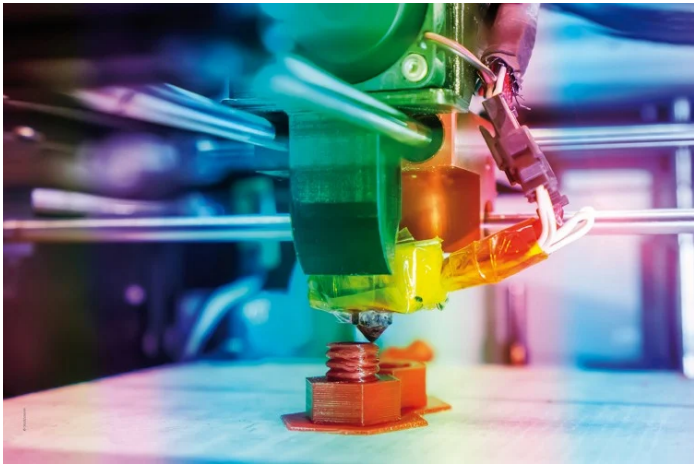


09.10.2019 Orthopädie/Unfallchirurgie

3D-Druck in der Unfallchirurgie

C. Krettek, N. Bruns, E. Liodakis, M. Omar



3D-Druck (Synonyme „Rapid Prototyping“ oder „additive Fertigung“) findet mehr und mehr Interesse und Anwendung in der muskuloskelettalen Chirurgie, insbesondere der Unfallchirurgie.

In der vorliegenden Arbeit soll der aktuelle Stand in komprimierter Form nach anatomischen und funktionellen Gesichtspunkten dargestellt werden. Da es sich bei vielen der analysierten Publikationen um Machbarkeitsstudien handelt ist der Evidenzgrad gering und methodische Schwächen zahlreich sowie offensichtlich. Diese Pionierarbeiten sind jedoch für

die weitere Entwicklung außerordentlich stimulierend und wichtig, denn das technische, medizinische und auch ökonomische Potential dieser Technologie ist riesig und für alle an der Versorgung von muskuloskelettalen Problemen Beteiligten interessant.

Ähnlich wie in der Industrie verläuft medizinische Entwicklung im Allgemeinen und in der Unfallchirurgie im Besonderen nicht kontinuierlich, sondern in Schüben, getriggert und getragen von Schlüsselentwicklungen.

3D-Druck (Synonyme „Rapid Prototyping“ oder „additive Fertigung“) spielt in der Industrie seit Jahren eine immer größere Rolle, findet bereits intensive Anwendung in der Zahnmedizin- und Kieferchirurgie [9] und wird auch in der muskuloskelettalen, insbesondere der Unfallchirurgie, immer interessanter [12].

Es ist die tiefe Überzeugung der Autoren, dass 3D-Druck-/3D-Print (3DP)-Technologie die Unfallchirurgie in den nächsten Jahren ebenso intensiv und nachhaltig beeinflussen wie die beispielhaft genannten Entwicklungen der Vergangenheit. Die Literatur zu diesem Thema wächst, der Anteil aus dem deutschsprachigen Raum ist allerdings sehr gering und auf wenige Zentren beschränkt.

Grundlagen

3D-Druckanwendungen werden bislang in der Unfallchirurgie relativ wenig genutzt. In der Orthopädie werden patientenspezifische Anwendungen vor allem in der Endoprothetik eingesetzt, entweder als patientenspezifische

Resektionslehren zusammen mit Standardendoprothesen oder patientenspezifische Resektionslehren in Kombination mit patientenspezifischen Endoprothesen [3].

Doch gerade auch in der Unfallchirurgie ist das Potential für Anwendungen patientenspezifischer 3D-Druck-Konstrukte enorm. Diese besondere Form der individualisierten Medizin kann weite Bereiche der muskuloskeletalen Chirurgie mit Lösungen bereichern, die bislang nicht vorstellbar oder umsetzbar waren. Dabei können unterschiedliche Anwendungsformen unterschieden werden (Tabelle 1).

Tab. 1: 3D-Druck-Anwendungsmatrix in der Unfallchirurgie

Stufen	3D-Druck	Möglichkeiten	Bemerkung
1	Modell	Betrachtung, Anfassen, Testen präop./intraop. Patient, Angehörige, Chirurg, Team	prä-, intra- und/oder postoperative Anwendung besseres Verständnis Pathologie, z. B. Fraktur verbesserte Planung verbesserte Kommunikation mit Patienten
2	Werkzeug	Führen von Instrumenten Manipulationshilfe (z. B. Reposition) template gestützte Navigation Orthesen Prothesen	template gestützte Navigation Bohr- oder Sägeschablonen, Repositionshilfen) die eindeutig einer anatomischen Struktur zugeordnet werden können (matching)

Stufen	3D-Druck	Möglichkeiten	Bemerkung
3	Implantat	Anpassung an Patientengeometrie template gestützte Navigation Manipulationshilfe	Repositionshilfe Passgenauigkeit
4	Matrix	Trägermaterialien beladen mit passiven oder aktiven Substanzen	Ersatz von Strukturdefiziten Wachstumsfaktoren Antibiotika
5	Gewebe	Composite 3D-Druck Knochen, Knorpel, Ligamente, Meniskus Konstrukte aus mehreren Komponenten z. B. Knochenknorpelkonstrukte	Ersatz von Strukturdefiziten Problematik Schicht vs. Vaskularisation/Per
6	Gewebeverbund/Gelenke	Composite 3D-Druck mit mehreren Komponenten, z. B. osteochondrale Konstrukte oder ganze Gelenke	Ersatz von Strukturdefiziten Problematik Schicht vs. Vaskularisation/Per

Hauptgrundlage des 3D-Drucks sind dreidimensionale Bilddatensätze, entweder aus der 3D-Bildgebung in Form von CT oder MRT oder Datensätze aus Konstruktionssoftware. Aus diesen 3D-Datensätzen können individuelle, patientenspezifische Konstrukte und Modelle erstellt werden, die bestimmte Aufgaben erfüllen.

Anwendungsstufe 1: Modell

Mit Hilfe des 3D-Drucks lassen sich patientenspezifische anatomische Modelle in unterschiedlichen Größen erstellen, die man ansehen und anfassen kann. Modelle können z. B. das Verständnis von Arzt und Patient der oft komplexen

Frakturgeometrie verbessern sowie topographische und funktionelle Zusammenhänge besser darstellen. Dies kann die präoperative Planung, die intraoperative Umsetzung des Plans und ggf. die postoperative Analyse des erzielten Ergebnisses sowie die Kommunikation mit dem Patienten erleichtern und verbessern.

Anwendungsstufe 2: Werkzeug

Mit Hilfe des 3D-Drucks lassen sich patientenspezifische anatomisch angepasste Werkzeuge erstellen. Diese können eingesetzt werden z. B. als Manipulationshilfe für die Durchführung oder Überprüfung der Reposition oder zur Führung und Kontrolle von Instrumenten wie Bohr-, Osteotomiewerkzeugen oder fixierenden Implantaten. Man spricht auch von „templategestützter Navigation“. Weitere Anwendungsbereiche sind die Herstellung von patientenspezifischen Stützverbänden, Orthesen oder Schaft-Exo-Prothesen nach Amputation [15].

Anwendungsstufe 3: Implantat

Mit Hilfe von 3D-Druck kann eine individuelle Anpassung des Implantates an die Patientengeometrie erfolgen (Stabilisierendes Implantat, Gelenkprothese). Das Implantat kann darüber hinaus als Manipulationshilfe (Reposition, Bohr- oder Schnittlehre) konfiguriert und eingesetzt werden („templategestützte Navigation“).

Anwendungsstufe 4: Matrix

Grundsätzlich lassen sich 3D-gedruckte Strukturen herstellen, die mit passiven (z. B. Hydroxylapatit) oder aktiven Substanzen (z. B. Wachstumsfaktoren, Medikamente) verbunden oder beladen sind. Damit lassen sich unterschiedliche Eigenschaften definieren [22].

Anwendungsstufe 5: Gewebe

Es besteht großer Bedarf für den Ersatz von Knochen, Knorpel, Ligamenten, Meniskus und anderen Strukturen. Hier kann der 3D-Druck als 3D-Bioprint in der Zukunft eine Lösung darstellen. Diese 3D-Druck-Gewebeprodukte könnten als Gewebeverbund zusammengesetzt werden, z. B. als Knochen-Knorpel-Konstrukte und dann eine Lösung für Defektsituationen am Gelenk darstellen [18].

Anwendungsstufe 6: Gewebe-Implantat Hybride

Schließlich ist es vorstellbar, diese Gewebeverbünde mit individuell gedruckten Implantaten zusammenzusetzen und damit bestimmte Verankerungs- oder Funktionsaufgaben zu erfüllen [14].

Herstellungsprinzipien

Für den 3D-Druck muss zunächst ein 3D-Bilddatensatz (z. B. anatomische Struktur) von CT oder MRT in ein vom Drucker erkennbares Dateiformat z. B. das STL (Stereo-Lithographie) umgewandelt werden. In verschiedenen CAD (Computer Assisted Design) Programmen kann dann der 3D-Datensatz analysiert und weiterverarbeitet werden [1].

Im Gegensatz zu traditionellen, das Rohmaterial abtragenden Bearbeitungstechniken (sägen, fräsen, bohren, meißeln etc.), arbeiten 3D-Drucker „additiv“, das heißt Objekte werden Schicht für Schicht aufgebaut.

Materialien

Das Ausgangsmaterial für den 3D-Druck wird je nach Anwendungsfall gewählt und den jeweiligen Bedingungen und Aufgaben angepasst und liegt z. B. in Pulverform oder vorgeformt (Spule) vor. Der Drucker fügt nach Fertigstellung einer Schicht eine neue Schicht hinzu, in dem das Ausgangssubstrat, kontrolliert nach den planerischen Vorgaben, aufgeschmolzen wird. Der Zyklus wird fortgesetzt, bis das gesamte Modell erzeugt ist. Als Ausgangssubstrat werden unterschiedliche Substanzen (Kunststoffe, Metalle) mit verschiedenen physikalischen (Festigkeit, Steifigkeit, Verhalten bei Dampfsterilisation), chemischen (Bindungseigenschaften) und biologischen Eigenschaften (Resorbierbarkeit) verwendet werden [20].

Anwendungsentwicklung

Mit dem 3D-Druck lassen sich patientenspezifische Modelle, Werkzeuge, Implantate und andere Strukturen kostengünstiger und geometrisch komplexer herstellen als mit herkömmlichen Prozessen. Mit dem 3D-Druck lassen sich z. B. auch hinterschnittene Formen oder Konstrukte herstellen. Feste und poröse Abschnitte können extrem variabel gestaltet werden um optimale Festigkeit für die Lösung der gestellten Aufgaben zu gewährleisten [13].

Ursprünglich wurde der 3D-Druck eingesetzt, um hochkomplexe, seltene und schwierige, anders nicht oder kaum lösbare Probleme zu adressieren. Dieser Ansatz weicht mehr und mehr einem zunehmend breiteren Einsatz auch bei weniger komplexen oder schwierigen Szenarien. Es ist zu erwarten, dass damit Kosten und Aufwand für Planung, Herstellung und Einsatz weiter sinken werden. Damit wird auch der Einsatz zu Lehr- und Ausbildungszwecken weiter erleichtert [13].

3D Modelle verbessern Geometrieverständnis

Die Anwendung von 3D-Druck Modellen in der Unfallchirurgie begann mit dem Wunsch, komplexe Frakturmuster realitätsnäher darzustellen als dies mit rein virtueller Darstellung auf einem Computerbildschirm möglich ist. Es wird vielfach postuliert, dass 3D-Druckmodelle neben der optischen Analyse auch eine taktile Erfassung der unterschiedlichen Geometriekomponenten und damit ein besseres Verständnis der Verletzung, bessere Planung, bessere operative Versorgung und bessere Ergebnisse erlauben [20].

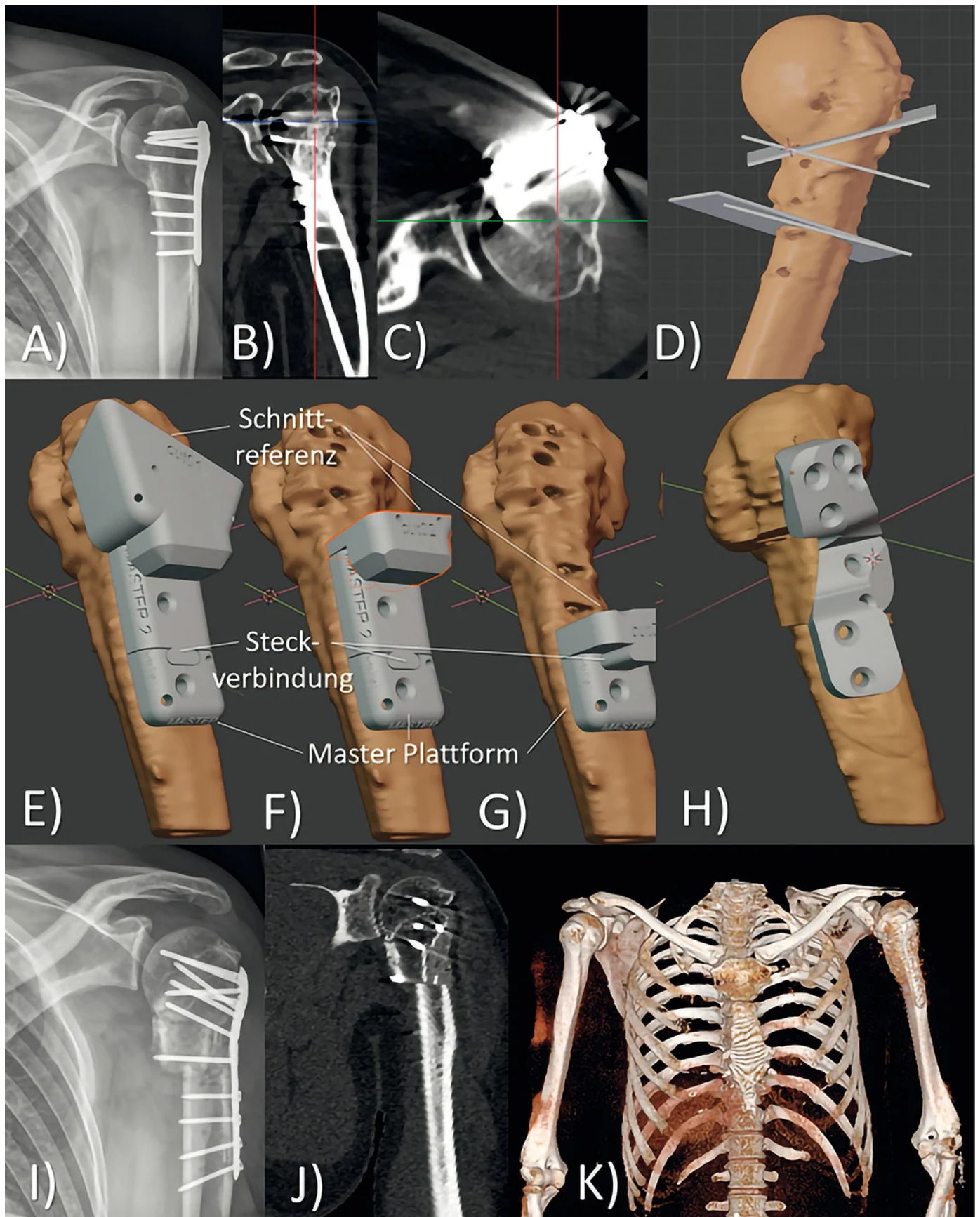


Abb. 1: Klinisches Beispiel einer 3D-Druck-Template-gestützten Navigation; A-C) Fehlstellung bei einem 35-jährigen Patient mit kombinierter Varus- und Torsionsfehlstellung und schmerzhafter Bewegungseinschränkung nach auswärtiger Plattenosteosynthese. D) Präoperative Planung mit mehreren Osteotomieebenen (Perfusionserhalt Humeruskopf). E-G) Virtuelles Aufbringen der Master-Plattform und der drei verschiedenen Sägereferenzen (Cut 1–3), die auf die Basisplattform aufgesteckt werden. H) Repositionswerkzeug. I) Postoperative C-Armkontrolle zeigt achsengerechte Korrektur, J) gute Kongruenz und auch im Seitenvergleich zufriedenstellende Wiederherstellung von Symmetrie und Bewegungsumfang. K)

Spiegelung der kontralateralen Geometrie

Bei der Wiederherstellung komplexer Geometrien im Schaft- und Gelenkbereich wird häufig die Gegenseite zum Vergleich herangezogen. Es wird häufig vorausgesetzt, dass das Skelett vollständig symmetrisch angelegt ist und als Muster für verletzte oder zerstörte Strukturen dienen kann. Das gilt aber nur mit gewissen Einschränkungen [17].

Für die femorale Torsion liegen ebenfalls eine Reihe von Untersuchungen vor, die ein hohes Maß an intraindividuellem Symmetrie aber hohe interindividuelle Varianz zeigen [2, 4, 7].

Für die intraartikulären Abschnitte dieser Knochen liegen bislang keine anatomischen Analysen vor. Hier ist im eigenen Vorgehen die Spiegelung mangels anderer Alternativen nach wie vor die beste Option für die Definition des Wiederherstellungsziels.

Repositionsfixateure

3D gedruckte Konstrukte können auch erfolgreich bei geschlossenen Verfahren zur nicht-invasiven Manipulation von Frakturen eingesetzt werden, z. B. zur Behebung von Fehlstellungen nach Damage Control. Die Arbeitsgruppe um Omar publiziert 2017 ein an einem Kadaverknochen getestetes Konzept mit einem patientenspezifischen 3D gedruckten und anhand von bilateralen CT-Daten nach virtueller Frakturposition individuell geplanten Repositionsfixateur, der nur in der anatomischen Repositionsstellung der Fraktur auf die schon insitu befindlichen Schanzschrauben passt und damit die Fraktur reponiert [6, 7].

Knochenklammern

Mit in 3D-Drucktechnik spezifisch gefertigten resorbierbaren Knochenklammern oder Clips sind wenig invasive Knochenstabilisierungen möglich. Sie sind biokompatibel und könnten bei entsprechender mechanischer Festigkeit und Konfiguration bei bestimmten Fraktursituationen hilfreich sein [16].

Wundauflagen und Gewebeersatz

In der regenerativen Medizin werden dreidimensionale Strukturen mit unterschiedlichen Materialien und Strukturen seit längerem untersucht und ständig weiterentwickelt. Bioprinting bezieht sich auf eine schichtbasierte Technologie, in der zellbasierte Materialien oder Zellen in bestimmter räumlicher Anordnungen auf einer Matrix aufgebracht werden.

Bioprints – mit unterschiedlichen Techniken hergestellt – werden zum Ersatz von Kornea oder Blutgefäßen intensiv beforscht und im Bereich der Haut bereits erfolgreich eingesetzt. Bei anderen Geweben stellen Vaskularisierung und Biointegration die größten biologischen Herausforderungen dar, die nur inter- und multidisziplinär (Materialwissenschaftlern, Gewebeingenieuren, Chirurgen) gelöst werden können [20].

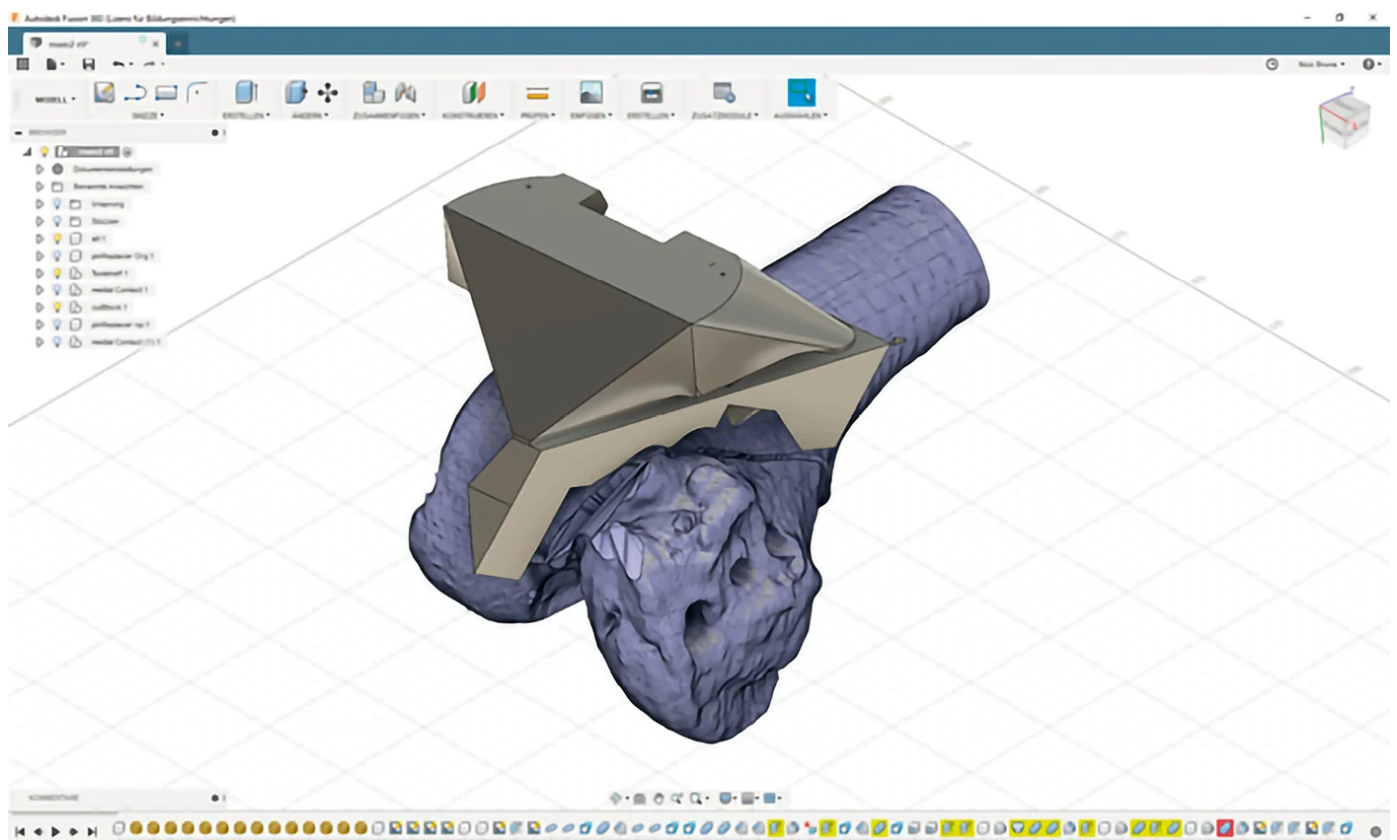


Abb. 2: Klinisches Beispiel einer 3D-Druck Template gestützten Navigation

Knochen und Knorpel aus dem 3D-Drucker

Knochendefekte nach Trauma, Tumor, Degeneration und Infektion stellen in der muskuloskeletalen Chirurgie ein großes, bislang wenig befriedigend gelöstes Problem dar. Hier könnte der 3D-Druck von Knochenersatzmaterialien eine Lösung darstellen, da die bisherigen Ansätze mit unterschiedlichsten Materialien und Strukturen bislang nicht in der Lage waren, autologen Knochen qualitativ vollständig zu ersetzen. Hier könnten 3D-gedruckte bioaktive Verbundwerkstoffe wie Polymere, Hydrogele, Metalle, Keramik und Bio-Glas) die bisherigen Limitierungen überwinden [21].

Noch komplexer ist die Situation am Knorpel. Aber erste Versuche konnten zeigen, dass es möglich ist, ein mehrschichtiges Verbundgerüst aus Knorpel, Knochen und kalzifizierten Schichten mit 3D-Druck zu erzeugen, die den anatomischen Aufbau des Knochens in einigen wichtigen Aspekten nachahmt. Dabei werden u. a. ausgefeilte thermisch induzierte Kristallisationstechniken verwendet. Der anatomie- und physiologienahe Schichtaufbau konnte in Mikro-CTs nachgewiesen werden [5].

Stützverbände, Exoprothesen und aktive Exoskelette

Patientenspezifisch im 3D-Druck gefertigte Handgelenkschienen als Gipsersatz sind mit hoher Passgenauigkeit, geringem Gewicht, leichter Pflege und hoher Luft- und Sichtdurchlässigkeit seit längerem bekannt [10].

Ebenso wie Stützverbände können patientenspezifische Exoprothesenschäfte für Zustände nach Amputation an der unteren und oberen Extremität mit 3D-Drucktechniken einfach und schnell mit hoher Passgenauigkeit und geringen

Kosten hergestellt werden [19]. Die Kombination von Rapid Prototyping und Robotertechnologien hat die Herstellung von funktionalen bionischen Prothesen ermöglicht [20].

iGrab ist ein 3D-gedrucktes, leichtes Exoskelett, das auf Twisted und Coiled Polymer (TCP) Muskeln basiert, die leicht sind, ein hohes Kraft-Masse Verhältnis aufweisen soll und z. B. als Hilfe bei Schlaganfall Patienten gedacht ist. Mit silberbeschichteten Nylonfäden wurden Aktuatoren entwickelt, die elektrothermisch betätigt werden können [11].

Fazit für die Praxis

Auf der ganzen Welt haben Ingenieure, Wissenschaftler und Chirurgen erkannt, dass sich mit 3D-Drucktechnologie insbesondere im Bereich der muskuloskelettalen Chirurgie ganz neue, bislang ungeahnte Gestaltungsmöglichkeiten für patientenspezifische Anwendungen wie Frakturmodelle, Repositionshilfen, Bohr- und Schnittlehren, Implantate, Orthesen und Prothesen bis hin zu 3D-Bioprinting von Knochen- und Knorpelgeweben u. v. a. mehr ergeben. Diese Entwicklung wird durch die rasante Zunahme an Veröffentlichungen im Zusammenhang mit 3D-Druck in der muskuloskelettalen Chirurgie im Allgemeinen und in der Unfallchirurgie im Besonderen belegt. Es ist zu erwarten, dass diese Entwicklung weiter rasant voranschreiten wird.

Danksagung

Dank gilt den Mitarbeitern des Instituts für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und den Mitarbeitern der Klinik für Kieferchirurgie der Medizinischen Hochschule Hannover.

Die Literaturliste erhalten Sie auf Anfrage via passion_chirurgie@bdc.de.

Krettek C, Bruns N, Liodakis E, Omar M: 3D-Druck in der Unfallchirurgie. Passion Chirurgie. 2019 September,9(09): Artikel 03_02.

Autoren des Artikels



Prof. Dr. med. Christian Krettek

Direktor
Klinik für Unfallchirurgie
Medizinische Hochschule Hannover (MHH)
Carl-Neuberg-Str. 1
30625 Hannover
[> kontaktieren](#)



Nico Bruns Nico Bruns

Assistenzarzt
Klinik für Unfallchirurgie
Medizinische Hochschule Hannover
[> kontaktieren](#)



Prof. Dr. Emmanouil Liodakis

Leitender Oberarzt

Klinik für Unfallchirurgie

Medizinische Hochschule Hannover (MHH)

[> kontaktieren](#)



PD Dr. Mohamed Omar

Oberarzt

Klinik für Unfallchirurgie

Medizinische Hochschule Hannover (MHH)

[> kontaktieren](#)