindividuellen Titanabutments (ANKYLOS®, Custom Abutments by Compartis®, DeguDent GmbH, Hanau) wurden zentral von der Firma Compartis (Hanau, Germany) mittels einer 7-achsigen CNC-Maschine gefertigt. Die Titanabutments bestanden aus Titan Grade 5 (Abbildung 16).

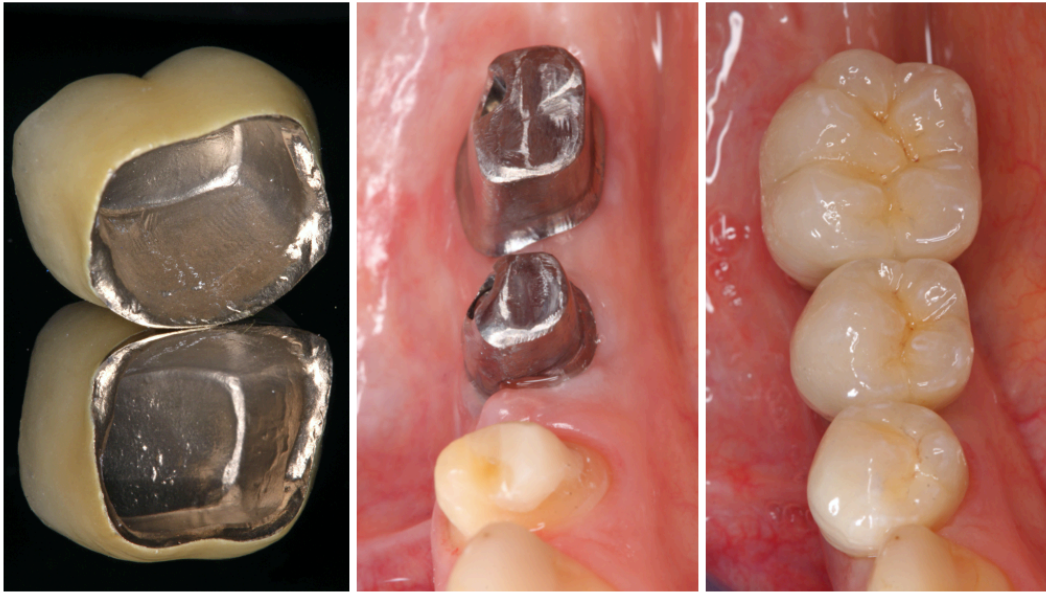


Abbildung 16: Individuelle einteilige Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen

2.3.4 Abutmentdesign

Alle Abutments aus dieser Studie wurden individuell mithilfe der Bearbeitungssoftware (Circon® art, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) modelliert. Die Kronen-Abutment-Grenze (spätere Zementgrenze) wurde so gelegt, dass diese 0,5-1 mm zirkulär subgingival verlief und sich zusätzlich weichteilunterstützend und girlandenförmig dem Gingivaverlauf anpasste.

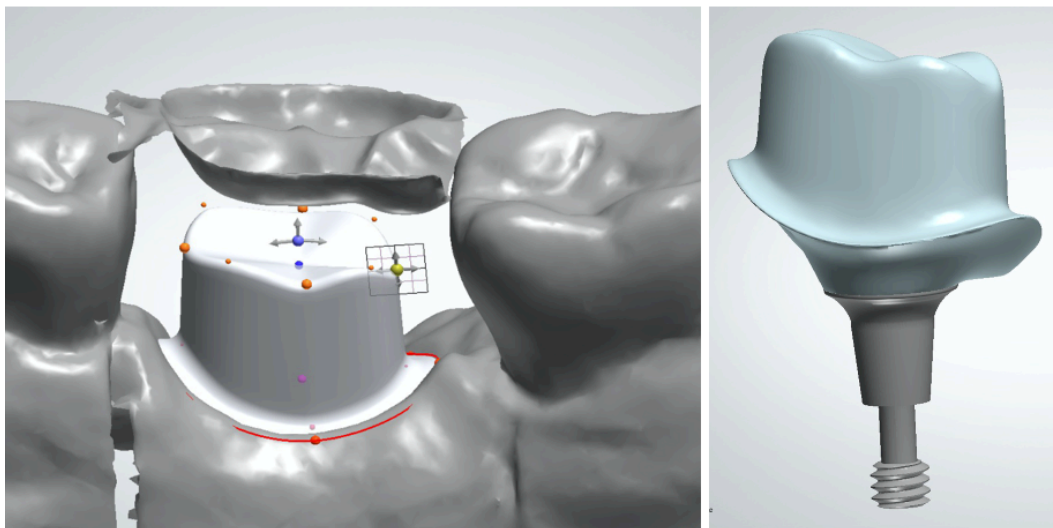


Abbildung 17: Virtuelle Gestaltung eines individuellen Abutments

Ebenfalls wurde das Abutment einem beschliffenen Zahnfeiler nachempfunden, sodass die Materialstärken und Präparationsempfehlungen der vollkeramischen und metallkeramischen Restaurationen materialgerecht eingehalten wurden und das Abutment optimal der Unterstützung diene (Abbildung 17).

Im Falle einer ungünstig anguliert stehenden Implantatachse wurde versucht, die Ausrichtung durch das individuelle Gestalten des Abutments zu korrigieren.

2.3.5 Einzelkronen

Alle individuellen einteiligen Abutments aus Titan wurden mit metallkeramischen Kronen versorgt. Das Gerüstmaterial bestand aus einer hochgoldhaltigen Legierung (DeguNorm®, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) und wurde nach einem klassischen Gussverfahren mit niedrigschmelzender Verblendkeramikmasse (Ducragold® kiss, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) vollverblendet. Die Zusammensetzung der hochgoldhaltigen Legierung teilt sich wie folgt auf (in Massen-%): Gold (Au): 73,8 m%, Platin (Pt): 9,0 %, Silber (Ag): 9,2 m%, Kupfer (Cu): 4,4 m%, Zink (Zn): 2,0 m%, Indium (In): 1,5 m%, Iridium (Ir): 0,1 m%. Dabei handelte es sich um eine extraharte Legierung vom Typ 4 gemäß ISO 1562 und ist aufbrennfähig gemäß ISO 9693 (Abbildung 18).

Alle individuellen zweiteiligen Abutments wurden mit vollkeramischen Einzelzahnkronen versorgt. Nach der Herstellung der Gerüste aus Zirkonoxidkeramik (Cercon®, Cercon ht, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) wurden diese mit einer Verblendkeramikmasse (Cercon® ceram Kiss, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) vollverblendet. Zur Herstellung des Gerüsts wurde ein CAD/CAM-System (Cercon® brain expert, Fa. DeguDent GmbH, Hanau) verwendet. Die Einzelkronen in der vorliegenden Studie wurden alle von einem zahntechnischen Labor in Deutschland hergestellt (Abbildung 18).



Abbildung 18: Metallkeramische (links) und vollkeramische Einzelkrone (rechts)

2.4 Behandlungsverlauf

Die Implantation wurde in einer Privatpraxis in Deutschland durch einen Zahnarzt mit spezialisierter Ausbildung in der Implantattherapie durchgeführt. Vor jeder geplanten Implantation wurden eine umfangreiche Anamnese und ein oraler Befund mit Analyse der oralen anatomischen Gegebenheiten durchgeführt. Präprothetisch wurde in jedem Fall eine digitale Volumentomographie durchgeführt sowie eine Bohrschablone für die Implantatbohrung erstellt. Die Implantatinsertion wurde nach den Standardprotokollen und Richtlinien des Herstellers durchgeführt. Nach der Implantatinsertion wurde das Implantat mit einer Verschlusschraube verschlossen und die Schleimhaut über dem Implantat vernäht. Eine geschlossene Einheilphase von drei Monaten im Unterkiefer und vier Monaten im Oberkiefer wurde eingehalten. Wenn ein Sinuslift durchgeführt wurde, musste das Implantat sechs Monate einheilen. Nach jeder Implantation wurde eine postoperative Panoramaschichtaufnahme angefertigt, um die korrekte Lage des Implantates zu überprüfen und einen röntgenologischen Ausgangsbefund sicherzustellen. Im Anschluss der gedeckten Einheilphase wurde das Implantat freigelegt und für 7-14 Tage ein konfektionierter Gingivaformer (Ankylos® Gingivaformer, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) eingeschraubt.

Die anschließende Abformung diente der genauen Bestimmung von Implantatposition und Implantatneigung und zur Überführung in eine Modellsituation. Die Abdrucknahme der verschraubten Abformpfosten erfolgte durch die Pick-Up-Technik mittels eines individuellen Löffels und einem Polyether-Abformmaterial (Impregum™, Fa. 3M Deutschland GmbH, Seefeld). Die Abformpfosten wurden vor der Abformung mit dem Implantat verschraubt. Der individuelle Löffel besitzt Austrittstellen für die Abformpfosten, um ein nachträgliches Lösen der Verschraubung nach der Abdrucknahme zu gewährleisten (Abbildung 19). Wenn die Verschraubung gelöst wurde, konnte der Abdruck samt Abformpfosten aus dem Patientenmund entnommen werden (Abbildung 20).

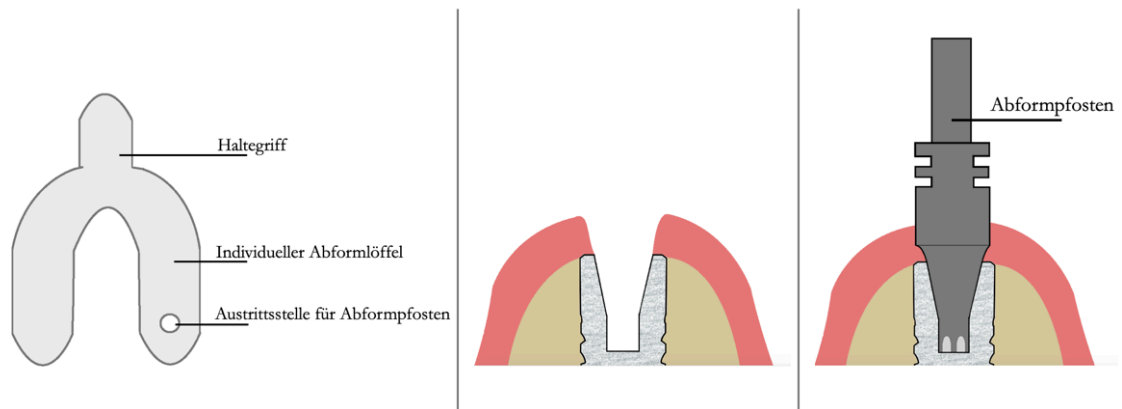


Abbildung 19: Individueller Abformlöffel (links), Implantat ohne verschraubten Abformpfosten (mitte) und mit verschraubten Abformpfosten (rechts)

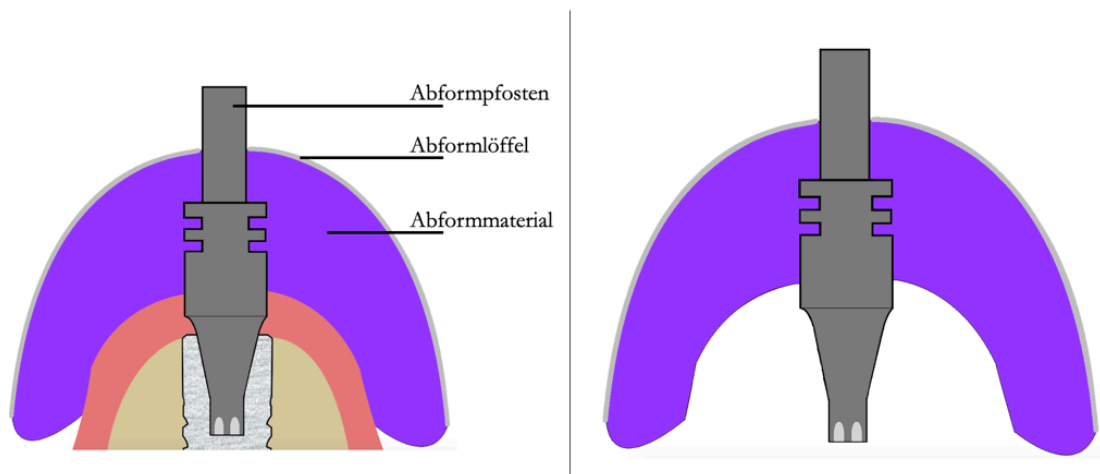


Abbildung 20: Abformpfosten mit Abformlöffel und Abformmaterial im Patientenmund (links) sowie Abformlöffel mit im Abformmaterial fixierten Abformpfosten außerhalb des Patientenmundes (rechts)

Bei der nachfolgenden Abutmenteinprobe wurde überprüft, ob die Kronen-Abutment-Grenze 0,5-1 mm zirkulär subgingival, girlandenförmig und weichteilunterstützend verläuft und den Design-Kriterien aus Kapitel 2.3.4 entspricht. Bei nicht korrekter Gestaltung des Abutments oder Lage der Kronen-Abutment-Grenze wurde nachpräpariert, bis die gewünschte Form oder Lage erreicht war. Bei der Einprobe des Abutments wurde eine Relationsbestimmung mit Modellierkunststoff (Pattern Resin, Fa. GC Germany GmbH, München) durchgeführt, um die aktuelle Bissituation für die Herstellung der Kronenversorgung zu registrieren.

Bei abschließender Eingliederung des Abutments wurde die Abutmentschraube mithilfe einer Ratsche (Ankylos®-Prothetikersche, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) mit einem Dreh-

moment von 15 Ncm angezogen und somit fest mit dem Implantat verschraubt. Die Einzelkronen wurden mit einem selbsthärtenden Zement auf Zinkoxid-Eugenol-Basis (TempBond, Fa. Kerr Hawe GmbH, Karlsruhe) eingesetzt. Zum Schutz der Abutmentschraube wurde die Abutmentöffnung mit temporären Füllmaterial (Cavit™, Fa. 3M Deutschland GmbH, Seefeld) verschlossen. Nach Insertion der Einzelkrone auf das individuelle Abutment wurde die statische und dynamische Okklusion überprüft und eingestellt. Jeder Patient wurde explizit über die Pflege des Implantates aufgeklärt und zur häuslichen Mundhygiene motiviert. Der Recall-Intervall entsprach mindestens zwölf Monate. Bei Rauchern oder Patienten mit parodontalen Vorerkrankungen wurde der Recall-Intervall auf mindestens drei oder sechs Monate festgelegt.

2.5 Zahnärztliche Nachuntersuchungen

Die Nachuntersuchungen wurden von einem zweiten Behandler, der nicht die Implantate setzte, in der gleichen Praxis durchgeführt. Die postimplantären Nachuntersuchungen, im Rahmen der professionellen Zahnreinigung oder UPT, umfasste das Erheben der Sondierungstiefen an vier Messpunkten an allen Zähnen und Implantaten, die Blutungspunkte auf Sondieren des Zahnfleisches (BOP) und des Approximalraum-Plaque-Index (API). Außerdem wurden die Patienten zur Implantatpflege und Mundhygiene remotiviert. Als Hilfsmittel für die Untersuchung wurden das zahnärztliche Grundbesteck und die Parodontalsonde (PCPUNC15, Fa. Hu-Friedy, Tuttlingen) verwendet. Bei einer Messstelle mit erhöhter Sondierungstiefe von 4 mm mit Sondierungbluten oder ≥ 5 mm erfolgte eine subgingivale Reinigung mit Schallscaler (KaVo SONICflex implant, Fa. KaVo Dental, Biberach) und es wurde mit einer stumpfen Kanüle Chlorhexidingel (Corsodyl 1 % Dental Gel, Fa. Glaxo-SmithKline Consumer Healthcare, Bülh) subgingival inseriert.

Im Rahmen der zahnärztlichen Nachuntersuchung wurden Implantate und Suprakonstruktionen (Einzelkrone und Abutment) hinsichtlich technischer Komplikationen und Verluste nachuntersucht. Dabei wurde überprüft, ob sich Implantat und Suprakonstruktion in Funktion befinden oder ob ein absoluter Verlust vorliegt. Ein absoluter Verlust lag dann vor, wenn die Suprakonstruktion aufgrund von zu starker Beschädigung erneuert werden musste und nicht in-situ verbleiben konnte. Als Endpunkte wurden dabei erfasst: Implantatverlust, Abutmentverlust oder Einzelkronenverlust (Tabelle 4). Komplikationen und Verluste wurden im Patientenverwaltungsprogramm und Prüfbogen (CRF) dokumentiert.

Tabelle 4: Beschreibung der Verluste

Endpunkt Verluste	Beschreibung
Implantatverlust	Implantat kann nicht mehr in-situ verbleiben
Abutmentverlust	Beschädigung des Abutments, Abutment ist nicht mehr in-situ/ kann nicht in-situ verbleiben
Einzelkronenverlust	Ausgeprägte Beschädigung der Einzelkrone, Einzelkrone muss neu angefertigt werden, Einzelkrone ist nach Retentionsverlust nicht mehr verfügbar

Zudem wurden folgende Komplikationen als Endpunkte erfasst: Fraktur von Verblendkeramik, Abutmentschraubenlockerung, Retentionsverlust der Einzelkrone und Verlust des Approximalkontaktes (Tabelle 5).

Tabelle 5: Beschreibung der Komplikationen

Endpunkt Komplikationen	Beschreibung	Intervention
Verblendkeramikfraktur	Verblendkeramik der Einzelkrone ist frakturiert/abgeplatzt (Chipping)	Bruchstelle wird geglättet und poliert.
Retentionsverlust der Einzelkrone	Die Einzelkrone ist dezementiert oder gelockert	Die Einzelkrone wird gesäubert und neu zementiert.
Abutmentschraubenlockerung	Die Abutmentschraube ist gelockert	Die Abutmentschraube wird mit 15 Ncm erneut festgezogen
Verlust des Approximalkontaktes	Approximalkontakt ist nicht mehr vorhanden	Keine Intervention (wenn keine Beschwerden oder biologische Komplikationen ausgelöst wurden)

2.6 Datenerfassung

Für die Datenerfassung wurde aus dem Patientenverwaltungsprogramm (Software Charly, Solutio GmbH, Holzgerlingen) der Praxis auf die in den jährlichen Kontrolluntersuchungen dokumentierten Patientendaten zugegriffen. Erhobene Daten wurden in einem CRF erfasst und anschließend in ein Tabellenkalkulationsprogramm (Excel, Microsoft® Corporation, Redmond, USA) auf einem praxisinternen Computer übertragen und verwaltet. Nachfolgend werden die erhobenen Daten aufgeführt:

- Patientennummer
- Geburtsdatum (zur Ermittlung des durchschnittlichen Alters der Patienten bei Eingliederung der Suprakonstruktion)
- Geschlecht (männlich/weiblich)
- Nikotinabusus (ja/nein)
- Parodontale Vorerkrankung: Der Patient gilt als parodontal vorerkrankt, wenn eine systematische parodontale Behandlung innerhalb der letzten fünf Jahre durchgeführt wurde.
- Implantatpositionen nach Zahnschema der Fédération Dentaire Internationale (FDI)
- Abutmentmaterial (einteiliges Titanabutment oder zweiteiliges Zirkonoxidkeramikabutment)
- Terminale Implantatposition (ja, wenn sich das Implantat als endständiger Zahn in der Zahnreihe befindet)
- Datum der Implantation
- Beobachtungszeitraum zwischen Implantationsdatum und letztem Kontrolltermin in Tagen
- Datum der Eingliederung der Suprakonstruktion (Abutment mit Einzelkrone)
- Beobachtungszeitraum zwischen Eingliederung der Suprakonstruktion und letztem Kontrolltermin in Tagen
- Letzter Kontrolltermin (Abschlussuntersuchung)
- Verlustdatum des Implantates/der Suprakonstruktion
- Datum einer eingetretenen Komplikation/Intervention des Implantates/der Suprakonstruktion
- Verlustursache: Implantatfraktur, Abutmentfraktur, Gerüstfraktur
- Grund für eine klinische Intervention: Retentionsverlust der Einzelkrone, fehlender Approximalkontakt, Abutmentschraubenlockerung, Verblendkeramikfraktur

2.7 Statistische Auswertung

Zu Beginn der Auswertung wurde eine deskriptive Statistik angefertigt. Dabei wurden folgende Daten vor und nach Dropout ermittelt:

- Anzahl der Patienten und Implantate/Abutments/ Einzelkronen
- Durchschnittliche Anzahl von Implantaten pro Patient
- Verteilung Patienten nach Geschlecht
- Durchschnittliches Alter der Patienten bei Implantation
- Eingliederungszeitraum (Suprakonstruktion)
- Durchschnittlicher Beobachtungszeitraum (Suprakonstruktion)
- Implantatpositionen (terminale Implantatposition, Verteilung Oberkiefer/Unterkiefer, Verteilung nach FDI)
- Verteilung der Abutments nach Restaurationsmaterialien (Titan- oder Zirkonoxidkeramikabutment)
- Anzahl an Parodontitis vorerkrankten Patienten/Raucher
- Häufigkeit und Art der Komplikationen oder des Versagens
- Dropout-Liste mit Beschreibung für den Grund des Dropouts

In der vorliegenden Studie wurden die statistischen Verfahren der Ereigniszeitanalyse mittels Kaplan-Meier-Methode (Kaplan und Meier 1958) verwendet sowie eine Analyse potentieller Risikofaktoren mittels Cox-Regression (Cox 1972) durchgeführt. Diese beiden aufgeführten statistischen Methoden sind die am häufigsten verwendeten Methoden für die Durchführung von Ereigniszeitanalysen in epidemiologischer und klinischer Forschung (ElHafeez et al. 2012).

Bei der Überlebenszeitanalyse (Ereigniszeitanalyse) mittels Kaplan-Meier-Methode wird die Überlebenszeit bis zum Zeitpunkt des Eintretens eines definierten Ereignisses/Endpunktes beobachtet. Das Ereignis muss nicht zwangsläufig mit dem Ereignis „Tod“ in Verbindung gebracht werden, sondern kann ein beliebiges Event wie z. B. das erstmalige Eintreten einer Komplikation nach Beginn einer Behandlung darstellen. Eine wichtige Voraussetzung bei der Überlebenszeitanalyse ist, dass der Startpunkt und der Endpunkt eindeutig definiert wurde (Rich et al. 2010; Zwiener et al. 2011).

Zu Beginn der Überlebenszeitanalyse ist nicht bekannt, wann oder ob der zu erwartende Endpunkt bei den zu untersuchenden Patienten in der gesamten Beobachtungszeit der Studie eintritt. Sollte der Endpunkt in der Beobachtungszeit nicht eingetreten sein, spricht man von einer zensierten Beobachtung. Sollten Patienten im Laufe der Studie aussteigen (lost-to-follow up) oder wegen anderer Gründe (z. B. unerwarteter Tod durch Verkehrsunfall) aus

der Studie ausscheiden, spricht man ebenfalls von zensierten Beobachtungen (Altman und Bland 1998; Ziegler et al. 2007; Rich et al. 2010).

Bei der Auswertung müssen sowohl die nicht zensierten Beobachtungen bis zum Eintreten des Endpunktes als auch die zensierten Beobachtungen berücksichtigt werden, da es sonst zu fehlerhaften Berechnungen kommen würde (Zwiener et al. 2011). Unter Berücksichtigung der Zensierungen wird mithilfe der Kaplan-Meier-Methode nach jedem aufgetretenen Ereignis die Überlebens-Erfolgswahrscheinlichkeit für ein Zeitintervall neu berechnet. Die Beobachtungsintervalle werden durch die eingetretenen Ereignisse/Endpunkte vorgegeben (Ziegler et al. 2007). Die geschätzten Überlebens- Erfolgswahrscheinlichkeiten sagen aus, bei welcher Anzahl von Patienten/Objekten ein bestimmter Endpunkt (z. B. Auftreten eines Verlustes oder einer Komplikation) zu einem Zeitpunkt nicht aufgetreten ist. Aus den Überlebenszeiten und den Überlebenswahrscheinlichkeiten lassen sich Kaplan-Meier-Kurven erstellen. Dafür werden die geschätzten Überlebenswahrscheinlichkeiten auf der Y-Achse und die Überlebenszeiten auf der X-Achse aufgetragen (Zwiener et al. 2011). Aus den Kaplan-Meier-Kurven können für ausgewählte Zeitpunkte die geschätzten Überlebens- und Erfolgsraten abgelesen werden.

Das Cox-Regressionsmodell dient als Verfahren zur Analyse einer potentiellen Einflussnahme von Risikofaktoren auf Überlebenszeiten (Hedderich und Sachs 2012). Ein wichtiger Ansatz im Cox-Modell ist dazu die Bestimmung des Hazards (Risikos) beziehungsweise der Verwendung der Hazard-Funktion $h(t)$.

$$h(t) = \frac{\text{Anzahl der Personen mit Zielergebnis im Intervall, das bei } t \text{ beginnt}}{(\text{Anzahl an Personen, die bis } t \text{ überleben}) \times \text{Intervallbreite}}$$

Das Hazard gibt ein geschätztes Risiko an, dass ein Ereignis innerhalb einer zu untersuchenden Gruppe zu einem bestimmten Zeitpunkt eintritt. Aus den Hazards zwei zu vergleichender Gruppen kann ein Hazard-Ratio (Risikoverhältnis, HR) ermittelt werden. Dafür wird mit den Hazard-Funktionen aus zwei Gruppen (z. B. A und B) ein Quotient gebildet.

$$HR = \frac{h_A(t)}{h_B(t)} = \text{const.}$$

Das ermittelte Hazard-Ratio wird als ein deskriptives Maß zur Beschreibung des Risikos für das Eintreten eines Ereignisses der einen Gruppe im Vergleich zu einer anderen Gruppe verwendet. Eine Voraussetzung für das Cox-Regressionsmodell ist, dass der Hazard-Ratio über die Zeit als konstant angenommen wird. Dies setzt wiederum voraus, dass sich die Hazards der beiden Gruppen proportional zueinander verhalten. Eine in der Kaplan-Meier-

Kurve abzeichnende Überlegenheit einer Gruppe, ohne sich kreuzende Überlebensfunktionen beider Gruppen, kann auf eine Proportionalität hinweisen (Ziegler et al. 2004; Zwiener et al. 2011).

In der statistischen Auswertung dieser Studie wurden die Überlebensraten für die Implantate, Abutments und Einzelkronen sowie die Erfolgsraten der Abutments und Einzelkronen ermittelt. Die Suprakonstruktionen und Implantate wurden als statistische Einheit definiert. Der Startpunkt ist der Tag der Eingliederung der Suprakonstruktion (Abutment und Einzelkrone). Als Endpunkt wurde das Eintreten eines Ereignisses wie der absolute Verlust oder eine aufgetretene Komplikation festgelegt (Tabelle 4 und 5). Verschiedene Beobachtungen an einem Patienten (ein Patient konnte mehrere Implantate besitzen) waren abhängig und wurden im Rahmen der adjustierten Varianzschätzung berücksichtigt. Das Überleben (Survival) und der prothetische Erfolg (Success) der Suprakonstruktion waren die in dieser Studie abhängige Variablen. Das Überleben und der Erfolg wurden wie folgt definiert:

- Überleben: Die Suprakonstruktion befindet sich bei der letzten Kontrolluntersuchung in-situ (in-situ-Kriterium) ohne absoluten Verlust (Pjetursson et al. 2012; Rinke et al. 2015).
- Prothetischer Erfolg: Die Suprakonstruktion bleibt innerhalb der Beobachtungszeit ohne technische Komplikationen. Es war keine Intervention nötig (Pjetursson et al. 2012).

Wenn bei den zu untersuchenden Objekten kein Verlust oder keine Komplikation eingetreten war, ermittelte sich die Beobachtungszeit aus dem Eingliederungsdatum der Suprakonstruktion sowie aus dem letzten Kontrolltermin (Abschlussuntersuchung). Sollte ein Verlust stattgefunden oder eine Komplikation aufgetreten sein, wurde das Datum der Therapie des Verlustes (Verlustdatum) und das Datum der Intervention (Eventdatum) der Komplikation notiert. Bei der Anwendung der Cox-Regression wurde die terminale Implantatposition und die Tatsache, ob es sich bei dem Einzelzahnimplantat um einen zu ersetzenden Molaren handelte, zur Analyse potentieller Einflussfaktoren auf die Erfolgswahrscheinlichkeiten untersucht. Für das Signifikanzniveau wurde ein α -Wert von 5 % definiert. Für die statistische Auswertung wurde die Open-Source-Software R (Version 3.4.0, www.r-project.org) mit der Funktion „prodlm“ verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 Studienpopulation

Zu Beginn der Studie wurden 74 Patienten (39 weiblich/35 männlich) mit insgesamt 123 Implantaten eingeschlossen. Von den 123 Implantaten wurden 93 mit einteiligen Titanabutments und 30 mit zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments versorgt (Abbildung 21).

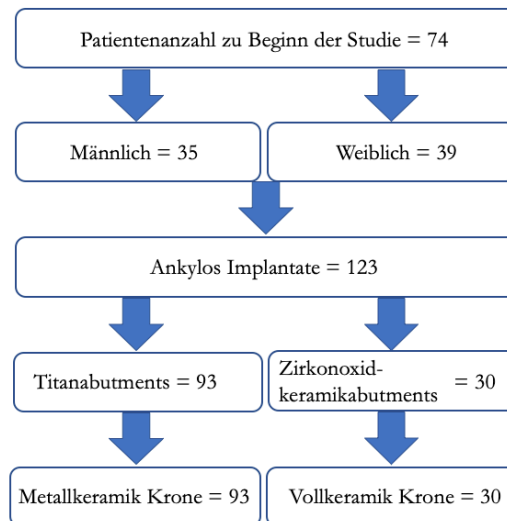


Abbildung 21: Ursprüngliche Studienpopulation

15 Patienten konnten im Nachbeobachtungszeitraum nicht kontinuierlich nachverfolgt werden (Drop-Outs). 59 Patienten mit 91 Implantaten nahmen an der 5-Jahres-Nachuntersuchung teil (Abbildung 22).

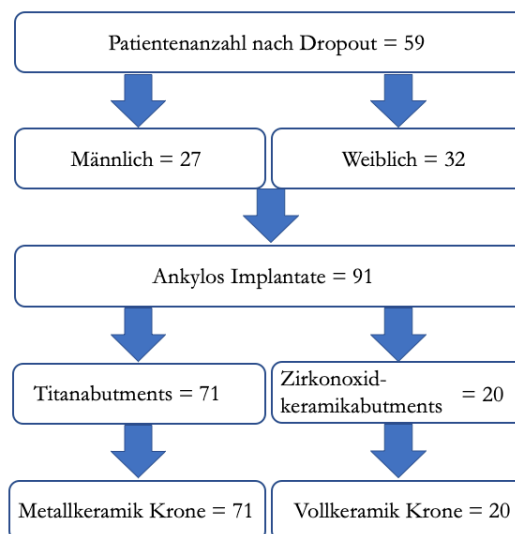


Abbildung 22: Patientenanzahl der bis zum letzten Untersuchungstermin nachbeobachteten Patienten

Die Dropouts der vorliegenden Studie entstanden durch unvollständige Patientendaten oder das unregelmäßige Erscheinen der Patienten am Recall. Im Folgenden werden die Dropouts aufgeführt:

- drei Patienten mit insgesamt vier Implantaten haben den Zahnarzt gewechselt
- zwei Patienten mit insgesamt sechs Implantaten sind verzogen
- sieben Patienten mit 16 Implantaten haben unregelmäßig am Recall teilgenommen
- zwei Patienten mit insgesamt vier Implantaten haben keine Einwilligung zur erneuten Datenerhebung unterschrieben
- ein Patient mit zwei Implantaten hatte im Gegenkiefer keine feste Bezaehlung (Totalprothese im Gegenkiefer)

Insgesamt konnten 59 Patienten (32 weiblich/27 männlich) mit 91 Implantaten an der letzten Nachuntersuchung teilnehmen und werden nachfolgend detailliert beschrieben. Der Altersdurchschnitt am Tag der Implantation lag bei 52 Jahren mit einer Standardabweichung von ± 11 Jahren, wobei der jüngste Teilnehmer in der Studie 35 und der älteste 78 Jahre alt gewesen ist. Insgesamt wurden 91 Suprakonstruktionen eingegliedert. Die Beobachtungszeit der Abutments mit Einzelkronen lag im Durchschnitt bei 62 Monaten mit einer Standardabweichung von ± 16 Monaten.

Von den 91 Implantaten wurden 71 Implantate mit Titanabutments und 20 Implantate mit Zirkonoxidkeramikabutments versorgt (Abbildung 23). Dabei waren 29 der Implantate im Oberkiefer und 62 Implantate im Unterkiefer inseriert. Patienten in der Studie konnten sowohl mit einem als auch mit mehreren Implantaten versorgt worden sein. Die durchschnittliche Verteilung der Implantate pro Patient lag bei 1,54 mit einer Standardabweichung von $\pm 1,07$.

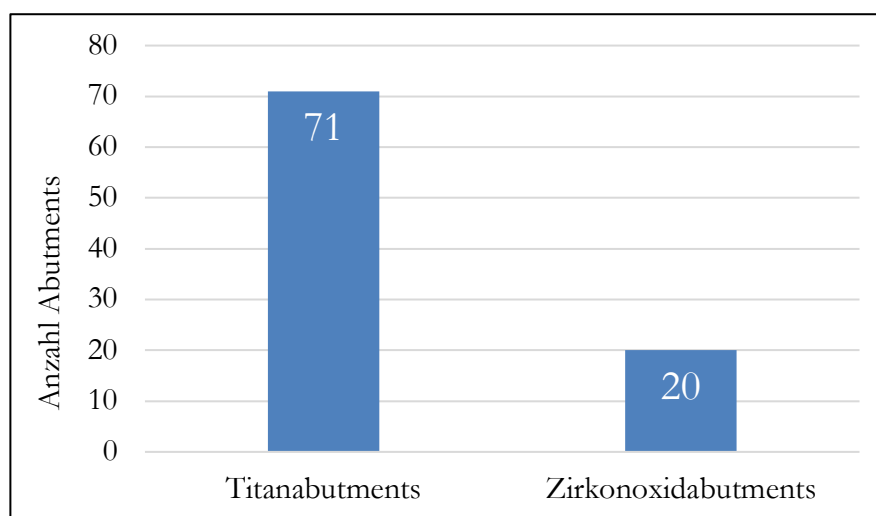


Abbildung 23: Verteilung der Restaurationen nach Materialien

Die Verteilung der Implantatpositionen nach dem Zahnschema der FDI und verwendeten Abutmentmaterial zeigen die Tabellen 6-8. Insgesamt standen 34 von 91 Implantaten (37,36 %) an einer terminalen Position.

Tabelle 6: Gesamtüberblick über die Verteilung aller Titan- und Zirkonoxidkeramikabutments

		Anzahl der Titan- und Zirkonoxidkeramikabutments im Oberkiefer = 29							
Anzahl Oberkiefer		3	10	2	2	4	2	5	1
Position	17	16	15	14	24	25	26	27	
	47	46	45	44	34	35	36	37	
Anzahl Unterkiefer		2	28	7	1	1	3	17	3
		Anzahl der Titan- und Zirkonoxidkeramikabutments im Unterkiefer = 62							

Tabelle 7: Verteilung der Titanabutments

		Anzahl der Titanabutments im Oberkiefer = 21							
Anzahl Oberkiefer		3	9	0	1	2	0	5	1
Position	17	16	15	14	24	25	26	27	
	47	46	45	44	34	35	36	37	
Anzahl Unterkiefer		2	23	5	0	1	3	13	3
		Anzahl der Titanabutments im Unterkiefer = 50							

Tabelle 8: Verteilung der Zirkonoxidkeramikabutments

		Anzahl der Zirkonoxidkeramikabutments im Oberkiefer = 8							
Anzahl Oberkiefer		0	1	2	1	2	2	0	0
Position	17	16	15	14	24	25	26	27	
	47	46	45	44	34	35	36	37	
Anzahl Unterkiefer		0	5	2	1	0	0	4	0
		Anzahl der Zirkonoxidkeramikabutments im Unterkiefer = 12							

Innerhalb des Patientenkollektivs galten 34 von 59 Patienten (entspricht 57,62 %) als parodontal vorerkrankt und nahmen unter anderem regelmäßig an der UPT teil. Zudem waren 12 von 59 Patienten (entspricht 22,33 %) Raucher.

3.2 Komplikationen und Verluste

Innerhalb der Beobachtungszeit wurden sechs Komplikationen und drei Verluste registriert. Die Komplikationen und Verluste sind alle bei den Implantaten aufgetreten, welche mit einteiligen Titanabutments und metallkeramischen Kronen (Titangruppe) versorgt wurden. In der Gruppe, in der die Implantate mit zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments und vollkeramischen Kronen (Zirkonoxidgruppe) versorgt wurden, gab es weder Komplikationen noch Verluste. In Tabelle 9 sind sowohl die Verteilung der Komplikationen und Verluste aufgeführt als auch die ermittelte implantatbezogene Prävalenz. Die implantatbezogene Gesamtprävalenz für technische Komplikationen bei Abutments und Einzelkronen beträgt 6,59 % und die der Verluste 3,29 %.

Tabelle 9: Übersicht Komplikationen und Verluste mit implantatbezogener Prävalenz

Komplikationen	Titan- gruppe	Zirkonoxidgruppe	Prävalenz
Retentionsverlust Krone	2	0	2,19 %
Fraktur der Verblendkeramik	1	0	1,09 %
Abutmentschraubenlockerung	1	0	1,09 %
Verlust Approximalkontakt	2	0	2,19 %
Verluste	Titan- gruppe	Zirkonoxidgruppe	Prävalenz
Einzelkrone (Neuanfertigung wegen eines Approximalkontaktverlustes)	1	0	1,09 %
Abutmentfraktur	2	0	2,19 %
Implantatverlust	0	0	0 %

Bei den Retentionsverlusten dezementierten sich metallkeramische Einzelkronen an den Positionen 35 und 36. Nach Eintreten dieser Komplikation wurde das Kroneninnere und das Abutment von Zementresten befreit, mit Schaumstoffpellet und Alkohol (95 %) gereinigt

sowie erneut mit dem provisorischen Befestigungsmaterial (TempBond, Fa. Kerr Hawe GmbH, Karlsruhe) eingesetzt.

Im Fall der einzigen Abutmentschraubenlockerung eines Implantates an Position 46 musste die Metallkeramikkrone auf dem Abutment entfernt werden, um anschließend die Abutmentschraube mithilfe der Prothetikratsche mit 15 Ncm erneut zu befestigen. Die entfernte Einzelkrone wurde mit provisorischem Befestigungsmaterial (TempBond, Fa. Kerr Hawe GmbH, Karlsruhe) rezementiert.

Die einzige Verblendkeramikfraktur trat an einer metallkeramischen Krone an der Position 46 auf. In diesem Fall wurde aufgrund der kleinen Größe der Verblendkeramikfraktur lediglich die Frakturstelle poliert.

An zwei Implantaten an den Positionen 36 und 46 kam es zu einem Verlust des Approximalkontaktes. Daran schloss sich keine Intervention an, da weder Beschwerden noch biologische Komplikationen aufgetreten waren.

Innerhalb der Beobachtungszeit frakturierten zwei Titanabutments an den terminal stehenden Implantaten an Position 46 und 26. Hierbei handelte es sich um absolute Verluste, weshalb die Neuanfertigung der Titanabutments unabdingbar war. An einem terminal stehenden Implantat (Region 16) kam es zu einem Approximalkontaktverlust. Hieraus resultierte der Verlust einer metallkeramischen Einzelkrone aufgrund von Neuanfertigung.

3.3 Ereigniszeitanalyse mittels Kaplan-Meier-Methode

3.3.1 Geschätzte Überlebenswahrscheinlichkeiten

Alle Implantate in dieser Studie befanden sich nach 72 Monaten Beobachtungszeit in-situ. Die Gesamtüberlebensrate der Implantate lag somit in der Titan- und Zirkonoxidgruppe bei 100 %. Die Gesamtüberlebensrate beider Abutmenttypen lag nach 72 Monaten Beobachtungszeit bei 98 % (95 % KI: 95,0 - 100) und die aller Einzelkronen bei 99 % (95 % KI: 97,0 - 100).

Die Überlebensraten für zweiteilige Zirkonoxidkeramikabutments lagen nach 72 Monaten Beobachtungszeit bei 100 %. Innerhalb der einteiligen Titanabutments sind zwei Verluste aufgrund von Abutmentfrakturen aufgetreten. Hierbei ergab sich nach 72 Monaten eine Überlebensrate von 97 % (95 % KI: 93,0 - 100) (Abbildung 24).

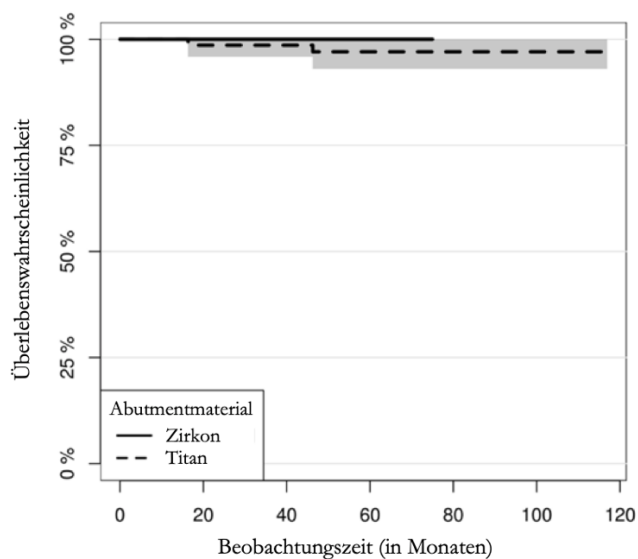


Abbildung 24: Überlebensraten von einteiligen Titanabutments und zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments

Innerhalb der Titangruppe musste eine metallkeramische Einzelkrone aufgrund eines Approximalkontaktverlustes mit einhergehender verstärkter Einlagerung von Speiseresten und Ausbildung einer Mukositis neu angefertigt werden. Dadurch ergab sich nach 72 Monaten Beobachtungszeit eine Überlebensrate von 99 % (95 % KI: 96,0 - 100). Die Überlebensrate der vollkeramischen Einzelkronen in der Zirkonoxidgruppe lag bei 100 %.

Tabelle 10: Zusammenfassung 6-Jahres-Überlebensraten der vorliegenden Studie

	6-Jahres-Überlebensrate
Gesamtheit der Implantate	100 %
CAD/CAM-Titanabutments	97 % (95 % KI: 93,0 - 100)
CAD/CAM- Zirkonoxidkeramikabutments	100 %
Titanabutments + Zirkonoxidkeramikabutments	98 % (95 % KI: 95,0 - 100)
Metallkeramische Einzelkronen	99 % (95 % KI: 96,0 - 100)
Vollkeramische Einzelkronen	100 %
Metallkeramische + vollkeramische Einzelkronen	99 % (95 % KI: 97,0 - 100)

3.3.2 Geschätzte Erfolgswahrscheinlichkeiten

Nach 72 Monaten Beobachtungszeit ergab sich eine Gesamterfolgsrate für Abutments und Einzelkronen aus der Titangruppe und Zirkonoxidgruppe von 89 % (95 % KI: 82,0 - 96,0) (Abbildung 25).

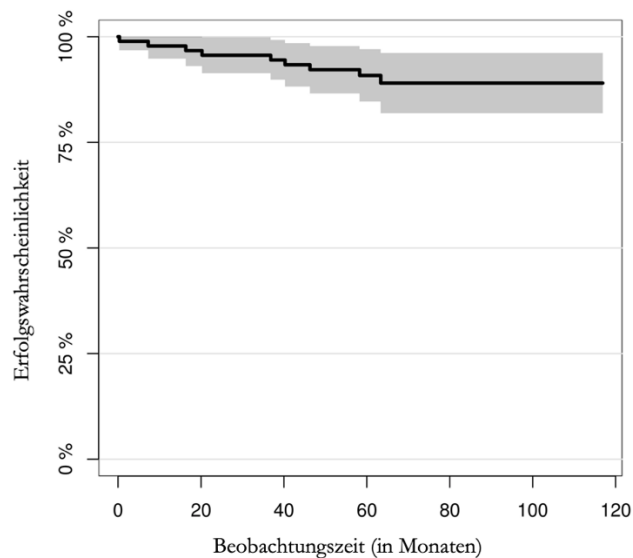


Abbildung 25: Gesamterfolgsrate der Titan- und Zirkonoxidkeramikabutments mit Suprakonstruktion

Die Zirkonoxidgruppe zeigte über den Beobachtungszeitraum von 72 Monaten keine Komplikationen, wodurch sich eine Erfolgsrate von 100 % ergab. Innerhalb der Titangruppe ergab sich über den Beobachtungszeitraum von 72 Monaten sechs Komplikationen sowie drei Verluste und somit eine Erfolgsrate von 86 % (95 % KI: 77,0 - 95,0) (Abbildung 26).

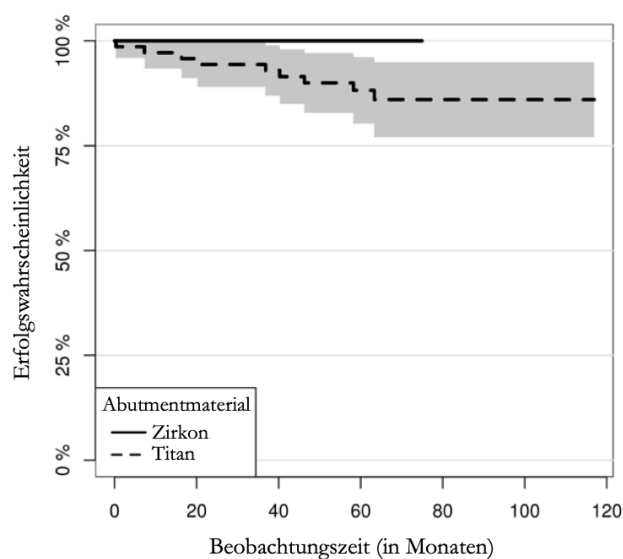


Abbildung 26: Geschätzte Erfolgsraten für einteilige Titanabutments und zweiteiligen Zirkonoxidkeramikabutments mit Suprakonstruktion im Vergleich

Insgesamt ist in der Beobachtungszeit von 72 Monaten eine Verblendkeramikfraktur aufgetreten. Hieraus ergab sich eine Gesamterfolgsrate von 99 % (95 % KI: 97,0 - 100) für die Komplikation Verblendkeramikfraktur bei metallkeramischen Einzelkronen gestützt von einteiligen individuellen Titanabutments und vollkeramischen Einzelkronen gestützt von zweiseitigen individuellen Zirkonoxidkeramikabutments.

Die einzige Verblendkeramikfraktur ist unter den metallkeramischen Einzelkronen aufgetreten, weshalb hier eine Erfolgsrate von 99 % (95 % KI: 96,0 - 100) nach 72 Monaten zu verzeichnen ist. Bei den vollkeramischen Kronen ergab sich dementsprechend eine Erfolgsrate von 100 % nach 72 Monaten (Abbildung 27).

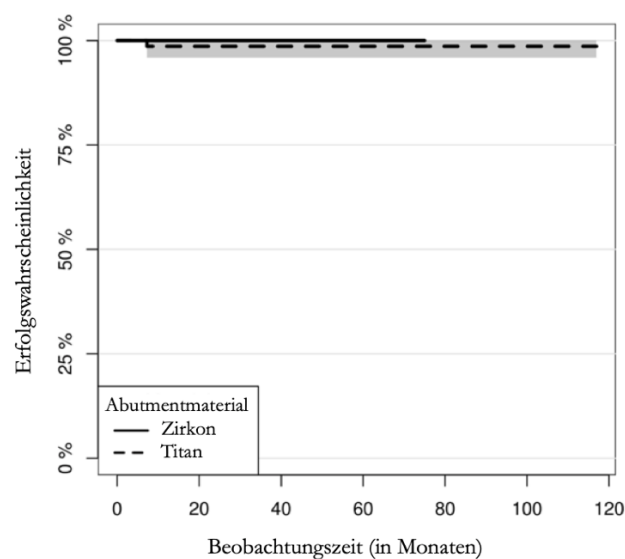


Abbildung 27: Übersicht der Erfolgsraten der Komplikation Verblendkeramikfraktur von Einzelkronen beider Gruppen im Vergleich

Der Verlauf der Funktionen in Abbildung 28 verdeutlicht, dass sich für die Einzelkronen und Abutments der Implantate in terminaler Position geringere Erfolgsraten abzeichneten. Die Erfolgsraten in terminaler Position lag nach 72 Monaten Beobachtungszeit bei 85 % (95 % KI: 73,0 - 97,0) und die in zahnbegrenzter Position bei 91 % (95 % KI: 83,0 - 100) (Abbildung 28).

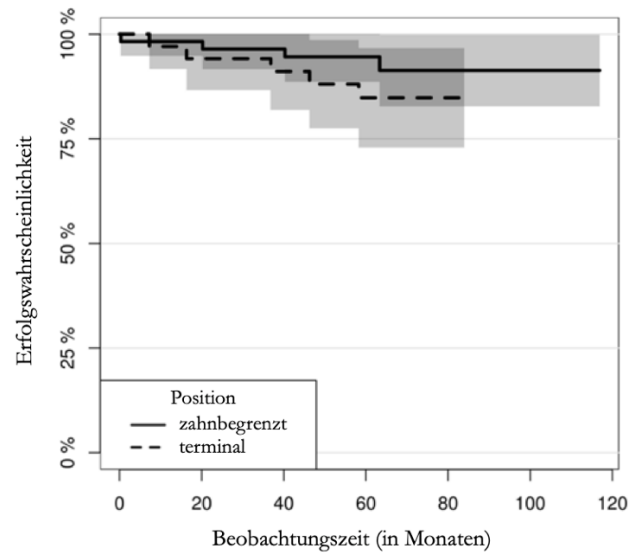


Abbildung 28: Prothetische Erfolgsrate in terminaler und zahnbegrenzter Implantatposition

Bei Implantaten in Position von Prämolaren ergaben sich im Verlauf höhere Erfolgsraten für die dazugehörigen Suprakonstruktionen als in der Position von Molaren (Abbildung 29). Die Erfolgsraten bei ersetzten Molaren lag nach 72 Monaten Beobachtungszeit bei 87 % (95 % KI: 78,0 - 96,0) und die der ersetzten Prämolaren bei 95 % (95 % KI: 87,0 - 100) (Abbildung 29). Die Tabelle 11 fasst die 6-Jahres-Erfolgsraten der vorliegenden Studie zusammen.

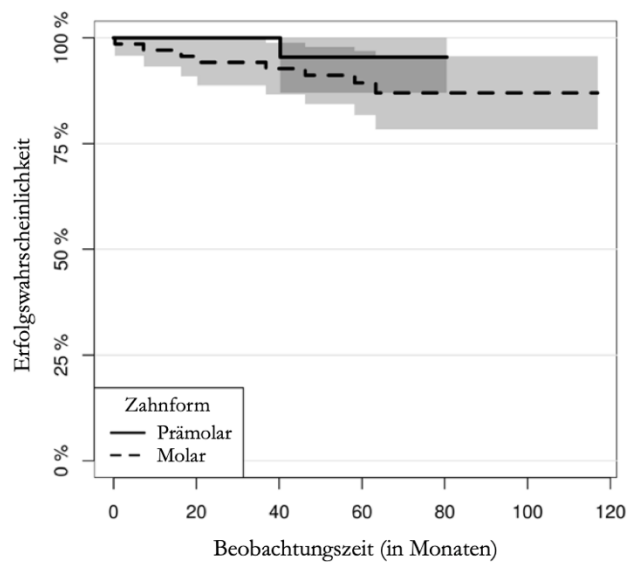


Abbildung 29: Prothetische Erfolgsraten von Molaren und Prämolaren

Tabelle 11: Zusammenfassung der 6-Jahres-Erfolgsraten der vorliegenden Studie

	6-Jahres-Erfolgsrate
Titangruppe (Abutment + Einzelkrone)	86 % (95 % KI: 77,0 - 95,0)
Zirkonoxidgruppe (Abutment + Einzelkrone)	100 %
Gesamt: Titangruppe + Zirkonoxidgruppe	89 % (95 % KI: 82,0 - 96,0)
Terminale Position	85 % (95 % KI: 73,0 - 97,0)
Zahnbegrenzte Position	91 % (95 % KI: 83,0 - 100)
Zahnform Molar	87 % (95 % KI: 78,0 - 96,0)
Zahnform Prämolare	95 % (95 % KI: 87,0 - 100)

3.4 Risikoanalyse mittels Cox-Regression

Für die Untersuchung potentieller Risikofaktoren wurde eine univariante Cox-Regressionsanalyse durchgeführt. Für den Endpunkt des prothetischen Erfolges wurden zwei Variablen untersucht. Die erste Variable bezog sich auf die Implantatposition (terminal/zahnbegrenzt). Bei der zweiten Variablen wurde die zu ersetzende Zahnform (Molar/Prämolare) untersucht. Aufgrund der geringen Anzahl von Verlusten wurde für den Endpunkt Überleben keine Cox-Regressionsanalyse durchgeführt.

Bei einem zu ersetzenden Molaren ist das Risiko einer prothetischen Komplikation nach 72 Monaten 2,7-fach (Hazard-Ratio) größer als im Vergleich zu Implantaten an der Stelle eines Prämolaren. Es konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p = 0,3467$).

Das Risiko einer prothetischen Komplikation ist nach 72 Monaten in einer terminalen Implantatposition 2,03-fach (Hazard-Ratio) größer als bei einem Implantat in zahnbegrenzter Position. Hierbei wurde kein signifikanter Unterschied ($p = 0,2859$) festgestellt (Tabelle 12).

Die Cox-Regressionsanalyse zeigte, dass weder die zu ersetzende Zahnform „Molar/Prämolare“ noch die Implantatposition „terminal/zahnbegrenzt“ als Variablen signifikanten Einfluss auf die prothetischen Erfolgsraten von Abutment und Einzelkrone nahmen.

Tabelle 12: Risikovariablen mit dazugehörigen Konfidenzintervall und Signifikanz

Risikovariable	Hazard-Ratio	95 % Konfidenzintervall	p
Zahnform Molar	2,7	0,341 - 21,414	0,3467
Implantatposition Terminal	2,03	0,553 - 7,47	0,2859

4 Diskussion

4.1 Zusammenfassung der Kernaussagen

Die in dieser prospektiven Studie ermittelten Überlebensraten, Erfolgsraten und technischen Komplikationen beschränken sich auf Einzelzahnimplantate und Suprakonstruktionen im Seitenzahnbereich. Die Ergebnisse beziehen sich auf Implantate, welche mit individuellen einteiligen CAD/CAM-Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen oder individuellen zweiteiligen CAD/CAM- Zirkonoxidkeramikabutments mit vollkeramischen Einzelkronen versorgt wurden. Alle Einzelzahnkronen wurden mit einem provisorischen Befestigungszement (TempBond, Fa. Kerr Hawe GmbH, Karlsruhe) auf individuellen Abutments zementiert.

In der vorliegenden Studie wurden hohe 6-Jahres-Überlebensraten für Implantate (100 %), CAD/CAM-Abutments 98 % (95 % KI: 95,0 - 100) und metallkeramische sowie vollkeramische Einzelkronen 99 % (95 % KI: 97,0 - 100) ermittelt. Die 6-Jahres-Erfolgsrate der CAD/CAM-Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen und zweiteiligen CAD/CAM- Zirkonoxidkeramikabutments mit vollkeramischen Einzelkronen beträgt 89 % (95 % KI: 82,0 - 96,0). Insgesamt ergab sich eine jährliche Gesamtfehlerrate von 1,32 % für technische Komplikationen bei Einzelkronen und Abutments. Im Einzelnen wurden jährliche Ereignisraten für die Verblendkeramikfraktur (0,22 %), Retentionsverluste (0,44 %), Abutmentschraubenlockerung (0,22 %) und Approximalkontaktverluste (0,44 %) konstatiert. Alle technischen Komplikationen sind der Gruppe der einteiligen CAD/CAM-Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen zuzuordnen. Anhand der vorliegenden Studie kann jedoch keine Aussage getroffen werden, ob die Materialauswahl des Abutments einen signifikanten Einfluss auf die Erfolgs-, Überlebens- und Komplikationsraten nimmt.

Potentiellen Risikofaktoren wie die Position des Implantates (zahnbegrenzt/terminal) und der zu ersetzenden Zahnform (Molar/Prämolar) nahmen in dieser Studie keinen signifikanten Einfluss auf die Erfolgsraten der Suprakonstruktionen. Tendenzen, dass die terminale Implantatposition und die zu ersetzende Zahnform Molar mit geringeren Erfolgsraten einhergehen, lassen sich aus den Abbildungen 28 und 29 ablesen.

4.2 Vergleich der Studienergebnisse mit relevanter Literatur

4.2.1 Überlebensraten von Implantaten

Die ermittelte 6-Jahres-Überlebensrate für Einzelzahnimplantate im Seitenzahnbereich beträgt in dieser Studie 100 %. Systematische Übersichtsarbeiten, welche die 5-Jahres-Überlebensraten für Einzelzahnimplantate ermittelten, kommen auf Ergebnisse zwischen 95-97 % (Jung et al. 2012; Pjetursson et al. 2014; Zembic et al. 2014; Rabel et al. 2018). Die genannten Übersichtsarbeiten differenzieren nicht hinsichtlich der Lokalisation der Einzelzahnimplantate (Frontzahnbereich/Seitenzahnbereich). Übersichtsarbeiten, die explizit die Überlebensraten von Einzelzahnimplantaten im Seitenzahnbereich untersuchten, sind selten. Moy et al. (2016) ermittelten in einer Übersichtsarbeit für einen durchschnittlichen Beobachtungszeitraum von 3,3 Jahren Überlebensraten für Einzelzahnimplantate (n=616) im Seitenzahnbereich von 96-97 % (Moy et al. 2016). Die 6-Jahres-Überlebensraten für Einzelzahnimplantate in der vorliegenden Studie sind hinsichtlich der Ergebnisse der zuvor genannten Übersichtsarbeiten vergleichbar hoch.

4.2.2 Überlebensraten von Abutments

Die 6-Jahres-Überlebensrate von CAD/CAM-Abutments aus dieser Studie beträgt 98 %. Innerhalb der Beobachtungszeit sind zwei CAD/CAM-Titanabutments frakturiert. Somit ergaben sich 6-Jahres-Überlebensraten für die CAD/CAM-Titanabutments von 97 % und für die CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments von 100 % (Tabelle 10). Abutments aus der vorliegenden Studie besaßen alle eine interne Anschlussgeometrie.

In der systematischen Übersichtsarbeit von Pjetursson et al. (2018a) wurde eine 5-Jahres-Überlebensrate von 98 % für Abutments aus Metall mit interner Anschlussgeometrie (n=1219) ermittelt. Keramikabutments mit interner Anschlussgeometrie (n=612) zeigten eine 5-Jahres-Überlebensrate von 97,2 %. Der Unterschied zwischen den Überlebensraten beider Gruppen war nicht signifikant. Die Gruppe der Metallabutments bestand zum größten Teil aus Titanabutments. Vereinzelt wurden auch Abutments aus Gold und andere Legierungen verwendet. Die Gruppe der Keramikabutments bestand zu einem großen Teil aus Zirkonoxid, jedoch fand auch Aluminiumoxid als Abutmentmaterial Anwendung. Zwischen konfektionierten und individuellen Abutments sowie hinsichtlich der Lokalisation wurde in der Auswertung nicht differenziert (Pjetursson et al. 2018a). Es kann festgehalten werden, dass die ermittelte 6-Jahres-Überlebensrate in der vorliegenden Studie vergleichbar hoch zu aktuellen Forschungsarbeiten ist.

Übersichtsarbeiten, die Überlebens- und Erfolgsraten von CAD/CAM-Abutments auswerten, ermittelten nur eine geringe Anzahl an Einzelstudien mit größtenteils kurzen Beobachtungszeiträumen. Eine Differenzierung in der Auswertung klinischer Ergebnisse von CAD/CAM-Abutments im Front- und Seitenzahnbereich wurde ebenfalls nicht durchgeführt (Kapos und Evans 2014; Long et al. 2017). Zur besseren Vergleichbarkeit werden im Folgenden Einzelstudien aufgeführt, die sich thematisch der vorliegenden Studie ähneln.

In einer randomisierten klinischen Studie mit einer Beobachtungszeit von 5,6 Jahren wurden individuelle einteilige CAD/CAM- Zirkonoxidkeramikabutments (Procera, NobelBiocare) im Eck- und Seitenzahnbereich mit einer metallkeramischen und 17 vollkeramischen Restaurationen sowie zehn einteiligen CAD/CAM-Titanabutments (Procera, NobelBiocare) mit metallkeramischen Einzelkronen untersucht. In dieser Studie wurden 24 Abutments im Seitenzahnbereich und vier im Eckzahnbereich lokalisiert. Für alle Abutments wurde eine Überlebensrate von 100 % ermittelt (Zembic et al. 2013). Durch die Verwendung von einteiligen Zirkonoxidkeramikabutments und durch das zusätzliche Vorhandensein von vier Eckzahnabutments wird die Vergleichbarkeit zur vorliegenden Studie reduziert. Die Studie weist eine vergleichbar hohe Überlebensrate für CAD/CAM-Abutments im Seitenzahnbereich auf.

In einer retrospektiven klinischen Studie mit einer durchschnittlichen Beobachtungszeit von $3,9 \pm 1$ Jahren konnten bei 81 Patienten mit insgesamt 94 einzelzahntragenden CAD/CAM-Titanabutments im Seitenzahnbereich eine Überlebensrate von 100 % ermittelt werden (Hsu et al. 2017). In einer weiteren retrospektiven Studie von Hsu et al. (2019) wurden 74 Patienten mit 86 Einzelzahnimplantaten und CAD/CAM-Titanabutments im Seitenzahnbereich versorgt. Nach einer Beobachtungszeit von $6,3 \pm 1,2$ Jahren ergab sich eine Überlebensrate für Abutments und Einzelkronen von 99 % (Hsu et al. 2019).

Gulje et al. (2019) untersuchten in einer prospektiven Studie 21 Patienten mit 31 CAD/CAM-Titanabutments (Atlantis Abutments, Dentsply Implants) im Seitenzahnbereich (12 Prämolaren/19 Molaren). Es konnte eine 5-Jahres-Überlebensrate von 100 % für die Implantate und Abutments ermittelt werden. Alle Implantate hatten eine Länge von 6 mm und wurden in atrophierten Unterkieferregionen implantiert (Guljé et al. 2019).

Vigolo et al. (2006) ermittelten in einer Studie mit prospektiven Studiendesign eine 4-Jahres-Überlebensrate von 100 % für einteilige CAD/CAM-Titanabutments (Procera, NobelBiocare) und individuelle UCLA-Goldabutments im Seitenzahnbereich. Jeder von den insgesamt 20 Patienten wurde mit einem CAD/CAM-Titanabutment und mit einem UCLA-Abutment versorgt. Somit wurden insgesamt 40 Implantate mit individuellen Einzelzahnabutments (16 Prämolaren/24 Molaren) nachuntersucht (Vigolo et al. 2006).

Insgesamt zeigen die zuvor genannten Einzelstudien mit 4-6 Jahren Beobachtungszeit hohe Überlebensraten für CAD/CAM-Abutments – unabhängig vom verwendeten Abutmentmaterial. Die bisher veröffentlichten Studienergebnisse sind dem der vorliegenden Studie vergleichbar.

4.2.3 Überlebensraten von implantatgetragenen Einzelkronen

In der vorliegenden Studie wurde eine 6-Jahres-Überlebensrate von 99 % für metallkeramische Einzelkronen (hochgoldhaltiges Gerüstmaterial mit Keramikverblendung) ermittelt. Bei vollkeramischen Einzelkronen (Zirkonoxidgerüst mit Keramikverblendung) konnte eine Überlebensrate von 100 % festgestellt werden. Alle Einzelkronen wurden mit provisorischem Befestigungszement auf den CAD/CAM-Abutments zementiert.

Aktuelle Übersichtsarbeiten ermittelten für metallkeramische Einzelkronen 5-Jahres-Überlebensraten von 97-98 %. Für vollkeramische Einzelkronen (Zirkonoxidgerüst mit Keramikverblendung) wurden 5-Jahres-Überlebensraten von 91,6-97 % ermittelt (Abou-Ayash et al. 2017; Pjetursson et al. 2018b; Rabel et al. 2018). Eine Differenzierung der Überlebensraten von Einzelkronen mit individuellen oder konfektionierten Abutments wurde nicht vorgenommen. Die in der vorliegenden Studie ermittelten Überlebensraten für metallkeramische Einzelkronen sind mit den Ergebnissen der aktuellen Übersichtsarbeiten vergleichbar. Die Überlebensraten für verblendete Zirkonoxidkronen aus der vorliegenden Studie sind den ermittelten 5-Jahres-Überlebensraten aus den Übersichtsarbeiten leicht überlegen.

Einzelstudien, welche Überlebensraten von individuellen CAD/CAM-Abutments mit Einzelkronen im Seitenzahnbereich untersuchten, werden zur besseren Vergleichbarkeit im Folgenden aufgeführt.

Zembic et al. (2013) versorgten 18 einteilige CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments mit einer metallkeramischen und 17 vollkeramischen Einzelkrone/n aus unterschiedlichen Gerüstmaterialien (Glaskeramik, Aluminiumoxid, Zirkonoxid). Weitere zehn CAD/CAM-Titanabutments wurden mit metallkeramischen Einzelkronen versorgt. Es ergab sich für alle aufgeführten Einzelkronen eine Überlebensrate von 100 % nach 5,6 Jahren (Zembic et al. 2013).

In zwei retrospektiven Studien von Hsu et al. (2017/2019) wurden jeweils 94 und 86 metallkeramische Einzelkronen (Gerüst aus Goldlegierung mit Keramikverblendung) auf CAD/CAM-Titanabutments im Seitenzahnbereich untersucht. Dabei ergaben sich Überlebensraten von 100 % nach $3,9 \pm 1$ Jahren (Hsu et al. 2017) sowie 99 % nach $6,3 \pm 1,2$ Jahren Beobachtungszeit (Hsu et al. 2019).

Vigolo et al. (2006) eruierten nach einer Beobachtungszeit von vier Jahren eine Überlebensrate von 100 % für metallkeramische Einzelkronen (hochgoldhaltiges Gerüstmaterial mit Keramikverblendung) auf CAD/CAM-Titanabutments (Vigolo et al. 2006). Gulje et al. (2019) ermittelten eine 5-Jahres-Überlebensrate von 100 % für 31 vollkeramische Einzelkronen (Zirkonoxidgerüst mit Keramikverblendung) auf CAD/CAM-Titanabutments im Seitenzahnbereich (Gulje et al. 2019).

Die genannten Einzelstudien zeigen für einen Beobachtungszeitraum von 4-6 Jahren Überlebensraten von 99-100 % für metallkeramische und vollkeramische Einzelzahnkronen auf individuellen CAD/CAM-Abutments im Seitenzahnbereich. Die Ergebnisse sind ähnlich mit denen aus der vorliegenden Studie. Der einzige Verlust einer Einzelkrone in dieser Studie resultierte aus einer Neuanfertigung aufgrund eines Approximalkontaktverlustes. Im Vergleich zur Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015) wurde für metallkeramische Einzelkronen auf konfektionierten Abutments eine 7-Jahres-Überlebensrate von 98,1 % ermittelt. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit dem der vorliegenden Studie. Gründe für die Verluste waren zwei ausgeprägte Verblendkeramikfrakturen sowie eine Neuanfertigung wegen eines Retentionsverlustes (Rinke et al. 2015).

4.3 Technische Komplikationen und Verluste

4.3.1 Verblendkeramikfrakturen

In der vorliegenden Studie wurde bei einer metallkeramischen Einzelkrone eine Verblendkeramikfraktur (1,09 %) über einen Zeitraum von fünf Jahren beobachtet. Dieses Ergebnis entspricht einer jährlichen Ereignisrate für die Verblendkeramikfraktur von 0,22 %. Die 6-Jahres-Erfolgsrate für die Komplikation der Verblendkeramikfrakturen liegt in dieser Studie für die Gesamtheit aller Einzelkronen und für die metallkeramischen Einzelkronen bei 99 %. Die 6-Jahres-Komplikationsrate für die Verblendkeramikfrakturen liegt bei Einzelkronen auf CAD/CAM-Abutments bei 1 %.

Betrachtet man aktuelle Übersichtsarbeiten wird die Verblendkeramikfraktur als häufigste technische Komplikation auf der Ebene der metallkeramischen und vollkeramischen verblendeten Einzelkronen beschrieben. Pjetursson et al. (2018b) eruierten dazu eine 5-Jahres-Komplikationsrate von 2,9 % für metallkeramische Einzelkronen und 2,8 % für keramikverblendete Zirkonoxidkronen. Dazu wurden jährliche Komplikationsraten für die Verblendkeramikfraktur von 0,58 % für metallkeramische Einzelkronen und 0,57 % für Zirkonoxidkronen ermittelt (Pjetursson et al. 2018b). Eine 5-Jahres-Verblendkeramikfrakturrate von

11,8 % für Zirkonoxidkronen ermittelten Rabel et al. (2018). Die Lokalisation von Einzelkronen im Seitenzahnbereich und die verschraubte Befestigungsvariante bei Einzelkronen zeigten signifikant häufiger Verblendkeramikfrakturen (Rabel et al. 2018).

Bei Übersichtsarbeiten handelt es sich häufig um eine große Sammlung von Einzelstudien mit unterschiedlichen Studiendesigns. Die gesammelten Einzelstudien beinhalten Einzelkronen mit unterschiedlichen Befestigungsmöglichkeiten (verschraubt/zementiert), Materialien, Lokalisationen (posterior/anterior) und Abutmenttypen (konfektioniert/individuell). Aus diesen Gründen lassen sich die oben genannten Komplikationsraten nur als eine generelle Übersicht für die Häufigkeit der Verblendkeramikfrakturen bei implantatgetragenen Einzelkronen betrachten. Differenzierte Auswertungen hinsichtlich des CAD/CAM-Abutmentdesigns in Kombination mit der Lokalisation (posterior/anterior) wurde in Übersichtsarbeiten bisher nicht vorgenommen. Eine Aussage darüber, ob die Verwendung von CAD/CAM-Abutments einen Einfluss auf die Komplikationsraten von Einzelkronen nimmt, lässt sich somit mit aktuellen Übersichtsarbeiten nicht beantworten. Unter der Berücksichtigung, dass in der vorliegenden Studie nur Einzelkronen im Seitenzahnbereich untersucht wurden, kam es im Vergleich zu den genannten Übersichtsarbeiten zu niedrigeren Verblendkeramikfrakturnraten.

Zur besseren Vergleichbarkeit werden im Folgenden Einzelstudien aufgeführt, die individuelle CAD/CAM-Abutments mit zementierten Einzelkronen im Seitenzahnbereich untersuchten.

Zembic et al. (2013) ermittelten über eine Beobachtungszeit von 5,6 Jahren drei Verblendkeramikfrakturen (ein Molar, ein Prämolare, ein Eckzahn) unter zehn metallkeramischen Einzelkronen auf CAD/CAM-Titanabutments. CAD/CAM- Zirkonoxidkeramikabutments mit 17 verblendeten Zirkonoxidkronen und einer metallkeramischen Einzelkrone zeigten keine Verblendkeramikfrakturen. Aus beiden Gruppen waren jeweils zwei CAD/CAM-Abutments in Eckzahnregionen lokalisiert (Zembic et al. 2013). Werden diese vier Eckzähne aus der Studie herausgerechnet, ergibt dies für die Verblendkeramikfraktur eine Gesamtprävalenz von 8 %. Die Studie von Zembic et al. (2013) zeigt im Vergleich zur vorliegenden Studie häufiger Verblendkeramikfrakturen.

Hsu et al. (2017) eruierten bei 81 Patienten mit 94 metallkeramischen Einzelkronen auf CAD/CAM-Titanabutments über einen Beobachtungszeitraum von $3,9 \pm 1$ Jahren fünf Verblendkeramikfrakturen (5,3 %) (Hsu et al. 2017). In einer weiteren retrospektiven Studie von Hsu et al. (2019) wurden nach $6,3 \pm 1,2$ Jahren bei 86 metallkeramischen Einzelkronen, ebenfalls gestützt von CAD/CAM-Titanabutments, sechs Verblendkeramikfrakturen ermittelt

(7 %) (Hsu et al. 2019). Beide Studien weisen ähnlich große Studienpopulationen und Beobachtungszeiten wie die vorliegende Studie auf, weshalb eine gute Vergleichbarkeit entsteht. Jedoch konstatierten beide Studien häufiger Verblendkeramikfrakturen als die vorliegende Studie.

In einer prospektiven Studie mit 21 Patienten wurden 31 CAD/CAM-Titanabutments mit Einzelkronen aus verblendetem Zirkonoxid versorgt. Über die Beobachtungszeit von fünf Jahren wurde keine Verblendkeramikfraktur festgestellt. Somit ergab sich eine 5-Jahres-Erfolgsrate für Verblendkeramikfrakturen von 100 % (Guljé et al. 2019). Vigolo et al. (2006) ermittelten in einer prospektiven Studie ebenfalls eine Erfolgsrate von 100 % über einen Beobachtungszeitraum von vier Jahren. In der Studie wurden 20 CAD/CAM-Titanabutments sowie 20 individuelle UCLA-Goldabutments mit metallkeramischen Einzelkronen versorgt und nachuntersucht. Beide Studien zeigen, trotz der kleineren Studienpopulation, Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie (Vigolo et al. 2006). Die Häufigkeit von Verblendkeramikfrakturen in der vorliegenden Studie ist zum Teil mit den Ergebnissen anderer Studien vergleichbar oder geringer. Einen Einfluss auf die Erfolgsrate, zwischen den Materialkombinationen aus Zirkonoxidkeramikabutment mit vollkeramischer Einzelkrone oder Titanabutment mit metallkeramischer Einzelkrone, lässt sich nicht feststellen. Die Anzahl der Einzelstudien, welche die technischen Komplikationen von Einzelkronen auf individuellen CAD/CAM-Abutments im Seitenzahnbereich untersuchten, sind begrenzt.

Einzelstudien, die Verblendkeramikfrakturen bei Einzelkronen auf konfektionierten Abutments im Seitenzahnbereich untersuchten, werden nachfolgend diskutiert. Daraus wird abgeleitet, inwiefern ein Einfluss auf die Häufigkeit der Verblendkeramikfraktur durch die Verwendung von CAD/CAM-Abutments besteht.

Lops et al. (2013) untersuchten über eine Beobachtungszeit von fünf Jahren 44 konfektionierte Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen und 37 konfektionierte Zirkonoxidkeramikabutments mit Einzelkronen aus verblendetem Zirkonoxid. Nach der Beobachtungszeit sind bei drei metallkeramischen und bei vier vollkeramischen Einzelkronen Verblendkeramikfrakturen aufgetreten. Daraus ergab sich eine Inzidenz von 8,6 % nach fünf Jahren (Lops et al. 2013).

Schwarz et al. (2012) ermittelten bei 153 Patienten mit 232 Einzelkronen (206 posterior/ 26 anterior) die Häufigkeit der Verblendkeramikfrakturen für eine durchschnittliche Beobachtungszeit von $2,1 \pm 1,4$ Jahren. Insgesamt wurden 179 metallkeramische Einzelkronen (Gerüst aus Goldlegierung mit Keramikverblendung) und 53 vollkeramischen Einzelkronen

(Zirkonoxidgerüst mit Keramikverblendung) auf konfektionierten Abutments untersucht. Bei den 206 Einzelkronen im Seitenzahnbereich wurden nach der relativ kurzen Beobachtungszeit insgesamt 29 Verblendkeramikfrakturen festgestellt. Dies entspricht einer Prävalenz von 14 % (Schwarz et al. 2012).

Auch Nothdurft et al. (2014) stellten eine hohe Anzahl an Verblendkeramikfrakturen fest. In der Studie wurden nach drei Jahren Beobachtungszeit bei acht von 36 Einzelkronen Verblendkeramikfrakturen ermittelt (22 %). Bei den Einzelkronen handelte es sich um verblendetes Zirkonoxid, das auf konfektionierten Zirkonoxidkeramikabutments im Seitenzahnbereich lokalisiert war (Nothdurft et al. 2014).

Alle oben aufgeführten Einzelstudien mit CAD/CAM-Abutments scheinen den Studien von Schwarz et al. (2012) und Nothdurft et al. (2014) hinsichtlich der Häufigkeit der aufgetretenen Verblendkeramikfrakturen überlegen.

Ein adäquater Vergleich ist mit der Studie von Rinke et al. (2015) möglich, da diese ein ähnliches Studiendesign verwendete. Die Vorläuferstudie ermittelte bei 112 konfektionierten Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen insgesamt zehn Verblendkeramikfrakturen. Daraus ergab sich eine 7-Jahres-Inzidenz von 8,9 % (Rinke et al. 2015). Die vorliegende Studie ermittelte lediglich eine 5-Jahres-Inzidenz für Verblendkeramikfrakturen von 1 %. Obwohl die Studie von Rinke et al. (2015) eine längere Beobachtungsdauer aufweist, lässt sich eine Verringerung der Verblendkeramikfrakturen durch die Verwendung von CAD/CAM-Abutments konstatieren. Im Vergleich der zuvor genannten Einzelstudien lassen sich tendenziell weniger Verblendkeramikfrakturen bei der Verwendung von CAD/CAM-Abutments feststellen.

In der Literatur werden häufig Verblendkeramikfrakturen bei verblendeten metallkeramischen und vollkeramischen Einzelkronen ermittelt (Pjetursson et al. 2018b; Rabel et al. 2018). Mögliche Ansätze zur Erklärung dieser Komplikation sind Eigenspannungen zwischen sowie in der Nähe befindlichen Grenzflächen von Gerüst- und Verblendkeramikmaterial. Diese Eigenspannungen werden unter anderem durch ein Missverhältnis der Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) von Gerüstmaterial und Verblendkeramikmaterial beeinflusst sowie durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten bei einem zu schnellen Abkühlen nach dem Aufbrennen der Verblendkeramik begünstigt (Swain 2009). Während des Aufbrennens von Verblendkeramik auf dem Gerüst (Sintern) werden hohe Temperaturen (bis zu 900 °C) verwendet, welche anschließend auf Raumtemperatur herunterkühlen. Bei metallkeramischen und vollkeramischen Restaurationen sind in der Regel der WAK von der Verblendkeramik kleiner als der des Gerüstmaterials, wodurch in der Verblendkeramikoberfläche

Druckspannungen und in der Gerüstoberfläche Zugspannungen entstehen (DeHoff et al. 2008; Swain 2009; Borba et al. 2011). Wenn das Gerüstmaterial einen höheren WAK als das Verblendmaterial besitzt, kommt es zu einem positiven thermischen Missverhältnis, wodurch die Druckspannung der Rissbildung in der Verblendkeramik entgegenwirkt (DeHoff et al. 1998; Millen et al. 2012). Ein negatives thermisches Missverhältnis (WAK von Gerüstmaterial ist kleiner als bei der Verblendkeramik) führt hingegen zu einem umgekehrten Effekt (Coffey et al. 1988). Gerüstmaterialien aus Zirkonoxid besitzen eine geringe Wärmeleitfähigkeit, wodurch bei einem zu schnellen Abkühlvorgang nach dem Aufbrennen der Verblendkeramik hohe Zugspannungen auftreten. Dies begünstigt das Auftreten von Verblendkeramikfrakturen (Swain 2009). Aus diesem Grund wurden Brennprogramme mit langsamen Abkühlvorgängen entwickelt, um das Risiko für Verblendkeramikfrakturen zu reduzieren (Al-Amleh et al. 2014). Zudem soll das thermische Missverhältnis möglichst klein gehalten werden, um die Eigenspannung im keramischen Material zu minimieren (Aboushelib et al. 2008).

Bei der Herstellung metallkeramischer und vollkeramischer Einzelkronen auf natürlichen Zähnen wird empfohlen, die Schicht der Verblendkeramik möglichst dünn zu halten und das Gerüst unter der Verblendkeramik materialunterstützend zu gestalten (Hobo und Shillingburg 1973; Proos et al. 2003). Bei inadäquater Gerüstgestaltung der Einzelkrone müsste eine zu dicke Schicht Verblendkeramik appliziert werden, was bei auftretenden Scherkräften und Zugkräften während okklusaler Belastung der Einzelkrone zu Verblendkeramikfrakturen führen könnte (Shirakura et al. 2009). In-vitro Studien belegen eine verringerte Anfälligkeit für Verblendkeramikfrakturen bei Einzelkronen mit zahnförmig anatomisch gestalteten Gerüstdesigns (Kokubo et al. 2011; Guess et al. 2013).

Die CAD/CAM-Technologie ermöglicht mithilfe von Software die Materialmindeststärken der Implantatprothetik zu kontrollieren und zu überwachen (Edelhoff et al. 2019). Das individuelle Abutment wird somit der Form der Einzelkrone nachempfunden, wodurch sich die Gerüstdicke der Krone reduziert und das Material der Einzelkrone unterstützt. Dadurch sollen Verblendkeramikfrakturen entgegengewirkt werden (Gehrke und Fischer 2013; Parpaiola et al. 2013). Die Erkenntnisse zur Gerüstoptimierung von verblendeten Einzelkronen auf natürlichen Zähnen könnte ein Ansatz zur Erklärung verringerter Komplikationsraten von Verblendkeramikfrakturen bei implantatgetragenen Einzelkronen auf CAD/CAM-Abutments darstellen. Unabhängig der Gestaltung der Abutments könnte durch eine sorgfältige Kontrolle der statischen und dynamischen Okklusion von Einzelkronen die Verblendkeramikfrakturnrate reduziert werden (Vigolo et al. 2006; Vigolo et al. 2012).

4.3.2 Retentionsverluste von Einzelkronen

In der vorliegenden Studie wurden zwei Retentionsverluste bei zwei provisorisch zementierten metallkeramischen Einzelkronen auf individuellen einteiligen Titanabutments ermittelt. Dies entspricht einer Inzidenz von 2,19 % nach fünf Jahren. Die jährliche Ereignisrate für die Komplikation des Retentionsverlustes beträgt 0,44 %.

Systematische Übersichtsarbeiten, die sich mit technischen Komplikationen und dem Retentionsverlust bei Einzelkronen beschäftigten, ermittelten 5-Jahres-Komplikationsraten zwischen 1,0-7,3 % (Kapitel 1.4.3). Pjetursson et al. (2018b) eruierten eine 5-Jahres-Komplikationsrate für Retentionsverluste von 2,0 % und eine jährliche Komplikationsrate von 0,4 % für metallkeramische Einzelkronen. In der Gruppe der keramikverblendeten Zirkonoxidkronen sind keine Retentionsverluste aufgetreten (Pjetursson et al. 2018b). Eine genauere Differenzierung hinsichtlich der Art der Zementierung (provisorisch/definitiv) und damit verbundener Komplikationsraten für den Retentionsverlust wurde in den vorliegenden Übersichtsarbeiten nicht schwerpunktmäßig behandelt. Rabel et al. (2018) konnten in ihrer systematischen Übersichtsarbeit keinen Einfluss bei der Zementauswahl auf die Häufigkeit von Retentionsverlusten bei vollkeramischen Einzelkronen ermitteln. In den untersuchten 41 Studien machten lediglich 24 Studien eine Angabe über verwendete Zemente (vier provisorisch zementiert, 19 definitiv zementiert). Eine Differenzierung bezüglich der Position anterior/posterior in Kombination mit den Zementierungsverfahren wurde ebenfalls nicht vorgenommen (Rabel et al. 2018). Andere Studien ermittelten jedoch, dass die Art des verwendeten Befestigungsmaterials einen Einfluss auf die Retentionseigenschaften der Einzelkrone auf Abutments besitzt (Squier et al. 2001; Carnaggio et al. 2012; Safari et al. 2018). Da in der vorliegenden Studie alle Einzelkronen mit provisorischem Zement befestigt wurden, bieten Übersichtsarbeiten im Hinblick auf die Fragestellung der Einflussnahme von CAD/CAM-Abutments auf die technischen Komplikationen von provisorisch zementierten Einzelkronen im Seitenzahnbereich, keine ausreichende Vergleichbarkeit.

Einzelstudien, die CAD/CAM-Abutments mit provisorisch zementierten implantatgetragenen Einzelkronen im Seitenzahnbereich untersuchten, werden im Folgenden zur besseren Vergleichbarkeit aufgeführt.

In der prospektiven Studie von Vigolo et al. (2006) wurden nach einer Beobachtungszeit von vier Jahren bei 20 provisorisch zementierten metallkeramischen Einzelkronen auf CAD/CAM-Titanabutments keine Retentionsverluste festgestellt (Vigolo et al. 2006). Die Studie von Vigolo et al. (2006) zeigt, dass die provisorische Zementierung von Einzelkronen auf individuellen CAD/CAM-Abutments eine zuverlässige Befestigungsvariante über einen

Zeitraum von vier Jahren darstellt. Die Aussagekraft dieses Ergebnisses ist jedoch aufgrund der geringen Anzahl an nachuntersuchten Einzelzahnimplantaten eingeschränkt.

Hsu et al. (2017) zementierten 94 metallkeramische Einzelkronen mit unterschiedlichen Zementen (Kompositzementen, Glasionomerzement und provisorischen Zement) auf individuellen CAD/CAM-Titanabutments. Insgesamt sind über die Beobachtungszeit von $3,9 \pm 1$ Jahren neun Retentionsverluste aufgetreten (9,6 %). Die in der Studie aufgetretenen Retentionsverluste wurden bei provisorisch zementierten Einzelkronen konstatiert (Hsu et al. 2017). Hsu et al. (2019) ermittelten über einen Beobachtungszeitraum von $6,3 \pm 1,2$ Jahren unter 86 metallkeramischen Einzelkronen, die ebenfalls mit Kompositzement, Glasionomerzement und provisorischen Zement befestigt wurden, fünf Retentionsverluste bei provisorisch zementierten Einzelkronen auf individuellen CAD/CAM-Titanabutments (Prävalenz 5,8 %) (Hsu et al. 2019).

Die aufgeführten Studien von Hsu et al. (2017/19) weisen im Vergleich zur vorliegenden Studie größere Prävalenzen hinsichtlich des Retentionsverlustes auf. Innerhalb der beiden Studien wurden nicht alle Einzelkronen mit provisorischen Befestigungszement befestigt, weshalb die Vergleichbarkeit eingeschränkt ist. Jedoch ist anzumerken, dass alle aufgetretenen Retentionsverluste bei provisorisch zementierten Einzelkronen auftraten, während bei definitiv zementierten Einzelkronen Komplikationen ausblieben. In beiden Studien wurden keine originalen Abutments vom zugehörigen Implantathersteller verwendet, was gegebenenfalls Einfluss auf die Retentionseigenschaften des Abutments genommen haben könnte. Einzelstudien, die explizit provisorisch zementierte implantatgetragene Einzelzahnkronen auf individuellen CAD/CAM-Abutments im Seitenzahnbereich hinsichtlich Retentionsverluste nachuntersuchen, sind selten.

Nachfolgend werden Einzelstudien aufgeführt, die sich auf provisorisch zementierten implantatgetragenen Einzelkronen im Seitenzahnbereich mit konfektionierten Abutments beschränken. Hieraus wird abgeleitet, wie sich die Prävalenz von Retentionsverlusten bei Einzelkronen auf konfektionierten Abutments im Vergleich zu individuellen CAD/CAM-Abutments darstellt.

Schwarz et al. (2012) untersuchten über eine Beobachtungszeit von $2,1 \pm 1,4$ Jahren insgesamt 232 Einzelkronen (206 posterior/26 anterior). Insgesamt wurden 127 Einzelkronen mit einem provisorischen Befestigungszement und 105 Einzelkronen mit einem definitiven Befestigungszement zementiert. Beide Gruppen zeigten insgesamt 27 aufgetretene Retentionsverluste. Innerhalb der Gruppe mit 127 provisorisch zementierten Einzelkronen wurden 17 Retentionsverluste (13,4 %) festgestellt (Schwarz et al. 2012).

Die Studie von Schwarz et al. (2012) zeigte schon über einen kurzen Beobachtungszeitraum eine hohe Prävalenz an Retentionsverlusten von Einzelkronen auf konfektionierten Abutments. Aus der Studie konnte nicht entnommen werden, wie sich die Retentionsverluste unter den Positionen der implantatgetragenen Einzelkronen (anterior/posterior) aufteilt. Im Vergleich zur vorliegenden Studie zeichnet sich eine Reduzierung von Retentionsverlusten durch die Verwendung von individuellen CAD/CAM-Abutments in Kombination mit einer provisorischen Befestigung der Einzelkrone ab.

In der Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015) wurden insgesamt 16 Retentionsverluste von provisorisch zementierten metallkeramischen Einzelkronen auf konfektionierten Titanabutments ermittelt. Dies entspricht einer 7-Jahres-Inzidenz von 14,3 % (Rinke et al. 2015). Durch die gute Vergleichbarkeit der Vorläuferstudie zur vorliegenden Studie lässt sich in diesem Fall durch die Verwendung von CAD/CAM-Abutments eine deutliche Reduzierung der Anzahl von Retentionsverlusten konstatieren.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Korsch und Walther (2015) in einer retrospektiven Studie, in der konfektierte Abutments ($n = 233$) und individuelle CAD/CAM-Abutments ($n = 59$) über einen 2-Jahres-Beobachtungszeitraum hinsichtlich Retentionsverluste nachuntersucht wurden. Alle Einzelkronen wurden mit einem provisorischen Befestigungszement zementiert. Innerhalb der Beobachtungszeit wurden 18 (7,7 %) Retentionsverluste bei metallkeramischen Einzelkronen auf konfektionierten Abutments ermittelt. Bei den Einzelkronen auf individuellen Abutments wurde kein Retentionsverlust konstatiert. In der Studie kam es durch die Verwendung von individuellen CAD/CAM-Abutments mit provisorisch zementierten Einzelkronen ebenfalls zu einer Reduzierung der Retentionsverluste (Korsch und Walther 2015).

Lops et al. (2013) ermittelten über einen Beobachtungszeitraum von fünf Jahren bei 81 konfektionierten Abutments mit provisorisch zementierten Einzelkronen im Seitenzahnbereich keine Retentionsverluste. Von den 81 konfektionierten Abutments wurden 44 Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen und 37 Zirkonoxidkeramikabutments mit vollkeramischen Zirkonoxidkronen versorgt (Lops et al. 2013). Im Gegensatz zu den Studien von Rinke et al. (2015), Schwarz et al. (2012) sowie Korsch und Walther (2015), zeigt diese Studie eine zuverlässige Retention von provisorisch zementierten Einzelkronen auf konfektionierten Abutments.

Sowohl bei der Verwendung von individuellen CAD/CAM-Abutments als auch bei konfektionierten Abutments sind bei der provisorischen Zementierung von Einzelkronen im Sei-

tenzahnbereich mit Retentionsverlusten zu rechnen. Bei der Verwendung von konfektionierten Abutments scheinen tendenziell häufiger Retentionsverluste aufzutreten. Ein möglicher Ansatz zur Erklärung der potentiellen Verringerung der Komplikationsraten von Retentionsverlusten, durch die Verwendung von individuellen CAD/CAM-Abutments, wird nachfolgend beschrieben.

Die Retention bei der Zementierung von Einzelkronen auf Abutments wird von Faktoren wie der Konvergenz der axialen Abutmentwände, Abutmentoberfläche, Abutmenthöhe, Abutmentdurchmesser, Oberflächenrauheit, Abutmentausrichtung und durch den verwendeten Befestigungszement beeinflusst (Hebel und Gajjar 1997; Squier et al. 2001; Carnaggio et al. 2012; Wittneben et al. 2017b; Safari et al. 2018). Konfektionierte Abutments besitzen häufig ein zylinderförmiges Abutmentdesign (Priest 2005) und durch den Hersteller vorgegebene Abutmentformen und Abmessungen. Konfektionierte Abutments im Seitenzahnbereich weisen hierdurch, im Vergleich zu beschliffenen natürlichen Molaren, eine kleinere Abutmentoberfläche zur Aufnahme einer prothetischen Restauration auf. Im Gegensatz dazu kann bei individuellen Abutments die Form eines beschliffenen Zahnes im Molarenbereich individuell nachempfunden werden. Dies wiederum führt unter anderem zur Vergrößerung der Abutmentoberfläche und zur Vergrößerung der Retention (Hebel und Gajjar 1997; Michalakis et al. 2003). Durch die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten bei CAD/CAM-Abutments (Kapos und Evans 2014; Schepke et al. 2017) könnten Abutments so hergestellt werden, dass diese an eine gegebene Situation angepasste, optimale Retentionseigenschaften besitzt.

Der Konvergenzwinkel des Abutments nimmt einen großen Einfluss auf die Retention von zementierten Restaurationen (Jørgensen 1955). Ein Konuswinkel von 6° ist häufig bei konfektionierten Abutments vorzufinden (Hebel und Gajjar 1997) und ermöglicht eine zwei- bis vierfach höhere Retention im Vergleich zu beschliffenen natürlichen Zähnen, die in der Praxis einen Konuswinkel von $10\text{--}22^\circ$ aufweisen (Tiu et al. 2015). Zudem besitzen Abutments häufig, aufgrund der submukosalen Lage des Implantates, eine größere Abutmenthöhe im Vergleich zu natürlichen beschliffenen Seitenzähnen (Hebel und Gajjar 1997). Aufgrund des optimalen Konuswinkels und der Abutmenthöhe können auch provisorische Befestigungszemente zur Zementierung von Einzelkronen auf konfektionierte Abutments verwendet werden (Wittneben et al. 2017b). Dies bestätigt unter anderem die Studie von Lops et al. (2013) mit zufriedenstellenden Ergebnissen zu provisorisch zementierten Einzelkronen auf konfektionierten Abutments im Seitenzahnbereich über eine Beobachtungszeit von fünf Jahren (Lops et al. 2013). Anzumerken ist, dass konfektionierte Abutments in bestimmten Situ-

ationen (z. B. bei abweichender Implantatachse) durch Beschleifen an die gegebene Patientensituation angepasst werden muss, wodurch die Retention von Einzelkronen beeinträchtigt werden könnte (Priest 2005).

4.3.3 Abutmentfrakturen und Abutmentschraubenlockerungen

In der vorliegenden Studie sind nach fünf Jahren zwei Abutmentfrakturen (2,19 %) und eine Abutmentschraubenlockerung (1,09 %) bei einteiligen CAD/CAM-Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen aufgetreten. Die jährliche Ereignisrate für die Abutmentfraktur betrug 0,44 % und für die Abutmentschraubenlockerung 0,22 %. Es wurden nur zweiteilige Titanimplantate (Ankylos®, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) mit konischer Implantat-Abutment-Verbindung verwendet.

Übersichtsarbeiten ermittelten für Abutmentfrakturen bei implantatgetragenen Einzelkronen 5-Jahres-Komplikationsraten von 0,2-0,4 % und für die Abutmentschraubenlockerung 3,6-8,8 % (Jung et al. 2012; Pjetursson et al. 2014; Zembic et al. 2014; Rabel et al. 2018). In der Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015) sind über den Beobachtungszeitraum von sieben Jahren keine Abutmentfrakturen aufgetreten, jedoch vier Abutmentschraubenlockerungen (Komplikationsrate 4 %) (Rinke et al. 2015). In der vorliegenden Studie wurden im Vergleich zu den in der Literatur ermittelten Komplikationsraten häufiger Abutmentfrakturen festgestellt. Die Komplikationsrate der Abutmentschraubenlockerung ist in der vorliegenden Studie reduziert. Andere Studien, die Implantatsysteme mit interner konischer Anschlussgeometrie verwendeten, ermittelten ebenfalls geringe Prävalenzen für die Abutmentschraubenlockerung von 0-1.3 % in Beobachtungszeiträumen von zwei bis acht Jahren im Molarenbereich (Romanos und Nentwig 2000; Döring et al. 2004; Weigl 2004; Mangano et al. 2009).

Ein möglicher Ansatz zur Erklärung der reduzierten Abutmentschraubenlockerung könnte die konische Implantat-Abutment-Verbindung darstellen (Döring et al. 2004; Rinke et al. 2015; Huang und Wang 2019). Die Anschlussgeometrie des Ankylos-Implantates besitzt einen 4 ° Konus für die Innenverbindung des Abutments und ermöglicht hierdurch einen hohen Reibungswiderstand zwischen den beiden Komponenten (Weigl 2004; Mangano et al. 2009). Hierdurch wird das Abutment vor Rotation geschützt und ermöglicht eine große mechanische Stabilität. Horizontale Biegekräfte werden über die gesamte Implantat-Abutment-Verbindung übertragen, wodurch die Abutmentschraube weniger belastet wird (Weigl 2004). Die Art der verwendeten Anschlussgeometrie wird mit der Häufigkeit von verschiedenen technischen Komplikationen wie Abutmentbrüchen und Abutmentschraubenlockerungen in Verbindung gebracht (Akca et al. 2003). Schraubenlockerungen werden signifikant häufiger

beim externen Verbindungstyp beobachtet (Gracis et al. 2012; Pjetursson et al. 2018a), da die auf die Abutment einwirkenden Kräfte zum großen Teil auf die Abutmentschraube weitergeleitet werden (Mangano et al. 2009). Interne Implantat-Abutment-Verbindungen sind externen Verbindungsdesigns hinsichtlich der größeren Maximalbelastung bis zum Bruch überlegen (Coray et al. 2016). Abutmentschraubenlockerungen und Abutmentschraubenfrakturen treten bevorzugt im Bereich des ersten Molaren auf (Katsavochristou und Koumoulis 2019).

Shim und Yang (2015) ermittelten bei 450 Ankylos-Implantaten mit konfektioniert hergestellten Titanabutments über eine Beobachtungszeit von acht Jahren insgesamt zehn Abutmentfrakturen (2,2 %). Zwei der Abutmentfrakturen sind im anterioren Bereich, einer im Prämolarenbereich und sieben im Molarenbereich aufgetreten. Die Molarenposition wurde in dieser Studie als prädisponierender Faktor für die Abutmentfrakturen festgestellt (Shim und Yang 2015). In der vorliegenden Studie sind die beiden Abutmentfrakturen auf Implantaten im terminalen Molarenbereich (Region 26,46) zurückzuführen und zu den Ergebnissen der verfügbaren Literatur in guter Übereinstimmung. Implantate im Bereich der Molaren sind großen okklusalen Kräften ausgesetzt (Richter 1995; Gealh et al. 2011). Dies könnte ein Ansatz zur Erklärung häufiger Abutmentbrüche im Seitenzahnbereich sein.

4.3.4 Approximalkontaktverlust

Innerhalb der Beobachtungszeit der vorliegenden Studie sind zwei Approximalkontaktverluste (2,19 %) aufgetreten. Die jährliche Ereignisrate für die Komplikation Approximalkontaktverlust beträgt 0,44 %. Ein Approximalkontaktverlust endete in einer Neuanfertigung einer Einzelkrone wegen störender Essensreste zwischen dem insuffizienten Approximalkontakt (food impaction). Approximalkontaktverluste wurden in der Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015) nicht ermittelt.

Varthis et al. (2019) ermittelten in einer Literaturübersicht die Prävalenzen und mögliche Ansätze für die Erklärung von Approximalkontaktverlusten zwischen implantatgetragenen Restaurationen und benachbarter Zähne. Insgesamt konnten sieben Einzelstudien (fünf retrospektive Studien, eine prospektive Studie, ein Fallbericht) ermittelt werden, welche von hohen Prävalenzen für Approximalkontaktverluste im Oberkiefer 18-66 % und im Unterkiefer von 37-54 % berichteten (Varthis et al. 2019). Unter anderem wurde die natürliche Bewegung von Zähnen mit dem Approximalkontaktverlust in Verbindung gebracht. Durch die okklusale Belastung kommt es zu einem konkavförmigen Verschleiß. Da der Verschleiß des mesialen Zahnanteils größer ist als im distalen Anteil, kommt es zu einer Mesialbewegung

der Zähne. Diese Bewegung gleicht den Verschleiß zwischen den Zähnen aus (Kaidonis et al. 1992; Kaidonis 2008; Varthis et al. 2019). Zudem kommt es im menschlichen Kiefer zu ständigen Umbauvorgängen und nachträglichem Wachstum im Erwachsenenalter, was zum Approximalkontaktverlust beitragen könnte (Daftary et al. 2013; Varthis et al. 2019).

4.4 Risikofaktoren Implantatposition und Zahnform

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, ob sich die Implantatposition (zahnbegrenzt/terminal) oder die Art des zu ersetzenden Zahnes (Molar/Prämolar) als potentielle Risikofaktoren auf die Erfolgsraten auswirken. In beiden Gruppen wurde kein signifikanter Einfluss auf die Erfolgsrate ermittelt (Kapitel 3.4). Es konnten jedoch Tendenzen festgestellt werden, dass Implantate in terminaler Position und Implantate, die Molaren ersetzen, zu einem höheren Komplikationsrisiko neigen. Da es sich bei Implantaten in terminaler Position häufig um zu ersetzende Molaren handelt und bei zahnbegrenzten Zähnen häufig um Prämolaren, spiegelt sich das Risiko der einen Gruppe in der anderen wider (in der vorliegenden Studie waren alle Prämolaren in zahnbegrenzter Position). Eine Betrachtung der Erfolgsraten in Bezug auf die Implantatposition (zahnbegrenzt/terminal) konnte der Literatur nicht entnommen werden. Studien differenzieren selten zwischen den Erfolgsraten bei zu ersetzenden Molaren und Prämolaren. Rabel et al. (2018) ermittelten signifikant häufiger Verblendkeramikfrakturen bei Implantaten im Seitenzahnbereich als im Frontzahnbereich ($p = 0,011$). Dies wurde auch bei natürlichen Zähnen im Seitenzahnbereich festgestellt. In der Übersichtsarbeit von Wang et al. (2012) konnten im Bereich der Molaren signifikant häufiger Verblendkeramikfrakturen bei vollkeramischen Einzelkronen ermittelt werden als im Vergleich zu Prämolaren (Wang et al. 2012).

4.5 Stärken und Limitationen der vorliegenden Studie

4.5.1 Stärken der vorliegenden Studie

Eine Stärke stellt dar, dass es sich in der vorliegenden Studie um eine prospektive Studie handelt, welche praxisbasiert ist. Zudem baut sie auf der retrospektiven Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015) auf, weshalb diese eine sehr gute Vergleichbarkeit zur Untersuchung von technischen Komplikationen bei der Verwendung von individuellen zu konfektionierten Abutments ermöglicht.

In der vorliegenden Studie wurden für die Implantate, Abutments und Einzelkronen ausschließlich gleiche Materialien, Typen, Hersteller und Zementierungsverfahren verwendet.

Auch das zahntechnische Labor für die Herstellung der Implantatprothetik war gleich. Hierdurch sind ähnliche Rahmenbedingungen sowohl bei der vorliegenden als auch bei der Vorläuferstudie gegeben und es werden weitere Faktoren reduziert, die gegebenenfalls einen Einfluss auf die Erfolgs- und Überlebensraten nehmen könnten.

4.5.2 Limitationen

Einer der wenigen Faktoren, die sich in der vorliegenden Studie im Vergleich zur Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015) unterscheiden, sind die verwendeten einteiligen CAD/CAM-Titanabutments sowie die zweiteiligen CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments. Zweiteilige CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments wurden in der vorliegenden Studie mit vollverblendeten Zirkonoxidkronen versorgt, welche in der Vorläuferstudie keine Anwendung fanden. Vollverblendete Zirkonoxidkronen wurden in einer aktuellen Übersichtsarbeit mit dem häufigen Auftreten von Verblendkeramikfrakturen in Verbindung gebracht (Rabel et al. 2018). Dies hätte die Vergleichbarkeit zwischen den beiden Studien einschränken können. In der vorliegenden Studie sind technische Komplikationen jedoch nur bei individuellen CAD/CAM-Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen aufgetreten, weshalb häufige Verblendkeramikfrakturen bei vollverblendeten Zirkonoxidkronen nicht beobachtet werden konnten.

Die Tatsache, dass in der vorliegenden Studie ein Behandler integriert war, birgt das Risiko, dass die Ergebnisse nicht generell übertragbar sind. Mehrere Behandler wären an dieser Stelle von Vorteil.

In der vorliegenden Studie wurden insgesamt 91 Implantate mit 71 CAD/CAM-Titanabutments und 20 CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments versorgt. Diese vergleichsweise kleine Stichprobe birgt das Risiko, dass die vorliegende Studie nicht in der Lage sei, eventuell vorhandene Risikofaktoren aufgrund der geringen Anzahl der Ereignisse zu erkennen. Die Studie ist potentiell unpowered. Aus diesem Grund stellt die kleine Stichprobe die stärkste Limitation dar. Zudem wurde aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Abutmentmaterialien keine Auswertung bezüglich der Einflussnahme von Abutmentmaterialien auf die Erfolgs- und Überlebensraten vorgenommen. Die Studie weist eine unvollständige Randomisierung auf. Die Art der Versorgung erfolgte jeweils auf Wunsch der Patienten. Insgesamt ergab sich ein patientenbezogener Dropout von 20 %. Die Gründe für die Dropouts konnten alle nachvollzogen werden. Derartig hohe Dropoutraten sind in prospektiven und retrospektiven Studien über lange Beobachtungszeiträume nicht selten (Pjetursson et al. 2018b).

Die Auswertung potentieller Risikofaktoren wurde hinsichtlich der zu ersetzenden Zahnform (Molar/Prämolar) und der Position des Implantates (zahnbegrenzt/terminal) durchgeführt. In der Literatur wurden jedoch Hinweise weiterer Risikofaktoren (z.B. Bruxismus) aufgeführt. Kinsel und Lin (2009) ermittelten in einer retrospektiven Studie bei Patienten mit Bruxismus ohne Aufbisschutz (Schienentherapie) und mit einer implantatgetragenen Gegenbeziehung ein signifikant höheres Risiko für Verblendkeramikfrakturen bei implantatgetragenen metallkeramischen Restaurationen (Kinsel und Lin 2009). Innerhalb einer systematischen Übersichtsarbeit wurde ebenfalls Bruxismus als ein potentieller Risikofaktor für technische Komplikationen bei implantatgetragenen Restaurationen ermittelt (Manfredini et al. 2014). In der vorliegenden Studie wurde darauf geachtet, dass die antagonistische Versorgung der Einzelzahnimplantate im Sinne einer festsitzenden Versorgung ist (implantatgetragener oder zahngetragener Zahnersatz). Es wurde jedoch keine Datenauswertung hinsichtlich des Risikofaktors Bruxismus durchgeführt.

4.6 Klinische Relevanz

Auf Basis der vorliegenden Studie können individuelle einteilige CAD/CAM-Titanabutments und zweiteilige CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments mit provisorisch zementierten Einzelkronen im Seitenzahnbereich über einen durchschnittlichen Beobachtungszeitraum von fünf Jahren mit ausreichender klinischer Sicherheit verwendet werden. Im direkten Vergleich der vorliegenden Studie zu der Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015) ließ sich durch die Verwendung von individuellen CAD/CAM-Abutments eine deutliche Reduzierung von technischen Komplikationen bei provisorisch zementierten Einzelkronen im Seitenzahnbereich ermitteln. Aus den vorliegenden Einzelstudien, die technische Komplikationen bei Einzelkronen auf CAD/CAM-Abutments und konfektionierten Abutments untersuchten, lässt sich ableiten, dass tendenziell weniger Retentionsverluste und Verblendkeramikfrakturen bei individuellen Abutments zu erwarten sind.

Einzelstudien, die explizit die technischen Komplikationen von implantatgetragenen Einzelkronen auf CAD/CAM-Abutments im Seitenzahnbereich untersuchten, sind selten. Die vorliegende Studie kann einen Beitrag dazu leisten, zukünftige implantat-prothetische Versorgungsstrategien mit einem verringerten Risiko für technische Komplikationen zu entwickeln.

Es werden in Zukunft weitere Einzelstudien benötigt, um eine gesicherte Aussage in Bezug auf die Auswirkung von CAD/CAM-Abutments auf die technischen Komplikationen zu ermöglichen. Lange Beobachtungszeiträume (> 10 Jahre) und größere Studienpopulationen sind wünschenswert. Es ist wichtig, dass in nachfolgenden Studien genaue Angaben zum

verwendeten Implantat, Abutment (konfektioniert oder individuell), Einzelkronenversorgung, Zementierungsverfahren und Lokalisation der Einzelkronen gemacht werden, um die Fragestellung der vorliegenden Studie mit ausreichender klinischer Sicherheit zu beantworten.

5 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden prospektiven klinischen Studie war es, den Einfluss von individuell hergestellten CAD/CAM-Abutments auf die technischen Komplikationen von provisorisch zementierten Einzelzahnkronen im Seitenzahnbereich zu untersuchen. Hierfür wurden in einer privaten Zahnarztpraxis (Hanau, Deutschland) 74 Patienten mit 93 CAD/CAM-Titanabutments und 30 CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments mit metallkeramischen und vollkeramischen Einzelkronen versorgt. Am Tag der Abschlussuntersuchung konnten insgesamt 59 Patienten mit 71 CAD/CAM-Titanabutments und 20 CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments teilnehmen sowie hinsichtlich technischer Komplikationen und Verluste nachuntersucht werden. Die durchschnittliche Beobachtungszeit betrug 62 ± 16 Monate. Die Patienten in dieser Studie wurden alle mit einem Implantatsystem (Ankylos®, Fa. Dentsply Sirona, Bensheim) versorgt. Alle Einzelkronen waren im Seitenzahnbereich lokalisiert und wurden mit provisorischem Befestigungszement (TempBond, Fa. Kerr Hawe GmbH, Karlsruhe) auf individuellen Abutments zementiert.

Aus den erhobenen Daten wurden die Inzidenzen und jährlichen Eventraten von technischen Komplikationen und Verlusten sowie die Erfolgs- und Überlebensraten mittels Ereigniszeitanalyse durch die Kaplan-Meier-Methode ermittelt. Zudem wurde unter Anwendung der Cox-Regressionsanalyse untersucht, ob potentielle Risikofaktoren wie die terminale Implantatposition und die zu ersetzende Zahnform Molar einen Einfluss auf die Erfolgsraten nimmt. Die Ergebnisse wurden mit der retrospektiven Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015), die ausschließlich konfektionierte Abutments mit provisorisch zementierte Einzelkronen im Seitenzahnbereich untersuchte, und der vorhandenen Literatur verglichen.

Nach der durchschnittlichen Beobachtungszeit von 62 ± 16 Monaten ergab sich eine Überlebensrate für Implantate von 100 %. Für zweiteilige CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments wurde eine 6-Jahres-Überlebensrate von 100 % ermittelt. Innerhalb der Gruppe der einteiligen CAD/CAM-Titanabutments ergab sich aufgrund von zwei Abutmentfrakturen eine 6-Jahres-Überlebensrate von 97 % (95 % KI: 93,0 - 100). Die Gesamtüberlebensrate von CAD/CAM-Abutments betrug in dieser Studie 98 % (95 % KI: 95,0 - 100). Die 6-Jahres-Überlebensrate für vollkeramische Einzelkronen betrug 100 % und die der metallkeramischen Einzelkronen 99 % (95 % KI: 96,0 - 100). Für die Gesamtüberlebensrate aller Einzelkronen konnte 99 % (95 % KI: 97,0 - 100) ermittelt werden.

Die 6-Jahres-Erfolgsrate für CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments mit vollkeramischen Einzelkronen betrug 100 %. Für CAD/CAM-Titanabutments mit metallkeramischen

Einzelkronen wurde eine 6-Jahres-Erfolgsrate von 86 % (95 % KI: 77,0 - 95,0) ermittelt. Betrachtet man die Gruppe der CAD/CAM-Titanabutments und CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments zusammen, ergab sich eine 6-Jahres-Erfolgsrate von 89 % (95 % KI: 82,0 - 96,0).

Die 5-Jahres-Inzidenz für technische Komplikationen betrug 6,59 %. Im Einzelnen wurde eine Verblendkeramikfraktur (1,09 %), zwei Retentionsverluste (2,19 %), eine Abutmentschraubenlockerung (1,09 %) sowie zwei Approximalkontaktverluste (2,19 %) konstatiert. Es ergab sich eine jährliche Gesamtfehlerrate von 1,32 % für technische Komplikationen bei implantatgetragenen Einzelkronen und Abutments. Es wurden jährliche Ereignisraten für die Verblendkeramikfraktur (0,22 %), Retentionsverluste (0,44 %), Abutmentschraubenlockerung (0,22 %) und Approximalkontaktverluste (0,44 %) ermittelt. Die 5-Jahres-Inzidenz für Verluste betrug 3,29 %, die sich aus zwei Abutmentfrakturen (2,19 %) und einer Neuankündigung einer Einzelkrone aufgrund eines Approximalkontaktverlustes (1,09 %) zusammensetzt. Die dazugehörige jährliche Gesamtverlustrate betrug 0,66 % für implantatgetragene Einzelkronen und Abutments. Die jährliche Verlustrate aufgrund von Abutmentfrakturen betrug 0,44 % und der Einzelkronen von 0,22 %.

Die Cox-Regressionsanalyse zeigte, dass weder die Position des Implantates in terminaler Position noch die zu ersetzende Zahnform Molar in dieser Studie einen signifikanten Einfluss auf die Erfolgsraten der Suprakonstruktionen nahmen. Bei einem Implantat in terminaler Position war das Risiko einer prothetischen Komplikation nach 72 Monaten 2,03-fach (95 % KI: 0,55 - 7,47) größer als bei einem Implantat in zahnbegrenzter Position. Bei einem zu ersetzenden Molaren ist das Risiko einer prothetischen Komplikation nach 72 Monaten 2,7-fach (95 % KI: 0,34 - 21,41) größer als bei einem Implantat an der Stelle eines Prämolaren.

In der vorliegenden Studie konnten hohe Überlebensraten und Erfolgsraten für einteilige CAD/CAM-Titanabutments mit metallkeramischen Einzelkronen und zweiteiligen CAD/CAM-Zirkonoxidkeramikabutments mit vollkeramischen Einzelkronen ermittelt werden. Die Überlebensraten für Implantate, Abutments und Einzelkronen sind in guter Übereinstimmung mit der vorhandenen Literatur. Im Gegensatz zur Vorläuferstudie von Rinke et al. (2015), in der ausschließlich konfektionierte Abutments benutzt wurden, konnte in der vorliegenden Studie eine deutliche Verringerung von technischen Komplikationen durch die Verwendung von individuellen CAD/CAM-Abutments bei provisorisch zementierten Einzelkronen im Seitenzahnbereich festgestellt werden.

6 Literaturverzeichnis

Abduo J, Lyons K (2013): Rationale for the Use of CAD/CAM Technology in Implant Prosthodontics. *Int J Dent* 2013, 1–8

Abichandani S, Nadiger R, Kavlekar A (2013): Abutment selection, designing, and its influence on the emergence profile: A comprehensive review. *Eur J Prosthodont* 1, 1–10

Abou-Ayash S, Strasding M, Rücker G, Att W (2017): Impact of Prosthetic Material on Mid- And Long-Term Outcome of Dental Implants Supporting Single Crowns and Fixed Partial Dentures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Eur J Oral Implantol* 10, 47–65

Aboushelib MN, Feilzer AJ, de Jager N, Kleverlaan CJ (2008): Prestresses in bilayered all-ceramic restorations. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 87B, 139–145

Adell R, Lekholm U, Rockler B, Branemark PI (1981): A 15-year study of osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. *Int J Oral Surg* 10, 387–416

Akca K, Cehreli MC, Iplikcioglu H (2003): Evaluation of the mechanical characteristics of the implant-abutment complex of a reduced-diameter morse-taper implant. A nonlinear finite element stress analysis. *Clin Oral Implants Res* 14, 444–454

Al-Amleh B, Neil Waddell J, Lyons K, Swain MV (2014): Influence of veneering porcelain thickness and cooling rate on residual stresses in zirconia molar crowns. *Dent Mater* 30, 271–280

Albrektsson T, Donos N (2012): Implant survival and complications. The Third EAO consensus conference 2012. *Clin Oral Implants Res* 23, 63–65

Alghazzawi TF (2016): Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *J Prosthodont Res* 60, 72–84

Alqutaibi AY, Alnazzawi AA, Algabri R, Aboalrejal AN, AbdElaziz MH (2020): Clinical performance of single implant-supported ceramic and metal-ceramic crowns: A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *J Prosthet Dent* (im Druck)

Altman DG, Bland JM (1998): Time to event (survival) data. *BMJ* 317, 468–469

Andreiotelli M, Wenz HJ, Kohal RJ (2009): Are ceramic implants a viable alternative to titanium implants? A systematic literature review. *Clin Oral Implants Res* 20, 32–47

ArRejaie AS, Al-Hamdan RS, Basunbul GI, Abduljabbar T, Al-Aali KA, Labban N (2019): Clinical performance of one-piece zirconia dental implants: A systematic review. *J Investig Clin Dent* 10, 1–6

Att W, Kurun S, Gerds T, Strub JR (2006): Fracture resistance of single-tooth implant-supported all-ceramic restorations: An in vitro study. *J Prosthet Dent* 95, 111–116

- Bagis B, Kutsal O (2018): What About a „Custom Abutment“? *Dent Oral Craniofac Res* 4, 1–2
- Barootchi S, Ravidà A, Tavelli L, Wang HL (2020): Nonsurgical treatment for peri-implant mucositis: a systematic review and meta-analysis. *Int J Oral Implantol* 13, 123–139
- Berglundh T, Armitage G, Araujo MG, Avila-Ortiz G, Blanco J, Camargo PM, Chen S, Cochran D, Derks J, Figuero E, et al. (2018): Peri-implant diseases and conditions: Consensus report of workgroup 4 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *J Clin Periodontol* 89, 313–318
- Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D (2008): Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J* 204, 505–511
- Binon P (2000): Implants and Components: Entering the New Millennium. *Int J Oral Maxillofac Implants* 15, 76–94
- Borba M, de Araújo MD, de Lima E, Yoshimura HN, Cesar PF, Griggs JA, Della Bona Á (2011): Flexural strength and failure modes of layered ceramic structures. *Dent Mater* 27, 1259–1266
- Borges T, Lima T, Carvalho Á, Dourado C, Carvalho V (2014): The influence of customized abutments and custom metal abutments on the presence of the interproximal papilla at implants inserted in single-unit gaps: a 1-year prospective clinical study. *Clin Oral Implants Res* 25, 1222–1227
- Boudrias P, Shoghikian É, Morin É, Hutnik P (2001): Esthetic Option for the Implant-Supported Single-Tooth Restoration — Treatment Sequence With a Ceramic Abutment. *J Can Dent Assoc* 67, 508–514
- Branemark PI, Hansson BO, Adell R, Breine U, Lindström J, Hallén O, Ohman A (1977): Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. *Scand J Plast Reconstr Surg Suppl* 16, 1–132
- Brodbeck U (2003): The ZiReal Post: A New Ceramic Implant Abutment. *J Esthet Restor Dent* 15, 10–24
- Brunski JB (1992): Biomechanical factors affecting the bone-dental implant interface. *Clin Mater* 10, 153–201
- Cacaci C, Neugebauer J, Schlegel A, Seidel F (Hrsg.): *Orale Implantologie - Checklisten der Zahnmedizin*. 1. Auflage; Thieme, Stuttgart 2006
- Cao Y, Yu C, Wu Y, Li L, Li C (2019): Long-Term Survival and Peri-Implant Health of Titanium Implants with Zirconia Abutments: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Prosthodont* 28, 883–892
- Caricasulo R, Malchiodi L, Ghensi P, Fantozzi G, Cucchi A (2018): The influence of

implant-abutment connection to peri-implant bone loss: A systematic review and meta-analysis. *Clin Implant Dent Relat Res* 20, 653–664

Carnaggio TV, Conrad R, Engelmeier RL, Gerngross P, Paravina R, Perezous L, Powers JM (2012): Retention of CAD/CAM All-Ceramic Crowns on Prefabricated Implant Abutments: An In Vitro Comparative Study of Luting Agents and Abutment Surface Area. *J Prosthodont* 21, 523–528

Ceruso FM, Barnaba P, Mazzoleni S, Ottria L, Gargari M, Zuccon A, Bruno G, Di Fiore A (2017): Implant-abutment connections on single crowns: a systematic review. *Oral Implantol (Rome)* 10, 349–353

Chaar MS, Att W, Strub JR (2011): Prosthetic outcome of cement-retained implant-supported fixed dental restorations: a systematic review. *J Oral Rehabil* 38, 697–711

Chee W, Jivraj S (2006a): Designing abutments for cement retained implant supported restorations. *Br Dent J* 201, 559–563

Chee W, Jivraj S (2006b): Screw versus cemented implant supported restorations. *Br Dent J* 201, 501–507

Chevalier J, Deville S, Münch E, Jullian R, Lair F (2004): Critical effect of cubic phase on aging in 3mol% yttria-stabilized zirconia ceramics for hip replacement prosthesis. *Biomaterials* 25, 5539–5545

Christel P, Meunier A, Heller M, Torre JP, Peille CN (1989): Mechanical properties and short-term in-vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia. *J Biomed Mater Res* 23, 45–61

Coffey JP, Anusavice KJ, DeHoff PH, Lee RB, Hojjatie B (1988): Influence of Contraction Mismatch and Cooling Rate on Flexural Failure of PFM Systems. *J Dent Res* 67, 61–65

Çömlekoğlu EM, Nizam N, Çömlekoğlu MD (2018): Immediate definitive individualized abutments reduce peri-implant bone loss: a randomized controlled split-mouth study on 16 patients. *Clin Oral Investig* 22, 475–486

Coray R, Zeltner M, Özcan M (2016): Fracture strength of implant abutments after fatigue testing: A systematic review and a meta-analysis. *J Mech Behav Biomed Mater* 62, 333–346

Cox DR (1972): Regression Models and Life-Tables. *J R Stat Soc Series B Stat Methodol* 34, 187–220

Daftary F, Mahallati R, Bahat O, Sullivan RM (2013): Lifelong Craniofacial Growth and the Implications for Osseointegrated Implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 28, 163–169

- Daudt Polido W, Aghaloo T, Emmett TW, Taylor TD, Morton D (2018): Number of implants placed for complete-arch fixed prostheses: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 29, 154–183
- DeHoff PH, Anusavice KJ, Hojjatie B (1998): Thermal incompatibility analysis of metal-ceramic systems based on flexural displacement data. *J Biomed Mater Res* 41, 614–623
- DeHoff PH, Barrett AA, Lee RB, Anusavice KJ (2008): Thermal compatibility of dental ceramic systems using cylindrical and spherical geometries. *Dent Mater* 24, 744–752
- Della Bona A, Pecho OE, Alessandretti R (2015): Zirconia as a Dental Biomaterial. *Materials (Basel)* 8, 4978–4991
- Denry I, Kelly J (2008): State of the art of zirconia for dental applications. *Dent Mater* 24, 299–307
- Derks J, Tomasi C (2015): Peri-implant health and disease. A systematic review of current epidemiology. *J Clin Periodontol* 42, 158–171
- Döring K, Eisenmann E, Stiller M (2004): Functional and Esthetic Considerations for Single-tooth Ankylos Implant-crowns: 8 Years of Clinical Performance. *J Oral Implantol* 30, 198–209
- Edelhoff D, Schweiger J, Prandtner O, Stimmelmayer M, Güth J (2019): Metal-free implant-supported single-tooth restorations. Part I: Abutments and cemented crowns. *Quintessence Int* 50, 176–184
- ElHafeez SA, Torino C, D'Arrigo G, Bolignano D, Provenzano F, Mattace-Raso F, Zoccali C, Tripepi G (2012): An overview on standard statistical methods for assessing exposure-outcome link in survival analysis (Part II): the Kaplan-Meier analysis and the Cox regression method. *Aging Clin Exp Res* 24, 203–206
- Fretwurst T, Semper-Hogg W, Nelson K (2016): Dentale Implantologie: Implantat-Abutment-Verbindung - Positionsstabilität und Mikrospace im Fokus. *ZBW* 2016, 20–23
- Fu JH, Wang HL (2020): Breaking the wave of peri-implantitis. *Periodontol 2000* 84, 145–160
- Gealh WC, Mazzo V, Barbi F, Camarini ET (2011): Osseointegrated Implant Fracture: Causes and Treatment. *J Oral Implantol* 37, 499–503
- Gehrke P, Fischer C (2013): Join the (r)-evolution - Individuelle, CAD/CAM-gestützt gefertigte Implantataufbauten Teil 1. *J Cont Dent Educ* 16, 330–337
- Gehrke P, Johansson D, Fischer C, Stawarczyk B, Beuer F (2015): In Vitro Fatigue and Fracture Resistance of One- and Two-Piece CAD/CAM Zirconia Implant Abutments. *Int J Oral Maxillofac Implants* 30, 546–554
- Glauser R, Sailer I, Wohlwend A, Studer S, Schibli M, Schärer P (2004): Experimental

zirconia abutments for implant-supported single-tooth restorations in esthetically demanding regions: 4-year results of a prospective clinical study. *Int J Prosthodont* 17, 285–290

Goiato MC, Andreotti AM, dos Santos DM, Nobrega AS, de Caxias FP, Bannwart LC (2019): Influence of length, diameter and position of the implant in its fracture incidence: A Systematic Review. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 13, 109–116

Gracis S, Michalakis K, Vigolo P, Vult von Steyern P, Zwahlen M, Sailer I (2012): Internal vs. external connections for abutments/reconstructions: a systematic review. *Clin Oral Implants Res* 23, 202–216

Grössner-Schreiber B, Terheyden H (2004): Implantatdesign–Form-und Oberflächengestaltung enossaler Implantate. *Implantologie* 12, 213–223

Guess PC, Bonfante EA, Silva NRFA, Coelho PG, Thompson VP (2013): Effect of core design and veneering technique on damage and reliability of Y-TZP-supported crowns. *Dent Mater* 29, 307–316

Guljé FL, Raghoobar GM, Vissink A, Meijer HJA (2019): Single crown restorations supported by 6-mm implants in the resorbed posterior mandible: A five-year prospective case series. *Clin Implant Dent Relat Res* 21, 1017–1022

Gupta S, Gupta H, Tandan A (2015): Technical complications of implant-causes and management: A comprehensive review. *Natl J Maxillofac Surg* 6, 3–8

Hannink RHJ, Kelly PM, Muddle BC (2000): Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *J Am Ceram Soc* 83, 461–487

Hashim D, Cionca N, Courvoisier DS, Mombelli A (2016): A systematic review of the clinical survival of zirconia implants. *Clin Oral Investig* 20, 1403–1417

Hebel KS, Gajjar RC (1997): Cement-retained versus screw-retained implant restorations: Achieving optimal occlusion and esthetics in implant dentistry. *J Prosthet Dent* 77, 28–35

Hedderich J, Sachs L (Hrsg.): *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R*. 14. Auflage; Springer Gabler, Berlin/Heidelberg 2012

Heitz-Mayfield LJA, Salvi GE (2018): Peri-implant mucositis. *J Periodontol* 45, 237–245

Hirooka H, Renvert S (2019): Diagnosis of Periimplant Disease. *Implant Dent* 28, 144–149

Hobo S, Shillingburg HT (1973): Porcelain fused to metal: Tooth preparation and coping design. *J Prosthet Dent* 30, 28–36

Hsu KW, Shen YF, Wei PC (2017): Compatible CAD-CAM titanium abutments for posterior single-implant tooth replacement: A retrospective case series. *J Prosthet Dent* 117,

363–366

Hsu KW, Wei PC, Chen YL, Liou EJ (2019): Retrospective and Clinical Evaluation of Aftermarket CAD/CAM Titanium Abutments Supporting Posterior Splinted Prostheses and Single Crowns. *Int J Oral Maxillofac Implants* 34, 1161–1168

Hu ML, Lin H, Zhang YD, Han JM (2020): Comparison of technical, biological, and esthetic parameters of ceramic and metal-ceramic implant-supported fixed dental prostheses: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent* 124, 26–35

Huang Y, Wang J (2019): Mechanism of and factors associated with the loosening of the implant abutment screw: A review. *J Esthet Restor Dent* 31, 338–345

Jepsen S, Berglundh T, Genco R, Aass AM, Demirel K, Derks J, Figuero E, Giovannoli JL, Goldstein M, Lambert F, et al. (2015): Primary prevention of peri-implantitis: Managing peri-implant mucositis. *J Clin Periodontol* 42, 152–157

Jokstad A, Ganeles J (2018): Systematic review of clinical and patient-reported outcomes following oral rehabilitation on dental implants with a tapered compared to a non-tapered implant design. *Clin Oral Implants Res* 29, 41–54

Jokstad A, Braegger U, Brunski JB, Carr AB, Naert I, Wennerberg A (2003): Quality of dental implants. *Int Dent J* 53, 409–443

Jorge JRP, Barão VA, Delben JA, Faverani LP, Queiroz TP, Assunção WG (2013): Titanium in Dentistry: Historical Development, State of the Art and Future Perspectives. *J Indian Prosthodont Soc* 13, 71–77

Jørgensen KD (1955): The Relationship Between Retention and Convergence Angle in Cemented Veneer Crowns. *Acta Odontol Scand* 13, 35–40

Jung RE, Pjetursson BE, Glauser R, Zembic A, Zwahlen M, Lang NP (2008): A systematic review of the 5-year survival and complication rates of implant-supported single crowns. *Clin Oral Implants Res* 19, 119–130

Jung RE, Zembic A, Pjetursson BE, Zwahlen M, Thoma SD (2012): Systematic review of the survival rate and the incidence of biological, technical, and aesthetic complications of single crowns on implants reported in longitudinal studies with a mean follow-up of 5 years. *Clin Oral Implants Res* 23, 2–21

Jung RE, Al-Nawas B, Araujo M, Avila-Ortiz G, Barter S, Brodala N, Chappuis V, Chen B, De Souza A, Almeida RF, et al. (2018): Group 1 ITI Consensus Report: The influence of implant length and design and medications on clinical and patient-reported outcomes. *Clin Oral Implants Res* 29, 69–77

Kaidonis JA (2008): Tooth wear: the view of the anthropologist. *Clin Oral Investig* 12, 21–26

- Kaidonis JA, Townsend GC, Richards LC (1992): Interproximal tooth wear: A new observation. *Am J Phys Anthropol* 88, 105–107
- Kaplan EL, Meier P (1958): Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *J Am Stat Assoc* 53, 457–481
- Kapos T, Evans C (2014): CAD/CAM technology for implant abutments, crowns, and superstructures. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29, 117–136
- Karunagaran S, Paprocki GJ, Wicks R, Markose S (2013): A Review of Implant Abutments - Abutment Classification to Aid Prosthetic Selection. *J Tenn Dent Assoc* 93, 18–23
- Katsavochristou A, Koumoulis D (2019): Incidence of abutment screw failure of single or splinted implant prostheses: A review and update on current clinical status. *J Oral Rehabil* 46, 776–786
- Kinsel RP, Lin D (2009): Retrospective analysis of porcelain failures of metal ceramic crowns and fixed partial dentures supported by 729 implants in 152 patients: Patient-specific and implant-specific predictors of ceramic failure. *J Prosthet Dent* 101, 388–394
- Klein MO, Schiegnitz E, Al-Nawas B (2014): Systematic Review on Success of Narrow-Diameter Dental Implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29, 43–54
- Kohal RJ, Att W, Bächle M, Butz F (2008): Ceramic abutments and ceramic oral implants. An update. *Periodontol 2000* 47, 224–243
- Kokubo Y, Tsumita M, Kano T, Fukushima S (2011): The influence of zirconia coping designs on the fracture load of all-ceramic molar crowns. *Dent Mater J* 30, 281–285
- Korsch M, Walther W (2015): Prefabricated Versus Customized Abutments: A Retrospective Analysis of Loosening of Cement-Retained Fixed Implant-Supported Reconstructions. *Int J Prosthodont* 28, 522–526
- Krebs M, Schmenger K, Neumann K, Weigl P, Moser W, Nentwig G-H (2015): Long-Term Evaluation of ANKYLOS® Dental Implants, Part I: 20-Year Life Table Analysis of a Longitudinal Study of More Than 12,500 Implants. *Clin Implant Dent Relat Res* 17, 275–286
- Lee JH, Park JM, Park EJ, Koak JY, Kim SK, Heo SJ (2016): Comparison of Customized Abutments Made from Titanium and a Machinable Precious Alloy. *Int J Oral Maxillofac Implants* 31, 92–100
- Lemos CAA, Verri FR, Gomes JM, Batista VE, Cruz RS, Oliveira HF, Pellizzer EP (2019): Ceramic versus metal-ceramic implant-supported prostheses: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent* 121, 879–886

- Lewis SG, Llamas D, Avera S (1992): The UCLA abutment: A four-year review. *J Prosthet Dent* 67, 509–515
- Linkevicius T, Vaitelis J (2015): The effect of zirconia or titanium as abutment material on soft peri-implant tissues: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 26, 139–147
- Linkevicius T, Vindasiute E, Puisys A, Linkeviciene L, Maslova N, Puriene A (2013): The influence of the cementation margin position on the amount of undetected cement. A prospective clinical study. *Clin Oral Implants Res* 24, 71–76
- Liu X, Chen S, Tsoi JK, Matinlinna JP (2017): Binary titanium alloys as dental implant materials—a review. *Regen Biomater* 4, 315–323
- Long L, Alqarni H, Masri R (2017): Influence of implant abutment fabrication method on clinical outcomes: a systematic review. *Eur J Oral Implantol* 10, 67–77
- Lops D, Bressan E, Chiapasco M, Rossi A, Romeo E (2013): Zirconia and titanium implant abutments for single-tooth implant prostheses after 5 years of function in posterior regions. *Int J Oral Maxillofac Implants* 28, 281–287
- Lughi V, Sergo V (2010): Low temperature degradation -aging- of zirconia: A critical review of the relevant aspects in dentistry. *Dent Mater* 26, 807–820
- Ma S, Fenton A (2015): Screw- Versus Cement-Retained Implant Prostheses: A Systematic Review of Prosthodontic Maintenance and Complications. *Int J Prosthodont* 28, 127–145
- Macedo JP, Pereira J, Vahey BR, Henriques B, Benfatti CA, Magini RS, Lopez-Lopez J, Souza JC (2016): Morse taper dental implants and platform switching: the new paradigm in oral implantology. *Eur J Dent* 10, 148–154
- Manfredini D, Poggio CE, Lobbezoo F (2014): Is Bruxism a Risk Factor for Dental Implants? A Systematic Review of the Literature: Bruxism and Dental Implants. *Clin Implant Dent Relat Res* 16, 460–469
- Mangano C, Mangano F, Piattelli A, Iezzi G, Mangano A, La Colla L (2009): Prospective clinical evaluation of 1920 Morse taper connection implants: results after 4 years of functional loading. *Clin Oral Implants Res* 20, 254–261
- Martinez-Rus F, Prieto M, Salido M, Madrigal C, Özcan M, Pradies G (2017): A Clinical Study Assessing the Influence of Anodized Titanium and Zirconium Dioxide Abutments and Peri-implant Soft Tissue Thickness on the Optical Outcome of Implant-Supported Lithium Disilicate Single Crowns. *Int J Oral Maxillofac Implants* 32, 156–163
- Meyer S, Giannopoulou C, Courvoisier D, Schimmel M, Müller F, Mombelli A (2017): Experimental mucositis and experimental gingivitis in persons aged 70 or over. Clinical and biological responses. *Clin Oral Implants Res* 28, 1005–1012

- Michalakis KX, Hirayama H, Garefis PD (2003): Cement-retained versus screw-retained implant restorations: a critical review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 18, 719–728
- Millen CS, Reuben RL, Ibbetson RJ (2012): The effect of coping/veneer thickness on the fracture toughness and residual stress of implant supported, cement retained zirconia and metal–ceramic crowns. *Dent Mater* 28, 250–258
- Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y (2009): A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J* 28, 44–56
- Morris HF, Ochi S, Orenstein IH, Petrazzuolo V (2004): AICRG, Part V: Factors Influencing Implant Stability at Placement and Their Influence on Survival of Ankylos Implants. *J Oral Implantol* 30, 162–170
- Moy PK, Nishimura GH, Pozzi A, Danda AK (2016): Single implants in dorsal areas – A systematic review. *Eur J Oral Implantol* 9, 163–172
- Mühlemann S, Kraus RD, Hämmerle CH, Thoma DS (2018): Is the use of digital technologies for the fabrication of implant-supported reconstructions more efficient and/or more effective than conventional techniques: A systematic review. *Clin Oral Implants Res* 29, 184–195
- Muley N, Prithviraj DR, Gupta V (2012): Evolution of External and Internal Implant to Abutment Connection. *Int J Oral Implantol Clin Res* 3, 122–129
- Naveau A, Rignon-Bret C, Wulfman C (2019): Zirconia abutments in the anterior region: A systematic review of mechanical and esthetic outcomes. *J Prosthet Dent* 121, 775–781
- Nentwig GH (2004): Ankylos Implant System: Concept and Clinical Application. *J Oral Implantol* 30, 171–177
- Nitschke I, Stark H: Zahnverlust und prothetische Versorgung. In: Jordan AR, Micheelis W (Hrsg.): Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie. Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV, Köln 2016, 416-450
- Nothdurft FP, Nonhoff J, Pospiech PR (2014): Pre-fabricated zirconium dioxide implant abutments for single-tooth replacement in the posterior region: success and failure after 3 years of function. *Acta Odontol Scand* 72, 392–400
- Papaspyridakos P, De Souza A, Vazouras K, Gholami H, Pagni S, Weber HP (2018): Survival rates of short dental implants (≤ 6 mm) compared with implants longer than 6 mm in posterior jaw areas: A meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 29, 8–20
- Park SE, Da Silva JD, Weber HP, Ishikawa-Nagai S (2007): Optical phenomenon of peri-implant soft tissue. Part I. Spectrophotometric assessment of natural tooth gingiva and peri-implant mucosa. *Clin Oral Implants Res* 18, 569–574

- Parpaiola A, Norton MR, Cecchinato D, Bressan E, Toia M (2013): Virtual Abutment Design: A Concept for Delivery of CAD/CAM Customized Abutments—Report of a Retrospective Cohort. *Int J Periodontics Restorative Dent* 33, 51–58
- Patzelt SBM, Spies BC, Kohal RJ (2015): CAD/CAM-fabricated implant-supported restorations: a systematic review. *Clin Oral Implants Res* 26, 77–85
- Pieralli S, Kohal RJ, Jung RE, Vach K, Spies BC (2017): Clinical outcomes of zirconia dental implants: A systematic review. *J Dent Res* 96, 38–46
- Pieralli S, Kohal RJ, Rabel K, von Stein-Lausnitz M, Vach K, Spies BC (2018): Clinical outcomes of partial and full-arch all-ceramic implant-supported fixed dental prostheses. A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 29, 224–236
- Pietruski JK, Skurska A, Bernaczyk A, Milewski R, Pietruska MJ, Gehrke P, Pietruska MD (2018): Evaluation of concordance between CAD/CAM and clinical positions of abutment shoulder against mucosal margin: an observational study. *BMC Oral Health* 18, 1–6
- Pjetursson BE, Zwahlen M, Lang NP (2012): Quality of reporting of clinical studies to assess and compare performance of implant-supported restorations. *J Clin Periodontol* 39, 139–159
- Pjetursson BE, Asgeirsson AG, Zwahlen M, Sailer I (2014): Improvements in implant dentistry over the last decade: comparison of survival and complication rates in older and newer publications. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29, 308–324
- Pjetursson BE, Zarauz C, Strasding M, Sailer I, Zwahlen M, Zembic A (2018a): A systematic review of the influence of the implant-abutment connection on the clinical outcomes of ceramic and metal implant abutments supporting fixed implant reconstructions. *Clin Oral Implants Res* 29, 160–183
- Pjetursson BE, Valente NA, Strasding M, Zwahlen M, Liu S, Sailer I (2018b): A systematic review of the survival and complication rates of zirconia-ceramic and metal-ceramic single crowns. *Clin Oral Implants Res* 29, 199–214
- Priest G (2005): Virtual-Designed and Computer-Milled Implant Abutments. *J Oral Maxillofac Surg* 63, 22–32
- Priest G (2017): A Current Perspective on Screw-Retained Single-Implant Restorations: A Review of Pertinent Literature. *J Esthet Restor Dent* 29, 161–171
- Prisco R, Morgano SM, D’Amato S (2001): New abutment for a screw-retained, implant-supported crown. *J Prosthet Dent* 85, 30–33
- Proos KA, Swain MV, Ironside J, Steven GP (2003): Influence of Core Thickness on a Restored Crown of a First Premolar Using Finite Element Analysis. *Int J Prosthodont* 16, 474–480

- Rabel K, Spies BC, Pieralli S, Vach K, Kohal R-J (2018): The clinical performance of all-ceramic implant-supported single crowns: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 29, 196–223
- Raghavendra S, Wood MC, Taylor TD (2005): Early wound healing around endosseous implants: A review of the literature. *Int J Oral Maxillofac Implants* 20, 425–431
- Renvert S, Polyzois I (2015): Risk indicators for peri-implant mucositis: a systematic literature review. *J Clin Periodontol* 42, 172–186
- Renvert S, Quirynen M (2015): Risk indicators for peri-implantitis. A narrative review. *Clin Oral Implants Res* 26, 15–44
- Rich JT, Neely JG, Paniello RC, Voelker CCJ, Nussenbaum B, Wang EW (2010): A practical guide to understanding Kaplan-Meier curves. *Otolaryngol Head Neck Surg* 143, 331–336
- Richter EJ (1995): In Vivo Vertical Forces on Implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 10, 99–108
- Richter EJ: Konstruktionsprinzipien von Implantaten aus prothetischer Sicht. In: Koeck B, Wagner W (Hrsg.): *Implantologie*. 2. Auflage; Elsevier Urban & Fischer, München/Jena 2004, 48-59
- Richter EJ (2005): Implantologie in der Zahnheilkunde. *Dtsch Zahnärztl Z* 60, 915–916
- Rinke S, Roediger M, Eickholz P, Lange K, Ziebolz D (2015): Technical and biological complications of single-molar implant restorations. *Clin Oral Implants Res* 26, 1024–1030
- Roehling S, Schlegel KA, Woelfler H, Gahlert M (2019): Zirconia compared to titanium dental implants in preclinical studies—A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 30, 365–395
- Romanos GE, Nentwig GH (2000): Single molar replacement with a progressive thread design implant system: a retrospective clinical report. *Int J Oral Maxillofac Implants* 15, 831–836
- Romanos GE, Javed F, Delgado-Ruiz RA, Calvo-Guirado JL (2015): Peri-implant Diseases. *Dent Clin N Am* 59, 157–178
- Rupp F, Liang L, Geis-Gerstorfer J, Scheideler L, Hüttig F (2018): Surface characteristics of dental implants: A review. *Dent Mater* 34, 40–57
- Safari S, Hosseini Ghavam F, Amini P, Yaghmaei K (2018): Effects of abutment diameter, luting agent type, and re-cementation on the retention of implant-supported CAD/CAM metal copings over short abutments. *J Adv Prosthodont* 10, 1–7
- Sailer I, Philipp A, Zembic A, Pjetursson BE, Hämmerle CHF, Zwahlen M (2009a): A

systematic review of the performance of ceramic and metal implant abutments supporting fixed implant reconstructions. *Clin Oral Implants Res* 20, 4–31

Sailer I, Sailer T, Stawarczyk B, Jung RE, Hämmerle CHF (2009b): In vitro study of the influence of the type of connection on the fracture load of zirconia abutments with internal and external implant-abutment connections. *Int J Oral Maxillofac Implants* 24, 850–858

Sailer I, Mühlemann S, Zwahlen M, Hämmerle CHF, Schneider D (2012): Cemented and screw-retained implant reconstructions: a systematic review of the survival and complication rates. *Clin Oral Implants Res* 23, 163–201

Sailer I, Makarov NA, Thoma DS, Zwahlen M, Pjetursson BE (2015): All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs). *Dent Mater* 31, 603–623

Sailer I, Strasing M, Valente NA, Zwahlen M, Liu S, Pjetursson BE (2018a): A systematic review of the survival and complication rates of zirconia-ceramic and metal-ceramic multiple-unit fixed dental prostheses. *Clin Oral Implants Res* 29, 184–198

Sailer I, Mühlemann S, Kohal RJ, Spies BC, Pjetursson BE, Lang NP, Gotfredsen KL, Ellingsen JE, Francisco H, Özcan M, et al. (2018b): Reconstructive aspects: Summary and consensus statements of group 3. The 5 th EAO Consensus Conference 2018. *Clin Oral Implants Res* 29, 237–242

Salvi GE, Aglietta M, Eick S, Sculean A, Lang NP, Ramseier CA (2012): Reversibility of experimental peri-implant mucositis compared with experimental gingivitis in humans. *Clin Oral Implants Res* 23, 182–190

Sanchez Perez A, Moya Villaescusa Mj, Jornet Garcia A, Gomez S (2010): Etiology, risk factors and management of implant fractures. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 15, 504–508

Schepke U, Meijer HJA, Kerdijk W, Raghoobar GM, Cune M (2017): Stock Versus CAD/CAM Customized Zirconia Implant Abutments - Clinical and Patient-Based Outcomes in a Randomized Controlled Clinical Trial. *Clin Implant Dent Relat Res* 19, 74–84

Schwarz F, Derks J, Monje A, Wang H-L (2018): Peri-implantitis. *J Clin Periodontol* 45, 246–266

Schwarz S, Schröder C, Hassel A, Bömicke W, Rammelsberg P (2012): Survival and Chipping of Zirconia-Based and Metal-Ceramic Implant-Supported Single Crowns. *Clin Implant Dent Relat Res* 14, 119–125

Shalabi MM, Gortemaker A, Van't Hof MA, Jansen JA, Creugers NHJ (2006): Implant surface roughness and bone healing: a systematic review. *J Dent Res* 85, 496–500

- Shim HW, Yang BE (2015): Long-term cumulative survival and mechanical complications of single-tooth Ankylos Implants: focus on the abutment neck fractures. *J Adv Prosthodont* 7, 423–430
- Shirakura A, Lee H, Geminiani A, Ercoli C, Feng C (2009): The influence of veneering porcelain thickness of all-ceramic and metal ceramic crowns on failure resistance after cyclic loading. *J Prosthet Dent* 101, 119–127
- Sim BK, Kim B, Kim MJ, Jeong GH, Ju KW, Shin YJ, Kim MY, Lee J-H (2017): Hollow Abutment Screw Design for Easy Retrieval in Case of Screw Fracture in Dental Implant System. *J Healthc Eng* 2017, 1–6
- Squier RS, Agar JR, Duncan JP, Taylor TD (2001): Retentiveness of dental cements used with metallic implant components. *Int J Oral Maxillofac Implants* 16, 793–798
- Staubli N, Walter C, Schmidt JC, Weiger R, Zitzmann NU (2017): Excess cement and the risk of peri-implant disease - a systematic review. *Clin Oral Implants Res* 28, 1278–1290
- Stawarczyk B, Keul C, Eichenberger M, Figge D, Edelhoff D, Lümke mann N (2017): Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I. *Quintessence Int* 48, 369–380
- Storelli S, Del Fabbro M, Scanferla M, Palandrani G, Romeo E (2018): Implant-supported cantilevered fixed dental rehabilitations in fully edentulous patients: Systematic review of the literature. Part II. *Clin Oral Implants Res* 29, 275–294
- Strub JR, Kern M, Türp JC, Witkowski S, Heydecke G, Wolfart S (Hrsg.): *Curriculum Prothetik*. Band 3; 4. Auflage; Quintessenz Verlag, Berlin 2011
- Swain MV (2009): Unstable Cracking (Chipping) of Veneering Porcelain on All-Ceramic Dental Crowns and Fixed Partial Dentures. *Acta Biomater* 5, 1668–1677
- Taylor TD, Agar JR, Vogiatzi T (2000): Implant Prosthodontics: Current Perspective and Future Directions. *Int J Oral Maxillofac Implants* 15, 66–75
- Tiu J, Al-Amleh B, Waddell JN, Duncan WJ (2015): Clinical tooth preparations and associated measuring methods: A systematic review. *J Prosthet Dent* 113, 175–184
- Tsuruta K, Ayukawa Y, Matsuzaki T, Kihara M, Koyano K (2018): The influence of implant–abutment connection on the screw loosening and microleakage. *Int J Implant Dent* 4, 1–6
- Varthis S, Tarnow DP, Randi A (2019): Interproximal Open Contacts Between Implant Restorations and Adjacent Teeth. Prevalence - Causes - Possible Solutions. *J Prosthodont* 28, 806–810
- Vigolo P, Givani A, Majzoub Z, Cordioli G (2006): A 4-Year Prospective Study to Assess

Peri-Implant Hard and Soft Tissues Adjacent to Titanium Versus Gold-Alloy Abutments in Cemented Single Implant Crowns. *J Prosthodont* 15, 250–256

Vigolo P, Mutinelli S, Givani A, Stellini E (2012): Cemented versus screw-retained implant-supported single-tooth crowns: a 10-year randomised controlled trial. *Eur J Oral Implantol* 5, 355–364

Vindasiute E, Puisys A, Maslova N, Linkeviciene L, Peciuliene V, Linkevicius T (2015): Clinical Factors Influencing Removal of the Cement Excess in Implant-Supported Restorations. *Clin Implant Dent Relat Res* 17, 771–778

Wachtel A, Zimmermann T, Spintig T, Beuer F, Müller WD, Schwitalla AD (2016): A Novel Approach to Prove Bacterial Leakage of Implant-Abutment Connections In Vitro. *J Oral Implantol* 42, 452–457

Wagner W, Al Nawas B: Implantatmaterialien und Konstruktionsprinzipien der Implantate aus chirurgischer Sicht. In: Koeck B, Wagner W (Hrsg.): *Implantologie*. 2. Auflage; Elsevier Urban & Fischer, München/Jena 2004, 62-93

Wang X, Fan D, Swain MV, Zhao K (2012): A Systematic Review of All-Ceramic Crowns: Clinical Fracture Rates in Relation to Restored Tooth Type. *Int J Prosthodont* 25, 441–450

Wasiluk G, Chomik E, Gehrke P, Pietruska M, Skurska A, Pietruski J (2017): Incidence of undetected cement on CAD/CAM monolithic zirconia crowns and customized CAD/CAM implant abutments. A prospective case series. *Clin Oral Implants Res* 28, 774–778

Weigl P (2004): New Prosthetic Restorative Features of the Ankylos Implant System. *J Oral Implantol* 30, 178–188

Wismeijer D, Brägger U, Evans C, Kapos T, Kelly JR, Millen C, Wittneben JG, Zembic A, Taylor TD (2014): Consensus Statements and Recommended Clinical Procedures Regarding Restorative Materials and Techniques for Implant Dentistry. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29, 137–140

Wittneben JG, Millen C, Brägger U (2014): Clinical Performance of Screw- Versus Cement-Retained Fixed Implant-Supported Reconstructions—A Systematic Review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29, 84–98

Wittneben JG, Gavric J, Belser UC, Bornstein MM, Joda T, Chappuis V, Sailer I, Brägger U (2017a): Esthetic and Clinical Performance of Implant-Supported All-Ceramic Crowns Made with Prefabricated or CAD/CAM Zirconia Abutments: A Randomized, Multicenter Clinical Trial. *J Dent Res* 96, 163–170

Wittneben JG, Joda T, Weber HP, Brägger U (2017b): Screw retained vs. cement retained implant-supported fixed dental prosthesis. *Periodontol 2000* 73, 141–151

- Zembic A, Bösch A, Jung RE, Hämmerle CHF, Sailer I (2013): Five-year results of a randomized controlled clinical trial comparing zirconia and titanium abutments supporting single-implant crowns in canine and posterior regions. *Clin Oral Implants Res* 24, 384–390
- Zembic A, Kim S, Zwahlen M, Kelly JR (2014): Systematic Review of the Survival Rate and Incidence of Biologic, Technical, and Esthetic Complications of Single Implant Abutments Supporting Fixed Protheses. *Int J Oral Maxillofac Implants* 29, 99–116
- Ziegler A, Lange S, Bender R (2004): Überlebenszeitanalyse: Die Cox-Regression. *Dtsch Med Wochenschr* 129, 1–3
- Ziegler A, Lange S, Bender R (2007): Überlebenszeitanalyse: Eigenschaften und Kaplan-Meier Methode. *Dtsch Med Wochenschr* 132, 36–38
- Zitzmann NU, Berglundh T, Marinello CP, Lindhe J (2001): Experimental peri-implant mucositis in man. *J Clin Periodontol* 28, 517–523
- Zwiener I, Blettner M, Hommel G (2011): Survival analysis— part 15 of a series on evaluation of scientific publications. *Dtsch Arztebl Int* 108, 163–169

Danksagung

Ein großer Dank gilt meinem Doktorvater Apl. Prof. Dr. med. dent. S. Rinke für die Bereitstellung des Themas und die ausgezeichnete Betreuung in jeder Phase der Dissertation. Ein weiterer Dank gilt auch meinem Zweitbetreuer Prof. Dr. med. dent. M. Hülsmann für die genommene Zeit und konstruktive Kritik während der Fortschrittsberichte.