Schlussbericht

(wird auf Anfrage Dritten zur Verfügung gestellt, s. BMBF Richtlinien: NKBF 98 und ANBest-P)

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
DECKEL MAHO Seebach GmbH	02P18C035

Förderprogramm:

Im Rahmen des BMBF-Forschungsprogramms „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“

Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur

„Produktion für Medizintechnik – wirtschaftlich und in höchster Qualität (ProMed)“.

Titel des Vorhabens:

Erforschung von Methoden zur teilautonomen Produktion orthopädischer Implantate

Projektleiter:	Tel.:
	E- Mail:

Laufzeit des Vorhabens von: 01.05.2019	bis: 31.12.2022

Verfassen Sie bitte einen kurzen **Schlussbericht** zu Ihrem Vorhaben unter Verwendung nachfolgender Gliederung und fügen diesen als **Anlage** bei:

1. Aufgabenstellung
2. Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde (z.B. Ressourcen, Einbindung in die Unternehmensstrategie, Vorarbeiten und Vorkenntnisse, etc.)
3. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn und Ende des Vorhabens
4. Planung und Ablauf des Vorhabens (z.B. Planabweichung, Probleme bei der Durchführung, etc.)
5. Erzieltes Ergebnis (ggf. durch Bilder, Diagramme oder Grafiken ergänzen)
6. Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses
7. Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes (Schulung, Beratung, Erfahrungsaustausch u. a.)
8. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen
9. Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

Ort und Datum	Stempel, rechtsverbindliche Unterschrift

1 Aufgabenstellung

Bedingt durch eine wachsende Weltbevölkerung und den demografischen Wandel steigt der Bedarf an **orthopädischen Implantaten**. Mit der Weiterentwicklung von Implantaten und Operationsmethoden steigen auch die **Anforderungen hinsichtlich Individualisierung und Lieferzeiten**. Diesen Herausforderungen können medizintechnische Unternehmen durch innovative Produktionssysteme und den stärkeren Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien begegnen.

Hauptziel des Vorhabens ist die **Entwicklung einer teilautonomen Fertigungszelle für die produktive Herstellung von orthopädischen Implantaten**. Durch die intelligente Vernetzung der Teilsysteme wird eine drastische Reduzierung der sich wiederholenden manuellen Arbeits- und Dokumentationsschritte erreicht. Grundlage dafür bildet die Komplettbearbeitung orthopädischer Implantate auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum. Alle Handlingsaufgaben zwischen den Prozessschritten werden durch einen Roboter in einer offenen Zelle vollzogen. Die Prozesssicherheit der autonomen Fertigung wird durch eine Prozessüberwachung auf Basis einer prozessparallelen Simulation sichergestellt, wobei die Prozesskraft mit einem sensorischen Spannsystem gemessen wird. Kraft-, Maschinen- und Simulationsdaten werden bidirektional ausgetauscht, sodass ein vollständiges digitales Prozessabbild entsteht und angepasste Prozessparameter in den Prozess zurückgegeben werden können. Die Qualitätskontrolle wird des Weiteren automatisiert mit Hilfe eines optischen Messsystems durchgeführt. Alle generierten Daten werden fälschungssicher und nachweisbar mit Hilfe der Blockchain-Technologie gespeichert. Mit diesen Informationen wird eine automatisierte Dokumentation nach Richtlinien der Medizintechnik möglich, was den manuellen Dokumentationsaufwand reduziert. Die entwickelten Teilsysteme der teilautonomen Fertigungszelle werden am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen in einen Demonstrator zusammengeführt. Gleichzeitig werden die notwendigen medizintechnischen Validierungen vorbereitet, was eine spätere Implementierung der Fertigungszelle bei den Anwendungspartnern erleichtert.

2 Voraussetzungen unter der das Vorhaben durchgeführt wurde

Die DMG MORI-Tochter DECKEL MAHO Seebach GmbH ist einer der wichtigsten Arbeitgeber in der Region und verfügt an ihrem 155.000 m² großen Standort über rund 600 Fachkräfte. Die Kernkompetenz von DECKEL MAHO Seebach besteht im 5-Achs-Fräsen. Die DMU 50, das erfolgreichste Produkt der DMG MORI, kann diese 5-Achs-Kompetenz unter Beweis stellen. Die Montagekapazität von DECKEL MAHO Seebach beträgt bis zu 2.000 Maschinen pro Jahr.

Als Pionier in der Medizintechnik verfolgt das DMG MORI Medical Excellence Center die Vision, Menschen und Unternehmen bei der Realisierung ihrer Ideen zu unterstützen. In dieser Weise entwickelt das Medical Excellence Center neue Prozesse, Produkte und Lösungen für die Medizintechnik. Dabei legen alle Mitarbeitenden Wert auf eine vertrauensvolle und langfristige Kundenbeziehung.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Um die Produktion in Hochlohnländern wirtschaftlich und zukunftsfähig zu gestalten, haben sich verschiedene Schwerpunktthemen herausgebildet. Dazu zählen neben der Automatisierung wiederkehrender Prozessschritte der Einsatz von Simulationssystemen zur Planung und Optimierung der Fertigung [ALT14] sowie sich selbst optimierende Fertigungssysteme [PER15]. In der Regel wird dabei das Ziel verfolgt, eine weitgehende Autonomie des Produktionssystems zu erreichen [KLO04]. Als Voraussetzung für eine Umsetzung werden unter anderem die Integration von Sensoren [KLO04] in die Werkzeugmaschine genannt. Der SFB 368 „Autonome Produktionszellen“ beschäftigte sich ausführlich mit dem Thema einer weitgehend autonomen Produktionszelle. Demnach gibt es hauptsächlich drei Teilaspekte der Autonomie [PFE06]: Autonomie durch die verstärkte Integration von Teilfunktionalitäten, Autonomie durch Störungstoleranz und Autonomie für den Benutzer durch optimierte Unterstützung. Zusätzlich wurden Herausforderungen im Zusammenhang mit autonomen Produktionssystemen in einer acatech Studie herausgearbeitet und benannt [ACA17]. Darin enthalten sind unter anderem folgende Herausforderungen:

- Autonome Systeme können nur durch das Zusammenwirken verschiedenster Fachdisziplinen realisiert werden. Diese notwendige, interdisziplinäre Kooperation erfordert neue Organisationsformen, die über die klassischen Formen hinausgehen.
- Um die Umrüstung der Produktion hin zu autonomen Systemen zu ermöglichen, muss die bestehende Produktionsinfrastruktur mit einbezogen werden.
- Zunehmend werden Maschinen mit künstlicher Intelligenz eingesetzt, die selbstständig dazulernen. Damit wird ein Wissenstransfer zwischen Mensch und Maschine notwendig, um gewonnenes Wissen dem Menschen mitteilen zu können.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die ursprünglich geplante Projektlaufzeit betrug drei Jahre. Während der Projektlaufzeit zeigten sich Herausforderungen, die eine Verlängerung der Laufzeit erforderlich machten. Eine wesentliche Ursache zur Laufzeitverlängerung stellten Probleme im Zusammenhang mit der Corona-Pandemie dar. Dadurch kam es zu verlängerten Lieferzeiten, z.T. geringerer Verfügbarkeit der Projektpartner durch Kurzarbeit und zu erheblich erschwerten Arbeitsbedingungen im Versuchsfeld des Instituts.

Die realisierte Fertigungszelle im Projekt beinhaltet den Einsatz taktiler und optischer Messtechnik, die zusammen mit dem Bearbeitungszentrum und dem Automatisierungsroboter den physischen Teil der Fertigungszelle bilden. Die Fertigungszelle ermöglicht somit, neben der spanenden Bearbeitung, auch die unmittelbare Qualitätskontrolle der gefertigten Implantate und die Dokumentation der Messdaten entsprechend der geltenden medizintechnischen Richtlinien. Die Ergebnisse zeigten, dass dieser Aufbau nicht nur für eine Qualitätskontrolle genutzt werden kann, sondern auch dazu, den Fertigungsprozess zu optimieren. Dafür wurden die Werkzeugwege mit Hilfe der Messdaten angepasst, wodurch geometrische Fehler kompensiert werden konnten. Diese Kompensation bietet ein erhebliches technisches und wirtschaftliches Potential, da dadurch manuelle Tätigkeiten zum Einfahren des Prozesses eliminiert werden können. Zudem kann eine Prozessregelung für Serienprozesse realisiert werden. Damit kann die Fertigungszelle den Prozess laufend anpassen, wenn die Fertigungsqualität, beispielsweise aufgrund von Werkzeugverschleiß, nicht mehr eingehalten werden kann.

Aufgrund des hohen wirtschaftlichen Potentials wurde in gemeinsamen Diskussionen im Projektkonsortium entschieden, die Kompensation und Prozessregelung umzusetzen. Die Prozessregelung wurde jedoch nicht in dem ursprünglich beantragten Rahmenplan und der Vorhabensbeschreibung berücksichtigt. Der hierdurch entstandene Mehraufwand wurde mit zusätzlichen vier Personenmonaten über einen Aufstockungsantrag finanziert. Aus diesem Grund ergab sich eine Verlängerung der Projektlaufzeit bis 31.12.2022.

Im Rahmen des Projekts werden Implantate gefertigt und optisch gemessen. Dafür wird das gefertigte Implantat nach dem Fertigungsprozess mit Hilfe eines Roboters entnommen. Entsprechend der ursprünglichen Planung sollte derselbe Roboter ebenfalls die optische Messung durchführen, indem das Implantat um das stationäre Messsystem geführt wird. Die ersten Untersuchungen im Projekt haben jedoch gezeigt, dass der dafür notwendige Programmier- und Änderungsaufwand seitens der Zeiss Optotechnik unverhältnismäßig hoch wäre. Der Fokus innerhalb des Projekts lag seitens Zeiss jedoch bei der Entwicklung des Messsystems. Somit hat sich die Notwendigkeit ergeben, die Messung und die Maschinenbeladung mit zwei unterschiedlichen Robotern durchzuführen. Ein Roboter übernimmt dabei das Werkstückhandling und ein weiterer Roboter die Führung des optischen Messsystems um das Werkstück. Aus diesem Grund wurde eine Änderung der Projektmittel beantragt, sodass ein zusätzlicher Roboter vom IFW beschafft werden konnte, der als Automatisierungsroboter genutzt wird. Ein zusätzlicher personeller Aufwand entstand durch die Anschaffung des zusätzlichen Roboters nicht. Bereits in der urpsrünglich geplanten Lösung mit einem Roboter sollte der Roboter für die Automatisierung am IFW eingerichtet und programmiert werden. Dieser Aufwand verblieb beim IFW und änderte sich nicht.

Im Verlauf des Vorhabens brachte sich die DMG MORI Seebach GmbH neben der Unterstützung in diversen Arbeitspaketen wie geplant vor allem in Arbeitspaket 1 zur Anforderungsdefinition, Arbeitspaket 2.1 zur Komplettbearbeitung sowie in das Arbeitspaket 5.1 zum Aufbau und Inbetriebnahme der Fertigungszelle ein.

5 Erzielte Ergebnisse

5.1 AP 1 Anforderungsdefinition

Ziel des ersten Arbeitspakets war die Erarbeitung eines Lastenhefts für das gesamte Projekt, die Untersuchung der aktuellen Zerspanprozesse sowie die Konzeptionierung des Arbeitsplatzes. Zur Erreichung der Ziele wurde ein Workshop mit den Anwendungspartnern Mack und Endocon sowie mit der DMG Software Solutions durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern in Form eines Lastenhefts dokumentiert. Dafür wurden zunächst die aktuellen Fertigungsprozesse analysiert, um den IST-Stand in Form einer Prozesskette zu dokumentieren. Darauf aufbauend wurde das Einsatzszenario des Projekts erarbeitet, welches als Grundlage für das Projekt genutzt wird. Das Gesamtsystem wird innerhalb der Fertigung von verschiedenen Nutzerrollen in unterschiedlichen Prozessbereichen genutzt. Anhand dieser Prozessbereiche werden schließlich die Anforderungen so beschrieben, dass eine technische Lösung zunächst offenbleibt. Zentrales Element des Lastenhefts ist die Darstellung des Gesamtsystems in der Business Process Modeling Notation (BPMN). In der nachfolgenden **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist das BPMN-Diagramm dargestellt. Darin wird die Prozesskette beschrieben, wobei die einzelnen Prozessschritte den Prozessbereichen zugeordnet sind. Die Verbindung der Prozessschritte erfolgt über Pfeile. Die Pfeile können sowohl einen physischen Materialtransport, als auch einen Datenaustausch beschreiben. Die dargestellten Prozessschritte und im Lastenheft beschriebenen Anforderungen werden während der Projektlaufzeit durch technische Lösungen erfüllt.

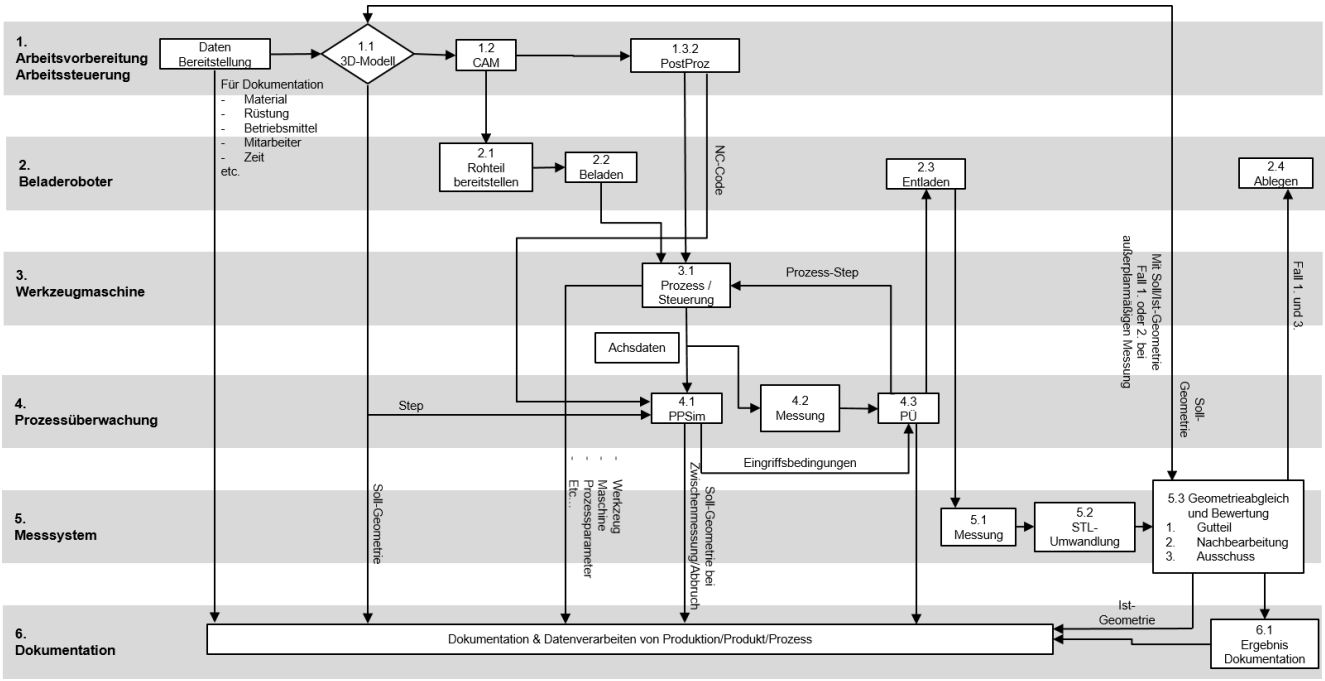

Abbildung 1: TempoPlant BPMN

Neben dem Lastenheft wurden die Implantate erstmals auf dem Bearbeitungszentrum Milltap 700 gefertigt, die von Deckel Maho Seebach entsprechend des Arbeitsinhalts ausgewählt und zur Verfügung gestellt wurde. Während der Fertigung wurden die Bearbeitungskräfte gemessen, die als Grundlage zur Auslegung des sensorischen Spannsystems genutzt werden. Die Kräfte betragen maximal 480 N beim Schruppen und minimal ca. 10 N bei der Schlichtbearbeitung mittels Kugelkopffräser.

In mehreren Telefonkonferenzen sowie einem Workshop konnten verschiedene Entwürfe des roboterunterstützen Arbeitsplatzes entworfen und bewertet werden. Das Ergebnis davon ist zwei mobile Plattformen, die jeweils mit einem Roboter ausgestattet sind. Die erste Plattform trägt den Beladeroboter, sowie den Zwischenlagerplatz, den Arbeitsplatz und die Reinigungsanlagen. Daran angeschlossen wird eine zweite, ebenfalls mobile, Messplattform. Diese trägt den Roboter, welcher mit einem optischen Messgerät ausgestattet ist. Zur Messung des gefertigten Implantats entnimmt der Beladeroboter das Implantat aus der Maschine und fährt in eine definierte Messposition.

Der Messroboter führt anschließend das Messsystem um das Werkstück (noch in der Einspannung) und erfasst so die Geometrie des gefertigten Implantats. Diese Lösung entspricht nicht der ursprünglich beantragten Lösung mit nur einem Roboter. Aus diesem Grund wurde vom IFW ein zusätzlicher Roboter beantragt, der als Automatisierungsroboter genutzt wird.

Seitens der DECKEL MAHO Seebach GmbH wurden Anforderungen bezüglich der Komplettbearbeitung, des Bearbeitungszentrums sowie notwendigen Schnittstellen zu den anderen Teilsystemen erarbeitet. Auf Grundlage dieser Anforderungen wurde das Bearbeitungszentrum des Typs MILLTAP 700 zur Fertigung beiden Implantate ausgewählt. Das Bearbeitungszentrum weist folgende technische Spezifikationen auf:

Bei einer MILLTAP 700 handelt es sich um ein vollwertiges 5-Achs-Simultan-Fräszentrum mit SIEMENS Steuerung. Diese Anlage wurde bei DECKEL MAHO Seebach / Member of DMG MORI entwickelt. Diese Maschine kann mit oder ohne Automation betrieben werden. Das Konzept hat sich hundertfach bewährt und überzeugt durch eine hohe Leistung auf kleinster Stellfläche. Die Anforderungen an die Stellfläche sind eine typische Anforderung aus der Medizintechnik.

Bei der verwendeten Maschine handelte es sich um Rückläufer aus dem Markt. Generell kann gesagt werden, dass es sich hier um einen typischen Prozess handelt. Wichtig ist, dass solche Rückläufer intern aufwendig überprüft werden und ein entsprechendes Up-Date erfahren, bevor sie wieder zur Verwendung bereitgestellt werden.

In diesem speziellen Fall wurden u.a. folgende Arbeiten durchgeführt:

+ Umfangreiche Überprüfung auf Vollständigkeit, Beschädigung(en),
+ Überprüfung der Software auf Vollständigkeit und Aktualität,
+ Testungen gem. den internen Vorgaben von DECKEL MAHO Seebach,
+ Demontage, Versand und Aufbau beim IFW am finalen Standplatz,
+ Begleitung des Einfahrens durch einen Mitarbeiter aus dem Medical Excellence Center Seebach,

5.2 AP 2.1 Komplettbearbeitung

Ziel des zweiten Arbeitspakets ist die Entwicklung der Fertigungszelle für die teilautonome Komplettbearbeitung, sodass die manuellen Fertigungsschritte und Handlingoperationen entfallen und eine automatisierte Qualitätskontrolle möglich ist. Nachdem die Milltap 700 am 06.12.2019 ans IFW geliefert wurde, folgte die Erstinbetriebnahme der Maschine. Für den neben der Maschine befindlichen Automatisierungstisch wurden in einem Workshop verschiedene Konzepte diskutiert und die mechanischen und elektrischen Schnittstellen besprochen. Zur Kommunikation zwischen Maschine und Roboter wurde eine Profibusverbindung eingerichtet, über die alle Steuer- und Sicherheitssignale ausgetauscht werden. Weiterhin wurden sicherheitsrelevante Einrichtungen z.B. das Not-Aus-Signal zum Roboter zweikanalig hartverdrahtet. Um eine automatisierte Beladung zu ermöglichen wurde vom IFW ein Nullpunktspannsystem der Firma Schunk beschafft. Für die automatisierte pneumatische Ansteuerung des Nullpunktspannsystems mussten in der Maschine neue Pneumatikventile installiert und in die PLC eingebunden werden. Nach Fertigstellung der Automatisierung wurden zunächst die Fräsprozesse für das DRUJ Implantat von der endocon GmbH sowie die Teleskopprothesen der MACK Dentaltechnik GmbH eingerichtet und iterativ angepasst, sodass eine stabile Fertigung sichergestellt ist. In der nachfolgenden Abbildung 2 sind beide Anwendungsfälle in dem Bearbeitungszentrum dargestellt. Dabei sind auch die Spannsysteme zu sehen, die zur Fertigung genutzt werden. Für das DRUJ Implantat (links) wurde ein neues Spannsystem entwickelt. Für die Zahnkronen wird der Rondenhalter verwendet, welcher bereits von der MACK Dentaltechnik GmbH genutzt wird.

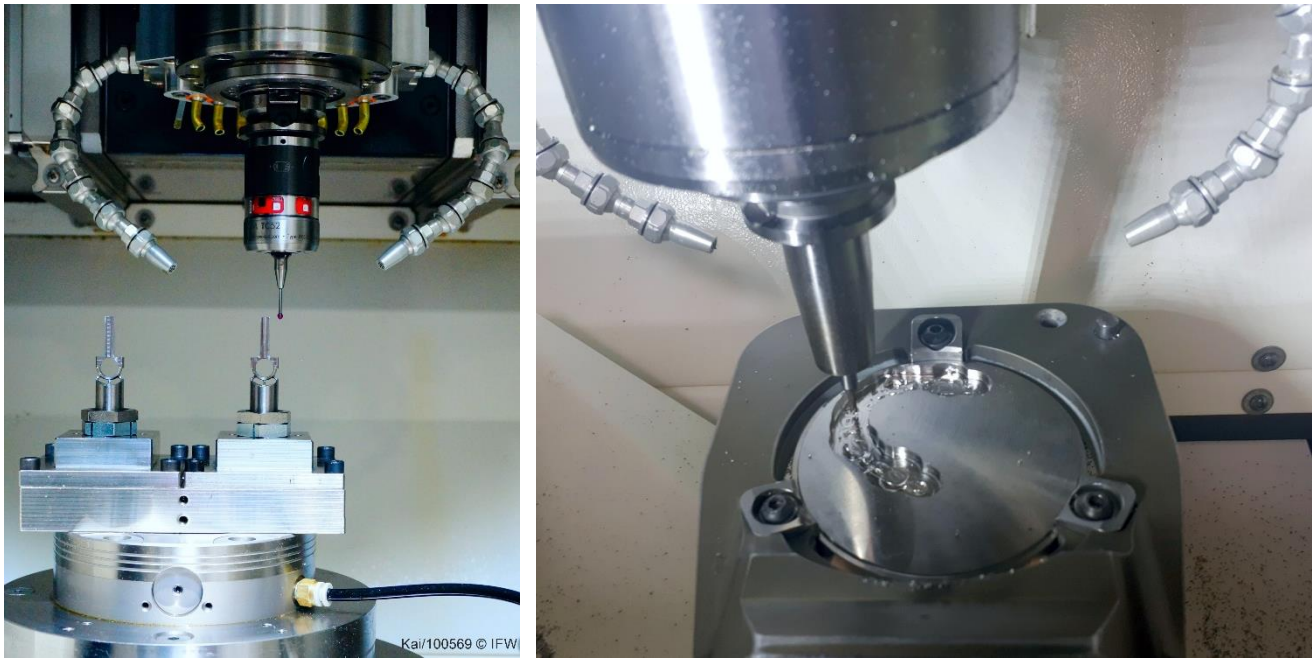

Abbildung 2: DRUJ-Implantat (links) und Teleskopkrone (rechts) in dem Bearbeitungszentrum

Beide Spannsysteme erlauben eine Zugänglichkeit von mehreren Seiten, sodass eine Komplettbearbeitung in einer Aufspannung ermöglicht wird. Die Werkstücke verbleiben in beiden Fällen jedoch an Stützstrukturen, sodass das fertige Implantat zunächst am Rohteil verbleibt. Während die Fertigung der Dentalprothesen bereits durch MACK Dentaltechnik vorgegeben wird, wurde für das DRUJ Implantat eine neue CAM-Planung entwickelt. In Abbildung 3 sind die Bearbeitungsoperationen und wichtige Maße mit den dazugehörigen Toleranzen für das DRUJ Implantat dargestellt. Die Endgeometrie wird demnach mit einer Kombination aus Stirn-, Umfangs- und Kugelkopffräsen hergestellt. Die Toleranzen erlauben dabei eine geometrische Abweichung zwischen 15 µm und 100 µm.

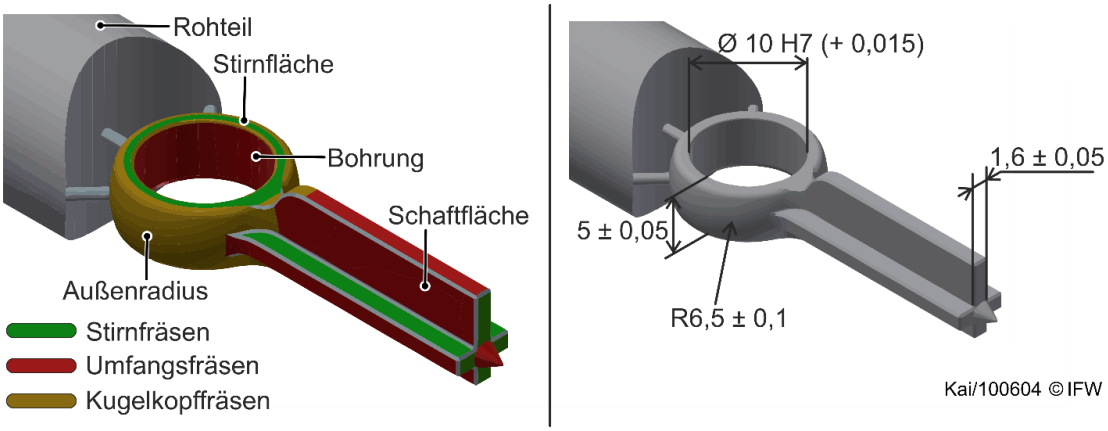

Abbildung 3: Bearbeitungsoperationen und Toleranzen des DRUJ-Implantats

Um zu überprüfen, ob die Toleranzen mit der eingerichteten CAM-Planung erreicht werden, wurden die Geometrie der hergestellten Implantate mehrfach mit dem in der Maschine befindlichen Taster sowie mit einer Koordinatenmessmaschine gemessen. Es wurden vier verschiedene Fälle untersucht, die in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt sind.

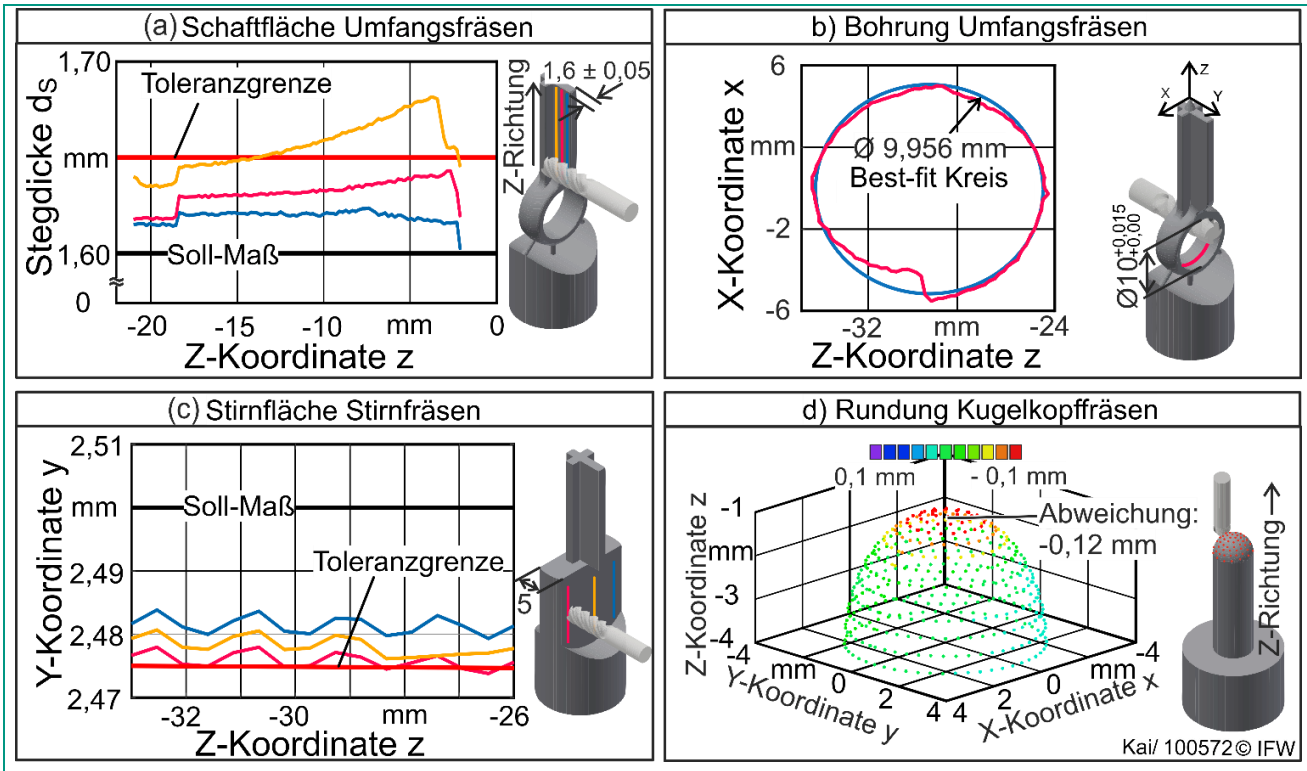

Abbildung 4: Geometriemessung am DRUJ Implantat

a) Die Schaftfläche wird im Umfangsfräsverfahren mit einem 4 mm Schaftfräser gefertigt. Die Geometriemessung wurde mit dem Messtaster der Werkzeugmaschine entlang der Schaftfläche in drei verschiedenen Höhen durchgeführt. Die drei farbigen Linien in Abbildung 4 (a) zeigen die Messergebnisse der unterschiedlichen Messstellen. Der Verlauf der Messlinien entlang der Schaftrichtung zeigt, dass sich die Stegdicke zum Ende der Schaftfläche vergrößert, was auf eine Abdrängung des Werkstücks zurückzuführen ist. Zusätzlich sorgt eine Abdrängung des Werkzeugs zu einer zunehmenden geometrischen Abweichung zur Werkzeugspitze hin (gelbe Linie). Dadurch wird die Toleranzgrenze überschritten, sodass das Implantat mit der initialen CAM-Planung nicht den geometrischen Anforderungen entspricht. Daraus folgt, dass eine Anpassung der Werkzeugwege notwendig ist.

b) Die Bohrung mit einem Durchmesser von 10 mm H7 erlaubt eine geometrische Abweichung von +0,015 mm. Diese wird ebenfalls durch Umfangsfräsen gefertigt. Die Messdaten zeigen, dass die Bohrung mit der initialen CAM-Planung einen Durchmesser von 9,956 mm erreicht und damit ebenfalls nicht die Anforderungen erfüllt. Dies ist ebenfalls auf eine Abdrängung des Werkzeugs und des Werkstücks, sowie auf das Umkehrspiel der Maschinenachsen zurückzuführen.

c) Die Stirnfläche des DRUJ Implantats wird im Stirnfräsverfahren gefertigt. Die Messdaten zur Erfassung der Bauteildicke zeigen, dass die gefertigte Fläche innerhalb der Toleranzgrenze liegt und damit die Anforderungen erfüllt. Jedoch ist auch hier eine Anpassung der Werkzeugwege oder Maschinenparameter sinnvoll, da die nur knapp erreichte Toleranzgrenze durch zusätzliche negative Effekte wie beispielsweise Werkzeugverschleiß oder thermoelastische Verformungen überschritten werden kann.

d) Da die Rundung des Außendurchmessers des Implantats aufgrund beschränkter Platzverhältnisse nicht gemessen werden kann, wurde ein Analogbauteil entworfen, was in Abbildung *4* (d) unten rechts dargestellt ist. Die Halbkugel wurde dafür mit einem 2 mm Kugelkopffräser dreiachsig gefertigt. Die Messdaten zeigen eine Abweichung von maximal -0,12 mm, welche wahrscheinlich auf ein unzureichendes Einmessen des Fräswerkzeugs zurückzuführen ist. Damit wird auch hier deutlich, dass eine Anpassung der Parameter erforderlich ist.

Die Messdaten zeigen verschiedene Einflüsse, die zu geometrischen Abweichungen am gefertigten Implantat führen. In der industriellen Praxis ist daher ein Einfahrprozess notwendig, in dem die Werkzeugwege oder Maschinenparameter iterativ verändert werden, sodass die geometrischen Anforderungen erfüllt werden. In dem Projekt TempoPlant ist aus diesem Grund ein automatisiertes Verfahren geplant, was die Werkzeugwege und Prozessparameter automatisiert verändert, um den manuellen Aufwand eines Einfahrprozesses zu eliminieren.

Mit der aktuellen Fertigungsstrategie beider Anwendungsfälle verbleiben die Werkstücke an Haltestegen und damit auch an dem Rohteil und Spannsystem. Um eine vollständige Komplettbearbeitung erreichen zu können muss daher in einem letzten Arbeitsschritt noch das Implantat von den Haltestegen gelöst werden. Dafür wurde

eine Strategie entwickelt, welche in Abbildung 5 dargestellt ist. Zunächst wurde simulativ a) die minimale Stegbreite ermittelt, an der das Implantat mit einer Prozesskraft von 5 N und der Gewichtskraft noch an den Haltestegen verbleibt. Diese Analyse hat eine Dicke von 16 µm ergeben. Im nächsten Schritt b) wurde die CAM-Planung erweitert, indem alternierend an beiden Stegen zusätzliches Material entfernt wurde. Ziel dieser alternierenden Strategie ist ein möglichst vollständiges Entfernen des Stegmaterials, sodass eine manuelle Nacharbeit der Stegflächen möglichst minimiert wird. Die experimentellen Untersuchungen c) haben gezeigt, dass der Abtrennprozess in einigen Fällen lediglich zu einem Verbiegen des Implantats an den Haltestegen führen kann, was im linken Teil der Teilabbildung c) zu erkennen ist. Das Verbiegen ist auf eine zu geringe Zustellung zurückzuführen, sodass es nicht mehr zum Schnitt des Materials kommt und die Haltestege vom Werkzeug abgedrängt werden. Aus diesem Grund wurde eine Mindestschnitttiefe von 0,015 mm eingeführt, bei der 100 % aller Implantate vom Rohteil getrennt wurden. Die anschließende Messtechnische Bewertung d) zeigt das Restmaterial, welches nach dem Abtrennvorgang am Implantat verbleibt. Es verbleibt eine kleine Kante, die ebenfalls etwa 16 µm Dick ist und etwa 0,1-0,2 mm von der Rundung absteht. Durch eine leichte manuelle Nacharbeit kann dieses Restmaterial mit Hilfe einer Feile in wenigen Minuten entfernt werden.

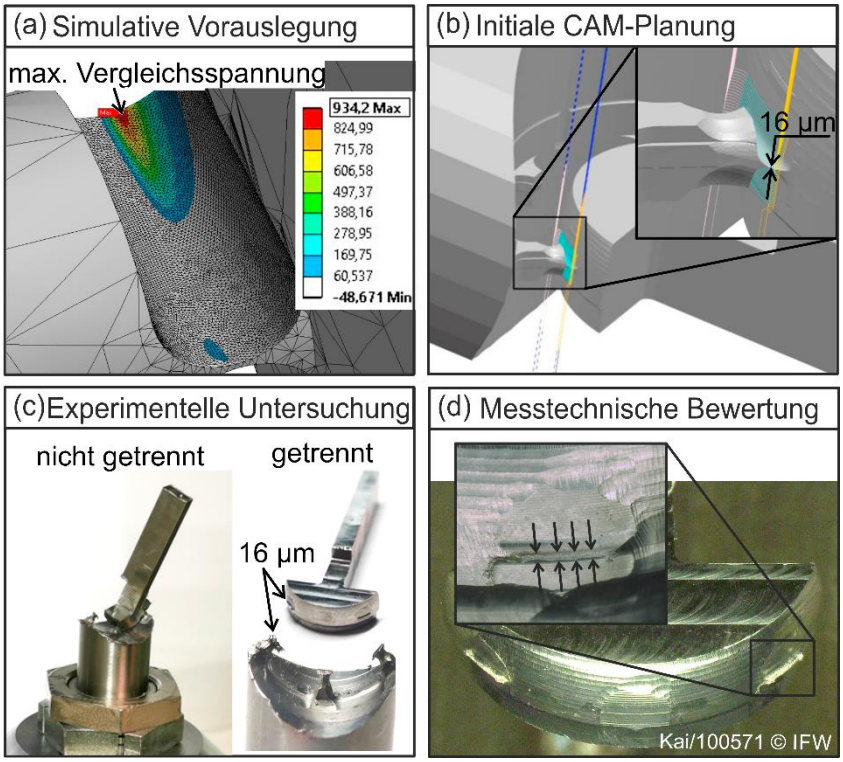

Abbildung 5: Methode zur automatisierten Entfernung der Haltestege

5.3 AP 5.1 Aufbau und Inbetriebnahme der Fertigungszelle

In Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium findet der Entwurf und die Inbetriebnahme der Fertigungszelle statt, die in Abbildung 6 dargestellt ist. Alle Teilsysteme befinden sich in unmittelbarer Nähe und sind fest miteinander verbunden, sodass es sich um eine in sich geschlossene Fertigungszelle handelt.

Der Fertigungsprozess wird von dem Bearbeitungszentrum Milltap 700 der Firma DMG MORI AG ausgeführt. Der unmittelbar neben der Milltap 700 befindliche Automatisierungstisch (Abbildung 7) bildet die Schnittstelle zu den anderen realen Teilsystemen. Darauf befindet sich ein Automatisierungsroboter des Typs KUKA KR 10 R900-2, der das Bearbeitungszentrum be- und entlädt, was den automatisierten Betrieb der Fertigungszelle ermöglicht.

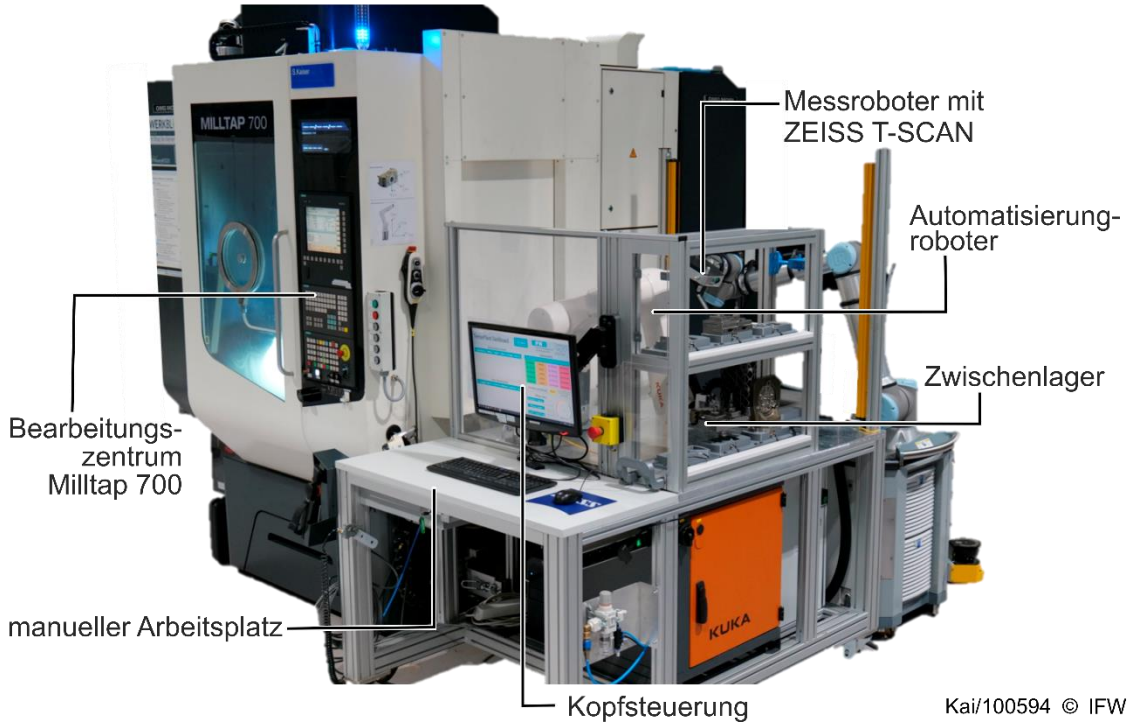

Abbildung 6: Prototypische Umsetzung der teilautonomen Fertigungszelle.

Die Werkstücke befinden sich dafür auf vormontierten Werkstückträgern in einem Werkstückspeicher. Die Werkstückträger können dabei zur Prozessüberwachung auch mit Sensorik zur prozessparallelen Kraftmessung ausgestattet sein. Zur fertigungsnahen Montage und Demontage der Werkstückträger und für weiterführende manuelle Arbeiten befindet sich stirnseitig ein manueller Arbeitsplatz. Dort befindet sich ebenfalls das HMI zur Steuerung der Fertigungszelle und zum Informationsaustausch zwischen Bediener und Fertigungszelle. Von dem manuellen Arbeitsplatz aus können Werkstücke über eine Übergabeschublade in die Roboterzelle ein- und ausgeschleust werden. Der Automatisierungsroboter übernimmt weiterhin die Aufgabe, das Werkstück für die optische Messung bereitzustellen. Dafür legt der Roboter den Werkstückträger, in welchem sich auch nach der Fertigung noch das Implantat befindet, auf einem Messpodest ab. Der rückseitig befindliche Messroboter vom Typ Universalrobots UR10 führt zur optischen Messung ein Messsystem, den sog. T-SCAN des Projektpartners Zeiss Optotechnik GmbH. Der T-SCAN wird von einem zweiten optischen System, dem sog. T-TRACK (oberhalb der Zelle, nicht abgebildet) räumlich erfasst, damit die zum gesamten Messsystem gehörende Software die Lage des T-SCAN während einer Messung identifizieren kann. Nach der Messung legt der Automatisierungsroboter den Werkstückträger zurück in den Werkstückspeicher oder direkt zur Übergabeschublade, um das Werkstück wieder dem Bediener zu übergeben.

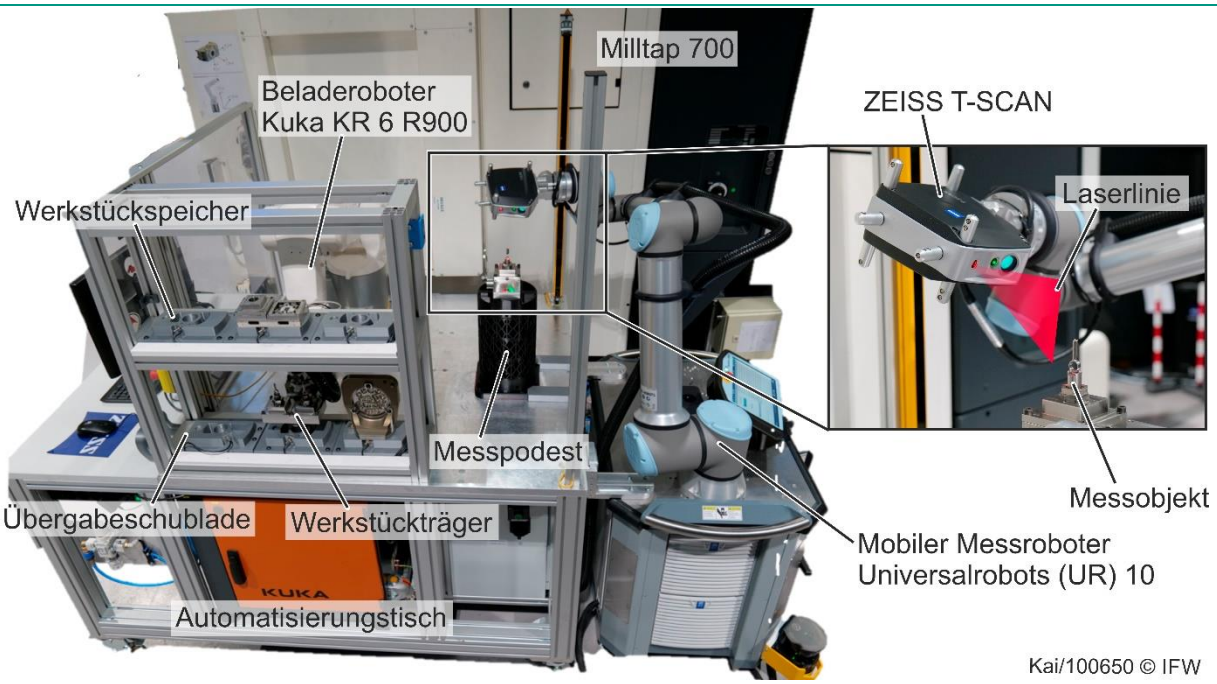

Abbildung 7: Automatisierungsroboter, Werkstücklager und Messroboter neben der Milltap 700.

Nachfolgend wird die technische Umsetzung der softwareseitigen Teilsysteme anhand des in Abbildung 8 dargestellten Schaubilds beschrieben. Ein zentrales Element bildet die Kopfsteuerung, die in der Automatisierungssoftware TwinCAT 3 (Beckhoff Automation GmbH & Co. KG) programmiert ist. Die Kopfsteuerung bildet das Bindeglied zwischen den digitalen und realen physischen Teilsystemen und steuert diese mit Hilfe der orange dargestellten Steuerbefehle. Die realen Teilsysteme kommunizieren also nur über die Kopfsteuerung. Eine Kommunikation zwischen den einzelnen realen Teilen findet nicht statt. Weitere Teilsysteme der Informationsverarbeitung sind die Messdatenauswertung, welche in GOM-Inspect (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH), einer Software für die Analyse von 3D-Messdaten, auf einem zusätzlichen Messrechner durchgeführt wird, die Kompensation, die mit Matlab (MathWorks, Inc.), einer Software zur Lösung mathematischer Probleme, auf dem Rechner der Kopfsteuerung durchgeführt wird und die Prozessüberwachung, welche auf einem Simulationsrechner prozessparallel ausgeführt wird. Die Datenübertragung zwischen dem sensorischen Spannsystem und der Prozessüberwachung findet dabei drahtlos über Bluetooth statt. Der Informationsaustausch zwischen den Teilsystemen ist in schwarz dargestellt. Die initialen Informationen, auf dessen Basis der Fertigungsprozess beginnt, werden der Fertigungszelle vom Bediener über das HMI übergeben. Der Datenaustausch zwischen Kopfsteuerung und dem Bearbeitungszentrum Milltap 700 wird über einen FTP-Server realisiert. Im Laufe der Prozesskette werden alle fertigungsrelevanten Messdaten und Fertigungsinformationen über den Informationsaustausch übergeben und in der Kompensation weiterverarbeitet bzw. direkt in der Datenbank zur Dokumentation gespeichert.

Die Datenbank verfügt dabei über einen Software-Agenten. Dieser erkennt, wenn ein neuer Auftrag durch den Benutzer über das HMI erstellt wird und legt daraufhin automatisch die für die Dokumentation notwendige Ordnerstruktur an, in der die Fertigungsdaten abgespeichert werden. Die Überwachung der Daten innerhalb der Datenbank findet nicht über die Informationsverarbeitung statt. Diese ist stattdessen mit Hilfe einer Blockchain-Cloudlösung über Microsoft Azure realisiert worden. Dabei werden jedoch keine Fertigungsinformationen an die Cloud übertragen. Es wird lediglich die Struktur der hinterlegten Daten überwacht, um eine Änderung feststellen zu können. Die Daten werden zur Dokumentation auf dem lokalen Laufwerk des Rechners der Informationsverarbeitung hinterlegt. In einer Firmenumgebung könnte dies auch eine andere Datenbank in SAP oder ein Netzlaufwerk sein.

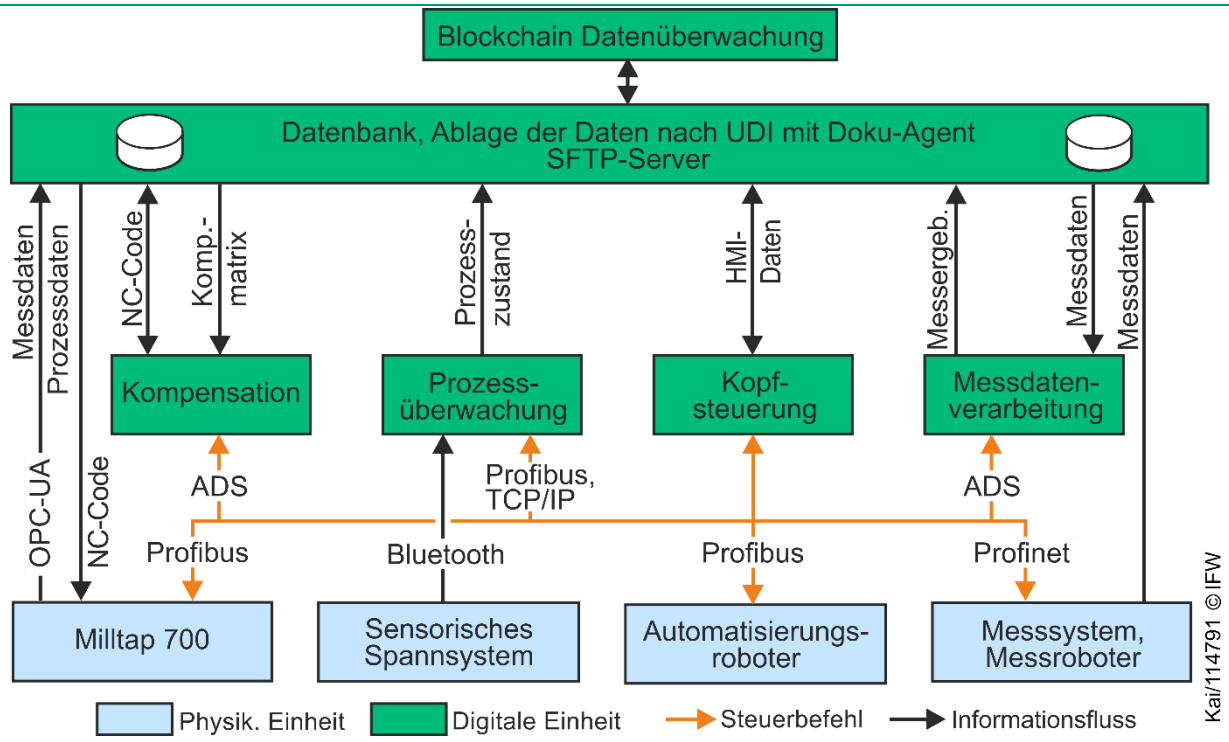

Abbildung 8: Architektur und Schnittstellen der physikalischen und digitalen Teilsysteme.

6 Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Arbeiten im Rahmen des Projektes TempoPlant befähigen die DECKEL MAHO Seebach GmbH / Member of DMG MORI, im Bereich der spanenden Bearbeitung von medizintechnischen Implantaten neue Einsatzmöglichkeiten für die Industrie aufzuzeigen.
Insbesondere dienen die Erkenntnisse zur prozessnahen Qualitätskontrolle und zur automatisierten Dokumentation und Validierung der Fertigungszelle nicht nur der Medizintechnikbranche, sondern auch der Luftfahrtindustrie sowie weiteren industriellen Branchen, in denen ein hohes Maß an Dokumentationspflicht und Nachverfolgbarkeit von Produkten notwendig sind. Erkenntnisse zur automatisierten Dokumentation, Validierung, Prozessüberwachung und prozessparallelen optischen Messung von Bauteilen sollten für eine Vielzahl an Unternehmen aus der Medizintechnikbranche von besonderem Interesse sein, um den hohen Anforderungen der Medical Device Regulation mit minimalem Aufwand gerecht zu werden.

Für die weitere Verwendung der Erkenntnisse wurde vom gesamten System ein entsprechendes Video in 01.2023 gedreht. Dieses Video wird bei DECKEL MAHO Seebach intern zu Schulungszwecken und zur Promotion verwendet. Bspw. wird das Video im Showroom von DECKEL MAHO Seebach gezeigt. Der DMG MORI Medical Excellence Center ist stolz auf die geschaffene Leistung und vertritt die Auffassung, den Zahn der Zeit damit zu treffen.

7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes

Im Rahmen zweier Vorträge (Medical Days 2022 DMG Mori, Innovation Forum Medizintechnik 2021) fand ein Erfahrungsaustausch mit Unternehmen aus der Medizintechnikbranche statt.

8 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Im Rahmen der Vorstellung des Forschungsprojekts auf der Weltleitmesse der Produktionstechnologie (EMO 2019), im Innovation Forum Medizintechnik (Tuttlingen 2021) sowie auf den DMG Mori – Medical Days (Seebach 2022) wurde der erreichte Projektfortschritt diskutiert. Hierbei fiel besonders auf, dass die Umsetzung der strengen regulatorischen Anforderungen durch die MDR vielen Unternehmen sorgen bereitet. Die im Forschungsprojekt entwickelten Technologien sind dabei auf weiten Anklang gestoßen.

9 Veröffentlichungen

9.1 Wissenschaftliche Journals (peer-reviewed)

[DEN22a] Denkena, B., Bergmann, B., & Kaiser, S. (2022). Close-to-process compensation of geometric deviations on implants based on optical measurement data. Procedia CIRP, 112, 122–127.

[DEN22d] Denkena, B., Klemme, H., Kaiser, S. & Shanib, M. (2022). Intelligent Manufacturing Cell for Implants. 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM).

9.2 Zeitschriftenartikel

[DEN19] Denkena, B., Bergmann, B., Doreth, K., Kaiser, S. (2019, 23. September). Implantate fertigen – willkommen im industriellen Internet der Dinge. devicemed.de. https://www.devicemed.de/implantate-fertigen-willkommen-im-industriellen-internet-der-dinge-a-867451/

[DEN20a] Denkena, B., Winkler, M., Kaiser, S., Shanib, M. (2021, 30. November). Individuelle Implantate wirtschaftlich produzieren. WGP. https://wgp.de/de/wirtschaftliche-produktion-individueller-implantate/

[DEN20b] Denkena, B., Dittrich, M.-A., Winkler, M., Kaiser, S. (2020, 20. Oktober). Intelligente Fertigungszelle für die Implantatherstellung. ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure. https://www.ingenieur.de/fachmedien/wt-werkstattstechnik/bmbf-produktionsforschung-wt-werkstattstechnik/intelligente-fertigungszelle-fuer-die-implantatherstellung/

[DEN20c] Denkena, B., Bergmann, B., & Kaiser, S. (2020, 16. November). Fertigungszelle für Implantate kompensiert geometrische Fehler. mav. https://mav.industrie.de/robotik-montageautomation/fertigungszelle-fuer-implantate-kompensiert-geometrische-fehler/

[DEN21] Denkena, B., Kaiser, S., Winkler, M. (2021, 17. Februar). Wenn der Messroboter Teil der Fertigungszelle ist. Quality Engineering. https://quality-engineering.industrie.de/branchen/medizin/wenn-der-messroboter-teil-der-fertigungszelle-ist/

[DEN22b] Denkena, B., Wichmann, M., Kaiser, S., Winkler, M. (2022, 10. Februar). Mit teilautonomer Fertigungszelle MDR-Anforderungen erfüllen. devicemed.de. https://www.devicemed.de/mit-teilautonomer-fertigungszelle-mdr-anforderungen-erfuellen-a-993e2f55a5f2a661b0886cc9be861ae9/

[DEN22c] Denkena, B., Klemme, H., Kaiser, S., Winkler, M., & Shanib, M. (2022, 31. März). Automatisierte Dokumentation zur Implantatfertigung. Zerspanungstechnik.de. https://www.zerspanungstechnik.de/blog/2022/04/04/automatisierte-dokumentation-zur-implantatfertigung/

9.3 Vorträge

[DIT19] Dittrich, M.-A. (2019): Medizintechnik geht nicht ohne Maschinenbau. (Vortrag, 17.09.2019). Hannover: EMO Hannover: Weltleitmesse der Produktionstechnologie 2019.

[KAI21] Kaiser, S. (2022): Teilautonome Fertigungszelle für die Medizintechnik – Chancen und Herausforderungen. (Vortrag, 21.10.2021). Tuttlingen: Innovation Forum Medizintechnik 2021.

[KAI22] Kaiser, S. (2022): Automatisierte Qualitätskontrolle und Fehlerkompensation durch eine G-Code Adaption. (Vortrag, 10.11.2022). Seebach: DMG Mori – Medical Days 2022.

9.4 Social Media

[IFW21] IFW - Leibniz Universität Hannover. (2021, 27. Mai). Wirtschaftliche Produktion individueller Implantate [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=0d8TQ72D_Hs

[IFW23] IFW - Leibniz Universität Hannover. (2023, 15. Mai). Teilautonome Fertigung orthopädischer Implantate [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=m01vs4nVbrc

10 Quellenverzeichnis

[ACA17] acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Fachforum Autonome Systeme, Chancen und Risiken für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft. Abschlussbericht – Langversion, Berlin, 2017.

[ALT14] Altintas, Y., Kersting, P., Biermann, D., et al.: Virtual process systems for part machining operations. CIRP Annals - Manufacturing Technology 63, S. 585 – 605, 2014.

[KLO04] Klocke, F., Pritschow, G.: Autonome Produktion. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004.

[PER15] Permin, E., Bertelsmeier, F., Blum, M., et al.: Self-optimizing production systems. 48th CIRP Conference on MANUFACTURING SYSTEMS - CIRP CMS 2015, Procedia CIRP 41, S. 417 – 422, 2016.

[PFE06] Pfeifer, T., Schmitt, R.: Autonome Produktionszellen: Komplexe Produktionsprozesse flexibel automatisieren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.