

# Schlussbericht

Verbundvorhaben HYTIMOX

„Verbund von Oxidkeramiken mit neuartigen Titanlegierungen mittels Glaslottechnologie zur Generierung hybrider Implantate“

Teilvorhaben HYTIMOX\_FERT

**Implementierung des Fügeprozesses im Bereich der Herstellung von Hybridimplantaten sowie die mechanische Bearbeitung von metallischen und keramischen Halbzeugen und Zubehörteilen**

vorgelegt von

FMZ GmbH  
Dirk Pfützner  
Charles-Darwin-Ring 3a  
18059 Rostock

Förderkennzeichen

03XP0279F

Laufzeit des Vorhabens

01.07.2020 – 30.06.2023

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# I. Kurzbericht

## 1. Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technische Ausgangspunkte

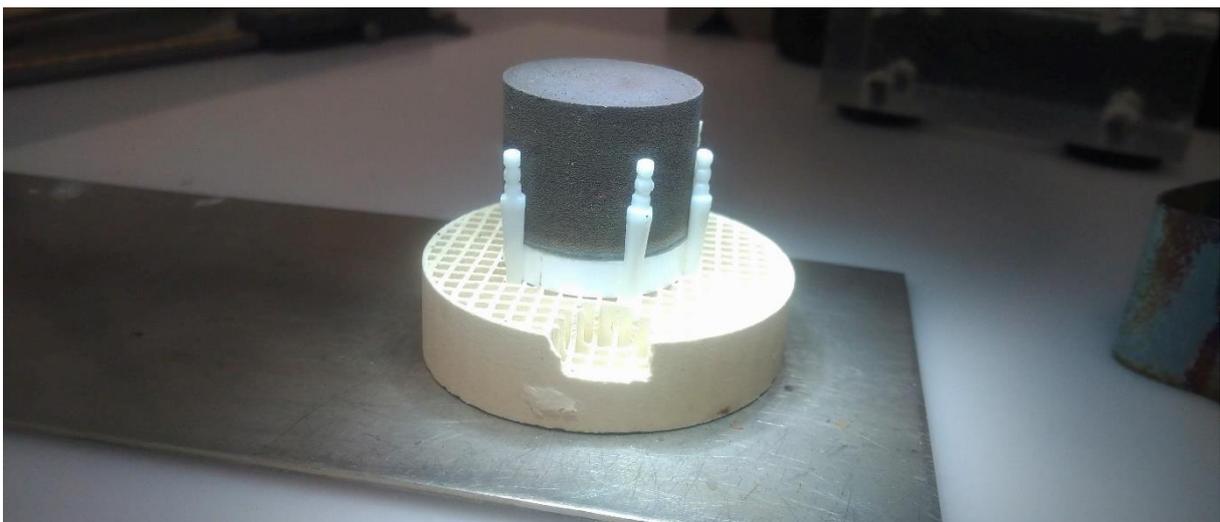
Die Aufgabenstellung für das vorliegende Teilvorhaben bestand einerseits in der Entwicklung geeigneter Arbeitsschritte für die Bearbeitung von keramischen und metallischen Bauteilen sowie einen Herstellungsprozess für das Fügen der verschiedenen metallischen/keramischen Werkstoffkombinationen mit Hilfe von Glasloten zu erarbeiten. Diese Teilaufgabe sollte in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern DOT und ZM gelöst werden.

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens erwies sich das Know How der FMZ GmbH im Bereich der Medizinproduktefertigung für kleine nichtmetallische und Titan Bauteile als äußerst hilfreich.

Beim Fügeprozess konnte auf Erfahrungen zum Einsatz von Glasloten bei der Verbindung von Nichteisenmetallen mit Dentalkeramiken zurückgegriffen werden, die insbesondere beim Projektpartner ZM entwickelt worden waren. Im vorliegenden Teilprojekt ging es darum, diese Vorkenntnisse zu nutzen, um eine volumenfüllende und kraftschlüssige Lötverbindung zwischen einer Kondyle aus ATZ-Keramik und einer additiv durch Laser Beam Melting (LBM) gefertigten Stützstruktur aus Titan-Niob-Tantal herzustellen, die vereint eine hybride Knie-Endoprothese darstellen. Die statisch/dynamischen mechanischen Eigenschaften eines derartigen Hybrid-Knies sollten am Modell eines Funktionsdemonstrators getestet werden, um nachzuweisen, dass sie den normativen Anforderungen an chirurgische Implantate entsprechen.

## 2. Ablauf des Vorhabens

Anfangs erfolgte die Fertigung von Testkörpern aus medizinisch zugelassenen Grundmaterialien Rein-Titan Grade 4 sowie Titanlegierung Ti6Al4V – Titan Grade 5 sowie die Beschaffung der Probekörper aus Keramik. Dazu wurden geeignete Vorrichtungen und Hilfsmaterialien für den Fügeprozess entwickelt, hergestellt oder beschafft.



Für das Fügen der Titan- und ATZ-Komponenten wurden geeignete Glaslote ausgewählt, deren Wärmeausdehnungskoeffizienten, nahe denen der zu verbindenden Materialien lagen. Als Auftragstechnik für das Glaslot wurden eine Kombination aus Sprayverfahren und Pasten Auftrag entwickelt, die um eine spezielle Strukturierung der Metalloberfläche ergänzt wurde.

Im Ergebnis dessen gelang es, statische Haft- und Scherfestigkeiten des Lötverbunds zu erreichen, welche die laut einschlägigen Standards für metallische thermische Sprayschichten auf metallischen Implantaten geforderten Werte deutlich übersteigen. Die Löttechnologie wurde erfolgreich auf stark vereinfachte Funktionsdemonstratoren des Hybrid-Knies übertragen, die im dynamischen Flexions-Reibversuch gegen Ultrahochmolekulargewichtiges Polyethylen (UHMWPE) ihre Einsatzfähigkeit nachweisen konnten.



Zum Erreichen der Projektziele wurde eine intensive Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern organisiert und gepflegt, um während des gesamten Projektzeitraums die von den Partnern bereitgestellten Kompetenzen einfließen zu lassen und entsprechende begleitende Untersuchungen abzusichern (materialtechnisch Tests, zellbiologische und mikrobiologische Untersuchungen). Eigene Arbeiten umfassten die detaillierte Charakterisierung der Schichtstruktur und ihrer mechanischen Eigenschaften. Dadurch sollten für die zu entwickelnden Schichtsysteme eine sehr gute Haftung auf typischen Implantat Werkstoffen und Oberflächentexturen, eine gute Verschleißbeständigkeit sowie biokompatible und zellwachstums-fördernde Eigenschaften gewährleistet werden. Während der Entwicklung des Lötverfahrens bestand eine besonders enge Wechselwirkung zwischen den Partnern DOT, ZM und FMZ, um die Herausforderung einer komplett volumenfüllenden und kraftschlüssigen Verbindung zwischen der Keramik und verschiedenen Titanwerkstoffen zu meistern. Dies gelang sowohl für das additiv mittels LBM gefertigte Ti-35Nb-6Ta als auch für das konventionell gefertigte Ti Grade 4, jeweils verlötet mit ATZ-Keramik.

### 3. Wesentliche Ergebnisse

Da die Ergebnisse des vorliegenden Teilvorhabens in Kapitel II noch ausführlich dargelegt werden, sind die wesentlichen Resultate stichpunktartig zusammengestellt:

- Sehr gute statische Haftzug- und Scherfestigkeit der Lötverbindung zwischen Reintitan (konventionell gefertigt) und ATZ-Keramik sowie zwischen Ti-35Nb-6Ta (additiv gefertigt, LBM) und ATZ (oberhalb der normativen Grenzwerte in Anlehnung an ISO 13179-1: HZF  $\geq$  22 MPa, SZF  $\geq$  20 MPa).
- Notwendig für additiv gefertigte Werkstücke aus TiNbTa-Legierungen ist eine Wärmevorbehandlung unter Vakuum bei 1200 °C/4 h zur Homogenisierung der Struktur und zum Ausheilen innerer Spannungen infolge des Herstellungsprozesses (LBM)

- Vergleichende Festigkeitsuntersuchungen der Lötverbindung von Reintitan und Ti-35Nb-6T mit den ATZ-Keramiken von Metoxit und Decema ergaben, dass beiden Keramiken gegenseitig ersetzbar sind.
- Das anhand zylindrischer Probekörper entwickelte Verfahren für eine volumenfüllende und kraftschlüssige Lötverbindung zwischen Titanlegierung und ATZ-Keramik wurde erfolgreich auf den Funktionsdemonstrator übertragen.
- Erfolgreiche dynamische Testung der Lötung von Funktionsdemonstratoren aus Reintitan/Ti-35Nb-6Ta versus ATZ im Reibtest gegen UHMWPE über 10 Mio. Zyklen bei simulierten physiologischen Bedingungen.

#### **4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Zur zellbiologischen und mikrobiologischen Charakterisierung der entwickelten osseointegrativ wirkenden Schichtsysteme in ihrer Anwendung auf die verschiedenen Titanlegierungen unterschiedlicher Herstellung wurden die experimentellen Möglichkeiten des Projektpartners OUK der Universität Rostock genutzt. Die sehr breit angelegten Versuche zur Erarbeitung einer zweckmäßigen Lötstrategie erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern DOT und ZM. Unabdingbar war dabei nach jedem Versuchsabschnitt auch die Rückkopplung zur Taniobis GmbH, dem Hersteller der Titanlegierungspulver, und zum IAPT, wo die additive Fertigung der Proben bzw. der Metallkomponenten des Funktionsdemonstrators mittels LBM durchgeführt wurde. Insbesondere durch die materialtechnische Expertise von Taniobis ist es gelungen, die Ursachen für eine mangelnde Löthaftung des ATZ auf bestimmten additiv gefertigten TiNbTa-Legierungen aufzuklären. Die Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften der Lötverbindungen (Haft-/Scherzugfestigkeit statisch und dynamisch) erfolgten beim Projektpartner Innoproof. Die Zusammenarbeit mit allen Partnern war äußerst intensiv und durch eine sehr zeitnahe Rückkopplung geprägt, wodurch eine zügige Bewertung der Zwischenergebnisse und Festlegung entsprechender Maßnahmen möglich wurde.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

#### AP3 Grundlagen zur Lötung von Keramik und Titankomponenten

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern DOT und ZM wurde in aufwändigen Testreihen herausgearbeitet, dass Oxidschichten auf der Oberfläche der Titankomponenten, die sich während der Lötung bei 820 °C ausbilden, die wesentliche Ursache für eine mangelnde Haftfestigkeit des Lötverbunds mit der ATZ-Keramik darstellen. Gemeinsam gelang es, eine Konditionierungsmethode zu entwickeln, mit der die Oxidation der Titanoberfläche weitgehend unterbunden werden kann. Dieses Verfahren basiert auf der Vorbeschichtung der Titanlegierung mit einer sehr dünnen Glaslotschicht (fusio12) unter Vakuumabschluss, wodurch die Titanoberfläche gleichsam passiviert wird. Auch die Keramikkomponente wird dünn mit fusio12 vorbeschichtet, wobei der Glaslotauftrag jeweils mittels Spraytechnik erfolgt. Abschließend werden beide Materialien gefügt, indem eine Glaslotpaste homogen aufgebracht wird und beide Teile unter einer Last von 2,5 N im Vakuum zusammengelötet werden. Die Geometrien der verwendeten Testproben entsprachen den Anforderungen, die in den einschlägigen internationalen Normen (ASTM F 1044 und ASTM F 147) festgelegt sind, um daran die statische Haftzugfestigkeit (HZF) bzw. die statische Scherzugfestigkeit (SZF) zu prüfen. Als Bewertungsmaßstab wurden die Grenzwerte herangezogen, die laut ISO 13179-1 für thermisch gespritzte Metallschichten auf metallischen chirurgischen Implantaten definiert sind: HZF  $\geq$  22 MPa, SZF  $\geq$  20 MPa.

Es wurden beim Projektpartner IAPT mittels Laser Beam Melting (LBM) additiv gefertigte Testkörper aus verschiedenen Titan-Niob-Tantal-Legierungen eingesetzt. Als Vergleichsmaterial dienten metallische Testkörper aus Reintitan (grade 4) bzw. TiAl6V4, die bei FMZ aus Bulkmaterial mittels konventioneller spanabhebender Verfahren hergestellt worden waren. Die metallischen Testkörper wurden jeweils mit Gegenkörpern aus ATZ-Keramik (Hersteller: Metoxit AG, Schweiz) verlötet. Als Glaslot wurde dabei das ZM-Produkt fusio12 verwendet.

Beim Lötverbund von konventionell gefertigtem Titan grade 4 bzw. TiAl6V4 mit ATZ wurden gute Verbundfestigkeiten oberhalb der o.g. Grenzwerte erzielt. Hingegen waren bei den mittels LBM aus Metallpulver additiv gefertigten Titanlegierungen Ti-20Nb-6Ta, Ti-27Nb-6Ta, Ti-35Nb-6Ta und Ti-6Al-4V zunächst unzureichende Festigkeiten des Verbunds mit ATZ zu verzeichnen. Gemeinsam mit dem Verbundpartner Taniobis konnten als Ursache dafür die Temperaturverläufe des Wärmeausdehnungskoeffizienten  $WAK = f(T)$  der additiv gefertigten Titanlegierungen verantwortlich gemacht werden, die bei  $T < 500$  °C starke Abweichungen vom WAK des Glaslots und vom WAK der ATZ-Keramik aufwiesen. Diese Abweichungen betragen zwischen 25 % und 70 %. Tolerierbar für eine sichere Glaslot-Verbindung sind erfahrungsgemäß WAK-Differenzen von maximal 10 %.

Als Ursachen für das Versagen des Lötverbunds wurden Phasenumwandlungen und innere Spannungen in den additiv gefertigten Legierungsproben ausgemacht, die sich während des Herstellungsprozesses ergaben. Diese Ursachen sollten durch eine Wärmevorbehandlung unter Vakuum bei 1200 °C/4 h beseitigt werden, indem dadurch die Struktur homogenisiert und die Spannungen ausgeheilt werden. Bei der Wiederholung der umfangreichen Testreihen mit derart getemperten Proben zeigte sich, dass die Wärmebehandlung, für die mit LBM additiv gefertigten Ti-6Al-4V-Proben und Ti-35Nb-6Ta-Proben erfolgreich war. Für diese Materialien wurden Mittelwerte der Festigkeiten im Lötverbund mit ATZ (Metoxit) deutlich oberhalb der geforderten Grenzwerte erreicht. Für die LBM-gefertigte Legierungen Ti-20Nb-6Ta und Ti-

27Nb-6Ta stellte sich hingegen heraus, dass sie auch nach der Wärmebehandlung für die Verlotung mit ATZ nicht geeignet waren. Diese beiden Legierungen wurden daher im weiteren Projektverlauf verworfen.

Als Konsequenz aus diesen Untersuchungsergebnissen wurde die Legierung Ti-35Nb-6Ta (LBM, additiv gefertigt) für die dynamischen Scherzugversuche (10 Hz, 10 Mio. Zyklen) ausgewählt. Als Referenzmaterial für die dynamische Scherprüfung wurde konventionell gefertigtes Titan grade 4 festgelegt. Die dynamischen Scherversuche wurden beim Projektpartner Innovent durchgeführt. Diese Prüfungen wiesen nach, dass der Lötverbund zwischen Ti-35Nb-6Ta (LBM, additiv gefertigt) bzw. Titan grade 4 und ATZ auch nach 10 Millionen Wiederholungen einem zyklischen Lastwechsel mit einer Maximallast von 10 MPa widersteht. Damit sind die Anforderungen, die aus mechanischer Sicht an die Verbundfestigkeit eines Hybrid-Knies gestellt werden müssen, erfüllt.

Aufgrund von Lieferproblemen bei Metoxit wurde im Herbst 2022 die ATZ-Keramik von der Decema GmbH, Koblenz, als Alternativmaterial neu in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Alle Testreihen zur Festigkeit des Lötverbunds von Titanlegierung und Keramik wurden daher mit der ATZ-Keramik von Decema komplett wiederholt. Dabei haben wiederum die Projektpartner DOT, FMZ und ZM eng kooperiert, während Taniobis und IAPT für die Herstellung der LBM-Probekörper zuständig waren. Im Ergebnis dieser umfangreichen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die ATZ-Keramiken der Metoxit AG und der Decema GmbH ohne Einschränkung gegenseitig austauschbar sind und somit beide für die Fertigung der Funktionsdemonstratoren verwendet werden können.

#### **AP5.1. Umsetzung des Glaslot-Fügens von Titan und Keramik in Form einer Prozesskette**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden gemeinsam mit DOT technische Lösungen für die folgenden Problemstellungen erarbeitet: Essenziell für einen kraftschlüssigen Glaslotverbund zwischen Titan und Keramik ist die komplette Volumenausfüllung der Lötstelle durch das Glaslot. Diese Forderung ist nicht trivial, weil beim Auftrag des Glaslots mittels Spraytechnik oder mittels Paste nach dem Brand neben Lufteinschlüssen auch ein beachtlicher Volumenschwund zu verzeichnen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Feststoffanteil der aufgetragenen Suspension nur bei ca. 50 Volumenprozent liegt, wodurch die Glaslotschicht nach dem Brand nur etwa die Hälfte des Lotspaltes einnimmt. Das ließe sich selbst dann nicht verhindern, wenn große Fügekräfte von bis zu 100 N aufgebracht würden. In den vorhandenen Brennöfen lassen sich diese Kräfte nicht annähernd erzeugen, so dass im Projekt ein anderer Lösungsweg verfolgt wurde.

Zur Verwirklichung eines volumenfüllenden und kraftschlüssigen Glaslotverbundes zwischen Titan und Keramik wurde die Oberfläche der Titankomponente derart bearbeitet, dass systematisch 0,1 mm tiefe Lötmulden eingearbeitet wurden. Nur am Rand und an einzelnen inselartigen Stützstellen wurde das Material stehengelassen, wodurch die Löt-Ebene zum Keramikteil definiert wird (siehe Abb. 5, links, am Beispiel einer Haftzugprobe).



Abb. 5: Löt-Spalt durch Einstich (links) und mit Glaslot gefüllter Spalt (geschliffen, rechts)

Der Löt-Spalt wurde durch 3maliges Auffüllen und Brennen mit Glaslot gefüllt und anschließend auf die Ebene des Randes heruntergeschliffen. Anschließend wurden der kongruente Gegenkörper aus ATZ-Keramik mit Glaslot vorbeschichtet, beide Teile formschlüssig aufeinandergesetzt und abschließend gebrannt (siehe Abb. 6).



Abb. 6: Volumenfüllend und kraftschlüssig verlötete Haftzugprobe ATZ-Keramik/Reintitan

Mit diesem Löt-Verfahren wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Nachweis einer komplett volumenfüllenden Verlötung
- mittlere Haftzugfestigkeit (N = 4): 24,9 MPa (Minimum 20,7 MPa)
- mittlere statische Scherfestigkeit (N = 4): 51,9 MPa (Minimum 38,0 MPa).

Diese Resultate liegen deutlich über den normativ geforderten Werten für thermisch gespritzte metallische Schichten auf metallischen chirurgischen Implantaten (ISO 13179-1) von  $\geq 22$  MPa für die statische Haftzugfestigkeit und von  $\geq 20$  MPa für die statische Scherfestigkeit. Damit wurde nachgewiesen, dass die verfahrenstechnischen Voraussetzungen für einen kraftschlüssigen Verbund von Titan- und Keramik-Komponente des Funktionsdemonstrators erfüllt sind.

Vor der Übertragung der entwickelten Oberflächenstrukturen und Brennparameter auf die Titan/TiNbTa-Komponenten des Funktionsdemonstrators wurde gemeinsam mit den Projektpartnern entschieden, für den Funktionsdemonstrator ein stark vereinfachtes Modell des Hybrid-Knies zu wählen. Demzufolge wurde der Funktionsdemonstrator als hybride ATZ-Titan-Halbkondyle mit nur einem einzigen Krümmungsradius konzipiert. Diese Geometrie erlaubt zum einen die einfache Übertragung des Löt-konzepts auf den Funktionsdemonstrator und zum anderen ist damit eine Untersuchung der dynamischen mechanischen Eigenschaften unter definierten Versuchsbedingungen beim Projektpartner Innoproof gewährleistet.



Abb. 7: Metallische Komponente des Funktionsdemonstrators mit Strukturierung für definierten Löt-Spalt, gefertigt mittels LBM aus Ti-35Nb-6Ta beim Projektpartner IAPT (links), aufgefüllt mit Glaslot, geglättet und vorbereitet zur Verlotung mit der Keramikkalotte (rechts)

Für die Metallkomponente des Funktionsdemonstrators (siehe Abb. 7) wurden gemäß den in AP3.1 dargelegten Ergebnissen additiv gefertigtes (LBM) Ti-35Nb-6Ta ausgewählt. Als Referenz wurden konventionell aus Titan grade 4 gefertigte Proben derselben Geometrie wie in Abb. 3 hergestellt. Die Oberflächenstrukturierung und das Auffüllen des Lötspalts mit Glaslot erfolgten nach dem Verfahren, wie es oben für die Haftzugproben beschrieben wurde. Vor dem abschließenden Fügebrand wurden beide Komponenten des Demonstrators nochmals spraybeschichtet, siehe Abb. 8 (links). Die Abb. 8 (rechts) zeigt den Endzustand des Funktionsdemonstrators nach dem Fügebrand.

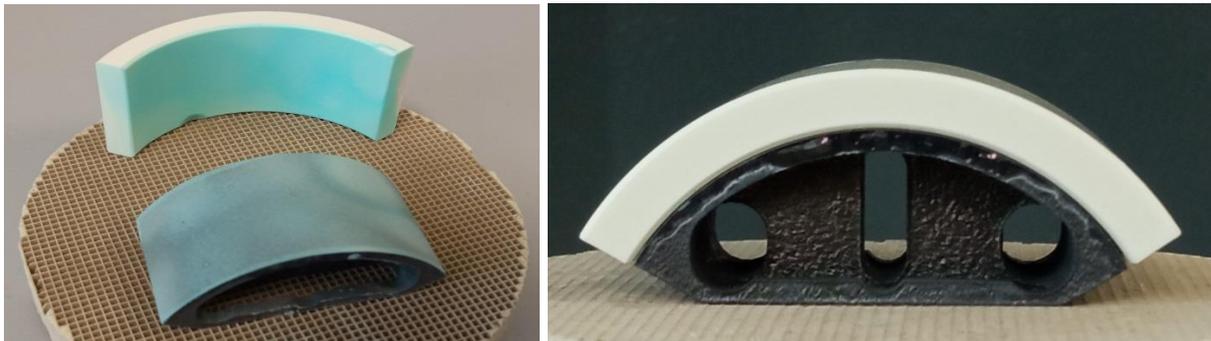


Abb. 8: Spraybeschichtung der Innenseite der ATZ-Keramikkalotte (Decema GmbH) und der Außenseite der Titankomponente (links) sowie fertig verlötete Hybrid-Halbkondyle des Funktionsdemonstrators (rechts)

Die biomechanische Prüfung der auf diese Weise hergestellten Funktionsdemonstratoren erfolgte beim Projektpartner Innoproof. Dabei wurden die gefertigten Funktionsdemonstratoren über 10 Millionen Zyklen einer Flexionsbewegung unterworfen, wobei gemäß ASTM F1160 eine zyklische Maximallast von 10 MPa aufgebracht wurde. Der Demonstrator rotierte dabei hin- und her um  $\pm 30^\circ$  gegen einen kongruent geformten Gegenkörper aus UHMPE. Der Test fand bei  $37^\circ\text{C}$  in simulierter Synovialflüssigkeit statt, um die physiologischen Bedingungen im realen Knie weitgehend nachzubilden. Die biomechanische Prüfung wurde mit jeweils 3 Funktionsdemonstratoren aus Ti-35Nb-6Ta (LBM) / ATZ-Keramik bzw. Titan grade4 (konventionell gefertigt) / ATZ-Keramik erfolgreich bestanden.

Die bei der Projektplanung formulierten Meilensteine wurden demzufolge in vollem Umfang erfüllt:

- Volumenfüllende und kraftschlüssige Verbindung zwischen ATZ-Kalotte und Metallkomponente aus Titanlegierung (konventionell gefertigt aus Reintitan bzw. additiv gefertigt aus Ti-35Nb-6Ta) mittels Glaslottechnik
- Statische Haftzugfestigkeit der Glaslotverbindung  $\geq 22$  MPa
- Statische Scherfestigkeit der Glaslotverbindung  $\geq 20$  MPa
- Dynamische Scherfestigkeit der Glaslotverbindung des Funktionsdemonstrators über 10 Millionen Zyklen beim Flexions-Reibkontakt mit UHMPE unter simulierten physiologischen Bedingungen (Maximallast von 10 MPa)

### **AP5.2 Automatisierungskonzept für das Glaslotfügen mit Prozessüberwachung**

Das in 5.1 erläuterte Verfahren zur Verbindung von Titanlegierungen und ATZ-Keramiken mittels Glaslotfügen ist aktuell nur im Manufakturmaßstab durchführbar. Teilschritte davon ließen sich prinzipiell automatisieren, die in einigen entscheidenden Phasen aber essenzielle Handarbeit bildet jedoch ein Nadelöhr im Prozessablauf. Aus diesem Grund und auch wegen der gegen Projektende fehlenden Zeit musste auf die Verwirklichung des Automatisierungskonzeptes verzichtet werden.

## **2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Siehe Verwendungsnachweis.

## **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Der geplante und durchgeführte Umfang der Arbeiten war notwendig und angemessen, insbesondere da es einer engen und partnerschaftlichen interdisziplinären Zusammenarbeit aller Verbundpartner bedurfte, um die Projektziele zu erreichen. Die Projektmittel wurden sparsam verwendet und nur in dem zur Erfüllung der Forschungsaufgaben erforderlichen Rahmen eingesetzt.

## **4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Der Nutzen der erarbeiteten Projektergebnisse wird sich nach der klinischen Testung und erfolgreichen Zulassung vor allem für den Patientenkreis sehr vorteilhaft erweisen, bei dem Sensibilisierungen/Allergien gegenüber den typischerweise eingesetzten Materialien für Knie-Endo-Prothesen (CoCrMo-Legierungen) vorliegen. Hinzu kommen Vorteile für Patienten mit einem geschwächten Immunsystem, z. B. Tumorpatienten nach Chemotherapie, Patienten mit bakteriellen Infektionen an Implantaten, ältere und allgemein geschwächte Patienten. Dieses vielversprechende Projekt lässt erwarten, dass hybride Werkstoffe ein hohes Potenzial haben, die klassischen in Implantaten eingesetzten Materialien abzulösen.

## **5. Fortschritte bei anderen Stellen**

Während der Bearbeitung des Projektes sind dem Projektteam keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

## **6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Hinsichtlich der erfolgten Veröffentlichungen wird auf die Berichte zu den Teilvorhaben der OUK Rostock und der Taniobis GmbH verwiesen, da die Haupt-Autorenschaft bei diesen Projektpartnern liegt.

Rostock, den 10.01.2024

Dirk Pfützner