

Geregeltes Tiefbohren
**Entwicklung und Erforschung eines mechatronischen
Werkzeugsystems zur Kompensation des Mittenverlaufs beim BTA-
Tiefbohren**

IGF-Nr.: 20422 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW),
An der Universität 2, 30823 Garbsen

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Institut für Spanende Fertigung (ISF),
Baroper Straße 303, 44227 Dortmund



Ansprechpartner beim IFW:

M. Eng. Niklas Klages
0511 / 762 18343
klages@ifw.uni-hannover.de

Ansprechpartner beim ISF:

M. Sc. Julian Frederic Gerken
0231 / 755 90165
julian.gerken@tu-dortmund.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 20422 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Tiefbohrverfahren ermöglichen das Herstellen von Bohrungen mit einer im Vergleich zum Durchmesser besonders großen Bohrungstiefe und werden ab einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von ca. $L/D = 10$ wirtschaftlich eingesetzt. Die drei klassischen Tiefbohrverfahren im industriellen Einsatz sind das Einlippentiefbohren, das Ejektortiefbohren und das BTA-(Boring and Trepanning Association)-Tiefbohren [VDI3210]. Das BTA-Tiefbohren wird in einem Durchmesserbereich von etwa $d = 10 \dots 1.500$ mm in den unterschiedlichen Bohrvarianten des Voll-, Kern- und Aufbohrens angewendet. Charakteristische Merkmale dieses Verfahrens sind der asymmetrische Aufbau des Werkzeugs, der durch Führungsleisten zu einer Selbstzentrierung des Werkzeugs in der Bohrung führt, die Kühlschmierstoff-(KSS)-Zufuhr mit einem hohen Volumenstrom durch einen speziellen Bohrölzufuhrapparat (BOZA) und die Abfuhr des KSS-Späne-Gemischs durch das Spanmaul des Bohrkopfs in das Bohrohr [VDI3209]. Das BTA-Tiefbohren wird oft am Ende der Wertschöpfungskette für die Bearbeitung von teuren Bauteilen wie z. B. Hydraulikzylindern, Getriebewellen und Flugzeuglandebeinen eingesetzt. Das Bauteil weist hier bereits einen hohen Gegenwert auf, wodurch eine hohe Prozesssicherheit sowie die Einhaltung enger Fertigungstoleranzen von enormer technischer und wirtschaftlicher Bedeutung ist. In Ergänzung zu den klassischen Bohrungsanforderungen, wie z. B. geringe Rundheits- und Durchmesserabweichung sowie gute Oberflächenqualität, stellt vor allem der sogenannte Mittenverlauf ein wichtiges Qualitätsmerkmal tiefer Bohrungen dar. Der Mittenverlauf spielt oftmals eine entscheidende Rolle für die Funktionsfähigkeit des Bauteils, da dieser den radialen Lagefehler der tatsächlichen Bohrungsmittelachse relativ zur idealen Bohrungsachse widerspiegelt [Bie18]. Der aus dem Prozess resultierende Mittenverlauf wird durch eine Vielzahl von Einfluss-faktoren, wie z. B. der Prozessführung, dem Maschinenzustand, den Schnittparametern, dem Werkzeug, dem Werkstück und der Temperaturverteilung im Werkstück beeinflusst. Eine vollständige Vermeidung des Mittenverlaufes ist beim BTA-Tiefbohren aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen nicht möglich [Ger20]. Die prozessparallele Messung des Mittenverlaufs stellt beim BTA-Tiefbohren eine enorme Herausforderung dar, die bereits Gegenstand früherer Forschungsprojekte war. Zum einen ist ein System zur prozessparallelen Messung des Mittenverlaufs am Bohrkopf mittels Lasermesstechnik erarbeitet worden [Kat11]. Zum anderen ist ein Ansatz zur Bestimmung der Bohrkopfposition und -orientierung anhand der Biegelinie des Bohrrohrs entwickelt worden [Den18]. Trotz der zufriedenstellenden Ergebnisse, sind beide Systeme aufgrund der Unzugänglichkeit der Messstelle und den Werkzeugeingriffsbedingungen für den industriellen Einsatz nur bedingt einsatzfähig. In der Praxis hat sich daher die robustere und flexible Methode der Ultraschall-Wanddickenmessung zur Bestimmung der Bohrkopfposition etabliert. Bei dieser Methode wird der Bohrprozess durch den Maschinenbediener unterbrochen und der Ultraschallkopf des Systems manuell über das Werkstück geführt. Auf Basis der gemessenen Wandstärken und der Erfahrung des Maschinenbedieners wird die radiale Position der Werkstücklünetten verändert, wodurch die Orientierung des Bohrkopfs zur Werkstückachse beeinflusst und dem Mittenverlauf entgegenwirkt wird [Bie18]. Ein

Beispiel aus der am projektbegleitenden Ausschuss beteiligten Firma Kaiser Maschinenbau und Zerspanungstechnik GmbH Co. KG verdeutlicht dies: Der Bohrprozess eines 17 m langen Hochdruckrohrs, durch das im späteren Einsatz Gas mit einem Druck von 6.000 bar geleitet wird, muss zwischen 60 und 70 mal unterbrochen werden, um eine Korrektur durchzuführen. Während der Unterbrechung wird die Wandstärke auf Höhe des Werkzeugs mit einem Ultraschallmesskopf gemessen. Aus dem Verlauf der Wandstärke wird auf die Verkippung des Bohrkopfs relativ zur idealen Bohrungsachse geschlossen. Anschließend verändert der Maschinenbediener die Lage des Bohrkopfes derart, dass sich der Mittenverlauf im fortgesetzten Bohrprozess verringert. Bei stehenden Bauteilen erfolgt dies durch austauschbare, in der Dicke variable Druckstücke, die das Bohrrohr am Bohrloch abstützen und dem Bohrrohr eine Biegelinie aufzwingen. Durch das Wiederholen dieses Ablaufs jeweils nach einigen Zentimetern Bohrlochtiefe können bisher auf 17 m Bohr-tiefe Mittenverläufe von < 2 mm realisiert werden. Die einzustellende Bohrkopfverkippung entstammt bisher ausschließlich dem Erfahrungswissen der Maschinenbediener. Diese benötigen daher eine sehr lange und kostenintensive Einarbeitung. Für jede dieser manuellen Lageänderungen benötigt der Maschinenbediener etwa 10 min. Bei 60 Unterbrechungen pro Bauteil entstehen somit 600 min unproduktive Nebenzeit. Bei Kosten von 125 € / h (Maschinenstundensatz + Bediener) ergibt sich somit ein Einsparpotenzial von 1.250 € je Bohrung. Dieses Prinzip wird als Grundlage für die Konstruktion des Systems zur prozessparallelen Erfassung und automatisierten Kompensation des Mittenverlaufs herangezogen. Die Entwicklung des Kompensationssystems sowie des Ultraschall-Messsystems erfolgte in enger Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Dieser setzt sich aus renommierten Firmen im Themenbereich Tiefbohren sowie Mess- und Prüftechnik zusammen, sodass ein optimaler industrieller Bezug über die gesamte Projektlaufzeit gewährleistet ist

Forschungsziel

Aus dem Stand der Technik geht hervor, dass bereits zahlreiche prozessspezifische Analysen zur Vorhersage des Mittenverlaufes und dessen Kompensation durchgeführt wurden. Es fehlt jedoch ein Ansatz zur automatisierten, prozesssimultanen Korrektur des Mittenverlaufs, der unabhängig von den vorliegenden Randbedingungen eine gleichbleibend hohe Qualität der erzeugten Tiefbohrungen ermöglicht. Um diesen Ansatz zu realisieren, müssen zwei Teilziele erreicht werden:

1. Erforschung des prozesstechnologischen Wissens zur automatisierten, prozessparallelen Kompensation des Mittenverlaufes beim Tiefbohren durch die gezielte Verkippung des Werkzeugs.

Um das Teilziel zu erreichen, müssen Modelle entwickelt werden, die basierend auf den im Prozess gemessenen Mittenverlauf die idealen Korrekturstellungen für das zu entwickelnde Werkzeugsystem bestimmen können. Die Arbeitshypothese besteht darin, dass der Mittenverlauf unter Nutzung dieser entwickelten Modelle und mit Hilfe eines

geeigneten mechatronischen Systems prozessbegleitend korrigiert werden kann. Daraus ergibt sich das zweite Teilziel:

2. Erforschung eines mechatronischen Systems zur Umsetzung der Mittenverlaufskorrektur.

Zum Erreichen dieses Ziels wird ein mechatronisches System zur Korrektur des Mittenverlaufs entwickelt, aufgebaut und dessen Einsatzverhalten erforscht. Dieses führt die Mittenverlaufskorrektur ohne eine Prozessunterbrechung durch. Das Korrektursystem kann in bestehende Tiefbohrmaschinen nachgerüstet werden. Somit soll erstmals ein für den industriellen Einsatz geeignetes Kompensationsverfahren erforscht werden.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zur Erreichung der genannten Ziele wurde, gemeinsam vom Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund und vom Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Universität Hannover, ein System zur automatischen prozessparallelen Mittenverlaufskompensation beim BTA-Tiefbohren entwickelt. Die in Bild 1 dargestellte Kompensationseinheit besteht aus einem Schubrohr, welches über das Bohrrrohr geschoben ist, der Kompensationseinheit, sowie dem Messsystem. Das Schubrohr kann über zwei Antriebe rotatorisch und translatorisch bewegt werden und ist an eine Stellhülse mit einer Regelleiste angekoppelt. Die Regelleiste auf der Stellhülse wird durch die Bewegung des Schubrohres in Vorschubrichtung an die Bohrungsinnenwand gedrückt. Die resultierende Kraft bewirkt eine Kippung des Bohrkopfes, wodurch der gemessene Mittenverlauf gezielt kompensiert werden kann.

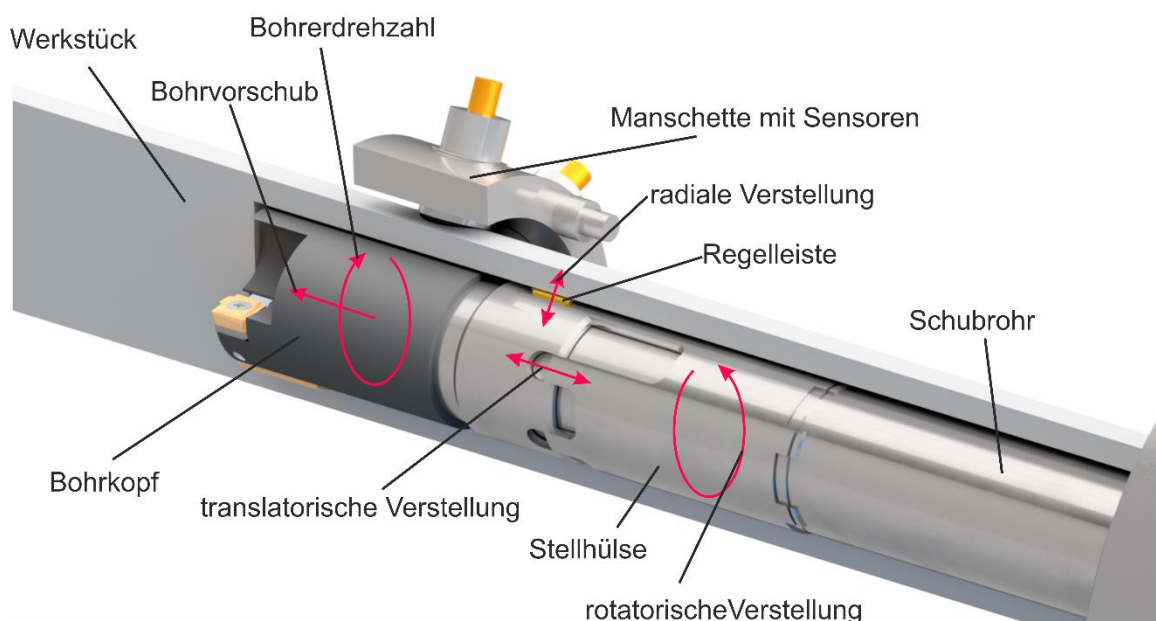


Bild 1 – Übersicht Kompensationseinheit

Die prozesssimultane Kompensation erfordert die Messung des Mittenverlaufes bei der Bohrbearbeitung. Hierfür wurde am IFW ein Messsystem entwickelt, das auf drei Ultraschallsensoren basiert. Die Ultraschallsensoren erfassen die Wandstärke zwischen Bohrungsinnenwand und Werkstückoberfläche an definierten Positionen. Mithilfe eines Auswertalgorithmus wird aus den gemessenen Wandstärken der aktuelle Mittenverlauf in Richtung und Betrag bestimmt. Bild 2 zeigt das zugrundeliegende Messprinzip des Messsystems. Aufgrund der Verwendung von Stützlünetten bei sehr langen Werkstücken wurden die Sensoren in einem 45° Versatz auf einer Manschette montiert. Diese Anordnung ermöglicht das Ein- und Ausfahren des Systems an den Stützlünetten. Durch die Erfassung der Wandstärken des Werkstücks kurz hinter den Führungsleisten des Bohrkopfes wird die Bestimmung des Mittenverlaufes während des Bohrprozesses ermöglicht. Die Berechnung des Mittenverlaufes aus den drei gemessenen Wandstärken erfolgt durch eine Ausgleichsrechnung. Anhand der drei Wandstärken und der bekannten Sensorpositionen werden drei Punkte auf der Bohrungswand bestimmt. Mithilfe dieser Punkte wird die Verschiebung der Bohrung in x und y Richtung bestimmt. Aus der Mittelpunktverschiebung lässt sich anschließend der Mittenverlauf in Betrag und Richtung bestimmen. Einflussgrößen, wie beispielsweise die Werkstücktemperatur oder die Sensorverkipfung wurden analysiert und, soweit möglich, durch konstruktive Maßnahmen oder Korrekturfunktionen kompensiert.

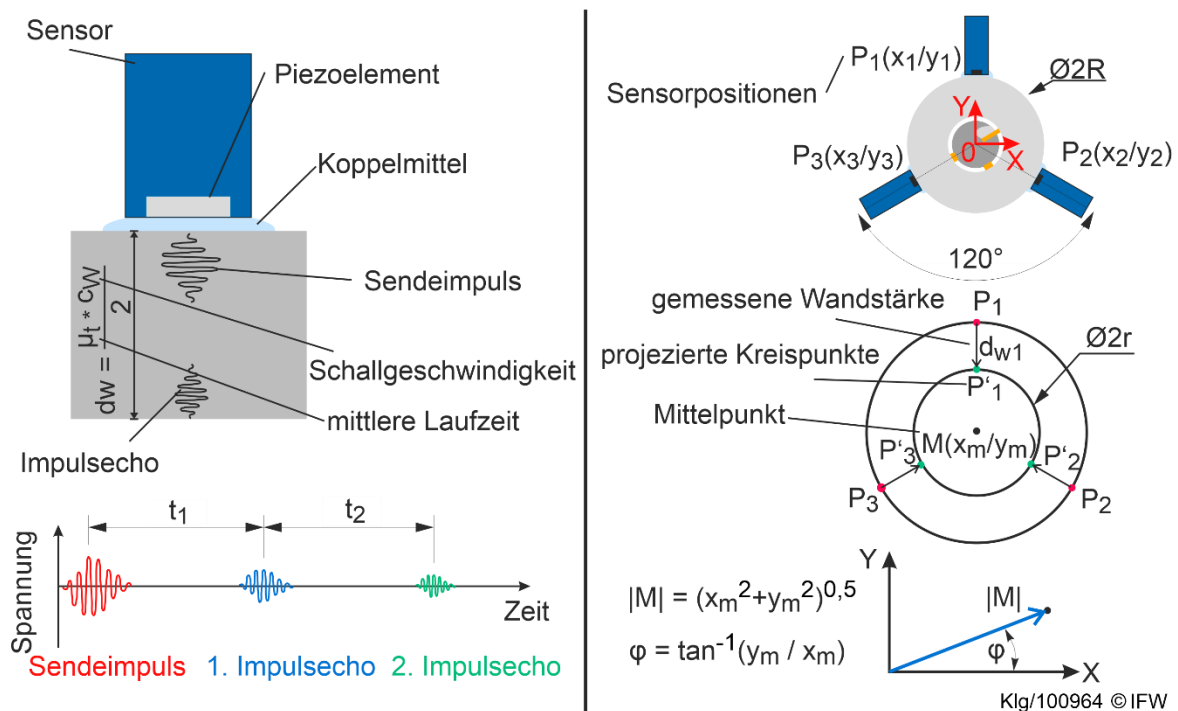


Bild 2 – Funktionsweise Messsystem

Im Anschluss an die Entwicklung der Teilsysteme an den Instituten wurde das Gesamtsystem gemeinsam an der Tiefbohrmaschine des ISF in Dortmund in Betrieb genommen und untersucht. Bild 3 zeigt eine Übersicht des aufgebauten Systems. Die Steuerung, Regelung und Messdatenerfassung wurde mit einem IPC durchgeführt. Durch die Benutzerschnittstelle werden dem Bediener der aktuelle Mittenverlauf in

Betrag und Richtung, die aktuelle Bohrtiefe und die Daten der Stellantriebe zur Verfügung gestellt.

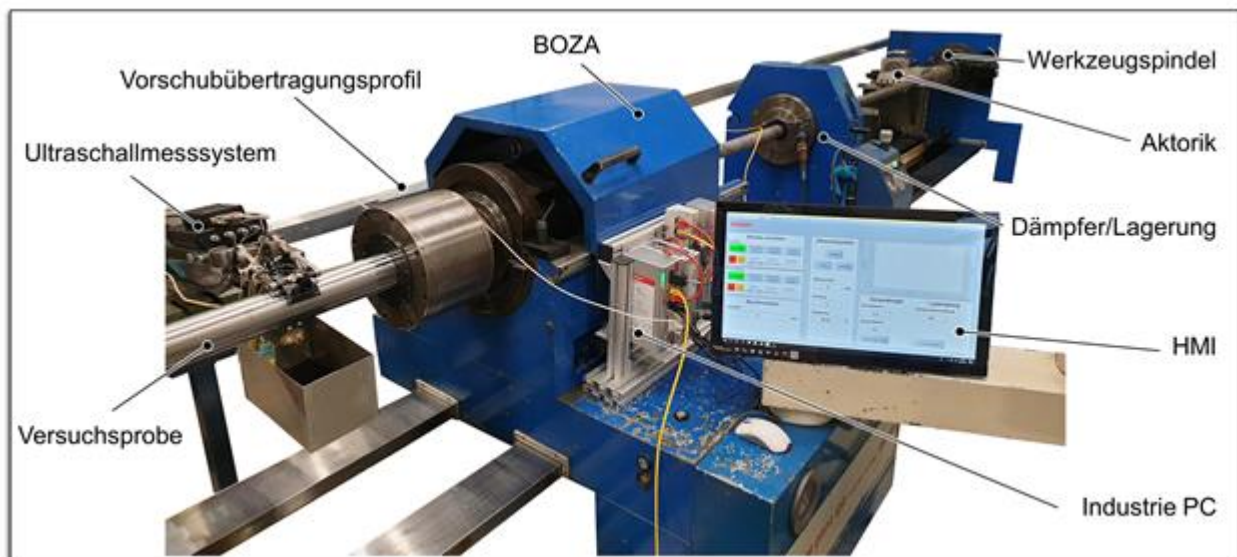


Bild 3: Aufgebautes Gesamtsystem zur Mittenverlaufskompensation

Zur Untersuchung der Wirksamkeit des Konzeptes wurden Bohrversuche mit unterschiedlichen Werkstoffen und Reglern durchgeführt. Als Werkstoffe wurden 18CrNiMo7-6 und 42CrMoV4 eingesetzt. Die Regler wurden zuvor auf Basis eines Simulink Modells vorausgelegt. Das Simulink Modell wurde auf Grundlage von Versuchen mit dem System mit und ohne eingeschaltete Kompensation entwickelt. Durch die vereinfachte Abbildung des Systemverhaltens im Modell konnten verschiedene Reglertypen untersucht werden und für die Anwendung im realen Prozess vorausgelegt werden. Auf Basis der Ergebnisse wurden ein Zweipunktregler mit Hysterese und ein „Logikregler“ für die Versuche am realen System ausgewählt. Bei der Zweipunktregelung wird die Regelleiste in Abhängigkeit des gemessenen Mittenverlaufs bei Überschreitung des oberen Grenzwertes ausgestellt und bei Unterschreitung des unteren Grenzwertes wieder eingefahren. Bei der Logikregelung wird zusätzlich die Strecke, die die Regelleiste bereits ausgefahren ist, in die Regelung miteinbezogen. Beide Regelverfahren verhindern eine Überlastung der Regelleiste durch ständiges Aus- und Einfahren.

Die ausgewählten Regler wurden im Anschluss in die Steuerung des IPC implementiert. Bei der anschließenden Erprobung der Regler am realen System wurde festgestellt, dass der Logikregler aufgrund der zusätzlichen Kontrolle der Kompensationsstrecke im Vergleich zum Zweipunktregler mit Hysterese deutlich besser für die Anwendung geeignet ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch den Einsatz der „Logikregelung“ der Mittenverlauf auf dem ersten Bohrmeter um ca. 40 % im Vergleich zum unregulierten Prozess reduziert werden kann. Außerdem konnte dem progressiv ansteigenden Mittenverlauf durch den Einsatz des Reglers entgegengewirkt werden, weshalb bei größeren Bohrtiefen eine deutlich stärkere Reduktion zu erwarten ist. Bild 4 zeigt die Versuchsergebnisse der Regelung mit dem Logikregler. Die Mittenverlaufsreduktion konnte sowohl bei 18CrNiMo7-6 als auch bei 42CrMoV4

erreicht werden. Durch weitere Verbesserung der Systemkomponenten kann der Mittenverlauf stärker reduziert werden.

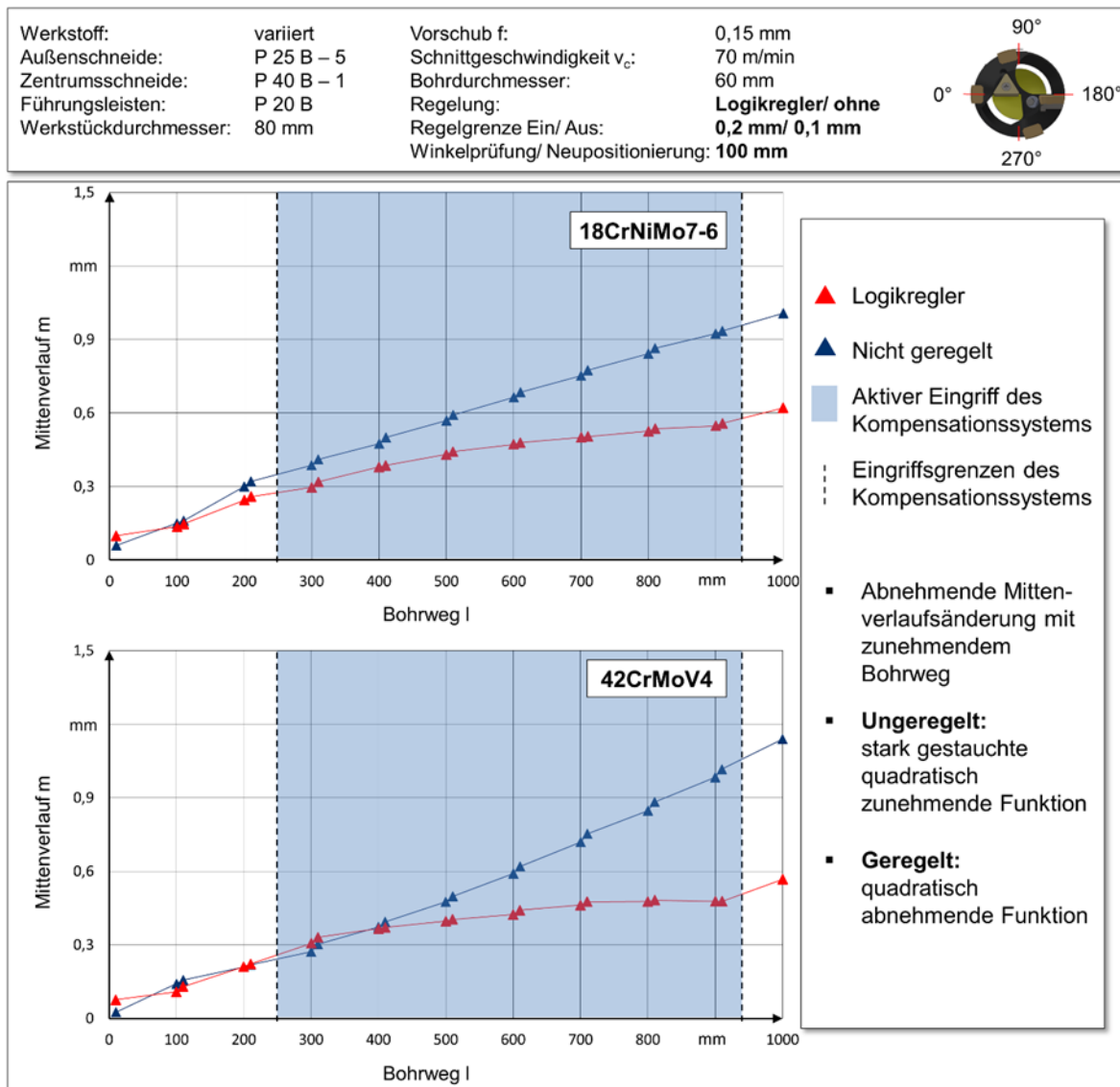


Bild 4 – Ergebnisse der Versuche mit der Logikregelung

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass der Mittenverlauf beim Tiefbohren durch eine gezielte Verkipfung des Bohrkopfes und prozessparallele Messung deutlich reduziert werden kann.

Zusammenfassung

Im Projekt „Geregeltes Tiefbohren“ wurde vom Institut für Spanende Fertigung (ISF) der TU Dortmund und vom Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover ein System zur prozesssimultanen Kompensation des Mittenverlaufs beim BTA-Tiefbohren entwickelt und erforscht. Durch eine neuentwickelte, gefertigte und erprobte Kompensationseinheit, die zwischen Bohrkopf und Bohrrohr montiert wird, ist mithilfe einer radial ausstellbaren Regelleiste und einem innovativen Aktorikkonzept eine gezielte Verkipfung des Bohrkopfs und somit eine zielgerichtete Beeinflussung des Mittenverlaufs im laufenden Prozess möglich. Das

entwickelte Messsystem bietet erstmals die Möglichkeit, den Mittenverlauf während des Bohrprozesses in Betrag und Richtung zu erfassen. Auf Basis von Versuchsreihen erfolgte die Entwicklung einer Regelung sowie die Anwendung beim BTA-Tiefbohrprozess. Nach einem Bohrweg von $l_B = 1.000$ mm ist eine durchschnittliche Mittenverlaufsreduzierung von ca. 40 % realisierbar. Im Vergleich zum Prozess ohne Regelung und Kompensationseinheit wurde die progressive Zunahme des Mittenverlaufs signifikant reduziert.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn M.Sc. Julian Frederic Gerken unter 0231 / 755-90165 oder bei Herrn M.Eng. Niklas Klages unter 0511 / 762-18343.

Literatur:

- [Bie18] Biermann, D.; Bleicher, F.; Heisel, U.: Deep hole drilling, CIRP Annals, 67, S. 673 – 694, 2018
- [Den18] Denkena, B.; Bergmann, B.; Kaiser, S. et al.: Process-parallel center deviation measurement of a BTA deep-hole drilling tool. Procedia Manufacturing 24 (2018), S. 229–234
- [Ger20] Gerken, J.F.; Klages, N.; Biermann, D.; Denkena, B.: In-process compensation of straightness deviation in BTA deep hole drilling using experimental and simulative analysis, Procedia CIRP, Vol. 93, S. 1417- 1422, 2020
- [Kat11] Katsuki, A.; Onikura, H.; Sajima, T.; Mohri, A.; Moriyama, T.; Hamano, Y.; Murakami, H.: Development of a practical high-performance laser-guided deep-hole boring tool. Improvement in guiding strategy. Precision Engineering 35 (2), 2011, S. 221-227
- [VDI3209] VDI-Richtlinie 3209 Blatt 1, Tiefbohren, Richtlinie für das Tiefbohren mit äußerer Zuführung des Kühlschmierstoffes (BTA- und ähnliche Verfahren). Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- [VDI3210] VDI-Richtlinie 3210: Tiefbohrverfahren. Beuth- Verlag, Berlin 2006