

# Roboterassistierte Umstellungsosteotomie mittels Wasserabrasivstrahltechnik

R. Westphal<sup>1</sup>, D. Zaremba<sup>2</sup>, T. Hassel<sup>2</sup>, E. Liodakis<sup>3</sup>, E. Suero<sup>3</sup>, C. Krettek<sup>3</sup>, F.-W. Bach<sup>2</sup>, F.M. Wahl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TU Braunschweig, Institut für Robotik und Prozessinformatik, Braunschweig, Germany

<sup>2</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde, Hannover, Germany

<sup>3</sup> Medizinische Hochschule Hannover, Unfallchirurgie, Hannover, Germany

Kontakt: ralf.westphal@tu-bs.de

## Abstract:

*Konventionelle Methoden der tibialen Umstellungsosteotomie zur Korrektur von Fehlstellungen der unteren Extremitäten sind häufig mit Problemen wie der hitzebedingten Knochengewebedenaturierung sowie einer möglichen Beinlängenänderung verbunden. In diesem Paper wird eine robotergeführte Methode zur praktikablen Durchführung von Focal-Dome-Osteotomien mittels Wasserstrahlstechnologie vorgestellt. Es wird gezeigt, dass dieses Verfahren präzise und glatte Schnittflächen unter Vermeidung denaturierender Effekte ermöglicht, wodurch die genannten Probleme konventioneller Verfahren vermieden werden können. Grundlage für die präzise Schnittführung ist eine ebenfalls in dem Paper vorgestellte OP-Planung auf Basis von patientenspezifischen 3D-Bilddaten. Die vorgestellten Verfahren bieten angesichts der Ergebnisse einen vielversprechenden Ansatz für die Entwicklung neuer Operationsmethoden in diesem Anwendungsgebiet.*

*Schlüsselworte: Umstellungsosteotomie, Roboterassistierte Chirurgie, Wasserstrahlstechnologie, HTO*

## 1 Problemstellung

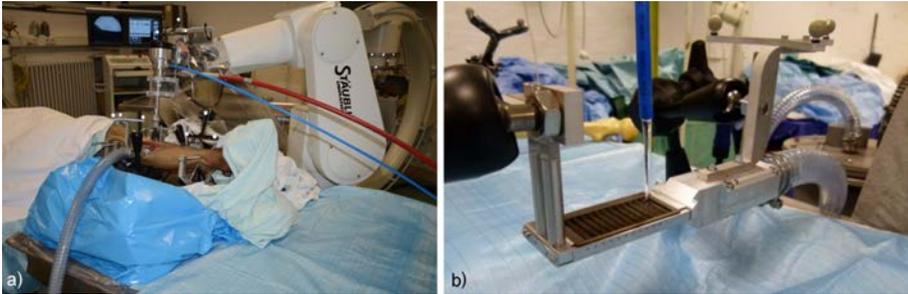
Bei der Umstellungsosteotomie handelt es sich um eine operative Methode, durch die die Lastverteilung innerhalb vorgeschädigter Gelenke optimiert werden kann, indem degenerative Gelenkanteile entlastet und gesunde vermehrt belastet werden. Zusätzlich können hierdurch skelettale Deformitäten im Bereich der unteren Extremitäten korrigiert werden. Hierzu wird im proximalen Bereich der Tibia ein Knochenschnitt (Osteotomie) durchgeführt, wodurch die mechanische Beinachse durch Varus/valgus-Rotation angepasst werden kann. Die Planung des dafür erforderlichen Knochenschnitts erfolgt in der Regel anhand präoperativer Röntgenaufnahmen. Mit den konventionellen Osteotomiemethoden sind eine Reihe von Problemen verbunden. Zum einen erzeugen die verwendeten mechanischen oszillierenden Sägen beim Schneidprozess Hitze, die zu einer Denaturierung des Knochengewebes führt und mit einer daraus resultierenden Verzögerung des Heilungsprozesses einhergeht [1, 4]. Zum anderen haben sich aus der Beschränkung auf gerade Schnittflächen die öffnende (open wedge) und schließende (closed wedge) Osteotomie als Standardverfahren etabliert, die allerdings in der Regel mit einer Längenänderung des Beins einhergehen. Eine aus physiologischer Sicht optimale Osteotomieform ist hingegen die Focal-Dome-Osteotomie mit einer kreisförmigen Schnittbahn, die allerdings aufgrund praktischer Probleme in der Umsetzung nur sehr selten zur Anwendung kommt.

Mithilfe der robotergeführten abrasiven Wasserstrahlstechnologie ist es hingegen möglich, beinahe beliebige Schnittgeometrien zu erzeugen. Insbesondere die Focal-Dome-Osteotomie wäre mit einem solchen Schneidsystem erstmals praktikabel umsetzbar. Darüber hinaus bleibt die Hitzeentwicklung beim Wasserstrahlstechniken unterhalb der Temperaturen, bei denen eine Denaturierung des Gewebes einsetzt, wodurch die anschließende Knochenheilung begünstigt wird [2, 3].

## 2 Material und Methoden

Um die Machbarkeit einer robotergeführten Focal-Dome-Osteotomie mittels Wasserstrahlstechnologie zu zeigen, wurde ein experimenteller OP-Aufbau im Labor der Medizinischen Hochschule Hannover installiert. Ein Stäubli RX 90 Roboter wurde verwendet, um den Wasserstrahlstechnikkopf mitsamt Hochdruckventil zu führen (vgl. Abbildung 1a). Die Wasserzuführung erfolgte über eine Hochdruckpumpe des Typs BHDT Ecotron 38.37 mit 300 MPa Wasserdruck. Mittels einer Suspensionsansaugung wurde dem Wasserabrasivinjektorstrahl Magnesiumpulver (99,8%, LNR45) als biokompatibles Abrasivmittel mit guter Schneidleistung [2] zugeführt. Ein kritischer Aspekt des Einsatzes der Wasser-

strahlschneidtechnologie zum Schneiden knöcherner Strukturen ist die Absorption bzw. Ableitung des Strahls beim Austritt aus dem zu schneidenden Gewebe. Ohne spezielle Vorrichtungen durchtrennt dieser Wasserstrahl alles dahinter liegende Gewebe ebenfalls. Um dies zu verhindern, wurde ein Strahlfänger (vgl. Abbildung 1b) konstruiert und gefertigt [2], der unter dem zu schneidenden Knochen positioniert wird.



**Abbildung 1:** Robotersetup. a) Kompletter Operationsaufbau mit Roboter, Wasserstrahl Düse und -ventil, Strahlfänger und Absaugung. b) Der Strahlfänger zum Auffangen und Ableiten des Wasserstrahls aus dem Operationsbereich.

Zur präzisen Planung der Schnittführung wurde ein 3D-Scan unter Verwendung eines 3D-C-Bogens (Siemens Siremob Iso-C 3D) der Schnittregion im proximalen Bereich der Tibia aufgenommen. Mit schwellwertbasierten Verfahren wurde der Knochen segmentiert und in ein Oberflächenmodell transformiert. Die Planung der endgültigen Lage des durchzuführenden Knochenschnitts erfolgte schließlich manuell über eine eigens für diese Experimente entwickelte Software, indem der Benutzer/Chirurg ein Kreissegment so am Bildschirm positioniert und in Radius und Segmentgröße anpasst, dass der Knochen an einer anatomisch günstigen Stelle geschnitten werden kann (vgl. Abbildung 2a). Nachdem dieses Kreissegment positioniert wurde, errechnet die Software die dazugehörigen Oberflächenpunkte auf dem Oberflächenmodell des Knochens (vgl. Abbildung 2b). Diese Punkte dienen später als Stützstellen der durch den Roboter abzufahrenden Schneidbahn. Zur Übertragung dieses Plans in den OP bzw. auf den Roboter, wurde ein optisches Navigationssystem (BrainLAB, bzw. ein selbstentwickeltes Navigationssystem basierend auf dem NDI-Accedo Trackingsystem) verwendet. Die Verwendung der Navigation in Verbindung mit der präzisen OP-Planung ermöglichte darüber hinaus die Implementierung von Sicherheitsfunktionen, die bei dem Einsatz potentiell sicherheitskritischer Wasserstrahlschneidetechniken unbedingt erforderlich ist. Bevor das Wasserstrahlventil vom Steuerungscomputer geöffnet werden kann, wird geprüft, ob sich die navigierte Düse in korrekter Ausrichtung und Distanz oberhalb des ebenfalls navigierten Strahlfängers befindet. Darüber hinaus wird der Strahl nur dann aktiviert, wenn die komplette geplante Schneidbahn durch den Strahlfänger abgedeckt wird. Ist dies nicht der Fall, kann der Schneidprozess nicht gestartet werden und es muss entweder eine neue Bahn geplant oder der Strahlfänger entsprechend umpositioniert werden.



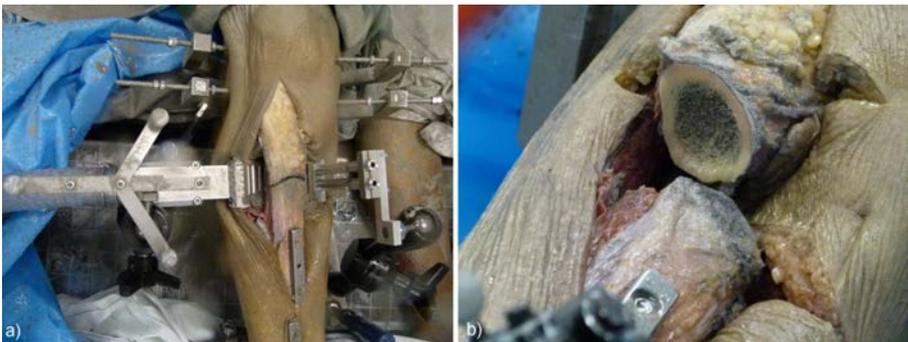
**Abbildung 2:** Planung der Schneidbahn. a) Manuelle Positionierung und Größenanpassung des Kreissegments entlang dem der Schnitt erfolgen wird relativ zum Knochenmodell. b) Die aus diesem Plan generierten Stützstellen der Roboterbahn entlang der Knochenoberfläche.

Für die Schneidexperimente standen zwei komplette, alkoholkonservierte menschliche Körper zur Verfügung, bei denen insgesamt drei robotergeführte Focal-Dome-Osteotomien mittels Wasserstrahl durchgeführt wurden. Für alle drei Ope-

rationen wurde wie beschrieben mittels 3D-Bildgebung ein OP-Plan erstellt der zunächst vom Roboter ohne aktiven Wasserstrahl abgefahren wurde, um die Bahn visuell zu prüfen. Nach erfolgreicher Prüfung der geplanten Schneidbahn erfolgte schließlich der eigentliche Schneidprozess. Abschließend wurde der Operationsbereich durch Nachspülen manuell gesäubert und das OP-Ergebnis visuell überprüft.

### 3 Ergebnisse

Alle drei Focal-Dome-Osteotomien konnten erfolgreich und ohne Komplikationen durchgeführt werden. Wie in Abbildungen 3 zu sehen ist, konnten durch den Einsatz von Magnesiumpulver als Abrasivmittel im Wasserstrahl, insgesamt sehr glatte Schnittflächen erzielt werden. Der Strahlfänger hat den Anforderungen entsprechend funktioniert, sodass kein Gewebe unterhalb des Knochens durch den Wasserstrahl geschädigt wurde. Der erste Schnitt wurde mit einer geringen Schnittgeschwindigkeit von etwa 3mm/min durchgeführt woraus sich eine OP-Zeit für den Knochenschnitt von 13:30 Minuten ergab. Nach Überprüfung dieses ersten Ergebnisses wurde die Schnittgeschwindigkeit erhöht, sodass die beiden folgenden Osteotomien in 7:00 bzw. 5:40 Minuten durchgeführt werden konnten. Das Abwasser nach der Absaugung hatte eine Temperatur von etwa 50°C. Das nach der Osteotomie in der OP-Wunde verbliebene Magnesium konnte relativ einfach durch Irrigation ausgewaschen werden.



**Abbildung 3:** Ergebnis der robotergeführten Focal-Dome-Osteotomie. a) Kreisförmige Schneidbahn. b) Glatte Schnittfläche (der spongiöse Knochen hat sich aufgrund der Anwendung von Magnesium als Abrasivmittel grau verfärbt).

### 4 Diskussion

Obwohl sich das vorgestellte Verfahren noch im Versuchsstadium befindet, sind die bisher erzielten Ergebnisse vielversprechend. Die erzielten Schnittflächen sind sehr glatt, wodurch die präzise Einstellung des gewünschten Korrekturwinkels erleichtert wird. Darüber hinaus wird durch die glatte Schnittfläche auch eine optimale Kontaktsituation erreicht. Dies und die Vermeidung denaturierender Effekte durch den kalten Wasserstrahlschneidprozess sollten den Heilungsprozess begünstigen.

Dennoch sind für einen praktikablen Einsatz dieser Technologie im Operationssaal noch einige Punkte zu optimieren, was Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein muss. Zum einen ist die korrekte Positionierung des Strahlfängers noch mit einem hohen Weichteiltrauma verbunden. Eine weitere Miniaturisierung bzw. Anpassung an die anatomischen Verhältnisse ist daher ein wichtiger Aspekt zukünftiger Arbeiten. Ein weiterer Aspekt betrifft die trotz Absaugung immer noch auftretenden Rückstände von Magnesium im Operationsbereich. Der größte Teil der Magnesiumrückstände kann relativ einfach mittels Wasserirrigation aus dem OP-Situs ausgewaschen werden. Die Menge der nach der Irrigation verbleibenden Magnesiumpartikel ist zum einen sehr gering zum anderen handelt es sich bei der verwendeten Magnesiumumlegierung um einen biokompatiblen Stoff, der bei normaler Nierenfunktion vom Körper abgebaut werden kann. Wie in Abbildung 3a zu sehen ist, wird durch den Schneidprozess nicht nur der direkte OP-Situs mit Magnesiumpartikeln verunreinigt sondern auch ein relativ großflächiger Bereich um den OP-Situs herum. Dies stellt insbesondere für die optische Navigation ein Problem dar. Durch Verunreinigung der Markerkugeln kann unter Umständen die Navigation der Operation während des Schneidprozesses nicht mehr gewährleistet werden. In einem solchen Fall wäre es z.B. nicht mehr möglich, den Schneidprozess bei einer Bewegung des Knochens oder Strahlfängers relativ zum Roboter abzuberechnen oder die Schneidbahn anzupassen. Die Entwicklung einer praktikablen Einhausung der Schneideinheit im OP-Gebiet mitsamt einer integrierten Absaugmöglichkeit wäre daher ebenfalls eine wünschenswerte und wichtige Erweiterung des Systems. Letztlich ist auch eine Verringerung der akustischen Emissionen durch Pumpe, Suspensions- und Ab-

saugeinheit für einen routinemäßigen Einsatz notwendig. Auch hier sind Weiterentwicklungen bzw. Verbesserungen denkbar.

#### **4 Zusammenfassung**

Es wurde ein experimenteller OP-Aufbau zur robotergeführten Focal-Dome-Osteotomie mittels Wasserstrahlabrasivtechnologie vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass mit dieser Technologie präzise und glatte Schnittflächen erzielt werden können, die sowohl die Einstellung des gewünschten Korrekturwinkels erleichtern als auch die anschließende Knochenheilung begünstigen. Durch die Kombination von 3D-Bildgebung, computerassistierter OP Planung und navigierter OP-Durchführung ist eine sichere und präzise Focal-Dome-Osteotomie möglich.

#### **5 Danksagungen**

Diese Arbeit entstand im Rahmen des DFG-Projekts „Computer- und roboterassistierte Umstellungsosteotomie unter Verwendung neuartiger Osteotomieverfahren und kraft-/ momentenbasierter, robotischer Operationsplanung und Operationsausführung“.

#### **6 Referenzen**

- [1] Baumgart, R., Kettler, M., Zeiler, C., Betz, A., Schweiberer, L.: *Möglichkeiten der Knochendurchtrennung*. Unfallchirurg, Vol. 100, pp. 797-804 (1997)
- [2] Biskup, C.: *Beitrag zur Bearbeitung von biologischem Hartmaterial mittels Wasserabrasivstrahltechnik*. Garbsen, Germany, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Dissertation (2011)
- [3] Biskup, C., Krömer, S., Höver, M., Versemann, R., Bach, Fr.-W., Kirsch, L., Andrae, A., Pude, F., Schmolke, S.: *Heat Generation During Abrasive Water-Jet Osteotomies Measured by Thermocouples*. Journal of Mechanical Engineering, Vol. 52, Issue 7-8, pp. 451-457 (2006)
- [4] Frierson, M., Ibrahim, K., Boles, M., Boté, H., Ganey, T.: *Distraction Osteogenesis. A comparison of corticotomy techniques*. Clin Orthop, April (301), pp. 19-24 (1994)