

Entwicklung eines Zangeninstruments mit gleitgeführten Betätigungsseilen für die Laparoskopie

J.-H. Borchard¹, E. Dahl², M. Gieseke², C. Nölke², S. Kaieler², M. Lambert³, F. Wehrheim³, L. A. Kahrs¹, T. Ortmaier¹

¹Leibniz Universität Hannover, Institut für Mechatronische Systeme, Hannover, Deutschland

²Laser Zentrum Hannover e.V., Hannover, Deutschland

³Richard Wolf GmbH, Knittlingen, Deutschland

Kontakt: Jan-Hinnerk.Borchard@imes.uni-hannover.de

Abstract:

In der minimal invasiven Chirurgie (MIC) bieten abwinkelbare Instrumentenspitzen gegenüber starren Instrumenten den Vorteil, dass sie die Bewegungseinschränkung des Instrumentenschafts, die im Zugangskanal zum Operationsgebiet besteht, ausgleichen. Somit ermöglichen sie die Gewebemanipulation unter Ausnutzung aller sechs Bewegungsfreiheiten im dreidimensionalen Raum. In der manuellen MIC finden derartige Instrumente bislang noch keine wahrnehmbare Verbreitung. Demgegenüber ist die Verwendung von Instrumenten mit abwinkelbarer Instrumentenspitze in der roboterassistierten Laparoskopie bereits üblich. Im Rahmen des Beitrages werden Wirkprinzip und konstruktive Ausführung einer neu entwickelten abwinkelbaren Instrumentenspitze vorgestellt. Gegenüber den etablierten Endowrist-Instrumenten der Firma Intuitive Surgical besteht hierbei die abwinkelbare Instrumentenspitze aus einer geringeren Komponentenanzahl. Aufgrund der gewählten Bauteilgeometrien wird mit diesem neuartigen Instrumentenkonzept eine verbesserte Miniaturisierbarkeit sowie eine, im Vergleich mit bekannten Lösungen, kostengünstigere Herstellung in Aussicht gestellt. Als potentiell geeignetes Fertigungsverfahren verschiedener Einzelkomponenten wird die Anwendbarkeit des selektiven Lasermikroschmelzens diskutiert.

Schlüsselworte: Minimalinvasive Chirurgie, Laparoskopie, Instrumentendesign, Prototypenentwicklung

1 Problemstellung

Minimal invasive Operationen sind inzwischen im klinischen Alltag etabliert. Gegenüber offenen Eingriffen besitzt die Laparoskopie dabei erhebliche Vorteile für den Patienten. Dies sind beispielsweise, ein geringerer Blutverlust, ein kürzerer Krankenhausaufenthalt, eine kürzere Genesungszeit und geringere Schmerzen. Der Zugang zum Körperinneren erfolgt über eine Anzahl kleiner Schnitte von wenigen Millimetern. In diesen Öffnungen werden Trokare als Schleuse für die einzusetzenden Instrumente und das Endoskop platziert. Bei Eingriffen im Bauchraum ist es erforderlich das Gebiet um den zu operierenden Bereich aufzuweiten, um einen ausreichend großen Arbeitsraum für die Instrumente zu schaffen. Dies erfolgt durch Beaufschlagung dieses Gebietes mit einem Überdruck aus Gas. Die zuvor eingebrachten Trokare reduzieren hierbei das Ausströmen des Gases während des Einführens und Entnehmens der Instrumente in bzw. aus dem Körper des Patienten mittels Rückschlagventilen [1, 2].

Manuelle laparoskopische Instrumente nach dem Stand der Technik verfügen üblicherweise über vier Freiheitsgrade (FHG) an der Instrumentenspitze und sind auf diese Weise in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt. Um die Beweglichkeit zu erhöhen werden in der roboterassistierten Laparoskopie häufig Instrumente mit zwei zusätzlichen Gelenken an der Instrumentenspitze verwendet. Die auf diese Weise erreichte volle Manipulierbarkeit der Instrumentenspitze ermöglicht kürzere Operationszeiten und eine flachere Lernkurve für den Operateur. Ein bekanntes Beispiel hierfür sind die Endowrist-Instrumente der Firma Intuitive Surgical Inc., Sunnyvale, California [3-5].

Ziel der hier vorgestellten neu entwickelten Instrumentenspitze ist vor allem die Verringerung der Einzelteile. Es wird davon ausgegangen, dass dadurch die Möglichkeiten einer Miniaturisierung, einer höheren Kraftübertragung, einer günstigeren und schnelleren Montage sowie einer Verminderung des Ausfallrisikos steigen [6]. Das hierzu entwickelte Konzept basiert auf einer speziellen Ausgestaltung für eine Seilführung zur Bewegungssteuerung der Zangenmaulteile. Hierbei wird vollständig auf gelagerte Führungsrollen verzichtet. Die Führung der Steuerseilzüge erfolgt stattdessen über Gleitflächen.

Als potentiell geeignetes Fertigungsverfahren für die Einzelkomponenten wird das generative Verfahren des selektiven Lasermikroschmelzens (SL μ M) untersucht. Die Kraftübertragung im Schaft zur Aktuierung der Instrumentenspitze erfolgt mittels Kunstfaserseilen. Diese besitzen gegenüber üblichen Edelstahlseilen den Vorteil einer höheren Zugfestig-

keit sowie einer geringeren Biegespannung. Die Kunstfaserseile werden mittels einer für diese Anwendung entwickelten mechatronische Antriebseinheit von außerhalb des Patienten betätigt.

2 Material und Methoden

In Abbildung 1 sind in einer Schnittansicht die Komponenten der neu entwickelten Instrumentenspitze dargestellt. Der Zangenhalter ist gegenüber dem Basisteil in einer Wrist-Achse q_w drehbar gelagert. Die Zangenmaulteile (nur eines ist dargestellt) sind um die Zangenachse im Zangenalter ebenfalls drehbar gelagert. Die wesentliche konstruktive Änderung der Instrumentenspitze gegenüber dem Stand der Technik ist die Neugestaltung der Führung der Betätigungsseile zur Steuerung der Zangenmaulteile. Diese erfolgt vollständig über Gleitflächen des Zangenhalters. Das Seil wird mittig durch die Achse des Wrist-Gelenkes q_w zwischen zwei gespiegelten Bögen geführt. Jeder der Bögen besitzt dabei den Radius r_k und die Abstände $l_{k,x}$ und $l_{k,y}$ zwischen Bogenmittelpunkt und der Wrist-Achse q_w . Für eine konstante Seilspannung ist es erforderlich, dass die Führungsstrecke l_s zwischen den Punkten P_1 und P_2 für alle Winkel $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ der Abwinkelung möglichst konstant bleibt. Die Führungsstrecke l_s berechnet sich dabei zu

$$l_s = r_k \varphi + l_w - l_{k,x} \sin \varphi + l_{k,y} \cos \varphi \quad (1.1)$$

mit der Höhe des Gelenks l_w . Da die anderen Variablen oft konstruktiv vorgegeben sind wird die Führungsstreckendifferenz

$$\Delta_s(l_{k,y}) = \max(l_s(\varphi, l_{k,y})) - \min(l_s(\varphi, l_{k,y})) \quad (1.2)$$

über alle Winkel φ in Abhängigkeit von $l_{k,y}$ dargestellt. Die optimale Länge $l_{k,y}^*$ ist dann mittels des Optimierungsproblems der Form

$$l_{k,y}^* = \arg \min_{l_{k,y}} \Delta_s(l_{k,y}) \quad (1.3)$$

mittels des Levenberg-Marquardt-Algorithmus gesucht.

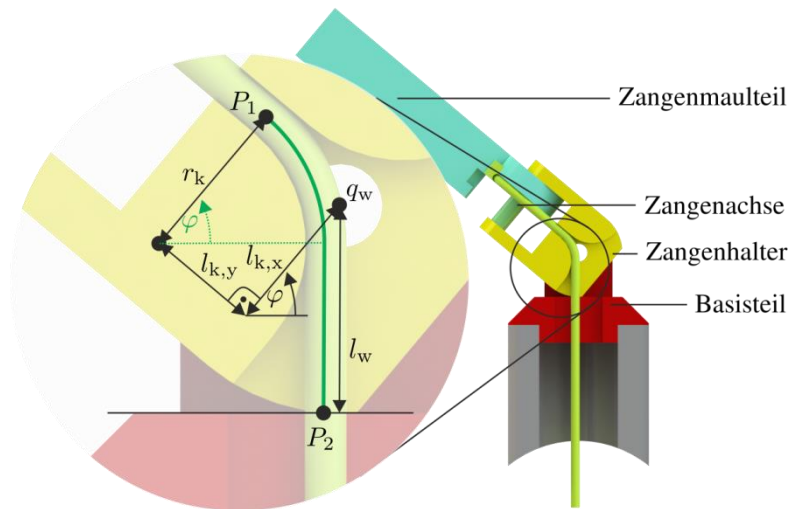


Abbildung 1: Führung der Betätigungsseile für die Zangenmaulteile mittels einer Gleitführung

3 Ergebnisse

Unter der Verwendung von Gleitführungen für die Antriebsseile der Zangenmaulteile wurde das in Abbildung 2 dargestellte Design einer abwinkelbaren Instrumentenspitze mit einem maximalen Durchmesser von 8 mm entwickelt. Es besteht aus fünf Bauteilen. Die beiden Zangenmaulteile werden durch eine Achse im Zangenhalter geführt. Zur Abwinkelung der Instrumentenspitze ist der Zangenhalter in zwei Führungsgabeln des Basisteils, die die Wrist-Achse q_w bilden, drehbar gelagert. Das Basisteil ist am Instrumentenschaft fixiert. Der Zangenhalter besitzt mittig eine radiusförmige Führung. Zwei Antriebsseile, welche durch den Instrumentenschaft und das Basisteil berührungslos geführt werden, liegen in dieser Führung an und sind am Seilende mit dem Zangenhalter verbunden. Eine gegenläufige Bewegung der

Seile führt zur Abwinklung der Instrumentenspitze. Zur unabhängigen Aktuierung der beiden Zangenmaulteile sind vier weitere Betätigungsseile im Zangenhalter gleitend geführt und paarweise mit den Zangenmaulteilen verbunden. Die gegenläufige Betätigung der Seile eines Paares führt zur unabhängigen Bewegung eines der Maulteile um die Zangenachse. Auf diese Weise wird eine Abwinklung und unabhängig davon auch das Öffnen bzw. Schließen der Zangenmaulteile realisiert. Die Geometrie der Seilführungen im Zangenhalter ist mittels der Formel (1.3) optimiert, sodass sich bei der Abwinklung der Instrumentenspitze eine möglichst kleine Änderung des Seilführungsweges ergibt. Die Konstruktion gibt dabei den Radius $r_k = 1,7$ mm und den Abstand $l_{k,x} = 1,85$ mm vor. Die Optimierung führt zu dem optimalen Abstand $l_{k,y}^* = 0,82$ mm. Der berechnete Verlauf der Führungsstrecke l_s ist für den optimalen Abstand $l_{k,y}^*$ und zum Vergleich für die Abstände $l_{k,y} = 0,5$ mm und $l_{k,y} = 1$ mm über den Winkel φ des Gelenks q_w in Abbildung 2 rechts dargestellt. Die minimale Führungsstreckendifferenz beträgt $\Delta_s(l_{k,y}^* = 0,82 \text{ mm}) = 0,23$ mm. Im Vergleich dazu betragen beispielsweise die Führungsstreckendifferenzen $\Delta_s(l_{k,y} = 0,5 \text{ mm}) = 0,44$ mm und $\Delta_s(l_{k,y} = 1 \text{ mm}) = 0,33$ mm bei nicht optimalen Abständen.

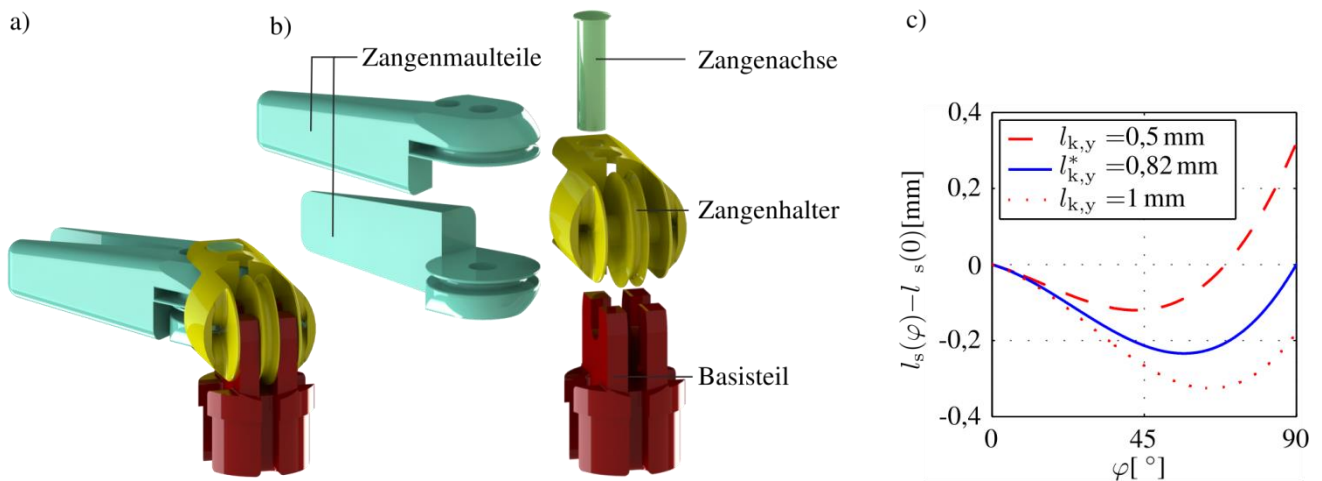


Abbildung 2: a) CAD-Modell einer Instrumentenspitze; b) Explosionsansicht des CAD-Modells einer Instrumentenspitze; c) Änderung der Seilführungsstrecke über den Winkel φ des Gelenks q_w zwischen dem Basisteil und dem Zangenhalter

4 Diskussion

Gegenüber dem Stand der Technik kann mit dem vorliegenden Konzept eine deutliche Reduzierung der Komponentenzahl erreicht werden. Die unter Verwendung von Gleitführungen für die Betätigungsseile der Zangenmaulteile konstruierte Instrumentenspitze besteht aus fünf Einzelteilen (zwei Zangenmaulteile, Zangenachse, Zangenhalter, Basisteil). Das Endowrist-Instrument besitzt im Vergleich dazu 16 Einzelteile. Unter anderem werden dort für Seilführungen acht Umlenkrollen sowie zwei Zusatzachsen benötigt. Das bedeutet, dass bei dem neuen Instrument im Vergleich zum Endowrist-Instrument weniger als ein Drittel der Einzelteile benötigt werden. Dies kann sich günstig auf die Miniaturisierbarkeit, die Größe der lasttragenden Querschnitte, die Montagezeit sowie die Zuverlässigkeit auswirken. Dies ist jedoch mittels einer Designbewertung noch zu belegen.

Die Seilführung kann prinzipbedingt nicht vollständig bewegungskoppelt realisiert werden. Es ist immer eine Veränderung der Führungsstrecke l_s über den Winkel φ des Gelenks q_w zu berücksichtigen (siehe Abbildung 2 c)). Bei einer Abwinklung von $\varphi = 56^\circ$ wird dabei eine Verkürzung der Führungsstrecke um $\Delta_s(l_{k,y}) = 0,23$ mm gegenüber der Nullstellung des Gelenks q_w berechnet. Dies führt zu einer Änderung der Vorspannung der Betätigungsseile über den Winkel φ des Gelenks q_w . Ob diese Verkürzung für die Anwendung zulässig ist oder kompensiert werden muss, ist experimentell zu ermitteln.

Bei der Bauteildimensionierung und Lebensdauererwartung sollten die Reibung zwischen Seil und Führung sowie der damit verbundene Verschleiß besondere Berücksichtigung finden. Zur Berechnung des Gleitreibkoeffizienten μ zwischen Seilen und Führungen verschiedener Materialien und zur Beurteilung des Verschleißes zeigen Versuchsergebnisse, dass eine Gleitführung der Betätigungsseile möglich ist. Dafür ist ein Kunstfaserseil auf der Basis von Polyethylen mit ultrahohem Molekulargewicht, bekannt unter dem Handelsnamen Dyneema, geeignet. Dieses zeichnet sich neben den guten Reib- und Verschleißigenschaften durch eine hohe Zugfestigkeit und eine geringe Biegespannung aus. Letztere ermöglicht die Seilführung über kleine Radien, was der Miniaturisierbarkeit zugute kommt. Ein Nachteil der Kunst-

faser ist die geringe Langzeit-Temperaturstabilität bis 70°C. Ein Instrument mit Dyneema Betätigungsseilen kann die bei der Instrumentenaufbereitung bevorzugte Heißdampfsterilisation nicht durchlaufen. Die Auswirkungen anderer Sterilisationsverfahren (z.B. H₂O₂-Plasmasterilisation) auf die Materialeigenschaften der Seile müssen untersucht werden.

Aufgrund der starken Funktionsintegration in die einzelnen Komponenten ist deren Komplexität im Vergleich zu bekannten Komponenten derartiger Instrumente höher. Hieraus folgen besondere Anforderungen an die Fertigungstechnologie für die Einzelkomponenten. In Abbildung 3 auf der linken Seite sind ähnliche Bauteile zu sehen, die für eine andere Variante einer laparoskopischen Instrumentenspitze mittels Selektivem Laser Mikro Schmelzen (SL μ S) hergestellt wurden. Die Stabilität und Oberflächengüte dieser Bauteile ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Insbesondere müssen die Oberflächen der Seilführungen in einem Nachbearbeitungsschritt geglättet werden.

Die vorgestellte Konstruktion einer laparoskopischen Instrumentenspitze soll mittels geeigneter Fertigungstechnologien als Funktionsmuster aufgebaut werden. Zur Aktuierung steht dabei bereits eine mechatronische Antriebseinheit zur Verfügung (siehe Abbildung 3 rechts). Diese ist mit einem Durchmesser von 60 mm kompakt aufgebaut und ermöglicht die Vorspannung und Betätigung von drei Zugseilpaaren, sowie eine Rotation des Instrumentenschafts. Die Servomotoren werden mittels ROS (Robot Operating System) angesteuert. Bisher sind dabei Motorgeschwindigkeitsvorgaben mittels eines Mehrachseingabegerätes (SpaceMouse, 3Dconnection GmbH, München) möglich.



Abbildung 3: Links: Mittels SL μ M gefertigte Einzelteile einer Zangenspitze für die Laparoskopie; rechts: mechatronische Antriebseinheit für laparoskopische Instrumente

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Beitrages wurden Wirkprinzip und konstruktive Ausführung einer neu entwickelten und bereits zum Patent angemeldeten Instrumentenspitze vorgestellt. Diese zeichnet sich durch eine geringere Anzahl an Einzelteilen aus und besitzt somit das Potenzial einer verbesserten Miniaturisierbarkeit, verringerten Montagekosten und einer höheren Zuverlässigkeit. Dieser Vorteil wurde mittels des Einsatzes von Gleitführungen für die Betätigungsseile der Zangenmauteile erzielt. Die prinzipbedingte Veränderlichkeit der Führungsstrecke l_s der Betätigungsseile über den Winkel φ des Gelenks q_w wurde durch die Optimierung der geometrischen Parameter minimiert. In der Diskussion wird außerdem auf eine mögliche Fertigung mittels selektivem Lasermikroschmelzen und den Einsatz von Kunststofffasern zur Betätigung der Zangenmauteile hingewiesen sowie eine Antriebseinheit für die Instrumentenspitze vorgestellt.

5 Referenzen

- [1] N. J. Soper, L. L. Swanström, W. S. Eubanks, *Mastery of Endoscopic and Laparoscopic Surgery*, second edition, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2004.
- [2] C. E. H. Scott-Conner, *The SAGES Manual: Fundamentals of Laparoscopy, Thoracoscopy, and GI Endoscopy*, Springer, 2006.
- [3] G. Hubens, H. Coveliers, L. Balliu, M. Ruppert, W. Vaneerdeweg, *A performance study comparing manual and robotically assisted laparoscopic surgery using the da vinci system*, Surgical endoscopy, 2003.
- [4] C. Nguan, A. Girvan, P. P. Luke, *Robotic surgery versus laparoscopy; a comparison between two robotic systems and laparoscopy*, Journal of Robotic Surgery, 2008.
- [5] G. S. Guthart, J. K. Salisbury, *The Intuitive™ telesurgery system: overview and application*, in: Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [6] Edwards, K. L. *Towards more strategic product design for manufacture and assembly: priorities for concurrent engineering*. Materials & Design, 2002.