

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie,  
Muskuloskelettales Universitätszentrum München  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktoren:

Prof. Dr. med. Wolfgang Böcker, Prof. Dr. med. Boris Holzapfel

# Verarbeitung radiologischer Bilddaten zur Verbesserung der operativen Behandlung unfallchirurgisch-orthopädischer Patienten

Als kumulative Habilitationsschrift  
für das Fach Orthopädie und Unfallchirurgie

der medizinischen Fakultät



Vorgelegt von

Dr. med. Simon Weidert

München 2024

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>Teilprojekte der Habilitation und Bedeutung für das Fachgebiet</b>	<b>5</b>
Die Weiterverarbeitung von CT DICOM Daten zu einer 3D-Druck- Lösung für die Behandlung von Erkrankungen und Verletzungen des Skeletts	5
Entwicklung einer Methode zur Prüfung und Sicherstellung der Qualität von anatomischen 3D-Drucken zur Patientenbehandlung	11
Die Nutzung von radiologischen Bilddaten durch Augmented/Mixed/Virtual Reality zur Unterstützung von chirurgischen Eingriffen	15
Die Evaluierung von Systemen zur Röntgenbild-basierten Computer-Assisted-Surgery im realen Operationssaal	19
Die Verwendung von radiologischen Bilddaten und 3D-Druck zur Ausbildung in der Wirbelsäulenchirurgie	24
Die Nutzung von KI-Methoden und Signalanalyse zur Erweiterung der Kniegelenksdiagnostik	29
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>35</b>
<b>Anhang</b>	<b>36</b>
Originalarbeiten als Erst- oder Letztautor	36
Originalarbeiten als Co-Autor	37
Reviews	39
Bücher und Buchkapitel	39
Gesammelte Referenzen	40
<b>Danksagung</b>	<b>64</b>
<b>Abdrucke der Originalarbeiten</b>	<b>65</b>

## Einleitung

Die dem Habilitationsprojekt zugrunde liegende Idee ist die Nutzbarmachung von medizinischen (meist radiologischen) Bilddaten für die Verbesserung der Therapie im Fachgebiet Orthopädie und Unfallchirurgie. Das größte Potential für die Generierung eines Sekundärnutzens über den eigentlichen Primärnutzen dieser Daten (z.B. Röntgendiagnostik, Diagnosestellung) hinaus bietet die Weiterverarbeitung durch digitale Systeme bzw. Software. Durch den technischen Fortschritt stehen uns mittlerweile viele dazu notwendige Komponenten zur Verfügung, seien es leistungsfähige Hardware oder Softwarekomponenten, die man weiterentwickeln kann.

Die in dieser kumulativen Arbeit behandelten Forschungsprojekte basieren überwiegend auf folgenden Voraussetzungen für ihre Umsetzung:

- 1) Die medizinischen Rohdaten (z.B. Röntgenbilder oder CT (Computertomographie) / MRT (Magnetresonanztomographie)-Volumendaten) sind in großer Menge und hoher Qualität entweder bereits verfügbar, fallen bei der Behandlung der Patienten regelmäßig an oder können durch einfache technische Lösungen generiert werden.
- 2) Die technologische Lösung zur Verarbeitung der Daten, um diese für eine sekundäre Verwertung verfügbar zu machen, ist entweder bereits vorhanden, kann durch Hinzufügen eigener Softwarekomponenten erweitert oder mit vergleichsmäßig wenig Aufwand selbst entwickelt werden.
- 3) Die medizinische Expertise bezüglich des bisherigen Problems („problem owner“) sowie eine praxisnahe Lösungsvision kann durch enge Orientierung am klinischen Prozess generiert und in die Entwicklung des Projekts eingebracht werden.

Daraus resultiert die Notwendigkeit einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit zumindest der Experten von Komponente 2 und 3 sowie der Zugriff auf qualitativ und quantitativ ausreichende Rohdaten (in vielen Fällen sog. DICOM Bilddaten, ein digitales medizinisches Bilddatenformat).

Die im Laufe der Jahre und durch die Weiterentwicklung unserer Arbeitsgruppe konkret identifizierten technischen Lösungsfelder im Rahmen der beschriebenen Grundidee sind:

- 1) Die Weiterverarbeitung von CT DICOM Daten zu einer 3D-Druck-Lösung für die Behandlung von Erkrankungen und Verletzungen des Skeletts

- 2) Die Entwicklung einer Methode zur Prüfung und Sicherstellung der Qualität von anatomischen 3D-Drucken zur Patientenbehandlung
- 3) Die Nutzung von radiologischen Bilddaten durch Augmented/Mixed/Virtual Reality zur Unterstützung von chirurgischen Eingriffen
- 4) Die Evaluierung von Systemen zur Röntgenbild-basierten Computer-Assisted-Surgery im realen Operationssaal
- 5) Verwendung von radiologischen Bilddaten und 3D-Druck zur Ausbildung in der Wirbelsäulenchirurgie
- 6) Die Nutzung von KI-Methoden und Signalanalyse zur Erweiterung der Kniegelenksdiagnostik

Diese verschiedenen Fragestellungen wurden im Rahmen der Veröffentlichungen wissenschaftlich behandelt und publiziert. Dieses Manuskript soll die hier aufgeführten Arbeiten zusammenfassen und in einen Zusammenhang bringen. Dafür werden die Inhalte dieser in verständlicher Sprache zusammengefasst und mit Illustrationen versehen. Erweitert wird dies mit einer Bewertung der Ergebnisse sowie einer Einschätzung, welche Bedeutung die Arbeit für das Fachgebiet der Unfallchirurgie und Orthopädie hat.

Um die Lesbarkeit dieser Arbeit zu verbessern, werden die gesammelten Referenzen der genannten Hauptpublikationen im Anhang kumulativ aufgelistet. Sie sind ausserdem den Originalpublikationen im Anhang separat zu entnehmen. Abkürzungen werden am Ort Ihres ersten Auftretens erläutert. Zur besseren Lesbarkeit von Personenbezeichnungen & personenbezogenen Wörtern wird die männliche Form genutzt. Diese Begriffe gelten für alle Geschlechter.

## Teilprojekte der Habilitation und Bedeutung für das Fachgebiet

### Die Weiterverarbeitung von CT DICOM Daten zu einer 3D-Druck-Lösung für die Behandlung von Erkrankungen und Verletzungen des Skeletts

**Weidert S**, Andress S, Linhart C, Suero EM, Greiner A, Böcker W, Kammerlander C, Becker CA. 3D printing method for next-day acetabular fracture surgery using a surface filtering pipeline: feasibility and 1-year clinical results Int J Comput Assist Radiol Surg. 2020

Die Versorgung von Frakturen des menschlichen Skeletts erfordert vom behandelten Chirurgen zunächst das biomechanische Verständnis der individuellen Frakturmorphologie, ohne welches eine zielgenaue Versorgung etwa mittels Osteosynthese nicht gewährleistet werden kann. Dabei ist beispielsweise relevant, in welche Richtung Instabilitäten bestehen, welche Fragmente zusammenhängen, eine Reposition blockieren können und überhaupt für eine Fixierung, etwa mittels Schrauben, in Frage kommen. Anschließend kann das optimale Vorgehen geplant werden, was sowohl den operativen Zugang angeht als auch die Repositionstechnik und die Art der Fixierung. Die höchste Komplexität erreicht dieser Planungsvorgang meist bei Gelenkfrakturen, insbesondere bei multiplen Teilen oder starker Dislokation der Fragmente. Häufig sind solch komplexen Frakturen durch zweidimensionale Darstellung (CT-Schnittbilder oder gar Röntgen-Projektionsbilder) nur äußerst schwer zu erfassen. In dem Zusammenhang hat sich zur Verbesserung der Visualisierung bereits die multiplanare Rekonstruktion (die Möglichkeit, beliebige Schnittbildebenen in einem Volumendatensatz zu generieren) und die 3D-Oberflächenrekonstruktion über Raycasting etabliert. Beide Visualisierungsformen sind bisher jedoch nur auf einem Monitor verfügbar und damit nicht haptisch erfahrbar.

Durch die zunehmende Verfügbarkeit von 3D-Druck-Fertigung, welche eine schnelle und preisgünstige Erstellung von anatomischen Modellen ermöglicht, kann die Anatomie und Pathologie im realen Maßstab reproduziert werden und sowohl prä- als auch intraoperativ verfügbar gemacht werden. Unter anderem bietet sich dadurch die Möglichkeit, Frakturpositionen genauer zu planen und sogar Implantate für die spätere Operation am Modell zu konfektionieren.

Allerdings macht der Schritt vom CT-Datensatz zu einem 3D gedruckten, realistischen (Fraktur)Modell eine aufwendige Datenverarbeitung notwendig, bei der die Oberflächen der Kortikalis identifiziert werden, die Fraktur isoliert und die einzelnen Fragmente nach Eliminierung unnötiger Strukturen „geschlossen“ werden müssen, um eine 3D-Druck-Fertigung effizient zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit war es, eine neuartige Software zu entwickeln, welche die effiziente und verlässliche Generierung eines optimalen individuellen Modells von Acetabulumfrakturen ermöglicht, so dass eine Etablierung dieser Technologie in den klinischen Workflow ohne Zeitverzögerung oder massiven Personaleinsatz realistisch wird. Dabei sollen die resultierenden Modelle sowohl in kürzester Zeit druckbar sein, eine Frakturreposition ermöglichen und die Anbiegung von Rekonstruktionsplatten zur späteren Verwendung im OP (Operationssaal) ermöglichen.

Die Entwicklung dieser Software sollte eng am klinischen Endanwender erfolgen und deren Performance im Rahmen einer klinischen Pilotstudie anhand einer Fallserie von Acetabulumfrakturen erprobt und evaluiert werden.

### **Technologie:**

Die durch uns entwickelte Software fügt sich als Modul in die weit verbreitete Open-Source-Software „3D Slicer“ ein. Hiermit können CT DICOM Daten von Acetabulumfrakturen geladen, semiautomatisch segmentiert und in ein durch einen 3D-Drucker effizient fertigbares Modell umgewandelt werden. Dies wird ermöglicht durch einen neuartigen Segmentierungsprozess, der auf Frakturen und Fertigbarkeit mittels 3D-Druck optimiert ist. Um die einzelnen Fragmente bzw. die Frakturlinien zu erhalten und gleichzeitig ein kohärentes, druckbares Modell zu generieren, wurde ein spezieller Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt. Dieser bildet im ersten Schritt nach der erfolgten Grobsegmentierung nach Hounsfield Units eine Sphäre um das gesamte Modell, welche dann iterativ sich an die Kortikalis annähert und bei Vorliegen eines Frakturspaltes die entsprechenden Flächen löscht („Shrinkwrap“, siehe Abbildung 1). Das Resultat ist eine annähernd perfekte Rekonstruktion der Kortikalisstruktur mitsamt der Frakturspalten. Nach Export der STL (3D Objekt Datenformat) und Erstellung des Druckprogramms durch eine Slicer-Software kann das Modell gedruckt, die Frakturen reponiert und Implantate an die Knochenkontur angepasst werden (siehe Abbildung 2).

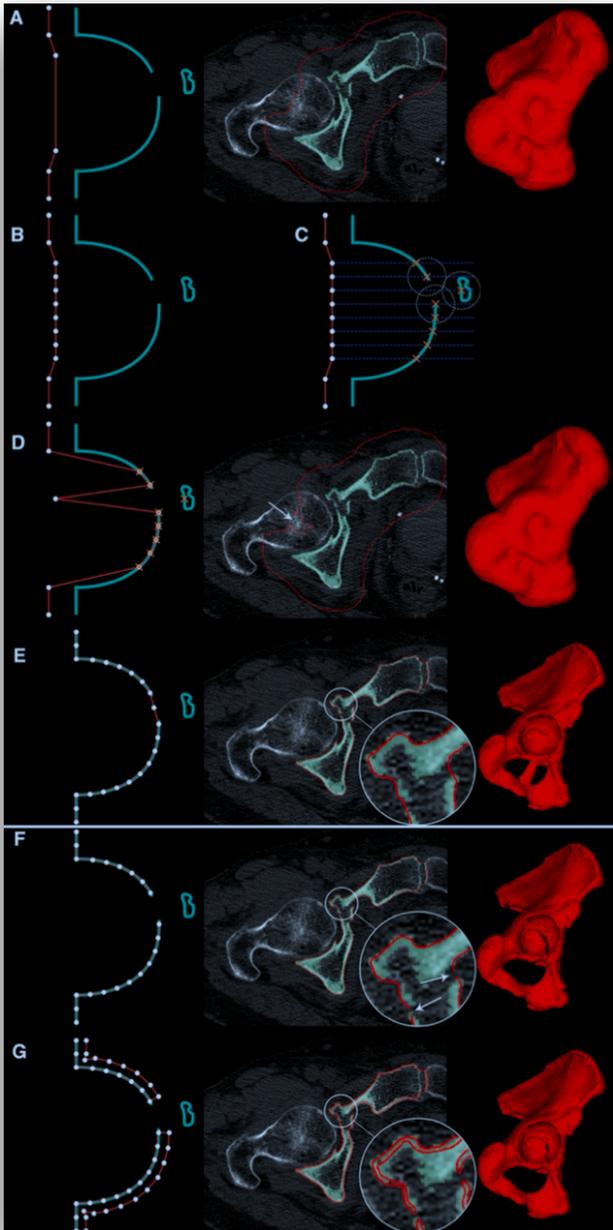


Abbildung 1: Segmentierungsprozess mit Frakturerkennung und -rekonstruktion mit Optimierung auf 3D-Druck-Fertigung



Abbildung 2: resultierendes 3D-Druck-Modell mit angebogener Rekoplatte für die OP am Folgetag

### Studienmethode:

Die von uns entwickelte Methode wurde von uns im klinischen Regelbetrieb als individuelle Planungslösung zur Vereinfachung der Operation angewendet und auch dokumentiert. So wurde die Segmentationszeit, welche mit der Erstellung des fertigen Modell-Datensatzes beendet war, notiert. Die Datei wurde anschließend in den 3D Drucker gegeben, welcher über Nacht mittels FDM (Fused Deposition Manufacturing, ein 3D-Druck-Verfahren) ein PLA (Polylaktat)-Modell produzierte. Am Folgetag wurde das Modell nachbearbeitet (manuelle Entfernung der Support-Strukturen und an den behandelnden Operateur gegeben, welcher die

Reposition erproben und an dem reponierten Modell mittels Schränkeisen eine Stahl-Rekoplatte so zurechtbog, dass sie sich optimal an die Anatomie des Patienten anpasste. Diese Platte wurde daraufhin zur Sterilisation gegeben. Am 2. oder 3. Tag nach Aufnahme erfolgte üblicherweise die Operation der Acetabulumfraktur. Es wurde in 81% der Fälle ein anteriorer Stoppa-Zugang gewählt, bei dem ein Mittellinienschnitt infraumbilikal durchgeführt und der Rectusmuskel am Ansatz einseitig inzidiert oder abgelöst wird. Bei den übrigen 18% war zur Versorgung des hinteren Pfeilers ein dorsaler Kocher-Langenbeck-Zugang notwendig. Die Reposition erfolgte dann, wenn möglich, mit Hilfe der Platte. In allen Fällen stand zusätzlich das anatomische Modell, welches in eine sterile Saugertasche gehüllt wurde, dem Operateur zur Verfügung. Ein Jahr nach operativer Versorgung wurden im Rahmen einer retrospektiven Analyse Patienten identifiziert und entsprechend der Studienparameter ausgewertet.

Um eine weitergehende technische Analyse der Performance zu ermöglichen wurden alle 3D-gedruckten Modelle in einem CT erneut digitalisiert, um den resultierenden sekundären Datensatz mit dem primären Patientendatensatz hinsichtlich der Deckungsgleichheit zu vergleichen. Zudem wurden alle Patientendatensätze mit einer herkömmlichen Methode segmentiert, um die Auswirkung unserer Methode auf die Druckzeit zu untersuchen.

### **Ergebnisse:**

Insgesamt 12 Patienten (mittleres Alter 41.2 Jahre, 4 Frauen, 8 Männer) wurden im Anschluss retrospektiv ausgewertet mit 1-Jahres-Ergebnissen in 9 Fällen, welche im Rahmen der Vorstellung in unserer unfallchirurgischen Sprechstunde dokumentiert wurden.

### **Klinische Ergebnisse:**

Die mittlere OP-Zeit betrug 3:16 h bei einem mittleren Blutverlust von 853 ml. Keiner der Patienten mit komplettiertem 1-Jahres-Kontrolltermin (n=9) musste im Laufe des Jahres revidiert werden und in allen Fällen wurde von einer knöchernen Heilung ausgegangen. Komplikationen wie Hüftkopfnekrosen oder operationspflichtige sekundäre Arthrosen traten nicht auf. Der erzielte Harris Hip Score war im Mittel 75,7 Punkte, der modifizierte Harris Hip Score 71,6 Punkte. Der mittlere Merle d'Aubigne Score war 11,1.

### **Technische Ergebnisse:**

Die semiautomatische Verarbeitung des CT-Datensatzes zu einer druckbaren STL-Datei betrug im Mittel nur 11:08 Minuten. Das resultierende optimierte Modell

konnte in einer Zeit von im Mittel 8:40 h gedruckt werden. Der Vergleich der Druckzeiten zwischen herkömmlichem Modell und dem Modell, was aus unserer Methode resultiert („Filter“), ist in den Balkendiagrammen dargestellt:

Hier zeigt sich im Schnitt eine 65%ige Reduktion der Druckzeit durch die Erstellung des optimierten Druckmodells durch Anwendung unseres Filters.

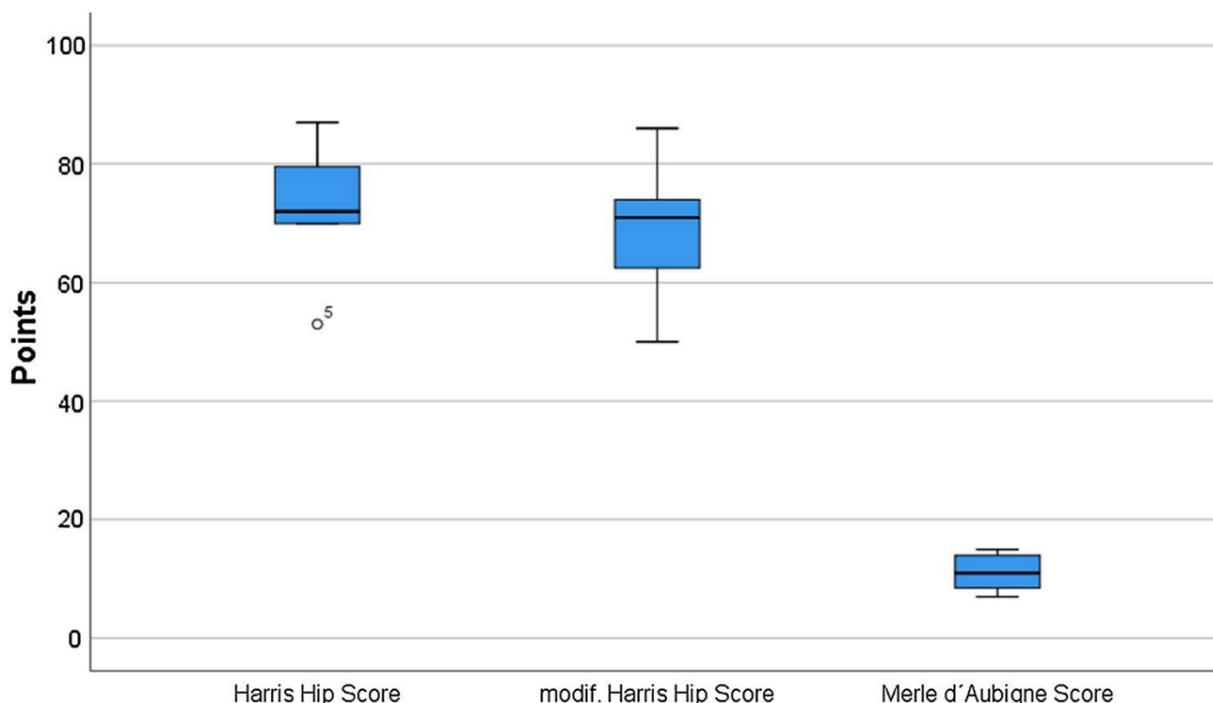


Abbildung 3: klinische Ergebnisse nach einem Jahr (Hüft-Funktions-Scores)

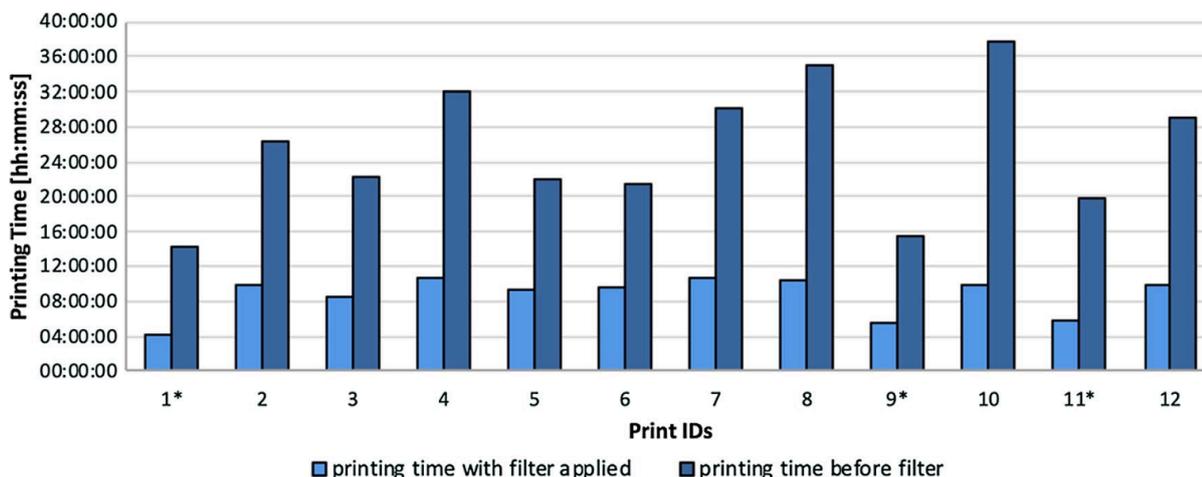


Abbildung 4: Vergleich der Druckzeiten zwischen herkömmlicher 3D-Modellerstellung und der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode (Filter)

Über den gesamten Workflow wurde aus Qualitätssicherungsgründen jeweils der notwendige Zeitbedarf dokumentiert. Die präoperative Biegezeit des Implantats betrug ca. 10 Minuten im Mittel - bis auf einen Fall machte dies die intraoperative Implantatanpassung überflüssig (siehe Abbildung 5).

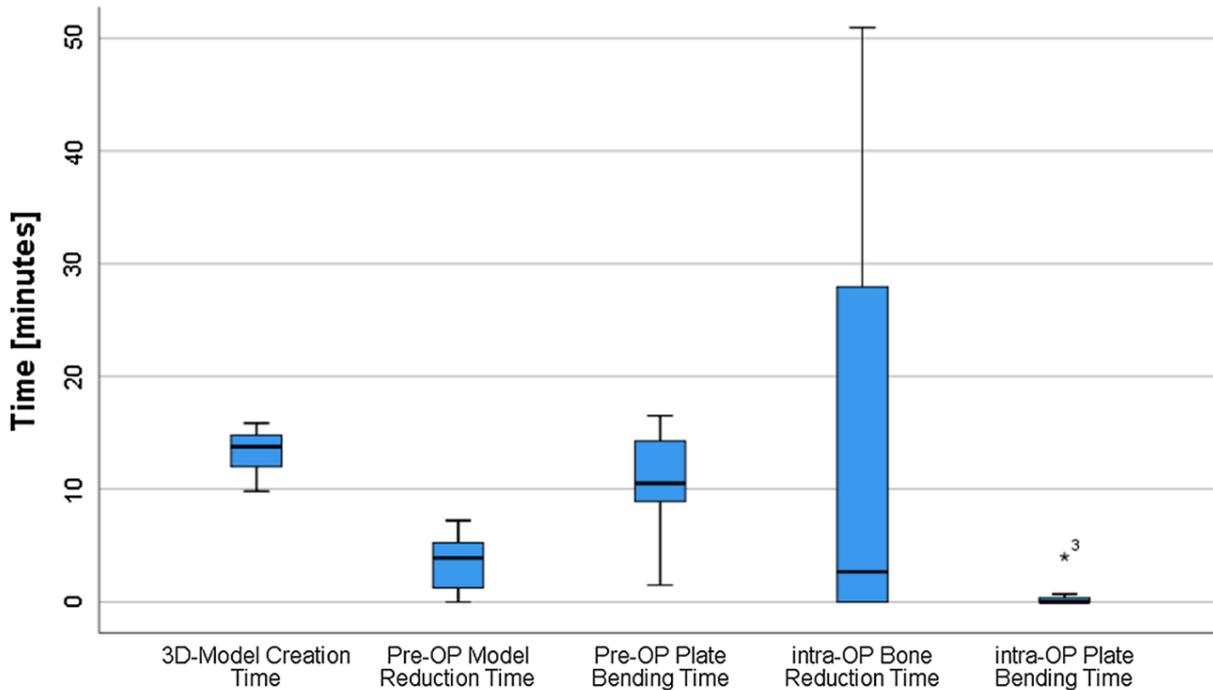


Abbildung 5: Personeller Zeitaufwand für die einzelnen Schritte des 3D-Druck-Prozesses vom CT Patientendatensatz bis hin zur Anwendung im OP

### Diskussion und Bedeutung für das Fach:

Unsere Arbeit konnte erfolgreich in der Regelversorgung von Acetabulumfrakturen integriert werden und zeigte gute klinische Ergebnisse mit minimalem Zusatzaufwand an Zeit und Kosten. Die subjektive Überlegenheit des Verfahrens hinsichtlich der Verfügbarkeit eines konfektionierten Implantats, welches die Reposition sowohl unterstützt als auch kontrolliert sowie die Einsparung der intraoperativen Biegezeit können mangels Vergleichsgruppe bisher nicht belegt werden. Dafür wäre eine prospektive kontrollierte Studie notwendig.

Das von uns entwickelte Softwaremodul wurde mittlerweile in die Standardversion der Open-Source-Software 3D-Slicer integriert und kann daher nun weltweit angewendet werden. So findet sie nun nicht nur in der Unfallchirurgie sondern bereits auch in der Orbitachirurgie Anwendung.

<https://github.com/sebastianandress/Slicer-SurfaceWrapSolidify>

## Entwicklung einer Methode zur Prüfung und Sicherstellung der Qualität von anatomischen 3D-Drucken zur Patientenbehandlung

Andreß S, Achilles F, Bischoff J, Kußmaul AC, Böcker W, **Weidert S**. A method for finding high accuracy surface zones on 3D printed bone models Comput Biol Med. 2021

Die Verwendung der 3D-Druck-Technologie bei der operativen Patientenversorgung ist in den letzten Jahren stark zunehmend. Wie bei der Etablierung jeglicher Technologie steht im Anfangsstadium stets die Innovation im Fokus, dann die Performance. Die dritte Komponente, die im weiteren Verlauf relevant wird ist die Qualitätssicherung, die sich später meist in einer entsprechenden Regulatorik wiederfindet. Wenn man den Prozess vom Patientendatensatz (meist CT) zum fertigen Modell und der darauf folgenden Patientenbehandlung anschaut, gibt es hier mögliche Fehlerquellen, welche negativen Einfluss auf das Ergebnis haben könnten. Vor allem stellt sich die Frage, inwiefern das Produkt des Prozesses, das 3D-Druck-Modell, überhaupt die Anatomie und Pathologie des individuellen Patienten realistisch wiedergibt.

Ziel dieser Arbeit war es, eine Technologie zu entwickeln welche es erlaubt, das resultierende 3D-Modell mit dem Ausgangsmodell aus dem initialen Patientendatensatz vergleichbar zu machen hinsichtlich Präzision und Deckungsgleichheit. Solche Prozesse sind in der industriellen Fertigung bereits etabliert, jedoch nicht ohne Weiteres auf die Patientenversorgung übertragbar. Insbesondere liegt dies an der Unregelmäßigkeit und individuellen Beschaffenheit der menschlichen Anatomie und der damit verbundenen Probleme, das Resultat des Prozesses mit dem „Ground Truth“ vergleichbar zu machen.

Bisher publizierte Techniken beschränkten sich darauf, Entfernungen zwischen zwei definierten anatomischen Punkten zu messen, was mit einer großen Ungenauigkeit einhergeht und nur Teilaspekte des Modells zu überprüfen vermag.

Anhand des Nutzungsbeispiels von 3D-gedruckter Patientenanatomie bei Acetabulumfrakturen sollte eine Lösung entwickelt und validiert werden.

Die besondere Herausforderung ist hierbei, dass die durch Software mögliche Registrierung der Ausgangssegmentierung auf das digitalisierte Endprodukt des 3D-Drucks zu ungenau ist und meist mehrere mögliche Ergebnisse liefert. Auch können die durch eine Registrierung beider Modelle ermittelten Abweichungen entweder Registrierungsfehler sein oder Druckfehler - diese sind nicht auseinanderzuhalten.

### Technologie und Methode:

Wir entwickelten ein Modul für die 3D-Slicer-Software (ähnlich wie in der zuverigen Arbeit aus 2020), welche eine mehrfache, zufällige Registrierung beider Modelle und die statistische Auswertung der Ergebnisse ermöglicht. Dadurch können Registrierungsfehler abgegrenzt und Zonen mit wirklichen Abweichungen (z.B. durch „morphing“ des Drucks) definiert und dargestellt werden.

Die Resultate wurden im Anschluss sowohl quantitativ als auch qualitativ hinsichtlich der Konsequenzen für ihre Anwendung in der Patientenversorgung evaluiert.

Um die Methode zu evaluieren wurden artifizielle Fehler in die Modelle integriert (siehe Abbildung 6), durch den Algorithmus untersucht und die Resultate ausgewertet (siehe Abbildung 7).

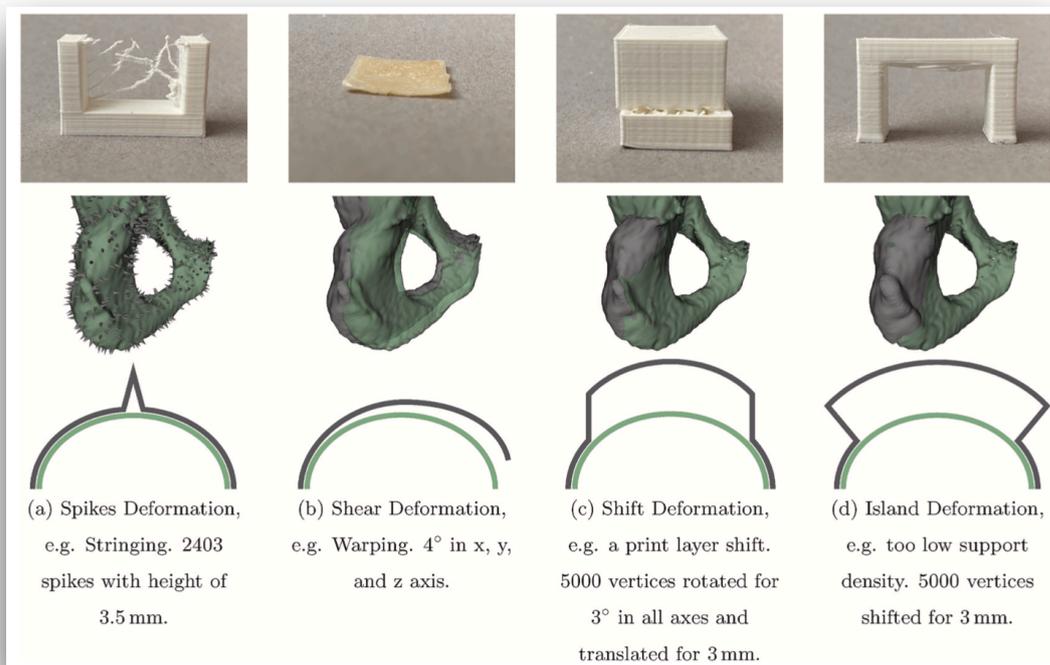


Abbildung 6: Die 4 grundsätzlichen Arten von artifiziellen Oberflächenfehlern, welche auf die Modelle angewendet und damit simuliert wurden (oben: Druckbeispiel, mittig: Oberflächenabweichung an konkretem Modell, unten: schematische Darstellung)

### Ergebnisse:

30 CT-Datensätze mit Acetabulumfrakturen wurden artifiziell mit Fehlern versehen und anschließend mit unserer Methode analysiert. Hier zeigten sich eine Sensitivität von über 95% und eine Spezifität von über 99% in der Detektion der Oberflächenveränderungen der Modelle (siehe als Beispiel Abbildung 7).

In einem Real-World-Szenario wurden anschließend 32 3D-Drucke von Acetabulumfrakturen mittels HR (hochauflösendes)-CT digitalisiert und durch unsere Software analysiert. 25% der Modelle zeigten sich fehlerfrei. Insgesamt

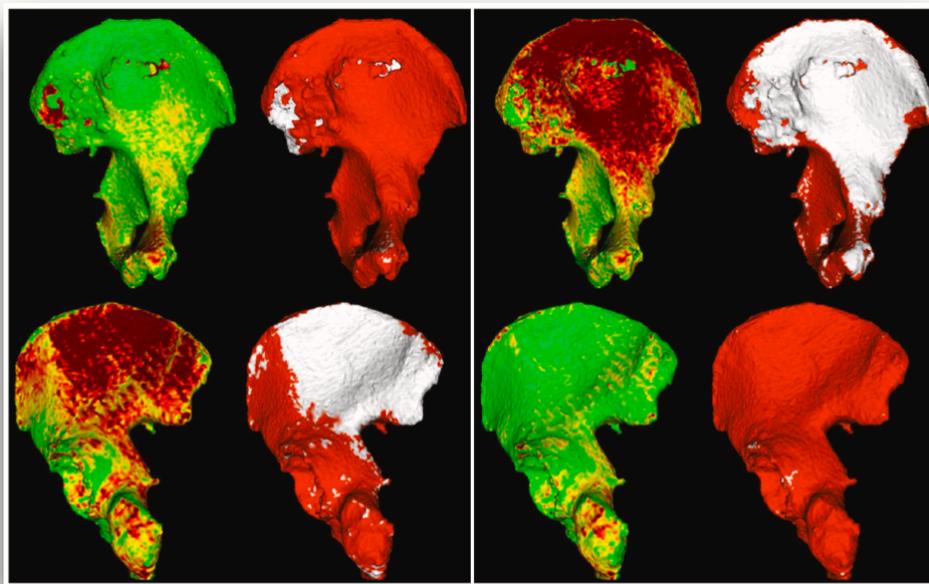


Abbildung 7: Beispiele für Fehlertyp 4: Island Deformation. Rot = große Abweichung und damit große Wahrscheinlichkeit für mangelnde Akkuratheit.

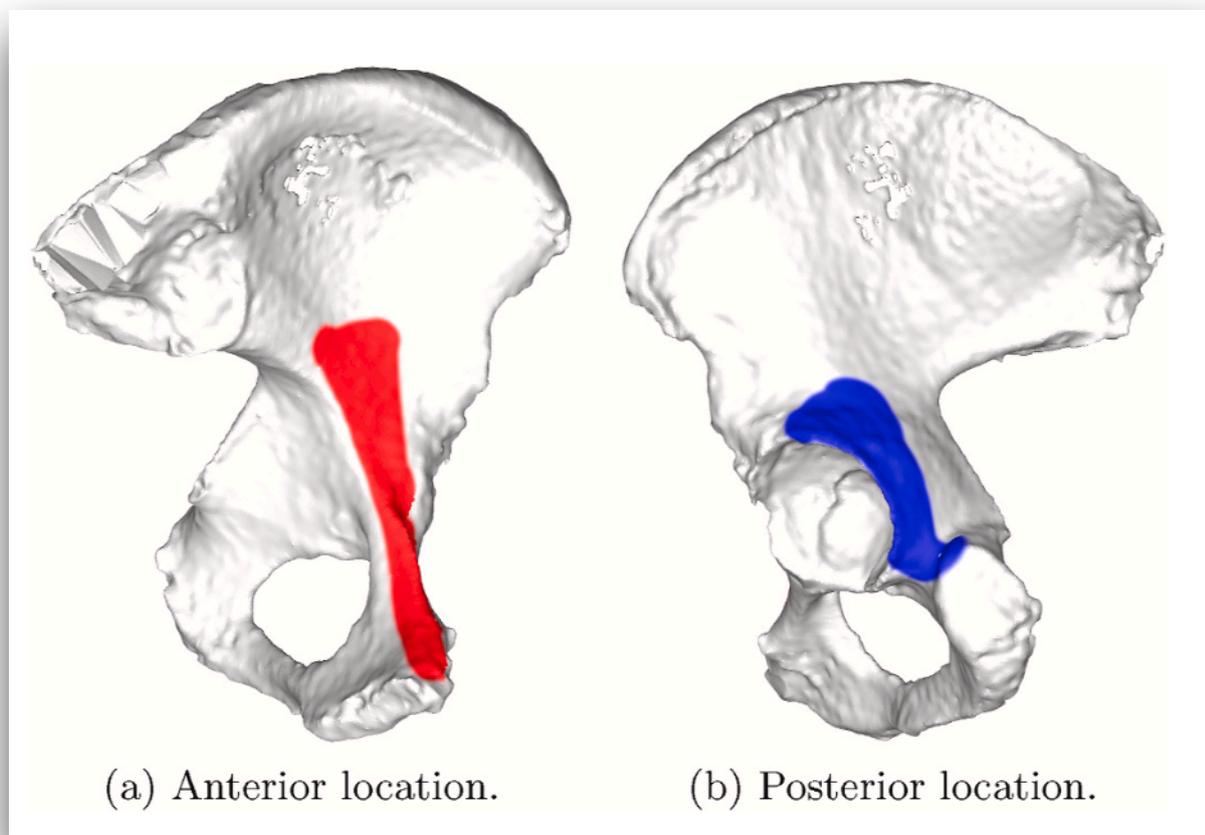


Abbildung 8: Durch Analyse definierte „Safe Zones“ erlauben eine Verwendung zur Implantatplatzierung in den eingefärbten Bereichen auch wenn in dem übrigen Modell Fehler vorliegen sollten

72% wurden als klinisch akzeptabel beurteilt, während mit herkömmlichen Methoden nur 9% bzw. 41% Akzeptanzrate erreichbar waren. Dies liegt darin begründet, dass unsere Methode Fehler eindeutig lokalisiert so dass beim Auftreten dieser in Bereichen, die für die OP nicht relevant sind, das Modell weiterhin als nutzbar einzustufen ist.

### **Diskussion und Bedeutung:**

Wir konnten eine Methode entwickeln und validieren, welche zumindest für den Anwendungsfall Acetabulumfrakturen als auch darüber hinaus verwendet werden kann, um die Fehlerhaftigkeit und damit Verwendbarkeit für die Versorgung zu visualisieren und abschätzbar zu machen. Zudem erlaubt die Technologie auch im Falle von fehlerhaften Modellen „Safe Zones“ zu definieren, die dennoch präzise genug sind, um Implantatplatzierungen in dem Bereich zu erlauben (siehe Abbildung 8)

Die Software wurde erneut als 3D-Slicer-Extension (Software Plugin) veröffentlicht und kann nun von anderen Anwendern einfach genutzt werden. Wir gehen davon aus, dass mit zunehmendem Bedarf an Qualitätssicherung, insbesondere bei zukünftigen Medizinprodukten, diese Funktion unverzichtbar wird:

<https://github.com/sebastianandress/Slicer-SurfaceFragmentsRegistration>

## Die Nutzung von radiologischen Bilddaten durch Augmented/Mixed/Virtual Reality zur Unterstützung von chirurgischen Eingriffen

**Weidert S**, Wang L, von der Heide A, Navab N, Euler E. [Intraoperative augmented reality visualization. Current state of development and initial experiences with the CamC]. Unfallchirurg. 2012

Fallavollita P, Brand A, Wang L, Euler E, Thaller P, Navab N, **Weidert S**. An augmented reality C-arm for intraoperative assessment of the mechanical axis: a preclinical study. Int J Comput Assist Radiol Surg. 2016

**Weidert S**, Wang L, Landes J, Sandner P, Suero EM, Navab N, Kammerlander C, Euler E, von Der Heide A. Video-augmented fluoroscopy for distal interlocking of intramedullary nails decreased radiation exposure and surgical time in a bovine cadaveric setting. Int J Med Robot. 2019

Das Thema Augmented Reality wurde in unserer Arbeitsgruppe schon früh behandelt. Neben den Experimenten mit Head-Mounted Displays (HMD), die jedoch aufgrund mangelnder Miniaturisierung noch weit von der Anwendung am Patienten entfernt waren, war schon früh das Ziel, eine Augmented Reality Technologie in den OP-Saal zu bringen. Dafür bot sich der „CamC“ an, ein C-Bogen-Durchleuchtungsgerät, welches mittels einer Spiegelkonstruktion und einer daran kalibrierten Kamera die Fähigkeit besitzt, Röntgen- und Videobilder als präzises Overlay (Bild über Bild mit Transparenz) darzustellen (siehe Abbildung 9). Durch diese Verbindung von statischem Röntgenbild mit dem Live-Videobild ergab

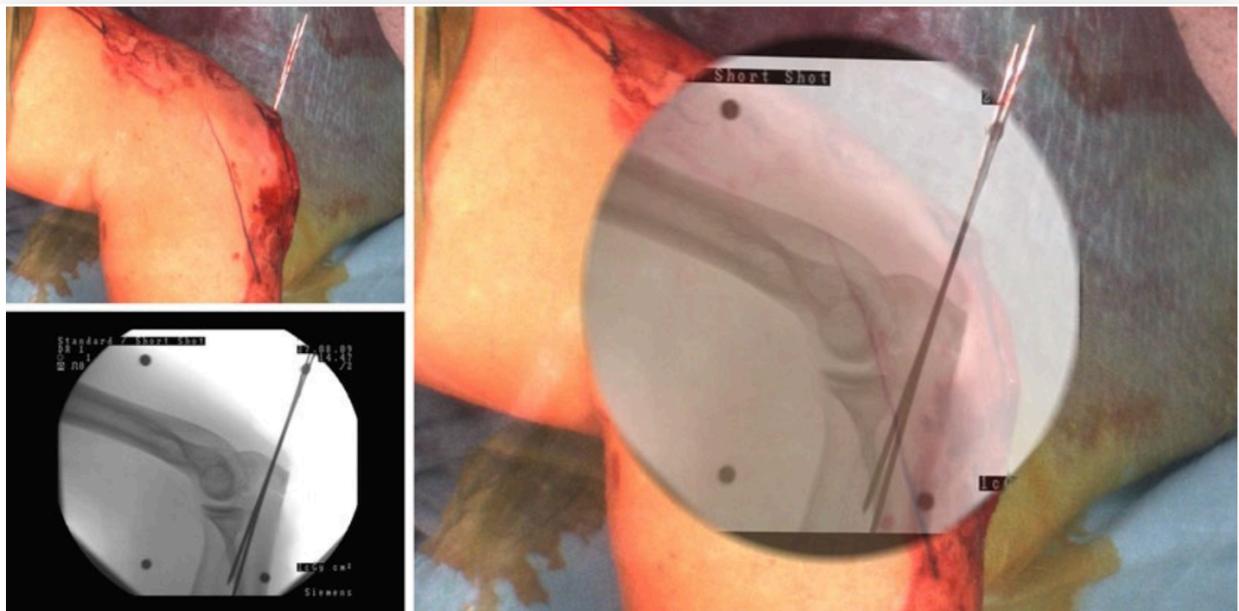


Abbildung 9: Videobild (links oben) und Durchleuchtungsbild (links unten) werden durch die vorhandene Kalibrierung exakt übereinandergelegt (man beachte die K-Drähte, die sich übergangslos vom Videobild in das Röntgenbild fortsetzen)

sich erstmals die Möglichkeit, Instrumente und Implantate am Kamerabild relativ zum radiologisch sichtbaren Knochen zu navigieren.

2012 publizierten wir die ersten Erfahrungen mit dem CamC in der Zeitschrift der deutschen Fachgesellschaft. Hier konnten wir erstmals die Anwendung bei Frakturen des Handgelenks, des Fußes und des Ellenbogens exemplarisch zeigen.

Neben dieser frühen, explorativen Patientenstudie wurden auch spezifische Applikationen präklinisch am Leichenmodell entwickelt und evaluiert.

### **Distal Interlocking:**

Wenn eine Osteosynthese einer Fraktur eines langen Röhrenknochens (z.B. Femurknochen) mittels eines Marknagels erfolgt, muss dieser zur Etablierung einer Rotationsstabilität mittels einer Schraube „verriegelt“ werden. Dazu muss diese Schraube durch die Haut hindurch eingebracht sehr exakt durch den Knochen platziert werden, damit das im Nagel befindliche Loch präzise getroffen wird. Um dies sicher durchzuführen, sind intra-operativ meist viele Bildwandlerbilder notwendig, um den Bohrer und danach die Schraube zu platzieren. Mit dem CamC bestand die Idee, dass man viele dieser Röntgenbilder während der Prozedur durch Video-Guidance ersetzen könne.

Diese Anwendung wurde im Tiermodell erprobt, indem Kuh-Metatarsalia, welche beim Schlachten anfallen, verwendet wurden. Nach Einbringen eines Marknagels durch das eine Ende des Knochens wurde der Versuch gestartet, bei dem der Operateur nach Randomisierung entweder einen herkömmlichen C-Bogen nutzt oder den mit einer Videodarstellung ausgestatteten CamC C-Bogen. Alle Anwendungen wurden genau dokumentiert und die Workflows analysiert. Dabei zeigte sich, dass bei fast allen Arbeitsschritten (siehe Abbildung 10) von Inzision über das Auffinden der optimalen Eintrittsstelle im Knochen bis hin zum tatsächlichen Bohren die Nutzung des CamC Systems die Anzahl der notwendigen Röntgenbilder reduzieren konnte. Dabei profitierten Anfänger und Experten gleichermaßen von der erweiterten Darstellung mit dem Ergebnis einer deutlichen Reduktion der notwendigen Röntgen-Bildgebung.

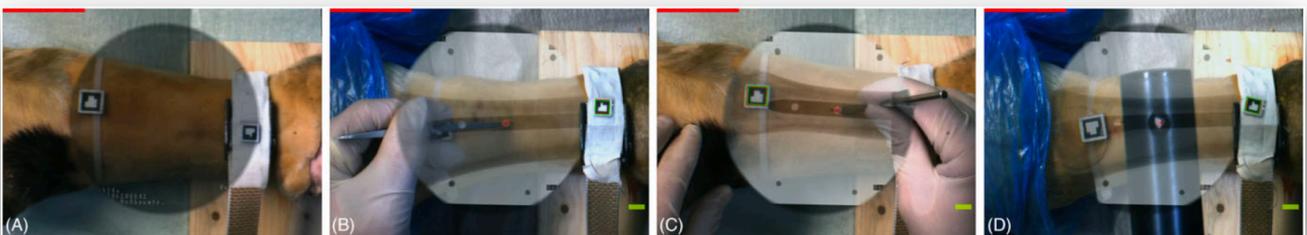


Abbildung 10: Monitorbild mit AR-Darstellung bei der Marknagelverriegelung am Kuhkadaver

### Mechanical Axis Determination

Die Verwendung einer mit der Röntgenbildgebung registrierten Kamera am C-Bogen erlaubt nicht nur eine Video-Overlay-Darstellung sondern ermöglicht zudem auch eine exakte Lagebestimmung des C-Bogens relativ zum Patienten, wenn der Tisch mit optischen Markern (ähnlich QR-Codes) ausgestattet ist. Diese Fähigkeit wurde mit einer Software genutzt, welche einzelne Bilder des Hüftkopfes, des Knies und des oberen Sprunggelenks auf eine Matrix projizieren kann und damit die Messung der Beinachse ermöglicht. Eine solche Bestimmung ist beispielsweise bei Deformitätenkorrekturen um das Knie herum (z. Closed oder Open Wedge Osteotomien) essentiell, um auf dem OP-Tisch das Erreichen der geplanten Korrektur zu prüfen und ggfs. korrigieren zu können. Eine besondere Herausforderung war dabei, die üblicherweise störenden Parallaxeffekte zu vermeiden, indem der Benutzer den C-Bogen unter Anweisung der Software im Rahmen der verfügbaren Freiheitsgrade ausrichtet.

Um diese Anwendung zu validieren wurden in Kooperation mit unserem anatomischen Institut 25 menschliche Beine durch Teilinzision der Kapsel und der Bänder des Knies destabilisiert und in einer Box in einer Varus- oder Valgusfehlstellung platziert. Zur Generierung eines Goldstandards wurde ein CT durchgeführt mit einer Scout-Darstellung, welche keine geometrischen Projektionsfehler aufweist und eine exakte Beinachsenvermessung erlaubt. Damit verglichen wurden die durch unsere Software generierten Beinachsendarstellungen, welche auf einem OP-Tisch generiert wurden (siehe Abbildung 11, links CamC Versuchsaufbau und Bildanalyse, rechts CT Scout Versuchsaufbau und Bildanalyse).

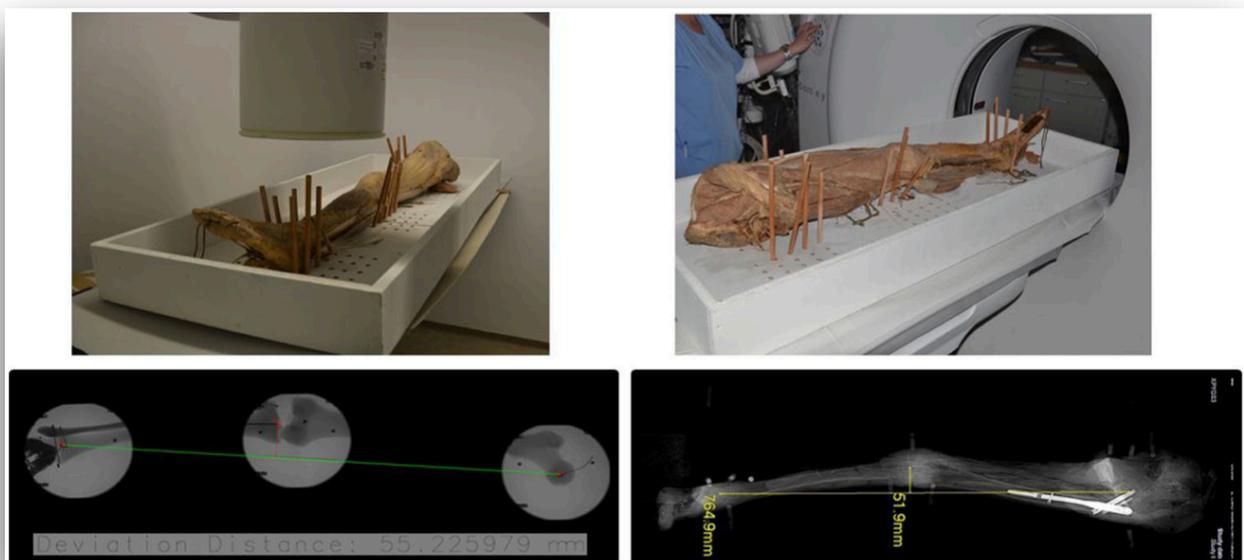


Abbildung 11: Versuchsaufbau und Auswertung der Beinachse (links: CamC AR-C-Bogen, rechts: Goldstandardkontrolle mittels CT und Achsbestimmung am Scout)

Die Analyse ergab eine äußerst hohe Präzision der Bestimmung der mechanischen Achse (gemessen als mm laterale oder mediale Abweichung vom anatomischen Kniemittelpunkt) mit einer Korrelation der beiden Verfahren von  $R^2 = 0,9594$  (Pearson Korrelationskoeffizient). Alle Messungen wurden von 5 verschiedenen Befundern durchgeführt, von Studenten über Assistenzärzte bis zu erfahrenen Oberärzten.

### **Bewertung und Bedeutung für das Fach:**

Die durch die Spiegel-Konstruktion gegebene Notwendigkeit, den C-Bogen mit der Röntgenröhre in umgekehrter Position (über dem Patienten statt unter dem Tisch) zu nutzen und die damit potentiell erhöhte Strahlenexposition der Augen des Operateurs ist der Hauptgrund, weshalb die Technologie bisher nicht den Weg in den OP-Saal gefunden hat.

Unseres Wissens war der CamC dennoch das erste Augmented Reality Verfahren, was im realen OP in realen Operationen eingesetzt wurde. Eine Reihe von heutigen Produkten haben von dieser Forschung profitiert (z.B. HoloSurgery, Augmedix).

## Die Evaluierung von Systemen zur Röntgenbild-basierten Computer-Assisted-Surgery im realen Operationssaal

**Weidert S**, Sommer F, Suero EM, Becker CA, Pieske O, Greiner A, Kammerlander C, Böcker W, Grote S. Fluoroscopic Marker-Based Guidance System Improves Gamma Lag Screw Placement During Nailing of Intertrochanteric Fractures: A Randomized Controlled Trial J Orthop Trauma. 2020

Neue Technologien zur bildbasierten Navigation im orthopädisch-unfallchirurgischen Operationssaal versprechen meist verbesserte Genauigkeit, exaktere Ergebnisse und einen besseren Operationsablauf. Dennoch ist es meist schwierig, diese Benefits in der täglichen Anwendung nachzuweisen und nicht nur statistisch signifikante Ergebnisse zu generieren, sondern die Verbesserung von Parametern nachzuweisen, welche unmittelbar für die klinische Behandlung relevant sind.

Die operative Behandlung von pertrochantären Frakturen des proximalen Femurs mit Verriegelungsmarknägeln ist eine der meistpraktizierten Operationen in der Unfallchirurgie. Dabei wird über eine kleine Inzision proximal der Trochanter Spitze zunächst ein Zieldraht eingebracht, der dann überbohrt wird und über den im Folgenden das eigentliche Nagelimplantat eingebracht wird. Ein entscheidender Schritt ist dabei die Einbringung der Schenkelhalsschraube, die über ein dafür vorgesehenes Loch im eigentlichen Nagel mittels eines Zielinstrumentariums mittig im Femurkopf platziert werden muss - diese Schraube sollte so platziert sein, dass im biplanaren Bildwandlerbild die addierte Distanz von der Schraubenspitze zur Kortikalis des Femurkopfes maximal 25mm betragen sollte. Bei größerer Distanz war in klinischen Studien eine erhöhte Rate von Schraubenlockerungen und damit verbundener Revisionsoperationen nachgewiesen worden.

Ein neuartiges, als Medizinprodukt zugelassenes Image Guidance System (auch: Navigationssystem), welches das intraoperative Röntgenbild registriert und auswertbar macht, soll die Implantation von Gammanägeln bei pertrochantären Frakturen vereinfachen und die Ergebnisqualität hinsichtlich der erwähnten Schraubenplatzierung steigern (siehe Abbildung 12).

### **Methodik:**

Um dieses System zu validieren führten wir eine prospektive randomisierte klinische post-market Studie durch, bei der die Operateure entweder einen herkömmlichen C-Bogen (SOC) oder einen C-Bogen mit dem Guidance System verwenden sollten (siehe CONSORT Ablaufdiagramm in der Abbildung 13). Die teilnehmenden Patienten wurden noch in der Notaufnahme über die Studie und die operative Behandlung aufgeklärt und meist noch am gleichen Tag bzw. der Nacht

operativ behandelt. Das Randomisierungsergebnis wurde erst im OP-Saal bekanntgegeben.

Die Dokumentation des Ablaufs und des Ergebnisses erfolgte durch die Speicherung jedes Bildes mit Zeitstempel und darauf folgender Analyse des Zeitbedarfs für die einzelnen Schritte, Korrekturen der Drahtposition sowie des

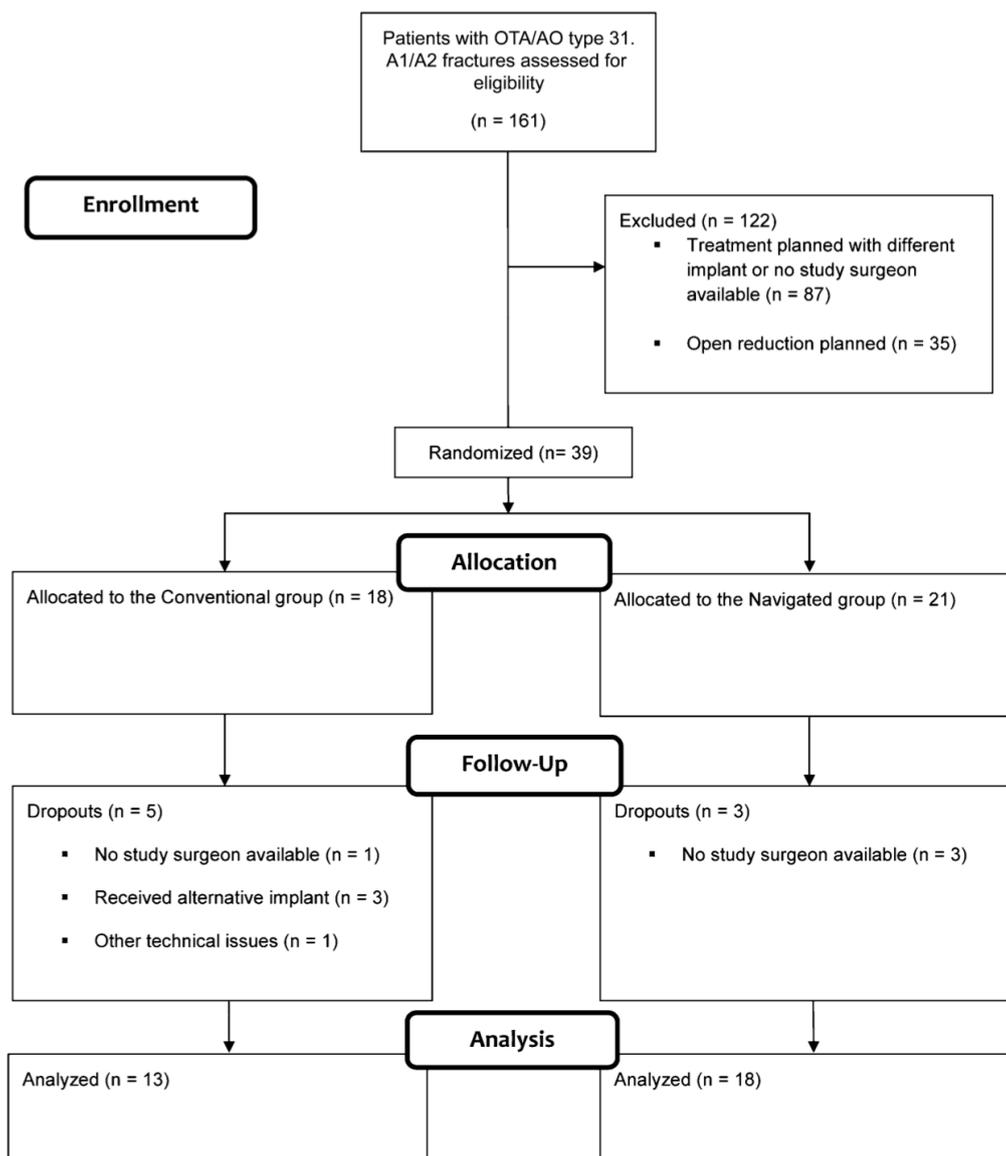


Abbildung 12: CONSORT Diagramm der Studie

Ergebnisses im biplanaren Röntgenbild (Tip-Apex-Distance [TAD]: die addierte Distanz von der Schraubenspitze zur Femurkopfkortikalis in mm). Abbildung 13 zeigt die Intraoperative Darstellung der Fluoroskopiebilder für den Operateur bei Verwendung des Systems - die Unterstützung besteht in der Vorhersage der Drahtposition sowie die Bestimmung der benötigten Schraubenlänge am Bild.

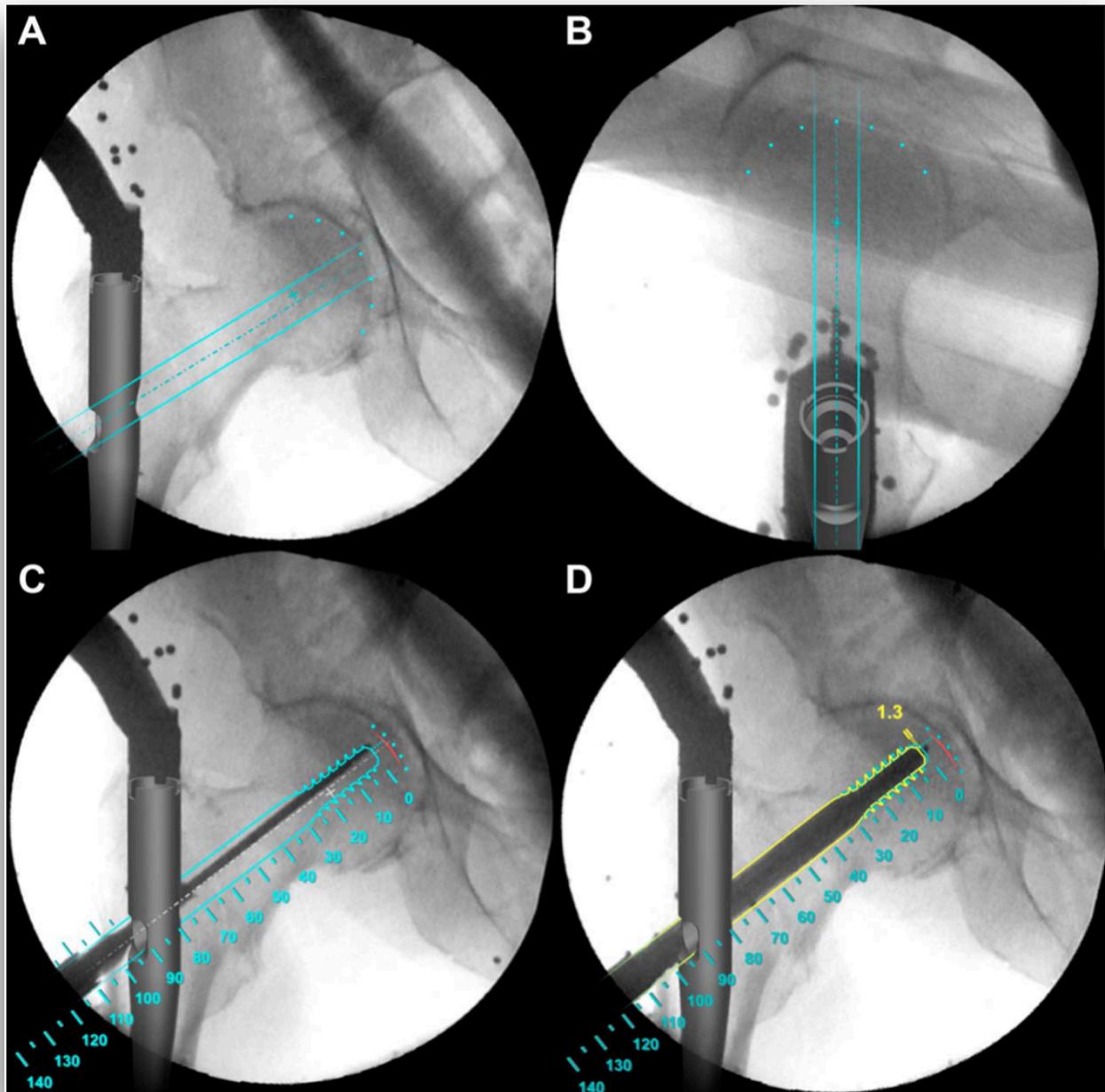


Abbildung 13: intraoperative Darstellung der C-Bogen Röntgenbilder mit Ziel- und Messfunktionen zur verbesserten Platzierung der Schenkelhalsschraube

Postoperativ wurden die gespeicherten intraoperativen Röntgenbilder exportiert und nach Kalibrierung der Bilder der jeweilige TAD bestimmt. Dabei wurde ein TAD von  $<25\text{mm}$  als Erfolg, ein TAD  $>25\text{mm}$  als Misserfolg gewertet, da dies in der Literatur zu einer erhöhten Komplikationsrate geführt hatte.

### Ergebnisse:

Von 161 gescreenten Patienten mit Frakturen des Trochanters (AO-Typen 31A1-2) konnten 39 Patienten in die Studie eingeschlossen werden. Die Navigationsgruppe ( $n=21$ ) hatte 3 drop-outs, die Kontrollgruppe ( $n=18$ ) hatte 5 drop-outs (siehe Abbildung 13). Der primäre Outcome-Parameter TAD zeigte in der

Navigationsgruppe einen Mittelwert von 17,5mm und keinen Fall mit TAD>25mm. Im Gegensatz dazu zeigte die Kontrollgruppe eine mittlere TAD von 24,2 mm und 5 Fälle mit einer TAD>25mm (siehe Abbildung 14). Die OP-Zeit zwischen der navigierten Gruppe (Median 33 Minuten) und Kontrollgruppe (Median 27 Minuten) zeigte bei sehr ähnlicher Streuung von 18 Minuten bis >60 Minuten keinen signifikanten Unterschied ( $p=0,31$ ). Auch die Anzahl von intraoperativen Röntgenbildern zeigte keinen signifikanten Unterschied ( $p=0,80$ ). Auffallend ist, dass nur in einem Fall in der navigierten Gruppe der Operateur eine Korrektur des Zieldrahtes (guidewire) vornehmen musste, während es in der Kontrollgruppe im Schnitt 4 Mal notwendig war (Abbildung 15).

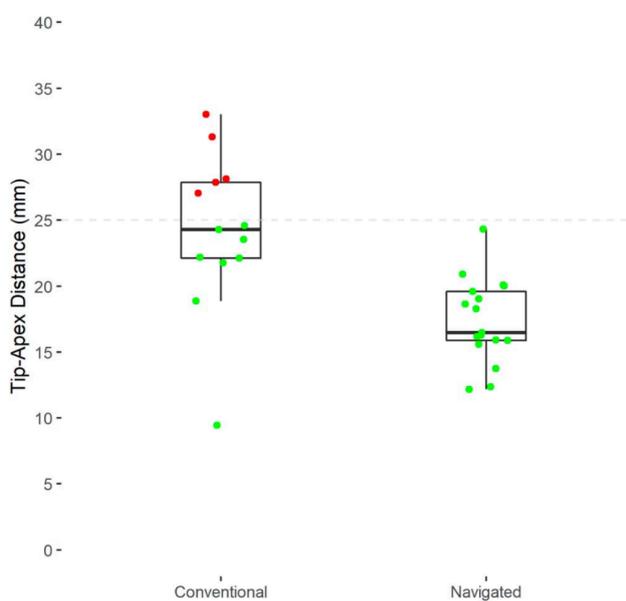


Abbildung 14: Tip-Apex Distance der beiden Gruppen im Vergleich

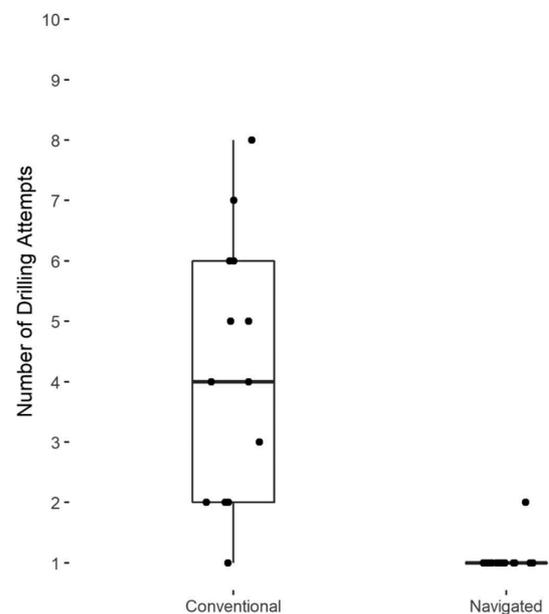


Abbildung 15: Anzahl der Bohrversuche für den Zieldraht für die Femurkopfschraube im Vergleich

### Diskussion:

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die Anwendung des neuen Systems zumindest nicht zu einer signifikanten Verlängerung der Prozeduren führt, aber auch keine Reduktion von intraoperativer Röntgenbildgebung erreicht. Die erhoffte Vereinfachung des Ablaufs lässt sich daher anhand kürzerer OP-Zeiten und eingesparten Röntgenbildern nicht nachweisen. Beide Parameter sind vermutlich jedoch abhängig von der Lernkurve, in der die teilnehmenden Operateure sich noch befanden. Grundsätzlich ist die Schwäche der Studie insbesondere die vergleichsweise niedrige Fallzahl insgesamt und pro individuellem Operateur, besonders bei der Anwendung des für sie neuen Navigationssystems.

Jedoch zeigen sich trotz der niedrigen Fallzahl und Heterogenität der Anwender (Erfahrungsstufe der Operateure) bereits sehr eindrückliche Ergebnisse: Erstens führte die Anwendung des Navigationssystems zu einer 100%igen Erfolgsrate beim Erreichen der TAD, und diese war signifikant geringer und damit besser als in der Kontrollgruppe. Zweitens musste in der Navigationsgruppe nur einmal der Bohrdraht für die Schenkelhalsschraube korrigiert werden, während dies in der Kontrollgruppe im Schnitt 4 Mal (und bis zu 8 Mal) notwendig wurde. Dadurch ist der kritischste Schritt der Operation deutlich vereinfacht, was sich jedoch nur im TAD Outcome zeigt und nicht in den übrigen Parametern wie Zeit und Röntgenbildern.

Hinsichtlich der Parameter Bohrversuche und Tip-Apex-Distance zeigte die navigierte Gruppe damit eine deutliche Überlegenheit gegenüber dem Standard-of-Care, was mit einer geringeren Invasivität für den Patienten einhergeht sowie mit einer in der Literatur nachgewiesenen geringeren postoperativen Komplikationsrate (i.e. „Cut-Out“ der Schenkelhalsschraube). Da die Studie für den individuellen Teilnehmer mit der Beendigung der OP beendet und kein Follow-Up geplant war und es sich hier um ein alterstraumatologisches Kollektiv mit sehr geringer Wiedervorstellungsrate handelt, können wir über die tatsächlichen klinischen Outcomes nicht berichten.

**Bedeutung für das Fach:**

Unsere Studie konnte erstmals zeigen, dass das verwendete System einen Benefit gegenüber dem Standard-of-Care (der aktuell etablierten Standardbehandlung) hat - ein deutlicher Widerspruch zu den Ergebnissen der einzigen zu dem Zeitpunkt existierenden klinischen Studie aus den USA.

## Die Verwendung von radiologischen Bilddaten und 3D-Druck zur Ausbildung in der Wirbelsäulen Chirurgie

Stefan P, Pfandler M, Lazarovici M, Weigl M, Navab N, Euler E, Fürmetz J, **Weidert S**. Three- dimensional- Printed Computed Tomography-Based Bone Models for Spine Surgery Simulation Simul Healthc. 2020

Die Ausbildung junger Chirurginnen und Chirurgen in der Wirbelsäulen Chirurgie findet auch heutzutage meist im OP-Saal selbst statt. Wichtige Fertigkeiten wie das Einbringen von Implantaten in die knöchernen Wirbelsäule unter Zuhilfenahme von Röntgen-Bildgebung und haptischer (durch die Hände gespürte) „Navigation“ sollten jedoch außerhalb des OPs gelernt werden. Zwar existiert dafür das Leichenmodell, bei dem man an Körperspendern übt, doch diese sind sehr teuer, schlecht verfügbar und damit seltenen Gelegenheiten vorbehalten. Käuflich zu erwerbende bisherige Wirbelsäulenmodelle wiederum repräsentieren keine tatsächlichen Fälle oder Pathologien und sind vom haptischen Gefühl her oft nicht ausreichend realistisch. Der 3D-Druck verspricht wiederum, auf Basis von verfügbaren Patientendaten, realistische und kostengünstige Präparate mit realen Pathologien herzustellen, die in simulierten Operationen zum Erwerb der genannten Fähigkeiten genutzt werden können.

Das Ziel des Projektes war, auf Basis von CT-Datensätzen realer Fälle mittels 3D-Druck Modelle zu generieren, die sowohl im Röntgenbild sichtbar sind als auch durch die Optimierung der Oberfläche und Binnenstruktur (i.e. Kortikalis und Spongiosa) eine sehr realistische Haptik vermitteln.

### **Methode:**

Die Untersuchung gliederte sich in 2 Schritte, bei denen jeweils Chirurgen verschiedener Erfahrungsgrade Modelle testen und bewerten sollten (7-Punkt Likert-Skala).

Zunächst wurde zum Ermitteln der optimalen haptischen Eigenschaften und damit der Konstruktions- und Druckparameter des Präparats ein Testsetup generiert, bei dem Testpersonen mittels eines Trokars verschiedene Kortikalis- und Spongiosakonfigurationen penetrieren und bewerten konnten (siehe Abbildung 16). Im Anschluss nach Auswahl eines optimalen Falles wurde der DICOM Datensatz eines HR-CT-Scans segmentiert und für die Weiterverarbeitung vorbereitet. Im letzten Verarbeitungsschritt, dem „Slicing“, wurde die Kortikalis sowie Spongiosa („Infill-Muster“) entsprechend der Ergebnisse aus Schritt 1 angepasst, das optimale haptische Feedback beim Penetrieren des Knochens zu generieren. Diese resultierenden Modelle wurden mittels FDM-3D-Druck (Fused Deposition Modeling) und 2 Druckköpfen mit 2 verschiedenen Materialien für Kortikalis und Spongiosa produziert und damit 3 Variationen produziert (siehe Abbildung 17).

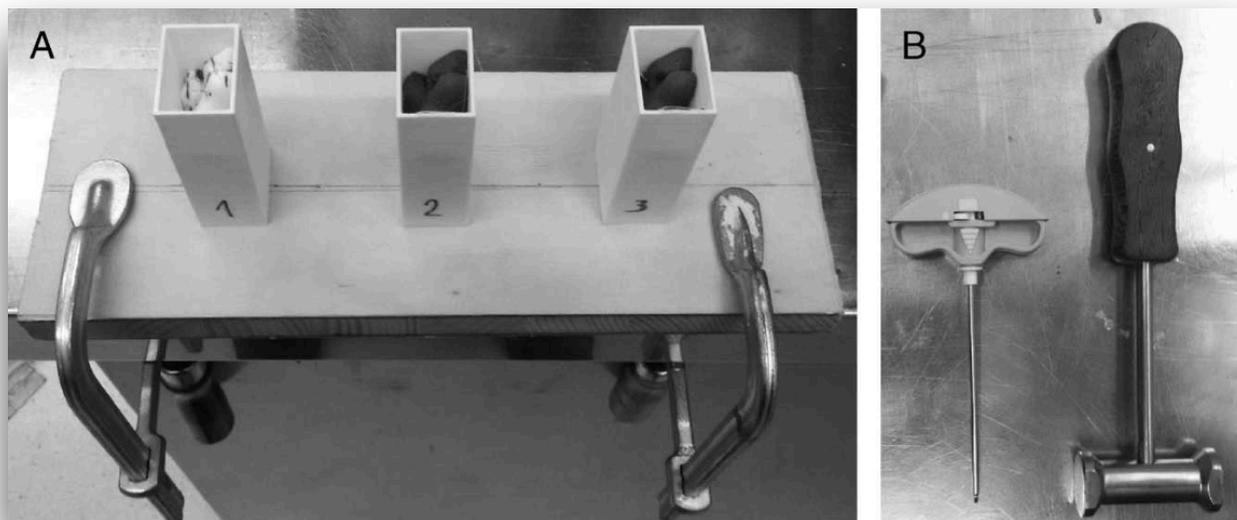


Abbildung 16: Haptisches Testsetup (A) mit verschiedenen Spongiosadichten („In-Fills“). B zeigt den Trokar (links) und einen bei Bedarf nutzbaren Hammer (rechts) zum Vortreiben.

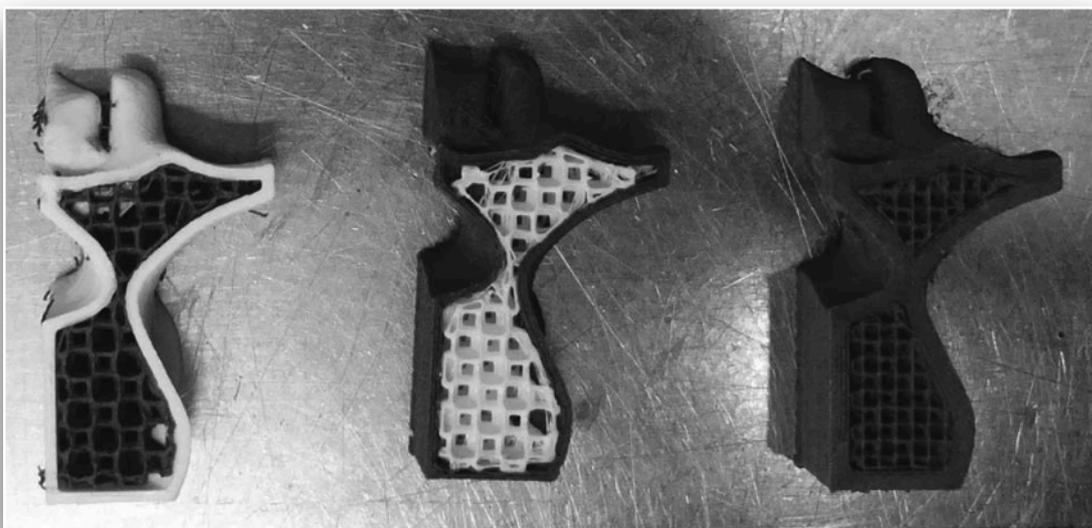


Abbildung 17: Compound-Aufbau der verschiedenen Testversionen der Knochenmatrix (dargestellt ist ein sagittaler Schnitt durch den Wirbelkörper). Links Typ P/W, Mitte Typ W/P, rechts Typ W/W.

Diese resultierenden Modelle wurden von den Experten penetriert und bewertet hinsichtlich ihres Realismus (7-Punkt Likert-Skala).

Ein größerer Wirbelsäulenabschnitt wurde nach dem Druck mit einer Zinkbeschichtung überzogen, so dass er im Röntgen sichtbar wurde. Auch die resultierenden Röntgenbilder, generiert durch Durchleuchtung mittels eines C-Bogen-Röntgengeräts, wurden diesmal 10 Experten zur Bewertung vorgelegt (siehe Abbildung 18).

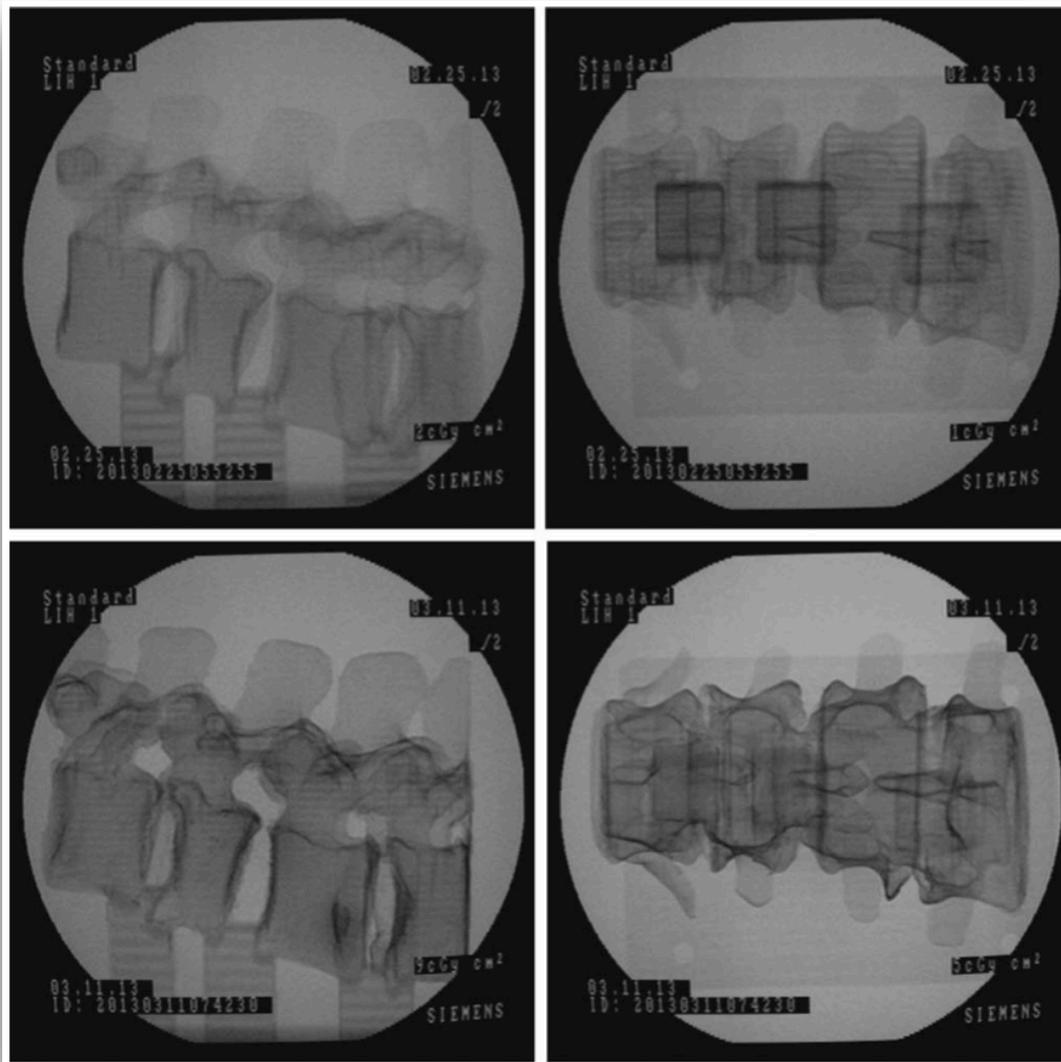


Abbildung 18: C-Bogen Durchleuchtung der 3D gedruckten, unbeschichteten (Reihe oben) und Zink-beschichteten (Reihe unten) Wirbelsäulenmodelle

### Ergebnisse:

11 Chirurgen mit einer Erfahrung von 3 bis 33 Jahren (Mittelwert: 12,82 Jahre) wurden zur Bewertung der Modelle rekrutiert und eingewiesen. Alle führten eine Pedikulierung der drei Modelle (siehe Abbildung 17) durch den Trokar durch und bewerteten im Anschluss den Realismus des dabei resultierenden Gefühls. Hier zeigte sich eine klare Präferenz für das P/W Modell (Abbildung 17 links), welches sich von den alternativen Modellen W/P und W/W in der Bewertung statistisch signifikant ( $P < 0,001$ ) als überlegen absetzt (siehe Abbildung 19).

Die Bewertung der Fluoroskopiebilder erfolgte durch 10 Chirurgen von 4-35 Jahren Berufserfahrung (Mittelwert 14,88 Jahre). Diese bescheinigten sowohl den beschichteten 3D-Modellen als auch den unbeschichteten 3D-Modellen im Röntgenbild einen hohen Grad an Realismus (links, Abbildung 20) und Nutzwert für das Training in der Wirbelsäulen Chirurgie (rechts, Abbildung 20).

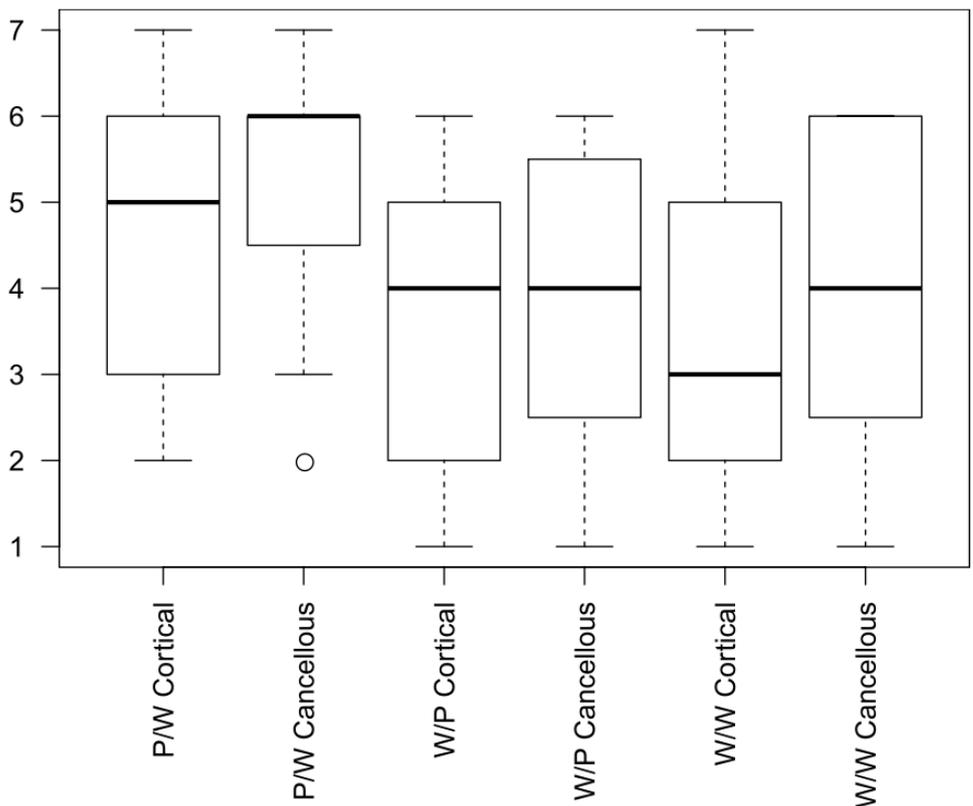


Abbildung 19: Bewertung der haptischen Qualität der 3 Modellvarianten P/W, W/P und W/W durch die 11 Chirurgen auf der 7-stelligen Likert-Skala. P/W vs. WP und P/W vs. W/W jeweils  $P < 0.001$ .

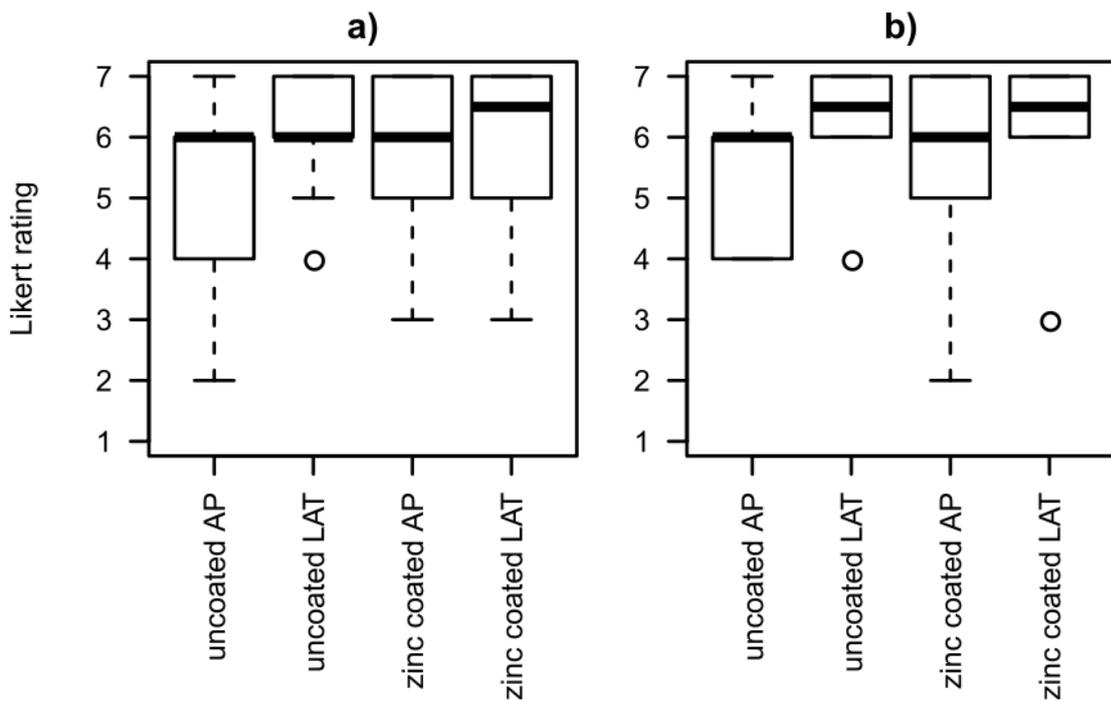


Abbildung 20: Bewertung der Ähnlichkeit (links) sowie der Nutzbarkeit für Training der Fluoroskopiebilder der beschichteten und unbeschichteten Modelle. (Likert-Skala: 1=strongly disagree, 7= strongly agree)

**Diskussion:**

Die Evaluation durch fachkundige Operateure zeigte einen hohen Realitätsgrad der haptischen Eigenschaften beim Pedikulieren als auch einen hohen Realismus der aus den Modellen durch Durchleuchtung erzielbaren Röntgenbilder. Trotz dem heterogenen Probandenkollektiv zeigte sich eine sehr einheitliche Bewertung der Modelle, so dass die resultierenden Modellparameter für Trainings an Knochenmodellen, zumindest in der Wirbelsäulen Chirurgie, und zur Pedikulierung im Besonderen geeignet zu sein scheinen. Zwar zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen unbeschichtetem und beschichtetem Modell bzgl. des Realitätsgrades und Nutzwertes für die Ausbildung, jedoch scheint das beschichtete Modell, wenn nicht zwingend notwendig, so doch eine Option zu sein, wenn akzentuierter Bilder insbesondere in der a.p. Bildgebung gewünscht werden.

**Bedeutung für das Fach:**

Die Ergebnisse sind in die Weiterentwicklung des am LMU Klinikum selbst und des durch das LMU Spin-Off Medability GmbH eingesetzten Wirbelsäulensimulators eingeflossen. Dieser wird nun von vielen Herstellern zum Training von Operateuren an der Wirbelsäule weltweit erfolgreich eingesetzt.

## Die Nutzung von KI-Methoden und Signalanalyse zur Erweiterung der Kniegelenksdiagnostik

Befrui N, Elsner J, Flessner A, Huvanandana J, Jarrousse O, Le TN, Müller M, Schulze WHW, Taing S, **Weidert S**. Vibroarthrography for early detection of knee osteoarthritis using normalized frequency features. Med Biol Eng Comput. 2018

Viele Patientinnen und Patienten leiden unter Knieschmerzen, welche von beginnenden Schäden des Gelenks im Sinne von Veränderungen der Knorpelkonsistenz und -oberfläche hervorgerufen werden. Diese Veränderungen, häufig als Früharthrose bezeichnet, sind im konventionellen Röntgenbild unsichtbar und können allenfalls durch eine gute MRT Untersuchung oder eine Arthroskopie nachgewiesen werden.

Die Idee dieser Arbeit war es, im Rahmen eines durch Bundesmittel geförderten Konsortialprojekts eine Technologie zu entwickeln und zu evaluieren, welche diese Knorpelveränderungen durch Vibrationssignale, welche bei Bewegung von dem Gelenk emittiert werden, zu detektieren oder gar zu beurteilen vermag. Diese Aufnahmetechnik wird als „Vibroarthrographie“ bezeichnet.

Da solche Vibrationssignale einem EKG nicht unähnlich sind aber kaum erkennbare Muster aufweisen (siehe Abbildung 22), ist jedoch eine ausgefeilte Signalanalyse mittels Maschinellem Lernen notwendig, einer Methode aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz. Diese Lösung wurde im Rahmen des Projekts in unserem Labor am LMU Klinikum entwickelt und evaluiert.

### **Methodik:**

In einem ersten Schritt musste eine Messapparatur entwickelt werden, welche dem Patienten angelegt werden kann und über feste Sensorpositionen eine störungsfreie und standardisierte Aufnahme der Vibrationssignale gewährleistet (siehe Abbildung). Zur Signalanalyse wurde eine Software entwickelt, welche die Aufzeichnung und Weiterverarbeitung der Signale erlaubte. In einem weiteren Schritt wurden durch eine kooperierende Praxis Patienten rekrutiert, welche bereits ein MRT des Knies im Rahmen von unspezifischen Kniegelenksbeschwerden erhalten hatten. Als Vergleichsgruppe wurden gesunde Probanden rekrutiert, bei denen Knieschäden durch einen Fragebogen ausgeschlossen wurden.

Drei Vibrations- und Piezosensoren (angebracht am medialen, lateralen Tibiaplateau sowie präpatellar) sollen bei allen Probanden hochfrequente Signale während der Kniebewegung aufnehmen (siehe Abbildung 22). Um das Signalrauschen zu reduzieren, wurden bei jedem Patienten 20 Bewegungssegmente aufgenommen, die auf eine gleiche Breite (i.e. Dauer) normalisiert wurden und aus denen ein intra-individueller Mittelwert gebildet wurde.

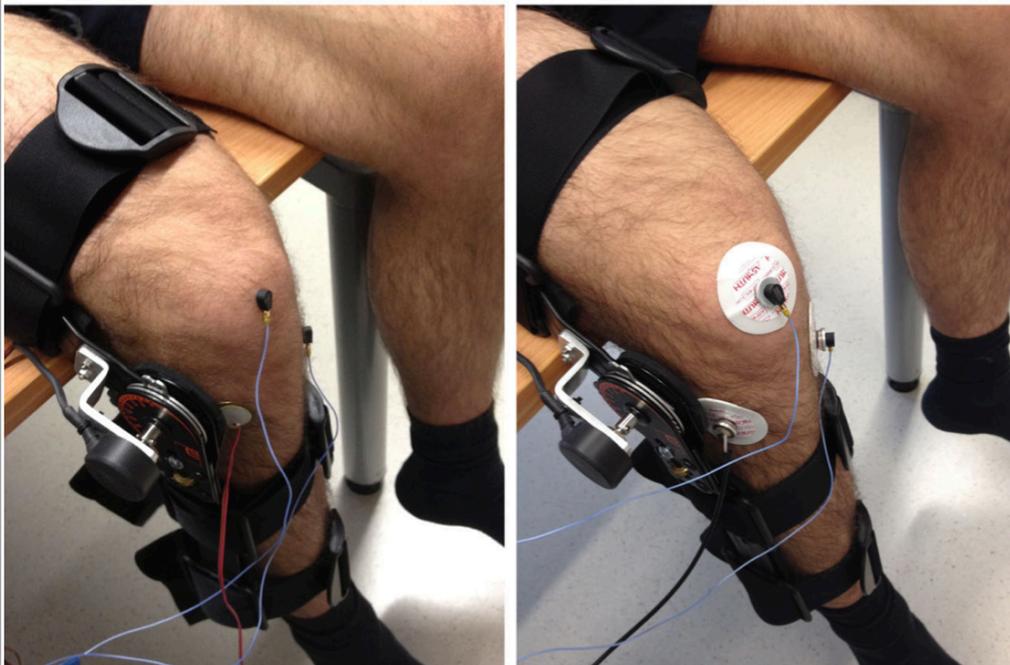
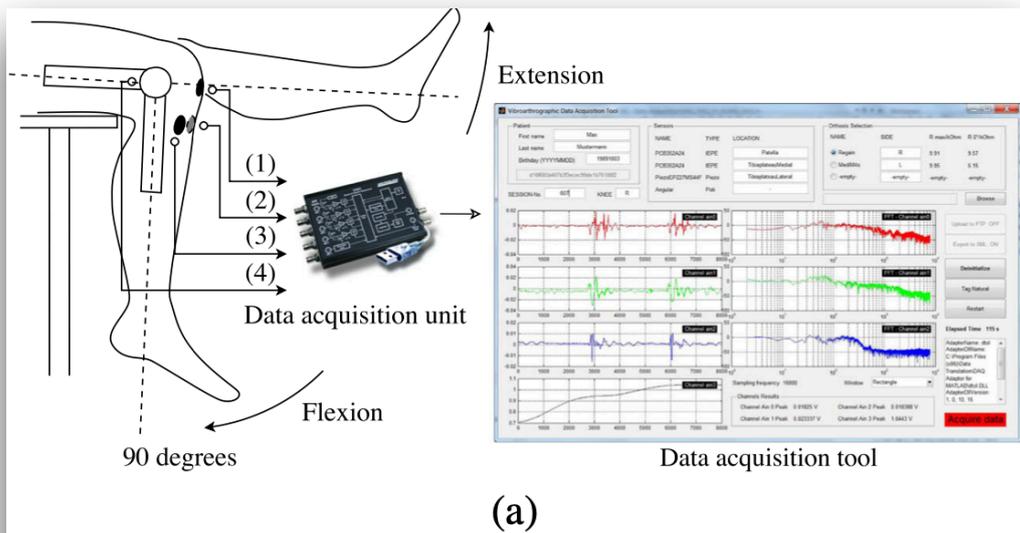


Abbildung 21: Messapparatur, Sensorik und Datenakquisesoftware für die Vibroarthrographie. Links Sensor direkt auf der Haut, rechts angebracht an einer EKG-Klebesonde. Die Software (oben rechts) erlaubt das Monitoring der Signale während der Aufzeichnung.

Die gesammelten und verarbeiteten Signalpakete wurden im Anschluss durch eine Support-Vector-Machine ([SVM], eine Machine Learning / KI Technik) automatisch in gesund und krank kategorisiert. Zum Training wurden hier zunächst die Kategorien gesund/krank den Signaldaten zugeordnet, später auch die im MRT durch standardisierte Befundung ermittelten Grade an Knorpelschäden (Outerbridge Klassifikation). Die resultierenden Datensätze wurden im Anschluss mittels einer linearen SVM analysiert und eine Klassifikationsaufgabe durchgeführt.

Ausserdem sollte versucht werden, relevante Signalkomponenten zu identifizieren, welche die Klassifikationsentscheidung maßgeblich beeinflussen.

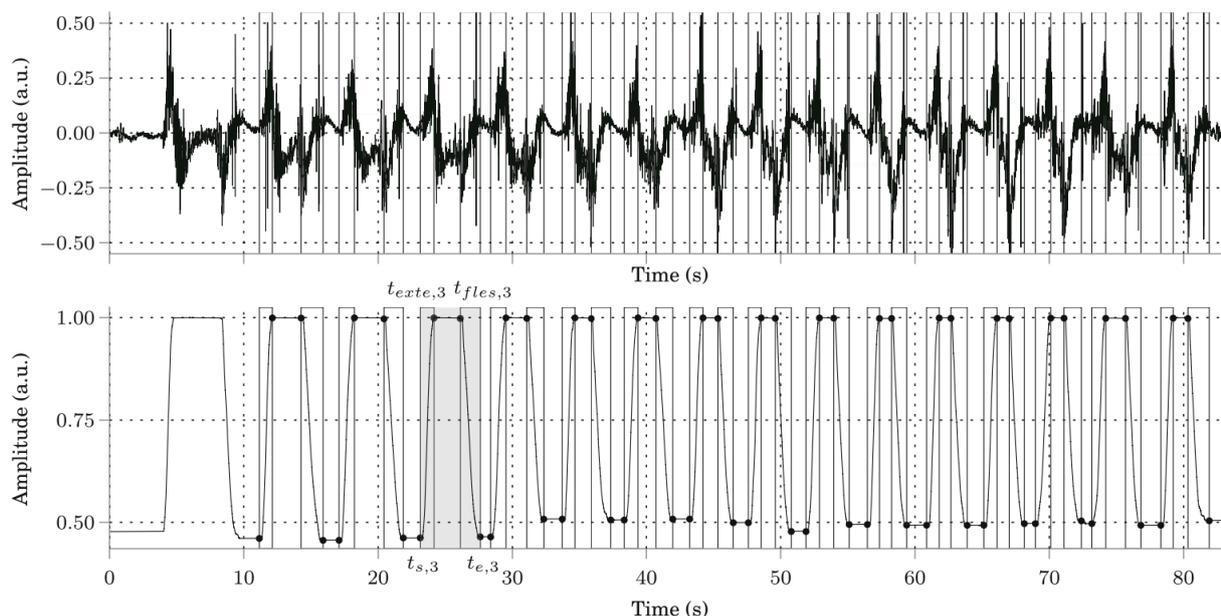


Abbildung 22: Rohsignal des Piezosensors auf der Patella. Die Zacken repräsentieren jeweils eine Extensions-Flexionsbewegung mit einer kurzen Wartepause zwischen den Episoden.

**Ergebnisse:**

30 gesunde Probanden (59 gesunde Knie, 14 Frauen, 16 Männer, mittleres Alter 27 Jahre, meanBMI = 22,6) und 39 Patienten (40 pathologische Knie, 24 Frauen, 15 Männer, mittleres Alter 55 Jahre, meanBMI = 27,4) wurden in die Studie eingeschlossen und mittels Vibroarthrographie vermessen. Alle Patienten hatten zudem ein MRT, auf dem Knorpelschäden und andere Pathologien diagnostiziert wurden (siehe Abbildung 23).

Diagnosis	Number of cases (knees)
Chondromalacia grade II	3
Chondromalacia grade III	12
Chondromalacia grade IV	16
Manifest OA	9

Abbildung 23: Ergebnisse der strukturierten MRT Befundung der Patientengruppe. Chondromalazie 1 oder gar ein Normalbefund lag in keinem der Fälle vor.

Nach mehreren vorbereitenden Schritten mit Weiterverarbeitung der Signale konnte eine erste Analyse der High-Frequency-Features, welche sich als starke Komponente des Klassifikators zeigten, durchgeführt werden. Hier zeigte sich insbesondere bei Flexion des Knies eine Aufspaltung in Gesund und Patient (siehe Abbildung 24).

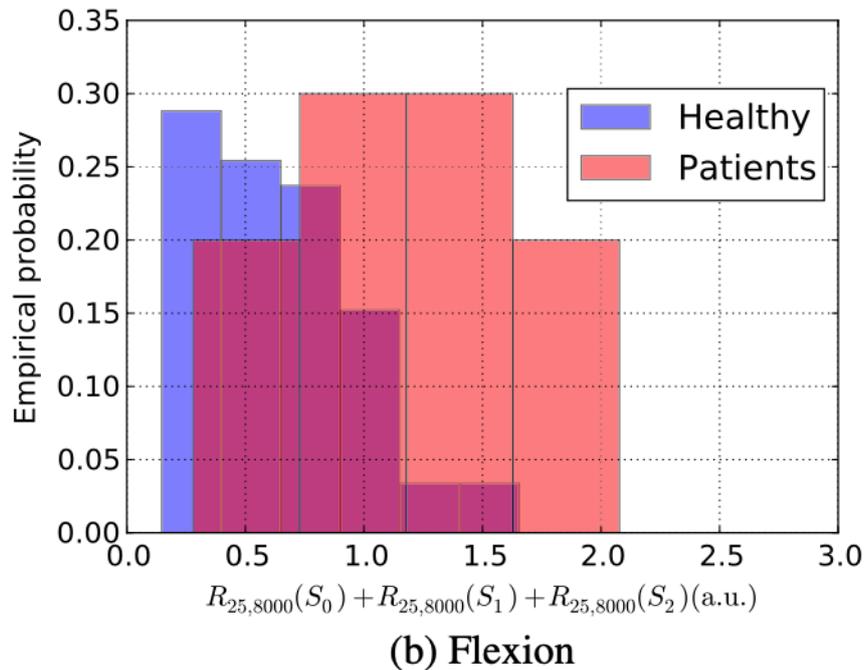


Abbildung 24: Histogramm der summativen Frequenzfeatures aller 3 Sensoren der individuellen Probanden (gesund vs. krank)

Nach verschiedenen Ansätzen des Trainings der SVM und der Cross-Validation (hier wird der komplette Datensatz aufgeteilt in Trainings- und Testdatensätze) konnten wir eine Area-under-the-Curve (AUC) von beispielsweise 0,85 für den Durchgang mit einer 5-fachen Cross-Validation und Tief- sowie Hochfrequenzfeatures erreicht und 0,89 für die volle Population (siehe Abbildung 25).

Unsere Methode erzielte demzufolge mit einer Sensitivität von 0,80 und einer Spezifität von 0,75 eine mit dem klassischen MRT Befund vergleichbare Leistungsfähigkeit in der Detektion von Knorpelschäden.

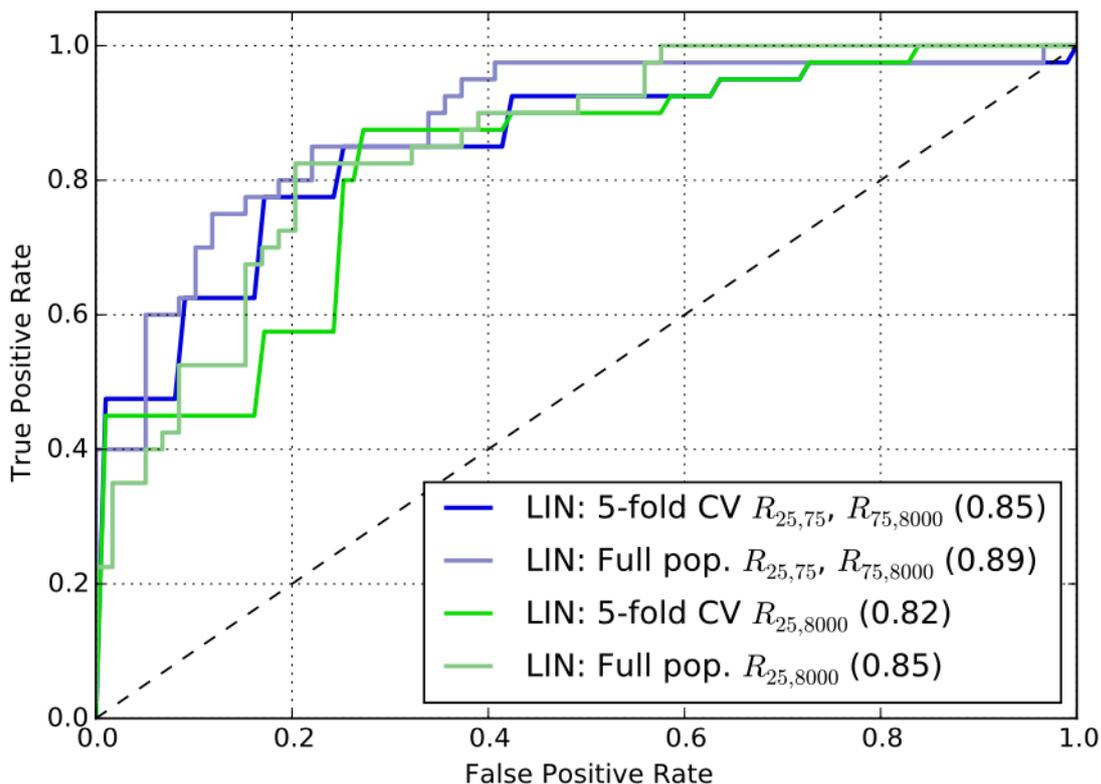


Abbildung 25: Receiver Operating Characteristics (ROC) Kurven zeigen die Performance der SVMs mit verschiedenen Features und mit/ohne Cross-Validation. Die Area under the Curve ist der Performance-Parameter.

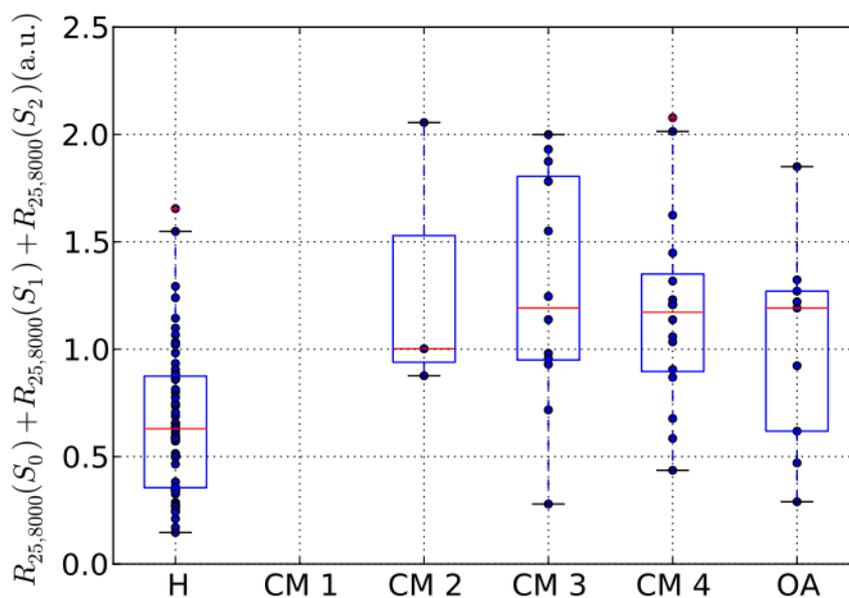


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen der Chondromalazie (Outerbridge Klassifikation) und dem Auftreten der Hochfrequenz-Signalkomponenten in Flexion. H: healthy (gesund)

**Diskussion und Bedeutung für das Fachgebiet**

Trotz der erfreulichen Ergebnisse gibt es Einschränkungen in ihrer Generalisierbarkeit. Erstens bestanden bei den Patienten neben der Chondromalazie teilweise auch andere Pathologien, welche Einfluss auf das Signal haben könnten. Des Weiteren sind beide Gruppen hinsichtlich Alter und BMI sehr heterogen. So könnte beispielsweise das Alter und damit zusammenhängende Veränderungen (z.B. Wassergehalt im Knorpel, Elastizität der Bänder) entscheidenden Einfluss auf die Klassifikation haben.

Die Technologie ist daher noch weit von einer Anwendung als Medizinprodukt entfernt. Dennoch arbeiten weltweit mehrere Gruppen an der Weiterentwicklung dieser Technik zur Auswertung akustischer Gelenksignale. Die Arbeit hat daher ein breites Publikum gefunden und zählt derzeit bereits 40 Zitationen in anderen Publikationen. Eine Folgestudie an >100 Kniegelenkspatienten vor ihrer Arthroskopie, welche als Ground-Truth einen intraoperativen Goldstandard-Befund erbringt und dem MRT überlegen ist, befindet sich aktuell in der Auswertung.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Inhalt
1	Segmentierungsprozess mit Frakturerkennung und -rekonstruktion
2	Resultierendes 3D Druck Modell mit angebogener Rekoplatte
3	Klinische Ergebnisse nach einem Jahr (Hüft-Funktions-Scores)
4	Vergleich der Druckzeiten
5	Personeller Zeitaufwand für die einzelnen Schritte des 3D Druck Prozesses
6	Die 4 grundsätzlichen Arten von artifiziellen Oberflächenfehlern
7	Beispiele für Fehlertyp 4: Island Deformation
8	Durch Analyse definierte „Safe Zones“ erlauben eine Verwendung zur Implantatplatzierung
9	Videobild und Durchleuchtungsbild werden exakt übereinandergelegt
10	Monitorbild mit AR-Darstellung bei der Marknagelverriegelung am Kuhkadaver
11	Versuchsaufbau und Auswertung der Beinachse
12	CONSORT Diagramm der Studie
13	Intraoperative Darstellung der C-Bogen Röntgenbilder mit Ziel- und Messfunktionen
14	Tip-Apex Distance der beiden Gruppen im Vergleich
15	Anzahl der Bohrversuche für den Zieldraht für die Femurkopfschraube im Vergleich
16	Haptisches Testsetup mit verschiedenen Spongiosadichten
17	Compound-Aufbau der verschiedenen Testversionen der Knochenmatrix
18	C-Bogen Durchleuchtung der 3D gedruckten Wirbelsäulenmodelle
19	Bewertung der haptischen Qualität der 3 Modellvarianten
20	Bewertung der Ähnlichkeit sowie der Nutzbarkeit für Training der Fluoroskopiebilder
21	Messapparatur, Sensorik und Datenakquisesoftware für die Vibroarthrographie
22	Rohsignal des Piezosensors auf der Patella
23	Ergebnisse der strukturierten MRT Befundung der Patientengruppe
24	Histogramm der summativen Frequenzfeatures aller 3 Sensoren der individuellen Probanden
25	Receiver Operating Characteristics (ROC) Kurven
26	Zusammenhang zwischen der Chondromalazie und Hochfrequenz-Signalkomponenten

## Anhang

### Originalarbeiten als Erst- oder Letztautor

1	Andreß S, Achilles F, Bischoff J, Kußmaul AC, Böcker W, <b>Weidert S</b> . A method for finding high accuracy surface zones on 3D printed bone models <i>Comput Biol Med</i> . 2021 Aug;135:104590. doi: 10.1016/j.combiomed.2021.104590 . Impact Factor: 4.589. Top Journal
2	<b>Weidert S</b> , Andress S, Linhart C, Suero EM, Greiner A, Böcker W, Kammerlander C, Becker CA. 3D printing method for next-day acetabular fracture surgery using a surface filtering pipeline: feasibility and 1-year clinical results <i>Int J Comput Assist Radiol Surg</i> . 2020 Mar;15(3):565-575. doi: 10.1007/s11548-019-02110-0. Epub 2020 Jan 2. . Impact Factor: 2.473. Standard Journal.
3	<b>Weidert S</b> , Sommer F, Suero EM, Becker CA, Pieske O, Greiner A, Kammerlander C, Böcker W, Grote S. Fluoroscopic Marker-Based Guidance System Improves Gamma Lag Screw Placement During Nailing of Intertrochanteric Fractures: A Randomized Controlled Trial <i>J Orthop Trauma</i> . 2020 Mar;34(3):145-150. doi: 10.1097/BOT.0000000000001662. . Impact Factor: 1.897. Standard Journal.
4	Stefan P, Pfandler M, Lazarovici M, Weigl M, Navab N, Euler E, Fürmetz J, <b>Weidert S</b> . Three-dimensional-Printed Computed Tomography-Based Bone Models for Spine Surgery Simulation <i>Simul Healthc</i> . 2020 Feb;15(1):61-66. doi: 10.1097/SIH.0000000000000417. . Impact Factor: 1.761.
5	<b>Weidert S</b> , Wang L, Landes J, Sandner P, Suero EM, Navab N, Kammerlander C, Euler E, von Der Heide A. Video-augmented fluoroscopy for distal interlocking of intramedullary nails decreased radiation exposure and surgical time in a bovine cadaveric setting. <i>Int J Med Robot</i> . 2019 Aug;15(4):e1995. doi: 10.1002/rcs.1995. Epub 2019 Apr 21. PMID:30861265. Impact Factor: 1.634. Standard Journal.
6	Becker CA, Kammerlander C, Greiner A, Sommer F, Linhart C, Böcker W, Rubenbauer B, <b>Weidert S</b> . [Diagnostic and Treatment Strategies in Morel-Lavallee Lesions in the Spinal Column and Pelvis]. <i>Z Orthop Unfall</i> . 2018 Oct;156(5):541-546. doi: 10.1055/a-0596-8018. Epub 2018 Apr 12. German. PMID:29649850. Impact Factor: 0.631.
7	Befrui N, Elsner J, Flessler A, Huvanandana J, Jarrousse O, Le TN, Müller M, Schulze WHW, Taing S, <b>Weidert S</b> . Vibroarthrography for early detection of knee osteoarthritis using normalized frequency features. <i>Med Biol Eng Comput</i> . 2018 Aug;56(8):1499-1514. doi: 10.1007/s11517-018-1785-4. Epub 2018 Feb 1. PMID:29392547. Impact Factor: 2.039. Standard Journal.
8	Fallavollita P, Brand A, Wang L, Euler E, Thaller P, Navab N, <b>Weidert S</b> . An augmented reality C-arm for intraoperative assessment of the mechanical axis: a preclinical study. <i>Int J Comput Assist Radiol Surg</i> . 2016 Nov;11(11):2111-2117. Epub 2016 Jun 10. PMID:27287762. Impact Factor: 1.863. Standard Journal.
9	<b>Weidert S</b> , Wang L, von der Heide A, Navab N, Euler E. [Intraoperative augmented reality visualization. Current state of development and initial experiences with the CamC]. <i>Unfallchirurg</i> . 2012 Mar;115(3):209- 13. doi: 10.1007/s00113-011-2121-8. German. PMID:22406917. Impact Factor: 0.640.

## Originalarbeiten als Co-Autor

10	Esfandiari H, <b>Weidert S</b> , Kövesházi I, Anglin C, Street J, Hodgson AJ. Deep learning-based X-ray inpainting for improving spinal 2D-3D registration Int J Med Robot. 2021 Jan 18:e2228. doi: 10.1002/rcs.2228. Online ahead of print. . Impact Factor: 2.015. Standard Journal.
11	Becker CA, Linhart C, Bruder J, Zeckey C, Greiner A, Cavalcanti Kußmaul A, <b>Weidert S</b> , Suero EM, Böcker W, Kammerlander C. Cementless hip revision cup for the primary fixation of osteoporotic acetabular fractures in geriatric patients Orthop Traumatol Surg Res. 2021 Feb;107(1):102745. doi: 10.1016/j.otsr.2020.102745. Epub 2020 Dec 14. . Impact Factor: 1.809. Standard Journal.
12	Canseco JA, Schroeder GD, Patel PD, Grasso G, Chang M, Kandziora F, Vialle EN, Oner FC, Schnake KJ, Dvorak MF, Chapman JR, Benneker LM, Rajasekaran S, Kepler CK, Vaccaro AR; AO Spine Cervical Classification Validation Group. Regional and experiential differences in surgeon preference for the treatment of cervical facet injuries: a case study survey with the AO Spine Cervical Classification Validation Group Eur Spine J. 2021 Feb;30(2):517-523. doi: 10.1007/s00586-020-06535-z. Epub 2020 Jul 22. . Impact Factor: 2.458. Standard Journal.
13	Suero EM, Greiner A, Becker CA, Cavalcanti Kußmaul A, <b>Weidert S</b> , Pfeufer D, Woiczinski M, Braun C, Flatz W, Böcker W, Kammerlander C. Biomechanical stability of sacroiliac screw osteosynthesis with and without cement augmentation Injury. 2020 Jan 30:S0020-1383(20)30071-1. doi: 10.1016/j.injury.2020.01.043. Online ahead of print. . Impact Factor: 2.106. Standard Journal.
14	Lucas B, <b>Weidert S</b> , Krause M, Rickert M, Walcher F, Reppenhagen S. OP-Simulationen, 3-D-Druck und Virtual Reality in der chirurgischen Weiterbildung Z Orthop Unfall. 2019 Dec;157(6):622-625. doi: 10.1055/a-1020-7736. Epub 2019 Dec 3. . Impact Factor: 0.798.
15	Esfandiari H, Anglin C, Guy P, Street J, <b>Weidert S</b> , Hodgson AJ. A comparative analysis of intensity-based 2D-3D registration for intraoperative use in pedicle screw insertion surgeries Int J Comput Assist Radiol Surg. 2019 Oct;14(10):1725-1739. doi: 10.1007/s11548-019-02024-x. Epub 2019 Jul 10. . Impact Factor: 2.473. Standard Journal.
16	Becker CA, Kammerlander C, Kußmaul AC, Woiczinski M, Thorwächter C, Zeckey C, Sommer F, Linhart C, <b>Weidert S</b> , Suero EM, Böcker W, Greiner A. Modified less invasive anterior subcutaneous fixator for unstable Tile-C-pelvic ring fractures: a biomechanical study. Biomed Eng Online. 2019 Mar 29;18(1):38. doi: 10.1186/s12938-019-0648-z. PMID:30925898   PMCID:PMC6441140. Impact Factor: 2.013.
17	Zeckey C, Bogusch M, Borkovec M, Becker CA, Neuerburg C, <b>Weidert S</b> , Suero EM, Böcker W, Greiner A, Kammerlander C. Radiographic cortical thickness parameters as predictors of rotational alignment in proximal femur fractures: A cadaveric study. J Orthop Res. 2019 Jan;37(1):69-76. doi: 10.1002/jor.24166. Epub 2018 Nov 19. PMID:30345546. Impact Factor: 3.043. Standard Journal.
18	Becker CA, Kammerlander C, Cavalcanti Kußmaul A, Dotzauer F, Woiczinski M, Rubenbauer B, Sommer F, Linhart C, <b>Weidert S</b> , Zeckey C, Greiner A. Minimally invasive screw fixation is as stable as anterior plating in acetabular T-Type fractures - a biomechanical study. Orthop Traumatol Surg Res. 2018 Nov;104(7):1055-1061. doi: 10.1016/j.otsr.2018.06.013. Epub 2018 Sep 1. PMID:30179721. Impact Factor: 1.572.
19	Andress S, Johnson A, Unberath M, Winkler AF, Yu K, Fotouhi J, <b>Weidert S</b> , Osgood G, Navab N. On- the-fly augmented reality for orthopedic surgery using a multimodal fiducial. J Med Imaging (Bellingham). 2018 Apr;5(2):021209. doi: 10.1117/1.JMI.5.2.021209. Epub 2018 Jan 26. PMID:29392161   PMCID:PMC5785621. Impact Factor: NA.
20	von der Heide AM, Fallavollita P, Wang L, Sandner P, Navab N, <b>Weidert S</b> , Euler E. Camera-augmented mobile C-arm (CamC): A feasibility study of augmented reality imaging in the operating room. Int J Med Robot. 2018 Apr;14(2). doi: 10.1002/rcs.1885. Epub 2017 Dec 21. PMID:29266806. Impact Factor: 1.634. Standard Journal.

21	Fischer M, Fuerst B, Lee SC, Fotouhi J, Habert S, <b>Weidert S</b> , Euler E, Osgood G, Navab N. Preclinical usability study of multiple augmented reality concepts for K-wire placement. <i>Int J Comput Assist Radiol Surg.</i> 2016 Jun;11(6):1007-14. doi: 10.1007/s11548-016-1363-x. Epub 2016 Mar 19. PMID:26995603. Impact Factor: 1.863. Standard Journal.
22	Ma M, Fallavollita P, Habert S, <b>Weidert S</b> , Navab N. Device- and system-independent personal touchless user interface for operating rooms : One personal UI to control all displays in an operating room. <i>Int J Comput Assist Radiol Surg.</i> 2016 Jun;11(6):853-61. doi: 10.1007/s11548-016-1375-6. Epub 2016 Mar 16. PMID:26984551. Impact Factor: 1.863. Standard Journal.
23	Weigl M, Stefan P, Abhari K, Wucherer P, Fallavollita P, Lazarovici M, <b>Weidert S</b> , Euler E, Catchpole K. Intra-operative disruptions, surgeon's mental workload, and technical performance in a full-scale simulated procedure. <i>Surg Endosc.</i> 2016 Feb;30(2):559-566. doi: 10.1007/s00464-015-4239-1. Epub 2015 Jun 20. PMID:26091986. Impact Factor: .
24	Londei R, Esposito M, Diotte B, <b>Weidert S</b> , Euler E, Thaller P, Navab N, Fallavollita P. Intra-operative augmented reality in distal locking. <i>Int J Comput Assist Radiol Surg.</i> 2015 Sep;10(9):1395-403. doi: 10.1007/s11548-015-1169-2. Epub 2015 Mar 27. PMID:25814098. Impact Factor: 3.540. Top Journal.
25	Wucherer P, Stefan P, Abhari K, Fallavollita P, Weigl M, Lazarovici M, Winkler A, <b>Weidert S</b> , Peters T, de Ribaupierre S, Eagleson R, Navab N. Vertebroplasty Performance on Simulator for 19 Surgeons Using Hierarchical Task Analysis. <i>IEEE Trans Med Imaging.</i> 2015 Aug;34(8):1730-7. doi: 10.1109/TMI.2015.2389033. Epub 2015 Jan 8. PMID:25585414. Impact Factor: 3.756. Top Journal.
26	Diotte B, Fallavollita P, Wang L, <b>Weidert S</b> , Euler E, Thaller P, Navab N. Multi-modal intra-operative navigation during distal locking of intramedullary nails. <i>IEEE Trans Med Imaging.</i> 2015 Feb;34(2):487-95. doi: 10.1109/TMI.2014.2361155. Epub 2014 Oct 2. PMID:25296403. Impact Factor: 3.756. Top Journal.
27	Pauly O, Diotte B, Fallavollita P, <b>Weidert S</b> , Euler E, Navab N. Machine learning-based augmented reality for improved surgical scene understanding. <i>Comput Med Imaging Graph.</i> 2015 Apr;41:55-60. doi: 10.1016/j.compmedimag.2014.06.007. Epub 2014 Jun 19. PMID:24998759. Impact Factor: 1.385.
28	Wucherer P, Stefan P, <b>Weidert S</b> , Fallavollita P, Navab N. Task and crisis analysis during surgical training. <i>Int J Comput Assist Radiol Surg.</i> 2014 Sep;9(5):785-94. doi: 10.1007/s11548-013-0970-z. Epub 2014 Jan 9. PMID:24402558. Impact Factor: 1.707. Standard Journal.
29	Wang L, Fallavollita P, Brand A, Erat O, <b>Weidert S</b> , Thaller PH, Euler E, Navab N. Intra-op measurement of the mechanical axis deviation: an evaluation study on 19 human cadaver legs. <i>Med Image Comput Comput Assist Interv.</i> 2012;15(Pt 2):609-16. PMID:23286099. Impact Factor: NA.
30	Diotte B, Fallavollita P, Wang L, <b>Weidert S</b> , Thaller PH, Euler E, Navab N. Radiation-free drill guidance in interlocking of intramedullary nails. <i>Med Image Comput Comput Assist Interv.</i> 2012;15(Pt 1):18-25. PMID:23285530. Impact Factor: NA.
31	Wang L, Fallavollita P, Zou R, Chen X, <b>Weidert S</b> , Navab N. Closed-form inverse kinematics for interventional C-arm X-ray imaging with six degrees of freedom: modeling and application. <i>IEEE Trans Med Imaging.</i> 2012 May;31(5):1086-99. doi: 10.1109/TMI.2012.2185708. Epub 2012 Jan 26. PMID:22293978. Impact Factor: 4.027. Top Journal.
32	Wang L, Traub J, <b>Weidert S</b> , Heining SM, Euler E, Navab N. Parallax-free intra-operative X-ray image stitching. <i>Med Image Anal.</i> 2010 Oct;14(5):674-86. doi: 10.1016/j.media.2010.05.007. Epub 2010 Jun 2. PMID:20561811. Impact Factor: NA.
33	Wang L, Traub J, <b>Weidert S</b> , Heining SM, Euler E, Navab N. Parallax-free long bone X-ray image stitching. <i>Med Image Comput Comput Assist Interv.</i> 2009;12(Pt 1):173-80. PMID:20425985. Impact Factor: NA.

## Reviews

34	Stefan P, Pfandler M, Wucherer P, Habert S, Fürmetz J, <b>Weidert S</b> , Euler E, Eck U, Lazarovici M, Weigl M, Navab N. [Team training and assessment in mixed reality-based simulated operating room: Current state of research in the field of simulation in spine surgery exemplified by the ATMEOS project]. Unfallchirurg. 2018 Apr;121(4):271-277. doi: 10.1007/s00113-018-0467-x. Review. German. PMID:29546445. Impact Factor: 0.716.
35	Befrui N, Fischer M, Fuerst B, Lee SC, Fotouhi J, <b>Weidert S</b> , Johnson A, Euler E, Osgood G, Navab N, Böcker W. [3D augmented reality visualization for navigated osteosynthesis of pelvic fractures]. Unfallchirurg. 2018 Apr;121(4):264-270. doi: 10.1007/s00113-018-0466-y. Review. German. PMID:29500506   PMCID:PMC5898194. Impact Factor: 0.716.
36	<b>Weidert S</b> , Andress S, Suero E, Becker C, Hartel M, Behle M, Willy C. [3D printing in orthopedic and trauma surgery education and training : Possibilities and fields of application]. Unfallchirurg. 2019 Jun;122(6):444-451. doi: 10.1007/s00113-019-0650-8. Review. German. PMID:31053925. Impact Factor: 0.716.

## Bücher und Buchkapitel

37	Ficklscherer A, <b>Weidert S</b> . Kurzlehrbuch Orthopädie und Unfallchirurgie. 2018 March. Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH. ISBN: 3437433350
38	<b>Weidert S</b> , Philipp S. Mixed and Augmented Reality Simulation for Minimally Invasive Spine Surgery Education - In book: Technical Advances in Minimally Invasive Spine Surgery. 2022

## Gesammelte Referenzen

1. Agarwala Anshul; Agrawal Pranshu SS. A report of nonunion at medial wedge high tibial osteotomy site and its management. *J Nat Sci Biol Med.* 2015;6(3):160-NA. doi:10.4103/0976-9668.166128
2. Ahmed KS. Estimating Protein Functions Correlation Based on Overlapping Proteins and Cluster Interactions. *American Journal of Bioinformatics Research.* 2012;1(1):1-5. doi:10.5923/j.bioinformatics.20110101.01
3. Akatsuka Takakazu; Fujii Masakazu; Furuhashi Yukihiro; Saito Akito; Shibasaki Takao; Iseki Hiroshi; Hori Tomokatsu YK. MICCAI - AR Navigation System for Neurosurgery. In: *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2000.* Vol NA. ; 2000:833-838. doi:10.1007/978-3-540-40899-4\_86
4. Alberti C. Three-dimensional CT and structure models. *Br J Radiol.* 1980;53(627):261-262. doi:10.1259/0007-1285-53-627-261-b
5. Alyassin Jack L.; Downs J. Hunter; Fox Peter T. AML. Evaluation of new algorithms for the interactive measurement of surface area and volume. *Med Phys.* 1994;21(6):741-752. doi:10.1118/1.597333
6. Andersen Lars; Madeleine Pascal REAN. A Review of Engineering Aspects of Vibroarthrography of the Knee Joint. *Crit Rev Phys Rehabil Med.* 2016;28(1-2):13-32. doi:10.1615/critrevphysrehabilmed.2016017185
7. Andreß S, Achilles F, Bischoff J, Kußmaul AC, Böcker W, Weidert S. A method for finding high accuracy surface zones on 3D printed bone models. *Comput Biol Med.* 2021;135. doi:10.1016/j.combiomed.2021.104590
8. Baumgaertner Brian D. MR; S. AWARENESS OF TIP-APEX DISTANCE REDUCES FAILURE OF FIXATION OF TROCHANTERIC FRACTURES OF THE HIP. *J Bone Joint Surg Br.* 1997;79(6):969-971. doi:10.1302/0301-620x.79b6.0790969
9. Baumgaertner Stephen L.; Lindskog Dieter M.; Keggi John MR; C. The Value of the Tip-Apex Distance in Predicting Failure of Fixation of

- Peritrochanteric Fractures of the Hip. *J Bone Joint Surg Am.* 1995;77(7):1058-1064. doi:10.2106/00004623-199507000-00012
10. Becker CA, Kammerlander C, Greiner A, et al. Diagnostic and Treatment Strategies in Morel-Lavallee Lesions in the Spinal Column and Pelvis. *Z Orthop Unfall.* 2018;156(5):541-546. doi:10.1055/a-0596-8018
  11. Befrui N, Elsner J, Flessner A, et al. Vibroarthrography for early detection of knee osteoarthritis using normalized frequency features. *Med Biol Eng Comput.* 2018;56(8):1499-1514. doi:10.1007/s11517-018-1785-4
  12. Ben-Dor Laurakay; Friedman Nir; Nachman Iftach; Schummer Michèl; Yakhini Zohar AB. Tissue classification with gene expression profiles. *J Comput Biol.* 2000;7(3-4):559-583. doi:10.1089/106652700750050943
  13. Beverland George; Mccoy Gf; Mollan Rab DK. What is physiological patellofemoral crepitus. *Med Biol Eng Comput.* 1985;23(2):1249-1250. doi:NA
  14. Bizzotto Andrea; Regis Dario; Romani Denis; Tami Ivan; Magnan Bruno NS. Three-Dimensional Printing of Bone Fractures: A New Tangible Realistic Way for Preoperative Planning and Education. *Surg Innov.* 2015;22(5):548-551. doi:10.1177/1553350614547773
  15. Bizzotto Ivan; Santucci Attilio; Romani Denis; Cosentino Andrea NT. 3D Printed replica of articular fractures for surgical planning and patient consent: A 3 years multi-centric experience. *Mater Today Commun.* 2018;15(NA):309-313. doi:10.1016/j.mtcomm.2018.02.014
  16. Blair-Pattison Richard; Swamy Ganesh; Anglin Carolyn AJ; H. Forces in spinal cannulation and breaches ex vivo. *Proc Inst Mech Eng H.* 2014;228(7):693-702. doi:10.1177/0954411914540632
  17. Blattert Ute; Kunz Elmar; Panzer W.; Weckbach Arnulf; Regulla D. TR; F. Skill dependence of radiation exposure for the orthopaedic surgeon during interlocking nailing of long-bone shaft fractures: a clinical study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2004;124(10):659-664. doi:10.1007/s00402-004-0743-9

18. Blodgett WE. Auscultation of the Knee Joint. *Boston Med Surg J*. 1902;146(3):63-66. doi:10.1056/nejm190201161460304
19. Bohl Michael A; Repp Garrett J; Nakaji Peter; Chang Steve W.; Turner Jay D.; Kakarla U Kumar MA; M. The Barrow Biomimetic Spine: Fluoroscopic Analysis of a Synthetic Spine Model Made of Variable 3D-printed Materials and Print Parameters. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2018;43(23):E1368-E1375. doi:10.1097/brs.0000000000002715
20. Bortolotto Esmeralda; Peroni Caterina; Orlandi Matteo A.; Bizzotto Nicola; Poggi Paolo CE. 3D Printing of CT Dataset: Validation of an Open Source and Consumer-Available Workflow. *J Digit Imaging*. 2015;29(1):14-21. doi:10.1007/s10278-015-9810-8
21. Brooks Mamdouh SM. Accuracy of clinical diagnosis in knee arthroscopy. *Ann R Coll Surg Engl*. 2002;84(4):265-268. doi:10.1308/003588402320439711
22. Brouwers Arno; van Tilborg Fiek A J B; de Jongh Mariska A. C.; Lansink K.W.W.; Bemelman Mike LT. Validation study of 3D-printed anatomical models using 2 PLA printers for preoperative planning in trauma surgery, a human cadaver study. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2018;45(6):1013-1020. doi:10.1007/s00068-018-0970-3
23. Brouwers Lars F Pullter; de Jongh Mariska A C; der Heijden Frank H.W.M. van; Leenen Luke P H; Spanjersberg Willem R; van Helden Sven H; Verbeek Diederik O; Bemelman Mike NA; Lansink Koen W W NG. The Value of 3D Printed Models in Understanding Acetabular Fractures. *3D Print Addit Manuf*. 2018;5(1):37-45. doi:10.1089/3dp.2017.0043
24. Brown Brenton F.; Firoozbakhsh Keikhosrow GA; M. Application of computer-generated stereolithography and interpositioning template in acetabular fractures: a report of eight cases. *J Orthop Trauma*. 2002;16(5):347-352. doi:10.1097/00005131-200205000-00010
25. Brown Keikhosrow; Gehlert Rick J GA; F. Three-dimensional CT modeling versus traditional radiology techniques in treatment of acetabular fractures. *Iowa Orthop J*. 2001;21(NA):20-24. doi:NA

26. Buckwalter Henry J. JA; M. Articular cartilage: degeneration and osteoarthritis, repair, regeneration, and transplantation. *Instr Course Lect.* 1998;47(NA):487-504. doi:NA
27. Burkhard Philipp; Farshad Mazda MD; F. Three-dimensionally printed vertebrae with different bone densities for surgical training. *Eur Spine J.* 2018;28(4):798-806. doi:10.1007/s00586-018-5847-y
28. Butscher Marc; Hofmann Sandra; Gauckler Ludwig J.; Müller Ralph A; B. Structural and material approaches to bone tissue engineering in powder-based three-dimensional printing. *Acta Biomater.* 2010;7(3):907-920. doi:10.1016/j.actbio.2010.09.039
29. Chang Chih-Jen CCL. LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Trans Intell Syst Technol.* 2011;2(3):27. doi:10.1145/1961189.1961199
30. Chen Lejing; Fallavollita Pascal; Navab Nassir XW. Medical Imaging: Image-Guided Procedures - Error analysis of the x-ray projection geometry of camera-augmented mobile C-arm. *SPIE Proceedings.* 2012;8316(NA):237-242. doi:10.1117/12.911324
31. Chen Lejing; Fallavollita Pascal; Navab Nassir XW. Precise X-ray and video overlay for augmented reality fluoroscopy. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2012;8(1):29-38. doi:10.1007/s11548-012-0746-x
32. Chen Xuanhuang; Zhang Guodong; Haibin Lin; Yu Zhengxi; Wu Changfu; Li Xing; Lin Yijun; Huang Wenhua XC. Accurate fixation of plates and screws for the treatment of acetabular fractures using 3D-printed guiding templates: An experimental study. *Injury.* 2017;48(6):1147-1154. doi:10.1016/j.injury.2017.03.009
33. Cherkassky Yunqian VM. Practical selection of SVM parameters and noise estimation for SVM regression. *Neural Netw.* 2004;17(1):113-126. doi:10.1016/s0893-6080(03)00169-2
34. Çiftdemir Sedat Alpaslan; Özcan Mert; Copuroglu Cem; Erem Murat MT. Does electromagnetic-manual guided distal locking influence rotational alignment in antegrade femoral nailing? *Int Orthop.* 2014;39(3):507-512. doi:10.1007/s00264-014-2626-1

35. Citak Michael J.; Kendoff Daniel; Tarte S; Krettek Christian; Nolte Lutz-Peter; Hübner Tobias MG. Virtual 3D planning of acetabular fracture reduction. *J Orthop Res.* 2007;26(4):547-552. doi:10.1002/jor.20517
36. Cortes Vladimir CV. Support-Vector Networks. *Mach Learn.* 1995;20(3):273-297. doi:10.1023/a:1022627411411
37. Dawson R; Murray D; Carr A JF. Questionnaire on the perceptions of patients about total knee replacement. *J Bone Joint Surg Br.* 1998;80(1):63-69. doi:NA
38. Dawson Ray; Carr Andrew; Murray David W. JF. QUESTIONNAIRE ON THE PERCEPTIONS OF PATIENTS ABOUT TOTAL HIP REPLACEMENT. *Journal of Bone and Joint Surgery-british Volume.* 1998;80(2):185-190. doi:NA
39. Diotte Pascal; Wang Lejing; Weidert Simon; Euler Ekkehard; Thaller Peter H.; Navab Nassir BF. Multi-Modal Intra-Operative Navigation During Distal Locking of Intramedullary Nails. *IEEE Trans Med Imaging.* 2014;34(2):487-495. doi:10.1109/tmi.2014.2361155
40. Diotte Pascal; Wang Lejing; Weidert Simon; Thaller Peter-Helmut; Euler Ekkehard; Navab Nassir BF. MICCAI (1) - Radiation-Free drill guidance in interlocking of intramedullary nails. *Med Image Comput Comput Assist Interv.* 2012;15(Pt 1):18-25. doi:10.1007/978-3-642-33415-3\_3
41. Dunbar Otto; Ryd Leif; Lidgren Lars MJ; R. Appropriate questionnaires for knee arthroplasty. *J Bone Joint Surg Br.* 2001;83-B(3):339-344x. doi:10.1302/0301-620x.83b3.0830339
42. Dunbar Otto; Ryd Leif; Lidgren Lars MJ; R. Appropriate questionnaires for knee arthroplasty. Results of a survey of 3600 patients from The Swedish Knee Arthroplasty Registry. *J Bone Joint Surg Br.* 2001;83(3):339-344. doi:NA
43. Elfar Ron M.G.; Reed Jeffrey D.; Stanbury Spencer J. JJM. Composite Bone Models in Orthopaedic Surgery Research and Education. *J Am Acad Orthop Surg.* 2014;22(2):111-120. doi:10.5435/jaaos-22-02-111

44. Erat Olivier; Weidert Simon; Thaller Peter-Helmut; Euler Ekkehard; Mutschler Wolf; Navab Nassir; Fallavollita Pascal OP. Medical Imaging: Image-Guided Procedures - How a surgeon becomes superman by visualization of intelligently fused multi-modalities. SPIE Proceedings. 2013;8671(NA):NA-NA. doi:10.1117/12.2006766
45. Erb KH. Über die Möglichkeit der Registrierung von Gelenkgeräuschen. Langenbecks Arch Surg. 1933;241(11):237-245. doi:10.1007/bf02797216
46. Fallavollita P, Brand A, Wang L, et al. An augmented reality C-arm for intraoperative assessment of the mechanical axis: a preclinical study. Int J Comput Assist Radiol Surg. 2016;11(11):2111-2117. doi:10.1007/s11548-016-1426-z
47. Fang Hong; Kuong Evelyn E; Chui Elvis; Siu Yuk Chuen; Ji Tao; Drstvenšek Igor CC. Surgical applications of three-dimensional printing in the pelvis and acetabulum: from models and tools to implants. Unfallchirurg. 2019;122(4):278-285. doi:10.1007/s00113-019-0626-8
48. Faulkner Austin C.; Bradley Yong; Pasciak Alexander S. AR; B. A robust and inexpensive phantom for fluoroscopically guided lumbar puncture training. Simul Healthc. 2015;10(1):54-58. doi:10.1097/sih.0000000000000066
49. Fedorov Reinhard; Kalpathy-Cramer Jayashree; Finet Julien; Fillion-Robin Jean-Christophe; Pujol Sonia; Bauer Christian; Jennings Dominique; Fennessy Fiona M.; Sonka Milan; Buatti John M.; Aylward Stephen R.; Miller James V.; Pieper Steve; Kikinis Ron AB. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. Magn Reson Imaging. 2012;30(9):1323-1341. doi:10.1016/j.mri.2012.05.001
50. Feuerstein Thomas; Heining Sandro Michael; Navab Nassir MM. Intraoperative Laparoscope Augmentation for Port Placement and Resection Planning in Minimally Invasive Liver Resection. IEEE Trans Med Imaging. 2008;27(3):355-369. doi:10.1109/tmi.2007.907327

51. Frank Rangaraj M.; Bell G.D. CB; R. Analysis of knee joint sound signals for non-invasive diagnosis of cartilage pathology. *IEEE Eng Med Biol Mag.* 1990;9(1):65-68. doi:10.1109/51.62910
52. Fuchs H.; Schmid A.; Stürmer Klaus Michael M; M. Strahlenschutz im Operationssaal. *Oper Orthop Traumatol.* 1999;11(4):328-333. doi:10.1007/bf02593998
53. Fuerst Daniel; Augat Peter; Schrempf Andreas DS. EMBC - Foam phantom development for artificial vertebrae used for surgical training. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2012;2012(NA):5773-5776. doi:10.1109/embc.2012.6347306
54. Gausden Alexander B.; Zeldin Roseann; Lane Joseph M.; McCarthy Moira M. EB; C. Tracking Cumulative Radiation Exposure in Orthopaedic Surgeons and Residents: What Dose Are We Getting? *J Bone Joint Surg Am.* 2017;99(15):1324-1329. doi:10.2106/jbjs.16.01557
55. Geller Comron; Morrison Todd A.; Macaulay William JA; S. Tip-apex distance of intramedullary devices as a predictor of cut-out failure in the treatment of peritrochanteric elderly hip fractures. *Int Orthop.* 2009;34(5):719-722. doi:10.1007/s00264-009-0837-7
56. George Peter; Rybicki Frank J.; Mitsouras Dimitrios EL. Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Medical Models. *Radiographics.* 2017;37(5):1424-1450. doi:10.1148/rg.2017160165
57. Gottschalk S. Tim; Park Daniel K.; Rhee John M.; Mitchell Phillip M. MB; Y. Surgical training using three-dimensional simulation in placement of cervical lateral mass screws: a blinded randomized control trial. *Spine J.* 2014;15(1):168-175. doi:10.1016/j.spinee.2014.08.444
58. Guerhazi Frank W.; Hayashi Daichi AR. Imaging of osteoarthritis: update from a radiological perspective. *Curr Opin Rheumatol.* 2011;23(5):484-491. doi:10.1097/bor.0b013e328349c2d2
59. H Ernest W. FJ. Analysis of sounds from normal and pathologic knee joints. *Arch Phys Med Rehabil.* 1961;42(NA):233-240. doi:NA

60. Hankemeier Tobias; Wang Gongli; Kendoff Daniel; Zheng Guoyan; Richter Martinus; Gösling Thomas; Nolte Lutz-Peter; Krettek Christian SH. Navigated intraoperative analysis of lower limb alignment. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2005;125(8):531-535. doi:10.1007/s00402-005-0038-9
61. Haonga Lewis G. BTZ. The SIGN Nail: Factors in a Successful Device for Low-Resource Settings. *J Orthop Trauma.* 2015;29(Supplement 10):S37-9. doi:10.1097/bot.0000000000000411
62. Harrop Ali R.; Hoh Daniel J.; Ghobrial George M.; Sharan Ashwini JS; R. Neurosurgical training with a novel cervical spine simulator: posterior foraminotomy and laminectomy. *Neurosurgery.* 2013;73(supplement 1):94-99. doi:10.1093/neurosurgery/73.suppl\_1.s94
63. Hawi Emmanouil; Suero Eduardo M.; Meller Rupert; Citak Musa; Krettek Christian NL. A cadaver study comparing intraoperative methods to analyze lower limb alignment. *Skeletal Radiol.* 2014;43(11):1577-1581. doi:10.1007/s00256-014-1972-9
64. Heining Stefan; Euler Ekkehard; Navab Nassir SMW. CAMC (camera augmented mobile C-arm)-first clinical application in a cadaver study. *J Biomech.* 2006;39(NA):S210-NA. doi:10.1016/s0021-9290(06)83765-6
65. Hirai Akio; Kawamata Takakazu; Hori Tomokatsu; Iseki Hiroshi NK. Image-guided neurosurgery system integrating AR-based navigation and open-MRI monitoring. *Comput Aided Surg.* 2005;10(2):59-72. doi:10.1080/10929080500229389
66. Horn BKP. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America A.* 1987;4(4):629-642. doi:10.1364/josaa.4.000629
67. Hudelmaier Christian; Hohe J.; Englmeier K.-H.; Reiser Maximilian F.; Putz Reinhard; Eckstein F. MG. Age-related changes in the morphology and deformational behavior of knee joint cartilage. *Arthritis Rheum.* 2001;44(11):2556-2561. doi:10.1002/1529-0131(200111)44:11<2556::aid-art436>3.0.co;2-u
68. Hueter C. *Grundriss Der Chirurgie. Vol NA.*; 1880. doi:NA

69. Hurson Anthony; O'Donnchadha Brian; Nicholson P.; Rice J; McElwain J.P. CT. Rapid prototyping in the assessment, classification and preoperative planning of acetabular fractures. *Injury*. 2007;38(10):1158-1162. doi:10.1016/j.injury.2007.05.020
70. Jackson Isao RW; A. THE ROLE OF ARTHROSCOPY IN THE MANAGEMENT OF DISORDERS OF THE KNEE. *J Bone Joint Surg Br*. 1972;54(2):310-322. doi:10.1302/0301-620x.54b2.310
71. Jackson Timothy M.; Aberman Harold M. DW; S. Symptomatic articular cartilage degeneration: the impact in the new millennium. *Clin Orthop Relat Res*. 2001;391(391 Suppl):S14-25. doi:10.1097/00003086-200110001-00003
72. Jiang Liu; Km Yip; Wu En-Ting CCY. Physiological patellofemoral crepitus in knee joint disorders. *Bull Hosp Jt Dis*. 53(4):22-26. doi:NA
73. Kannus Jari; Sievänen Harri; Heinonen Ari; Vuori Ilkka; Jarvinen M. PP. Epidemiology of hip fractures. *Bone*. 1996;18(1):57S-63S. doi:10.1016/8756-3282(95)00381-9
74. Kim Jeong Hwan; Kang Jin U.; Song Chul-Gyu KSS. An enhanced algorithm for knee joint sound classification using feature extraction based on time-frequency analysis. *Comput Methods Programs Biomed*. 2009;94(2):198-206. doi:10.1016/j.cmpb.2008.12.012
75. King Langche GZ. Logistic Regression in Rare Events Data. *Political Analysis*. 2001;9(2):137-163. doi:10.1093/oxfordjournals.pan.a004868
76. Klein Selim; Traub Jörg; Heining Sandro Michael; Euler Ekkehard; Navab Nassir TB. Bildverarbeitung F&uuml;r Die Medizin - Interactive Guidance System for C-Arm Repositioning Without Radiation. Vol NA. doi:10.1007/978-3-540-71091-2\_5
77. Kobbelt Jens; Labsik Ulf; Seidel Hans-Peter LV. A Shrink Wrapping Approach to Remeshing Polygonal Surfaces. *Computer Graphics Forum*. 1999;18(3):119-130. doi:10.1111/1467-8659.00333

78. Konishi Makoto; Nakamoto Masahiko; Kakeji Yoshihiro; Yoshino Ichiro; Taketomi Akinobu; Sato Yoshinobu; Tamura Shinichi; Maehara Yoshihiko KH. Augmented reality navigation system for endoscopic surgery based on three-dimensional ultrasound and computed tomography: Application to 20 clinical cases. *Int Congr Ser.* 2005;1281(NA):537-542. doi:10.1016/j.ics.2005.03.234
79. Koprowski R. Book review of “The Biomedical Engineering Handbook” fourth edition, edited by Joseph D. Bronzino, Donald R. Peterson. *Biomed Eng Online.* 2016;15(1):1-7. doi:10.1186/s12938-015-0119-0
80. Kraus Michael, von dem Berge Stephanie; Schöll Hendrik; Krischak Gert; Gebhard Florian. Integration of fluoroscopy-based guidance in orthopaedic trauma surgery - a prospective cohort study. *Injury.* 2013;44(11):1486-1492. doi:10.1016/j.injury.2013.02.008
81. Krettek Bernd; Farouk Osama; Miclau Theodore; Kromm Alexander; Tscherner Harald CK. Experimental study of distal interlocking of a solid tibial nail: radiation-independent distal aiming device (DAD) versus freehand technique (FHT). *J Orthop Trauma.* 1998;12(6):373-378. doi:10.1097/00005131-199808000-00001
82. Krettek Bernd; Miclau Theodore; Kölbl Reto; Machreich Thomas; Tscherner Harald CK. A mechanical distal aiming device for distal locking in femoral nails. *Clin Orthop Relat Res.* 1999;364(364):267-275. doi:10.1097/00003086-199907000-00033
83. Krettek Theodore; Schandelmaier Peter; Tscherner H. C; M. Intraoperative control of axes, rotation and length in femoral and tibial fractures technical note. *Injury.* 1998;29(29):29-39. doi:10.1016/s0020-1383(98)95006-9
84. Krishnan R M; Bell G D; Frank C B SR. Auditory display of knee-joint vibration signals. *J Acoust Soc Am.* 2001;110(6):3292-3304. doi:10.1121/1.1413995
85. Krishnan Rangaraj M.; Bell G.D.; Frank Cyril B. SR. Adaptive time-frequency analysis of knee joint vibroarthrographic signals for noninvasive

- screening of articular cartilage pathology. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2000;47(6):773-783. doi:10.1109/10.844228
86. Kuhl Claudia MB. Enhanced cephalomedullary nail lag screw placement and intraoperative tip-apex distance measurement with a novel computer assisted surgery system. *Injury.* 2016;47(10):2155-2160. doi:10.1016/j.injury.2016.07.018
87. Lilly Denise M.; Graner Kelly C.; Nowinski Gregory P.; Sadowski Jason; Grant Kevin D. RJ; K. Computer-assisted navigation for intramedullary nail fixation of intertrochanteric femur fractures: A randomized, controlled trial. *Injury.* 2017;49(2):345-350. doi:10.1016/j.injury.2017.12.006
88. Lim Graham S.; Keown Thomas; Byrne Connor T.; Lin Charles C.; Marecek Geoffrey S.; Scolaro John A. PK; S. Use of 3D Printed Models in Resident Education for the Classification of Acetabulum Fractures. *J Surg Educ.* 2018;75(6):1679-1684. doi:10.1016/j.jsurg.2018.04.019
89. Lin Chih-Jen; Weng Ruby C. HTL. A note on Platt's probabilistic outputs for support vector machines. *Mach Learn.* 2007;68(3):267-276. doi:10.1007/s10994-007-5018-6
90. Lin LIK. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics.* 1989;45(1):255-268. doi:10.2307/2532051
91. Liodakis Mohamed; Doxastaki Iosifina; Krettek Christian; Haasper Carl; Hankemeier Stefan EK. Upright MRI measurement of mechanical axis and frontal plane alignment as a new technique: a comparative study with weight bearing full length radiographs. *Skeletal Radiol.* 2010;40(7):885-889. doi:10.1007/s00256-010-1074-2
92. Londei Marco; Diotte Benoit; Weidert Simon; Euler Ekkehard; Thaller Peter-Helmut; Navab Nassir; Fallavollita Pascal RE. Intra-operative augmented reality in distal locking. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2015;10(9):1395-1403. doi:10.1007/s11548-015-1169-2
93. Ma Weipeng; Zhang Boyu; Qu Xiaofeng; Ning Guochen; Zhang Xinran; Liao Hongen LJ. Augmented reality surgical navigation with accurate CBCT-

- patient registration for dental implant placement. *Med Biol Eng Comput.* 2018;57(1):47-57. doi:10.1007/s11517-018-1861-9
94. Ma Zhe; Zhang Boyu; Jiang Weipeng; Fu Ligong; Zhang Xinran; Liao Hongen LZ. Three-dimensional augmented reality surgical navigation with hybrid optical and electromagnetic tracking for distal intramedullary nail interlocking. *Int J Med Robot.* 2018;14(4):e1909-NA. doi:10.1002/rcs.1909
95. Maini Amit; Jha Sunil; Tiwari Anurag LS. Three-dimensional printing and patient-specific pre-contoured plate: future of acetabulum fracture fixation? *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2016;44(2):215-224. doi:10.1007/s00068-016-0738-6
96. Maussavi Rangaraj M.; Bell G.D.; Frank Cyril B.; Ladly K.O. ZMK; R. Screening of vibroarthrographic signals via adaptive segmentation and linear prediction modeling. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1996;43(1):15-23. doi:10.1109/10.477697
97. McCauley R; Lynch Kevin; Jokl Peter TR; K. Chondromalacia patellae: diagnosis with MR imaging. *AJR Am J Roentgenol.* 1992;158(1):101-105. doi:10.2214/ajr.158.1.1727333
98. Mccoy J. D.; Beverland DE; Kernohan W. G.; Mollan Rab GM. Vibration arthrography as a diagnostic aid in diseases of the knee. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Br.* 1987;69(2):288-293. doi:10.1302/0301-620x.69b2.3818762
99. Mehlman Thomas CT; D. Radiation Exposure to the Orthopaedic Surgical Team During Fluoroscopy: "How Far Away Is Far Enough?" *J Orthop Trauma.* 1997;11(6):392-398. doi:10.1097/00005131-199708000-00002
100. Menashe Kelly A.; Losina Elena; Kloppenburg Margreet; Zhang Weiya; Li Ling; Hunter David J. LH. The diagnostic performance of MRI in osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Osteoarthritis Cartilage.* 2011;20(1):13-21. doi:10.1016/j.joca.2011.10.003
101. Messmer Felix; Wullschleger Christoph; Hügli Rolf W.; Regazzoni Pietro; Jacob Augustinus Ludwig PM. Image Fusion for Intraoperative Control of

- Axis in Long Bone Fracture Treatment. *European Journal of Trauma*. 2006;32(6):555-561. doi:10.1007/s00068-006-5159-5
102. Mingo-Robinet Miguel; Martínez-Cervell Carmen; del Olmo Juan Antonio Alonso; Laso Jose A. Rivas; Aguado-Hernández Hector; Burón-Alvarez Isidro J; TT. Comparative study of the second and third generation of gamma nail for trochanteric fractures: review of 218 cases. *J Orthop Trauma*. 2015;29(3):e85-90. doi:10.1097/bot.0000000000000190
103. Mischkowski Max; Kübler Alexander C.; Krug Barbara; Seifert Ulrich; Zöller Joachim E. RA; Z. Application of an augmented reality tool for maxillary positioning in orthognathic surgery - a feasibility study. *J Craniomaxillofac Surg*. 2006;34(8):478-483. doi:10.1016/j.jcms.2006.07.862
104. Mitschke Ali-Reza; Navab Nassir MBH. MICCAI - Interventions under Video-Augmented X-Ray Guidance: Application to Needle Placement. In: *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2000*. Vol NA. ; 2000:858-868. doi:10.1007/978-3-540-40899-4\_89
105. Moreschini V.; Cannata R. O; P. Insertion of distal locking screws of tibial intramedullary nails: A comparison between the free-hand technique and the SURESHOTTM Distal Targeting System. *Injury*. 2013;45(2):405-407. doi:10.1016/j.injury.2013.09.023
106. Müller J.; Wenda K.; Mohr W.; Rommens Pol Maria LPS. Radiation exposure to the hands and the thyroid of the surgeon during intramedullary nailing. *Injury*. 1998;29(6):461-468. doi:10.1016/s0020-1383(98)00088-6
107. Nakamoto Osamu; Faber Kenneth; Gill Inderbir S. MU. Current progress on augmented reality visualization in endoscopic surgery. *Curr Opin Urol*. 2012;22(2):121-126. doi:10.1097/mou.0b013e3283501774
108. Navab A.; Mitschke Matthias NBK. IWAR - Merging Visible and Invisible: Two Camera-Augmented Mobile C-Arm (CAMC) Applications. Vol NA. doi:10.1109/iwar.1999.803814
109. Navab N; Heining Sandro Michael; Traub Joerg NH. Camera Augmented Mobile C-Arm (CAMC): Calibration, Accuracy Study, and Clinical

- Applications. *IEEE Trans Med Imaging*. 2010;29(7):1412-1423. doi:10.1109/tmi.2009.2021947
110. Navab Nassir, Stefan; Benhimane Selim; Euler Ekkehard; Heining Sandro Michael NW. MICCAI (1) - Visual servoing for intraoperative positioning and repositioning of mobile c-arms. *Med Image Comput Comput Assist Interv*. 2006;9(Pt 1):551-560. doi:10.1007/11866565\_68
111. Navab T.; Wang Lejing; Okur Asli; Wendler Thomas NB. First Deployments of Augmented Reality in Operating Rooms. *Computer (Long Beach Calif)*. 2012;45(7):48-55. doi:10.1109/mc.2012.75
112. Omar Eduardo M.; Hawi Nael; Decker Sebastian; Krettek Christian; Citak Musa MS. Preoperative virtual reduction reduces femoral malrotation in the treatment of bilateral femoral shaft fractures. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2015;135(10):1385-1389. doi:10.1007/s00402-015-2285-8
113. Oszwald Ralf; Stier Rebecca; Gaulke Ralph; Calafi Afshin; Müller Christian W.; Wahl Friedrich M.; Krettek Christian; Gössling Thomas MW. Hands-on robotic distal interlocking in intramedullary nail fixation of femoral shaft fractures. *Technol Health Care*. 2010;18(4):325-334. doi:10.3233/thc-2010-0596
114. Outerbridge RE. FURTHER STUDIES ON THE ETIOLOGY OF CHONDROMALACIA PATELLAE. *J Bone Joint Surg Br*. 1964;46(2):179-190. doi:10.1302/0301-620x.46b2.179
115. Outerbridge RE. THE ETIOLOGY OF CHONDROMALACIA PATELLAE. *J Bone Joint Surg Br*. 1961;43(4):752-757. doi:10.1302/0301-620x.43b4.752
116. Pahuta Emil H.; Backstein David; Papp Steven; Gofton Wade MAS. Virtual fracture carving improves understanding of a complex fracture: a randomized controlled study. *J Bone Joint Surg Am*. 2012;94(24):e182-1-7. doi:10.2106/jbjs.k.00996
117. Pakdel Faramarz HRS. ICCSA (3) - Incremental Adaptive Loop Subdivision. In: *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2004*. Vol NA. ; 2004:237-246. doi:10.1007/978-3-540-24767-8\_25

118. Paley Kevin DT. Mechanical axis deviation of the lower limbs. Preoperative planning of uniapical angular deformities of the tibia or femur. *Clin Orthop Relat Res.* 1992;280(280):48-64. doi:10.1097/00003086-199207000-00008
119. Palmer Cameron; McNally Eugene; Price Andrew; Tracey Irene; Jezzard Peter; Carr Andrew; Glyn-Jones Sion AB. Non-invasive imaging of cartilage in early osteoarthritis. *Bone Joint J.* 2013;95-B(6):738-746. doi:10.1302/0301-620x.95b6.31414
120. Panzica Eduardo M.; Westphal Ralf; Citak Musa; Lioudakis Emmanouil; Hawi Nael; Petri Max; Krettek Christian; Stuebig Timo MS. Robotic distal locking of intramedullary nailing: Technical description and cadaveric testing. *Int J Med Robot.* 2017;13(4):NA-NA. doi:10.1002/rcs.1831
121. Parker MJ. Sliding hip screw versus intramedullary nail for trochanteric hip fractures; a randomised trial of 1000 patients with presentation of results related to fracture stability. *Injury.* 2017;48(12):2762-2767. doi:10.1016/j.injury.2017.10.029
122. Pati Okan; Wang Lejing; Weidert Simon; Euler Ekkehard; Navab Nassir; Fallavollita Pascal SE. Medical Imaging: Image-Guided Procedures - Accurate pose estimation using single marker single camera calibration system. *SPIE Proceedings.* 2013;8671(NA):867126-NA. doi:10.1117/12.2006776
123. Pauly Benoit; Habert Séverine; Weidert Simon; Euler Ekkehard; Fallavollita Pascal; Navab Nassir OD. IPCAI - Relevance-Based Visualization to Improve Surgeon Perception. In: *Information Processing in Computer-Assisted Interventions.* Vol NA. ; 2014:178-185. doi:10.1007/978-3-319-07521-1\_19
124. Peylan A. Direct auscultation of the joints; preliminary clinical observations. *Rheumatism.* 1953;9(4):77-81. doi:NA
125. Pfandler Marc; Stefan Philipp; Wucherer Patrick; Weigl Matthias ML. Virtual reality-based simulators for spine surgery: a systematic review. *Spine J.* 2017;17(9):1352-1363. doi:10.1016/j.spinee.2017.05.016

126. Pihlajamaiki Paavo-Ilari; Leppanen Vesa-Veikko; Kiuru Martti J.; Mattila Ville M.; 高庆 (译) NA; 陈仁辉 (译) NA; 王永清 (译) NA HK; K. Reliability of Clinical Findings and Magnetic Resonance Imaging for the Diagnosis of Chondromalacia Patellae. Chinese Journal of Orthopaedics. 2010;30(09):NA-NA. doi:NA
127. Pihlajamäki Paavo-Ilari; Leppanen Vesa-Veikko; Kiuru Martti J.; Mattila Ville M. HK. Reliability of Clinical Findings and Magnetic Resonance Imaging for the Diagnosis of Chondromalacia Patellae. J Bone Joint Surg Am. 2010;92(4):927-934. doi:10.2106/jbjs.h.01527
128. Popp Ronald; Schiuma Damiano; Keel Marius; Lippuner Kurt; Benneker Lorin Michael AS. DensiProbe Spine: an intraoperative measurement of bone quality in spinal instrumentation. A clinical feasibility study. Spine J. 2013;13(10):1223-1229. doi:10.1016/j.spinee.2013.06.067
129. Prior B; Shark Lik-Kwan; Stockdale Jennifer; Selfe James; R Bury; P Cole; Goodacre John JA; M. Analysis of high frequency acoustic emission signals as a new approach for assessing knee osteoarthritis. Ann Rheum Dis. 2010;69(5):929-930. doi:10.1136/ard.2009.112599
130. Quatman Carolyn M.; Schmitt Laura C.; Spindler Kurt P. CE; H. The Clinical Utility and Diagnostic Performance of Magnetic Resonance Imaging for Identification of Early and Advanced Knee Osteoarthritis: A Systematic Review. Am J Sports Med. 2011;39(7):1557-1568. doi:10.1177/0363546511407612
131. Rangayyan Faraz; Wu Yunfeng; Cai Suxian RM; O. Fractal analysis of knee-joint vibroarthrographic signals via power spectral analysis. Biomed Signal Process Control. 2013;8(1):23-29. doi:10.1016/j.bspc.2012.05.004
132. Rangayyan Yunfeng RM; W. Analysis of vibroarthrographic signals with features related to signal variability and radial-basis functions. Ann Biomed Eng. 2008;37(1):156-163. doi:10.1007/s10439-008-9601-1
133. Rangayyan Yunfeng RM; W. Screening of knee-joint vibroarthrographic signals using probability density functions estimated with Parzen windows.

- Biomed Signal Process Control. 2010;5(1):53-58. doi:10.1016/j.bspc.2009.03.008
134. Rangayyan Yunfeng RM; W. Screening of knee-joint vibroarthrographic signals using statistical parameters and radial basis functions. *Med Biol Eng Comput.* 2007;46(3):223-232. doi:10.1007/s11517-007-0278-7
135. Reed Diego; Hatch George F. Rick; Burke Wendy S.; Colletti Patrick M.; Narvy Steven J; Mirzayan Raffy; Vangsness C. Thomas MEV. 3.0-Tesla MRI and arthroscopy for assessment of knee articular cartilage lesions. *Orthopedics.* 2013;36(8):e1060-4. doi:10.3928/01477447-20130724-24
136. Regling Arno; Probe Robert A.; Maxey James W; Solberg Brian D. MB. Improved lag screw positioning in the treatment of proximal femur fractures using a novel computer assisted surgery method: a cadaveric study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2014;15(1):189. doi:10.1186/1471-2474-15-189
137. Rengier Amit; von Tengg-Koblighk H.; Zechmann Christian M.; Unterhinninghofen Roland; Kauczor H. U.; Giesel Frederik L. FM. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2010;5(4):335-341. doi:10.1007/s11548-010-0476-x
138. Sabharwal Caixia SZ. Assessment of Lower Limb Alignment: Supine Fluoroscopy Compared with a Standing Full-Length Radiograph. *J Bone Joint Surg Am.* 2008;90(1):43-51. doi:10.2106/jbjs.f.01514
139. Salmi Kaija-Stiina; Tuomi Jukka; Wolff Jan; Mäkitie Antti MP. Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). *J Craniomaxillofac Surg.* 2013;41(7):603-609. doi:10.1016/j.jcms.2012.11.041
140. Sandell Thomas LJ; A. Articular cartilage and changes in Arthritis: Cell biology of osteoarthritis. *Arthritis Res.* 2001;3(2):107-113. doi:10.1186/ar148
141. Sanderford HB. Special feature: The TORC TP — III. Computer (Long Beach Calif). 1974;7(7):48-51. doi:10.1109/mc.1974.6323617

142. Schindler OS. Synovial plicae of the knee. *Curr Orthop.* 2004;18(3):210-219. doi:10.1016/j.cuor.2004.03.005
143. Schölkopf Alexander J.; Williamson Robert C.; Bartlett Peter L. BS. New Support Vector Algorithms. *Neural Comput.* 2000;12(5):1207-1245. doi:10.1162/089976600300015565
144. Schölkopf Christopher John; Smola Alexander J. BB. Advances in kernel methods: support vector learning. In: *NA. Vol NA.* ; 1999:NA-NA. doi:NA
145. Schroeder Bill WL. *The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3-D Graphics. Vol NA.*; 1997. doi:NA
146. Shekhar Omkar; Bhat Venkatesh; Philip Mathew; Lei Peng; Godinez Carlos; Sutton Erica; George Ivan; Kavic Steven; Mezrich Reuben; Park Adrian RD. Live augmented reality: a new visualization method for laparoscopic surgery using continuous volumetric computed tomography. *Surg Endosc.* 2010;24(8):1976-1985. doi:10.1007/s00464-010-0890-8
147. Shen Rangaraj M.; Bell G.D.; Frank Cyril B.; Zhang Yuan-Ting; Ladly K.O. YR. Localization of knee joint cartilage pathology by multichannel vibroarthrography. *Med Eng Phys.* 1995;17(8):583-594. doi:10.1016/1350-4533(95)00013-d
148. Slomczykowski Robert; Sati Marwan; Krettek Christian; Nolte Lutz-Peter M; H. Novel computer-assisted fluoroscopy system for intraoperative guidance : Feasibility study for distal locking of femoral nails. *J Orthop Trauma.* 2001;15(2):122-131. doi:10.1097/00005131-200102000-00009
149. Slonim DK. From patterns to pathways: gene expression data analysis comes of age. *Nat Genet.* 2002;32(4):502-508. doi:10.1038/ng1033
150. Stefan P, Pfandler M, Lazarovici M, et al. Three-dimensional-Printed Computed Tomography-Based Bone Models for Spine Surgery Simulation. *Simulation in Healthcare.* 2020;15(1):61-66. doi:10.1097/SIH.0000000000000417
151. Stefan Séverine; Winkler Alexander; Lazarovici Marc; Fürmetz Julian; Eck Ulrich; Navab Nassir PH. A radiation-free mixed-reality training environment

- and assessment concept for C-arm-based surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2018;13(9):1335-1344. doi:10.1007/s11548-018-1807-6
152. Suero Edaurdo, Tobias; Stübig Timo; Krettek Christian; Citak Musa EM; H. Use of a virtual 3D software for planning of tibial plateau fracture reconstruction. *Injury.* 2009;41(6):589-591. doi:10.1016/j.injury.2009.10.053
153. Suhm Peter; Zuna Ivan; Jacob Ludwig A; Regazzoni Pietro NM. Fluoroscopic guidance versus surgical navigation for distal locking of intramedullary implants. A prospective, controlled clinical study. *Injury.* 2004;35(6):567-574. doi:10.1016/s0020-1383(03)00312-7
154. Swartman D.; Wei Wei; Schnetzke Marc; Beisemann Nils; Keil Holger; Franke Jochen; Grützner Paul-Alfred; Vetter Sven Yves BF. 2D projection-based software application for mobile C-arms optimises wire placement in the proximal femur - An experimental study. *Injury.* 2017;48(10):2068-2073. doi:10.1016/j.injury.2017.07.022
155. Tack Jan; Gemmel Paul; Annemans Lieven PV. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online.* 2016;15(1):115. doi:10.1186/s12938-016-0236-4
156. Takai Masatoshi; Kii Sakumo; Mito Daisuke; Hayai Chihiro; Motohashi Satoru; Takahashi Tomoki HM. Accuracy analysis of computer-assisted surgery for femoral trochanteric fracture using a fluoroscopic navigation system: Stryker ADAPT® system. *Injury.* 2018;49(6):1149-1154. doi:10.1016/j.injury.2018.03.014
157. Tam Zhi-Quan; Lai Yu-Kun; Langbein Frank C.; Liu Yonghuai; Marshall David; Martin Ralph R.; Sun Xianfang; Rosin Paul L. GKL; C. Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Nonrigid. *IEEE Trans Vis Comput Graph.* 2013;19(7):1199-1217. doi:10.1109/tvcg.2012.310
158. Tavathia Rangaraj M.; Frank Cyril B.; Bell G.D.; Ladly K.O.; Zhang Yuan-Ting S; R. Analysis of knee vibration signals using linear prediction. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1992;39(9):959-970. doi:10.1109/10.256430
159. Teber Selcuk; Simpfendörfer Tobias; Baumhauer Mathias; Güven Eşref Oğuz; Yencilek Faruk; Gözen Ali Serdar; Rassweiler Jens DG. Augmented

- reality: a new tool to improve surgical accuracy during laparoscopic partial nephrectomy? Preliminary in vitro and in vivo results. *Eur Urol.* 2009;56(2):332-338. doi:10.1016/j.eururo.2009.05.017
160. Tucci Jaqueline; de Carvalho Sposito Guilherme; Camarini Paula Maria Ferreira; de Oliveira Anamaria Siriani HTM. Closed Kinetic Chain Upper Extremity Stability test (CKCUES test): a reliability study in persons with and without shoulder impingement syndrome. *BMC Musculoskelet Disord.* 2014;15(1):1-9. doi:10.1186/1471-2474-15-1
161. Ukimura Inderbir S. OG. Imaging-Assisted Endoscopic Surgery : Cleveland Clinic Experience. *J Endourol.* 2008;22(4):803-810. doi:10.1089/end.2007.9823
162. Umapathy Sridhar K; K. Modified local discriminant bases algorithm and its application in analysis of human knee joint vibration signals. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2006;53(3):517-523. doi:10.1109/tbme.2005.869787
163. Upex Pomme; Riouallon Guillaume PJ. Application of 3D printing for treating fractures of both columns of the acetabulum: Benefit of pre-contouring plates on the mirrored healthy pelvis. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2017;103(3):331-334. doi:10.1016/j.otsr.2016.11.021
164. Uruç Raif; Dogramaci Yunus; Kalacı Aydıner; Dikmen Beşir; Yıldız Ömer Serkan; Yengil Erhan VÖ. The comparison of freehand fluoroscopic guidance and electromagnetic navigation for distal locking of intramedullary implants. *Injury.* 2013;44(6):863-866. doi:10.1016/j.injury.2012.12.009
165. van Overveld Brian KW. Shrinkwrap: An efficient adaptive algorithm for triangulating an iso-surface. *Vis Comput.* 2004;20(6):362-379. doi:10.1007/s00371-002-0197-4
166. Van Staden K.; Richards R.; Bunker T. G; F. Image intensifier position for hand and wrist fractures. *Injury.* 2000;31(5):351-352. doi:10.1016/s0020-1383(99)00310-1
167. Vapnik V. An overview of statistical learning theory. *IEEE Trans Neural Netw.* 1999;10(5):988-999. doi:10.1109/72.788640

168. Wakefield Kong; Conaghan P.G.; Brown Andrew K.; O'Connor P; Emery Paul RJ; K. The role of ultrasonography and magnetic resonance imaging in early rheumatoid arthritis. *Clin Exp Rheumatol.* 2003;21(5):S42-9. doi:NA
169. Walters CF. THE VALUE OF JOINT AUSCULTATION. *The Lancet.* 1929;213(5514):920-921. doi:10.1016/s0140-6736(00)79189-6
170. Wang Lejing; Traub Joerg; Weidert Simon; Heining Sandro Michael; Euler Ekkehard; Navab Nassir LT. Parallax-free intra-operative X-ray image stitching. *Med Image Anal.* 2010;14(5):674-686. doi:10.1016/j.media.2010.05.007
171. Wang Lejing; Fallavolita Pascal; Brand Alexander; Erat Okan; Weidert Simon; Thaller Peter-Helmut; Euler Ekkehard; Navab Nassir LF. MICCAI (2) - Intra-op measurement of the mechanical axis deviation: an evaluation study on 19 human cadaver legs. *Med Image Comput Comput Assist Interv.* 2012;15(Pt 2):609-616. doi:10.1007/978-3-642-33418-4\_75
172. Wang Lejing; Fallavolita Pascal; Zou Rui; Chen Xin; Weidert Simon; Navab Nassir LF. Closed-Form Inverse Kinematics for Interventional C-Arm X-Ray Imaging With Six Degrees of Freedom: Modeling and Application. *IEEE Trans Med Imaging.* 2012;31(5):1086-1099. doi:10.1109/tmi.2012.2185708
173. Wang Lejing; Weidert Simon; Traub Joerg; Heining Sandro Michael; Riquarts Christian; Euler Ekkehard; Navab Nassir LW. Bildverarbeitung F&uuml;r Die Medizin - Camera Augmented Mobile C-Arm. Vol NA.; 2009. doi:10.1007/978-3-540-93860-6\_20
174. Weidert S, Andress S, Linhart C, et al. 3D printing method for next-day acetabular fracture surgery using a surface filtering pipeline: feasibility and 1-year clinical results. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2020;15(3):565-575. doi:10.1007/s11548-019-02110-0
175. Weidert S, Andress S, Suero E, et al. 3D printing in orthopedic and trauma surgery education and training: Possibilities and fields of application. *Unfallchirurg.* 2019;122(6):444-451. doi:10.1007/s00113-019-0650-8
176. Weidert S, Sommer F, Suero EM, et al. Fluoroscopic Marker-Based Guidance System Improves Gamma Lag Screw Placement During Nailing

- of Intertrochanteric Fractures: A Randomized Controlled Trial. *J Orthop Trauma*. 2020;34(3):145-150. doi:10.1097/BOT.0000000000001662
177. Weidert S, Wang L, Landes J, et al. Video-augmented fluoroscopy for distal interlocking of intramedullary nails decreased radiation exposure and surgical time in a bovine cadaveric setting. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2019;15(4). doi:10.1002/rcs.1995
178. Weidert S, Wang L, Von Der Heide A, Navab N, Euler E. Intraoperative “augmented-reality-visualisierung”: Aktueller stand der entwicklung und erste Erfahrungen mit dem CamC. *Unfallchirurg*. 2012;115(3):209-213. doi:10.1007/s00113-011-2121-8
179. Weidert Sebastian; Linhart Christoph; Suero Eduardo M.; Greiner Axel; Böcker Wolfgang; Kammerlander Christian; Becker Christopher A. SA. Correction to: 3D printing method for nextday acetabular fracture surgery using a surface filtering pipeline: feasibility and 1year clinical results. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2020;15(3):565-575. doi:10.1007/s11548-019-02110-0
180. Weidert Simon; Andress Sebastian; Suero Eduardo M.; Becker Christopher A.; Hartel Maximilian J; Behle Maren; Willy Christian SA. 3D printing in orthopedic and trauma surgery education and training : Possibilities and fields of application. *Unfallchirurg*. 2019;122(6):444-451. doi:10.1007/s00113-019-0650-8
181. Welch PD. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967;15(2):70-73. doi:10.1109/tau.1967.1161901
182. Wieczorek André; Fallavollita Pascal; Kutter Oliver; Ahmadi Ahmad; Wang Lejing; Navab Nassir MA. MICCAI (1) - Interactive 3d visualization of a single-view X-ray image. *Med Image Comput Comput Assist Interv*. 2011;14(Pt 1):73-80. doi:10.1007/978-3-642-23623-5\_10
183. Winqvist RA. Locked Femoral Nailing. *J Am Acad Orthop Surg*. 1993;1(2):95-105. doi:10.5435/00124635-199311000-00004

184. Wong Jimmy; Lau Tak-Wing; Fang Christian; Yan Chun Hoi; Yeung Kelvin W.K.; To Michael; Leung Frankie TMJ. The use of three-dimensional printing technology in orthopaedic surgery. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2017;25(1):2309499016684077-2309499016684077. doi:10.1177/2309499016684077
185. Wu Pinnan; Luo Xin; Huang Hui; Liao Lifang; Yao Yuchen; Wu Meihong; Rangayyan Rangaraj M. YC. Quantification of knee vibroarthrographic signal irregularity associated with patellofemoral joint cartilage pathology based on entropy and envelope amplitude measures. *Comput Methods Programs Biomed*. 2016;130(NA):1-12. doi:10.1016/j.cmpb.2016.03.021
186. Wu Suxian; Yang Shanshan; Zheng Fang; Xiang Ning YC. Classification of Knee Joint Vibration Signals Using Bivariate Feature Distribution Estimation and Maximal Posterior Probability Decision Criterion. *Entropy*. 2013;15(12):1375-1387. doi:10.3390/e15041375
187. Wu Suxian; Yang Shanshan; Zheng Fang; Xiang Ning YC. Classification of Knee Joint Vibration Signals Using Bivariate Feature Distribution Estimation and Maximal Posterior Probability Decision Criterion. *Entropy*. 2013;15(4):1375-1387. doi:NA
188. Wu Y. Knee Joint Vibroarthrographic Signal Processing and Analysis. Vol NA.; 2015. doi:10.1007/978-3-662-44284-5
189. Yaniv Leo ZJ. Long bone panoramas from fluoroscopic X-ray images. *IEEE Trans Med Imaging*. 2004;23(1):26-35. doi:10.1109/tmi.2003.819931
190. Yeo Tamas; U-Thainual Paweena; Lasso Andras; McGraw Robert; Fichtinger Gabor CT; U. The Effect of Augmented Reality Training on Percutaneous Needle Placement in Spinal Facet Joint Injections. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2011;58(7):2031-2037. doi:10.1109/tbme.2011.2132131
191. Yu James; Daurka J. S.; Lewis A A; Cobb Justin AW; D. A Feasibility Study into the Use of Three-Dimensional Printer Modelling in Acetabular Fracture Surgery. *Adv Orthop*. 2015;2015(NA):617046. doi:10.1155/2015/617046
192. Zhang Cyril B.; Rangayyan Rangaraj M.; Bell G.D. YTF. Mathematical modeling and spectrum analysis of the physiological patello-femoral pulse

- train produced by slow knee movement. IEEE Trans Biomed Eng. 1992;39(9):971-979. doi:10.1109/10.256431
193. Zhang Rangaraj M. YTR. Adaptive cancellation of muscle contraction interference in vibroarthrographic signals. IEEE Trans Biomed Eng. 1994;41(2):181-191. doi:10.1109/10.284929
194. Zhang Stephan; Navab Nassir XF. ISMAR - Visual marker detection and decoding in AR systems: a comparative study. In: NA. Vol NA. ; 2002:97-106. doi:NA
195. Zioupos Richard; Hutchinson John R. PC. Some basic relationships between density values in cancellous and cortical bone. J Biomech. 2008;41(9):1961-1968. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.03.025

## Danksagung

Mein besonderer Dank gebührt Prof. Dr. med. W. Böcker und Prof. Dr. med. W. Mutschler sowie Prof. Dr. med. B. Holzapfel, die mich stets klinisch und wissenschaftlich gefördert und meine berufliche Laufbahn überhaupt erst ermöglicht haben. Von ihnen habe ich stets volle Unterstützung für meine Ideen und Projekte erfahren und ihr wertvoller Rat war für mich unverzichtbar. Weiterhin möchte ich meinen Fachmentoren Prof. Dr. Carl Neuerburg und Prof. Dr. Christoph Trumm danken für ihre Unterstützung im Rahmen des Habilitationsverfahrens und darüber hinaus.

Viele der hier dargestellten Arbeiten waren nur möglich durch die außerordentliche Kooperation der Arbeitsgruppe mit den Computerwissenschaftlern des Lehrstuhls für Computer Assisted Medical Procedures and Augmented Reality von Prof. Nassir Navab der TU München, den Laborleitern Prof. Pascal Fallavolita und Dr. Ulrich Eck, meinen frühen Kollegen Lejing Wang und Tobias Blum sowie Gastwissenschaftlern und Stipendiaten wie Hooman Esfandiari und den Informatikern und Ingenieuren, die dank der vielen staatlichen Drittmittelprojekte in unserer Arbeitsgruppe ihre Forschung betreiben konnten. Mit Herrn Dr. Patrick Wucherer und Philipp Stefan verbindet mich eine jahrelange Zusammenarbeit in Forschung, Entwicklung und Unternehmensgründung zur Etablierung einer neuen Simulatortechnologie in der Wirbelsäulenchirurgie, die mich sehr geprägt hat und deren gemeinsamen Erfolg mich mit Stolz erfüllen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen aktuellen und ehemaligen Doktoranden, auf die ich sehr stolz bin und deren Mitarbeit, Ideen und Enthusiasmus für mich immer ein Ansporn waren. Insbesondere möchte ich hier Dr. Nima Befrui, Dr. Sebastian Andress, Jonathan Bischoff, Matthias Meyer, Istvan Köveshazi, Florian Eisoldt und Stefanie Altmann danken. Nicht zuletzt war die wissenschaftliche Arbeit nur durch gegenseitige kollegiale Unterstützung möglich, weshalb ich PD Dr. Axel Greiner, Dr. Bianka Rubenbauer, Dr. Eduardo Suero, PD Dr. Christopher Becker, Dr. Jürgen Landes und PD Dr. Stefan Grote sehr danken möchte.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die mich auf meinem Weg stets sehr unterstützt hat und auf die ich mich stets verlassen konnte.

## Abdrucke der Originalarbeiten

Entfällt aufgrund von Urheberrechten für die Online-Version dieses Dokuments.

Quellen der Arbeiten mit DOI und URL:

1	Andreß S, Achilles F, Bischoff J, Kußmaul AC, Böcker W, <b>Weidert S</b> . A method for finding high accuracy surface zones on 3D printed bone models <i>Comput Biol Med</i> . 2021 Aug;135:104590. doi: 10.1016/j.compbimed.2021.104590 <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001048252100384X?via=ihub">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001048252100384X?via=ihub</a>
2	<b>Weidert S</b> , Andress S, Linhart C, Suero EM, Greiner A, Böcker W, Kammerlander C, Becker CA. 3D printing method for next-day acetabular fracture surgery using a surface filtering pipeline: feasibility and 1-year clinical results <i>Int J Comput Assist Radiol Surg</i> . 2020 Mar;15(3):565-575. doi: 10.1007/s11548-019-02110-0 <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11548-019-02110-0">https://link.springer.com/article/10.1007/s11548-019-02110-0</a>
3	<b>Weidert S</b> , Sommer F, Suero EM, Becker CA, Pieske O, Greiner A, Kammerlander C, Böcker W, Grote S. Fluoroscopic Marker-Based Guidance System Improves Gamma Lag Screw Placement During Nailing of Intertrochanteric Fractures: A Randomized Controlled Trial <i>J Orthop Trauma</i> . 2020 Mar;34(3):145-150. doi: 10.1097/BOT.0000000000001662 <a href="https://journals.lww.com/jorthotrauma/abstract/2020/03000/fluoroscopic_marker_based_guidance_system_improves.6.aspx">https://journals.lww.com/jorthotrauma/abstract/2020/03000/fluoroscopic_marker_based_guidance_system_improves.6.aspx</a>
4	Stefan P, Pfandler M, Lazarovici M, Weigl M, Navab N, Euler E, Fürmetz J, <b>Weidert S</b> . Three-dimensional-Printed Computed Tomography-Based Bone Models for Spine Surgery Simulation <i>Simul Healthc</i> . 2020 Feb;15(1):61-66. doi: 10.1097/SIH.0000000000000417 <a href="https://journals.lww.com/simulationinhealthcare/abstract/2020/02000/three_dimensional_printed_computed.11.aspx">https://journals.lww.com/simulationinhealthcare/abstract/2020/02000/three_dimensional_printed_computed.11.aspx</a>
5	<b>Weidert S</b> , Wang L, Landes J, Sandner P, Suero EM, Navab N, Kammerlander C, Euler E, von Der Heide A. Video-augmented fluoroscopy for distal interlocking of intramedullary nails decreased radiation exposure and surgical time in a bovine cadaveric setting. <i>Int J Med Robot</i> . 2019 Aug;15(4):e1995. doi: 10.1002/rcs.1995 <a href="https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rcs.1995">https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rcs.1995</a>
6	Becker CA, Kammerlander C, Greiner A, Sommer F, Linhart C, Böcker W, Rubenbauer B, <b>Weidert S</b> . [Diagnostic and Treatment Strategies in Morel-Lavallee Lesions in the Spinal Column and Pelvis]. <i>Z Orthop Unfall</i> . 2018 Oct;156(5):541-546. doi: 10.1055/a-0596-8018 <a href="https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/abstract/10.1055/a-0596-8018">https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/abstract/10.1055/a-0596-8018</a>
7	Befrui N, Elsner J, Flesser A, Huvanandana J, Jarrousse O, Le TN, Müller M, Schulze WHW, Taing S, <b>Weidert S</b> . Vibroarthrography for early detection of knee osteoarthritis using normalized frequency features. <i>Med Biol Eng Comput</i> . 2018 Aug;56(8):1499-1514. doi: 10.1007/s11517-018-1785-4 <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11517-018-1785-4">https://link.springer.com/article/10.1007/s11517-018-1785-4</a>
8	Fallavollita P, Brand A, Wang L, Euler E, Thaller P, Navab N, <b>Weidert S</b> . An augmented reality C-arm for intraoperative assessment of the mechanical axis: a preclinical study. <i>Int J Comput Assist Radiol Surg</i> . 2016 Nov;11(11):2111-2117. Doi: 10.1007/s11548-016-1426-z <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s11548-016-1426-z">https://link.springer.com/article/10.1007/s11548-016-1426-z</a>

- |   |  |
|---|--|
| 9 | <p><b>Weidert S</b>, Wang L, von der Heide A, Navab N, Euler E. [Intraoperative augmented reality visualization. Current state of development and initial experiences with the CamC]. Unfallchirurg. 2012 Mar;115(3):209- 13.<br/>doi: 10.1007/s00113-011-2121-8<br/><a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s00113-011-2121-8">https://link.springer.com/article/10.1007/s00113-011-2121-8</a></p> |
|---|--|