

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2023-11-12-86



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Hochproduktives Innen-Polygondrehen in der Medizintechnik

Alternativer Schraubenantrieb effizient zerspant

T. Arndt, V. Sellmeier, W.-D. Kiessling, A. Kanz, M. Luik, V. Schulze

ZUSAMMENFASSUNG Medizinische Knochenschrauben werden meist spanend aus biokompatiblen Titanlegierungen hergestellt. Für die Fertigung des Schraubenantriebs sind die geringen Abmessungen gepaart mit zähem Werkstoff oft herausfordernd. In diesem Beitrag wird ein neuartiger Schraubenantrieb vorgestellt, der sehr effizient durch synchronisiert-zyklisches Polygondrehen hergestellt werden kann. Im Vergleich zum konventionellen Fräsen eines Innensechsrunds ist eine mehr als 13-fache Produktivitätssteigerung möglich.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Drehen, Entwicklung

Alternative screw drive efficiently machined – High-productivity internal polygon turning for medical applications

ABSTRACT Medical bone screws are usually machined from biocompatible titanium alloys. For the manufacturing of the screw drive, the small dimensions and the difficult to machine material are often challenging. This work therefore presents a novel screw drive which can be manufactured very efficiently by polygon turning. Compared to conventional milling, an increase in productivity by more than a factor of 13 is possible.

1 Einleitung

Aufgrund ihrer hohen Biokompatibilität bestehen Knochenschrauben für orthopädische Anwendungen überwiegend aus der Titanlegierung Ti6Al4V ELI (3.7165) [1]. Das Gewinde der Knochenschraube wird wegen der hohen Anforderungen an Oberflächengüte und Gratfreiheit nicht wie herkömmliche Stahlschrauben umformend, sondern spanend hergestellt [2], wobei für die langen und schlanken Bauteile vor allem das Wirbeln auf Langdrehautomaten zum Einsatz kommt [3]. Bei vielen Anwendungen hat die Gewindeherstellung den größten Anteil an der Stückzeit, weshalb sich die Entwicklungen der letzten Jahre auf eine Produktivitätssteigerung dieses Prozessschritts konzentriert haben. Durch die Entwicklung einer Verfahrensvariante, welche mit einer veränderten Prozesskinematik die Parallelisierung des Wirbelns und des Drehens bei gleichzeitig verbesserter Oberflächenqualität des Gewindegrunds erlaubt, kann die Fertigungszeit um bis zu 30 % reduziert werden [4]. Innovationen bei der Werkzeuggestaltung und -kühlung erlauben in einigen Anwendungsfällen sogar die Halbierung der Stückzeit [5]. Vor diesem Hintergrund rückt die Bearbeitungszeit zur Herstellung des Schraubenkopfs zunehmend in den Fokus. Dieser wird in der Regel parallel zur Gewindeherstellung in einer zweiten Bauteil-

spindel mit rückseitig arbeitenden Werkzeugen gefertigt. Um die Gesamtstückzeit zu reduzieren, ist deshalb neben der Verkürzung der Bearbeitungszeit für das Gewinde auch die Reduktion der Bearbeitungszeit für den Schraubenantrieb notwendig. Zu den häufigsten Antriebsformen gehört heute der Innensechsrund (auch bekannt unter dem Markennamen „TORX“). Durch die verhältnismäßig kleinen Konturradien, die erschwerte Spanabfuhr infolge der Sacklochbohrung und die hohe mechanische und thermische Belastung, die der Werkstoff auf das Werkzeug ausübt, ist die Herstellung des Innensechsrunds oft eine Herausforderung. Moderne Werkzeugsysteme erlauben zwar prozesssicheres Fräsen trotz großer Länge-zu-Durchmesser-Verhältnisse von bis zu vier [6]. Die Prozessparameter müssen aufgrund der Stabilität der fragilen Werkzeuge jedoch meist sehr konservativ gewählt werden, was gerade bei kurzen Knochenschrauben die Gesamtstückzeit negativ beeinflusst.

Ein hochproduktives Fertigungsverfahren zur Herstellung von Außen- und Innenkonturen mit unrundem Querschnitt ist der so genannte Zwei-Spindel-Unrund-Drehprozess [7], auch bekannt als Polygondrehen. Dabei handelt es sich um ein synchronisiert-zyklisches Zerspanungsverfahren, bei welchem Werkzeug und Bauteil lageeregelt mit einem festen Drehzahlverhältnis (Achskopplung) in Eingriff gebracht werden [8]. Werkzeug- und Bau-

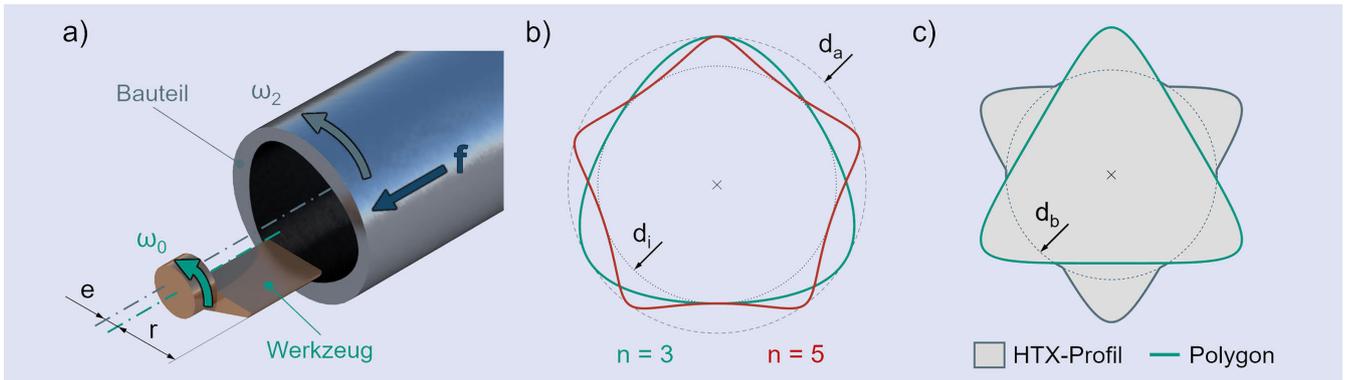


Bild 1. a) Kinematik des Polygondrehens. b) Beispiele für Polygone, welche mit dem Polygondrehen in Abhängigkeit von Werkzeug und Kinematik erzeugt werden können. c) Grundaufbau des HTX-Profiles. Grafik: wbk

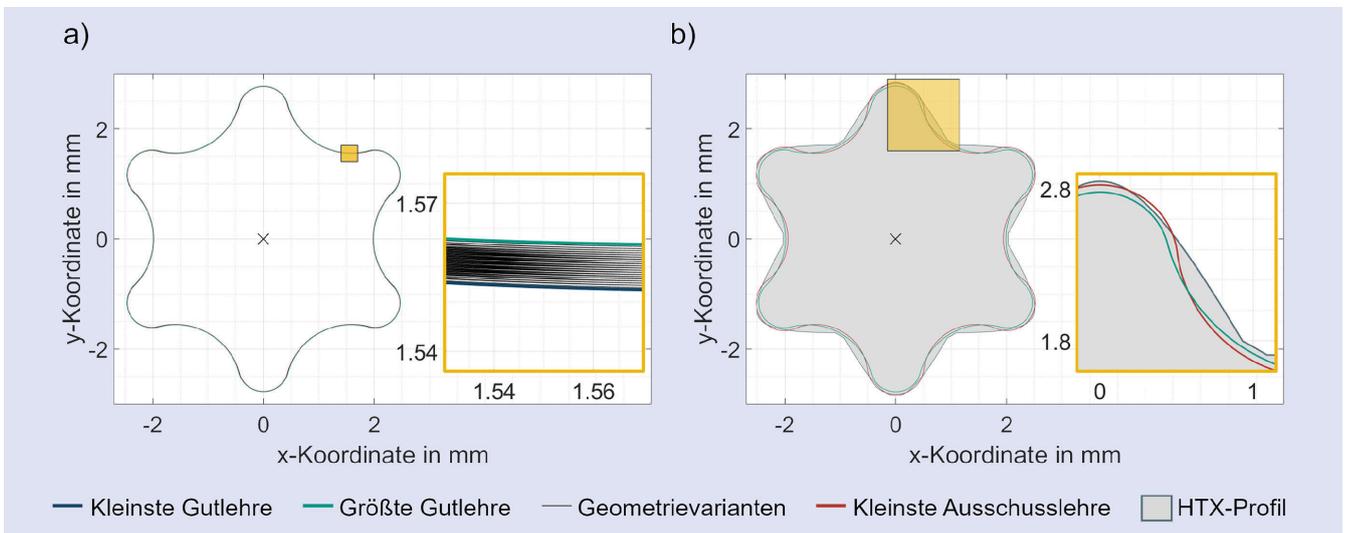


Bild 2. a) Bestimmung der minimalen und maximalen Kontur am Beispiel der Gutlehre. b) Das HTX-Profil liegt in Toleranzmitte zwischen größter Gut- und kleinster Ausschusslehre. Grafik: wbk

teilachse rotieren in dieselbe Richtung, wobei das Bauteil vom Werkzeug überholt wird. Beide verlaufen parallel und sind um einen Achsabstand e zueinander versetzt, siehe **Bild 1** a. Dadurch können polygonale Konturen erzeugt werden, deren Form durch die Anzahl an Mitnehmern n sowie den Hüll- und Pferchkreisdurchmesser d_a und d_i bestimmt sind, siehe **Bild 1** b. Diese geometrischen Größen hängen direkt mit den Größen der Kinematik, das heißt dem Werkzeugflugkreisradius r , dem Achsabstand e und dem Drehzahlverhältnis i zusammen [9]. Hypotrochoide Konturen werden auch als Polygone oder H-Profile bezeichnet und sind im Zusammenhang mit Welle-Nabe-Verbindungen seit wenigen Jahren genormt [10].

In diesem Beitrag wird ein alternativer, in seiner Kontur ein Innensechsrund ähnlicher Schraubenantrieb (HTX) vorgeschlagen, welcher hochproduktiv durch Polygondrehen hergestellt werden kann. Die Abmessungen des HTX werden mithilfe von Variantenrechnung auf Basis der Gut- und Ausschuss-Lehrung für Innensechsrund-Profile derart abgeleitet, dass herkömmliche Schraubendreher passen. Zudem werden zwei Prozessstrategien zur Herstellung des HTX anhand eines Beispiels im Laborumfeld experimentell untersucht und auf die seriennahe Fertigung übertragen, sowie mit der konventionellen Fertigung eines Innensechsrunds durch Fräsen verglichen.

2 Alternativer Schraubenanschluss (HTX)

Das HTX-Profil wird durch Kombination zweier identischer Polygone mit jeweils drei Mitnehmern ($n = 3$) zusammengesetzt, welche um 180° verdreht zueinander eingebracht werden, siehe **Bild 1** c. Durch die zuvor eingebrachte Kernlochbohrung mit dem Durchmesser d_b entsteht ein Kantenbruch an den Übergängen. Als Grundform der Polygone wird ein sogenanntes Flachpunktprofil gewählt, sodass die Form weder konvex noch konkav ist [10]. Die Zusammenhänge der Bestimmungsgrößen vereinfachen sich gemäß Formel (1).

$$e = \frac{1}{4} r = \frac{1}{10} d_a = \frac{1}{6} d_i \quad (1)$$

2.1 Ableitung der Hauptabmessungen

Die Ableitung der Abmessungen des HTX-Profiles erfolgt auf Basis der Norm der Gut- und Ausschuss-Lehrung von Innensechsrund-Profilen, welche die Grenzabmessungen der Lehren vorgibt [11]. Die Prämisse ist, dass die größte Gutlehre passt, die kleinste Ausschusslehre nicht. In einem ersten Schritt werden daher die maximalen Konturen der Gut- und Ausschusslehren

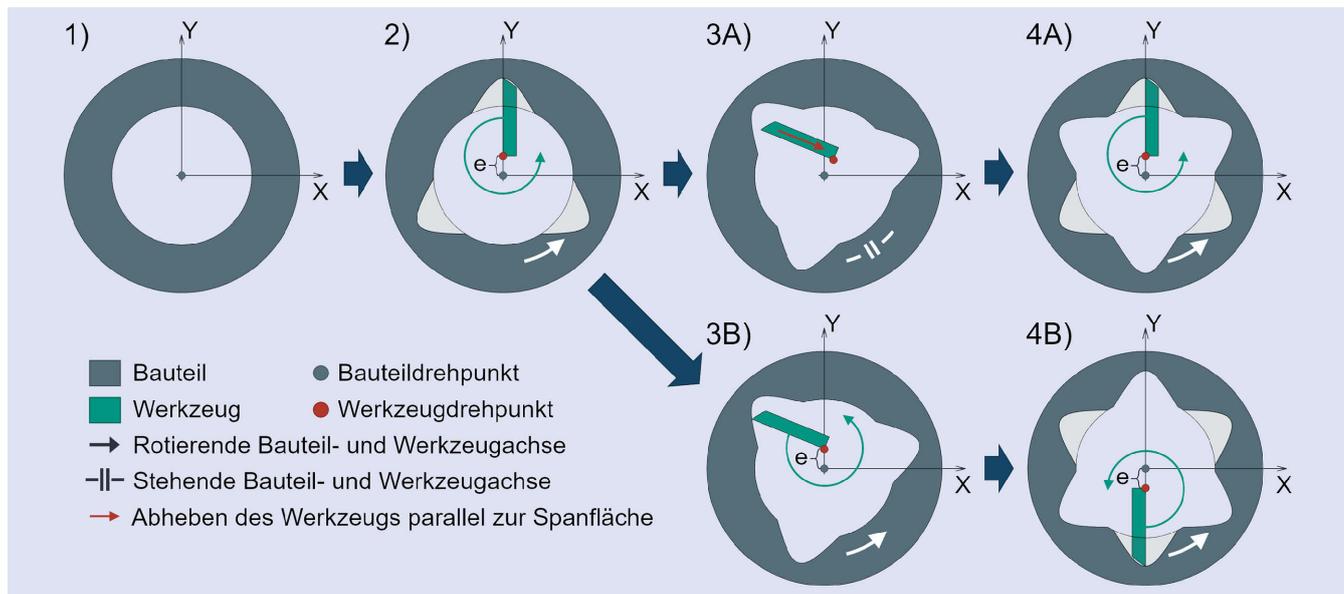


Bild 3. Zwei verschiedene Prozessstrategien zur Herstellung des HTX durch Polygondrehen, Darstellung im Stirnschnitt des Bauteils. Grafik: wbk

bestimmt, wozu eine in „Matlab“ programmierte numerische Variantenrechnung durchgeführt wird. Die vier geometrischen Parameter des Innensechsrunds werden zwischen den Grenzmaßen linear in je zehn Stufen variiert, wodurch sich für die Gutlehren in der Theorie 10 000 Geometrievarianten ergeben. Da das Innensechsrundprofil anhand der genormten vier geometrischen Parameter grundsätzlich überbestimmt ist, wird je einer der Parameter aus den anderen berechnet und mit den jeweiligen Grenzen verglichen. Werden diese überschritten, ist die berechnete Geometrievariante ungültig und wird ausgeschlossen. Typischerweise liegt der Anteil an gültigen Varianten bei >90 %. Ausgehend von den Hauptabmessungen des Innensechsrunds wird anschließend entlang der Konturnormalen die minimale und maximale Kontur der Lehren bestimmt, Bild 2 a.

Zur Ermittlung der Hauptabmessung des HTX-Profiles wird der Achsabstand e in diskreten Schritten erhöht und das jeweilige HTX-Profil nach Gleichung (1) auf Durchdringung mit den Konturen der größten Gut- und der kleinsten Ausschusslehre geprüft. Da e auf der Maschine beispielsweise über die Y-Achse mit einer typischen programmierbaren Auflösung von 0,001 mm eingestellt wird, wird dieses Inkrement zur Erhöhung von e verwendet. Die Hauptabmessung ergibt sich als Mittelwert der auf diese Weise ermittelten Grenzwerte von e , sodass das HTX-Profil in Toleranzmitte zwischen größter Gut- und kleinster Ausschusslehre liegt, siehe Bild 2 b. Der Durchmesser der Kernlochbohrung d_b wird gleich der Hauptabmessung des Innenkreises des korrespondierenden Innensechsrundes gewählt. Die Bearbeitungstiefe t entspricht ebenso der des Innensechsrundes.

2.2 Prozessstrategien

Zwei Prozessstrategien zur Herstellung des HTX durch Polygondrehen werden untersucht. Beiden gemein ist das Plandrehen des Kopfes, sowie das Vorbohren und Innenausdrehen der Kernlochbohrung. Anschließend wird das erste Polygon eingebracht, wobei e in die positive Y-Richtung des Maschinenkoordinatensystems eingestellt wird, siehe Bild 3 Schritt 2. Ab diesem Zeitpunkt unterscheiden sich die Prozessstrategien A und B: Bei Stra-

tegie A werden Werkzeug- und Bauteilrotation unter Beibehaltung der Achskopplung angehalten und das Werkzeug parallel zur Spanfläche abgehoben, bevor es im Eilgang ausgefahren wird, siehe Bild 3 Schritt 3A. Dadurch sollen Kratzer auf der erzeugten Bauteiloberfläche vermieden werden. Anschließend wird das Bauteil um 180° verdreht, das Werkzeug identisch zu Schritt 2 positioniert und das zweite Polygon eingebracht, siehe Bild 3 Schritt 4A. Die Prozedur zum Ausfahren des Werkzeugs entspricht Schritt 3A.

Strategie B sieht zum Ausfahren des Werkzeugs kein Anhalten und Abheben vor, siehe Bild 3 Schritt 3B. Es wird mit einem Ausfahr-Vorschub f_R gearbeitet, welcher zum vierfachen Vorschub f gewählt wird. Um das zweite Polygon um 180° versetzt zum ersten einzubringen, wird der Achsabstand im Unterschied zu Schritt 2 in negative Y-Richtung eingestellt, siehe Bild 3 Schritt 4B. Anschließend erfolgt das Ausfahren des Werkzeugs analog zu Schritt 3B. Auf diese Weise kann die Achskopplung über den gesamten Prozess hinweg aufrechterhalten werden.

3 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen erfolgen am Beispiel eines HTX-Profiles mit Abmessungen ähnlich T30, Tabelle. Sie untergliedern sich in drei Teile:

- Grundsätzliche Machbarkeit des HTX-Profiles durch Polygondrehen
- Erprobung der Praxistauglichkeit des Polygondrehens im seriennahen Umfeld
- Konventionelle Fertigung des HTX-Profiles und eines Innensechsrundes T30 durch Fräsen als industrielle Referenzprozesse

Die Versuche zur grundsätzlichen Machbarkeit der Prozessstrategien werden unter Laborbedingungen auf einer Langdrehmaschine vom Typ „Traub TNL32-7B“ durchgeführt. Zur Untersuchung der Praxistauglichkeit wird anschließend die Strategie mit den besten Ergebnissen ins seriennahe Umfeld übertragen. Dazu wird eine Langdrehmaschine vom Typ „Traub TNL32-11“ mit Stangenlader genutzt, welche im Tagesgeschäft als Produkti-

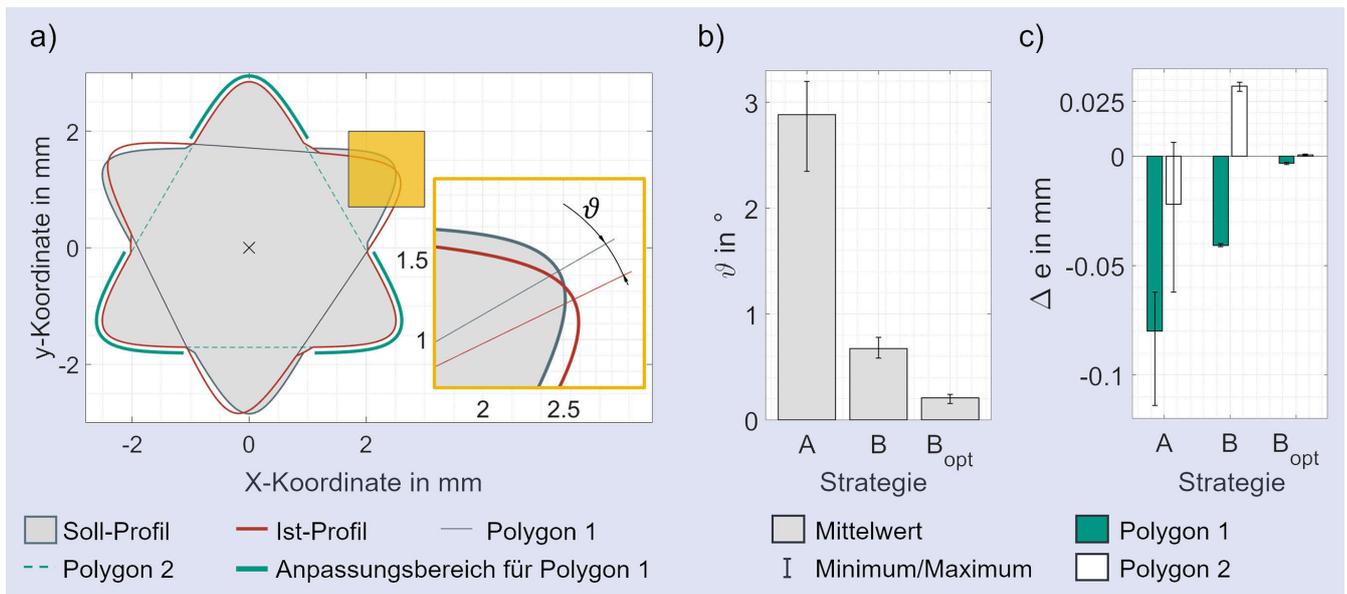


Bild 4. a) Methode zur Bestimmung der geometrischen Größen des HTX-Profiles mittels Polygon-Fitting. b) Erreichte Genauigkeit in Abhängigkeit der Prozessstrategie, $v_c = 30$ m/min. Grafik: wbk

onsmaschine zur Serienproduktion eingesetzt wird. Diese Maschine kommt auch für die konventionelle Fertigung der Antriebe durch Fräsen zum Einsatz. Alle Versuche werden auf der Gegenspindel der Maschinen unter Hochdruck-Öl-Kühlung durchgeführt. Bei den Werkzeugen zum Polygondrehen handelt es sich um beschichtete HM-Sonderwerkzeuge mit Innenkühlung. Für die Untersuchung der Prozessstrategien wird die Schnittgeschwindigkeit v_c auf den Stufen 30 m/min und 70 m/min variiert. Durch unterschiedliche Ausstattungsvarianten der beiden Maschinen kann die maximale Werkzeugdrehzahl n_0 von 12 000 1/min bei den seriennahen Versuchen nicht ausgeschöpft werden, sodass v_c hier auf 55 m/min beschränkt ist, siehe Tabelle. Als Versuchswerkstoff wird gemäß der Anwendung Knochen-schraube Implantat-Titan Ti6Al4V ELI verwendet. Die Messung der Hauptzeiten erfolgt innerhalb des CNC-Programms durch Auslesen der Maschinen-Zeitstempel. Diese Zeit umfasst lediglich das Einbringen der beiden Polygone des HTX-Profiles durch Polygondrehen beziehungsweise im Fall der konventionellen Fertigung das Fräsen der Konturen. Bei Letztgenannter werden die Konturen mit einem Fräser $\varnothing 1$ mm vorbereitet und im Fall des Innensechsrunds T30 auch geschlichtet. Aufgrund der kleineren Eckenradien des HTX-Profiles im Vergleich zum Innensechsrund muss hier zum Schlichten ein Fräser $\varnothing 0,5$ mm verwendet werden. Durch die kleinen Werkzeugdurchmesser ist v_c bei der konventionellen Fertigung auf 18 m/min beziehungsweise 9 m/min beschränkt.

Die hergestellten Bauteile werden auf einem Koordinatenmesszentrum Firma Zeiss vom Typ „Prismo“ mit einer Auflösung von 3600 Punkten/U vermessen. Um die HTX-Profile hinsichtlich der Bestimmungsgrößen der Polygone und insbesondere deren Lage zueinander auswerten zu können, werden die Messdaten mit Matlab weiterverarbeitet. Für jedes der beiden Polygone wird ein Anpassungsbereich am Ist-Profil identifiziert, welcher im Anschluss für das Fitting eines Polygons verwendet wird, siehe **Bild 4 a)**. Dazu werden lediglich im Anpassungsbereich die Abweichungen des anzupassenden Polygons vom Ist-Profil berechnet und die kinematischen Größen r und e , sowie die Win-

kellage mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate [12] optimiert. Da das Werkzeug für beide Polygone identisch ist, wird r global optimiert. Dies trifft auch bauteilübergreifend zu, sofern das Werkzeug zwischen den Versuchen nicht ausgebaut oder gewechselt wird. Aus den Größen lassen sich neben den Abweichungen Δr und Δe auch die Verdrehung der beiden Polygone zueinander ϑ berechnen, siehe **Bild 4**. Außerdem wird der Abgleich mit den Konturen der ermittelten größten Gut- und kleinsten Ausschusslehre zur Bewertung der erreichten Geometrietreue herangezogen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die erreichte Geometrietreue ist stark von der verwendeten Prozessstrategie abhängig, siehe **Bild 4 b/c)**. Bei Strategie A ergeben sich demnach ϑ von bis zu $3,2^\circ$ bei verhältnismäßig großen Abweichungen von e , welche zudem stark streuen. Dem gegenüber ist die Verdrehung zwischen den Polygonen im Fall von Strategie B im Mittel um mehr als 75 % geringer, wobei auch die Streuung deutlich abnimmt. Möglicher Grund dafür ist der unterschiedliche Einfluss der Positioniergenauigkeit der Werkzeugmaschine auf die Geometrietreue in Abhängigkeit der Prozessstrategie: Während das Werkzeug bei Strategie A zum Abheben in X- und Y-Richtung verfahren werden und die Achskopplung zum Verdrehen des Bauteils aufgehoben werden muss, wird die Achskopplung bei Strategie B über den gesamten Prozess hinweg aufrechterhalten und das Werkzeug nur in Y-Richtung neu positioniert. Diese Begründung erscheint auch vor dem Hintergrund betragsmäßig sehr ähnlicher, jedoch in ihrem Vorzeichen unterschiedlicher Δe im Fall von Strategie B einleuchtend: Korrigiert man das Zentrum des Werkzeughalters in Bezug auf das Zentrum des Bauteils nach Messung um wenige 1/100 mm, ergeben sich im Fall von Strategie B_{opt} mit Abstand die geringsten Abweichungen, siehe **Bild 4 b/c)**. Kleinste Positionierungsfehler zwischen Bauteil und Werkzeug führen demnach zu veränderten wirksamen Achsabständen e , welche nicht nur direkten Einfluss auf die Geometrie der beiden Polygone, sondern in Analogie zu Schritt 4

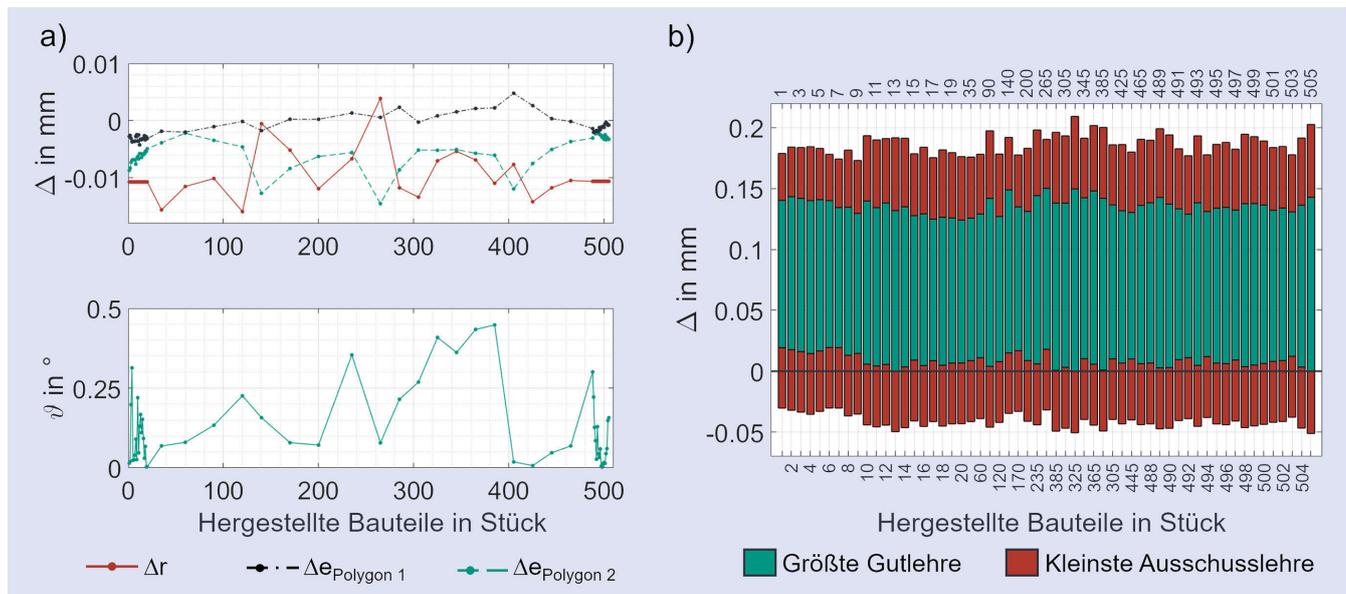


Bild 5. Geometriedaten der Bauteile aus seriennahen Versuchen. a) Auswertung der geometrischen Größen der Polygone. b) Abgleich der hergestellten HTX-Profile mit den Lehren des Innensechsrundes. Grafik: wbk

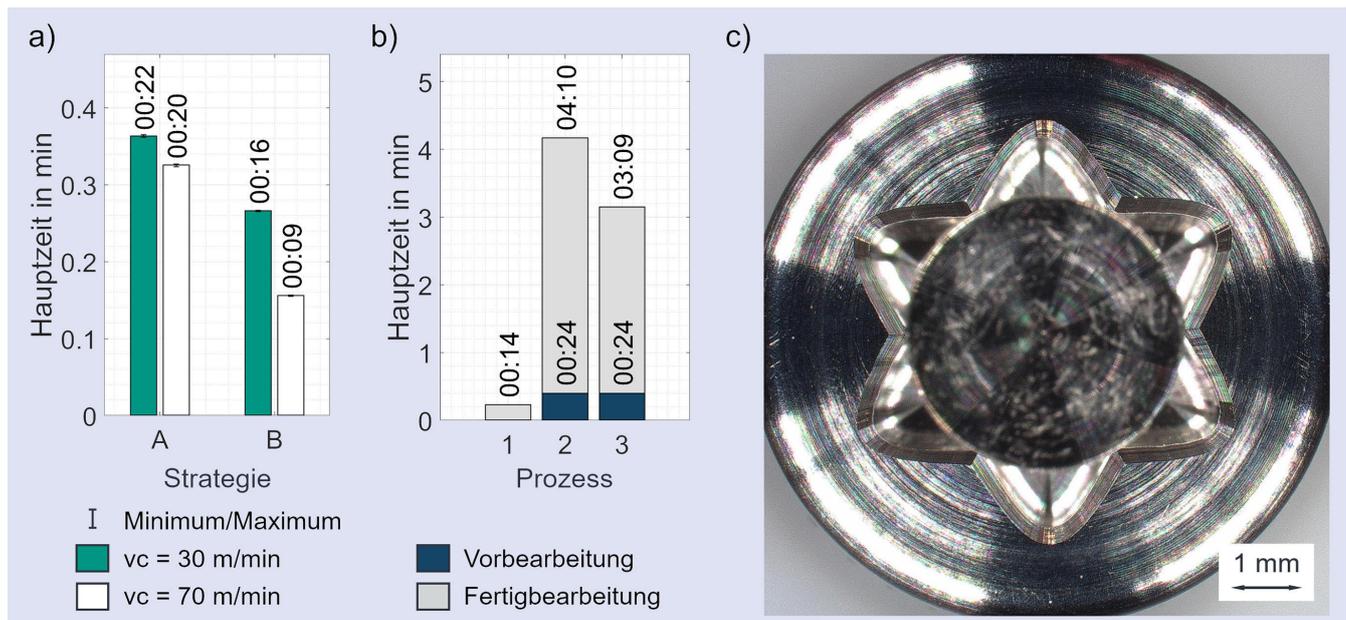


Bild 6. a) Hauptzeiten zur Herstellung des HTX in Abhängigkeit der Strategie. b) Hauptzeiten bei der Herstellung von Schraubenanschlüssen in der seriennahen Produktion (Prozess 1: HTX-Profil hergestellt durch Polygondrehen mit Strategie B; Prozess 2: HTX-Profil konventionell durch Fräsen hergestellt; Prozess 3: Innensechsrund T30 konventionell durch Fräsen hergestellt). c) Polygongedrehter und zeitgleich entgrateter HTX. Grafik: wbk

der Prozessstrategie B auch Auswirkungen auf die Orientierung der Polygone zueinander haben. Für die Versuche im seriennahen Umfeld kommt daher Strategie B mit einem exakt auf Spindelmitte eingestellten Werkzeughalter zum Einsatz.

Die seriennahen Versuche wurden aus zeitlichen Gründen vor Erreichen der Standmenge nach über 500 mit einem Polygondrehwerkzeug hergestellten HTX abgebrochen. Über die gesamte Einsatzzeit des Werkzeugs variiert Δe zwischen $-0,015$ mm und $0,005$ mm, sowie Δr zwischen $-0,016$ mm und $0,004$ mm, siehe **Bild 5 a)**. Die Verdrehung der beiden Polygone zueinander überschreitet $\vartheta = 0,448^\circ$ nicht, ist damit in der Serie allerdings nahezu doppelt so groß wie im Laborumfeld. Diese Abweichungen in der

Kinematik des Polygondrehens wirken sich jedoch nicht negativ auf die Geometrietreue der hergestellten HTX im Sinne der Lehre nach [11] aus, **Bild 5 b)**. Demnach ergeben sich bei Prüfung mit der größten Gutlehre nur positive Abweichungen, das heißt die größte Gutlehre passt. Negative Abweichungen beim Abgleich der Profile mit der kleinsten Ausschusslehre bedeuten, dass sich die Ausschusslehre nicht in den HTX einführen lässt. Vom Standpunkt der Lehre aus betrachtet entspricht der HTX damit einem Innensechsrund.

Mit Strategie B lässt sich gegenüber A nicht nur die bessere Geometrietreue erreichen, unabhängig von v_c ergeben sich hier auch die geringeren Fertigungshauptzeiten, siehe **Bild 6 a)**. In

Tabelle. Geometrische Größen des HTX-Profiles und Prozessstellgrößen für die Versuche.

HTX-Profil						
Parameter	e	r	d _a	d _i	d _b	t
Wert in mm	0,570	2,280	5,700	3,420	4,050	2,800
Prozessstellgrößen						
v _c in m/min	30	55	70		f in mm/U	0,015
n ₀ in 1/min	5.025	9.198	11.457		f _{R Strategie A} in m/min	40
n ₂ in 1/min	3.350	6.142	7.638		f _{R Strategie B} in mm/U	0,060

den seriennahen Versuchen konnte die maximale Schnittgeschwindigkeit der Laborversuche nicht erreicht werden, weshalb sich hier eine Hauptzeit von 14 s ergibt, siehe Bild 6 b). Im Vergleich zur konventionellen Fertigung eines Innensechsrunds durch Fräsen (Prozess 3) ergibt sich dennoch eine Produktivitätssteigerung um mehr als den Faktor 13. Wird der HTX konventionell gefräst (Prozess 2) muss aufgrund kleinerer Eckenradien im Vergleich zum Innensechsrund ein Fräser mit kleinerem Durchmesser eingesetzt werden, was zu einem kleineren Zeitspannvolumen führt. Dadurch steigt die Hauptzeit und das Potenzial des HTX verschwindet, siehe Bild 6 b). Während das Entgraten des Schraubenantriebs bei der konventionellen Fertigung eines zusätzlichen Prozessschrittes bedarf, welcher in den dargestellten Hauptzeiten nicht berücksichtigt ist, macht eine am Werkzeug des Polygondrehens integrierte Entgratschneide das Entgraten in einem separaten Prozessschritt überflüssig. Bei Bearbeitung des HTX auf Tiefe erfolgt das Entgraten somit automatisch, siehe Bild 6 c).

5 Fazit

In diesem Beitrag wurde ein alternativer, in seiner Kontur einem Innensechsrund ähnlicher Schraubenantrieb (HTX) vorgestellt, welcher hochproduktiv durch Polygondrehen hergestellt werden kann. Die Kontur des Antriebs wurde dabei derart ausgelegt, dass herkömmliche Innensechsrund-Schraubendreher passen. Es wurden zwei Prozessstrategien zur Herstellung des HTX im Laborumfeld experimentell untersucht und anschließend in ein seriennahes Fertigungsumfeld übertragen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Geometrietreue der hergestellten Profile eine hohe Sensitivität gegenüber Positionierungsfehlern vom Werkzeug relativ zum Bauteil aufweist, welcher durch die Wahl einer geeigneten Prozessstrategie begegnet werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass der HTX vom Standpunkt der Lehre aus betrachtet einem Innensechsrund entspricht. Diese Eigenschaft konnte im seriennahen Umfeld bei einer über 13-fachen Produktivität im Vergleich zur konventionellen Fertigung eines Innensechsrunds durch Fräsen über mehr als 500 Bauteile aufrechterhalten werden. Damit stellt der HTX zumindest aus fertigungstechnischer Sicht eine interessante Alternative für den Antrieb von Knochenschrauben dar. Inwiefern der HTX in seinen Eigenschaften hinsichtlich übertragbarem Drehmoment mit konventionellen Schraubenantrieben vergleichbar ist und ob gegebenenfalls spezielle Schraubendreher notwendig sind, sollten künftige Arbeiten untersuchen. Außerdem ist aufgrund der hohen Sensitivität der Geometrietreue gegenüber Positionierungsfehlern insbeson-

dere bei kleineren Abmessungen mit Einschränkungen zu rechnen. Folgende Arbeiten sollten demnach die geometrischen und prozessseitigen Grenzen des Polygondrehens untersuchen.

FÖRDERHINWEIS

Die Ergebnisse wurden im Projekt „Funktionsintegrierte Implantate durch neuartige synchronisiert-zyklische Zerspanprozesse (ZyklusMed)“ erarbeitet. Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (Förderkennzeichen O2P18C040 bis O2P18C043) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Niinomi, M.: Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2008, S. 30–42
- [2] Koelsch, J. R.: Medical Implants in One Setup. SME Media, Stand: 2005. Internet: <https://www.sme.org/medical-implants-one-setup>. Zugriff am 29. Juni 2023
- [3] Hobohm, M.: Wirbeln in der Medizinbranche. *Werkstatt und Betrieb*, 12/2006, S. 24–28
- [4] Schulze, V.; Sellmeier, V.; Abele, E. und Kannwischer, M.: Gewinde-Wirbeln und Fräsen schwer zerspanbarer Werkstoffe. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF)*, Jahrgang 112, 2017, S. 443–446
- [5] Zerspanungstechnik: Paul Horn Jet-Wirbeln: Wirbelsystem mit innerer Kühlmittelzufuhr. Stand 2022. Internet: https://www.zerspanungstechnik.com/bericht/gewindewerkzeuge/jet-jet-wirbeln-high-speed-wirbeln_wirbelsystem-mit-innerer-kuehlmittelzufuhr_2022-05-18. Zugriff am 29. Juni 2023
- [6] O. V.: Hochleistungs-Fräswerkzeuge für Torx-Schrauben. Firmenbroschüre, Zecha Hartmetall-Werkzeugfabrikation GmbH,
- [7] Königsbach-Stein, 08/2022
- [8] Maximov, J.: A new method of manufacture of hypocycloidal polygon shaft joints. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, 2005, S. 144–149
- [9] Arndt, T.; Sellmeier, V. und Schulze, V.: Model-based tool design for the manufacturing of hypocycloidal internal profiles by polygon turning. *Procedia CIRP*, Vol. 117, 2023, S. 7–12
- [10] Maximov, J.; Hirstov, H.: Machining of hypertrochoidal surfaces by adding rotations around parallel axes, part 1: Kinematics of the method and rational field of application, Vol. 6, 2005, S. 1–11
- [11] DIN 3689–1: Welle-Nabe-Verbindung – Hypotrochoidische H-Profile – Teil 1: Geometrie und Maße. Deutsche Fassung, Ausgabe November 2021

[12] DIN EN ISO 10664: Innensechsrund für Schrauben (ISO 10664:2014).
Deutsche Fassung, Ausgabe Januar 2015

[13] Gauss, C.: Abhandlung zur Methode der kleinsten Quadrate.
Berlin: Verlag P. Stankiewicz, 1887



Tassilo Arndt, M.Sc. 

Foto: wbk

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze 

wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 
Engelbert-Arnold-Str. 8, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 721 608 42455
tassilo.arndt@kit.edu
www.wbk.kit.edu

Dr.-Ing. Volker Sellmeier

Index-Werke GmbH & Co. KG Hahn & Tessky
Plochinger Straße 92, 73730 Esslingen
Tel. +49 711 3191 713
www.index-group.com

Dr.-Ing. Wolf-Dieter Kiessling

Beutter Präzisions-Komponenten GmbH & Co. KG
Butzensteigleweg 4–6, 72348 Rosenfeld
Tel. +49 7428 9330
www.beutter.de

Andreas Kanz

Dr.-Ing. Matthias Luik

Hartmetall-Werkzeugfabrik Paul Horn GmbH
Horn-Str. 1, 72072 Tübingen
Tel. +49 7071 70040
www.horn-group.com

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)