

Titel

Aktives fluidisches Dämpfungssystem für den Einsatz dünner Trennschleifscheiben in der Natursteinbearbeitung

IGF-Nr.: 18400 N

Forschungsstellen

Forschungsstelle 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe,
Remscheid (IFW)

Forschungsstelle 2: Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen,
Hannover (IFW)



Ansprechpartner beim IFW-Remscheid:

M. Sc. Dominik Lenz
02191 / 5921.123
lenz@fgw.de

Ansprechpartner bei IFW-Hannover :

M. Sc. Christian Teige
0511 / 762.18334
teige@ifw.uni-hannover.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 18400 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

Bei der Fliesen- und Plattenherstellung aus Naturstein hat sich die Trennschleifbearbeitung als wirtschaftlichstes Verfahren etabliert. Das Werkzeugverhalten beeinflusst dabei maßgeblich die resultierenden Schnittfugenweiten und die Schnittflächenqualitäten. Durch den Einsatz dünner Trennschleifscheiben in der Natursteinbearbeitung ist es möglich, den Materialverlust in der Trennfuge erheblich zu reduzieren. Eine Reduzierung der Segmentdicke z.B. von industriell üblichen 6 mm auf 4 mm führt zu einer Verminderung des Verschnitts um 33 %. Hierdurch wird deutlich, welches Materialeinsparpotenzial der Einsatz dünner Sägeblätter bietet. Wirtschaftlich ist der Einsatz dünner Blätter sehr sinnvoll, technisch jedoch sind die Herausforderungen sehr hoch. Somit besteht bei Werkzeugherstellern, bei Werkzeugmaschinenherstellern und Endanwendern großes Interesse an einer Reduzierung der Schnittfugenbreite.

Während des Trennschleifprozesses führen insbesondere die Impulse, die beim Eintritt des Werkzeugs in das Werkstück entstehen, sowie Planlauffehler zu einer dynamischen Anregung des Werkzeugblatts. Die dadurch auftretenden Schwingungen wirken sich negativ auf das Bearbeitungsergebnis aus. Neben dem Verlust an Maßhaltigkeit der Schnittfuge ergibt sich ein erhöhter Werkzeugverschleiß. Das Problem ist besonders relevant bei Werkzeugblättern mit einem hohen Durchmesser-zu-Dicken-Verhältnis, welche sehr sensitiv gegenüber axialen Schwingungen sind und die Schnittqualität verschlechtern. Weiterhin führt der Verlust an axialer Steifigkeit bei dünnen Trennschleifscheiben zum Verlaufen des Werkzeugs, wodurch die Maßhaltigkeit der Platten gefährdet und im Produktionsprozess von Platten aus Naturstein ein höheres Aufmaß genommen werden muss. Eine einfache Versteifung durch die Erhöhung der Werkzeugdicke ist bei dem Ziel, eine dünne Schnittfuge zu generieren, kontraproduktiv. Ebenso sind die Lösungsansätze produktivitätsmindernd, welche die Schnitttiefe zu stark einschränken.

Sowohl beim Dämpfen von Werkzeugschwingungen als auch bei der Reduzierung der Schnittfugenbreite durch dünne Trennschleifscheiben sind unterschiedliche Ansätze bekannt. Dabei werden häufig erhöhte Anforderungen an die Präzision von Maschinen-, Werkzeug- und Rohblockbeschaffenheit oder an die Schnittgeschwindigkeit gestellt. Dies bedingt allerdings zusätzliche Arbeitsschritte oder Änderungen an der Maschinenkonstruktion. Aus diesen Gründen haben sich dünne Stammblätter bisher kaum durchgesetzt. Bekannte Lösungen aus der Holzindustrie nutzen erfolgreich externe Sägeblattführungen, um dünne Sägeblätter einzusetzen und die auftretenden Schwingungen passiv zu dämpfen. Die Sägeblattführungen sorgen für eine Kompensation des Steifigkeitsverlusts. Vergleichbare Führungs- bzw. Dämpfungssysteme für große Trennschleifscheiben in der Steinbearbeitung sind nicht bekannt. Als innovative Lösung wird das in diesem Forschungsvorhaben zu entwickelnde, aktive fluidische Dämpfungssystem angesehen. Der Ansatz ist weder in der Literatur noch in der praktischen Umsetzung bekannt.

Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die aktive Bedämpfung von Schwingungen beim Einsatz dünner Trennschleifscheiben in der Natursteinbearbeitung durch Anwendung eines neuartigen fluidischen Dämpfungssystems (vgl. Abbildung 1). Das Dämpfungssystem kompensiert die Nachteile dünner Trennschleifscheiben, wie beispielsweise den Verlust an axialer Steifigkeit.

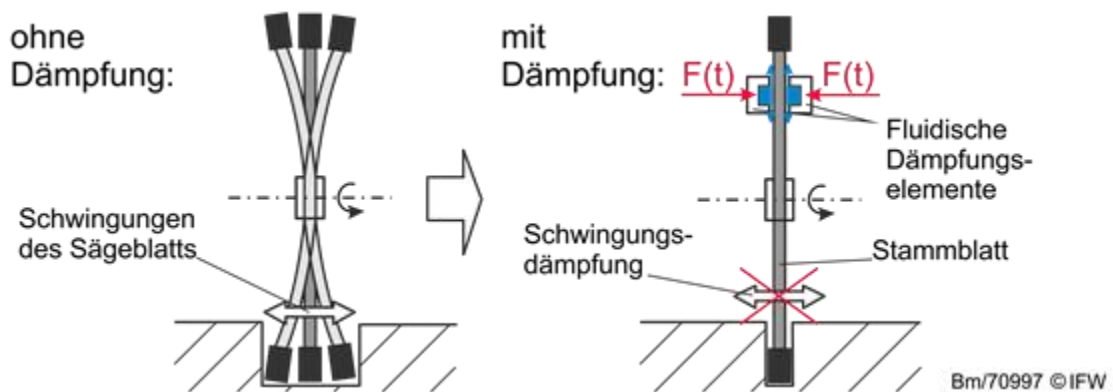


Bild 1 Dämpfung der Werkzeugenschwingungen

Das übergeordnete Hauptziel ließ sich in sechs Teilziele untergliedern.

1. Erstes Teilziel war die Definition von Referenzprozessen, anhand derer eine Analyse und Bewertung der Neuentwicklung erfolgte. Dabei lag der Fokus auf der Identifikation der Dynamik von Referenzsägeblättern als Grundlage für die Auslegung und Bewertung des Dämpfungssystems.
2. Das zweite Teilziel waren experimentelle Untersuchungen an handelsüblichen Gesteinssägen, um das Schwingungsverhalten von Trennschleifscheiben zu analysieren. Angestrebt wurden dabei grundlegende Erkenntnisse, die im weiteren Verlauf des Projekts zur Parametrierung und zum Abgleich mit einer FE-Simulation genutzt wurden.
3. Das dritte Teilziel war die FE-Simulation zur Auslegung und Optimierung des aktiven fluidischen Dämpfungssystems.
4. Das vierte Teilziel war die Konstruktion und der Aufbau des Dämpfungssystems. Ein Fokus hierbei war der mögliche Einsatz des Systems in Multiblattanlagen.
5. Das fünfte Teilziel waren unterschiedliche Regelungsstrategien, die in einer gekoppelten Simulation parallel zur Konstruktion erarbeitet, optimiert und verglichen wurden.
6. Das abschließende sechste Teilziel war die Erforschung des realisierten Dämpfungssystems im realen Zerspanprozess. Diese ermöglichte eine abschließende Validierung im Vergleich mit konventionellen, dickeren Trennschleifscheiben.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Der Lösungsweg zur Erreichung des Projektziels ist in Bild 2 dargestellt. Zunächst wurden in enger Abstimmung mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses die technischen Spezifikationen erarbeitet, um die Ziele und Anforderungen an das zu erforschende Dämpfungssystem zu definieren. Referenzwerkzeuge und Werkstücke für die Untersuchungen wurden festgelegt. Das Erreichen des Forschungsziels einer möglichst schmalen Schnittfuge erforderte eine Optimierung von Konstruktion und Betrieb des Dämpfungssystems. Zur Parametrierung und Verifizierung eines FE-Modells wurden in AP 2 messtechnische Voruntersuchungen an einer Brückensäge durchgeführt, um das statische und dynamische Verhalten von Trennschleifscheiben zu erforschen. Die experimentellen Voruntersuchungen lieferten die Randbedingungen und Parameter für ein erstelltes FE-Modell in AP3. Anhand des Modells erfolgte die Optimierung der Aktorposition und Anzahl sowie die simulative Auslegung der Regelung. Die Ergebnisse des FE-Modells stellten die Grundlage für die Auslegung, Konstruktion und Fertigung des Dämpfungssystems in AP 4 dar. Im Anschluss an die Montage wurde das neu konstruierte Dämpfungssystem in praktischen Untersuchungen erforscht und hinsichtlich der Erreichung des Forschungsziels bewertet.

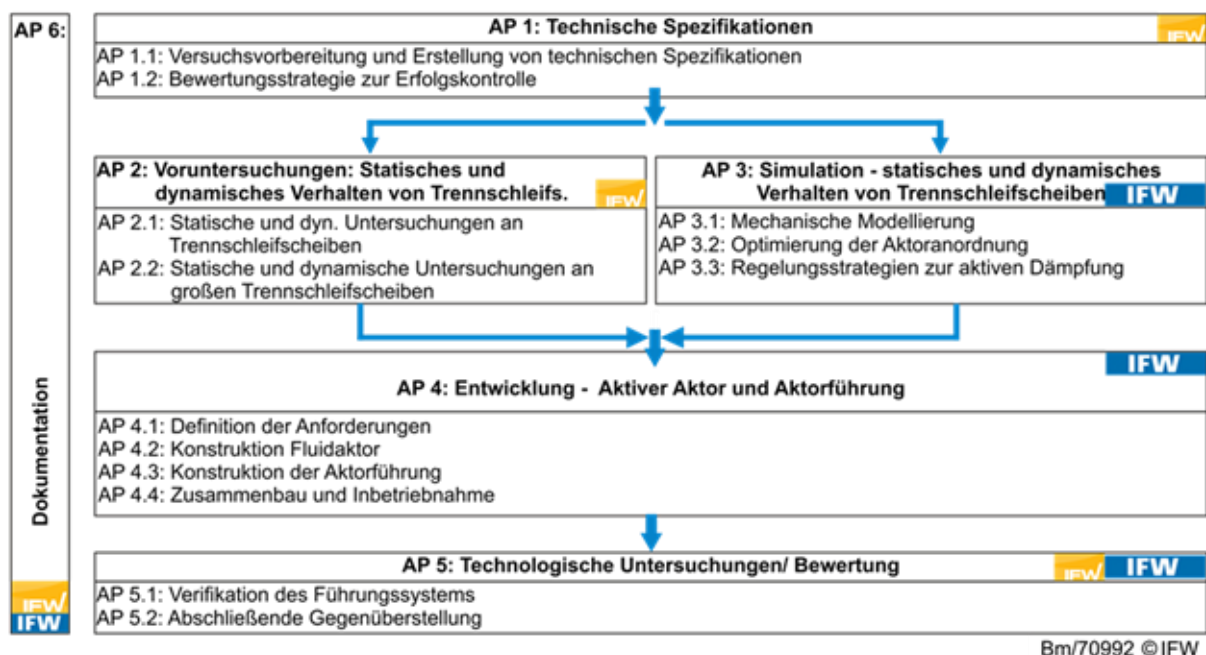


Bild 2: Arbeitsprogramm zur Erreichung des Projektziels

Die Ergebnisse der umfassenden Untersuchungen wurden analysiert und mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses diskutiert. Es folgten Empfehlungen für KMU zur Umsetzung der theoretischen und praktischen Forschungsergebnisse in ein Produkt.

Zur messtechnischen Erfassung des statischen und des dynamischen Verhaltens der zu untersuchenden Trennschleifscheiben wurde für die technologischen Versuche ein Scanning Laser Doppler Vibrometer (S-LDV) eingesetzt, mit welchem in den ersten Versuchen des Vorhabens die Schwingungseigenschaften der eingesetzten

Trennschleifscheiben erfasst worden sind. In Kombination mit einer optischen Einheit zur Mitführung des Messgitters wurde das Schwingungsverhalten der Trennschleifscheibe aus der Sicht des mitrotierenden Beobachters analysieren. Durch das Messgitter konnten Geschwindigkeiten entlang der gesamten Trennschleifscheibe erfasst werden, die integriert die auftretenden Schwingungsamplituden lieferten. Die Adaption an die Versuchsbrückensäge Hensel Gigant ist in Bild 3 dargestellt.



Bild 3: Eingesetzte Messtechnik

Mittels dieser Messtechnik konnten Schwingungs- und Einsatzverhalten der Referenzwerkzeuge bestimmt und ausgewertet werden, so dass nach Abschluss der Abreiten genaue Kenntnisse über das Schwingverhalten der Referenzwerkzeuge im Stillstand, im Leerlauf und im Betrieb zur Verfügung standen. Zusätzlich wurde mit dem Messsystem die Eignung des geplanten Wirbelstromsensorkonzepts zur Abstandmessung verifiziert.

Auf Grundlage dieser ermittelten Daten wurde im Anschluss ein Simulationsmodell zur Berechnung der dynamischen axialen Verformung der Trennschleifscheiben an beliebigen Positionen erstellt und validiert. Zur Erarbeitung der optimalen Wirkungsweise des zu entwickelnden Dämpfungssystems wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, das die Eigenfrequenzen, Eigenmoden und Steifigkeiten der zu untersuchenden Trennschleifscheiben unter Wirkung verschiedener Lastkollektive ermittelt. Zusätzlich wurde ein genetischer Optimierungsalgorithmus zur Optimierung der Aktorpositionen erstellt. Dabei wurden optimale Positionen von passiv und aktiv wirkenden Aktoren zur Maximierung des Dämpfungseffektes ermittelt und auf Funktionalität hin untersucht.

In einem nächsten Schritt wurde ein volumenstromgeregelter Aktor entwickelt. Der Druck sowie der Volumenstrom im hydraulischen Kreislauf zwischen den Ventilen und den hydrostatischen Taschen wurden dabei mithilfe von Druck- und Volumenstromsensoren gemessen. Der von den Servoventilen kommende Volumenstrom gelangt zu den hydrostatischen Taschen, wo anhand des

Volumenstroms eine Aktorkraft generiert wird. Zur Realisierung von positiven und negativen Aktorkräften in y-Richtung besteht der hydrostatische Aktor aus zwei gegenüberliegenden hydrostatischen Taschen. Das von den Servoventilen kommende Fluid tritt jeweils durch einen engen Spalt zwischen der hydrostatischen Tasche und der Trennschleifscheibe. Der Spalt stellt einen Widerstand für das strömende Fluid dar und bewirkt einen Druckaufbau zwischen Trennschleifscheibe und hydraulischem Aktor und damit die Erzeugung einer Aktorkraft F_A . Zur Einstellung einer hohen Aktorkraft ist es notwendig, eine geringe Spaltweite zu realisieren, jedoch gleichzeitig ungewollte Verformungen der Trennschleifscheibe durch eine Zwangsführung zu vermeiden.

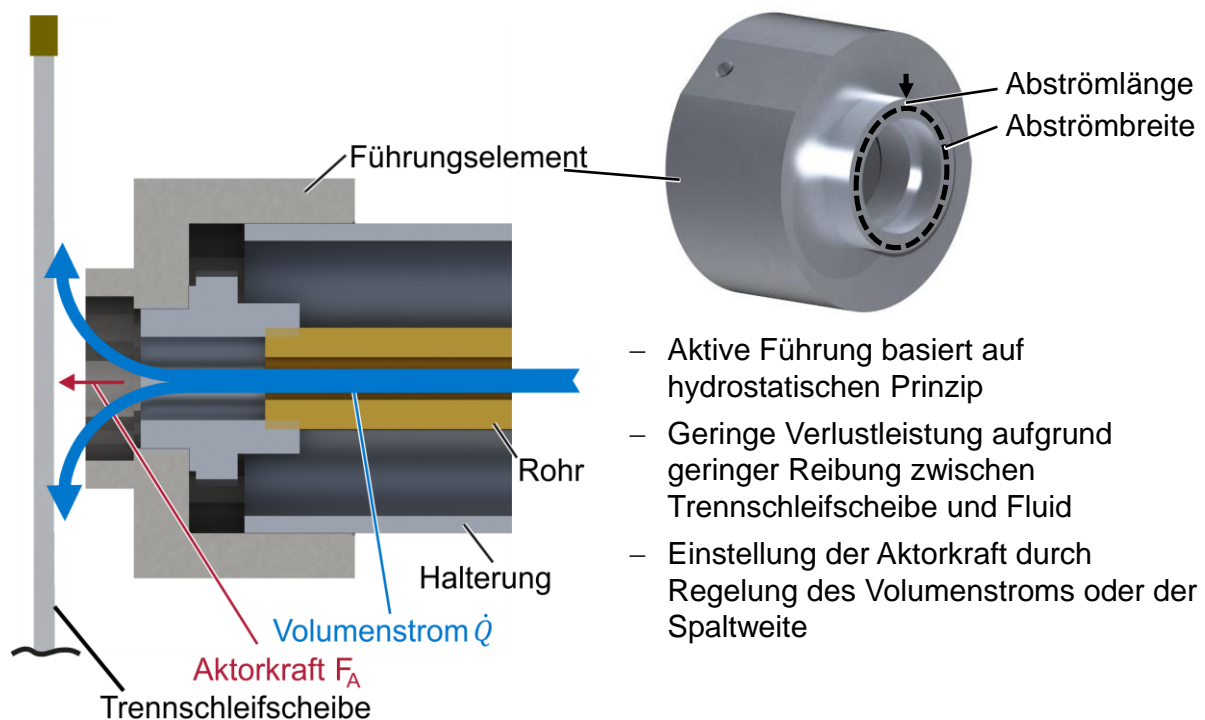


Bild 4: Konstruktive Umsetzung Volumenstrom geregelter Aktor

Die anschließenden Untersuchungen zeigten, dass ventilgesteuerte Fluidaktoren in der Lage sind, durch Volumenstromvariation axiale Verformungen der Trennschleifscheibe hervorzurufen. Die realisierbare maximale axiale Auslenkung der Trennschleifscheibe war jedoch nur gering. Mithilfe des Simulationsmodells konnte festgestellt werden, dass unter Verwendung einer maximal realisierbaren Aktorauslenkung annähernd kein Kompensationseffekt realisierbar ist. Hieraus resultiert dann eine ungünstige Zwangsführung der Trennschleifscheibe. Dadurch bilden sich modifizierte Eigenformen, die über Schwingungsknoten im Bereich des Aktors verfügen und somit eine Schwingungskompensation verhindern. Daher wurde zur Umsetzung der Kompensation des axialen Schnittverlaufes von Trennschleifscheiben ein neues Aktorkonzept entwickelt, mit dem sich eine deutlich höhere Auslenkung realisieren ließ. Durch die Einstellung eines höheren Abstands zwischen hydrostatischer Tasche und Trennschleifscheibe wird eine Zwangsführung der Trennschleifscheibe vermieden. Bei diesem Konzept handelte es sich um ein weggeregelteres System.

Zur Realisierung der axialen Verschiebung der hydrostatischen Tasche wurden 2 Elektromagnete verwendet, die an einer Anschlussplatte aus Aluminium befestigt sind (Abbildung 5). Die Ankerplatte ist fest mit der Aktorführung verbunden. Der Magnetspalt wurde je Magnet über einem Wirbelstromsensor erfasst. Die hydrostatische Tasche sowie die hydraulischen Anschlüsse sind fest mit der Ankerplatte verbunden. Daher bewirkt eine Verschiebung der Ankerplatte eine Verschiebung der hydrostatischen Tasche. Mithilfe der Elektromagneten können variable Kräfte in positive y-Richtung realisiert werden.

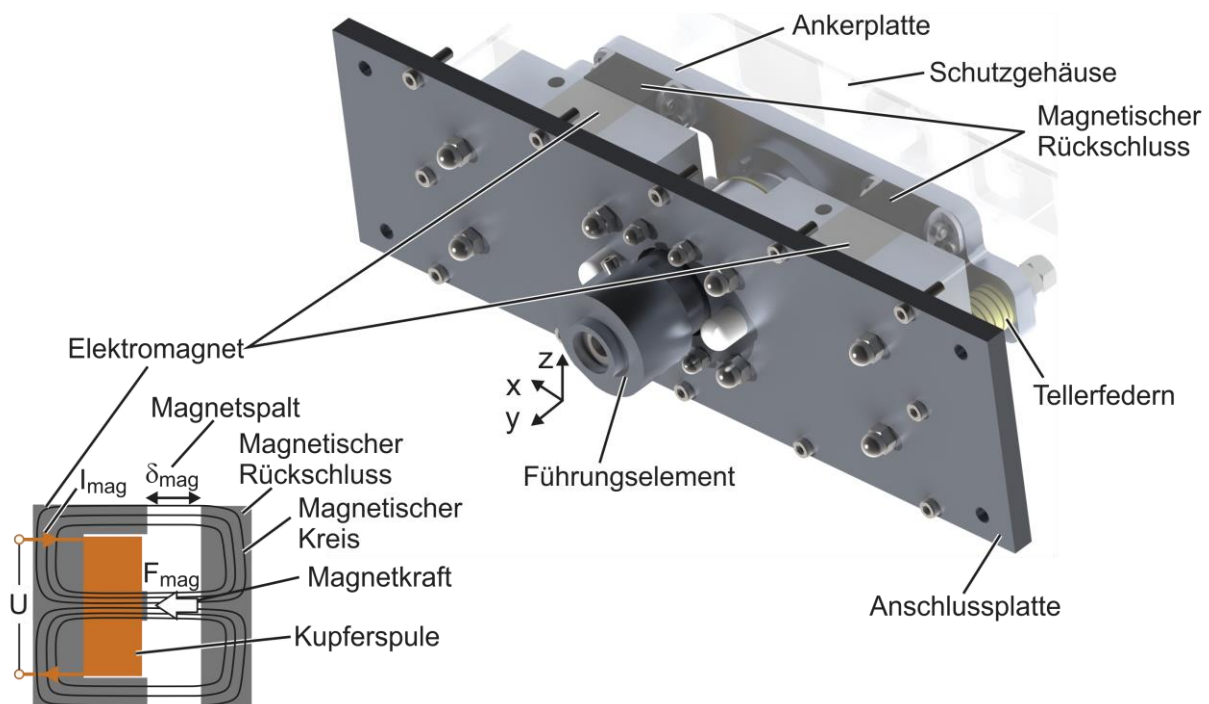


Bild 5: Konstruktive Umsetzung Wegeregelter Aktor

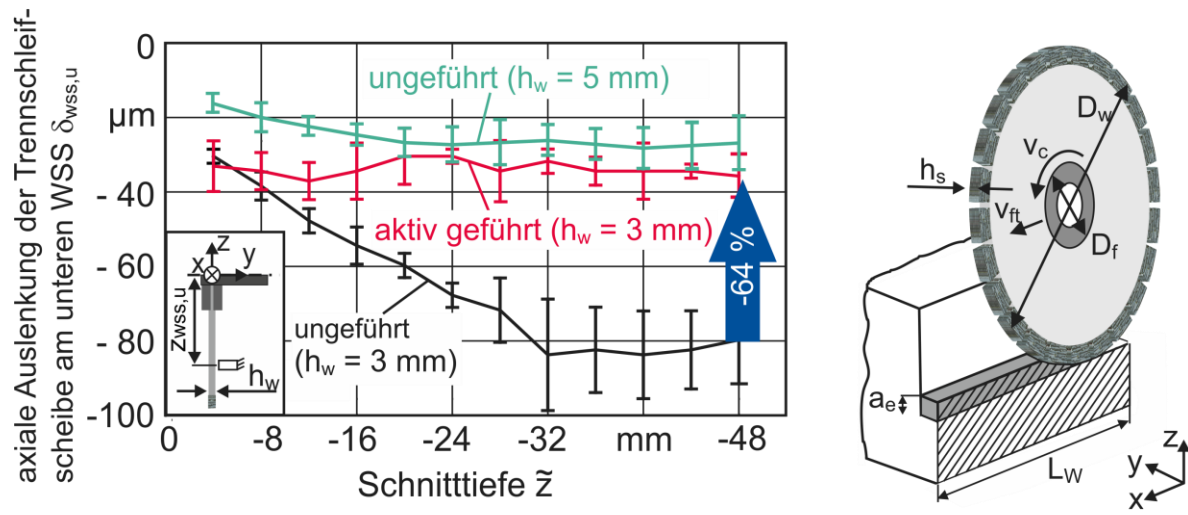
Zusätzlich zu den eigentlichen Aktoren wurde ein Regelkreis zur Regelung der axialen Auslenkung der Trennschleifscheibe durch den Aktor ausgelegt und in die Steuerung implementiert. Ein schnittgeschwindigkeitsabhängiges Übertragungsverhalten zwischen axialer Auslenkung der Trennschleifscheibe am oberen und unteren Wirbelstromsensor wurde erarbeitet.

Abschließend wurde das entwickelte System technologischer Untersuchungen unterzogen, so dass ein Nachweis der Kompensationswirkung der aktiven Führung auf den Schnittverlauf unter Anwendung unterkritischer und überkritischer Schnittgeschwindigkeiten erbracht werden konnte. Dabei wurden vergleichende Schnittuntersuchungen einer ungeführten und einer geführten Trennschleifscheibe mit einer Stammblattdicke von $h_w = 3 \text{ mm}$ durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zusätzlich mit den Ergebnissen der Untersuchungen an einer ungeführten Trennschleifscheibe der Stammblattdicke $h_w = 5 \text{ mm}$ verglichen.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer dieser Untersuchungen. Deutlich erkennt man, dass mit der dünneren Schleifscheibe in einem ungeführten Prozess

hohe axiale Auslenkungen auftreten. Wird der Prozess aber mittels des entwickelten Führungssystems unterstützt, werden axiale Auslenkungen erreicht die im Bereich derer mit dickeren Trennschleifscheiben liegen. Somit lassen sich, aufgrund der geringeren Segmentbreite der dünneren Schleifscheibe, auch kleinere Schnittfugen erzeugen.

Das Führungssystem leistet für die Trennschleifscheibe mit $h_w = 3$ mm im unterkritischen Bereich eine Reduktion 64 %, im Bereich der kritischen Drehzahlen sind dies noch 12 %.



Parameter

Schnittgeschwindigkeit	$v_c = 50$ m/s	Werkzeugdurchmesser	$D_w = 1000$ mm
Vorschubgeschwindigkeit	$v_{ft} = 2000$ mm/min	Stammblattbreite	$h_w = 3$ mm
Einzelschnitttiefe	$a_e = 4$ mm	z-Position WSS unten	$z_{WSS,u} = -340$ mm
Segmentbreite	$h_s = 4; 6$ mm	Länge des Werkstücks	$L_w = 200$ mm
Werkstoff Werkstück	Marmor		

Bild 6: Einfluss des Aktors auf die axiale Auslenkung der Trennschleifscheibe

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen ist, dass ein aktiv geführtes dünnes Stammbblatt eine gleiche Fertigungsgenauigkeit wie Referenzscheibe mit $u_{WSS,max} < 35$ μ m erreicht.

Zusammenfassung

Die Dicke der Trennschleifscheibe beim Trennschleifen von Naturstein ist maßgeblich für den auftretenden Schnittverlust verantwortlich. Die Reduktion der Schnittfugenbreite durch den Einsatz dünnerer Trennschleifscheiben verringert den Verschnitt und erhöht den Anteil an nutzbaren Natursteinprodukten pro Rohblock. Die Anwendung dünner Trennschleifscheiben führt jedoch während des Zerspanprozesses zu einem verstärkten Verlaufen der Trennschleifscheibe, wodurch Parallelitätsfehler der Schnittfuge entstehen. Das Ziel des Forschungsvorhabens war die aktive Kompensation des Schnittverlaufes beim Einsatz dünner Trennschleifscheiben in der Natursteinbearbeitung durch Anwendung eines

neuartigen fluidischen Dämpfungssystem. Für die Kompensation wurden die statische Korrektur der axialen Auslenkung der Trennschleifscheibe sowie die Dämpfung der Trennschleifscheibenschwingung untersucht. In dem abgeschlossenen Forschungsprojekt wurden grundlegende Erkenntnisse über das statische und dynamische Verhalten von Trennschleifscheiben unter Beeinflussung eines fluidischen Führungssystems erarbeitet. Auf Grundlage experimenteller Untersuchungen wurden FE-Modelle parametrisiert, die einerseits den Aufbau des grundlegenden Verständnisses für das Systemverhalten und andererseits durch eine Kopplung mit der Programmierumgebung Matlab die numerische Optimierung der Aktorgröße, -anordnung und -anzahl ermöglichten. Weiterhin wurden unterschiedliche Reglerstrukturen und Regelansätze während des Konstruktionsprozesses untersucht. Kenntnisse über die Auswirkungen der Reglerstrukturen auf Dämpfung und Steifigkeit des Gesamtsystems insbesondere im rotierenden Betrieb wurden erlangt. Die Konstruktion des Führungssystems erfolgte auf Basis der zuvor gesammelten Daten. Nach Abschluss des Projekts steht nun ein funktionsfähiges Demonstratorsystem zum aktiven Führen bestehend aus Aktor und Aktorführung für große Trennschleifscheiben zur Verfügung. Auslegungsmethoden für die Konstruktion und die Regelung des Systems wurden erforscht. Das simulativ optimierte System wurde zusätzlich in praktischen Untersuchungen validiert. Mithilfe des aktiven Führungssystems konnte der Schnittverlauf der dünnen Trennschleifscheibe von $\Delta u_1 = 110 \mu\text{m}$ um 64% auf $\Delta u_2 = 40 \mu\text{m}$ reduziert werden. Dadurch konnte die Dicke der Trennschleifscheibe von 5 mm auf 3 mm bei gleichbleibender Prozessgenauigkeit reduziert werden. Durch die Steigerung der Fertigungsgenauigkeit bei Anwendung der dünnen Trennschleifscheibe, konnte der Verschnitt an Naturstein um 33% eines einzelnen Schnitts reduziert werden.

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.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Dominik Lenz unter 02191 5921.123.