

**Diplomarbeit**

**Unterschiedliche Implantat – Abutmentverbindungen – bei 2-  
teiligen Zirkonoxid Implantaten in klinischer Anwendung.  
– Eine narrative Literaturübersicht**

eingereicht von

**Dr.<sup>in</sup> med. univ. Tatjana Kuse-Isingschulte**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktorin der Zahnmedizin**

**(Dr.<sup>in</sup> med. dent.)**

an der

**Medizinischen Universität Graz**

ausgeführt an der

**Universitätsklinik für Zahnmedizin und Mundgesundheits**

**Klinische Abteilung für Orale Chirurgie und Kieferorthopädie**

unter Anleitung von

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

und

Univ. ZÄ Dr.<sup>in</sup> med. dent. Anke Pichler

Graz am 05.09.2024

*Eidesstattliche Erklärung*

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

*Graz am 05.09.2024*

*Dr.<sup>in</sup> med. univ. Tatjana Kuse-Isingschulte eh.*

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich vor allem bei meinen Diplomarbeitsbetreuern Herrn PD Dr. Dr. M. Payer und Frau Dr. med. dent. Anke Pichler für ihre freundliche Bereitstellung, sowie Möglichkeit der Bearbeitung dieser Fragestellung bedanken. Des Weiteren möchte ich mich bei Dr. Dr. Behrouz Arefnia für seine Unterstützung und Hilfestellung bedanken.

Ebenso ein großer Dank meinen Freunden und StudienkollegInnen die mir eine unvergessliche Zeit während des Studiums bereitet haben. Im speziellen meiner Stuhlpartnerin Hannah, die immer ein offenes Ohr, aufmunternde Worte und eine helfende Hand hatte. Gleichmaßen vielen Dank an die Zahnmedizinischen AssistentInnen und ärztlichen Aufsichten der Grazer Zahnklinik, die einem in oft ausweglos erscheinenden Momenten stets motivierend und hilfsbereit zur Seite gestanden haben.

An meine Schwestern, Mascha und Lilli, danke, dass ihr mich immer aufs Neue motiviert und aufgerichtet habt und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden habt.

Zuletzt möchte ich besonders meinen Eltern danken, die mich mit Ihrer bedingungslosen Unterstützung in allen Belangen, sowohl während meines Medizinstudiums als auch meines Zahnmedizinstudiums begleitet haben. Mama und Papa, euer steter seelischer, moralischer und beratender Beistand, zu jeder Tages- und Nachtzeit, war von großer Bedeutung. Ebenso eure stoische Gelassenheit, mit welcher ihr meine, durch ein strapaziertes Nervenkostüm hervorgerufenen Launen immer ertragen habt.

## Zusammenfassung

**Hintergrund:** Die aktuelle Forschung im Bereich der dentalen Implantologie beschäftigt sich intensiv mit der Erprobung von Alternativmaterialien zum Goldstandard Titan. Derzeit stehen insbesondere zweiteilige Zirkonoxid Implantate im Fokus des Interesses und im Speziellen deren Implantat-Abutmentverbindung. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die unterschiedlichen Implantat-Abutmentverbindungen und deren Befestigungsmethoden zu geben. Ebenso werden weitere Biomaterialien vorgestellt, die eine metallfreie Alternative der Implantatversorgung ermöglichen können.

**Material und Methoden:** Die Methodik eines „narrativen Reviews“ bildete die Grundlage für die Bearbeitung der Fragestellung dieser Literaturrecherche. Zur Erarbeitung der theoretischen Grundlagen wurden neben Inhalten aus Fachbüchern auch Studien aus Datenbanken herangezogen. Anhand der definierten Suchkriterien wurden aktuelle und verfügbare Daten aus medizinischen Datenbanken wie Pubmed, MedLine und Google Scholar herausgefiltert.

**Ergebnisse:** Aus insgesamt 1246 Artikeln konnten nach Überprüfung verschiedener Kriterien 102 Studien herausgefiltert werden. Nach Ausschluss von Duplikaten, sowie Screening von Titel und Abstract wurden 35 Studien zur Volltextanalyse identifiziert. Davon dienten 14 Artikel der Analyse für diese narrative Literaturrecherche. Es konnten sechs in vivo Studien und weitere acht in vitro Studien identifiziert werden. Die Überlebensrate zweiteiliger Zirkonoxid Implantate lieferten vergleichbare Ergebnisse zu jenen von Titan Implantaten. Die Komplikationsraten wurden als moderat bewertet. Unterschiedliche in vitro geprüfte Implantat-Abutmentverbindungen ergaben, dass das Zementieren/Verkleben bessere Ergebnisse erzielte, im Vergleich zu verschraubten Verbindungen. Die getesteten Materialien ergaben unterschiedliche teils zufriedenstellende Resultate für Zirkonoxid bzw. PEKK Abutments. Währenddessen zeigten sich PEKK-Schrauben im Vergleich zu Zirkonoxid-, Titan- bzw. Carbon Schrauben am schwächsten.

**Konklusion:** Zweiteilige Zirkonoxid Implantate zeigen eine vergleichbar gute Überlebensrate wie Titanimplantaten, wodurch sie eine mögliche metallfreie Alternative darstellen könnten. Speziell im Bereich der Implantat-Abutmentverbindung finden sich

derzeit noch vermehrt Beeinträchtigungen, die einer Optimierung bedürfen. Aufgrund der geringen klinischen Langzeitdaten ist eine Empfehlung für den klinischen Alltag derzeit noch nicht uneingeschränkt möglich. Die Verwendung zweiteiliger Zirkonoxid Implantate sollte immer in Hinblick auf die individuellen Bedürfnisse der PatientInnen abgestimmt sein. In Bezug auf die Verwendung weiterer Alternativmaterialien für Abutments und Schrauben, wie beispielsweise PEKK, Glasfaser oder kohlenstofffaserverstärktes PEEK (Carbon) besteht weiterhin intensiver Forschungsbedarf. Die Datenlage in der Literatur und zu klinischen Langzeitergebnissen ist hier noch zu gering für finale Schlussfolgerungen und klinische Empfehlungen ist.

**Schlüsselwörter:** Two-piece zirconia implants, Implant-Abutment-Connection, Abutment Materials, Implant-Abutment Complications, Screw retained Abutment.

## **Abstract**

**Introduction:** Current research in dental implantology is intensely focused on testing alternative materials to the gold standard, titanium. Ceramic materials, such as zirconia, have already gained significant acceptance. Currently, the focus of interest is directed towards two-piece zirconia implants, especially concerning their implant-abutment connection. This study aims to provide an overview of the various implant-abutment connections and their fixation methods. Additionally, other biomaterials that could offer a metal-free alternative for implant treatment will be presented.

**Material and Methods:** The methodology of a "narrative review" formed the basis for addressing the question posed in this literature review. In addition to the content from textbooks, studies from various scientific databases were also used to develop the theoretical foundations. Based on the defined search criteria present and relevant data were filtered from medical databases such as Pubmed, MedLine and Google Scholar.

**Results:** Out of a total of 1246 articles, 102 studies were filtered out after reviewing various criteria. After the exclusion of duplicates and the screening of titles and abstracts, 35 studies were identified for full-text analysis. Fourteen of these articles were used for the analysis in this narrative literature review. Six *in vivo* studies and eight *in vitro* studies were identified. The survival rates of two-piece zirconia implants provided results comparable to those of titanium implants. The complication rates were assessed as moderate. Various *in vitro* tested implant-abutment connections showed that cementing/bonding achieved better results compared to screwed connections. The tested materials yielded different, partially satisfactory results for zirconia and PEKK abutments. Meanwhile, PEKK screws performed the weakest in comparison to zirconia, titanium, and carbon screws

**Conclusion:** Two-piece zirconia implants show a comparable survival rate to titanium implants, meaning they could be a possible metal-free alternative. However, particularly in the area of the implant-abutment connection, there are still increasing impairments that require optimization. Due to the limited long-term clinical data, a full recommendation for routine clinical use cannot yet be made without restrictions. The use of two-piece zirconia implants should always be tailored to the individual needs of the patients. Regarding the use

of other alternative materials for abutments and screws, such as PEKK, glass fiber, or carbon fiber-reinforced PEEK (Carbon), there is still a significant need for further intensive research. The available literature and clinical long-term data are still insufficient and limited for final conclusions and clinical recommendations

**Keywords:** Two-piece zirconia implants, Implant-Abutment Connection, Abutment Materials, Implant-Abutment Complications, Screw-Retained Abutments

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	III
Zusammenfassung .....	IV
Abstract.....	VI
Inhaltsverzeichnis .....	VIII
Glossar und Abkürzungen .....	X
Abbildungsverzeichnis .....	XI
Tabellenverzeichnis .....	XIII
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen der Implantologie.....	2
2.1 Aufbau einer Implantatversorgung.....	2
2.1.1. Das Zahnimplantat.....	2
2.1.2. Implantataufbau.....	2
2.2. Konzepte in der Implantatversorgung.....	3
2.2.1. Ein- und zweiteilige Systeme .....	3
2.3. Implantat Suprastruktur.....	5
2.3.1. Abutment - Implantataufbauten.....	5
2.3.1.1. Anforderungen / Aufgaben des Abutments .....	5
2.3.2. Die Implantat Abutmentverbindung.....	5
2.3.2.1. Außenverbindung und Innenverbindungen .....	6
2.3.2.2. Herstellungsverfahren von Abutments.....	7
2.3.2.3. Konfektionierte Abutments.....	8
2.3.2.4. Individuelle Abutments.....	8
2.3.2.5. Einteilig vs. Zweiteilige Abutments.....	9
2.3.3. Befestigungsarten .....	9
2.3.3.1. Zementiert .....	9
2.3.3.2. Verschraubt.....	10
2.3.3.3. Abutmentschraube .....	11
2.4. Materialien in der Implantologie .....	12
2.4.1. Anforderungen an das Implantatmaterial.....	12
2.4.2. Abutmentmaterialien.....	12
2.5. Materialkunde .....	13
2.5.1. Titan.....	13
2.5.2. Vor- und Nachteile von Titan.....	14

2.5.3.	<i>Zirkoniumdioxid</i> .....	14
2.5.4.	<i>Vor- und Nachteile von Zirkoniumdioxid</i> .....	15
2.5.5.	<i>Glasfaser</i> .....	15
2.5.6.	<i>Polymere</i> .....	16
2.6.	<b>Misserfolge der Implantologie</b> .....	18
2.6.1.	<i>Allgemeine Komplikationen der Implantation</i> .....	18
2.6.2.	<i>Komplikationen der Implantat-Abutmentverbindung</i> .....	18
2.6.2.1.	Technische und mechanische Komplikationen.....	19
2.6.2.2.	Biologische Komplikationen.....	19
2.6.2.4.	Materialspezifische Komplikationen.....	20
2.7.	<b>Fragestellung</b> .....	20
3.	<b>Material und Methoden</b> .....	21
3.1.	<b>Literaturrecherche</b> .....	21
3.2.	<b>Datenerhebung und Analyse</b> .....	22
3.3.	<b>Auswahlkriterien der Publikationen</b> .....	22
4.	<b>Ergebnisse</b> .....	23
4.1.	<b>Screening und Auswahl der Literatur</b> .....	23
4.1.1.	<i>Inkludierte Artikel</i> .....	26
4.2.	<b>Ergebnisse der in-vivo Studien</b> .....	27
4.2.1.	<i>Überlebensraten zweiteiliger Zirkonoxid Implantate</i> .....	28
4.2.2.	<i>Komplikationsraten zweiteiliger Zirkonoxid Implantate</i> .....	29
4.2.3.	<i>Implantat-Abutmentverbindung</i> .....	30
4.3.	<b>Ergebnisse der in-vitro Studien</b> .....	32
4.3.1.	<i>Allgemeines Vorgehen der in vitro Untersuchungen</i> .....	34
4.3.1.1.	Zementiert versus verschraubte Befestigung.....	35
4.3.1.2.	Verschiedene Abutment Materialien.....	35
4.3.1.3.	Verschiedene Materialien für Abutmentschrauben.....	36
5.	<b>Diskussion</b> .....	38
5.1.	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b> .....	38
5.2.	<b>Limitationen</b> .....	45
6.	<b>Konklusion</b> .....	46
7.	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	47

## Glossar und Abkürzungen

BOP	Bleeding on probing
CAD	Computer-aided Design
CAM	Computer-aided Manufacturing
CaO	Calciumoxid
EHS	Early wound healing score
MBL	Marginal bone loss
MgO	Magnesium Oxid
MPa	Mega Pascal
MR	Schleimhautrezession
Ncm	Newton Zentimeter
PAEK	Polyaryletherkethon
PEEK	Polyetheretherketon
PEKK	Polyetherketonketon
PES	Pinc esthetic score
PI	Plaque Index
REM	Rasterelektronenmikroskop
ST	Sondierungstiefe
TiO <sub>2</sub>	Titandioxid
UCLAs	Universal Clearance-Limited Abutments
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yttriumoxid
Y-TZP	Yttrium stabilisiertes tetragonales Zirkoniumdioxid
ZrO <sub>2</sub>	Zirkonoxid
ZrSiO <sub>4</sub>	Zirkoniumsilikat

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung eines zweiteiligen Implantats (6) .....	2
Abbildung 2 a, b) Einteiliges Keramik Implantat (Z-System: Z5m & Z5mt, Oesingen, Schweiz) (9) .....	3
Abbildung 3 a, b) Zweiteiliges Keramik Implantat (Z-System: ZTL & Z5-BL, Oesingen, Schweiz) (9) .....	4
Abbildung 4 Beispielhafte Darstellung verschiedener Implantat Abutmentverbindungen neuerer Zirkonoxid Implantate a) Ceralog Implantat mit Hexalobe Innenverbindung b) Zeramex XT Bolt-in-Tube Innenverbindung c) prothetische 3C™ Innenverbindung (19; 21; 20) .....	7
Abbildung 5 Einteiliges CAD/CAM-Keramik Abutment ohne Klebebasis (11) .....	7
Abbildung 6 Beispielhafte Darstellung konfektionierter Zirkonoxid Abutments der Firma Zeramex (von links nach rechts) Zeramex XT Abutments straight 1mm; Zeramex XT Abutment straight 2mm und Zeramex XT Abutment angled 15° 1mm (19) .....	8
Abbildung 7 Schematische Darstellung eines zweiteiligen Hybrid-Abutments, mit Titanbasis s und Keramikaufbau (25) .....	9
Abbildung 8 Darstellung eines zweiteilig verschraubten Zirkonoxid Implantats mit Carbon Schraube der Firma Zeramex (19) .....	10
Abbildung 9 links: Abutmentschraube aus Zirkon (BL-OSC-H) rechts: Abutmentschraube aus Titan (BL-OST-H, Z-System) (29) .....	11
Abbildung 10 Abutmentschraube aus Carbon der Firma Zeramex (19) .....	11
Abbildung 11 Abutments aus Titan, Zirkoniumdioxid, Polyaryletherketon (39) .....	13

Abbildung 12: Darstellung eines stufenlos individualisierbaren Abutments aus Hightech-Glasfasern in 3C-Verbindung der Firma Patent (21).....	16
Abbildung 13: Eigenschaften von PEEK und PEKK (48) .....	17
Abbildung 14: (links) Darstellung eines zweiteiligen Implantat-Sets der Firma Camlog (Ceralog Hexalobe);; (rechts) Darstellung von zwei verschieden angulierten PEKK Abutments der Firma Camlog mit einer Hexalobe-Verbindung, sowie einer Titan und Goldschraube (20) .....	17
Abbildung 15: Grafische Darstellung der Bruchinitiierungsstellen bei den von Zhang et al untersuchten ein- und zweiteiligen Zirkonimplantaten a) einteiliges Implantat mit Bruchstelle im enossalen Teil b) zweiteiliges Implantat mit Bruchstelle am Abutmenthals c) Bruchstelle an der inneren Oberfläche der Implantat Abutmentverbindung d) Bruchstelle im enossalen Teil, mit Versagen der Fixierung (51).....	19
Abbildung 16: Grafische Darstellung des Literatur Screenings .....	23
Abbildung 17: Anzahl der Publikationen pro Jahr (eigene Darstellung) .....	26
Abbildung 18: Grafische Darstellung der Komplikationsraten (eigene Darstellung) .....	29

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Darstellung der Vor- und Nachteile des Werkstoffes Titan in der dentalen Implantologie (3; 42) .....	14
Tabelle 2: Darstellung der Vor- und Nachteile von Zirkonoxid-Keramik (20) (53) (57) ...	15
Tabelle 3: Auflistung der inkludierten in-vivo Studien.....	24
Tabelle 4: Auflistung der inkludierten in-vitro Studien .....	25
Tabelle 5: Übersicht zu den in vivo Studien.....	27
Tabelle 6: Darstellung vergleichbarer prospektiver Kohortenstudien.....	28
Tabelle 7: Darstellung der Häufigkeitswerte der Komplikationsraten der vergleichbaren Studien .....	30
Tabelle 8: Auflistung der in vitro Studien mit Aufzeichnung der Untersuchungsmethoden dabei steht „x“ = ja und „-“ = teilweise, nein = nicht vorgenommen .....	32
Tabelle 9 Auflistung der in vitro Studien mit Anzahl der untersuchten Proben .....	33
Tabelle 10: Anzahl der zementiert bzw. verschraubten Abutments der in vitro Studien, mit jeweiliger Anzahl der Abutments und Schrauben ausgehend der untersuchten Materialien .....	34

# 1. Einleitung

Das Bestreben nach der Aufrechterhaltung des stomatognathen Systems ist das Hauptanliegen aller ZahnärztInnen. Die orale Implantologie und Implantatprothetik sind Teilgebiete der Zahnmedizin, welche mittlerweile eine Standardbehandlungsoption für verlorengegangene Zähne darstellen. (1) Im Rahmen der modernen prothetisch-restaurativen Zahnheilkunde, bieten Implantate eine entscheidende Möglichkeit, um in den Bereichen Langlebigkeit, Funktionalität, Ästhetik und Komfort beizutragen. Um dies garantieren zu können ist neben des Makrodesigns und der Oberflächengestaltung, die Wahl des Materials von Bedeutung. (2)

Derzeit gelten Titan Implantate in der dentalen Implantologie als Goldstandard. Aufgrund von ästhetischen Beeinträchtigungen und gehäuft dokumentierter Hypersensitivitäten bzw. Unverträglichkeiten gegenüber Titan, wird der Wunsch nach einer metallfreien Versorgung vermehrt geäußert. (3) Speziell in den letzten zwei Jahrzehnten wurde die Entwicklung und Optimierung von Zirkonoxid Implantate vorangetrieben. (4).

Die aktuelle Forschung beschäftigt sich intensiv mit der Erprobung von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten und den Möglichkeiten der Implantat-Abutmentverbindung Diese stellt sich als Schlüsselstelle für die prothetische Versorgung dar. Die Befestigung der Abutments kann auf zwei verschiedene Weisen erfolgen. Sie können entweder verschraubt oder zementiert bzw. adhäsiv verklebt werden. Wobei sich hier jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile zeigen. (5)

Ziel dieser narrativen Literaturrecherche ist eine Übersicht über mögliche Implantat Abutmentverbindungen bei zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten zu geben. Dafür sollen neben der Überlebensrate die biologischen, mechanischen und technischen Komplikationen von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten und deren Möglichkeiten einer Implantat Abutmentverbindungen geprüft und erörtert werden. Zusätzlich soll untersucht werden welche alternativen Materialien bzw. Werkstoffe im Rahmen einer metallfreien Implantatversorgung geeignet sind, um eine möglichst langlebige und komplikationsfreie Versorgung zu gewährleisten.

## 2. Grundlagen der Implantologie

### 2.1 Aufbau einer Implantatversorgung

#### 2.1.1. Das Zahnimplantat

Das dentale Implantat besteht aus einem alloplastischen Material und dient zur Verankerung eines restaurativen Zahnersatzes. (1) Über die Jahre wurden verschiedene Formen, Materialien und Systeme, sowie Designs bezüglich ihrer Eignung als dentales Implantat getestet. Das heutige Standardimplantat bzw. der Implantatkörper wird als rotationssymmetrischer, zahnwurzelförmiger Zylinder gefertigt. Es stehen derzeit verschiedene Materialien zur Verfügung, die sich in steter Weiterentwicklung befinden. Das System bzw. Implantatdesign ist von verschiedenen Faktoren abhängig, sodass zumeist individuell entschieden wird, welche Variante verwendet wird. (1)

#### 2.1.2. Implantataufbau

Beim dentalen Implantat wird zwischen einem primären und einem sekundären Anteil unterschieden. Der Primärteil ist der eigentliche Implantatkörper, der intraossär im Kieferkamm verankert wird. Der Sekundärteil stellt den Implantataufbau – Abutment, Abutmentschraube und Suprakonstruktion/Implantatkrone – dar. (s. Abbildung 1) Dabei ist zu beachten, dass das Abutment sowohl Teil des Primär- als auch des Sekundärteils sein kann, abhängig davon welches Implantatsystem also ein ein- bzw. zweiteiliges Design gewählt wurde. (s.u.)

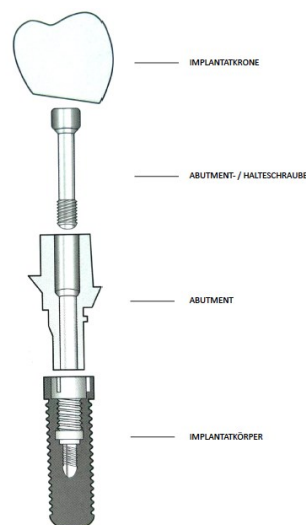


Abbildung 1 Schematische Darstellung eines zweiteiligen Implantats (6)

## 2.2. Konzepte in der Implantatversorgung

### 2.2.1. Ein- und zweiteilige Systeme

Das Design von Implantaten kann man in ein- und zweiteilige Systeme unterteilen. Während im einteiligen System alle Konstruktionselemente innerhalb eines Werkstücks vereint sind, besteht das zweiteilige System aus einem Primärteil (Implantatkörper) und einem Sekundärteil (Implantataufbau), die lösbar miteinander verbunden sind. (7)

Das einteilige Implantatsystem wurde von Beginn an in der dentalen Implantologie verwendet. Es gibt keine Trennlinie zwischen Primär- und Sekundärteil. (s. Abbildung 2) Die Insertionstiefe wird über die prothetische Ebene definiert, welche etwas unterhalb des Mucosaniveaus liegt. Dadurch, dass der intraossäre und prothetische Anteil aus einem Stück gefertigt ist, ist ein vollständiger Weichgewebsabschluss im Bereich der Durchtrittsstelle der Mukosa, nicht möglich. Eine ausreichende Knochenhöhe und –qualität ist ebenso wie ein adäquates Weichgewebsvolumen erforderlich. (8)

Das fehlende Interface des Abutments ist bei diesem System von Vorteil, da keine Mikrospace-Problematik zwischen Implantat und Implantataufbau entsteht. Des Weiteren ist nur ein chirurgischer Eingriff notwendig. Als nachteilig bei den einteiligen Implantatsystemen erweist sich eine mangelnde Flexibilität der prothetischen Versorgung, die unter anderem durch eine vorgegebene Achsausrichtung des Implantats bedingt ist. (8)



Abbildung 2 a, b) Einteiliges Keramik Implantat (Z-System: Z5m & Z5mt, Oesingen, Schweiz) (9)

Eine weitere Versorgungsmöglichkeit bietet das zweiteiligen Implantatsystemen. Hier ist der Implantatkörper getrennt von der Suprakonstruktion (s. Abbildung 3) Bei dieser Variante werden der chirurgische und der prothetische Behandlungsschritt voneinander getrennt. Von Vorteil bei den zweiteiligen Implantatsystem ist, dass der Implantatkörper separat von dem Implantataufbau eingebracht wird. Dadurch ist eine gedeckte Einheilung möglich, sodass eine potenzielle Keimbesiedlung minimiert wird. Zusätzlich kommt es hier zu keiner direkten mechanischen Belastung. Des Weiteren besteht hier die Möglichkeit durch augmentative Maßnahmen eine Optimierung des Implantatbettes zu erreichen. Entscheidend ist ebenso, dass die Aufbauelemente, in Material und Form individualisiert werden können, sodass sich weitaus mehr Variationsmöglichkeiten ergeben, bezogen auf die Funktionalität und Ästhetik der prothetischen Versorgung. (10)

Neben der vielen Vorteilen zeigen sich hier auch einige Problemstellungen. Aufgrund des lösbaren Verbundes von Sekundär- und Primärteil, kann es speziell in diesem Bereich zu Komplikationen wie zu der Bildung eines Mikrospalts kommen. Dieser Randspalt kann durch Mikrobewegungen zwischen Implantatkörper und Abutment vergrößert werden. Dadurch wird eine mögliche bakterielle Besiedlung begünstigt. Durch ein darauffolgende Entzündungsgeschehen, wie eine Periimplantitis, kann eine primär erfolgreiche Osseointegration negativ beeinflusst werden. Ein weiterer Nachteil des zweiteiligen Systems ist ein erneuter chirurgischer Eingriff, zur Freilegung des Implantates, für die folgende prothetische Versorgung. (10)

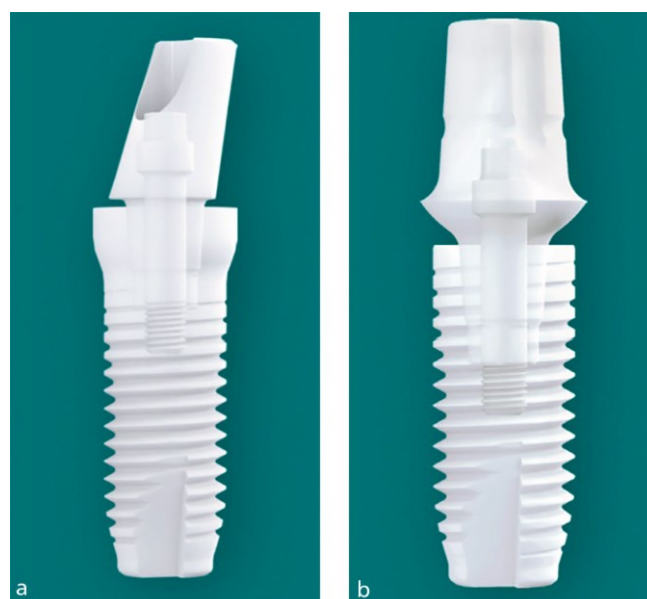


Abbildung 3 a, b) Zweiteiliges Keramik Implantat (Z-System: ZTL & Z5-BL, Oesingen, Schweiz) (9)

## **2.3. Implantat Suprastruktur**

Die Implantat Suprastruktur entspricht dem Sekundärteil des Implantates. Es ist jener Anteil, der auf dem Implantatkörper dem Primärteil befestigt wird und auf dem die prothetische Versorgung verankert wird. Dazu gehören das Implantat-Abutment, also das eigentliche Verbindungselement zwischen dem Implantatkörper und der prothetischen Versorgung, sowie die Abutmentschraube, welche in das interne Gewinde des Implantatkörpers eingeschraubt wird und so das Abutment befestigt. (11) Im Wesentlichen bildet es die Voraussetzung für eine adäquate Stabilität der prothetischen Restauration und sollte eine zufriedenstellende Ästhetik liefern. (12; 13; 14)

### **2.3.1. Abutment - Implantataufbauten**

#### **2.3.1.1. Anforderungen / Aufgaben des Abutments**

Abutments sind für die Verbindung zwischen Implantat und Suprakonstruktion verantwortlich. Neben Stabilität und Ästhetik sollten Abutments folgende weitere Anforderungen erfüllen:

- Sicherstellung eines stabilen Hart- und Weichgewebes (15)
- Keine Abnutzungserscheinungen im Bereich der Verbindung mit dem Implantatkörper (16)
- Eine möglichst geringe Plaqueakkumulation (17)
- Biokompatibilität (kein hervorrufen einer Stimulation des Immunsystems oder auslösen einer allergischen Reaktion, gut gewebeverträglich)
- Kein Herbeiführen einer Gingivaverfärbung (18)

### **2.3.2. Die Implantat Abutmentverbindung**

Die Implantat-Abutmentverbindung bildet hier eine Schlüsselstelle für die prothetische Versorgung, da sie eine mechanische, geometrische und teilweise auch eine materialtechnische Unterbrechung darstellt. Diese Verbindungsstelle, bzw. das Implantat-Abutment-Interface, kann anhand ihrer mechanischen Konstruktionsweise in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. (5):

- Außenverbindungen mit Rotationsschutz
- Innenverbindungen (mit und ohne Rotationsschutz)
- Innenverbindungen mit und ohne Platform-Switching (5)

Die Außen- und Innenverbindungen unterscheiden sich je nach Hersteller und haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Der Rotationsschutz hingegen dient dazu das Abutment mit dem Implantatkörper zu verschlüsseln und eine eindeutige Positionierung der prothetischen Restauration sicherzustellen, um Drehungen der Suprakonstruktion auf dem Implantat zu vermeiden. (6)

### **2.3.2.1. Außenverbindung und Innenverbindungen**

Bei der Implantat Abutmentverbindungen kann man Außen- und Innenverbindungen unterscheiden. Diese mechanische Konstruktionsweise dient einer präzisen Positionierung des Abutments und soll einerseits dazu beitragen Undichtigkeiten bzw. Mikrobewegungen und andererseits Schraubenlockerungen bzw.-frakturen entgegenzuwirken. (6) Bei den älteren externen Verbindungen traten im Vergleich zu den Innenverbindungen bei neueren Implantatsystemen gehäuft Komplikationen wie Schraubenlockerung oder – fraktur auf, aufgrund der mangelnden Resistenz gegenüber Kaubelastungen. Im Gegensatz dazu zeigen die internen Verbindungsdesigns neuerer Systeme eine höhere Belastbarkeit und Stabilität. Innenverbindungen können konische oder parallele geformt sein. Des Weiteren können sie mit oder ohne Rotationsschutz hergestellt werden. (6)

Bei den zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten wird derzeit intensiv an dem Design der Innenverbindung geforscht. Verschiedene Hersteller haben bereits unterschiedliche Designs entwickelt, die einen verbesserten Halt und stabile Fixierung des Abutments im Implantat ermöglichen sollen. Beispielsweise hat die Firma Zeramex zwei verschiedene Verbindungssysteme entwickelt. Zum einen das Zeramex P6 Implantat mit einer Außen-Sechskant Verbindung und zum anderen das Zeramex XT Implantat mit einer Bolt-in-Tube Innenverbindung. Zu beiden Systemen wurde ein passendes Zirkonoxid Abutment mit Carbon Schraube entworfen. Wobei ersteres 2021 vom Markt genommen wurde. (19) Die Firma Camlog entwickelte für ihr zweiteiliges Zirkonoxid Implantatsystem Ceralog eine sogenannte Hexalobe Innenverbindung mit einem verschraubten PEKK Abutment. (20) Eine weitere Verbindung ist eine prothetische 3C™ Innenverbindung der Firma Patent mit einem zementierten Glasfaser Abutment. (21) (s. Abbildung 4)



*Abbildung 4 Beispielhafte Darstellung verschiedener Implantat-Abutmentverbindungen neuerer Zirkonoxid-Implantate a) Ceralog Implantat mit Hexalobe Innenverbindung b) Zeramex XT Bolt-in-Tube Innenverbindung c) prothetische 3C™ Innenverbindung (19; 21; 20)*

### **2.3.2.2. Herstellungsverfahren von Abutments**

Abutments können auf unterschiedlicher Weise und in verschiedenen Formen hergestellt werden, was unter anderem abhängig von dem ausgewählten Material ist. Man unterscheidet zwischen konfektionierten und individuellen Abutments. Für die Herstellung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, sie können gegossen, gepresst, gefräst oder gedruckt werden. Hierfür wird das Abutment von einem Zahntechniker in gewünschter Form und Größe in Wachs aufgestellt bzw. aufgewachst und anschließend im Lost-Wax-Verfahren in Edelmetall oder in Presskeramik umgesetzt. (11) Ein weiteres sehr gängiges Herstellungsverfahren, ist das Drucken bzw. Fräsen im Rahmen der CAD/CAM Technologie. Mittels computer-gestützten bzw. -gesteuerten Programmen wird aus einem Rohling (z.B. Zirkon) ein Abutment herausgefräst. (s. Abbildung 5) Dieses Verfahren stellt eine optimale Variante zur Herstellung individueller Abutments dar, da eine hohe Präzision und Passgenauigkeit möglich sind. (11)



*Abbildung 5 Einteiliges CAD/CAM-Keramik-Abutment ohne Klebebasis (11)*

### 2.3.2.3. Konfektionierte Abutments

Diese Abutments werden industriell in verschiedenen Formen, Größen und Angulationen gefertigt. (s. Abbildung 6) Es gibt sie als beschleifbare und nicht beschleifbare Variante. Sie bieten eine gute standardisierte Lösung, da sie sofort einsatzbereit sind. Ein großer Vorteil dieser Variante ist neben der schnellen Verfügbarkeit und einfachen Handhabung, dass der Behandlungszeitraum verkürzt wird und sie kostengünstiger sind. Von Nachteil erweist sich hier jedoch die Passform, bzw. die vorgegebene Achsausrichtung, wodurch sie sich in Bereichen mit komplexen anatomischen Gegebenheiten bzw. ästhetisch anspruchsvollen Regionen als ungeeignet erweisen. (11; 15)

Konfektionierte Zirkonoxidabutments sind bereits seit Längerem auf dem Markt verfügbar. Zu Beginn waren sie ausschließlich in einer weißen Farbe erhältlich. Mittlerweile gibt es sie auch in eingefärbten Varianten mit dentinähnlicher Färbung, wodurch sich aus ästhetischer Sicht einige Vorteile ergeben. (22)



Abbildung 6 Beispielhafte Darstellung konfektionierter Zirkonoxid Abutments der Firma Zeramex (von links nach rechts) Zeramex XT Abutments straight 1mm; Zeramex XT Abutment straight 2mm und Zeramex XT Abutment angled 15° 1mm (19)

### 2.3.2.4. Individuelle Abutments

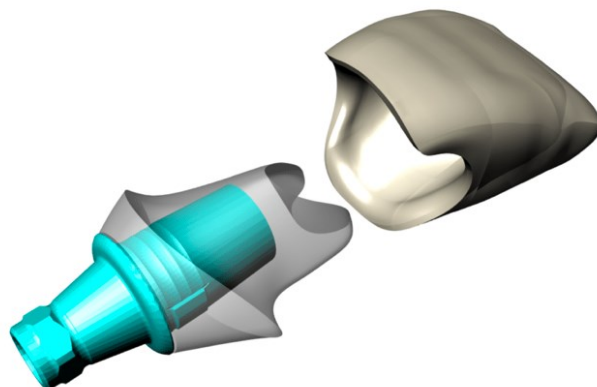
Diese Abutments sind maßgefertigt und speziell auf den/die PatientIn angepasst. Sie wurden individuell auf die Mundsituation abgestimmt und bieten daher eine exakte Passform. Dadurch werden unter anderem die Ästhetik und die Gewebekonturierung optimal unterstützt. Dies ist speziell in hoch ästhetischen Regionen wie dem Frontzahnbereich von Vorteil. (15; 23) In anderen Fällen, wie beispielsweise einer ausgeprägten Angulation oder einer ungünstigen Pfeilergeometrie, sollten individuelle Abutments bevorzugt werden. (22) Die Wahl zwischen einem konfektionierten oder individuellen Abutment hängt demnach von verschiedenen Faktoren ab. So müssen zum einen die anatomischen Gegebenheiten, wie

das Knochenangebot und die ästhetischen Anforderungen beachtet werden, zum anderen auch die Bedürfnisse bzw. Möglichkeiten des/der PatientIn berücksichtigt. (5; 15)

### **2.3.2.5. Einteilig vs. Zweiteilige Abutments**

Abutments können sowohl einteilig als auch zweiteilig sein und aus verschiedenen Materialien gefertigt werden. Die Herstellung erfolgt in Abhängigkeit des Materials auf unterschiedliche Weise. Das derzeit am häufigsten verwendet Abutment ist das einteilige Titanabutment. Weitere Möglichkeiten eines Implantataufbaus sind die Goldgussabutments, Zirkonoxidabutments und die seit kurzem in der Testung befindende einteilige PEKK/PEEK und Glasfaser Abutments. (15; 23)

Die zweiteiligen Abutmentvarianten, gibt vor allem als Hybrid-Variante. Sie bestehen aus zwei Materialien mit dem Versuch die Vorteile der jeweiligen Werkstoffe zu vereinen. Am häufigsten dient Titan als Implantatverbindungselement, als industriell vorgefertigte Klebebasis (Ti-Base) für einen individuell angefertigten Aufbau beispielsweise aus Zirkonoxid oder Lithiumdisilikat. (24) (s. Abbildung 7)



*Abbildung 7 Schematische Darstellung eines zweiteiligen Hybrid-Abutments, mit Titanbasis s und Keramikaufbau (25)*

### **2.3.3. Befestigungsarten**

#### **2.3.3.1. Zementiert**

Die heutigen Befestigungskomposite bzw. Kunststoffbasierte Zemente können selbsthärtend, lighthärtend oder dualhärtend sein und sind in verschiedenen Farben und Viskositäten erhältlich. Während sich die Vorteile zementierter Suprastrukturen auf Funktion und Ästhetik, sowie passiven Sitz und den Ausgleich der Implantatachse beziehen, ist hier ein erhöhter Zeitaufwand zu berücksichtigen. Es ist jedoch zu beachten, dass das

Zementieren bzw. Kleben der Implantat-Abutment-Verbindung irreversibel ist, wodurch die Reparaturfähigkeit deutlich eingeschränkt ist. Außerdem kann es, anders als bei der verschraubten Befestigungsvariante, zu einem möglichen Verbleiben von Zementresten kommen. Diese beiden Punkte stellen einen großen Nachteil dieser Befestigungsmethode dar. (26; 27) Der mögliche Verbleib von subgingivalen Zementresten kann in weiterer Folge zu peri-implantären entzündlichen Reaktionen führen, wodurch sich ein hohes inflammatorisches Potential ergibt. (6)

### 2.3.3.2. Verschraubt

Heutzutage werden die Implantat-Abutment-Verbindungen bevorzugt verschraubt. Die Art von Außen- und Innenverbindung bzw. die Implantat-Innenkonfiguration mit entsprechender Abutmentschraube variieren je nach Hersteller und System und sind unter anderem abhängig von Material und Gestaltung. (s. Abbildung 8) Vorteilhaft bei dieser Art der Befestigung ist eine gute Reparaturfähigkeit, sowie die Möglichkeit der einfachen Reinigung. Die Verschraubung erfolgt über einen Kanal durch die Suprakonstruktion, welche anschließend okklusal mit Komposit verschlossen wird. Die Abnahme der Versorgung ist einfach und schnell möglich. Aufgrund des okklusalen Schraubenkanals ist jedoch zum einen die Ästhetik vermindert und zum anderen kann die Kaufunktion teilweise eingeschränkt sein. Ebenso ist der Ausgleich der Implantatachse und -positionierung erschwert. (6)



*Abbildung 8 Darstellung eines zweiteilig verschraubten Zirkonoxid Implantats mit Carbon Schraube der Firma Zeramex (19)*

### 2.3.3.3. Abutmentschraube

Die Abutmentschraube, die auch als Halteschraube bezeichnet wird, dient dazu eine sichere Verankerung zwischen Abutment und Implantat herzustellen. Dabei wird die Schraube direkt durch das Abutment in das Implantat eingeschraubt, wodurch eine stabile Verbindung entsteht. Speziell in diesem Bereich kann es gehäuft zu Komplikationen, wie eine Schraubenlockerung oder –fraktur, kommen. Abutmentschrauben werden in verschiedenen Größen und Formen hergestellt und können aus unterschiedlichen Materialien gefertigt sein. Die derzeit am häufigsten verwendete Schraube ist eine Titanschraube. Andere Materialien sind beispielsweise Gold, Zirkonoxid, Carbon oder PEEK/PEKK. (s. Abbildung 9 und Abbildung 10) (28)



Abbildung 9 links: Abutmentschraube aus Zirkon (BL-OSC-H) rechts: Abutmentschraube aus Titan (BL-OST-H, Z-System) (29)



Abbildung 10 Abutmentschraube aus Carbon der Firma Zeramex (19)

Eine ausreichende mechanische Stabilität ist notwendig, um die Verankerung des Abutments zu sichern und Komplikationen zu vermindern. Als metallfreie Alternative scheiden Titan und Gold als Materialien aus. Zirkonoxid ist aufgrund seiner mechanischen und physikalischen Eigenschaften nur teilweise als Material für eine Abutmentschraube geeignet. PEEK ist aufgrund seines niedrigen Elastizitätsmoduls ein vielversprechendes Material, jedoch spricht die geringe mechanische Stabilität mit vermehrt auftreten Schraubenfrakturen derzeit noch gegen dieses Material. (28) Carbon Schrauben bestehen aus einem Kohlefaserverbund, ein leichter, hochsteifer, röntgentransparenter und korrosionsbeständiger Werkstoff. Dieses Material besitzt des Weiteren eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit und ist chemisch beständig. Der Hersteller Zeramex macht sich diese Eigenschaften in einem kombinierten Verbund mit dem weichen Matrixmaterial PEEK zu Nutzen. Diese Kombination hat zur Folge, dass sich die Carbon Schraube an das harte Keramik anpasst und beim Anziehen der Schraube entsprechend verkürzt und verbreitert. Es schmiegt sich an das Implantat-Innengewinde nahezu spaltfrei an. (30)

## **2.4. Materialien in der Implantologie**

Grundsätzlich können die verwendeten Materialien in drei Gruppen eingeteilt werden: Metalle, Keramik und Polymere. Der gebräuchlichste Werkstoff und derzeit geltender Goldstandard für Implantate ist Titan, ein Metall. Neuere Denkansätze zielen auf den Einsatz von vollkeramischen Lösungen. Wobei sich Zirkonoxid, als adäquate Materialalternative etabliert hat. (31; 32) Ein weiteres Biomaterial, an dessen Eignung geforscht wird sind die Hochleistungspolymere PEEK (Polyetheretherketon) bzw. PEKK (Polyetherketonketon). (33; 34)

### **2.4.1. Anforderungen an das Implantatmaterial**

Es gibt verschiedene Anforderungen an die Implantat Werkstoffe, damit eine möglichst gute klinische Prognose, sowie der Langzeiterfolg von Implantaten gewährleistet werden kann. Um eine dauerhafte knöcherne Einheilung, sowie einen guten Weichgewebsabschluss zu ermöglichen, bedarf es Materialien, die eine ausreichende Sicherheit, bezogen auf ein mögliches, mechanisches Versagen bieten. Demnach sind neben den chemischen und physikalischen Materialeigenschaften mehrere andere Parameter, wie das Implantatdesign oder seine Oberflächenbeschaffenheit bzw. Mikrostruktur von großer Bedeutung. Das optimale Implantatmaterial sollte dementsprechend nicht nur biokompatibel sein, sondern auch eine geeigneten Materialstärke und -härte aufweisen, sowie über eine guten Bruch- und Korrosionsstabilität verfügen. Die Festigkeit eines Implantates wird durch Material und Form bestimmt, sodass die Eigenschaften des verwendeten Werkstoffes und das Implantatdesign miteinander kompatibel sein müssen. (3; 31)

### **2.4.2. Abutmentmaterialien**

Abutments können aus verschiedenen Materialien auf unterschiedliche Weise hergestellt werden. Die ersten Abutments waren konfektioniert und nur in wenigen Größen und geringer Variation erhältlich und somit für die meisten Indikationen ungeeignet. Daraufhin wurde 1987 Goldabutments entwickelt, genannt UCLA-Abutments, bestehend aus einer Goldbasis, an die eine individuelle Abutmentform angegossen wird. Mittlerweile finden sie aufgrund neuer zur Verfügung stehender Materialien und Technologien wie CAD/CAM immer seltener Anwendung. Aufgrund seiner guten Materialeigenschaften sind die derzeit am häufigsten verwendeten Abutments aus Titan gefertigt. Dentalkeramiken werden bereits seit mehreren Jahren bzgl. ihrer Langzeitergebnisse und Eignung als Abutmentmaterial

erforscht. (35; 36) Dabei zeigte sich, dass Zirkonoxid, durch eine verbesserte Bruchlasteigenschaft verglichen mit Titan- oder Aluminiumoxidabutments als besonders geeignet. (24; 18) Ein weiterer Werkstoff der derzeit intensiv auf seine Tauglichkeit als Abutmentmaterial geprüft wird sind die Hochleistungskunststoffe PEKK bzw. PEEK. (37) (s. Abbildung 11) Ebenso finden auch Glasfaser Abutments zunehmend Anwendung, wobei sich diese gleichermaßen noch in der Testung befinden. (38)



Abbildung 11 Abutments aus Titan, Zirkoniumdioxid, Polyaryletherketon (39)

## 2.5. Materialkunde

### 2.5.1. Titan

Kaltverformtes Titan Grad 4 wird in der oralen Implantologie verwendet. Es weist eine gute mechanische Festigkeit auf, welche für die eigentlichen Implantatkörper ausreichend, für die Aufbauteile oder kleine Schrauben nur teilweise genügend ist. Durch das Zulegieren anderer Metalle kann eine weitere Verfestigung erreicht werden, sodass Titanlegierungen eine deutlich höhere mechanische Stabilität und Festigkeit aufweisen verglichen zu Reintitan. (3; 40) Aufgrund der umfangreichen Studienlage gelten Titan und Titanlegierungen derzeit weiterhin als Goldstandard in der Implantologie. (41)

Die Legierung von Titan-Zirkonium werden derzeit weiter erforscht und bereits von Herstellern angeboten, welche dieser Legierung eine deutlich höhere mechanische Stabilität verglichen mit einem Kaltverformten Titan Grad 4 zusagen. (3; 40)

### 2.5.2. Vor- und Nachteile von Titan

Titan hat sich unter anderem aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften als ein wichtiger Bestandteil in der Medizin etabliert. Dieser Werkstoff bietet viele Vorteile, wie beispielsweise eine hohe Festigkeit oder Korrosionsbeständigkeit und ist gut biokompatibel, dennoch lassen sich auch hier Nachteile in seiner Anwendung finden. (s. Tabelle 1 ) (3; 42)

Tabelle 1 Darstellung der Vor- und Nachteile des Werkstoffes Titan in der dentalen Implantologie (3; 42)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Korrosionsbeständig</li> <li>- Biokompatibel</li> <li>- Hohe Festigkeit bei sehr geringem Gewicht</li> <li>- Hohe Schmelztemperatur, gut hitzebeständig</li> <li>- Nicht magnetisch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe elektrische Leitfähigkeit</li> <li>- Sprödigkeit bei niedrigen Temperaturen</li> <li>- ungünstige Ästhetik aufgrund grauer Farbe</li> <li>- hoher Kostenaufwand</li> <li>- erschwerte Verarbeitung</li> </ul>

### 2.5.3. Zirkoniumdioxid

Das Mineral Zirkonium wurde ursprünglich 1892 entdeckt und aufgrund seines hohen Schmelzpunktes als feuerfestes Material für die Raumfahrt verwendet. In der Medizin und Zahnmedizin wird das Oxid dieses Metalls, Zirkonoxid verwendet. 1969 wurde es erstmalig für medizinische Zwecke eingesetzt, in der Zahnmedizin wird es seit ca. 2001 vermehrt angewendet und daran geforscht. (42)

Mit der Ordnungszahl 40 stellt es das zweite Element der Titangruppe dar. Es besitzt eine Dichte von 6,5g/cm<sup>3</sup> und eine Atommasse von 91,2 u, somit zählt es zu den Schwermetallen. In der Natur kommt dieses Mineral in Form von Zirkonsilikat [ZrSiO<sub>4</sub>] und Baddeleyit vor, welches die Ausgangsstoffe für die Gewinnung von Zirkoniumdioxid sind. Es wird aus Zirkonsand gewonnen, der als weißes hochschmelzendes Pulver vorliegt. Zirkoniumdioxid ist ein polymorphes Material, das in drei Strukturen bzw. Kristallmodifikation vorkommt: monoklonal, tetragonal und kubisch. Diese Phasen ändern sich abhängig von ihrem Schmelzpunkt, bzw. gehen während des Abkühlungsvorgang ineinander über von kubisch zu tetragonal zu monoklonal. Hierbei kommt es zu einer Volumens- und Stabilitätsveränderung. Durch die Zugabe von MgO, CaO oder Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird eine Stabilisierung der schädlichen Volumenzunahme erreicht, sodass das Gefüge im gewünschten tetragonalen bzw. kubisch-tetragonalen Zustand gehalten wird. Speziell die

Zugabe von Yttriumoxid, durch die eine metastabile tetragonale polykristalline Form entsteht hat sich in der Zahnmedizin durchgesetzt. (43) Ein Y-TZP-Implantat wird durch diese Transformation härter, sodass sich Biegefestigkeit und Bruchzähigkeit verbessern, zeitgleich kommt es jedoch zu einer höheren Anfälligkeit für LTD bzw. Alterung. (44) Die Festigkeitswerte von Oxidkeramiken in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung mit Yttriumoxid bzw. Aluminiumoxid reichen von 600-1200MPa.

#### 2.5.4. Vor- und Nachteile von Zirkoniumdioxid

Zirkonoxid-Keramik bietet einige Vorteile, unter anderem besitzt es eine ästhetisch weiße Farbe mit einer ähnliche Transluzenz der menschlichen Zähne. Zusätzlich besticht es durch seine mechanischen Eigenschaften und gute Biokompatibilität, wodurch es in der Zahnmedizin in den letzten zwei Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen hat. Dennoch finden sich auch bei diesem Werkstoff einige Nachteile. (s.Tabelle 2) (42)

*Tabelle 2: Darstellung der Vor- und Nachteile von Zirkonoxid-Keramik (20) (53) (57)*

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Biegefestigkeit und Bruchzähigkeit</li> <li>- Widerstandsfähigkeit gegenüber Rissen und Brüchen</li> <li>- hohe Korrosionsbeständigkeit</li> <li>- biokompatibel</li> <li>- hohe Temperaturbeständigkeit</li> <li>- geringe Wärmeleitfähigkeit</li> <li>- sehr gute Ästhetik aufgrund der weißen Farbe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erschwerte Verarbeitung aufgrund der hohen Härte</li> <li>- Sprödigkeit, mit der Gefahr einer plötzlichen Fraktur</li> <li>- Alterung unter hydrothermalen Bedingungen</li> <li>- Empfindlich gegenüber Verunreinigungen</li> <li>- kostenaufwändig</li> </ul>

#### 2.5.5. Glasfaser

Glasfaser basiert auf einem vorkommenden Rohstoff, Quarzsand. Während des Herstellungsprozesses wird geschmolzenes Glas zu langen dünnen Fäden gezogen. Dieses Material ist vielfältig und findet in verschiedenster Weise Anwendung. In der Zahnmedizin wird es bereits seit längerem verwendet, z.B. als Glasfaserstift in der Endodontie oder als Füllmaterial in faserverstärkten Kompositen. Es besitzt viele für die Zahnmedizin und Implantologie entscheidende Eigenschaften wie eine hohe Biege- und Zugfestigkeit und ist Temperatur- und Feuchtigkeitsbeständig, zusätzlich besitzt es ein hohes Elastizitätsmodul. (45; 46)

In der Implantologie findet dieses Material als Abutment Anwendung. Der von der Firma Patent entwickelte hochstabile und flexible Glasfaserstift mit dentinähnlichen Eigenschaften, wird in den Implantatkörper zementiert und kann, wie ein natürlicher Zahn, präpariert bzw. beschliffen werden. (s. Abbildung 12)



*Abbildung 12: Darstellung eines stufenlos individualisierbaren Abutments aus Hightech-Glasfasern in 3C-Verbindung der Firma Patent (21)*

### **2.5.6. Polymere**

Ein weiteres Biomaterial an dessen Eignung, als metallfreie Alternative, derzeit intensiv im Bereich der Implantologie begonnen wird zu forschen, ist das PEEK bzw. PEKK - Hochleistungspolymere aus der Familie der Polyaryletherketone (PAEK). Ihre Eigenschaften und Anwendungsgebiete können abhängig von ihrem Füllstoffgehalt und ihrer Zusammensetzung variieren. Sie bestehen aus unterschiedlich vielen Ether und Ketone Anteile. (47) (s. Abbildung 13)

Diese Werkstoffe können für herausnehmbare und festsitzenden Restaurationen verwendet werden. Abhängig ihres Herstellungsprozesses und ihrer Zusammensetzung kann sich die Festigkeit bzw. Steifigkeit unterscheiden. Die Festigkeit, das Elastizitätsmodul und seine Härte sind umso höher, je höher der Füllstoffgehalt ist. (48)

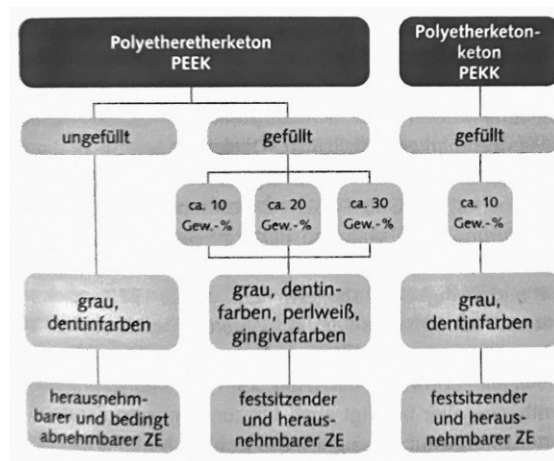


Abbildung 13: Eigenschaften von PEEK und PEKK (48)

Sie weisen einige sehr gute mechanische und biologische Materialeigenschaften auf. Zu seinen Haupteigenschaften zählt unter anderem eine hohe mechanische Festigkeit und Temperaturbeständigkeit, sowie eine gute Ermüdungsfestigkeit. Sie zeigen eine geringe Biofilmaffinität und hohe Widerstandsfähigkeit. (33; 34) Das geringe Elastizitätsmodul, kann unter Kaubelastung eine erhöhte Verformbarkeit zur Folge haben, dies in Kombination mit erhöhten Spannungen kann sich negativ auf das Implantat auswirken. Dennoch bestechen die überwiegend guten Materialeigenschaften dieses Werkstoffes, wodurch sie zum Gegenstand wissenschaftlicher Forschung im Bereich der Implantologie werden. Einige Hersteller, wie die Firma Camlog bieten bereits Abutments aus diesem Werkstoff an. (s. Abbildung 14) Es bedarf jedoch eingehenden Untersuchungen und Datenerhebungen zu diesem Werkstoff bezüglich seiner Tauglichkeit als metallfreie Alternative in der Implantologie. (49; 34)



Abbildung 14: (links) Darstellung eines zweiteiligen Implantat-Sets der Firma Camlog (Ceralog Hexalobe);; (rechts) Darstellung von zwei verschiedenen angulierten PEKK Abutments der Firma Camlog mit einer Hexalobe-Verbindung, sowie einer Titan und Goldschraube (20)

## **2.6. Misserfolge der Implantologie**

Misserfolge bei einer Implantation können jederzeit auftreten und unterschiedliche Ursachen haben. So können ganz allgemeine, biologische bzw. technische, ebenso wie materialspezifische und restaurativ-prothetische Fehlerquellen im Rahmen einer Implantation bzw. Implantatversorgung auftreten. Neben dem Implantatkörper selbst, kann es auch im Bereich des Sekundärteiles oder der Suprakonstruktion zu Komplikationen bzw. Misserfolgen kommen, wobei dies oft auf kombinierte Effekte zurückzuführen ist. (50; 51)

### **2.6.1. Allgemeine Komplikationen der Implantation**

Grundsätzlich kann man zwischen prä-, intra- und postoperativen Komplikationen unterscheiden, sowie ganz allgemein auftretende Komplikationen wie Blutungen, Nervenschädigung oder Verletzung der Nachbarstrukturen/ -zähne, Infektion, postoperative Schmerzen, Hämatome oder Nachblutungen. (52)

Bezogen auf die Implantation können Fehlerquellen bereits während der Planung entstehen, bspw. durch eine unvollständige Diagnostik oder eine mangelnde Risikoabschätzung. Man kann hier frühe und späte Implantatverluste differenzieren. Die frühen Verluste eines Implantates werden innerhalb der ersten Wochen und Monate nach Einbringung beobachten. Ein Spätverlust hingegen tritt im Rahmen ausgeprägter Entzündungsvorgänge bzw. Knochenverlust, nach initial erfolgreicher Osseointegration und funktioneller Belastung auf. (50)

### **2.6.2. Komplikationen der Implantat-Abutmentverbindung**

Weitere verschiedenen Komplikationen im Rahmen einer Implantation können das Abutment selbst, sowie den Bereich der Implantat-Abutmentverbindung betreffen. Diese können zum Beispiel aus einer mangelhaften restaurativen Versorgung entstehen, durch Fehl- oder Überbelastung der Suprakonstruktion oder durch eine ungünstige Verankerungsmethode. Grundsätzliche kann man hier in biologische, mechanische und technische Komplikationen unterscheiden. (38)

### 2.6.2.1. Technische und mechanische Komplikationen

Im Allgemeinen beziehen sich technischen Komplikationen auf eine mögliche Abutmentlockerung, welche durch Dezementierung des Abutments bzw. durch Lockerung oder Fraktur der Abutmentschraube geschehen kann. Die Dezementierung der Restauration, im Sinne einer Kronenlockerung, Chipping, Gerüstfraktur der Keramik, sowie die Randspaltbildung zwischen Kronenrand und Abutment zählen ebenso zu den möglichen technischen Komplikationen. (53; 51) Zu den mechanischen Komplikationen zählen wiederum jene, die die Integrität des Implantats oder des Abutments beeinträchtigen, beispielsweise Implantat oder Abutmentfrakturen. Diese Bruchstellen können wie beispielhaft in Abbildung 15 dargestellt, auf unterschiedlichen Höhen und durch verschiedene Belastung bzw. Ermüdungsvorgänge initiiert werden. (38; 51)

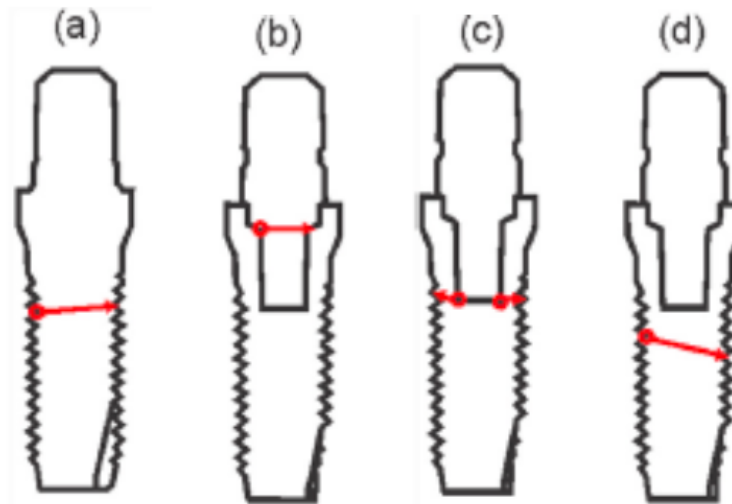


Abbildung 15: Grafische Darstellung der Bruchinitiierungsstellen bei den von Zhang et al untersuchten ein- und zweiteiligen Zirkonimplantaten a) einteiliges Implantat mit Bruchstelle im enossal Teil b) zweiteiliges Implantat mit Bruchstelle am Abutmenthals c) Bruchstelle an der inneren Oberfläche der Implantat-Abutmentverbindung d) Bruchstelle im enossal Teil, mit Versagen der Fixierung (51)

### 2.6.2.2. Biologische Komplikationen

Biologische Komplikationen werden unter anderem definiert als Schwellung, Gingivahyperplasie, Weichgewebsrezession oder Fistelbildung, sowie komplexe Entzündungsvorgänge wie eine periimplantäre Mukositis und Periimplantitis dazu. Die periimplantäre Mukositis ist eine auf das Weichgewebe beschränkte entzündliche Läsion, wohingegen die Periimplantitis eine auf das knöcherne Implantatlager ausgeweitete Entzündung ist. (38; 54)

#### **2.6.2.4. Materialspezifische Komplikationen**

Betrachtet man nun die Materialeigenschaften zeigt sich, dass die Komplikationsrate von Zirkonoxid unter anderem von der Qualität des Materials abhängt. Der Einfluss von Feuchtigkeit und Stress bzw. Belastung, kann zu einer Phasenumwandlung und damit zu einer Schwächung und ggf. zur Fraktur des Implantats bzw. Abutments führen. (44) Zirkonoxid besitzt eine relativ hohe Biegefestigkeit im Vergleich zu Titan. Dies bedeutet, dass Zirkonimplantate einer einwirkenden Kraft besser entgegenwirken können als Titan Implantate. Andererseits liegt die statistische Bruchkraft von Zirkonoxid in einem für den zahnmedizinischen Gebrauch gerade noch zulässigen Bereich. Das bedeutet, dass es abhängig von der Stärke der einwirkenden Kraft bei Titan eher zu einer Verformung kommt, während Zirkonoxid bereits frakturiert. (55)

Die Kombination der Werkstoffe Titan und Zirkon, sprich die Versorgung eines Implantatkörpers aus Titan mit einem Zirkonoxid Abutment für eine bessere Ästhetik wurde bereits vermehrt getestet. Dabei wurde beobachtet, dass es im Bereich des Gewindes zu vermehrt zu Mikrobewegungen kam. Folglich kam es zu Abrieberscheinung der Metalloberfläche der Titan Implantate und zu der Entstehung eines Mikrospalts zwischen Keramik und Metall. (16) Diese Abnutzungs- bzw. Abrieberscheinungen führen zu einer Ansammlung von Debris, wodurch ein entzündliches Geschehen des periimplantären Gewebes begünstigt wird. (3)

### **2.7. Fragestellung**

Diese Literaturrecherche soll einen Überblick über die möglichen Implantat Abutmentverbindungen zweiteiliger Zirkonoxid Implantate geben.

Dies soll anhand folgender Punkte erörtert werden:

- Überlebens- und Komplikationsrate zweiteiliger Zirkonoxid Implantate
- Vergleich potenzieller Komplikationen zementierter und verschraubter Befestigungsmethoden
- Eignung verschiedener Biomaterialien für ein Abutment als metallfreie Alternative der Implantatversorgung
- Eignung verschiedener Biomaterialien für Abutmentschrauben als metallfreie Alternative der Implantatversorgung

## 3. Material und Methoden

### 3.1. Literaturrecherche

Diese Arbeit stellt eine narrative Literaturübersicht dar, welche mit einer vorangegangenen systematischen Recherche erstellt wurde. Eine Übersichtsarbeit beschäftigt sich damit, Literatur zu einer spezifischen Thematik zu erfassen, sie soll unterstützend dazu beitragen mögliche Forschungslücken bzw. Fehlerquellen zu identifizieren und dazu beitragen potenzielle Konzepte für weitere zukünftige Recherchen und die Praxis zu entwickeln.

Die Grundlage bildet eine Literaturrecherche zu dem Thema Implantat-Abutmentverbindungen bei zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten.

Zu Beginn dieser Literaturrecherche wurde eine Suchstrategie erarbeitet, um geeignete Literatur für diese Arbeit herauszufiltern. Es wurden die medizinischen Datenbanken PubMed, MedLine und Google Scholar verwendet, wodurch sich der Hauptanteil der Recherche ergab. Des Weiteren wurde Fachliteratur sowohl aus der Bibliothek der Medizinischen Universität Graz als auch aus privatem Bestand zur Recherche herangezogen, um die theoretischen Grundlagen für die Hinführung zur Kernthematik zu erarbeiten. Die verwendeten Fachbücher stammten aus den Gebieten der zahnärztlichen Chirurgie und Implantologie, sowie der Prothetik und zahnmedizinisch-restaurativen Versorgung.

Um die Datenlage bezüglich der Komplikations- bzw. Überlebensrate unterschiedlicher Implantat-Abutmentverbindungen bei zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten in klinischer Anwendung zu ermitteln, wurde die Mesh- Suchfunktion unter Eingabe folgender Begrifflichkeiten, sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch angewandt: „dental implants“, „one and two piece Implants“ bzw. „Two-piece Zirconia Implants“, „Zirconia implant complication“, „Abutment materials“ bzw. „Abutment complications“, „One-and Two-piece Abutments“, „Implant-Abutment-Connection“ und „Zirconia Implant Restoration“, sowie „screw retained Abutment“ bzw. „cemented Abutment Connection“. Zur Recherche für weitere Hintergrundinformation wurden in der Mesh-Suchfunktion zusätzlich folgende Begrifflichkeiten wie „Zirconia vs. Titanium“, „Implant biomaterials“ und „Belastbarkeit Implantate“, sowie „Implant Fracture resistance“ verwendet.

### **3.2. Datenerhebung und Analyse**

Zur weiteren Analyse wurden alle thematisch passenden Artikel aufgelistet und die jeweiligen Volltexte beschafft, um diese anhand verschiedener Kriterien überprüfen zu können. Im darauffolgenden Arbeitsschritt wurde die Literatur anhand des Abstracts auf ihre inhaltliche Relevanz geprüft. Anschließend wurden jene Artikel exkludiert, welche die Thematik nur unzureichend bearbeiteten und von der Literaturrecherche ausgeschlossen.

Weitere Publikationen, die die biologischen und technischen Eigenschaften von Zirkonoxid, Titan und anderen Implantat assoziierten Werkstoffen zum Thema hatten, sowie Vergleichsstudien von Zirkonoxid- und Titan-Implantaten wurden für den theoretischen Teil herangezogen.

### **3.3. Auswahlkriterien der Publikationen**

Es wurden sowohl in-vivo als auch in-vitro Studien, sowie klinische und randomisiert kontrollierte Studien in der Literaturrecherche einbezogen.

Die zur Volltextanalyse weiterverwendeten Studien, wurden nach Titel- und Abstract Überprüfung ausgewählt. Es wurden jene Studien eingeschlossen, welche sich mit der Überlebens- und Komplikationsrate von Zirkonoxid Implantaten beschäftigten.

Studien, welche detaillierter auf die Implantat Abutmentverbindungen und deren Verankerungsmöglichkeiten und Fraktureigenschaften verschiedener Materialien eingingen, wurden ebenso in die weitere Analyse mit einbezogen.

Das Erscheinungsjahr der für den Ergebnisteil relevanten Publikationen wurde auf den Zeitraum von 2015-2024 begrenzt.

Tierstudien stellten kein Ausschlusskriterium dar.

Folgende Punkte stellten ein Ausschlusskriterium

- mangelnde Information
- geringe Vertrauenswürdigkeit
- Themenabweichung in Titel bzw. Abstract
- Publikationen deren Volltexte nicht online erhältlich waren
- Systematische Reviews.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Screening und Auswahl der Literatur

Im Rahmen der ersten Suche konnten mittels der Schlagwörter „Zirconia Implants“, „zirconia abutments“ und „Implant abutments“ n = 1246 Artikel herausgefiltert werden. Diese Artikel bezogen sich jedoch sehr allgemein auf die dentalen Implantate, sodass die Suche weiter eingegrenzt wurde. Die bereits verwendeten Begrifflichkeiten wurden spezifischer angewandt, woraufhin die Schlagwörter „connection“ und „two-piece“ den Hauptbestandteil der Recherche bildeten und durch die boolean operators „AND, OR und NOT“ ergänzt wurden.

Ausgehend von dieser Suche ergaben sich eine Artikelmenge von n = 102, nach Ausschluss von Duplikaten (n = 31), Durchsicht der Titel und Abstracts (n= 36) und anschließender Analyse der Volltexte (n =35), konnten 28 Artikel herausgefiltert werden, die im Rahmen dieser Literaturrecherche verwendet wurden. Von diesen 28 Artikeln wiederum wurden 14 für die Datenanalyse des Ergebnisteils einbezogen. (s. Abbildung 16) (s. Tabelle 3 und Tabelle 4) Die weiteren 14 wurden für den theoretischen Anteil und das Hintergrundwissen verwendet.

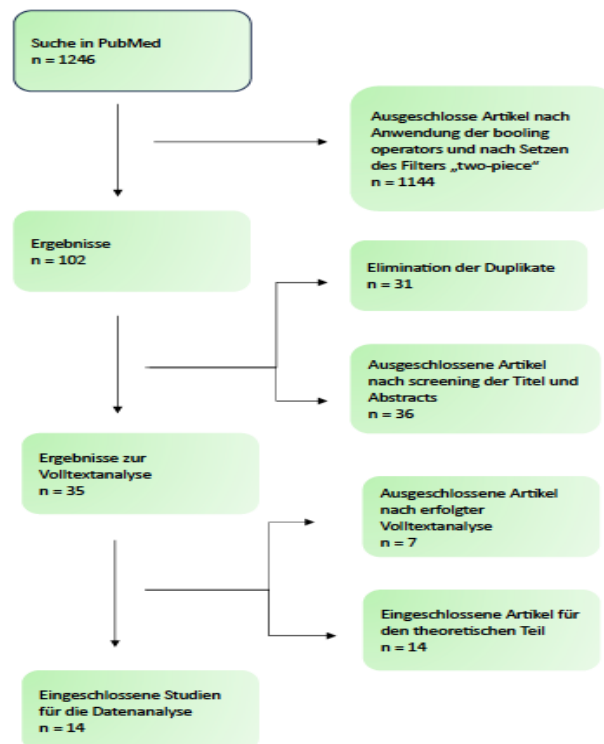


Abbildung 16: Grafische Darstellung des Literatur Screenings

Tabelle 3: Auflistung der inkludierten in-vivo Studien

<b>AutorIn</b>	<b>Implantate</b>	<b>Titel der Studie</b>	<b>Publika- tionsjahr</b>
<b>Payer, M. et al (56)</b>	31	All-ceramic restoration of zirconia two-piece implants – a randomized controlled clinical trial	2015
<b>Cionca, N. et al (57)</b>	49	Two-piece zirconia implants supporting all-ceramic crowns: Six-year results of a prospective cohort study	2020
<b>Karapataki, S. (58)</b>	91	Clinical Performance of Two-Piece Zirconia Dental Implants After 5 and up to 12 Years	2023
<b>Koller, M. et al (59)</b>	31	Two-piece zirconia versus titanium implants after 80 months: Clinical outcomes from a prospective randomized pilot trial	2020
<b>Becker et al (60)</b>	52	Clinical performance of two-piece zirconia implants in the posterior mandible and maxilla: a prospective cohort study over 2 years	2017
<b>Brunello, G. et al (38)</b>	60	Two-piece zirconia implants in the posterior mandible and maxilla: A cohort study with a follow-up period of 9 years	2022

Tabelle 4: Auflistung der inkludierten in-vitro Studien

<b>AutorIn</b>	<b>Proben</b>	<b>Titel der Studie</b>	<b>Publika- tionsjahr</b>
<b>Cantarella, J. et al (61)</b>	60	Mechanical Stability of Restorations Supported by Titanium Base, Zirconia, and Polyetherketoneketone Abutments on One- and Two-Piece Zirconia Implants	2021
<b>Kohal, R. et al (29)</b>	32	Fracture Resistance of a Bone-Level Two-Piece Zirconia Oral Implant System – The Influence of Artificial Loading and Hydrothermal Aging	2024
<b>Burkhardt, F. et al (62)</b>	48	Fracture resistance and crystal phase transformation of one- and two-piece zirconia implant with and without simultaneous and aging – An in Vitro study	2021
<b>Preis, V. et al (63)</b>	60	In vitro performance of two-piece zirconia implant systems for anterior application	2016
<b>Stimmelmayer, M. et al (28)</b>	36	Mechanical stability of all-ceramic abutments retained with three different screw materials in two-piece zirconia implants – an in vitro study	2020
<b>Zhang, F. et al (37)</b>	16	Reliability of an injection-moulded two-piece zirconia implant with PEKK abutment after long-term thermos-mechanical loading	2020
<b>Zhang, F. et al (51)</b>	16	Fracture analysis of one/two-piece clinically failed zirconia dental implants	2022
<b>Kohal et al (64)</b>	32	Fracture resistance of a Two-Piece Zirconia Implant System after Artificial Loading and/or Hydrothermal Aging – An In Vitro Investigation	2023

### 4.1.1. Inkludierte Artikel

Das Erscheinungsjahr der in dieser narrativen Literaturrecherche verwendeten und analysierten Artikel wurden auf den Zeitraum 2015-2024. Von den insgesamt 14 herausgefilterten Publikationen wurden elf Arbeiten in den Jahren 2020-2024 veröffentlicht wurden. (s. Abbildung 17)

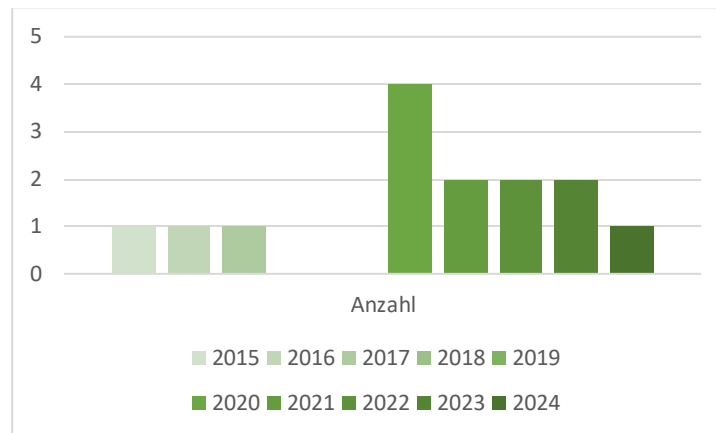


Abbildung 17: Anzahl der Publikationen pro Jahr (eigene Darstellung)

Bei sechs von 14 Publikationen handelt es sich um in-vivo Studien, mit unterschiedlichem Studiendesign. Die älteste klinische Studie wurde im Jahr 2015 von Payer et al (56) veröffentlicht. Die jüngste Studie stammt aus dem Jahr 2023 und wurde von Karapataki et al (58) im Rahmen einer prospektiven Kohorten Studie publiziert.

Vier Studien (57; 58; 59; 60) wurden im Rahmen einer prospektiven- und eine (38) als retrospektive Kohortenstudie durchgeführt. Eine weitere erfolgte als randomisierte klinische Studie. (56)

Insgesamt wurden 306 Implantate bei 197 PatientInnen über einen Beobachtungszeitraum von 2-12 Jahren kontrolliert und untersucht. (s. Tabelle 5)

Um Rückschlüsse einer erfolgreichen Versorgung mit zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten ziehen zu können, wurden zur Beurteilung der unterschiedlichen Implantat Abutmentverbindungen neben der Überlebensrate die biologischen, mechanischen und technischen Komplikationen genauer untersucht.

Tabelle 5: Übersicht zu den in vivo Studien

<b>AutorInnen/ Publikations- jahr</b>	<b>Studiendesign</b>	<b>Implantate/ PatientInnen</b>	<b>Untersuchungs- /Kontrollzeitraum</b>
<b>Payer et al (56) 2015</b>	Randomisiert kontrollierte klinische Studie	31 Implantate 22 PatientInnen	24 Monate 6/12/18/24 Mo Kontrollen
<b>Cionca et al (57) 2020</b>	Prospektive Kohorten-Studie	49 Implantate 31 PatientInnen	5 Jahre 82,2 ± 5,86 Mo Kontrollen
<b>Karapataki et al (58) 2023</b>	Prospektive Kohorten-Studie	91 Implantate 39 PatientInnen	5-12 Jahre Median 76 Mo
<b>Koller et al (59) 2020</b>	Prospektive Kohorten-Studie	31 Implantate 22 PatientInnen	80 Monate 30/80 Mo Kontrollen
<b>Becker et al (60) 2017</b>	Prospektive Kohorten-Studie	52 Implantate 52 PatientInnen	32,9 Monate 6/12/24 Mo Kontrollen
<b>Brunello et al (38) 2022</b>	Retrospektive Kohorten-Studie	52 Implantate 30 PatientInnen	9 Jahre

Die weiteren acht Studien (28; 29; 37; 51; 61; 62; 63; 64) sind in-vitro Studien, welche sich vor allem mit der Befestigungs- bzw. Verbindungsart und den verschiedenen getesteten Materialien, sowie dem Bruchverhalten und der Bruchfestigkeit von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten beschäftigen. (s. Tabelle 4)

## **4.2. Ergebnisse der in-vivo Studien**

Die in diesen Studien geprüften Implantate wurde in dem Zeitraum von 2009-2016 gesetzt und gehören mit zu den ersten auf dem Markt erhältlichen zweiteiligen Zirkonoxid Implantatsystemen. Sechs der im Rahmen der Literaturrecherche herausgefilterten Artikel zeigen die in vivo Ergebnisse zu den Überlebens- und Komplikationsraten von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten bzw. deren Implantat-Abutmentverbindung. (s. Tabelle 6 und Tabelle 7)

Ein direkter Vergleich zwischen den einzelnen Publikationen erweist sich aufgrund der unterschiedlich gesetzten Hauptmerkmale als schwierig. Entscheidend für diese Literaturrecherche waren die Überlebensrate der zweiteiligen Zirkon Implantate und vor allem deren Implantat-Abutmentverbindungen, im Zusammenhang mit den potenziellen technischen, mechanischen und biologischen Komplikationsraten, der zweiteiligen Zirkon Implantate. Der Vergleich verschiedener Implantat-Abutmentverbindungen – verschraubt

bzw. zementiert wurde ebenso in die Analyse mit einbezogen, sowie die Testung unterschiedlicher Materialien.

Zur Beurteilung der Überlebens- und Komplikationsrate wurden unter anderem klinische Parameter wie der Plaqueindex (PI), Bleeding on probing (BOP), pink esthetic score (PES), Sondierungstiefe (ST), Schleimhautrezession/-wucherung (MR), die Breite der keratinisierten Schleimhaut und der Papillenindex herangezogen, sowie der Periotest und radiologische Messwert des marginalen Knochenverlustes (MBL). (56; 57; 60)

#### 4.2.1. Überlebensraten zweiteiliger Zirkonoxid Implantate

Das Überleben eines Implantates bzw. dessen prothetischer Versorgung wurde definiert als das intakte Bestehen über den jeweiligen Untersuchungs- bzw. Kontrollzeitraumes.

Der Beobachtungs- bzw. Kontrollzeitraum, der in dieser Literaturrecherche verwendeten und analysierten Studien variiert von zwei bis zu 12 Jahren. Alle Artikel der untersuchten zweiteilige Zirkonoxid Implantate berichten über Überlebensraten im Bereich von 85,7-100%, sodass sich ein durchschnittlicher Wert von ca. 93% ergibt. (s. Tabelle 6) Damit weisen sie vergleichbare Ergebnisse wie einteilige Zirkonoxid- und zweiteilige Titan Implantate auf. (56) Zu ähnlichen Ergebnissen kamen weitere Studien mit Überlebensraten von 92%-98,3% nach einem Jahr, 97,2% nach zwei Jahren und 95% nach 7 Jahren. (65)

Tabelle 6: Darstellung vergleichbarer prospektiver Kohortenstudien

Studie/ AutorInnen	Publi- kations- jahr	Implantate	Untersuchs-/ Kontroll- zeitraum	ImplantatV erluste	Überlebensrate
Payer et al (56)	2014	16	24 Monate	1	93,3%
Becker et al (60)	2017	52	2 Jahre	2	95,8%
Koller et al (59)	2020	16	80 Monate	2	85,7%
Brunello et al (38)	2022	52	9 Jahre	1	94,1%
Cionca et al (57)	2021	49	6 Jahre		83% (kumulativ)
Karapataki (58)	2023	91	5-12 Jahre	0	100%

#### 4.2.2. Komplikationsraten zweiteiliger Zirkonoxid Implantate

Neben der Überlebensrate beschäftigten sich fünf dieser Studien detaillierter mit den biologischen, technischen und mechanischen Komplikationsraten. Eine dieser fünf Studien fokussierte sich nur auf die biologischen Beeinträchtigungen, während eine andere primär auf die technischen und mechanischen Komplikationen einging. (58; 59)

Mechanische Komplikationen wurden als jene Ereignisse betrachtet, die die Integrität des Implantats bzw. des Abutments beeinträchtigten. Darunter zählen z.B. Implantat- bzw. Abutmentfrakturen, -lockerungen bzw. Dezementierung, Schraubenlockerung oder Schraubenfraktur. Technische Ereignisse wurden als solche vermerkt, die die prothetische Kronenversorgung betrafen, wie bspw. Dezementierung oder Kronenfrakturen bzw. -verluste oder Chipping. (59)

Biologische Komplikationen umfassten das Vorhandensein von periimplantärer Mukositis bzw. Periimplantitis und wurden unter anderem anhand von einem positiven BOP mit oder ohne Pus festgelegt. Zusätzlich wurden Veränderungen des radiologisch ermittelten Knochenlevels im Vergleich zum Ausgangswert, also zum Zeitpunkt der Kroneninstallation an den Zielimplantaten als Parameter verwendet. (60)

Ausgehend davon wie die Komplikationen innerhalb einer Studie genau definiert und welche Parameter zur Beurteilung im Einzelnen verwendet wurden, variierten die Häufigkeiten. (s. Abbildung 18) Zur Berechnung bzw. Schätzung der Komplikationsraten wurde unter anderem die Kaplan-Meier-Methode verwendet. (60; 38; 57)

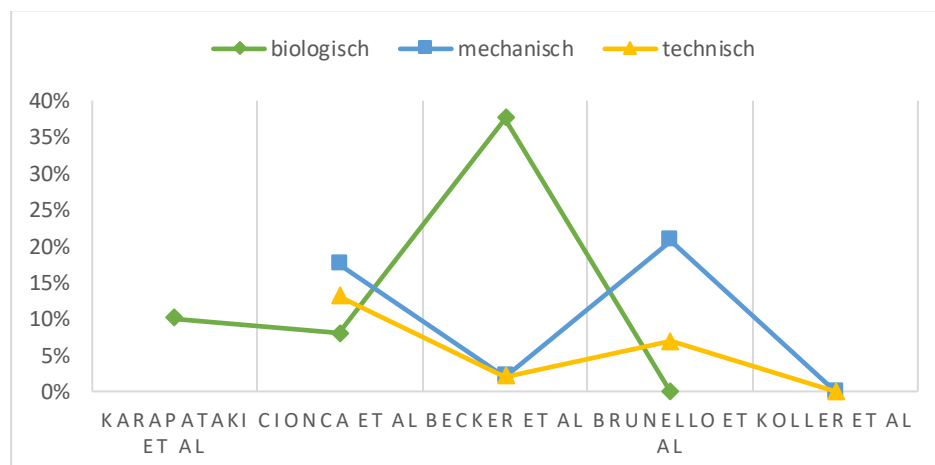


Abbildung 18: Grafische Darstellung der Komplikationsraten (eigene Darstellung)

Für die biologischen Komplikationen ergab sich ein Mittelwert von 14%, für die mechanischen einer von 13% und für die technischen wurde ein Mittelwert von 7% errechnet. (s. Tabelle 7)

*Tabelle 7: Darstellung der Häufigkeitswerte der Komplikationsraten der vergleichbaren Studien*

<b>Komplikationen /</b> AutorInnen	Karapataki et al (58)	Cionca et al (57)	Koller et al (59)	Becker et al (60)	Brunello et al (38)	Mittelwert
<b>biologisch</b>	10%	8%	nicht erhoben	37,5%	0%	14%
<b>mechanisch</b>	nicht erhoben	17,5%	0%	2,1%	20,7%	13%
<b>technisch</b>	nicht erhoben	13%	0%	2,1%	6,9%	7%

### **4.2.3. Implantat-Abutmentverbindung**

Die restaurativ prothetische Versorgung der inserierten zweiteiligen Zirkonoxid Implantate erfolgte innerhalb der Studien auf unterschiedliche Weise. Alle Abutments wurden zementiert befestigt bzw. adhäsiv verklebt. (56; 57; 58; 59; 38; 60)

In drei der Studien (56; 57; 59) wurden einteilige Zirkonoxid Abutments und in den anderen drei Studien (38; 58; 60) Glasfaser Abutments für die prothetische Restauration verwendet.

In der prospektiven Kohorten Studie von Cionca et al (57) aus 2021 erfolgte die prothetische Versorgung der zweiteiligen Zirkonoxid Implantate, ähnlich wie bei Payer et al (56) und Koller et al (59) über zementierte einteilige Zirkonoxid Abutments. (57) Über die jeweiligen Beobachtungszeiträume traten Komplikationen wie beispielsweise Abutmentfrakturen, -lockerungen bzw. -dezementierungen in unterschiedlicher Häufigkeit auf.

Während es bei Payer et al (56) und Koller et al (59) zu keiner dieser mechanischen oder technischen Beeinträchtigungen kam, traten diese bei Cionca et al (57) mit einer Häufigkeit von 13-17,5% auf. (s. Tabelle 7)

Neben den technischen und mechanischen Komplikationen wurden bei Cionca et al ebenfalls die biologischen Beeinträchtigungen gewertet, welche bei 8% der untersuchten Implantate auftraten. (57)

Karapataki et al (58), Becker et al (60) und Brunello et al (38) verwendeten zementierte Glasfaser Abutments, welche entsprechend den Gegebenheiten und Bedürfnissen der PatientInnen, größtenteils mit vollkeramischen Einzelzahnkronen restauriert wurden.

Bei der Versorgung mit Glasfaser Abutments traten vermehrt Komplikationen auf. Die Hauptkomplikation bezog sich vor allem auf Abutmentfrakturen, sowie Lockerungen oder Dezentrierungen des Abutments.

Die technischen Beeinträchtigungen traten mit einer Häufigkeit von bis zu 20,7% auf, wobei es hier vor allem zu Abutmentfrakturen kam. Implantatfrakturen wurden hingegen in keiner der drei Studien beobachtet. Mechanischen Komplikationen kamen etwas seltener mit einer Häufigkeit von bis zu 6,9% vor. (38) Durch das zweiteilige System konnte das betroffene Abutment ausgetauscht und somit der Erhalt des Implantats gesichert werden. (57). Die Biologischen Komplikationen variierten in diesen drei Studien stark von 0% bis hin zu 37,5%. (s. Tabelle 7) Bei den von Brunello et al (38) untersuchten Implantaten konnten keinerlei biologische Komplikationen festgestellt werden. Vielmehr zeigte sich ein stabiles Gewebeniveau mit einer Mucosarezession von weniger als 1mm. (38) Für die Studie von Karapataki et al (58) kam es bei 10% der untersuchten zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten zu einer biologischen Komplikation. Diese äußerten sich im Rahmen von periimplantärer Mukositis ohne bzw. teilweise mit Knochenverlust. Periimplantitiden wurden keine beobachtet. (58)

### 4.3. Ergebnisse der in-vitro Studien

Weitere acht Artikel beschäftigten sich mit verschiedenen Implantat Abutmentverbindungen. Dabei wurden neben den Verankerungsmethoden verschiedene Materialien für Abutments und Schrauben getestet. Insgesamt wurden 310 Proben untersucht. Dies geschah im Rahmen von hydrothermisch und/oder mechanischer Belastung bzw. Alterung der jeweiligen Proben. Anschließend wurde die Bruchlast bzw. Fraktur Resistenz der einzelnen Implantatproben untersucht und in Abhängigkeit der verschiedenen Materialien und Verankerungsarten analysiert. (s. Tabelle 8) Die Proben wurden bis zur Fraktur belastet und die daraus resultierten Versagensmodi und Frakturgeschehen dokumentiert und miteinander verglichen. Eine weitere Studie von Zhang et al (51) untersuchte ein- und zweiteilige Zirkonoxid Implantate, bei welchen es zu einem klinischen Versagen gekommen war.

*Tabelle 8: Auflistung der in vitro Studien mit Aufzeichnung der Untersuchungsmethoden dabei steht „x“ = ja und „-“ = teilweise, nein = nicht vorgenommen*

Studie	Proben	Künstliche Alterung und Belastung	Belastung bis zur Fraktur	Aufzeichnung Komplikation	Publikationsjahr
Burkhardt et al (62)	48	-	x	x	2021
Stimmelmayr et al (28)	36	x	x	x	2020
Kohal et al (29)	32	-	-	-	2024
Zhang et al (51)	16	nein	nein	x	2022
Zhang et al (37)	16	-	x	x	2020
Cantarella et al (61)	60	x	x	x	2021
Preis et al (63)	70	-	x	x	2016
Kohal et al (64)	32	-	-	-	2023

Unter den 310 getesteten Proben waren 34 einteilige Zirkonoxid Implantate und 38 zweiteilige Titan Implantate, die in den jeweiligen Studien als Referenz zu den 238 zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten dienten. (s. Tabelle 9) Für eine bessere Übersicht wurden in der weiteren Analyse primär die Ergebnisse der zweiteiligen Zirkonoxid Implantate betrachtet.

*Tabelle 9 Auflistung der in vitro Studien mit Anzahl der untersuchten Proben*

<b>Studien/ AutorInnen</b>	<b>Gesamt- anzahl der Proben</b>	<b>Zweiteilige Zirkon Implantate = 238</b>	<b>Einteilige Zirkon Implantate = 34</b>	<b>Zweiteilige Titan Implantate =38</b>	<b>Publikations- jahr</b>
<b>Cantarella et al (61)</b>	60	36	12	12	2021
<b>Kohal et al (64)</b>	32	32	-	-	2023
<b>Burkhardt et al (38)</b>	48	16	16	16	2021
<b>Preis et al (63)</b>	70	60	-	10	2016
<b>Zhang et al (37)</b>	16	16	-	-	2020
<b>Zhang et al (51)</b>	16	10	6	-	2022
<b>Kohal et al (29)</b>	32	32	-	-	2024
<b>Stimmelmayer et al (28)</b>	36	36	-	-	2020

Insgesamt 198 der 238 untersuchten zweiteiligen Zirkonoxid Implantat-Proben wurden mit einem Zirkonoxid Abument versorgt, 12 mit einem Titan- und 28 mit einem PEKK Abutment. 219 Abutments, unterschiedlichen Materials wurden mit einer Schraube befestigt. Die dafür verwendeten Schrauben bestanden aus unterschiedlichen Materialien. (28; 29) Es wurden 147 Titan-, 16 Zirkon-, 12 PEKK-, 12 Gold- und 32 Carbon Schrauben verwendet, welche in weiterer Folge miteinander verglichen und auf ihre Eignung zur Verankerung von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten getestet wurden. Die übrigen 19 Zirkonoxid Abutments wurden zementiert bzw. adhäsiv mit dem Zirkonoxid Implantatkörper verklebt. (51; 63) (s. Tabelle 10)

*Tabelle 10: Anzahl der zementiert bzw. verschraubten Abutments der in vitro Studien, mit jeweiliger Anzahl der Abutments und Schrauben ausgehend der untersuchten Materialien*

	<b>Gesamtanzahl der Abutments =238</b>	<b>Zementiert = 19</b>	<b>Verschraubt = 219</b>
<b>Material</b>	<b>Abutment</b>		<b>Abutmentschrauben</b>
<b>Zirkonoxid</b>	198	19	16
<b>Titan</b>	12	-	147
<b>PEKK</b>	28	-	12
<b>Gold</b>	-	-	12
<b>Carbon</b>	-	-	32

### **4.3.1. Allgemeines Vorgehen der in vitro Untersuchungen**

Die analysierten Studien untersuchten jeweils welchen Einfluss die Implantat-Abutmentverbindung auf die langfristige in-vitro Performance und die Bruchfestigkeit bzw. das Transformationsverhalten von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten hat. (62; 63)

Die zweiteiligen Zirkonoxid Implantat Proben wurden entweder verschraubt bzw. zementiert befestigt. Anschließend erfolgte eine Aufteilung in Gruppen unterschiedlicher Größe. Je nach Studie führte man eine künstliche Alterung der Proben durch. Dies wurde über thermische bzw. hydrothermische und mechanische Belastung, eines Kausimulators erreicht. (61) In weiterer Folge kam es zur Überprüfung des Bruch- bzw. Transformationsverhaltens. Die Proben wurden demnach bis zum Bruch belastet und der Biegemoment bzw. -spannung berechnet. (29; 61; 64; 63)

Bei jenen Proben, die bis zum Bruch belastet wurden, dokumentierte man die verschiedenen Bruchmuster und Lokalisationen, also Implantatkörper, Implantat-Abutmentverbindung, Abutment bzw. Abutmentschraube. (28) Zusätzlich wurden in einem Teil der Studien die Implantatoberflächen bzw. Frakturflächen unter einem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht, um zu ermitteln welchen Einfluss die künstliche Alterung auf die verwendeten Materialien hatte. (29; 64)

#### **4.3.1.1. Zementiert versus verschraubte Befestigung**

In der Studie von Preis et al (63) wurde sechs zweiteilige Zirkonoxid Implantatsystem mit je n=10 untersucht und miteinander verglichen. Bei einer Gruppe wurde das Zirkonoxid Abutment zementiert befestigt, bei den weiteren fünf Gruppen erfolgte die Verankerung über eine Titanschraube. Nach erfolgter künstlicher Alterung zeigten die schraubengehaltenen zweiteiligen Zirkonoxid Implantate teilweise hohe Ausfallraten, verglichen mit den verklebten Proben, bei welchen es zu keinerlei Ausfällen kam. Während der Prüfung der Bruchfestigkeit, bei welcher die Proben bis zur Fraktur belastet wurden, zeigte sich, dass bei den zementierten zweiteiligen Zirkon Implantaten das Versagen besonders das Abutment betraf. (63) Zu einem ähnlichen Ergebnis kam Zhang et al (51). Bei der Auswertung der zementierten zweiteilige Zirkonoxid Implantate nach klinischem Versagen wurden überwiegend Frakturen im Bereich des Abutments bzw. der Implantat-Abutmentverbindung festgestellt. Die Bruchmodi der schraubgestützten Gruppen betrafen vermehrt das Implantat und/oder Abutment im Bereich der Verbindungsschraube. Schraubenfraktur- bzw. lockerungen traten nur kaum auf. (63) Insgesamt zeigte diese Studie verbesserte Überlebensraten eines zweiteiligen Zirkonoxid Implantatsystems mit verklebter Implantat-Abutment-Verbindung im Vergleich zu verschraubten zweiteiligen Zirkonoxid Implantatsystemen. (61)

#### **4.3.1.2. Verschiedene Abutment Materialien**

Cantarella et al (61) und Zhang et al (37) verwendeten in ihren Studien zu zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten neben Zirkonoxid Abutments auch PEKK und Titan Abutments. Die Verankerung erfolgte bei allen untersuchten PEKK Abutments über eine Titan Schraube.

Bei den PEKK Abutments konnte nach dem Alterungsprozess eine Abnahme der Festigkeit festgestellt werden. (37) Aufgrund der mechanischen Eigenschaften nehmen PEKK Abutments die auf sie auswirkende Belastung anders auf und übertragen diese auf das Implantat bzw. die Implantat Abutmentverbindung. Diese Kraftübertragung, zeigte sich unter anderem darin, dass es bei den verschraubten PEKK Abutments primär zu Implantatfrakturen bzw. Frakturen im Bereich der Implantat Abutmentverbindung kam. (37; 61) Im Gegensatz dazu wiesen Zirkonoxid Abutments eine stabile Implantat-Abutmentverbindung auf. Jedoch zeigten sie nach dem Bruchlasttest die geringste

mechanische Stabilität. (61) Die gehäuft auftretenden Frakturen von Implantat und Abutment teilweise in Kombination mit Schraubenfraktur oder – lockerung kann demnach unter anderem auf die Sprödigkeit des Materials zurückgeführt werden. Aufgrund dieser mechanischen Eigenschaft dieses keramischen Werkstoffes erweist sich die Verbindung von Zirkonoxid Abutment mit Zirkonoxid Implantaten als schwierig. (63)

Die Ausfälle der getesteten Titan Abutments betrafen alle den Bereich der zementierten Kronen, es konnten keine Abutment- oder Implantatfrakturen bzw. Verformungen festgestellt werden. (61)

#### **4.3.1.3. Verschiedene Materialien für Abutmentschrauben**

Die Erforschung verschiedener Materialien von Abutmentschrauben ist entscheidend für ein Behandlungskonzept einer metallfreien Implantatversorgung. Bei dieser Analyse wurden die Materialien Titan, Zirkon, Gold, PEKK und Kohlefaserverstärktes PEEK auf ihre Eignung untersucht und miteinander verglichen. Titanschrauben werden größtenteils aufgrund ihrer guten Eigenschaften und Ergebnisse für verschraubte zweiteilige Zirkonoxid Implantate verwendet. Titanschrauben zeigten eine hohe Stabilität im Bereich der Implantat Abutmentverbindung und bewiesen eine gute Widerstandsfähigkeit und Bruchfestigkeit gegenüber okklusalen Kräften. Titanschrauben zeigten eine bessere Stabilität verglichen mit jenen aus Gold oder PEKK. Dennoch kam es gehäuft zu Komplikationen wie Implantat- und/oder Abutmentfrakturen, seltener zu Schraubenfrakturen oder -lockerungen. (28; 63)

Im Gegensatz dazu zeigten sich bei der PEKK-Abutmentschraube wenige Implantatfrakturen sondern vermehrt Schraubenfrakturen. Tatsächlich konnte festgestellt werden, dass die Implantat Abutmentverbindung durch die PEKK-Schraube geschwächt wurde. Dieses Material zeigt eine geringe Bruchlast mit verminderter Stabilität, was eine vorzeitige Schraubenfraktur mit anschließender Abutmentfraktur zur Folge hat. (28)

Anders verhält es sich bei Carbon (kohlefaserverstärktes PEEK) Schrauben, die sich weniger anfällig für Korrosion und das damit verbundene Risiko von Ermüdungsfrakturen erweisen. Dieses Material zeigt eine geringere Härte, wodurch das Risiko für Abrasionen im Implantatinnengewinde vermindert wird. Diese Carbon Schrauben wiesen eine ausreichende Stabilität und Widerstandsfähigkeit gegenüber okklusalen Kräften auf. (64)

Zirkonoxidschrauben erwiesen sich als vergleichbar robust und widerstandsfähig wie Titanschrauben gegenüber Belastungen. Während der hydrothermischen und mechanischen Belastung, sowie der Testung der Fraktur Resistenz, konnten keinerlei Frakturgeschehen beobachtet werden. Signifikante Materialschäden wurden ebenfalls nicht festgestellt. (29)

## **5. Diskussion**

Diese Arbeit soll einen Überblick über unterschiedliche Implantat Abutmentverbindungen von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten schaffen. Eine narrative Literaturrecherche zu diesem Thema erweist sich aufgrund der geringen Langzeitdaten und wenigen verfügbaren klinischen Studien, mit unterschiedlichen Studiendesigns als schwierig. Es konnten einige verschiedene klinische Studien, sowie in vitro Arbeiten gefunden werden, welche der Analyse und Bewertung dieser Fragestellung dienen.

Neben den Überlebens- und Komplikationsraten wurden unterschiedliche Implantat Abutmentverbindungen und deren Befestigungsmethoden untersucht. Zusätzlich beschäftigten sich mehrere Studien mit unterschiedlichen Biomaterialien und Werkstoffen die sich als Abutment bzw. Abutmentschrauben eignen können und bewerteten deren in vitro Performance.

### **5.1. Zusammenfassung der Ergebnisse**

Bereits mehrere Studien haben dargelegt, dass sich der keramische Werkstoff Zirkonoxid aufgrund seiner guten biologischen und mechanischen, sowie ästhetischen Eigenschaften als vielversprechende Alternative zu Titanimplantaten etabliert hat. (3) Verschiedene klinische Studien berichten bereits, dass einteilige Zirkon Implantate eine gute Stabilität gegenüber enoralen Belastungskräften haben. (56; 66) Die mangelnde Flexibilität und eine vorgegebene Implantatachse für die anschließende prothetische Versorgung, sowie die Möglichkeit einer gedeckten Einheilung schränken die klinische Indikation für einteilige Implantate hingegen ein. Aufgrund dessen steht die Weiterentwicklung zweiteiliger Zirkonoxid Implantate im Fokus des Interesses und erlebte in den letzten Jahren einen großen Aufschwung. Zweiteilige Zirkonoxid Implantatsysteme bieten im Vergleich zu den einteiligen Implantatsystemen eine bessere prothetische Flexibilität und Reversibilität. (67)

#### **Überlebensraten**

Es zeigten sich gute Überlebensraten der zweiteiligen Zirkonoxid Implantate, die vergleichbar sind mit jenen von Titan Implantaten. In dieser Arbeit ergab sich eine

Überlebensrate von 85,7%-100% mit einem durchschnittlichen Wert von 93% über einen Beobachtungs- bzw. Kontrollzeitraum von zwei -12 Jahren. In der systematischen Review von Hashim et al (65) zeigten sich ähnliche Ergebnisse für die Überlebensraten von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten mit Werten von 92%-98,3% nach einem Jahr, 97,2% nach zwei Jahren und 95% nach 7 Jahren. (65)

### **Komplikationsraten**

Betrachtet man nun die Komplikationsraten von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten zeigten sich diese im Rahmen der klinischen Anwendung der Implantate neben einer hohen Überlebensrate als moderat. Es wurde unterschieden in biologische, technische und mechanische Komplikationen. Je nach Studie variierten die Werte hier deutlich unter anderem von der genauen Definition der einzelnen Komplikationen ausgehend. Die Häufigkeit der technischen und mechanischen Komplikationen zeigte sich mit einem durchschnittlichen Wert von 23,5% als relativ hoch. Wobei sich hier der Bereich der Implantat-Abutmentverbindung als sehr sensitiv zeigte. (38; 51) Die biologischen Komplikationen traten mit einem Mittelwert von 14% auf, wobei hier ebenfalls stark variierende Ergebnisse festgestellt werden konnten. (s. Abbildung 18) (58; 60)

### **Implantat Abutmentverbindungen**

Laut Block et al (68) sollte eine ideale Implantat-Abutmentverbindung eine hohe Fertigungstoleranz mit minimaler Spaltbildung entlang der Implantat-Abutment-Oberfläche aufweisen. Die Verbindung, sollte widerstandsfähig gegenüber Mikrobewegungen sein, sodass sich die Schraube während der Belastung nur minimal verformen kann. Idealerweise sollte der Mikropalt ca. 0,5 Mikrometer betragen, damit eine gute Implantatfunktion erhalten bleibt. (68)

Der gesamte Bereich der Implantat-Abutmentverbindung ist demnach von großer Bedeutung für den klinischen Erfolg. Da es hier gehäuft zu Komplikationen mit erhöhten Frakturgeschehen kommt, ist es von besonderem Interesse diesen Bereich weiterzuentwickeln und zu verbessern. (51; 59) Aufgrund einiger mechanischer und physikalischer Eigenschaften von Zirkonoxid, wie beispielsweise die Sprödigkeit dieses Materials, kommt es speziell in diesem Verbindungsbereich vermehrt zu Komplikationen

und Frakturgeschehen. Jüngst veröffentlichte Studien haben verschiedene zweiteilige Zirkonoxid Implantatsysteme getestet. Verklebte Systeme wiesen hier eine höhere Stabilität und Widerstandsfähigkeit gegenüber physiologischer Kaukräfte im Vergleich zu verschraubten Systemen auf. Es bestehen jedoch Bedenken gegenüber der Klebeverbindung, hinsichtlich der proinflammatorisch wirkenden Zementreste, sodass ein verschraubtes System bevorzugt wird. (4; 63) Zusätzlich ist die Verschraubung von Abutments mit dem Implantatkörper, flexibler und reversibel. Neben einem einfachen Weichgewebsmanagement und Ausformung des Durchtrittsprofils, besteht hier kein Risiko für Zementüberschüsse Die Möglichkeit einer vereinfachten Reparatur und Zugangsoption sind weitere Vorteile dieser Befestigungsmethode. (6; 69)

### **Befestigungsmethoden zementiert/verklebt versus verschraubt**

In der klinischen Anwendung werden zweiteiligen Zirkonoxid Implantate derzeit größtenteils zementiert bzw. adhäsiv verklebt und erzielen bezogen auf Überlebens- und Komplikationsraten gute Ergebnisse. (60; 59) Ebenso zeigten in einer in vitro Studie von Preis et al (63) aus 2016 die verklebten bzw. zementierten Implantat Abutmentverbindungen im Vergleich zu den verschraubten zweiteiligen Zirkonoxidimplantaten eine bessere Überlebensrate. Bei den verschraubten Implantat Abutmentverbindungen zweiteiliger Zirkonoxid Implantaten war das Frakturrisiko nach künstlicher Alterung deutlich erhöht. (63) Des Weiteren ergab eine Studie, dass eine verschraubte Verbindung zweiteiliger Zirkonoxid Implantate generell eine eher reduzierte mechanische Stabilität aufweist, unabhängig von dem Schraubenmaterial. Die Empfehlung dieser Untersuchung ergab demnach, dass eine verschraubte Implantat Abutmentverbindung bei Zirkonoxid Implantaten nur in ausgewählten Fällen erfolgen sollte. (28; 63; 70) Dennoch sollten bei der verklebten Implantat Abutmentverbindung einige entscheidende Punkte berücksichtigt werden. Durch das Verkleben wird aus dem zweiteiligen Implantat ein einteiliges. Die weitere prothetische Versorgung unterliegt demnach entsprechenden Regularien, wie beispielsweise eine subgingivale Platzierung der Implantatschulter speziell im ästhetischen sichtbaren Bereich. Folglich sind eventuell notwendig Anpassungen nur erschwert möglich. (67) Obwohl die verklebte bzw. zementierte Verankerung eine höhere Stabilität aufweist, im Vergleich zu den aktuellen verschraubten Systemen, ist dieses Konzept der Verankerung anspruchsvoll. Des Weiteren sind derzeit lediglich zwei Systeme, welche klinische Daten aufweisen können, auf dem Markt verfügbar. Die Weiterentwicklung und Optimierung von

verschraubten Systemen, für eine bessere Flexibilität und vergrößerte Auswahlmöglichkeit stehen demnach im Vordergrund. (67) Als Herausforderung für das Verschrauben von Zirkonoxid Implantat mit einem Zirkonoxid Abutments zeigt sich an dieser Stelle, dass Keramiken besser auf Druck als auf Zug belastbar sind. Das Einbringen einer Metallschraube bringt eben solche ungünstigen Zugkräfte und Spannungsspitzen für die Keramik mit sich. In weiterer Folge kann es hier zu Reibung und Fretting der Schraube mit entsprechendem Verschleiß und Abrieb kommen. (69) Die korrekte Auswahl einer geeigneten Abutmentschraube ist demnach für das Überleben des Implantates entscheidend. (29) Um potenzielle alternative Materialien zu testen sind präklinische Studien, die eine möglichst genaue Simulation der physiologischen Gegebenheiten wiedergeben sind daher vor dem klinischen Einsatz neuer zweiteiliger Zirkonoxid Implantatsysteme, notwendig. Dafür können beispielsweise hydrothermische Alterung und mechanische Belastung bzw. die Untersuchung der Frakturbelastbarkeit mit den jeweiligen resultierenden Komplikationen dienen. Ausgehend solcher Extremsituationen kann die Eignung verschiedener Materialien für zweiteilige Zirkonoxid Implantate evaluiert werden.

### **Vergleich von Abutmentschrauben und Materialalternativen**

Die derzeit am häufigsten verwendete Abutmentschraube ist eine Titanschraube. Das Finden einer geeigneten metallfreien Alternative erweist sich als schwieriger. Während das Material PEKK als Abutment vielversprechende Ergebnisse liefert, ist die Verwendung als Abutmentschraube weiterhin fraglich, da sich diese als sehr sensitiv gegenüber technischen und mechanischen Komplikationen zeigten. (28; 37) Bereits vor dem Alterungsprozess konnte bei den getesteten PEKK Abutmentschraube vermehrt Komplikationen beobachtet werden. Unter anderem frakturierte der Schraubenkopf beim Eindrehen in das Implantat, sodass die Implantat Abutmentverbindung fixiert und nicht mehr voneinander lösbar war. In den folgenden Untersuchungen zeigten sich ebenfalls mehrere Beeinträchtigungen dieses Materials als Schraube, die Optimierungen bedürfen. (28)

In einer in vitro Studie von Kohal et al (64) wurde ein weiteres potenzielles Biomaterial, welches als Schraubenmaterial angewendet werden kann, getestet. Carbon-Schrauben bestehen aus kohlenstofffaserverstärktem PEEK-Kunststoff und zeigen gute Ergebnisse in ihrer in vitro Performance und ermöglichen einen metallfreien Ansatz für PatientInnen. In dieser Studie zeigte sich, dass weder hydrothermale Alterung oder Belastung einen Einfluss

auf die Bruchfestigkeit des untersuchten Implantatsystems hatten. Darüber hinaus wurde eine sehr hohe Stabilität beobachtet, die langfristigen normalen intraoralen Okklusionskräften standhalten kann. Es konnten bei allen Proben keine sichtbaren Defekte oder Materialschäden weder an den Implantaten bzw. Abutments festgestellt werden. Ebenso wenig kam es zu Lockerungen der Implantat-Abutmentverbindungen. (64) Kohlenstofffaserverstärkte PEEK-Schrauben sind weniger anfällig für Korrosion, wodurch das Risiko von Ermüdungsbrüchen reduziert ist. Darüber hinaus besteht aufgrund der Materialeigenschaften, wie beispielsweise eine geringere Härte, ein vermindertes Risiko eines Abriebs des inneren Implantatgewindes. Daraus resultierende Komplikationen wie Lockerungen oder Frakturen der Implantat Abutmentverbindung werden entsprechend minimiert. (64) Tartsch et al (69) berichtet über ähnliche Vorzüge dieses Materials. Diese kohlefaserverstärkten PEEK-Schrauben zeigen eine hohe Zugfestigkeit, wobei die Gewindegänge weniger scharf gestaltet sind im Vergleich zu jenen der Metallschrauben. Dadurch ist eine gleichmäßigere Kraftübertragung ohne Spannungsspitzen möglich. (69) Weitere In-vivo-Untersuchungen sind erforderlich, um die klinische Leistung von Zirkonoxidimplantaten in Kombination mit den kohlenstofffaserverstärkten PEEK-Schrauben zu bewerten. (64)

Die Möglichkeit eines vollkeramischen zweiteiligen Zirkonoxid Implantatsystems ist aufgrund einer metallfreien Lösung sehr interessant. Ein solches Implantatsystem mit einer Keramikschraube ist aktuell noch nicht für die klinische Anwendung verfügbar, sodass es derzeit noch keine klinischen Daten zu Widerstands- und Belastungsfähigkeit von Vollzirkonoxid Implantatsystemen gibt. (29) Jedoch zeigte die in vitro Performance einer getesteten Zirkonoxid Schraube hier vielversprechendere Ergebnisse. Die Untersuchungen von Kohal et al (29) ergaben für ein zweiteiliges Zirkonoxid Implantatsystem vergleichbare Werte für die getestete Zirkonoxid- bzw. Titan Abutmentschraube bezogen auf die Bruchfestigkeit. Signifikante Materialschäden nach durchgeführten künstlichen Alterungsprozessen konnten ebenfalls nicht bei der Zirkonoxid- beobachtet werden. (29)

### **Vergleich verschiedener Abutmentmaterialien**

Neben der Befestigungsmethode ist die Entwicklung und Erprobung von verschiedenen Abutmentmaterialien von großer Bedeutung, um auch hier eine Lösung für eine geeignete metallfreie Alternative für zweiteiligen Zirkon Implantate zu finden.

In den klinischen Studien wurden zementierte Zirkonoxid und Glasfaser Abutments verwendet. Die zementierten Glasfaser Abutments zeigten allgemein zufriedenstellende Ergebnisse bezogen auf Überlebens- und Komplikationsrate. (58) Ein interessanter Vorteil dieser Abutments ist, dass sie nach der Befestigung im Implantatkörper, ähnlich wie ein Zahn, präpariert und auf die individuellen Gegebenheiten im Mund angepasst werden können. Diese Abutments stellen eine gute metallfreie Alternative dar, jedoch werden sie derzeit beispielsweise von der Firma Patent nur als zementierte bzw. adhäsiv verklebte Variante angeboten. (21) Eine Reparatur oder der Austausch des Abutments im Falle einer Fraktur ist demnach nur bedingt bzw. erschwert möglich. (6; 45)

Die zementierten Zirkonoxid Abutments in klinischer Anwendung zeigten gute Überlebensraten und moderate Komplikationsraten. Im Rahmen von in vitro Untersuchungen von verschraubten Zirkonoxid Abutments konnte festgestellt werden, dass die Komplikationen vermehrt das Abutment und/oder die Implantat Abutmentverbindung betrafen. In der Studie von Foong et al (71) wurde des Weiteren beobachtet, dass die untersuchten einteilige Zirkonabutments vermehrt im apikalen Bereich des Abutments frakturierten, ohne dass die Abutmentschraube oder das Implantat beschädigt bzw. deformiert wurde. Diese Art des Versagens zeigte sich vermehrt bei den einteiligen Zirkonoxid Abutments. (71) Diese Beobachtung könnte teilweise auf die Materialeigenschaften zurückgeführt werden. Um eine stabile Implantat-Abutmentverbindung zu erhalten, bedarf es einer passenden Abutmentschraube die diese Verbindung optimal unterstützt. Ausgehend verschiedener in vitro Studien bedürfen die verschraubten Zirkonoxid Abutments weiterer Forschung und Optimierungen. (61; 63; 62)

Neben Glasfaser und Zirkonoxid stellt beispielsweise der Werkstoff PEKK eine mögliche metallfreie Alternative der Implantat Versorgung dar. Cantarella et al (61) und Zhang et al (37) prüften dieses Hochleistungspolymer auf seine Eignung als Abutment. Dabei stellte sich heraus, dass dieses Material nach künstlicher Alterung und Belastung die Tendenz zur Verformung hat und an Festigkeit verliert. Diese Abnahme der Festigkeit bzw. das Erweichen des Materials führen zu einer reduzierten Belastbarkeit des Abutments. Die auf das Abutment auswirkenden Kräfte wurden weiter auf das Implantat geleitet, das wiederum ein Versagen des Implantats zur Folge hatte. Obwohl vermehrt technische bzw. mechanische Komplikationen bei diesem Material beobachtet wurden, zeigt dieses Hochleistungspolymer als Abutment ein gutes Potenzial als zukünftige Alternativoption zur prothetischen

Versorgung zweiteiliger Zirkonoxid Implantate. Es sind jedoch weitere Studien und vor allem Optimierungen dieses Werkstoffes erforderlich, um dies besser bewerten zu können. (37; 61) Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Cantarella et al (61) die in ihrer Laborstudie verschiedene Abutmentmaterialien, darunter Zirkonoxid, Titan und PEKK, miteinander verglichen. Sowohl die aus PEKK als auch die aus Zirkonoxid gefertigten Abutments wiesen alle Komplikationen im Bereich des Implantates, Abutments oder der Implantat-Abutmentverbindung auf. Lediglich 41,5% der Proben waren komplikationsfrei. Im Vergleich dazu konnten bei den Titan Abutments Komplikationen nur im Bereich der Kronenversorgung beobachtet werden. (61)

### **Aktuelle Datenlage und Empfehlungen zu zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten**

Mohseni et al (72) und Röhling und Gahlert et al (73) führte umfangreiche systematischen Reviews zu zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten durch. In ihren Literaturrecherchen wurde der Fokus auf den Langzeitergebnissen bzw. klinischen Erfolgen der zweiteilige Zirkonoxidimplantate gelegt. Des Weiteren wurden die Überlebensrate und die mechanischen bzw. biologischen Komplikationen im Vergleich zu Titan Implantaten genauer untersucht. Während Röhling und Gahlert et al (73) in ihrer Datenerhebung radiologische Beurteilungen mit einfließen ließen konzentrierte sich Mohseni et al (72) mehr auf die klinischen Ergebnisse. Zusammenfassend ergaben beide Reviews, dass zweiteilige Zirkonoxid Implantate eine valide Alternative zu Titan Implantaten darstellen. Wobei hier ebenfalls unterschieden werden sollte zwischen kommerziell hergestellten und den in den letzten Jahren stetig neu entwickelten und optimierten Zirkonoxid Implantaten. Der Fokus steht hier weiterhin auf der Entwicklung einer stabilen Implantat Abutmentverbindung.

Laut Mohseni et al (72) und Röhling und Gahlert et al (73) ist aufgrund der geringen Langzeitdaten eine klinische Empfehlung, zweiteiliger Zirkonoxid Implantate, bisher nur eingeschränkt möglich. Es bedarf weiterer umfangreicher prospektiver klinischer Studien und randomisierter klinischer Studien, um die vielversprechenden Ergebnisse zu bestätigen. Die allgemeine klinische Verwendung von zweiteiligen Zirkonoxid-Implantaten sollte immer individuell getroffen werden und nur in ausgewählten Fällen, nach eingehender PatientInnenaufklärung erfolgen. (72; 73)

Diese bisherigen Empfehlungen beruhen primär auf Daten der ersten auf dem Markt erhältlichen kommerziellen Implantatsysteme. Über die letzten Jahre wurden weitere verschiedene Systeme von unterschiedlichen Herstellern und Firmen entwickelt. Viele dieser zweiteiligen Zirkonoxidimplantate befinden sich aktuell in der Erprobung. Aktuelle Studien beschäftigen sich derzeit primär mit der Überlebens- und Komplikationsrate zweiteiliger Zirkonoxid Implantate, sodass klinische Studien und Daten zu verschiedenen alternativen Biomaterialien noch sehr rar sind. Die Erkenntnisse dazu stammen hauptsächlich aus in vitro Studien, wobei sich hier bereits vielversprechende Ergebnisse zeigen.

## **5.2. Limitationen**

Eine narrative Literaturrecherche soll einen Überblick über das aktuelle Wissen und die bisherigen Erfahrungen zu einer Thematik geben. Dadurch kann eine Grundlage für Diskussionen und neue Denkansätze entwickelt werden.

Aus der im Zuge dieser Diplomarbeit recherchierten Literatur geht hervor, dass derzeit noch zu wenig über die klinischen Langzeiterfolge von zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten bekannt ist. Ein bedeutender Einflussfaktor auf die Ergebnisse der vorliegenden Daten dieser narrativen Literaturrecherche, ist die geringe Anzahl an gefundenen, umfangreichen und repräsentativen klinischen Studien.

Insgesamt konnten nur 5 Kohortenstudien und eine randomisiert kontrollierte Studie gefunden werden. Diese geringe Anzahl empirischer Daten erschwert die Analyse und Interpretation zu dieser Thematik. Ausgehend der weiteren 8 analysierten Laborstudien zeigen sich hier ebenso Limitationen bezogen auf die Menge der untersuchten Proben. Unter diesem Aspekt sind Verzerrungen der Ergebnisse möglich und sollten mit einkalkuliert werden.

Ein weiterer limitierender Faktor für diese Arbeit stellt die Recherche der Literatur und Datenextraktion dar. Diese wurde von nur einem Reviewer vorgenommen. Daraus ergibt sich ein erhöhtes Risiko, dass relevante Publikationen bzw. Daten nicht gefunden oder fehlinterpretiert bzw. falsch ausgelesen wurden. Unter Umständen können ebenso noch nicht veröffentlichte Studienergebnisse, die dementsprechend nicht berücksichtigt wurden, die Ergebnisse und Aussagen dieser Arbeit verändern.

## 6. Konklusion

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit, zeigt sich, dass zweiteilige Zirkonoxid Implantate abhängig von ihrer Überlebensrate eine geeignete Alternative zu Titan Implantaten darstellen können. Die derzeitige Datenlage von Kurzzeitergebnissen zu den aktuell auf dem Markt erhältlichen zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten sind vielversprechend, jedoch absolut unzureichend für eine uneingeschränkte klinische Empfehlung. Ebenso ist die bisher verfügbare wissenschaftliche Datenlagen zu Langzeitergebnissen zweiteiliger Zirkonoxid Implantate sehr gering. Die Verwendung zweiteiliger Zirkonoxid Implantate sollte aufgrund ihrer derzeit begrenzten Einsatzmöglichkeiten immer in Hinblick auf die individuellen Bedürfnisse der PatientenInnen abgestimmt sein. Eine klinische Anwendung ist demnach nur bei korrekter Indikationsstellung und Behandlungsplanung, sowie ausführlicher PatientInnenaufklärung gegeben. (64; 72; 73)

Die Anzahl technischer und mechanischer Komplikationen ist bei zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten verhältnismäßig hoch. Besonders die Implantat-Abutmentverbindung stellt sich als gewisse Herausforderung dar. Es wird intensiv an den verschiedenen Befestigungsmethoden geforscht. Die Entwicklung einer geeigneten verschraubten zweiteiligen Zirkonoxid Implantatvariante steht hier im Vordergrund. Derzeit werden bereits verschiedene Abutmentschrauben und Abutments bestehend aus unterschiedlichen Werkstoffen auf ihre Eignung geprüft. Es bedarf weiterer eingehender Forschung, klinischer Untersuchungen und Datenerhebung zur Optimierung der unterschiedlichen Implantat-Abutmentverbindungen zweiteiligen Zirkonoxid Implantaten. (64; 72; 73)

Neue prothetische Lösungen wie beispielsweise PEKK-Abutments bzw. Glasfaser Abutments könnten neben Zirkonoxid Abutments eine mögliche Behandlungsoption zur Restaurierung zweiteiliger Zirkonoxid Implantate darstellen. (37) Zirkonschrauben oder Kohlenstofffaserverstärkte PEEK (Carbon) Schrauben könnten eine vielversprechende Lösung für eine metallfreie Implantat Versorgung bieten. (29; 64)

Ausgehend der geringen Stichprobe und Daten dieser Arbeit, sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten. Klinische Studien und Daten zu diesen alternativen Biomaterialien sind dringend erforderlich, um diese vielversprechenden Ergebnisse zu verifizieren.

## 7. Literaturverzeichnis

1. Schmelzeisen, R, Gutwald, R und Gellrich, N-C. *Zahnärztliche Chirurgie und Implantologie*. Köln : Deutscher Zahnärzte Verlag, 2018.
2. Mellinghoff, J. Erste klinische Ergebnisse zu dentalen Schraubenimplantaten aus Zirkonoxid. *Z Zahnärztl. Impl.* 2006, 22(4), S. 288-293.
3. Fischer, Jens, Wolfart, Stefan und Strub, Jörg Rudolf. Implantat-Werkstoffe. [Buchverf.] Matthias Kern, et al. *Curriculum Prothetik*. Berlin : Quintessenz, 2022, Bd. 3.
4. *ESCI - Die klinische Anwendung von zweiteiligen Zirkonoxid-Implantaten* . Chen, André, et al. [Hrsg.] European Society for Ceramic Implantology ESCI. Zürich : s.n., 2021.
5. Wolfart, S. *Implantatprothetik - ein patientenorientiertes Konzept*. Berlin : Quintessenz, 2014.
6. Kern, Matthias, et al., [Hrsg.]. *Einführung in die dentale Implantologie*. Berlin : Quintessence publishing, 2022. S. 955-97. Bd. III.
7. Weber, Thomas. Zahnärztliche (enossale) Implantate. *Memorix: Zahnmedizin*. s.l. : Thieme, 2016.
8. Neumeyer, Stefan, Hopmann, Sabine und Hannker, Christian. Einteilige versus zweiteilige Implantate. *Dental Magazin*. November 2013, 31 (8), S. 26-31.
9. Bollen, Curd, Hakobayan, Gagik und Jörgens, Martin. One-piece versus two-piece ceramic dental implants. *British dental Journal*. 08. March 2024, 236 (5), S. 383-387.
10. Neumeyer, Stefan, Hopmann, Sabine und Müller, Heike. Implantate: Einteilig versus zweiteilig (Teil 2). *Dental Magazin*. Februar 2014, 32 (1), S. 52-56.
11. Schweiger, Josef, et al. CAD/CAM-genertiert – Moderne Wege zum Implantat-Abutment. *ZM-Zahnärztliche Mitteilungen*. 16. Oktober 2012, 20, S. 54-63.
12. Carrillo de Albornoz, A., et al. A randomized trial on the aesthetic outcomes of implant-supported restorations with zirconia or titanium abutments. *J Clin Periodontol*. December, 2014, 41(12), S. 1161-9.
13. Kim, S., et al. Comparison of fracture resistance of pressable metal ceramic custom implant abutments with CAD/CAM commercially fabricated zirconia implant abutments. *J Prothet Dent*. April 2009, 101(4), S. 226-30.
14. Steinebrunner, L., et al. Implant-abutment interface design affects fatigue and fracture strength of implants. *Clin Oral Implants Res*. Dec 2008, 19(12), S. 1276-84.

15. Linkevicius, T und Apes, P. Influence of abutment material on stability of peri-implant tissues: a systematic review. *Int J Oral Maxillofacial Implants*. May-Jun, 2008, 23(3), S. 449-256.
16. Stimmelmayer , M., et al. Wear at the titanium-titanium and the titanium-zirconia implant-abutment interface: a comparative in vitro study. *Dent mater*. Dec 2012, 28(12), S. 1215-20.
17. Abrahamsson, I., Berglundh, T. und Lindhe, J. Soft tissue response to plaque formation at different implant systems. A comparative study in the dog. *Clin Oral Implants Res*. April 1998, 9 (2), S. 73-9.
18. Happe, A., et al. In vitro color changes of soft tissues caused by dyed fluorescent zirconia and nondyed nonfluorescent zirconia in thin mucosa. *Int J Periodontics Restorative Dent*. Jan-Feb 2013, 33(1), S. e1-8.
19. Zeramex. [Online] CeramTec Schweiz GmbH. [Zitat vom: 17. Juli 2024.] [https://www.zeramex.com/de/fachbereich/implantatsystem\\_xt.php](https://www.zeramex.com/de/fachbereich/implantatsystem_xt.php).
20. Ceralog Prothetik. [Online] Camlog, 2024. <https://www.camlog.de/de/produkte/implantatsysteme/ceralog/>.
21. Patent. [Online] [Zitat vom: 17. Juli 2024.] [https://www.mypatent.com/de/blog/patent-tm-implantatsystem-13/das-patent-tm-implantatsystem-178#blog\\_content](https://www.mypatent.com/de/blog/patent-tm-implantatsystem-13/das-patent-tm-implantatsystem-178#blog_content).
22. Rinke, Sven und Fischer, Carsten. ZWP online. [Online] 28. Februar 2011. [Zitat vom: 29. August 2024.] <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/implantologie/prothetik/vollkeramische-abutments-konfektioniert-oder-individuell>.
23. Lin, WS, et al. Use of prefabricated titanium abutments and customized anatomic lithium disilicate structures for cement-retained implant restorations in the esthetic zone. Mar 2014, 111(3), S. 181-5.
24. AlAmar, Mohammed und Alqahtani, Fawaz. Effect of different Implant-Abutment Connection Materials on the Fracture Resistance of Zirconia Abutments. *Journal of Oral Implantology*. April 2020, Bd. XLVI, 2, S. 88-92.
25. Melo de Matos, Jefferson David, et al. Hybrid abutment during prosthetic planning and oral rehabilitation. *Minerva Dental and Oral science*. Apr, 30. April 2022, 71(2), S. 24-51.
26. Ragauskaite, A., et al. The comparison of cement- and srew-retained crowns from technical and biological points of view. *Stomatologija*. 2017, 19(2), S. 44-50.
27. Hamed, M. T., et al. A Systematic Review of screw versus Cement-Retained fixed Implant Supported Reconstructions. *Clin Cosmet Investg Dent*. Jan 2020, 12, S. 9-16.

28. Stimmelmayr, Michael, et al. Mechanical stability of all-ceramic abutments retained with three different screw materials in two-piece zirconia implants - an in vitro study. *Clinical Oral Investigations*. May 2020, 24(5), S. 1801-1806.
29. Kohal, Ralf J., et al. Fracture Resistance of a Bone-Level Two-Piece Zirconia Oral Implant System - The Influence of Artificial Loading and Hydrothermal Aging. *Journal of Functional Biomaterials*. 7. May 2024, 15(5), S. 122.
30. Wettstein, Pascal. *Carbon - Etabliert in der dentalen Implantologie*. s.l. : Implantologie Journal 7&8, 2019. S. 54-56.
31. Osman, R. B. und Swain, M. V. A Critical Review of dental Implant Materials with an Emphasis on Titanium versus Zirconia. *Materials*. 5. Mar 2015, 8(3), S. 932-958.
32. Zeller, B., et al. Biofilm formation on metal alloys, zirconia and polyetherketoneketone as implant materials in vivo. Nov 2020, 31(11), S. 1078-86.
33. Schwitalla, Andreas. Mechanische Grundlagen für die Entwicklung eines metallfreien Implantatsystems auf der Basis von Polyetheretherketon (PEEK). Berlin : Charité - Universitätsmedizin Berlin, 18. Juni 2019.
34. I., Isabell. 3Dnatives - Ihr Portal für den 3D-Druck. [Online] 24. Juni 2021. <https://www.3dnatives.com/de/peek-vs-pek-3d-druck-240620211/#!>
35. Brackett, MG, et al. In vitro cytotoxic response to lithium disilicate dental ceramics. *Dent Mater*. April 2008, 24(4), S. 450-56.
36. Snétişy, D., & Kraft, M. Implantat- und Abutmentwerkstoffe. [Buchverf.] M., Ilie, N., & Lohbauer, U. (eds.) Rosentritt. *Werkstoffe in der Zahnmedizin-Moderne Materialien und Technologien*. Stuttgart : Georg Thieme Verlag KG, 2018.
37. Zhang, Fei, et al. Reliability of an injection-moulded two-piece zirconia implant with PEKK abutment after long-term thermo-mechanical loading. *J Mech Behav Biomed Mater*. October 2020, 110, S. 110.
38. Brunello, Giulia, et al. Two-piece zirconia implants in the posterior mandible and maxilla: A cohort study with a follow-up period of 9 years. *Clinical Oral Implant Research*. December 2022, 33(12), S. 1233-1244.
39. Günther, Elena, et al. Biofilme auf Implantaten und Abutments. 01. Oktober 2021, 19, S. 44-55.
40. Le Guéhenec, L, et al. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental materials*. Jul 2007, 23(7), S. 844-54.
41. Özkurt, Zeynep und Kazazoglu, Ender. Zirconia Dental Implants: A Literature Review. *Journal of Oral Implantology*. June 2011, 37(3), S. 367-76.

42. Hanawa, Takao. Zirconia versus titanium in dentistry: A review. *Dental Materials Journal*. Jan 2020, 39(1), S. 24-36.
43. Stawarczyk, Bogna und Fischer, Jens. Keramische Werkstoffe. [Buchverf.] Matthias Kern, et al. *Curriculum - Prothetik Band II*. Berlin : Quintessence Publishing, 2022, Bd. II.
44. Chevalier, Jérôme, et al. Low-temperature degradation in zirconia with a porous surface. *Acta Biomaterialia*. July 2011, 7(7), S. 2986-93.
45. Chemie.de. [Online] [Zitat vom: 18. Juli 2024.] [https://www.chemie.de/lexikon/Glasfaser.html#Nutzung\\_der\\_mechanischen\\_Eigenschaften](https://www.chemie.de/lexikon/Glasfaser.html#Nutzung_der_mechanischen_Eigenschaften).
46. Oßwald-Dame, Ulrike. ZWP Online. [Online] 18. August 2014. [Zitat vom: 15. Juli 2024.] <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/endodontologie/fuellungstherapie/vorteile-von-glasfasern-zum-schliessen-grosser-kavitaeten>.
47. Silla, Marek, Eichberger, Marlis und Stawarczyk, Bogna. Polyetherketonketon (PEKK) als Restaurationswerkstoff in der modereren Zahnmedizin: eine Literaturübersicht. *Die Quintessenz der Zahntechnik*. Februar 2016, 42(2), S. 176-190.
48. Stawarczyk, Bogna. *Hochleistungskunststoffe/Thermoplaste*. [Hrsg.] M Kern, et al. Berlin : Quintessence Publishing, 2022. S. 537-549. Bd. II.
49. Lioubavina-Hack, N, Lang, N P und Karring, T. Significance of primary stability for osseointegration of dental implants. 17. June 2006, 17(3), S. 244-50.
50. Bruggenkate, Christian, et al. *ITI - Das Dental Implantat System*. [Hrsg.] Christian Foitzik. Hannover : Straumann Publishing, 1994.
51. Zhang, Fei, et al. Fracture analysis of one/two-piece clinically failed dental implants. *Dental Materials*. Oct 2022, 38(10), S. 1633-47.
52. Striezel, F. P., et al. *Implantologie*. [Hrsg.] P.A., Hausamen, J.-E., Becker, J., Neukam, F.W., Schliephake, H., Schmelzeisen, R. Reichart. Berlin : Quintessenz, 2002. S. 398-478. Bd. 1.
53. O'Mahony, A, MacNeill, SR und Cobb, CM. Design features that may influence bacterial plaque retention: a retrospective analysis of failed implants. Apr 2000, 31(4), S. 249-56.
54. Zachariat, Christine. Verschrauben oder Zementieren - Das ist hier die Frage! *Zahn Prax*. 10. Mai 2013, Bd. 16, 1, S. 16-20.
55. Andreietelli, M und Kohal, R-J. Fracture Strength of Zirconia Implants after Artificial Aging. *Clinical implant dentistry and related research*. June 2009, 11 (2), S. 158-166.

56. Payer, Michael, et al. All-ceramic restoration of zirconia two-piece implants - a randomized controlled clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*. Apr 2015, 26(4), S. 371-376.
57. Cionca, Norbert, Hashim, Dena und Mombelli, Andrea. Two-piece zirconia implants supporting all-ceramic crowns: Six-yeer results of a prospective cohort study. *Clin Oral Implants Res*. 695-701, June 2021, 32(6), S. 695-701.
58. Karapataki, Sofia, et al. Clinical Performance of Two-Piece Zirconia Dental Implants After 5 and Upt to 12 Years. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. 12. Dec 2023, 38(6), S. 1105-1114.
59. Koller, Martin, et al. Two-piece zirconia versus titanium implants after 80 months: Clinical outcomes from a prospective randomiyed pilot trial. *Clinical Oral Implant Reasearch*. April 2020, 31(4), S. 388-396.
60. Becker, J, et al. Clinical performance of two-piece zirconia implants in the posterior mandible and maxilla: A prospective cohort study over 2 years. *Clinical Oral Implants Research*. January 2017, 28 (1), S. 29-35.
61. Cantarella, Josef, et al. Mechanical Stability of Restorations Supported by Titanium Base, Zirconia, and Polyetherketoneketone Abutments on One- and Two-Piece Zirconia Implants. *Int J Oral Maxillofac Implants*. März-April 2021, 36(2), S. 313-321.
62. Burkhardt, Felix, et al. Fracture resistance and crystal phase transformation of a one- and two-piece zirconia implant with and without simulataneous loading and aging - An in vitro study. *Clinical Oral Implant Research*. November 2021, 32(11), S. 1288-1298.
63. Preis, Verena, et al. In vitro performance of two-piece zirconia implant systems for anterior application. *Dental Materials*. June 2016, 32(6), S. 765-74.
64. Kohal, Ralf J, et al. Fracture Resistance of a Two-Piece Zirconia Implant System After Artificial Loading and/or Hydrothermal Aging - An In Vitro Investigation. *Journal of Functional Biomaterials*. 15. Dec 2023, 14(12), S. 567.
65. Hashim, D, et al. A systematic review of the clinical survival of zirconia implants. *Clin Oral Investig*. Sep 2016, 20(7), S. 1403-1417.
66. Kohal, RJ, et al. One-piece Zirconia oral implants: One-year results from a prospective cohort study. 1.Single tooth replacement. *J Clin Periodontol*. 590-7, June 2012, 39(6).
67. Tartsch, Jens. Die restaurative Versorgung mit Keramikimplantaten. *Implantologie*. 2023, 31(3), S. 269-288.

68. *Evidence-based Criteria for an Ideal Abutment implant Connection - A Narrative Review*. Block, Michael S. 80 (10), s.l. : Oktober, July 2022, J Oral Maxillofac Surg, S. 1670-1675.
69. Tartsch, Jens. ZWP online. [Online] 15. August 2016. <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/implantologie/keramikimplantate/reversibel-verschraubtes-keramikimplantat-im-frontzahnbereich>.
70. Gahlert, M, et al. Failure analysis of fractured dental zirconia implants. *Clinical oral implant research*. March 2012, 23(3), S. 287-293.
71. Foong, Jamie, et al. Fracture Resistance of Titanium and Zirconia Abutments: an in vitro Study. *The Journal of prothetic Dentistry*. Mai 2013, 109, S. 304-312.
72. Mohseni, Parvin, Soufi, Ahmad und Chrcanovic, Bruno Ramos. Clinical outcomes of zirconia implants: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*. 23. Dec 2024, 28(1), S. 15.
73. Röhling, S, et al. Clinical and radiographic outcomes of zirconia dental implants - a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants research*. September 2023, 34, S. 112-124.