



FH-Impuls 2016 I: Impulsprojekt 04 „Digitalisierung in der Medizintechnik-Fertigung (DigiMed)“

KURZBERICHT (Teil I Sachbericht zum Verwendungsnachweis)

Partnerschaft	CoHMed – Connected Health in Medical Mountains
Fachhochschule	Hochschule Furtwangen
Projekt	FH-Impuls 2016 I: Impulsprojekt 04 „Digitalisierung in der Medizintechnik-Fertigung (DigiMed)“
Förderkennzeichen	13FH5I04IA
Projektleiter	Prof. Dr. Kurt Greinwald Kronenstraße 16 78532 Tuttlingen 07461 1502 6625 kurt.greinwald@hs-furtwangen.de

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

Teilweise oder komplette Zahnprothesen, die vom Zahnarzt und Zahntechniker individuell hergestellt werden, basieren neben anatomischen und radiologischen Informationen auf oft nur rein ästhetischen Eindrücken. Da das hauptsächliche Ziel jeder zahnärztlichen Behandlungsmaßnahme aber die funktionelle Wiederherstellung des Kauorgans bzw. Kauapparates ist, müssen zur Definition der jeweiligen Prothetik - bisher ungenutzte - funktionell relevante Parameter berücksichtigt werden. Das erste Teilprojekt stellte die Entwicklung eines digitalen Globalmodells des Gebisses in den Mittelpunkt, welches funktionelle Parameter integriert. Mit Hilfe des Modells sollte eine virtuelle patientenindividuelle Optimierung der Gebissfunktion erfolgen, bevor das gefundene virtuelle Optimum in den digitalen Workflow zur Zahnersatzherstellung einfließt. Im Rahmen des Hauptarbeitspakets 1 sollten diese Wirkzusammenhänge in einem sogenannten Globalmodell abgebildet werden. Das Globalmodell selbst ist ein Expertensystem inklusive Simulationswerkzeug zur Definition eines optimierten Okklusionsergebnisses. Es setzt einen Eingangszustand (okklusaler Ist-Zustand) auf der Basis formulierter Wirkungszusammenhänge in einen Ausgangszustand (individuell optimierter okklusaler Soll-Zustand) um. Die Therapievorschlüsse sollten die schonendsten Methoden darstellen, die die optimale Funktion des oralen Status wiederherstellen. Hierzu sollten z.B. optimale Zahnhöhen, –formen und –stellungen visualisiert und Kauergebnisse prognostiziert werden. Dabei erhielt der behandelnde Zahnarzt die Möglichkeit, mit der Variation okklusaler Parameter verschiedene Therapieszenarien zu simulieren. Patient und Therapeut bekamen dann die möglichen Therapieergebnisse dargestellt und konnten sich für eine geeignete Therapie mit dem für den Patienten angemessenen Ergebnis entscheiden. Am Ende der Therapie sollte im Sinne einer Qualitätskontrolle mit dem Kaufunktionstest gezeigt werden, wie sich die Kauleistung prozentual gesteigert hat und wie erfolgreich die Behandlung somit gewesen ist.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

In diesem Teilprojekt sollte die Digitalisierung des Fertigungsprozesses zur Herstellung medizinischer Produkte untersucht werden, mit dem Ziel neue Herstellungsverfahren für die Herstellung individualisierter medizintechnischer Werkstücke zu erschließen. Die Aufgabe, die notwendige Präzision bei den in der Medizintechnik verwendeten, schwer zu bearbeitenden Materialien wie Sonderedelstähle oder Titanlegierungen zu erreichen, sollte mittels laufender Erfassung und Optimierung der Prozessparameter durch eine digitalisierte Prozesssteuerung erfüllt werden. Um auf Anhieb optimale Ergebnisse zu erhalten, sollten Tools für das Zusammenspiel von in Datenbanken hinterlegten Literatur- und Erfahrungswerten, externen Prozessexperten und Vor-Ort-Bedienpersonal bei der Werkzeugmaschinen Einrichtung und -steuerung entwickelt werden.

Das Kernproblem beim Einrichten von Fertigungsprozessen, nämlich die Wahl der besten Fertigungsstrategie und der optimalen Parameter, sollte mit Unterstützung eines Expertensystems, eines „virtuellen Fertigungsexperten“ auch für angelerntes Personal möglich werden, indem angelernte Bediener/Einrichter über ein Human Machine Interface (HMI) die notwendigen Informationen, um im Rahmen erlaubter Bedientätigkeiten, Fertigungsvorgaben des virtuellen Fertigungsexperten auszuführen. Das System sollte – nach iterativen Optimierungen durch reale Fertigungsexperten – über eine ausreichende Datenbasis verfügen, um selbstständig Fertigungsprozesse zu konzipieren und deren Einrichtung zu überwachen.

2 Ablauf des Vorhabens

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

In diesem Vorhaben wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, um die Anforderungen zu ermitteln. Die Anforderungen wurden eng mit dem Projektpartner definiert. Das Expertenwissen kam weitestgehend aus den Projektpartnern von WiFoAZM. Für die Aufgabe notwendige Schnittstellen und Daten wurden definiert. Die einzelnen Features wurden dann in der

Entwicklungsphase erarbeitet und umgesetzt. In regelmäßigen Abständen wurden die Ergebnisse dem Projektpartner vorgestellt. Während der Entwicklung wurden kleinere Pakete als studentische Projektarbeiten vergeben.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

Zunächst wurden – in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern – die Anforderungen an das zu erstellende Expertensystem ermittelt. Die erforderlichen Daten (Erfahrungs-, Regelwerke, Grenzwerte, pBedienkonzept...) wurden in MS Excel und einem Funktionsmodell in MS Access zusammengetragen. Nach eingehenden Recherchen wurde das Expertensystem als webbasiertes System konzipiert, das in einer Kombination von Django, Python und Ajax und einer MySQL-Datenbank besteht. Das System kann somit sowohl online, als auch auf Maschinenoberflächen betrieben werden. Per Web-Anwendung werden die Anfragen über HTTP-Requests an das Django Framework gesendet, dort erfolgt die Verarbeitung bzgl. Regelwerk und auf den Eingabedaten der User-basierten Abfragen einer MySQL-Datenbank. Die entsprechend ermittelten Daten werden ggf. in Django weiterverarbeitet und anschließend per HRRP-Response in der Web-Anwendung angezeigt. Die responsive Programmierung lässt eine Nutzung, neben der Maschinenoberfläche, auch über verschiedenste Betriebssysteme und z.B. auch Handys und Tablets zu. Das System kann sowohl als Stand-Alone-Ausführung auf einem Industrie-PC unmittelbar auf Produktionsmaschinen, auf einem Server bei einem Maschinenhersteller und im Web als Cloudbasierte Lösung implementiert werden.

Die Module wurden sehr ergonomisch gestaltet. Eingaben werden auf Plausibilität überprüft und Parameter-Grenzwerte eingehalten. Zahlreiche Infofelder und Hinweise erleichtern das Eingeben der Prozessdaten und versetzen somit auch ungelehrte Bediener in die Lage, das System zu bedienen.

Das System wurde nach und nach um zahlreiche Module erweitert, so wurde zunächst ein Modul zur Schleifscheibenauswahl erstellt, nach und nach Module zur effektiven Durchführung von Abrichtprozessen mit den unterschiedlichsten Abrichtwerkzeugen und für die Schleifverfahren Außerund- (Längs, Einstech), Innenrund- (Längs, Einstech), Flach (Pendel, Tief) und Spitzenlosschleifen (Durchgangsschleifen) jeweils die Module Vorschlag, Beurteilung, Strategie und Troubleshooting ergänzt. Alle Module wurden zunächst für Stahlwerkstoffe programmiert und iterativ viele weitere Werkstoffe (Edelstahl, Nickel- und Kobaltbasierte Legierungen, Titanlegierungen, Aluminium, Hartchrom, Hartmetall, WC-CoCr, Al₂O₃-Keramik, Cr₂O₃-Keramik und Gummi) ergänzt.

3 Wesentliche Ergebnisse und ggf. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Pakete mit den Projektpartnern bredent medical GmbH und WiFoAZM erarbeitet und umgesetzt. Es entstand eine Software, die es ermöglicht patientenindividuelle Daten, wie Gebissscan, kephalometrische und kondylographische Daten, automatisiert in einen Okklusionsvorschlag zu übertragen. Bei der Generierung des Okklusionsvorschlag wird zahnmedizinisches und zahntechnisches Expertenwissen umgesetzt. Darüber hinaus wurden Werkzeuge entwickelt, die den Anwender bei der Therapieplanung unterstützen sollen.

Die vorgeschlagene Okklusion wird in Form von einfachen geometrischen Objekten in das CAD-System übertragen, die dem Anwender Position, Orientierung und funktionale Eigenschaften, wie z.B. optimale Höckerspitzenwinkel veranschaulichen. Es lassen sich zum einen genaue Höckerspitzenpositionen darstellen oder zum anderen eine zusammengefasste Darstellung in Form einer Aufstellkalotte. Der Unterschied zu herkömmlichen Aufstellkalotten besteht darin, dass diese individuell an den

Patienten angepasst sind und sowohl digital als auch analog, als gedrucktes Modell, in den Workflow eingebracht werden können. In diesem Modell kann der Anwender frei entscheiden, wie er die Therapie planen und umsetzen möchte.

In einem weiteren Modell kann der Okklusionsvorschlag aus Bibliothekszähnen bestehen. Das geschieht z.B. bei der Planung einer Totalprothese. Hier werden Bibliothekszähne über eine Okklusionsebene positioniert und orientiert, die der Zahnarzt an einem Kieferkammregistrator definiert hat.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

Im Rahmen dieses Vorhabens entstand ein Expertensystem für Schleifprozesse, das nach der Eingabe einiger wichtiger Daten, wie z.B. Werkstückmaterial, Soll- Oberflächengüte und -Rundheit, Endmaß, Kühlschmierstoffdaten, Spannsysteme (z.B. steif oder biegsam) Vorschläge zur Bearbeitung empfiehlt. Die Schleifwissen- Datenbank umfasst Materialdaten, Maschinen- daten, Schleif- und Abrichtwerkzeugdaten sowie Bearbeitungsparameter, die zur Ermittlung der Vorschlagsdaten dienen. Der über die Schleifwissen-Datenbank und unter Zuhilfenahme eines formelbasierten Regelwerks erstellte Vorschlag umfasst detailliert die zu verwendende Schleifscheibe (stark abhängig z.B. vom Werkstoff, der Werkstoffhärte, gewünschten Oberflächengüte, Maß- und Formgenauigkeit und Abtragsrate), als auch deren Einstellparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Zustellung, Geschwindigkeitsverhältnis, Ausfunktzeit etc.), sowie Empfehlungen zum Abrichten (Abrichter, Abrichtparameter wie Abrichttiefe, Überdeckungsgrad, Abrichtgeschwindigkeit, Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis etc.) und eine Schleifstrategie (Schruppen, Schlichten und Feinschlichten).



FH-Impuls 2016 I: Impulsprojekt IP „04 Digitalisierung in der Medizintechnik-Fertigung (DigiMed)“

EINGEHENDE DARSTELLUNG (Teil II Sachbericht zum Verwendungsnachweis)

Partnerschaft	CoHMed – Connected Health in Medical Mountains
Fachhochschule	Hochschule Furtwangen
Projekt	FH-Impuls 2016 I: Impulsprojekt 04 „Digitalisierung in der Medizintechnik-Fertigung (DigiMed)“
Förderkennzeichen	13FH5I04IA
Projektleiter	Prof. Dr. Kurt Greinwald Kronenstraße 16 78532 Tuttlingen 07461 1502 6625 kurt.greinwald@hs-furtwangen.de

INHALTSVERZEICHNIS

1	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen	2
2	Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	14
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	14
4	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses	15
5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	16
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	16
7	Literatur	17

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

F&E&I	Forschung, Entwicklung und Innovation	IAF	Institut für Angewandte Forschung
FH	Fachhochschule	IFC	Innovations- und Forschungs-Centrum Tuttlingen
FKZ	Förderkennzeichen	IP	Impulsprojekt
HAP	Hauptarbeitspaket	OP	Operationssaal
HFU	Hochschule Furtwangen	VZÄ	Vollzeitäquivalente
HSG	Hahn-Schickard-Gesellschaft	XPL	Exploratives Projekt (FH-Impuls)

1 Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow / Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Kurt Greinwald / Firmenpartner: bredent medical GmbH & Co. KG

Das Ziel dieses Projekts war es ein Software-Framework zu erstellen, das dem Anwender bei der Planung und Herstellung von Zahnersatz unterstützt. Dabei sollen patientenindividuelle Daten verschiedener Kanäle wie z.B. Kondylographie, Kephalmetrie und 3D-Daten der Ist-Situation verwendet werden, um beim Okklusionsvorschlag die Kaufunktion des Gebisses zu optimieren. Das System besteht aus vielen Einzelkomponenten, die als einzelne Ziele oder Anforderungen definiert werden. Im Folgenden werden diese dargestellt und mit der umgesetzten Entwicklung gegenübergestellt.

Die Software braucht eine grafische Benutzeroberfläche, deren Bedienung auf einer Weboberfläche basiert. Das Backend verwendet das Webframework Flask, welches auf der Programmiersprache Python basiert. Diese Entscheidung erlaubt dem Projekt eine Skalierbarkeit für die Kommerzialisierung. Das Projekt kann dahin weitergehend entwickelt werden als reine Cloud-Dienstleistung verwendet zu werden, als eigenständiges Softwarepaket oder es werden einzelne Komponenten des Systems in bestehende Softwaresysteme integriert. Die Weboberfläche ist zudem noch mit einem Datenbanksystem verknüpft. Das hilft beim Sammeln für Daten, die eine spätere Integrierung von KI-Anwendungen ermöglicht. Das im Projekt verwendete Datenbanksystem ist SQLite. Das Flask-Framework erlaubt ein einfaches Austauschen der Datenbank mit z.B. MySql oder PostgreSQL.

[Start page](#) [Input points of occlusion](#) [Condylography Data](#) [Upload 3D-Scan Data](#) [Virtual articulator](#) [Cephalometry Input](#) [Login](#)

DieDeWo Flask Dash Application

[clear cookies](#)

Select case:

24 case

[select occlusion set](#)

ID	Case Description	Delete
24	case	Delete entry
23	case	Delete entry
21	case	Delete entry
20	case	Delete entry

Abbildung 1: DieDeWo - Grafisches User Interface

Die Oberfläche (s. Abb. 1) erlaubt das Erstellen von Benutzerkonten. Jeder Nutzer kann z.B. Patientenfälle, aktuell im Projekt „cases“ genannt, erstellen. Man kann mehrere Fälle desselben Patienten erstellen. Jeder Fall bekommt eine eindeutige ID-Nummer und es können diagnostische Daten verschiedener Quellen mit diesem Fall verknüpft werden. Es handelt sich dabei

Diese Eingangsdaten werden über die Weboberfläche importiert. Über den Workflow der Software können diverse Parameter eingestellt werden und über eine vereinfachte Darstellung eine Vorschau angezeigt werden. Am Ende lässt sich der Vorschlag exportieren, sodass diese Daten in einem üblichen CAD/CAM-System zur Fertigstellung des Zahnersatzes übertragen werden können. Hierfür braucht es die passenden Schnittstellen. Für die Eingangsdaten können beim Hochladen über die grafische Oberfläche beliebige Daten importiert werden. Aktuell werden CSV, STL und PLY-Dateien unterstützt. Zur Weiterverarbeitung der Daten in üblichen CAD/CAM-Systemen werden die Formate STL und PLY verwendet.

Abbildung 2: Userinterface zum Importieren von Kondylographiedatensätzen

Zur Generierung des Gebissvorschlags werden Daten aus der Kondylographie und der Kephalometrie benötigt. Bei den kondylographischen Daten handelt es sich um Export-Datensätze des Cadiax-Systems der Firma GAMMA Medizinisch-wissenschaftliche Fortbildungs-GmbH. Systeme der Firma Zebris Medical GmbH können ebenfalls importiert werden. Diese werden jedoch über ein Tool in das Format des Cadiax-Systems konvertiert. Kephalometrische Daten werden über die Weboberfläche (s. Abb. 2) in einer Eingabemaske übertragen. Bei den 3D-Daten der aktuellen Gebissituation werden PLY-Daten verwendet. Diese verhalten sich wie STL-Daten und beinhalten darüber hinaus Farbinformationen.

Der Algorithmus zur Optimierung der Kaufunktion verwendet Höckerspitzen des Gebisses als Ausgangslage. Aus den Höckerspitzen wird die Okklusionsebene definiert. Auf dieser basierend wird die Spee'sche Kurve konstruiert, die ein grundlegendes Feature der Software darstellt. Neben dieser kann auch eine Wilsonkurve vorgeschlagen werden. Die Höckerspitzenpunkte (s. Abb. 3a) werden zusammen mit den kondylographischen Daten verwendet, um sog. F-Punkte zu konstruieren. Über die Bewegung des Unterkiefers mit den kondylographen Daten werden wichtige Endpunkte für den Oberkiefer konstruiert. Mit den kephalometrischen Daten kann berechnet werden, welche Höckerspitzenneigung ideal für die optimierte Situation ist. Die

konstruierten Punkte und Kurven werden im Webinterface in einem dreidimensionalen Koordinatensystem (s. Abb.3b) dargestellt. Im Interface können verschiedene Parameter, wie z.B. die Referenzebene oder der Abstand der Eckzähne zur Okklusionsebene, welche Bestandteil zur Berechnung der Spee'schen Kurve ist, eingestellt werden.

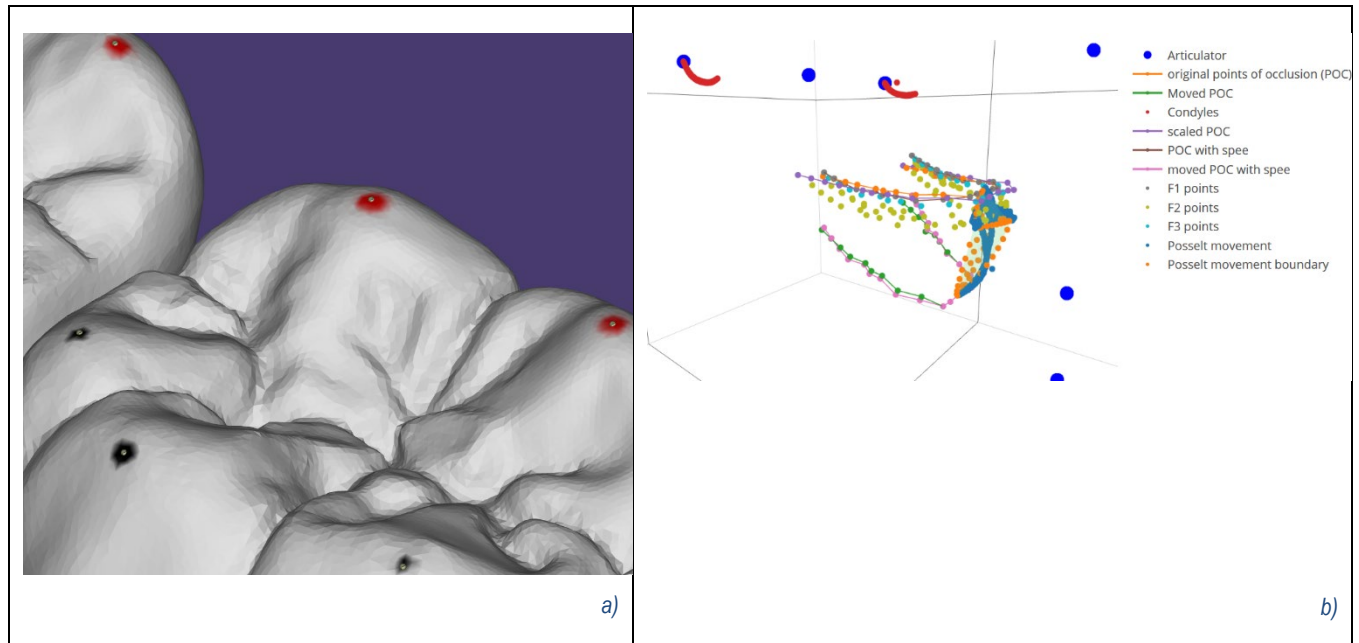


Abbildung 3: a) Darstellung von Höckerspitzen; b) Darstellung des virtuellen Artikulators im Userinterface

Die Höckerspitzenpunkte können sowohl manuell am analogen Modell vermessen werden und über eine Eingabemaske in die Software eingegeben werden oder über eine automatisierte Auswertung als 3D-Datensatz im PLY-Format hochgeladen werden. Dabei können beim Scannen des 3D-Datensatzes die Höckerspitzenpunkte im analogen Modell markiert werden oder per digitaler Nachbearbeitung in einer Software wie z.B. Blender markiert werden. Im Userinterface (s. Abb. 4) muss nur angegeben werden, welche Zähne vorhanden sind und die Software erkennt dann automatisch die Höckerspitzenpunkte und benennt diese dann. In einem weiteren Schritt kann die automatische Benennung überprüft und ggf. korrigiert werden.

Refresh

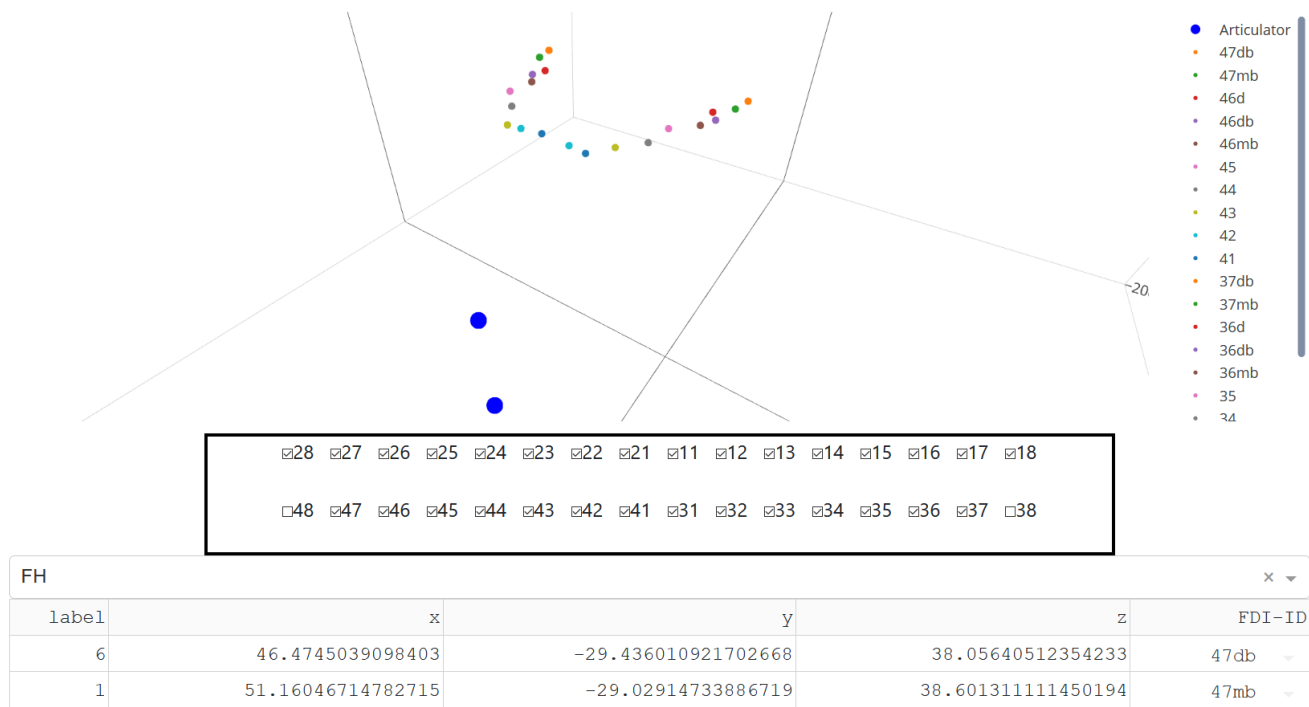


Abbildung 4: Userinterface zum Importieren von digitalisierten Gebissabdrücken

Die Ergebnisse der Gebissoptimierung werden in einfachen geometrischen Objekten (s. Abb. 3b und 5) dargestellt, die als Vorlage für den Anwender bei der Zahnersatzkonstruktion dienen sollen. Höckerspitzenpunkte können z.B. als Kugeln oder als zusammenhängender Draht dargestellt werden. Höckerspitzenneigungen werden als Kegeln dargestellt. Eine weitere Möglichkeit ist es Spee'sche Kurve und Wilsonkurve in einem Kalottenmodell zusammenzufassen. Diese sog. Aufstellkalotten sind analoge Vorlagen, die der Anwender für die Modellierung des Gebisses verwendet. Die nun digital aufgestellten Kalotten (s. Abb.6) sind individuell an den Patienten angepasst und können digital im CAD/CAM-System verwendet werden oder auch über additive Fertigung als analoges Modell benutzt werden. Über die Kondylographiedatensätze lassen sich auch sog. Poselt'sche Bewegungen (s. Abb. 3b) darstellen. Dabei handelt es sich um die Grenzbewegungen der Zahnkontakte während einer bestimmten Bewegung wie z.B. der Protrusion und Retrusion.

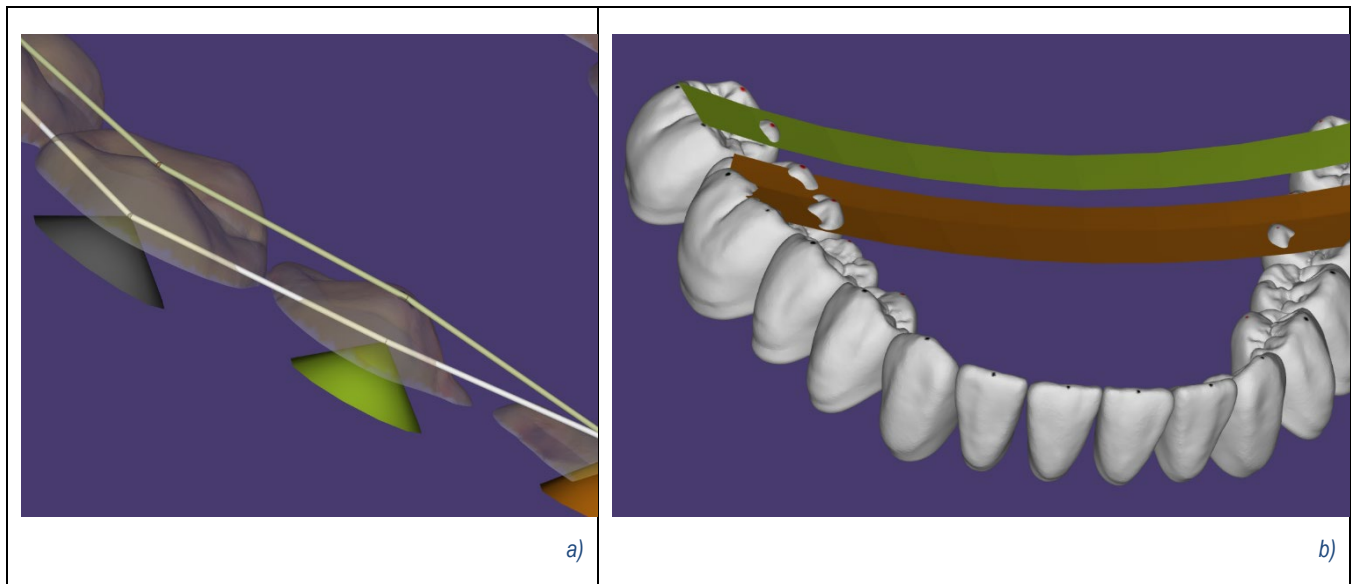


Abbildung 5: a) Okklusionsvorschlag als einfache geometrische Körper dargestellt; b) Konstruktionshilfe als digitale Aufstellklotte

Ein weiteres Feature, das die Planung unterstützen soll, gibt die Möglichkeit Kontaktstellen beim sog. Zähneknirschen dem Bruxieren in das digitale Modell zu transferieren. Hierbei wird dem Patienten über Nacht eine dünne farbbeschichtete Tiefziehfolie über sein Gebiss gezogen, die sich an den Zahnkontaktstellen abreibt (Registrierung). Dieses analoge Verfahren ist aktuell nur vom Zahnarzt und ohne weitere Hilfsmittel anwendbar. Eine digitale Auswertung mit Fotos wird aktuell von der Firma orehab minds GmbH entwickelt. Auch die letztgenannten Daten können nicht in den digitalen Workflow, also in das CAD/CAM-System übertragen werden. Im Rahmen des Projekts wurde diese Möglichkeit entwickelt. Es ist nun möglich diese Tiefziehfolien nach erfolgter Registrierung mit 3D-Scannern zu digitalisieren (s. Abb. 7a) und mit der entwickelten Software (s. Abb. 7b) auszuwerten. Die gefundenen Kontaktstellen können als STL-Dateien exportiert werden, die dann im CAD/CAM-System geladen werden können.

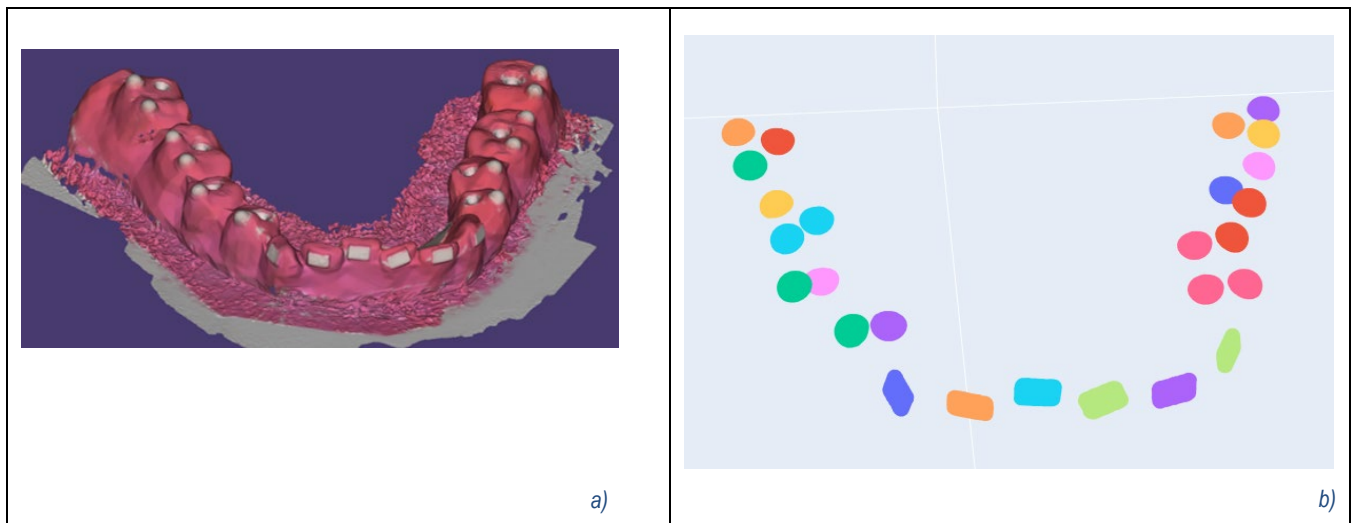


Abbildung 6: a) 3D-Scan einer Tiefziehfolie über einem selbsterstelltem Referenzmodell; b) Ergebnis der Auswertung, diese Flächen können als STL-Dateien exportiert werden

In einem weiteren Arbeitspaket wurde die Frage bearbeitet, wie man vorgeht, sollten keine Zähne vorhanden sein. Für diesen Fall muss zunächst eine Okklusionsebene definiert werden. Diese kann der Zahnarzt analog über ein sog. Kieferkammregistrat definieren. Im Kieferkammregistrat ist eine Okklusionsebene über drei Punkte definiert. Durch das digitale Markieren

dieser drei Punkte kann im System die Okklusionsebene bestimmt werden (s. Abb. 8a). Damit kann, indem man Bibliotheks-
zähne verwendet, eine Totalprothese vorschlagen, die anhand der Okklusionsebene konstruiert ist. Die Zähne dieses Gebiss-
vorschlags können zusätzlich mit einer individuellen Spee'schen Kurve sowie optional auch einer Wilsonkurve ausgerichtet
werden (s. Abb. 8b).

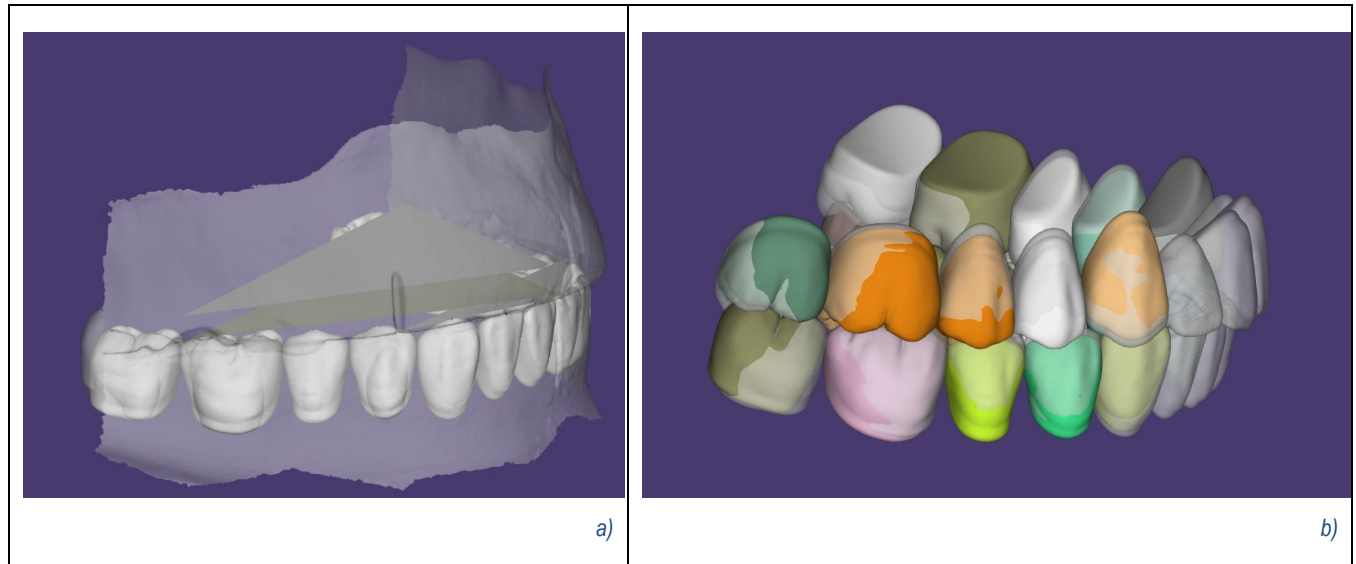


Abbildung 7: a) Automatische Ausrichtung von Bibliothekszähnen an die Okklusionsebene eines Kieferkammregistrats; b) Automatische Ausrichtung von Bibliothekszähnen an die Spee'sche Kurve

Bei fehlenden Einzelzähnen können die fehlenden Höckerspitzen interpoliert werden. Diese werden aktuell linear interpoliert, da nur einzelne Höckerspitzen interpoliert werden können. Außerdem werden nur die bukkalen Höcker interpoliert. Linguale Höcker werden nicht berücksichtigt. Diese werden separat über die Wilsonkurve definiert.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen / Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Bahman Azarhoushang / Firmenpartner: Bärhausen GmbH & Co. KG, CNC-Technik Weiß GmbH

Zunächst wurden – in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern – die Anforderungen an das zu erstellende Expertensystem ermittelt.

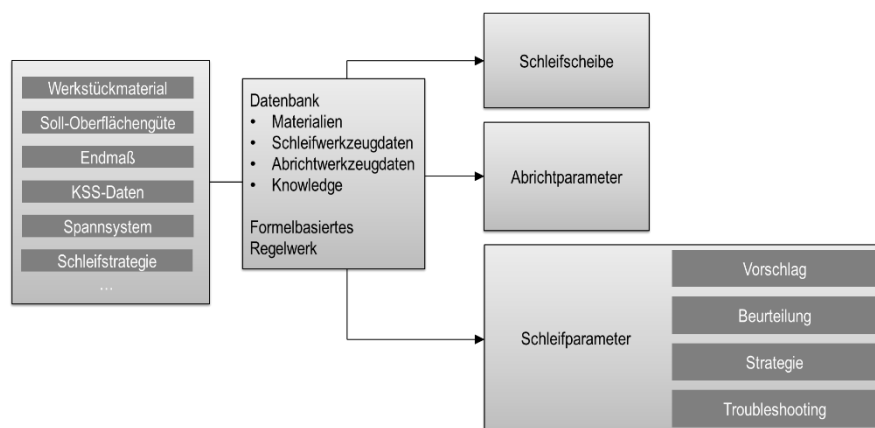


Abbildung 8: Eingabeparameter, Verarbeitung und Ausgabeparameter des Expertensystems für Schleifprozesse

Die erforderlichen Daten (Erfahrungs-, Regelwerke, Grenzwerte, Bedienkonzept...) wurden in MS Excel und einem Funktionsmodell in MS Access zusammengetragen. Nach eingehenden Recherchen wurde das Expertensystem als webbasiertes System konzipiert, das in einer Kombination von Django, Python und Ajax und einer MySQL-Datenbank besteht. Das System kann somit sowohl online, als auch auf Maschinenoberflächen betrieben werden. Per Web-Anwendung werden die Anfragen über HTTP-Requests an das Django Framework gesendet, dort erfolgt die Verarbeitung bzgl. Regelwerk und auf den Eingabedaten der User-basierten Abfragen einer MySQL-Datenbank. Die entsprechend ermittelten Daten werden ggf. in Django weiterverarbeitet und anschließend per HRRP-Response in der Web-Anwendung angezeigt. Die responsive Programmierung lässt eine Nutzung, neben der Maschinenoberfläche, auch über verschiedenste Betriebssysteme und z.B. auch Handys und Tablets zu. Das System kann durch das gewählte Konzept sowohl als Stand-Alone-Ausführung auf einem Industrie-PC unmittelbar auf Produktionsmaschinen, auf einem Server bei einem Maschinenhersteller und im Web als Cloudbasierte Lösung implementiert werden.

Das System wurde nach und nach um zahlreiche Module erweitert, so wurde zunächst ein Modul zur Schleifscheibenauswahl erstellt, nach und nach Module zur effektiven Durchführung von Abrichtprozessen mit den unterschiedlichsten Abrichtwerkzeugen (stehend, rotierend, Einkorn, Vielkorn, Vlies, PKD, ...) und für die Schleifverfahren Außerund- (Längs, Einstech), Innenrund- (Längs, Einstech), Flach (Pendel, Tief) und Spitzenlosschleifen (Durchgangsschleifen) jeweils die Module Vorschlag, Beurteilung, Strategie und Troubleshooting ergänzt. Alle Module wurden zunächst für Stahlwerkstoffe programmiert und iterativ viele weitere Werkstoffe (Edelstahl, Nickel- und Kobaltbasierte Legierungen, Titanlegierungen, Aluminium, Hartchrom, Hartmetall, WC-CoCr, Al₂O₃-Keramik, Cr₂O₃-Keramik und Gummi) ergänzt.

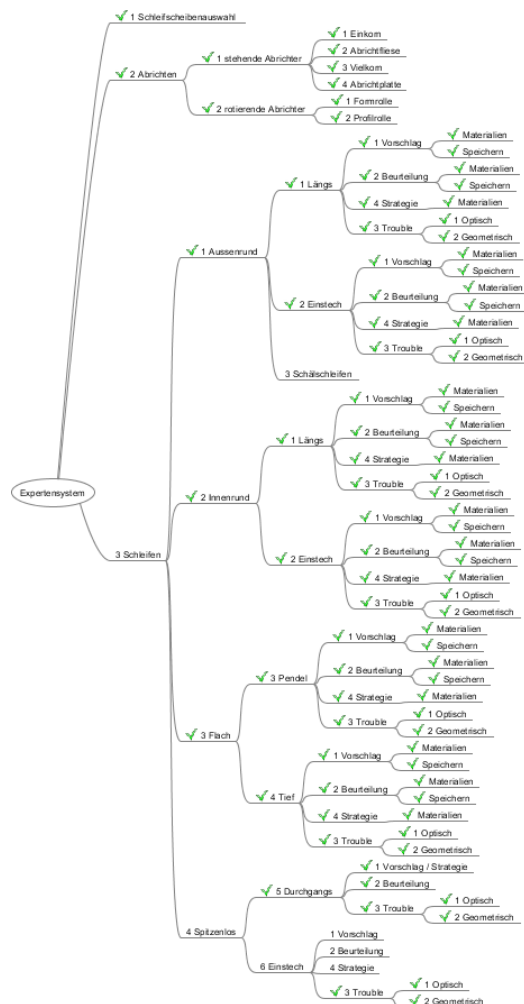


Abbildung 9: Übersicht über die Module des Schleif-Expertensystems

Durch die Modularität des Systems ist für den Anwender die Möglichkeit eines einfachen Einstiegs in diese neue Technologie gegeben.

Nach einem Schleifprozess ermittelte Fehler sind in vielen Fällen nur schwer zu erkennen. Zur Ermittlung der Fehlerursache ist ein großes Knowhow erforderlich, was oft zu langfristigem Stillstand der betroffenen Maschine führt, da zunächst ermittelt werden muss, ob die Maschine, das Werkzeug oder die Parameter die Fehlerquelle waren. Erstmalig wurde deshalb in die intelligente Datenbank ein Troubleshooting-Modul integriert, das nach der Messung oder über Usereingaben Hinweise zu den möglichen Ursachen und Empfehlung zu deren Behebung gibt. Das Troubleshooting-Modul enthält Bilder zu den unterschiedlichen Störungen und im Vergleich dazu guten Schliffbildern. Über die Abfrage von Parametern wird sichergestellt, ob die vom Bediener ausgewählte Vorauswahl der Störung tatsächlich vorliegt. Z.B. bei den Vorschubspuren ob der Abstand der Spuren gleich dem Vorschub pro Umdrehung des Werkstücks entspricht, ansonsten kann es sich nicht um Vorschubspuren handeln. Anschließend werden Vorschläge zur Behebung/Beseitigung des Problems angezeigt.

Die Module wurden sehr ergonomisch gestaltet. Eingaben werden auf Plausibilität überprüft und Parameter-Grenzwerte eingehalten. Zahlreiche Infofelder und Hinweise erleichtern das Eingeben der Prozessdaten und versetzen somit auch ungelehrte Bediener in die Lage, das System zu bedienen. Das System trifft selbstständig Entscheidungen. Da ungelehrte Bediener nicht in der Lage sind, die Vorschlagparameter nachzuvollziehen, wurden Parameter-Grenzwerte und Hinweise implementiert, so dass Fehleingaben nicht zu gefährlichen Betriebszuständen führen.

Im Folgenden wird eine Auswahl der einzelnen Module detaillierter beschrieben:

Nach der Eingabe/Auswahl der Parameter für den Schleifscheibentyp (Schleifprozess, Abtragsrate, Material und Härte, zu erzielende Werkstückrauheit und KSS) erfolgt ein Vorschlag für prozessgeeignete Schleifscheiben (Korn, Körnung, Härte, Gefüge und Porosität (**Abbildung 10**).

Abbildung 10: Schleifscheibenauswahl und empfohlene Schleifscheibenspezifikationen

Im Bereich Abrichten werden zunächst Empfehlungen bzgl. stehender und rotierender Abrichter gegeben. Nach deren Auswahl (Abrichtertyp kann auch selbst ausgewählt werden) erfolgt die Eingabe der Abrichtparameter, Schleifscheibenspezifikation und Prozessbedingungen (Abtragsrate, Schleifscheibengeschwindigkeit und einiger abrichterspezifischer Eingaben). Aus diesen ermittelt das System geeignete Abrichtparameter (**Abbildung 11**).

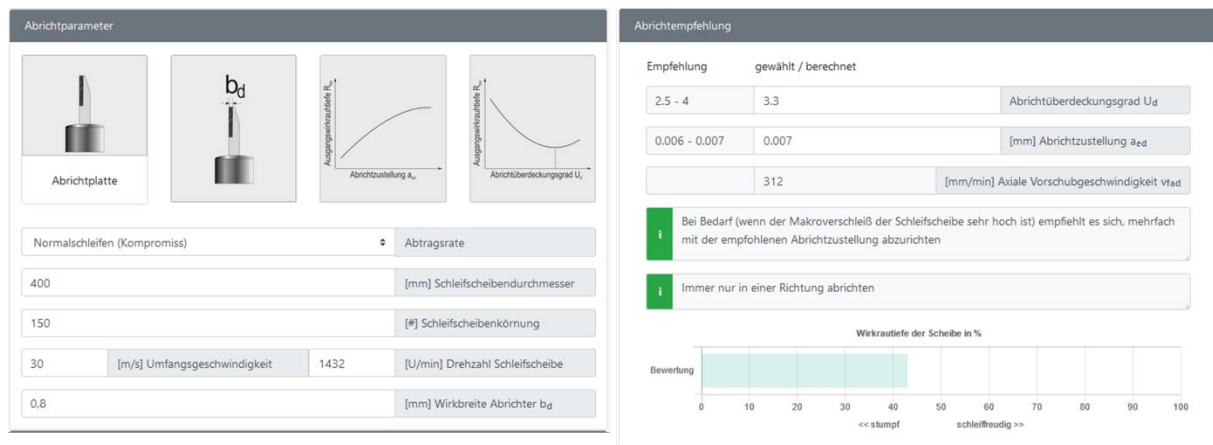


Abbildung 11: Abrichten: vorgeschlagene Abrichtparameter und Bewertung der Wirkrautiefe der Scheibe

Der Bereich Schleifen gliedert sich nach der Auswahl des betreffenden Schleifprozesses in vier Auswahloptionen (Abbildung 12).

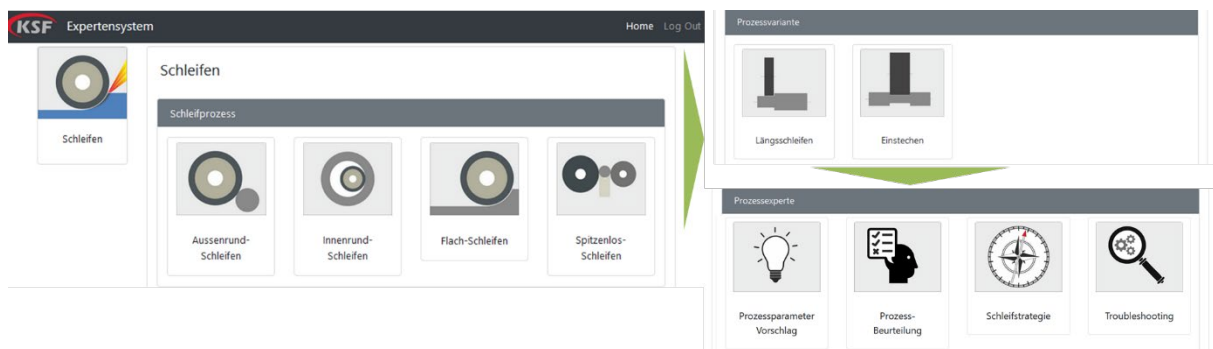


Abbildung 12: Schleifen und Auswahl des Schleifexperten

Über die erste Option „Prozessparameter/Vorschlag“ kann, nach Eingabe der Prozessparameter, wie Abtragsrate, Schleifscheibenbreite, Schleifscheibendurchmesser und Werkstückabmessungen eine Empfehlung für die Schleifparameter angezeigt werden (Abbildung 13).

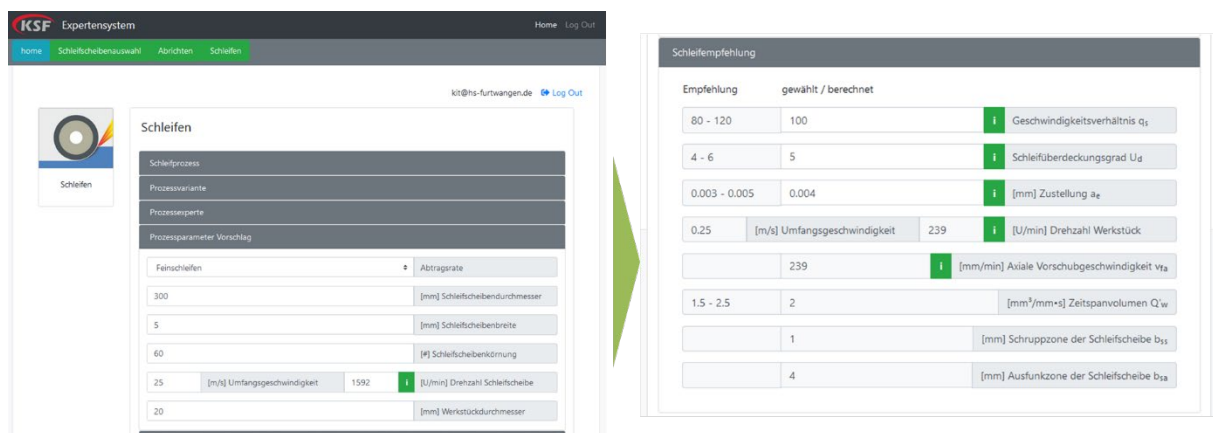


Abbildung 13: Prozessparameter Vorschlag für Schleifprozesse

Die Option „Prozessbeurteilung“ gibt Hinweise zu den Parametern eines über den Bediener eingegebenen (bestehenden) Prozess (**Abbildung 14 links**) und ggf. Hinweise zu ungeeigneten Schleifparametern (rechts).

Prozessbeurteilung			
400		[mm] Schleifscheibendurchmesser	
30		[mm] Schleifscheibenbreite	
150	[#] Schleifscheibenkörnung	82	[µm] ca. Schleifscheibenkörnung
30	[m/s] Umfangsgeschwindigkeit	1432	[U/min] Drehzahl Schleifscheibe
50		[mm] Werkstückdurchmesser	
0,25	[m/s] Umfangsgeschwindigkeit	95	[U/min] Drehzahl Werkstück
500		[mm/min] Axiale Vorschubgeschwindigkeit v_a	
0,005		[mm] Zustellung a_w	

Auswertung	
120	Geschwindigkeitsverhältnis q_p
Parameter für Feinschleifen. Erreichbare Abtragsraten sehr begrenzt aber gute Form- und I	
Schleißbrandgefahr	
5.7	Schleißüberdeckungsgrad U_d
Parameter für Feinschleifen. Gute Oberflächengüte, Prozesszeit lang	
0.005	[mm] Zustellung a_e
Parameter für Feinschleifen	
1.24	[mm³/mm·s] Zeitspanvolumen Q_w
5.26	[mm] Schruppzone der Schleifscheibe b_{sk}
24.74	[mm] Ausfunkezone der Schleifscheibe b_{sa}

Abbildung 14: Beurteilung von Schleifprozessen

Über den Menüpunkt „Schleifstrategie“ lassen sich jeweils Vorschläge für eine mehrstufige Prozessführung anzeigen. Der Prozess wird nach Eingabe der Prozessparameter (**Abbildung 15**) in mehreren Stufen, bestehend aus Abrichten, Schruppen, Schlichten und ggf. Feinschlichten und Ausfunken (je nach geforderter Rauheit, Formgenauigkeit und Prozessstabilität), untergliedert. Nach der ersten Schleif-Prozessstufe wird in jeder weiteren Stufe jeweils u. a. der Radialvorschub bzw. das Zeitspanvolumen und die Werkstückdrehzahl reduziert, bis das Endmaß erreicht ist (**Abbildung 16**). Durch dieses Vorgehen können die vorgegebenen Maß- und Formgenauigkeiten sowie Oberflächenqualitäten erreicht werden.

Prozessparameter Strategie			
Stahl		Materialgruppe	
cBN (keramische Bindung)		Schleifmittel	
400		[mm] Schleifscheibendurchmesser	
30		[mm] Schleifscheibenbreite	
150	[#] Schleifscheibenkörnung	107	[µm] ca. Schleifscheibenkörnung
50	[m/s] Umfangsgeschwindigkeit	2387	[U/min] Drehzahl Schleifscheibe
50		[mm] Werkstückdurchmesser	
0,25		[mm] Werkstückaufmaß (Radius)	
mittel		Anforderungen Rauheit	
mittel		Anforderungen Formgenauigkeit und Stabilität	

Abbildung 15: Eingabe der Prozessparameter für die Bereitstellung der Schleifstrategie eines Außenrundeinstechschleifprozesses

Strategieempfehlung			
Abrichtparameter			
Überdeckungsgrad U_a	3 bis 5		
Abrichtzustellung a_{ed}	2 ± 0.003 bis 0.004	[mm]	
Geschwindigkeitsverhältnis q_d (nur für rotierende Abrichter)	$+0.6$ bis $+0.8$		
Schleifparameter			
Schruppen			
Aufmaß	0.25 bis letzte 0.03	[mm]	
Geschwindigkeitsverhältnis q_d	50 bis 60		
Umfangsgeschwindigkeit Werkstück v_w	0.63 bis 1	[m/s]	
Drehzahl Werkstück n_w	317 bis 382	[U/min]	
Radiale Vorschubgeschwindigkeit v_r	1.3 bis 2.6	[mm/min]	
Zeitspanvolumen Q_{zW}	3.4 bis 6.8	[mm ³ /mm·s]	
Prozesszeit t	5.1 bis 10.2	[s]	
Schlichten			
Aufmaß	0.03 bis 0.01	[mm]	
Geschwindigkeitsverhältnis q_d	80 bis 100		
Umfangsgeschwindigkeit Werkstück v_w	0.5 bis 0.63	[m/s]	
Drehzahl Werkstück n_w	191 bis 241	[U/min]	
Radiale Vorschubgeschwindigkeit v_r	0.26 bis 0.97	[mm/min]	
Zeitspanvolumen Q_{zW}	0.68 bis 2.55	[mm ³ /mm·s]	
Prozesszeit t	1.2 bis 4.6	[s]	
Feinschlichten			
Aufmaß	letzte 0.01	[mm]	
Geschwindigkeitsverhältnis q_d	110 bis 130		
Umfangsgeschwindigkeit Werkstück v_w	0.38 bis 0.45	[m/s]	
Drehzahl Werkstück n_w	145 bis 172	[U/min]	
Radiale Vorschubgeschwindigkeit v_r	0.04 bis 0.31	[mm/min]	
Zeitspanvolumen Q_{zW}	0.1 bis 0.8	[mm ³ /mm·s]	
Prozesszeit t	1.9 bis 15	[s]	
Ausfunktun			
Geschwindigkeitsverhältnis q_d	110 bis 130		
Umfangsgeschwindigkeit Werkstück v_w	0.38 bis 0.45	[m/s]	
Drehzahl Werkstück n_w	145 bis 172	[U/min]	
Anzahl Werkstückumdrehungen	bis 15	[U]	
Prozesszeit t	bis 5	[s]	

Abbildung 16: Schleifstrategievorschlag für eine Außenrund-Einstech-Schleifprozess

Über die Option „Troubleshooting“ können die Ursachen für gegebene Schleiffehler (optisch und geometrisch) ermittelt werden. Für die Verfahren Außenrundscheifen, Innenrundscheifen, Flach- und Spitzenlosscheifen sind Troubleshooting-Maßnahmen integriert, die verfahrensspezifische Hinweise zur Beseitigung der wahrscheinlich vorliegenden Probleme geben und somit die Korrektur des spezifischen Schleifprozesses zur Erzielung optimaler Schleifergebnisse ermöglichen. **Abbildung 17** zeigt das Troubleshootingmodul für das Außenrundscheifen.

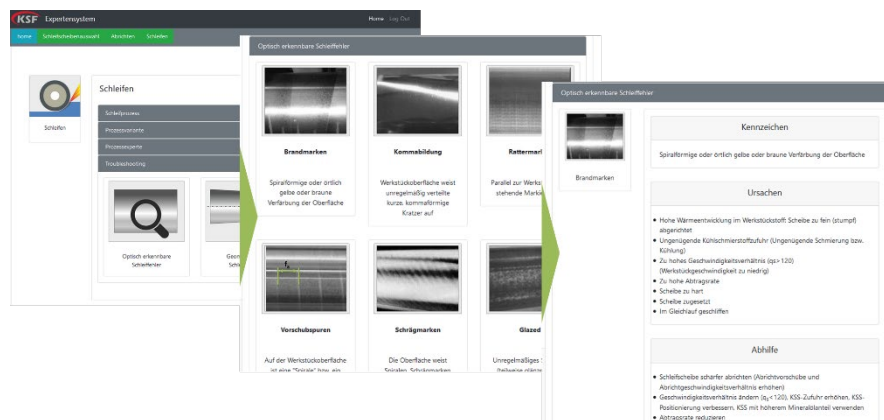


Abbildung 17: Troubleshooting für optische Schleiffehler beim Außenrundscheifen

Um das entwickelte Schleifexperten-Programm zu validieren, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Die Ergebnisse waren durchweg sehr positiv. Als Beispiel wird hier die Optimierung eines Außenrundscheifprozesses über den Schleifexperten dargestellt.

Die folgenden Untersuchungen wurden auf eine Studer S40 Außenrundlängsschleifmaschine durchgeführt

Vor der Optimierung wurde der Schleifprozess mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Abrichten:
Abrichtzustellung $a_{ed} = 3 \times 8 \mu\text{m}$
Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis $q_d = -0,4$

Abrichtvorschubgeschwindigkeit $v_{fad} = 130 \text{ mm/min}$

Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit beim Abrichten $v_{cd} = 30 \text{ m/s}$.

- Schleifen:
Schruppen (bis 0,05 mm Aufmaß):
Schnittgeschwindigkeit $v_c = 30 \text{ m/s}$
Werkstückdrehzahl $n_w = 145 \text{ UpM}$
Axialvorschub $v_{fa} = 1.500 \text{ mm/min}$
Zustellung $a_e = 10 \text{ }\mu\text{m}$.
Schlichten (bis Endmaß):
Schnittgeschwindigkeit $v_c = 30 \text{ m/s}$
Werkstückdrehzahl $n_w = 145 \text{ UpM}$
Axialvorschub $v_{fa} = 300 \text{ mm/min}$
Zustellung $a_e = 5 \text{ }\mu\text{m}$.
Ausfunken:
10 HÜbe.
- Erzielte Oberflächenrauheit nach dem Schleifen:
 $R_z = 1,6\text{-}2 \text{ }\mu\text{m}$.

Der Prozess wurde durch die Optimierung über den Schleifexperten wie folgt verändert:

- Abrichten:
Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit beim Abrichten: 45 m/s (Maximum der Maschine)
Abrichtzustellung $a_{ed} = 2 \times 4 \text{ }\mu\text{m}$
Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis $q_d = +0,5$ (Gleichlauf)
Abrichtüberdeckungsgrad $U_d = 3$.
- Schleifen:
Schruppen (bis letzte 0,02 mm Aufmaß):
Schnittgeschwindigkeit $v_c = 45 \text{ m/s}$ (Maximum der Maschine)
Werkstückdrehzahl $n_w = 650 \text{ UpM}$
Axialvorschub $v_{fa} = 7.500 \text{ mm/min}$
Zustellung $a_e = 5 \text{ }\mu\text{m}$.
Schlichten (bis Endmaß):
Schnittgeschwindigkeit $v_c = 45 \text{ m/s}$
Werkstückdrehzahl $n_w = 250 \text{ UpM}$
Axialvorschub $v_{fa} = 800 \text{ mm/min}$
Zustellung $a_e = 2,5 \text{ }\mu\text{m}$.
Ausfunken:
2 HÜbe.
- Erzielte Oberflächenrauheit nach dem Schleifen:
 $R_z < 1,5 \text{ }\mu\text{m}$.

Durch die Optimierung mithilfe des Schleifexperten konnte die Prozesszeit über 70 % reduziert werden. Gleichzeitig wurde eine feine und sehr gleichmäßige Oberflächenrauheit erzielt, die auf $R_z < 1,5 \text{ }\mu\text{m}$ verbessert wurde.

Es entstand im Rahmen dieses Vorhabens ein Expertensystem für Schleifprozesse, das nach der Eingabe einiger wichtiger Daten, wie z.B. Werkstückmaterial, Soll- Oberflächengüte und -Rundheit, Endmaß, Kühlschmierstoffdaten, Spannsysteme

(z.B. steif oder biegsam) Vorschläge zur Bearbeitung empfiehlt. Die Schleifwissen- Datenbank umfasst Materialdaten, Maschinendaten, Schleif- und Abrichtwerkzeugdaten sowie Bearbeitungsparameter, die zur Ermittlung der Vorschlagsdaten dienen. Der über die Schleifwissen-Datenbank und unter Zuhilfenahme eines formelbasierten Regelwerks erstellte Vorschlag umfasst detailliert die zu verwendende Schleifscheibe (stark abhängig z.B. vom Werkstoff, der Werkstoffhärte, gewünschten Oberflächengüte, Maß- und Formgenauigkeit und Abtragsrate), als auch deren Einstellparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Zustellung, Geschwindigkeitsverhältnis, Ausfunkzeit etc.), sowie Empfehlungen zum Abrichten (Abrichter, Abrichtparameter wie Abrichttiefe, Überdeckungsgrad, Abrichtgeschwindigkeit, Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis etc.) und eine Schleifstrategie (Schruppen, Schlichten und Feinschlichten).

Das Expertensystem wurde mit Abschluss des Vorhabens so weit entwickelt, dass Schleifmaschinenhersteller diesen in die Bedienoberflächen von Schleifmaschinen integrieren können. Ein Export der Vorschlagsparameter ermöglicht den Austausch der Parameter mit herkömmlichen Bedienprogrammen.

2 Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

In diesem Projekt sind maßgeblich nur Personalkosten für den wissenschaftlichen Mitarbeiter (TVL-13) angefallen, die zur Erfüllung des Projekts notwendig gewesen sind sowie geringfügige Reisekosten.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

Für das Projekt wurden Personalkosten für wissenschaftliche Mitarbeiter und Hiwis ausgegeben. Sachmittel oder Investitionen wurden nicht getätigt.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

Für die Entwicklung des virtuellen Artikulators mit allen im Projekt angefallen Features und den Möglichkeiten zur Integration Datensätze verschiedener Quellen waren die beantragten Mittel notwendig. Die Abstimmung mit den Projektpartnern sowie die Vergabe und Betreuung von Projektarbeiten zu dem Thema, die in das Projekt eingeflossen sind, waren ebenfalls sehr zeitaufwendig. Die allokierten Projektkosten waren zusammenfassend in Bezug auf die Arbeitsinhalte stimmig und die zugewiesenen Mittel notwendig für eine zielgerichtete Umsetzung der Inhalte.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

Das Projekt war mit erheblichem Ressourceneinsatz und Zeitaufwand verbunden. Die Hochschule sorgte hier über die Grundfinanzierung für den Betrieb aktueller Geräte, für Räume, Infrastruktur und Arbeitsplätze, verfügt aber über keine eigenen Ressourcen, um das Projekt in der skizzierten Form durchzuführen. Eine Förderung mit öffentlichen Mitteln war daher notwendig und die gemäß Antrag durchgeführten Arbeiten auch angemessen, um dem Projektziel näher zu kommen.

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

Nach dem Verwertungsplan aus der Vorhabensbeschreibung war es geplant einen Prozess zu entwickeln, der sich zu einem vermarktbaren Produkt weiterentwickeln lässt. Die Ergebnisse des Projekts sollen bei der Planung von Zahnersatz unterstützen. Ein Kauffunktionstest sollte auch die Wirksamkeit einer solchen Therapie nachweisen können. Die Anwendung eines Kauffunktionstests sowie eine interne Nutzung bei der Produktentwicklung von Zahnersatz kann bereits durchgeführt werden. Die Weiterentwicklung zum kommerzialisierten Produkt ist der nächste Schritt.

Im Projekt wurde ein solcher Prozess entwickelt, welcher viele Schritte einer Therapieplanung hinsichtlich Kauffunktion automatisiert unterstützt, bei der sonst viele aufwendige manuelle Schritte nötig wären. Die Projektergebnisse werden zunächst intern beim Projektpartner bei der Produktentwicklung von Zahnersatz verwendet. In dieser Phase werden Erfahrungen gesammelt, die für eine weitere Kommerzialisierung verwendet werden können. Ein solches kommerzialisierbares Produkt kann entweder als eigenständige Software verkauft werden oder mit einem Lizenzmodell in einer bestehenden Software-Suite integriert werden. Wenn aus der internen Verwendung der entwickelten Software, Zahnersatz entsteht, kann die Wirksamkeit in Studien mit einem Kauffunktionstest untersucht werden. Die im Projekt erreichten Ergebnisse stehen im Einklang mit dem in der Vorhabensbeschreibung erklärtem Verwertungsplan.

Zur Weiterentwicklung als eigenständige Software gab es Gespräche mit der Firma exocad GmbH. Darüber hinaus sind Gespräche mit dem Kondylographenhersteller Zebis Medical GmbH geplant. Da die Software auch Daten dieser Firmen importieren kann, sind Gespräche über eine mögliche Kooperation für eine Kommerzialisierung geplant. Folgeprojekte aus diesen Kooperationen können eine Therapieplanung sinnvoll unterstützen.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

Aus dem Schleifexperten können durch weitere Projekte Experten für andere Zerspanprozesse, Hybridprozesse (z.B. laserunterstütztes Schleifen) oder auch das Erodieren entstehen. Das Assistenzsystem kann als Unterstützungssystem für die Fertigung individualisierter medizintechnischer Komponenten eingesetzt werden. Insbesondere in der Medizintechnik ist die Anzahl der Produkte aufgrund der Individualisierung (z.B. bei Implantaten) und auch der unterschiedlichsten Instrumententypen sehr vielfältig. Zusätzlich werden sehr viele unterschiedliche Werkstoffe, wie Edelstähle, Titan, ... eingesetzt, die unterschiedliche Bearbeitungsstrategien erfordern. Das System ermöglicht eine fehlerfreie Fertigung auch von Einzelstücken und unter gegebenen Anforderungen und auch bei Materialien, die dem Maschinenbediener bei der Schleifbearbeitung bisher unbekannt sind.

Durch das Vorhaben wurden die Voraussetzungen für die Konzeption, Entwicklung und Realisierung neuer Produkte der Industriepartner geschaffen, welche konkrete Anforderungen aus den neuesten technologischen Entwicklungen adressieren und deshalb für potenzielle Anwender wirtschaftlich attraktiv sind.

Bärhausen GmbH & Co. KG und CNC-Technik Weiß GmbH können die gewonnenen Erkenntnisse für die Konzeption, Entwicklung und Optimierung von neuen Produktgenerationen (Schleifmaschinen, intelligenten Schleifwerkzeugen) bzw. für gänzlich neuartige Geschäftsmodelle (z.B. anwendungsabhängige Bezahlmodelle) nutzen.

Für das KSF stellt das Vorhaben eine ausgezeichnete Basis für weitere Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Prozessdatenerfassung und -analyse dar. Konkret kann die Rückkopplung der Ergebnisse aus der Pre-, Online- und Post-Prozessmesstechnik auf die Regelbasis weiterentwickelt und so eine automatisierte Optimierung der Prozessergebnisse erzielt werden. Es wurde am KSF bereits mit einem weiteren Projekt („DQ-MeisterIn“, Carl-Zeiss-Stiftung) begonnen, in dem die aus dem Schleifexperten entnommenen Parameter für die für eine Weiterentwicklung des Schleifexperten mit künstlicher Intelligenz

erforderlichen umfangreichen Schleifversuche durchgeführt und mit Sensorik (auf Basis von Rasperry Pies und Siemens Edgebox) automatisiert ausgewertet werden.

Der Schleifexperte wird auch in der Lehre und in Studentenprojekten, Bachelor- und Masterarbeiten eingesetzt.

5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

Es sind keine Arbeiten bekannt, die dem Vorhaben ähneln bekannt. CAD/CAM-unterstützte Zahnrestaurationen mit Hinblick auf die Funktion sind ebenfalls nicht bekannt. Die Arbeiten von Mehl mit dem Biogenerischen Zahn und dem Biokiefer nutzen Machinelearning Methoden zum Berechnen eines sog. „Durchschnittszahns“, der dann an die vorliegenden Gegebenheiten angepasst wird. Bei diesem Vorgehen werden anatomische Mittel berechnet. Eine klare Rückführung auf funktionale Parameter ist hier nicht gegeben.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

Auch nach Abschluss des Projektes finden sich weiterhin lediglich einige Apps von Schleifscheibenherstellern, die Vorschläge für die jeweils firmenspezifischen Schleifscheiben nicht allgemeingültig geben.

Weiterhin wurden entsprechend dem aktuellen Stand der Technik immer noch lediglich Lösungsvorschläge und Richtlinien zur Erstellung von Expertensystemen veröffentlicht. Diese basieren weiterhin rein auf Berechnungen, die bisher in der Praxis nicht validiert wurden und enthalten keine Datenbank mit praktischen Erfahrungswerten

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Hauptarbeitspaket 1: Digitaler evidenzbasierter dental Workflow

Es ist eine Veröffentlichung zum Thema „Registrierung von Bruxierstellen in den digitalen Workflow“ in Arbeit. Hierbei sollen verschiedene Digitalisierungsmethoden gegenübergestellt und mit der oben vorgestellten Auswertungssoftware verglichen werden. Die Veröffentlichung soll noch im Frühjahr 2023 erscheinen.

Hauptarbeitspaket 2: Erarbeitung von intelligenten Lösungen zur regelbasierten Parameterwahl und -optimierung von komplexen Zerspanprozessen

Im Rahmen der Projektarbeiten sind folgende drei Veröffentlichungen entstanden:

- Bahman Azarhoushang, Heike Kitzig-Frank „Expertensystem für Schleifprozesse“, Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung - Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis; 13. Seminar, 2021, pp. 4d-1-4d-11, 2021, ISBN 978-3-9821211-9-2
- Bahman Azarhoushang, Heike Kitzig-Frank „Grinding Expert: entscheidende Unterstützung für die Schleiftechnologie“, Schleifen und Polieren, 25.2021(4), pp. 18-23, 2021

- Bahman Azarhoushang, Heike Kitzig-Frank: „Optimieren und Beherrschen der Schleiftechnologie durch den Grinding-Expert“, Jahrbuch Schleifen Honen, Läppen und Polieren – Verfahren und Maschinen, Hrsg. Hans-Werner Hoffmeister, Berend Denkena, 2022, pp. 257-272, ISBN 978-3-8027-3176-1

7 Literatur

- [1] G. Slavicek, M. Soykher, H. Gruber, P. Siegl und M. Oxtoby, "A novel standard food model to analyze the individual parameters of human mastication," *J. Stomat. Occ. Med.*, Jg. 2, Nr. 4, S. 163–174, 2009, doi: 10.1007/s12548-009-0029-5.
- [2] G. Slavicek, "Okklusion im Schatten Evidenz basierter Medizin," *Stomatologie*, Jg. 106, Nr. 2, S. 17–22, 2009, doi: 10.1007/s00715-009-0084-y.
- [3] J. P. Lund, T. Drew und S. Rossignol, "A study of jaw reflexes of the awake cat during mastication and locomotion," *Brain, behavior and evolution*, Jg. 25, 2-3, S. 146–156, 1984, doi: 10.1159/000118860.
- [4] R. Slavicek und S. Sadao, "Bruxismus als Stressbewältigungsfunktion des Kauorgans," *Wien Med Wochenschr*, Jg. 2003, Nr. 101, 2003, Art. Nr. 4.
- [5] K. Sasaguri *et al.*, "Involvement of chewing in memory processes in humans: an approach using fMRI," *International Congress Series*, Jg. 1270, S. 111–116, 2004, doi: 10.1016/j.ics.2004.04.046.
- [6] Y. Takeuchi, T. Satoda, T. Tashiro, R. Matsushima und M. Uemura-Sumi, "Amygdaloid pathway to the trigeminal motor nucleus via the pontine reticular formation in the rat," *Brain Research Bulletin*, Jg. 21, Nr. 5, S. 829–833, 1988, doi: 10.1016/0361-9230(88)90052-4.
- [7] "Okklusion und Rehabilitation." <https://www.zm-online.de/archiv/2017/10/titel/okklusion-und-rehabilitation/> (Zugriff am: 3. Mrz. 2020).
- [8] M. Dienel, "Ein neu entdeckter Schutzfaktor vor Alzheimer-Demenz: Zahlreiche noch erhaltene Zähne-die Neuburger Demenzstudie," Jg. 8, 2006.
- [9] B. Leplow, *Parkinson* (Fortschritte der Psychotherapie 29). Göttingen: Hogrefe, 2007. [Online]. Verfügbar unter: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2864611&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- [10] U. Krueger-Janson, "Der Okklusale Kompass: Aufzeichnung der Bewegungsrichtungen des Unterkiefers und Zuordnung zu bestimmten Funktionsbereichen auf der Kaufläche," *Quintessenz*, Nr. 64, S. 413–422, 2013.
- [11] F. Hornung, G. Polzar und S. Weihe, "cranioplan®-verfahren-zur-bestimmung-der-cranialen-symmetrieebene," *Wissenschaft & Praxis*, Nr. 3, S. 8–15, 2017.
- [12] G. Slavicek, *Kephalometrie: = Cephalometry*, 1. Aufl. (Transfer-Dokumentation-Report). Stuttgart: Steinbeis-Ed, 2011.
- [13] C. Späth, "Zur Auswahl von Kauflächen aus einer Datenbank für das okklusale "Setting"-Verfahren in der Software des Cerec 3D-Systems," Dissertation, Medizinischen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald, Universität Greifswald, 1979.
- [14] A. Litzenburger, "Parametrisierung unbekannter Zahnoberflächen mittels des biogenerischen Zahnmodells,"
- [15] S. Ruge, "Zur Quantifizierung der funktionellen Okklusion – Entwicklung spezieller Analyseverfahren für den Einsatz digitaler Technologien in der Zahnmedizin," Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald, 2013.

- [16] M. Hanashima, K. Sakakibara, R. Slavicek und S. Sato, "A study regarding occlusal plane and posterior disocclusion," *J. Stomat. Occ. Med.*, Jg. 1, Nr. 1, S. 27–33, 2008, doi: 10.1007/s12548-008-0007-3.
- [17] J. Türp, K. Alt und H. Schindler, "Okklusion," 2006, S. 1–34.
- [18] M. Farella, A. Michelotti, T. Eijden und R. Martina, "The curve of Spee and craniofacial morphology: A multiple regression analysis," *European journal of oral sciences*, Jg. 110, S. 277–281, 2002, doi: 10.1034/j.1600-0722.2002.21255.x.
- [19] D. Kubein-Meesenburg, H. Naegerl, G. Meyer und W. Buecking, "Individual reconstruction of palatal concavities," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Jg. 60, Nr. 6, S. 662–672, 1988. doi: 10.1016/0022-3913(88)90394-0. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022391388903940>
- [20] D. Kubein, A. Jäger und G. Hoffmann, "Die sagittale Kompensationskurve und ihre Variation im Laufe des Lebens als Ausdruck der wachstumsbedingten Form- und Strukturveränderungen des Unterkiefers," *Fortschr. Kieferorthop.*, Nr. 47, 1986, Art. Nr. 1.
- [21] J.D. Orthlieb und R. Slavicek, "Geometrische interpretation der Spee kurve," *Stomatologie*, Jg. 82, S. 1–18, 1985.
- [22] L. F. Andrews, "The six keys to normal occlusion," *American Journal of Orthodontics*, Jg. 62, Nr. 3, S. 296–309, 1972, doi: 10.1016/S0002-9416(72)90268-0.
- [23] T. E. Shanahan, "The individual occlusal curvature and occlusion," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Jg. 8, Nr. 2, S. 230–240, 1958, doi: 10.1016/0022-3913(58)90152-5.
- [24] H.L. Page, "The occlusal curve," *Dental Digest*, S. 19–21, 1952.
- [25] Elie Amm. "Die Spee'sche Kurve – Kieferorthopädie und Realität – ZWP online – das Nachrichtenportal für die Dentalbranche." <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/kieferorthopaedie/diagnostik/die-spee-sche-kurve-kieferorthopaedie-und-realitaet> (Zugriff am: 15. Feb. 2021).
- [26] "DF0108_12-14_Mehl (Page 1),"
- [27] Scheu Dental, Hg. *Atlas Occlusion Diagnosis by BruxChecker*.
- [28] Christian Bruhn, A. Kantorowicz und Carl Patsch, Hg. *Zahnärztliche Prothetik: 3. Band Handbuch der Zahnheilkunde*, 3. Aufl. München: Verlag von J.F. Bergmann/Springer, 1930.
- [29] A. Mehl, V. Blanz und R. Hickel, "Biogeneric tooth: a new mathematical representation for tooth morphology in lower first molars," *European journal of oral sciences*, Jg. 113, Nr. 4, S. 333–340, 2005, doi: 10.1111/j.1600-0722.2005.00224.x.
- [30] K. Parlett, "Anterior Guidance: What Does It Mean To You?," *Canadian Journal of Restorative Dentistry % Prosthodontics*, Nr. 5, S. 50–57, 2012.