

Modular aufgebaute aktorische Drehwerkzeuge und Technologien zur Produktivitätssteigerung der robusten Schwerzerspanung²

Dipl.-Ing. Frank Arnold

1 Einleitung

In der Schwerzerspanung von rotationssymmetrischen Teilen unterliegen die technologischen Eingriffsbedingungen, speziell die Schnitttiefe und die daraus resultierenden Schnittkräfte, einem starken Einfluss der geometrischen Abweichungen des Rohteiles (Rundheit, Rundlauf, Zylinderform). Durch innovative Ansätze zur Verfahrensentwicklung in Verbindung mit neuen Bearbeitungs- und Werkzeugkonzepten soll die Herausforderung der verfahrensbedingten geometrischen Abweichungen der Rohteile angenommen und die Bearbeitung auf robusten Produktionsmaschinen wirtschaftlich verbessert werden. Aufbauend auf ersten Untersuchungen zur Ausrichtung des Rohteils und zum Aufbau der Werkzeuge /FOE-14/ werden im Vorgehen zunächst die auftretenden Abweichungen ermittelt und klassifiziert. In einem weiteren Schritt wird eine robuste Messeinrichtung entwickelt um die Aufspannlage des Rohteiles zu optimieren. Um die Schnitttiefenschwankungen zu reduzieren wird als dritter Schritt ein modulares aktorisches Werkzeug entwickelt. In einem weiteren Ansatz zur Verringerung der Auswirkungen der Geometrieabweichungen wird ein Konzept für ein aktiv schwingungsgedämpftes Drehwerkzeug für die Schwerzerspanung entwickelt.

2 Ermittlung und Klassifizierung der auftretenden geometrischen Abweichungen der Guss- und Schmiedeteile

Die Daten der Ist-Geometrie der Rohteile wurden über einen längeren Zeitraum erfasst und anschließend statistisch ausgewertet und klassifiziert. In der Auswertung der erfassten Daten konnten die zugehörigen geometrischen Abweichungen in Bezug zur Drehachse ermittelt und grafisch dargestellt werden (Abbildung 1).

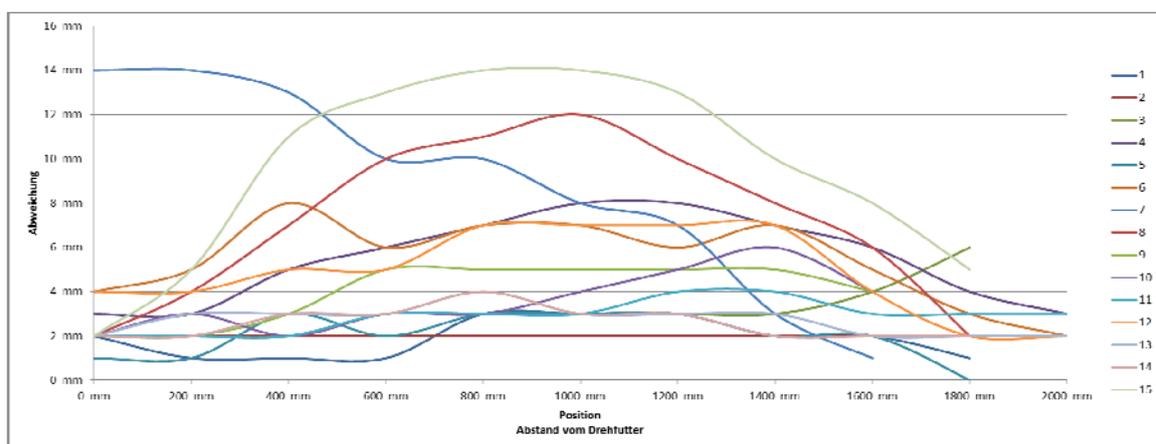


Abbildung 1: Graphen der ermittelten Oberflächenabweichungen

² Das Projekt wird über die AiF im Rahmen der Fördermaßnahme Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des BMWi gefördert.

Ausgehend von diesen Daten wurde eine Klassifizierung der ermittelten Abweichungen im Makrobereich des Werkstückes (langwellig, Entwicklung über großen Bereich des Werkstückes) vorgenommen. Bei diesen Abweichungen handelt es sich nach DIN 4760 um Gestaltabweichungen 1. Ordnung, um Formabweichungen. Die hauptsächlich auftretenden und den Zerspanungsprozess beeinflussende Größen können nach DIN EN ISO 1101 in die Formabweichungstoleranzen Geradheit, Zylindrizität und radialer Gesamtlauf aufgeteilt werden. Es wurden 4 Klassen festgelegt (Abbildung 2).

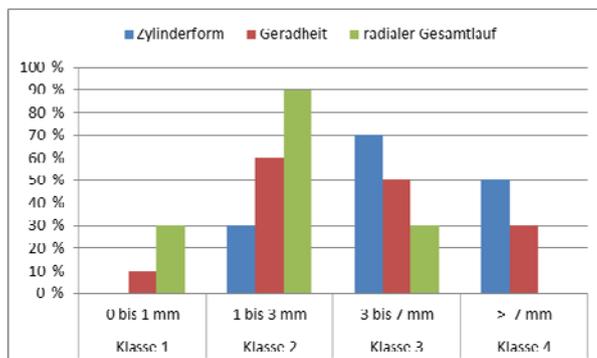


Abbildung 2: Anteil der Oberflächenabweichungen nach Klasse

3 Entwicklung einer Messeinrichtung für die Ausrichtung des Rohteiles in einer bearbeitungsoptimalen Lage

Die effiziente Bearbeitung eines Rohteiles bedarf bekannter und möglichst gleichbleibender Bedingungen. Herstellungsbedingt, z.B. beim Verfahren Freiformschmieden, entstehen unregelmäßige Oberflächen. Durch Abkühlprozesse bei der Warmumformung kommt es besonders bei langen wellenförmigen Rohteilen zu einem "Durchhängen", d.h. das Rohteil läuft in der Maschine nicht rund und fängt durch die statischen und dynamischen Unwuchten an zu schlagen. Um diese Probleme zu verringern wird eine Messeinrichtung zur Erfassung der Rohteilkontur für die Ausrichtung in einer bearbeitungsoptimalen Lage entwickelt.

3.1 Konzept

Das Gesamtkonzept (Abbildung 3) besteht aus einem Sensor, welcher den Abstand zur Rohteilkontur berührungslos ermittelt, einer Auswerteeinheit für die Berechnung und einer Anzeigeeinheit zur Ausgabe des Ergebnisses an den Maschinenbediener.

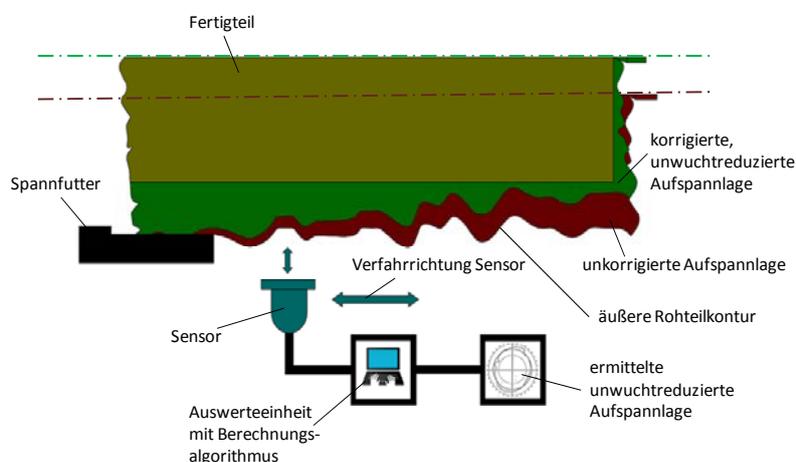


Abbildung 3: Gesamtkonzept Messeinrichtung

3.2 Berechnung der Aufspannlagenkorrektur

Für die Berechnung der Aufspannlagenkorrektur wurden folgende Ansätze gewählt:

- Die Erfassung der Oberfläche des Werkstückes erfolgt entlang der Längsachse.
- Die Messpunkte liegen auf einer Helikalbahn am Umfang verteilt (Abbildung 4).
- Die Welle wird in eine diskrete Anzahl Scheiben und jede Scheibe in eine diskrete Anzahl Segmente unterteilt (Abbildung 5).

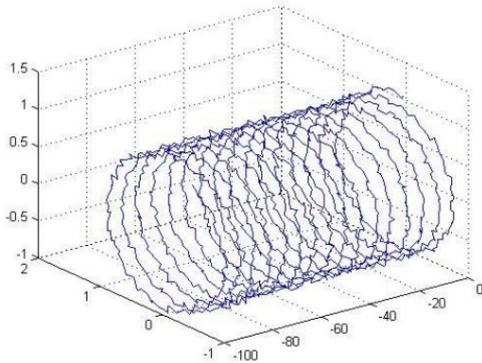


Abbildung 4: Messpunkte auf Helikalbahn

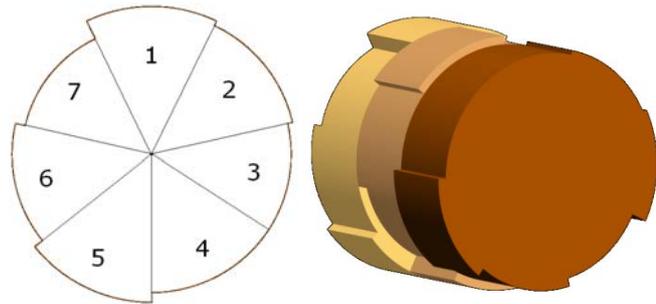
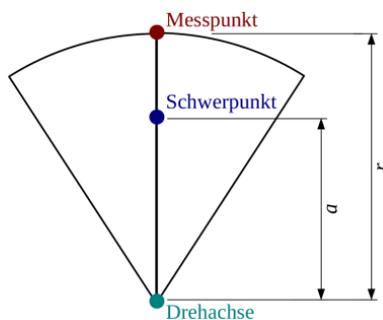


Abbildung 5: Unterteilung in Segmente und Scheiben

- Der Radius jedes Segmentes wird über einen Abstandssensor ermittelt.
- Jeder Schwerpunkt der Segmente besitzt entsprechend dem Bezugssystem der Scheiben je eine x- und y-Koordinate (Abbildung 6).



$$a_i = \frac{2 r_i n}{3 \pi} \sin \frac{180^\circ}{n}$$

Abbildung 6: Ermittlung des Schwerpunktes eines Segmentes

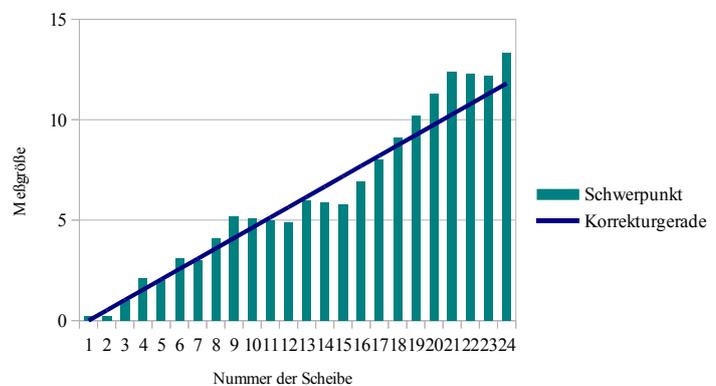


Abbildung 7: Korrekturgerade durch Nullpunkt im Reitstock

- Werden nun die Schwerpunkte aller Scheiben entlang der Länge des Werkstückes errechnet, kann über eine lineare Regression eine Korrekturgerade ermittelt werden.
- Da die Zentrierung im Reitstock als nicht veränderlich angesehen wird, muss die Gerade bei der ersten Scheibe durch den Nullpunkt verlaufen (Abbildung 7).
- Für die Ausführung der Berechnungen und Benutzeroberfläche für die Darstellung der Ergebnisse wurde der Auswertalgorithmus mit der Software DIADEM 2014 umgesetzt.

3.3 Umsetzung und Auswertung der Ergebnisse

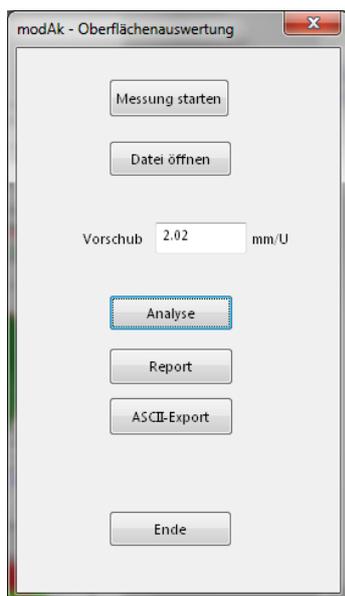


Abbildung 8:
Programmdialog mit
Handlungsmöglichkeiten

Die Erfassung der Oberflächendaten und Berechnung der notwendigen Korrekturvorgaben erfolgt im Softwaresystem DIADEM (Abbildung 8).

Das erstellte Programm bietet zusätzlich folgende Möglichkeiten:

- Die Auswertung bereits bemessener Daten über „Datei öffnen“ mit anschließender Analyse.
- Den Report mit den Korrekturen und Ergebnissen im PDF-Format speichern.
- Export der gemessenen Daten für eine Weiterverarbeitung als Punktwolke in gängigen CAD-Systemen.

Im Ergebnis der Analyse erhält der Bearbeiter auf dem Bildschirm eine Vorgabe der Korrekturwerte der einzelnen Spannbacken am Drehfutter. Im Beispiel nach Abbildung 9 ergibt sich eine Gesamtkorrektur K von:

$$K = \sqrt{(\text{Korrektur Backe 1})^2 + (\text{Korrektur Backe 2})^2} = 5,37\text{mm}$$

In der Ergebnisdarstellung (Abbildung 9) wird die Richtung der Verschiebung durch die Vorzeichen der Korrekturwerte angezeigt. Der Maschinenbediener wird durch die grafische Ausgabe am Bildschirm unterstützt. Zusätzlich erhält der Bediener die Informationen zum minimalen und maximalen Radius. Diese Informationen lassen eine Beurteilung hinsichtlich der Bearbeitbarkeit des Werkstückes zu. Der minimale Radius muss größer sein als der Radius des Fertigteiles, sonst ist eine maßhaltige Bearbeitung nicht möglich, d.h. das Rohteil wäre zu klein.

In Abbildung 10 wird die ursprüngliche Rohteillage (rot) und die korrigierte Rohteillage (grün) in 2 Diagrammen informativ dargestellt. Weiterhin findet der Anwender zusätzliche Informationen zum Messprozess wie z.B. Drehzahl, eingestellter Vorschub und Messfrequenz.

Die erarbeitete Lösung wurde durch umfangreiche Erprobungen verifiziert. Im Ergebnis stellt die entwickelte Lösung eine geeignete Unterstützung des Maschinenbedieners dar. Der Vorteil des Einsatzes ergibt sich aus der Zeitersparnis bei der Ausrichtung der Rohteile. Die Vermessung des Werkstückes ist bei Nutzung des Eilganges mit 3000mm/min nur abhängig von der Länge des Werkstückes. Die Berechnung erfolgt im erstellten Programm innerhalb von ca. 45s.

Datensatz: RT_001_SNR_01

| Korrektur Backe 1 [mm] | Korrektur Backe 2 [mm] | Korrektur Backe 3 [mm] | Korrektur Backe 4 [mm] |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 3.93 | -3.67 | -3.93 | 3.67 |

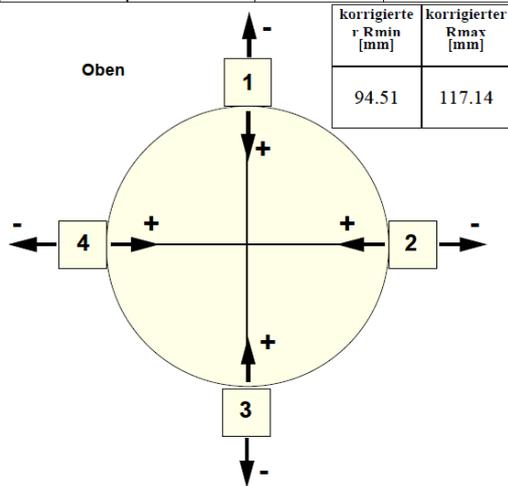


Abbildung 9: Korrekturvorgaben für Maschinenbediener

Datensatz: RT_001_SNR_01

| Vorschub [mm/U] | Messfrequenz [Hz] | Drehzahl [U/min] | Rmin [mm] | Rmax [mm] | Median [Messwerte/U] | Winkelinkrement [Grad] |
|-----------------|-------------------|------------------|-----------|-----------|----------------------|------------------------|
| 2.02 | 400 | 130.0 | 99.60 | 120.70 | 184 | 1.96 |

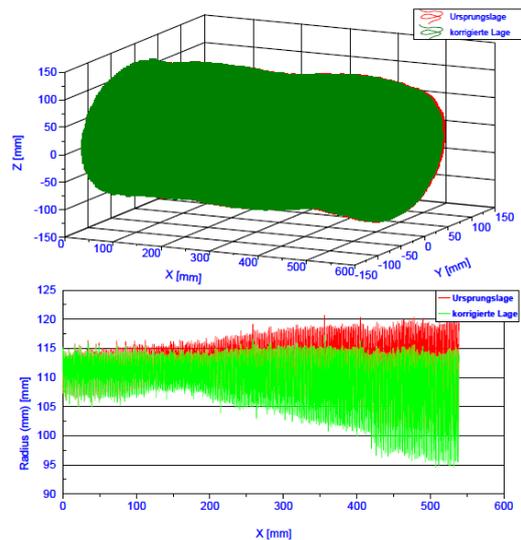


Abbildung 10: Zusatzinformationen zur Korrekturlage

4 Entwicklung modular aufgebauter aktorischer Werkzeuge für den Einsatz im Bereich der Schwerzerspannung

Die lokalen, d.h. örtlich stark begrenzten, Schwankungen durch Geometrieabweichungen sind durch die Korrektur der Aufspannlage nicht korrigierbar. Deshalb wurde ein modulares aktorisches Werkzeug entwickelt und erprobt, welches auf diese Abweichungen reagiert und die Schnitttiefe automatisch anpasst.

4.1 Konzept

Das Gesamtkonzept (Abbildung 11) besteht aus der berührungslosen Messeinrichtung zur Oberflächenvermessung, einer Auswerte-, Steuer-, und Regeleinheit und den Werkzeugmodulen 1 (Schruppschneide), 2 (Nachschruppschneide) und 3 (Endbearbeitungsschneide), wobei nur die Module 1 und 2 beweglich sind.

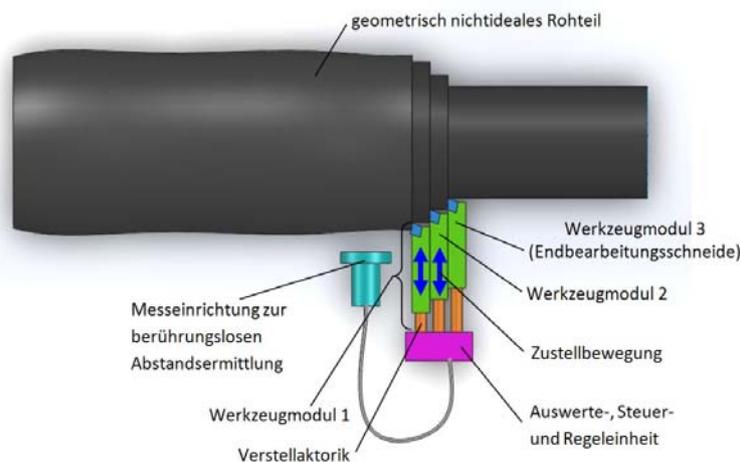


Abbildung 11: Gesamtkonzept aktorische Werkzeuge

4.2 Berechnungsgrundlagen und Regelung der aktorischen Werkzeuge

Für die Ansteuerung wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher die Zustellung der beiden verfahrenbaren Werkzeugschneiden berechnet und regelt. Abbildung 12 stellt die notwendigen Größen und Zusammenhänge für die Berechnung grafisch dar.

| | | | |
|--------------------------------------|------------------------|---------------------|------------------|
| Vorgaben Werkzeugaufbau: | a_1, a_2 | Messgröße: | a_t |
| Vorgaben Bearbeitungsaufgabe: | u_G, u, f_z, r | Regelgrößen: | a_{p1}, a_{p2} |
| Vorgaben WZ-Halter und WSP: | a_{p2mtn}, a_{p3mtn} | Stellgrößen: | W_1, W_2 |

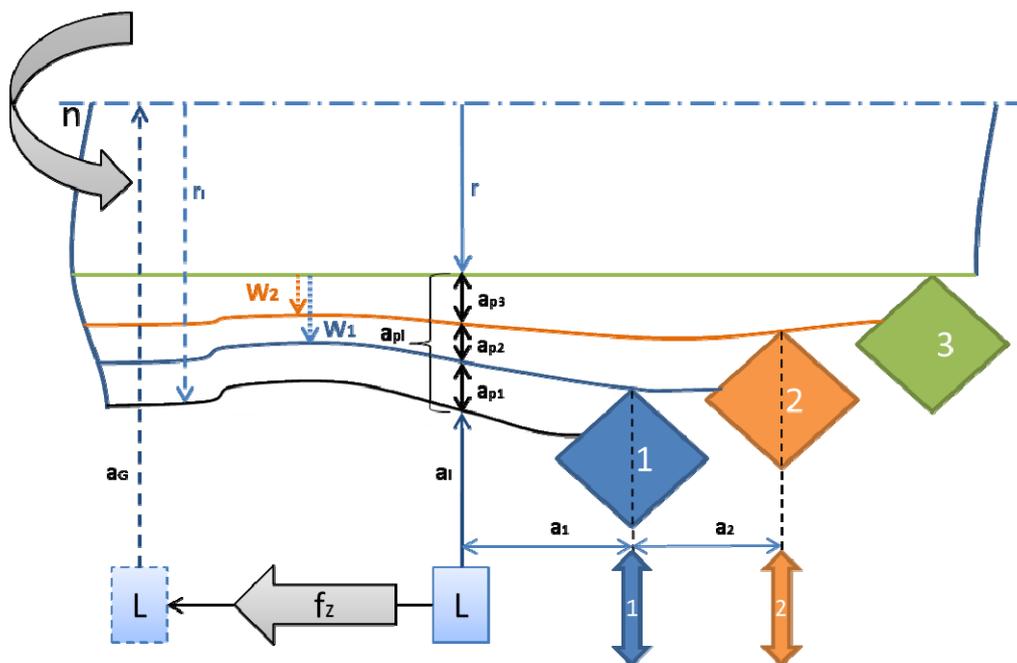


Abbildung 12: Skizze zur Auslegung des Regelalgorithmus

Für die Realisierung einer Filterfunktionalität, d.h. mit jeder Schneide reduzierter Schwankung der Schnitttiefe, wurde ein gleitender Mittelwert als Berechnungsvorschrift gewählt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Regelung kleine Abweichungen herausfiltert und dadurch im Ergebnis eine gleichmäßige Schnitttiefe der einzelnen Schneiden 1 bis 3 entsteht.

Die Berechnungen wurden in einen Regelalgorithmus in Softwaresystem DIADEM umgesetzt (Abbildung 13).

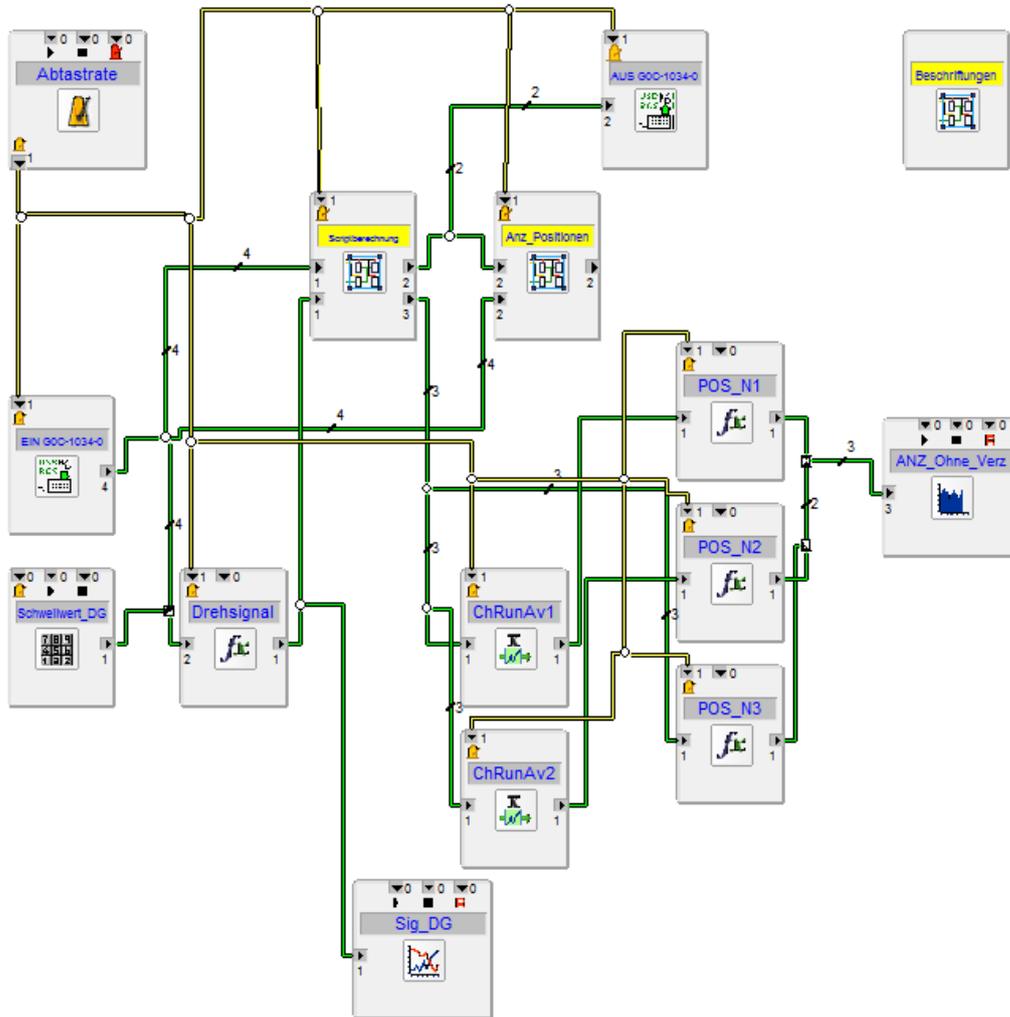


Abbildung 13: Umsetzung des Regelalgorithmus in der Software DIADeM 2014

4.3 Umsetzung und Test des Werkzeuges

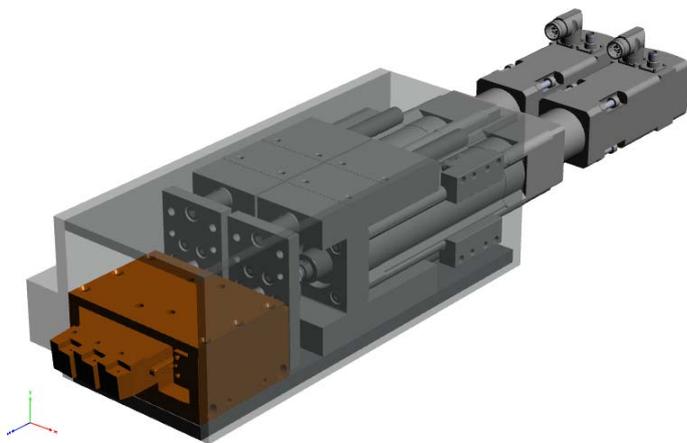


Abbildung 14: CAD-Konstruktion, Gehäuse transparent

Für die Verstellung der Einzelschneiden 1 und 2 wurde ein Antrieb mit Elektrozyylinder gewählt. Nach der Auswahl aller Komponenten und dem Entwurf der Regelung wurde das Werkzeug gebaut. Die CAD-Konstruktion ist in Abbildung 14 dargestellt.

Die Umsetzung des Werkzeuges mit Einbausituation ist aus den folgenden Abbildungen 15 und 16 ersichtlich.



Abbildung 15: Gesamtwerkzeug ohne Gehäusedeckplatte



Abbildung 16: Werkzeug im aufgebauten Zustand

Für die Bewertung der erreichten Lösung wurden umfangreiche Tests durchgeführt. Der Regelalgorithmus wurde mit jedem durchgeführten Versuch weiter besser an die stochastischen Bedingungen angepasst um einen robusten Einsatz zu gewährleisten.

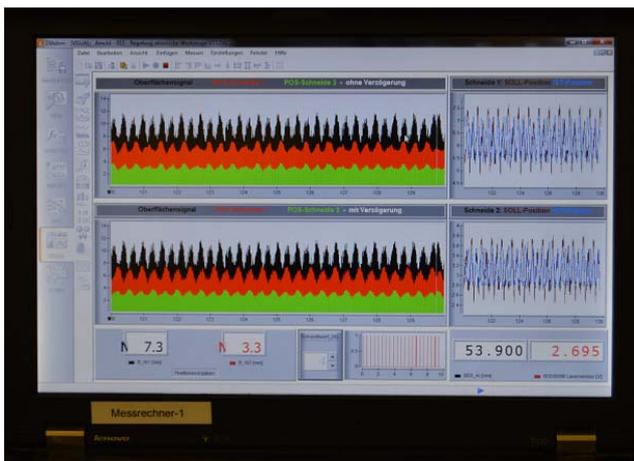


Abbildung 17: grafische Darstellung der arbeitenden Regelung am Rechner (Kontrolle, grafische Darstellung für Funktion nicht notwendig)

Die Abtastrate des Regelalgorithmus wurde auf die Drehzahl abgestimmt. Als Standard ist eine Abtastrate von 400Hz im System voreingestellt, d.h. eine Drehzahl bis 127 U/min ist die Anwendung sicher, im Bereich bis 178 U/min mit geringer Fehlerquote. Die Bedienoberfläche ist in Abbildung 17 dargestellt.

Im Ergebnis der Versuche konnte die Einsatzfähigkeit des Werkzeuges bestätigt werden. Durch den Einsatz des Werkzeuges wird, durch höhere erreichbare Schnitttiefen, die

Produktivität bei der Außen-Längsdrehbearbeitung von geschmiedeten Rohteilen erreicht und praktisch bestätigt.

5 Entwicklung eines aktiv schwingungsgedämpften Werkzeuges für die Drehbearbeitung in der Schwerzerspannung

Die im Bearbeitungsprozess auftretenden Schwingungen beeinflussen die Standzeit des Werkzeuges negativ. Diese Schwingungen sind demzufolge technologisch zu vermeiden. Im Falle der Schwerzerspannung ist dies, bedingt durch die unbestimmte Rohteilgeometrie (Formabweichungen), nur bedingt möglich. Ansätze sind bereits in den Punkten 3 und 4 verfolgt und umgesetzt. Die weitere Schwingungsdämpfung über diese Maßnahmen hinaus soll in diesem Arbeitspaket durch eine aktive Gegenschwingung erreicht werden.

5.1 Konzept

Nach umfangreichen theoretischen Betrachtungen zu Möglichkeiten der Integration in ein produktionsfähiges Werkzeugkonzept wurde eine Auswahl getroffen. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen (Robustheit) wurde die Dehnungs- und Kraftmessung für die Schwingungsdetektion genutzt. Die Dehnungsmessung am Werkzeugschaft hat den Vorteil der direkten Ermittlung der Auslenkung, dieses Signal kann einfach in eine Vorgabe des Stellweges für den Aktor gewandelt werden.

5.2 Berechnungsgrundlagen CAD-Konstruktion

Ausgehend von einer ersten CAD-Konstruktion (Abbildung 18 und Abbildung 19), welche zwei Kraftsensoren, einen Aktor und ein über eine Lagerung minimal bewegliches Drehwerkzeug vorsieht, wurden zunächst die Berechnungsgrundlagen zur Auswahl der notwendigen technischen Komponenten zusammengestellt.

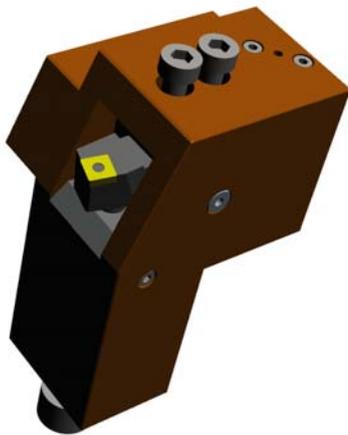


Abbildung 18: CAD-Modell des aktiv schwingungs-gedämpften Drehwerkzeuges

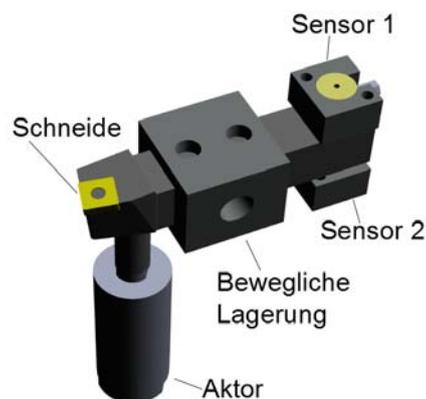


Abbildung 19: CAD-Modell Teilkomponente Sensor, Aktor, Lagerung und Schneide

Die CAD-Konstruktion liefert den freigeschnittenen Meißel mit den Längen $l_1=80\text{mm}$ und $l_2=72,7\text{mm}$ zur Lagerung sowie der angreifenden Schnittkraft F_c und der am Sensor resultierenden Kraft F_s . Nach mathematischer Berücksichtigung aller Gegebenheiten lässt sich die die Sensorlast F_s wie folgt berechnen:

$$F_s = \frac{l_1}{l_2} \cdot F_c \approx 23,7\text{kN}$$

Diese Last ist die Grundlage für die Dimensionierung des verwendeten Kraftsensors. Der Sensor sollte unter Berücksichtigung eines üblichen Sicherheitsfaktors von mindestens 1,25 einen Messbereich von etwa 30kN aufweisen. Die vom Aktor aufzubringende Gegenkraft entspricht der maximal zu erwartenden Schnittkraft mit einem Sicherheitsfaktor.

Im umfangreichen Versuchen wurde die Schnittkraft als schwingungsanregende Komponente und die Dehnung des Werkzeugschaftes gemessen. Beide Sensoren wurden nahe der Wirkstelle platziert um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Durch Spanklemmer vor der Schneide kommt es bei der Trockenbearbeitung zu einem Hitzenest, in welchem sich die Temperatur kurzfristig enorm auf bis über 600°C steigern kann. Begleitende Messungen mit einer Wärmebildkamera ergaben Temperaturen im Bereich der Wirkstelle um etwa 300°C. In diesem Temperaturbereich sind die Sensoren nicht mehr arbeitsfähig. Im Ergebnis wurde der Sensor zur Ermittlung der Schwingung durch konstruktive Änderungen so platziert,

dass er den hohen Temperaturen entzogen werden kann. Für den notwendigen Aktor wurden mehrere Varianten erstellt und verglichen. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass der ausgewählte Piezoaktor nicht zum Einsatz kommen kann. Bei den entstehenden Temperaturen wird der Aktor irreparabel beschädigt. Im Ergebnis einer Recherche konnten keine geeigneten Alternativen gefunden werden. Aktoren für den Hochtemperaturbereich weisen nicht die notwendige Blockierkraft auf oder sind von der geometrischen Ausführung nicht in das Konzept integrierbar. Auch der Einsatz eines aktiven Kühlkreislaufes wurde diskutiert, infolge der Einbau- und Umgebungsbedingungen aber als nicht praktikabel und wirtschaftlich nicht vertretbar eingestuft.

Für die Ansteuerung des Werkzeuges wurde ein Regelalgorithmus entwickelt. Da dieser nicht unter Produktionsbedingungen getestet werden konnte, wurde zur Simulation der stochastischen Zerspanungsbedingungen ein Kraftsignal generiert und die Ausgabe des Regelalgorithmus grafisch dargestellt (Abbildung 20).

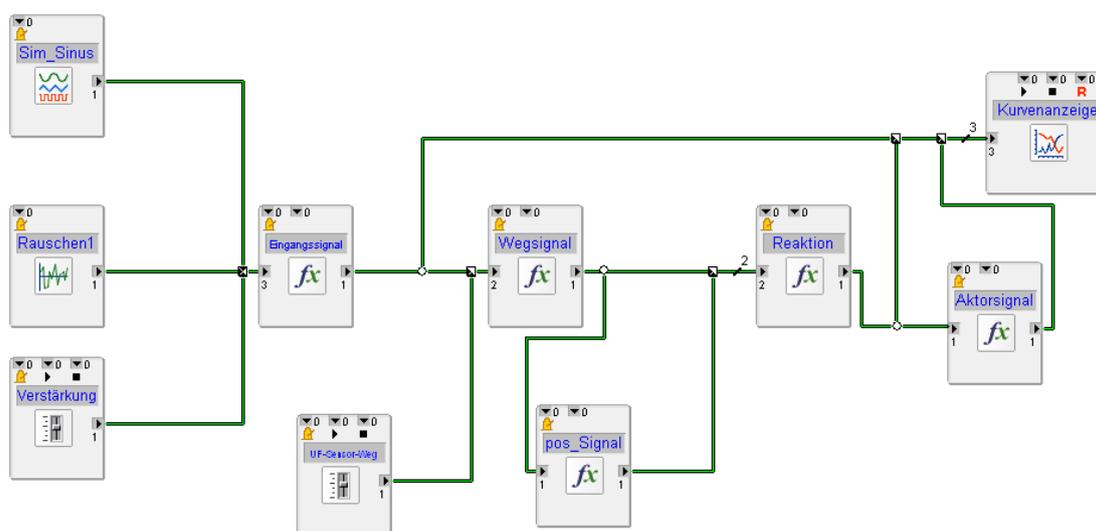


Abbildung 20: Schaltplan des Regelalgorithmus der aktiven Schwingungsdämpfung (Anregung durch simulierte Eingänge, Umsetzung in der Software DIAdem 2014)

Im Ergebnis wurde ein Konzept für ein aktiv schwingungsgedämpftes Drehwerkzeug für die Schwerzerspannung entwickelt. Die notwendigen technischen Komponenten wurden recherchiert und ausgewählt, der Regelalgorithmus wurde erstellt. Eine Umsetzung und Erprobung erfolgte nicht, da zurzeit kein Aktor marktverfügbar, welcher die technischen Anforderungen insbesondere im Bereich der thermischen Stabilität erfüllte.

6 Zusammenfassung

Im Ergebnis des Projektes liegt eine einsatzfähige Messeinrichtung zur Aufspanlagenkorrektur vor. Diese gestattet eine schnelle und präzise Ausrichtung eines Rohteiles unter Berücksichtigung der Schwerpunktlage und des Bearbeitungsradius. Ein weiteres Ergebnis ist die Entwicklung eines modularen, auf die tatsächliche Rohteilgeometrie aktiv reagierenden Werkzeuges für die Drehbearbeitung dar. In einem weiteren Punkt wurde ein Konzept für ein aktiv schwingungsgedämpftes Drehwerkzeug für die Schwerzerspannung entwickelt. Nach umfangreicher Recherche und Versuchen stellte sich die Anwendung für die Schwerzerspannung durch die entstehenden hohen Temperaturen als zum aktuellen Zeitpunkt nicht umsetzungsfähig heraus. Die notwendigen Aktoren sind thermisch

nicht stabil genug, d.h. beim Einsatz in der Umgebung werden die Aktoren irreparabel beschädigt. Für eine eventuell spätere angestrebte Umsetzung bei Verfügbarkeit entsprechender Hochtemperaturaktoren im notwendigen Kraftbereich wurde eine Konstruktion erstellt und eine Regelung entwickelt.

Literatur

- /AB-14/ Arnold, F.; Bretschneider, R.: Ansätze für die Produktivitätssteigerung bei der Zerspanung von Guss- und Schmiedekrusten. In: Nestler, A. (Hrsg.): Innovation Drehbearbeitung. Entwicklungen - Anwendungen - Trends. Vortragsband zum Fachkolloquium am 26.09.2014, Dresden: Selbstverlag TU Dresden, ISBN 978-3-86780-300-7
- /CHE-14/ Chen, L.: Messeinrichtung zur Erfassung der Rohteilkontur für die unwuchtreduzierte Ausrichtung in einer bearbeitungsoptimalen Lage. Großer Beleg, TU Dresden, 2014
- /ESC-15/ Esche, J.: Entwicklung und Einsatz eines aktiv schwingungsgedämpften Werkzeuges für die Drehbearbeitung in der Schwerzerspannung. Großer Beleg, TU Dresden, 2015
- /FOE-14/ Arnold, F.: Neuartige Werkzeugkonzepte zur Produktivitätssteigerung der robusten Schwerzerspannung. In: Nestler, A.: Forschungsergebnisbericht 2014 der Arbeitsgruppe Produktionsautomatisierung, Zerspan- und Abtragtechnik. TU Dresden, 2014, S. 26-30
- /MOD-14/ Arnold, F.; Bretschneider, R.: Entwicklung und Einsatz neuartiger Werkzeugkonzepte zur Produktivitätssteigerung der robusten Schwerzerspannung unter Berücksichtigung der Rohteilgeometrie und deren Auswirkungen. Zwischenbericht AiF-ZIM, Dresden/Gröditz, 2014
- /MOD-16/ Arnold, F.; Seyrich, A.: Entwicklung und Einsatz neuartiger Werkzeugkonzepte zur Produktivitätssteigerung der robusten Schwerzerspannung unter Berücksichtigung der Rohteilgeometrie und deren Auswirkungen. Abschlussbericht AiF-ZIM, Dresden/Gröditz, 2016
- /MUE-16/ Münch, C.: Entwicklung eines umsetzbaren Konzeptes für ein aktiv schwingungsgedämpftes Drehwerkzeug für die Schwerzerspannung. Oberseminar, TU Dresden, 2016
- /QIA-14/ Qian, J.: Werkzeug- und Technologieentwicklung für modulare aktorische Drehwerkzeuge in der Scherbearbeitung. Großer Beleg, TU Dresden, 2014