

Ch. Pelshenke, B. Denkena, J. Bockhorst, E. Reithmeier, T. Fahlbusch, M. Rahlves

Schnittverlauf beim Trennschleifen von Naturstein

Teil 1

■ Platten und Fliesen aus Naturstein werden heute zumeist mit Hilfe von diamantbestückten Kreissägeblättern gefertigt. Auf so genannten Blockcuttern (Multiblattsägen) kommen teilweise mehr als 80 Sägeblätter gleichzeitig in Eingriff. Kreissägeblätter liefern in kurzen Taktzeiten Trennschnitte hoher Produktivität. Nachteilig sind die sich einstellenden Schnittfugenweiten und häufig unzureichende Schnittflächenqualitäten. Vertikales und horizontales Trennschleifen sowie das Kalibrieren und Polieren stellen die Hauptbestandteile der Fertigungskette bei der Platten- und Fliesenfertigung dar. Dabei verursacht der Trennschleifprozess etwa 60 % der Fertigungskosten.

Problemstellung und Ziele

Ein Großteil der Maßnahmen und Ansätze, den Trennschleifprozess wirtschaftlicher zu gestalten, scheitert am Auftreten von Schnittverlauf. Untersuchungen mit extrem dünnen Sägeblättern sowie zum Tiefschleifen von Granit belegen, dass diese Prozesse grundsätzlich mög-

lich, jedoch aufgrund des dabei entstehenden Schnittverlaufs nicht wirtschaftlich umsetzbar sind. Forschungsziel des im Folgenden dargestellten Projektes war es, die wichtigsten Einflussparameter, die zur Entstehung von Schnittverlauf beitragen, zu ermitteln. Durch die Minimierung des Einflusses der Parameter, die zu hohen Axialkräften auf das Werkzeug und somit zu Schnittverlauf führen, ist es möglich, zum einen die Werkzeugdicke zu reduzieren oder zum anderen bei unveränderten Werkzeugabmessungen das Zeitspannvolumen zu erhöhen. Auf der Grundlage einer zu Beginn des Projekts durchgeführten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) wurden Werkzeuge (Stammbblätter) mit definierten Toleranzen hinsichtlich der Planlaufabweichung und der Vorspannung der Werkzeuge gefertigt. Für diese Stammbblätter wurden die Eigenfrequenzen, die Dämpfung, die Eigenformen, der axiale Planlauf und die Steifigkeit bestimmt. Hinsichtlich der Messtechnik wurde ein Messverfahren (Derotator mit Laser-Doppler Vibrometer, LDV) entwickelt, das die Verformungen von Stammbblättern flächenhaft visualisiert und quantifiziert. Dazu wurde der am IMR bereits im Einsatz befindliche Derotator mit einem LDV kombiniert und an die beschriebenen Messanforderungen angepasst. Damit ist es möglich, einen Kreisauschnitt über eine gesamte Rotati-

on zu betrachten und somit mittels Laserdopplervibrometer das Verformungsverhalten zu analysieren. Im Rahmen einer dynamischen Prüfung wurde neben dem quasi-statischen Schwingungsverhalten zusätzlich das dynamische Verhalten des Werkzeugs unter Rotation bestimmt. Um einen Eindruck zu erhalten, inwieweit das Werkzeugverhalten auf dem Prüfstand mit dem Einsatzverhalten auf der Maschine vergleichbar ist, wurde die dynamische Prüfung auf der Maschine wiederholt. Dabei kamen neben berührungslosen, induktiven Messverfahren wiederum der Derotator und das LDV zum Einsatz. In anschließenden Trennschleifuntersuchungen wurden die wichtigsten Einflussparameter, die zur Entstehung von Schnittverlauf beitragen, ermittelt.

Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse

Zu Beginn der Untersuchungen wurde eine systematische Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) erstellt. Im Rahmen dieser Analyse wurde zunächst eine Vielzahl an möglichen Einflussfaktoren aus den Kategorien Maschine, Werkzeug, Gesteinsmaterial und Prozess berücksichtigt, welche zum Entstehen von Schnittverlauf beitragen können. Dabei wurden insgesamt 53 denkbare Fehlerquellen und deren mögliche Fehlerfolgen zusammengetragen und in die ent-

Dr. Christian Pelshenke

wissenschaftlicher Mitarbeiter und stellv. Leiter der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW), Remscheid

Prof. Dr.-Ing. B. Denkena

Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), Leibniz Universität Hannover

Dipl.-Ing. J. Bockhorst

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

Dr.-Ing. Thomas Fahlbusch

Leiter der Arbeitsgruppe Optosensorik am Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

Dipl.-Phys. Maik Rahlves

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

sprechenden Haupteinflussgruppen eingeordnet. Zur Feststellung der Bedeutung der einzelnen Einflussgrößen wurden diese mit so genannten Risikoprioritätszahlen (RPZ) belegt. Dieser Kennwert wird aus dem Produkt aus der Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Fehlers (A), der Bedeutung des Fehlers (B) und der Wahrscheinlichkeit der rechtzeitigen Entdeckung des Fehlers (E) bestimmt. Die Kennzahlen A, B und E können mit Kennziffern zwischen 1 und 10 belegt werden (Bild 1). Aus der Höhe des Produktergebnisses wurde anschließend die Bedeutung der jeweiligen Einflussgröße bestimmt. Durch die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse wurden besonders die Ausrichtungen der Maschinenkomponenten zueinander, eine mangelnde Prozessbeobachtung, eine unzureichende Biegesteifigkeit und der Flanscheinfluss als Haupteinflüsse für Schnittverlauf eruiert. Insbesondere die Ausrichtung der Maschinenkomponenten zueinander, ein schräger Anschnitt und daraus resultierende hohe Axialkräfte auf das Trennwerkzeug und der Flanscheinfluss haben sich im Forschungsvorhaben als relevante Kenngrößen herauskristallisiert (Tabelle 1).

Bild 2 zeigt in einem Ishikawa-Diagramm die möglichen Ursachen für Schnittverlauf. Somit ermöglichte das Ergebnis der Analyse eine Bewertung der einzelnen Systemkomponenten und mit den anschließend durchgeführten Untersuchungen ist es möglich, die dargestellte Einordnung zu untermauern. Einflussgrößen wie beispielsweise „Fehler in der Maschinensteuerung“ und deren Relevanz sind so individuell, dass sie nicht all-

	Auftretenswahrscheinlichkeit (A)	Bedeutung (B)	Entdeckung (E)
1	Unwahrscheinlich	Kaum wahrnehmbar	Hoch
2-3	Sehr gering	Unbedeutend	Mäßig
4-6	Gering	Mäßig kritisch	Gering
7-8	Mäßig	Schwer kritisch	Sehr gering
9-10	Hoch	Außerst kritisch	Unwahrscheinlich

Bild 1
Kennzahlen zur FMEA

Fehlerquelle	Mögliche Fehlerfolge	RPZ
Ausrichtung der Maschinenkomponenten zueinander	Dejustage	353
mangelnde Prozessbeobachtung	Fehlerentdeckung reduziert	349
Biegesteifigkeit	Erhöhung der Blattauslenkung	344
Flansch (Größe, Passform, Anzugsmoment)	Erhöhung der Blattauslenkung, Reduzierung der Gesamtschnitttiefe	306
Druckfestigkeit	Veränderung Verschleiß und Prozesskräfte	306

gemeingütig innerhalb dieses Forschungsvorhabens behandelt werden konnten.

Werkzeugcharakterisierung und induktive Messungen

I. Werkzeugcharakterisierung

Innerhalb des Forschungsvorhabens kamen im Wesentlichen drei unterschiedliche Werkzeugabmessungen zum Einsatz (Tabelle 2). Den statischen und dynamischen Messungen wurden dabei vier Stammbblätter nach den unterschiedlichsten Fertigungsschritten entlang der Wertschöpfungskette zugeführt. Zur statischen Werkzeugcharakterisierung wurden, neben geometrischen und metallographischen Kennwerten, auch jeweils der Planlauf, die Schwingungsamplituden, das Abkling-

verhalten, die Dämpfung, die Eigenfrequenzlagen und die Steifigkeit am Laborprüfstand am IFW in Remscheid bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW) aufgenommen. Dazu wurden die Versuchswerkzeuge auf eine laufgenaue Welle mit 30 mm Außendurchmesser und weniger als $\pm 0,005$ mm Rundlaufabweichung aufgebracht. An dem schwingungsgedämpft aufgestellten Gestell befindet sich eine Halterung, an der induktive Wegaufnehmer derart berührungslos an das Versuchswerkzeug herangeführt werden können um nach einer entsprechenden Kalibrierung die axialen Schwingungen zu detektieren und diese dann entsprechend weiter zu verarbeiten und zu analysieren. Die impulsförmige Anregung der Versuchswerkzeuge erfolgte definiert über eine Stahlkugel an einem Fadenpendel (Bild 3).

Tabelle 1
Die höchsten Risikoprioritätszahlen aus der FMEA

A	985 mm x 5,0 mm x 100 mm	Z = 66	1.2003 (75Cr1)	41 HRC
B	615 mm x 3,4 mm x 100 mm	Z = 42	1.2003 (75Cr1)	44 - 48 HRC
C, D	983 mm x 3,5 mm x 100 mm	Z = 66	1.2003 (75Cr1)	44 HRC

Tabelle 2
Untersuchte Werkzeugabmessungen

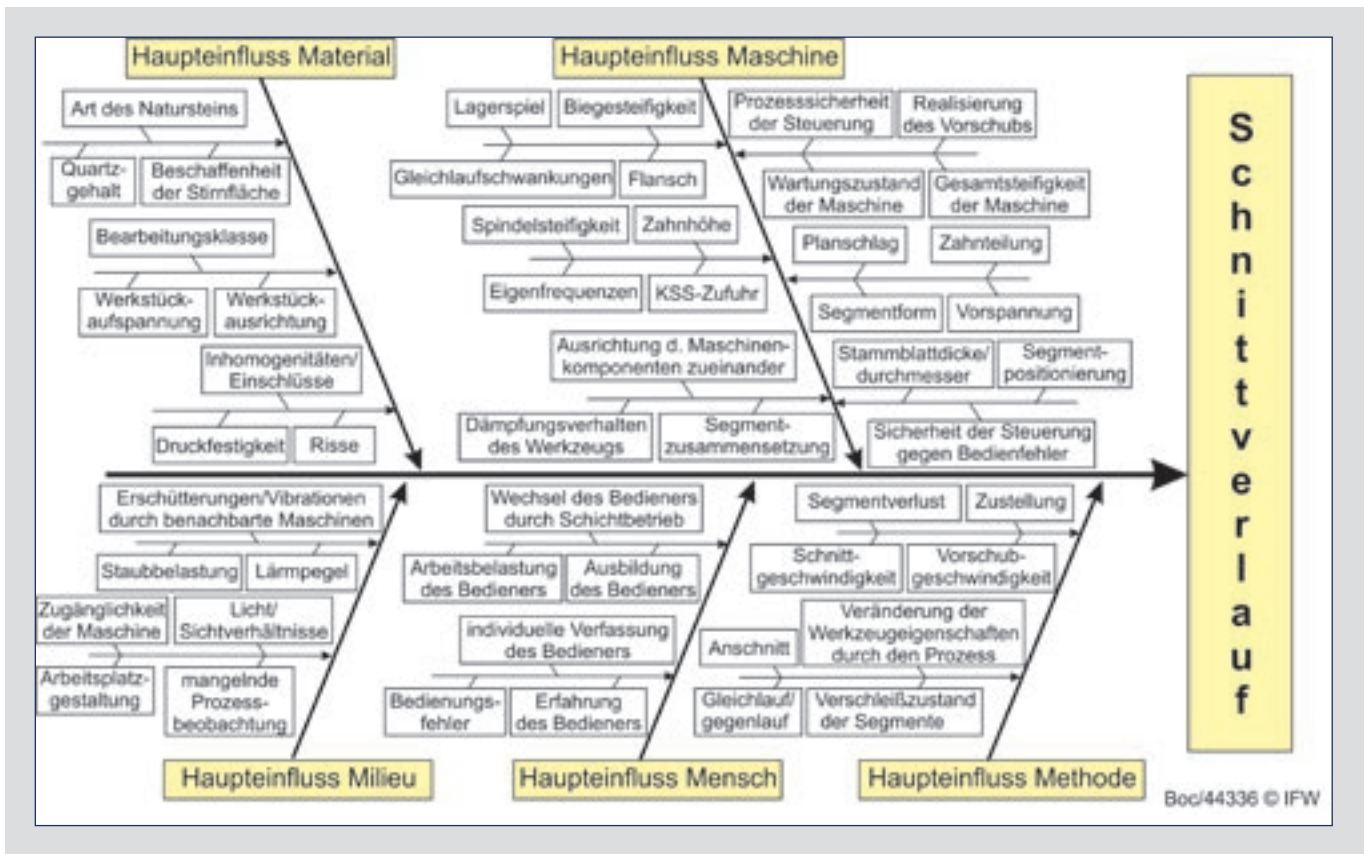


Bild 2
FMEA-Ursachen für Schnittverlauf, Ishikawa-Diagramm

Bild 4 gibt exemplarisch aufgenommene und verarbeitete Messdaten wieder. Dabei findet sich in der Abbildung links die Darstellung des Planlaufs, in der Mitte die zeitliche Darstellung des Abklingverhaltens nach einmaliger, impulsförmiger Anregung und rechts die Darstellung der Eigenfrequenzen nach FFT des Abklingensignals. Aus den jeweils aufgenommenen Abklingensignalen wurde die jewei-

lige Dämpfung bestimmt. Hierzu wurde die Zeit bestimmt, in der das Messsignal auf 10% seiner Ausgangsamplitude abgeklungen ist.

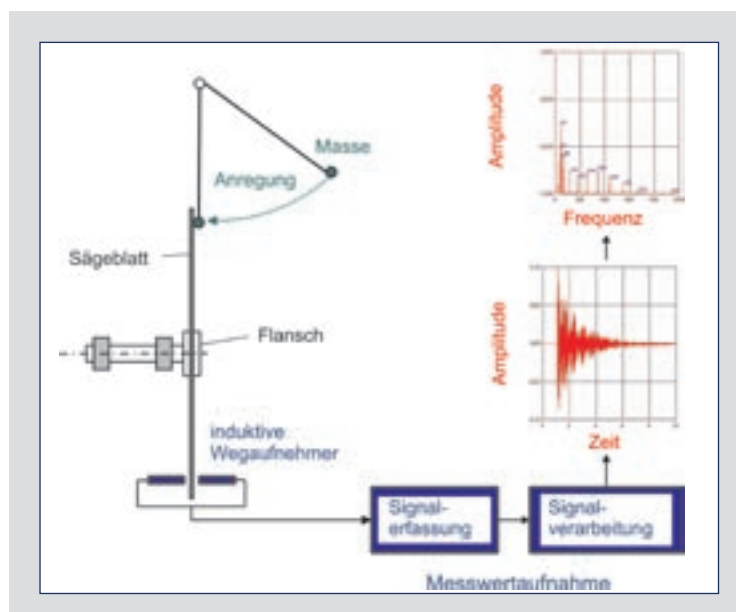
Die Bestimmungen der Biegesteifigkeiten erfolgten ebenfalls auf dem Sägenprüfstand. Hierzu wurde das jeweilige Versuchswerkzeug auf die Welle gespannt und mit einer Gewichtskraft von 21,37 N axial am äußeren, radi-

alen Rand nahe der Segmentstege ausgelenkt. Die resultierende Auslenkung wurde über eine Messuhr an der gleichen Stelle rückseitig aufgenommen. Die hier aufgenommene Biegesteifigkeit definiert sich dann durch den Quotienten aus der Biegekraft [N] und der daraus resultierenden Durchbiegung [mm]. Aufgrund der konstanten Biegekraft im Zähler und des aufgenommenen Messwertes der Durchbiegung im Nenner spiegelt ein hoher Wert der Biegesteifigkeit eine geringe Durchbiegung wider.

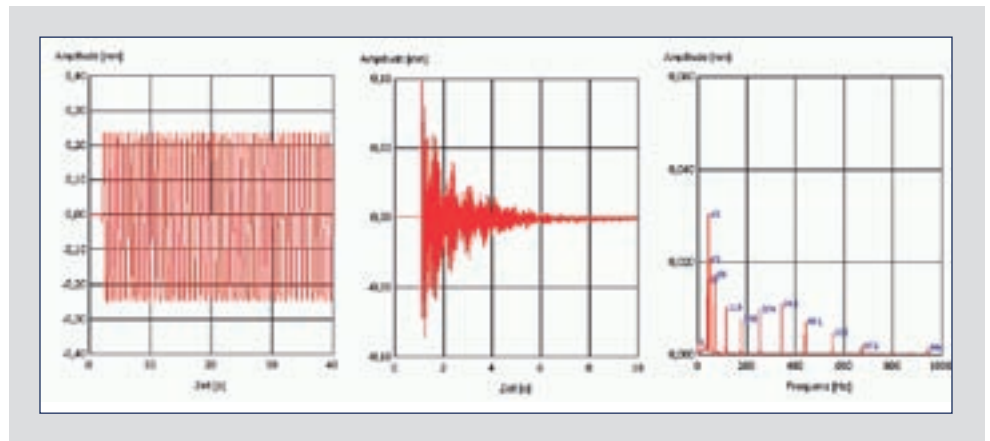
II. Induktive Messungen am Laborversuchsstand

Um die Einflüsse des Flanschdurchmessers, des Flanschzugmoments, bzw. der Vorspannkraft über das Flanschsystem, und der Flanschorientierung auf die Biegesteifigkeit, die Planlaufabweichung, das Abkling- bzw. Dämpfungsverhalten und die Eigenfrequenzlagen herauszustellen, wurden an den unbestückten Werkzeugen (Ronden) unter einer multiplen Pa-

Bild 3
Versuchsprüfstand Remscheid



rametervariation die genannten Kenngrößen ermittelt. Dabei wurden in der Regel mindestens drei unterschiedliche Flanschanzugmomente und sieben unterschiedliche Flanschorientierungen bezogen auf das Versuchswerkzeug gewählt. Zudem wurden bei der Versuchsreihe „A“ und „B“ die Flanschdurchmesser variiert. Nach den Messungen wurden die Ronden mit Diamantschleifsegmenten bestückt und die ermittelten Kennwerte mit einem Flanschdurchmesser, Flanschanzugmoment und -orientierung erneut ermittelt (bestückt). Danach wurden die Versuchswerkzeuge einsatzfertig gespannt und den Messroutinen wieder zugeführt (gespannt). Bei den Messungen an den gespannten Trennschleifscheiben wurden wieder jeweils der Flanschdurchmesser und das Flanschanzugmoment variiert. Abgeschlossen wurden die induktiven Messungen auf der Versuchsmaschine mit einem Flanschdurchmesser, einem un-



definierten Anzugsmoment, einer definierten Flanschorientierung und unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten v_c [m/s]. Eine Zusammenfassung der Anzahl der durchgeführten Messungen gibt *Tabelle 3* wieder.

Einflüsse auf die Biegesteifheit

In *Bild 5* ist die Biegesteifheit der unterschiedlichen Versuchswerkzeuge in Abhängigkeit vom Flanschanzugmoment und für

unterschiedliche Flanschdurchmesser aufgetragen. Dabei repräsentieren die offenen Symbole die Messwerte, die an den unbestückten Versuchsronden und die geschlossenen Symbole die Messwerte, die an den einsatzfertigen (bestückt und gespannt) Trennschleifscheiben aufgenommen worden sind.

Man erkennt deutlich, dass die Biegesteifheit aufgrund des geringeren freien Werkzeugradius bei größeren Flanschen deut-

Bild 4
Exemplarische Darstellung der induktiven Messergebnisse

Neu

Neu

Neu



30 Jahre Erfahrung im Abrichten und Profilieren

Wir sind Ihr Problemlöser – Nutzen Sie die Vorteile

- 5-Achsen CNC-Profiliermaschine AP mit Videokamera
- Profilieren von Scheibenpaketen – SK40/HSK63/HSK50
- Spitzprofile – konkave und konvexe Radien
- HM-Stufenwerkzeuge mit Fasen und Radien
- Manuelle Profiliermaschine AP-650 mit Kontrolloptik
- bis Scheiben \varnothing 500 – mit Sonderzubehör \varnothing 700
- Anfertigungen aller Sonderdorne, Flansche und Stufendorne

Aus unserem Sondermaschinenprogramm:

- Vollautomatische 5-Achsen-Anfasmaschine (Endenbearbeitung) für HM-Bohrer – Fräser – Gewindebohrer

Bitte setzen Sie sich mit uns in Verbindung!



Rudolf Geiger Maschinenbau GmbH

D-91320 Ebermannstadt-Rüsenbach
Telefon 0 91 94/73 77-0 · Telefax 0 91 94/73 77-50
Internet: www.geiger-gmbh.de · E-mail: rudolf@geiger-gmbh.de

lich zunimmt, das Blatt sich also steifer verhält. Einen signifikanten Einfluss der Vorspannung der Werkzeuge durch das Flanschsystem durch höhere Flanschanzugsmomente auf die Biegesteifheit konnte nicht ermittelt werden. Da die Biegesteifheit, hier definiert als die Auslenkung am Kräfteinwirkungspunkt aufgrund einer fest vorgegebenen und konstanten Kraft am äußeren radialen Rand des Versuchswerkzeugs, ganz maßgeblich von der nicht gespannten, freien radialen Weglänge abhängt, ist die Biegesteifheitserhöhung für größere Flanschaußendurchmesser sofort ersichtlich. Die leichte Abnahme der Biegesteifheiten mit wachsendem Flanschanzugsmoment kann durch eine Verlängerung der freien Werkzeuglänge erklärt werden, welche in der Hinterdrehung der Flansche be-

gründet ist. Mit zunehmendem Anzugsmoment öffnet sich der Flansch am äußeren radialen Rand, so dass der Auflageradius vom Flansch auf das Werkzeug verkürzt wird.

Einflüsse auf die radiale Planlaufabweichung

Bild 6 zeigt exemplarisch die ermittelten axialen Planlaufabweichungen für die Versuchsrunde „B“ mit Außendurchmesser von 615 mm und einer Werkzeugdicke von 3,4 mm gegen verschiedene Schnittgeschwindigkeiten für unterschiedliche Flanschaußendurchmesser und Flanschanzugsmomente. Einen ganz signifikanten Einfluss auf die radiale Planlaufabweichung hat die jeweilige Orientierung des Maschinen- und des Werkzeugspannflansches zur

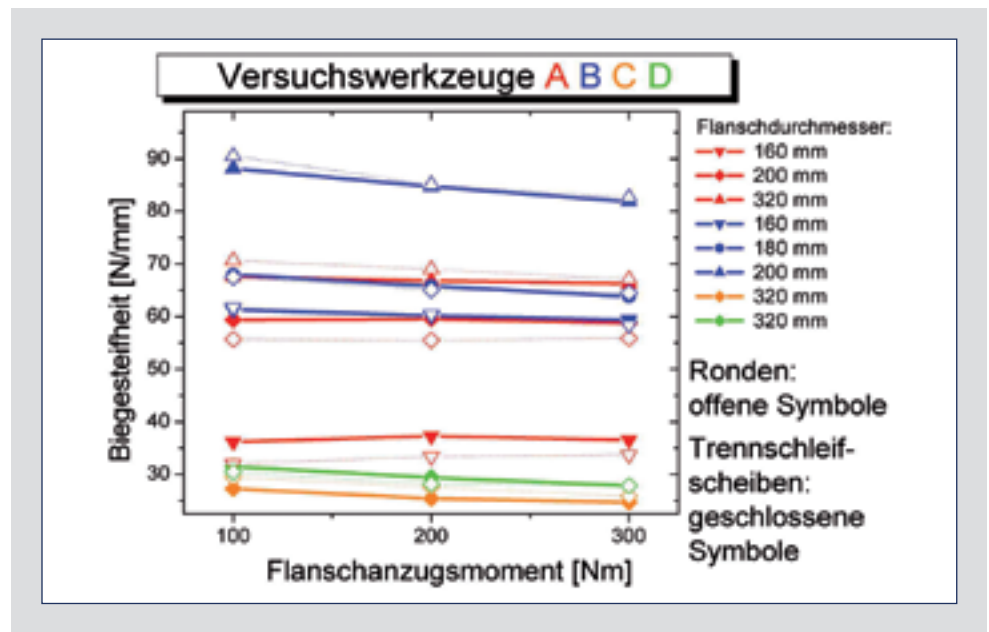
Trennschleifscheibe. Bild 7 gibt die Planlaufabweichung gegen die Orientierung des Flanschsystems der Versuchsrunde „C“ (983 mm x 3,5 mm x 100 mm) für drei unterschiedliche Flanschanzugsmomente wieder. Dabei bedeutet die Notation 0/-45/90, dass zur einmalig willkürlich gewählten Nulllage des Werkzeug-/Flanschsystems der Maschinenflansch um 45° nach links (minus) und der Spannflansch um 90° nach rechts (plus) verdreht wurden. Im Vergleich der Orientierungen „0/45/90“ mit „0/-90/-90“ für ein Anzugsmoment von 100 Nm treten die Unterschiede in der aufgenommenen Planlaufabweichung deutlich zu Tage. Für wachsende Anzugsmomente verändert sich die im Hinblick auf die Planlaufabweichung „günstige“ Orientierung der Flansche. Die optimier-

Tabelle 3
Zusammenfassung der Anzahl der durchgeführten Messungen

		Flanschgröße	Anzugsmoment	Orientierung	$v_c = 0$	$v_c = 30$	$v_c = 40$	$v_c = 50$	Biegesteifheit	Planlauf	Abklingverhalten	Eigenfrequ.
A 985 x 5,0	Ronde	3	3 – 4	1 – 7	1	0	0	0	9	34	34	34
	bestückt	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
	gespannt	3	3	1	1	0	0	0	9	1	1	1
	Maschine	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
B 615 x 3,4	Ronde	3	3	1 – 7	1	0	0	0	9	45	45	45
	bestückt	3	1	1	1	3	3	3	0	3	3	3
	gespannt	3	3	1	1	3	3	3	9	3	3	3
	Maschine	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
C 983 x 3,5	Ronde	1	3	7	1	0	0	0	3	21	21	21
	bestückt	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	gespannt	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
	Maschine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D 983 x 3,5	Ronde	1	3	7	1	0	0	0	3	21	21	21
	bestückt	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	gespannt	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1
	Maschine	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

ten Flanschpositionen sind dabei auch von Versuchswerkzeug zu Versuchswerkzeug jeweils unterschiedlich, so dass neben der Spannoberfläche des Flansches auch die Oberflächentopologie des jeweiligen Werkzeuges eine Rolle spielt und das Zusammenspiel der beiden Oberflächen in Abhängigkeit von deren Orientierung zueinander und von deren Pressspannung aufeinander die Planlaufabweichung deutlich beeinflusst.

Für die axiale Planlaufabweichung zeigt sich somit kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen der Planlaufabweichung und dem Flanschaußendurchmesser oder dem jeweiligen gewählten Flanschzugsmoment. So bedeutet ein größerer Flanschaußendurchmesser nicht automatisch eine geringere Planlaufabweichung. Es wurden Planlaufunterschiede – je nach gewähltem Parametersatz bestehend aus Flanschzugsmoment, Flanschdurchmesser und Flanschorientierung – aufgenommen, die sich um bis zu Faktor „4“ unterscheiden. Somit scheint sich ein bestimmter Parametersatz als besonders günstig zu erweisen. Dieser günstige Parametersatz ist allerdings individuell für das verwendete Werk-



zeug und die verwendeten Einsatzparameter wie beispielsweise der Flanschorientierung, aber auch der Schnittgeschwindigkeit v_c festzulegen. Dabei zeigt sich besonders, dass die Flanschorientierungen vom Maschinenflansch und vom Spannflansch zum Werkzeug einen deutlichen Einfluss haben.

Einflüsse auf die Dämpfung

Es wurden jeweils unter Parametervariation die Abklingzeiten der Werkzeuge nach einmaliger impulsförmiger Anregung

durch eine Stahlkugel von der Maximalamplitude auf 10% der Ausgangsamplitudenhöhe bestimmt. Dabei zeigt sich wieder jeweils ein individueller Parametersatz, der sich besonders günstig auf die Abklingzeit auswirkt. Der Einfluss der selektierten Parameter kann dabei wieder sehr deutlich ausfallen. Bild 8 zeigt für zwei Stammbblätter mit einem Außendurchmesser von 983 mm und einer Stammblattstärke von 3,4 mm die ermittelten Abklingzeiten aufgetragen gegen verschiedene Flanschzugsmomente für unterschied-

Bild 5 Biegesteifheit der Versuchswerkzeuge in Abhängigkeit vom Flanschzugsmoment und für unterschiedliche Flanschdurchmesser

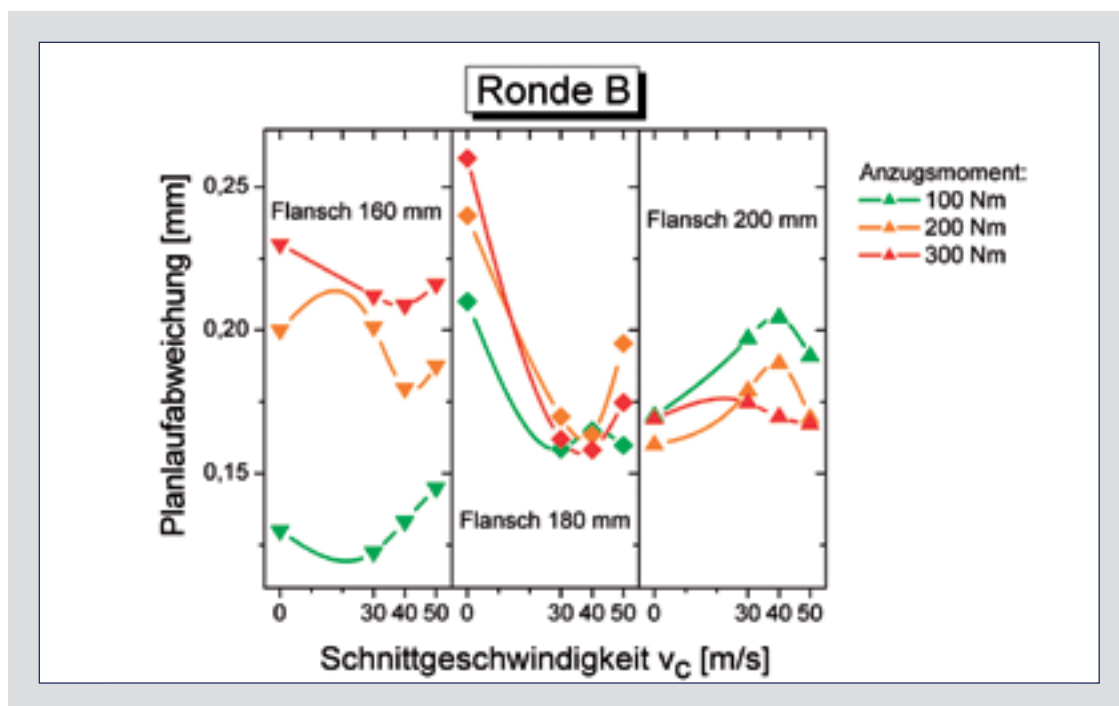


Bild 6 Planlaufabweichung der Versuchsrunde B in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit für verschiedene Flanschdurchmesser und jeweils unterschiedliche Flanschzugsmomente

Planlaufabweichung in Abhängigkeit der Flanschposition

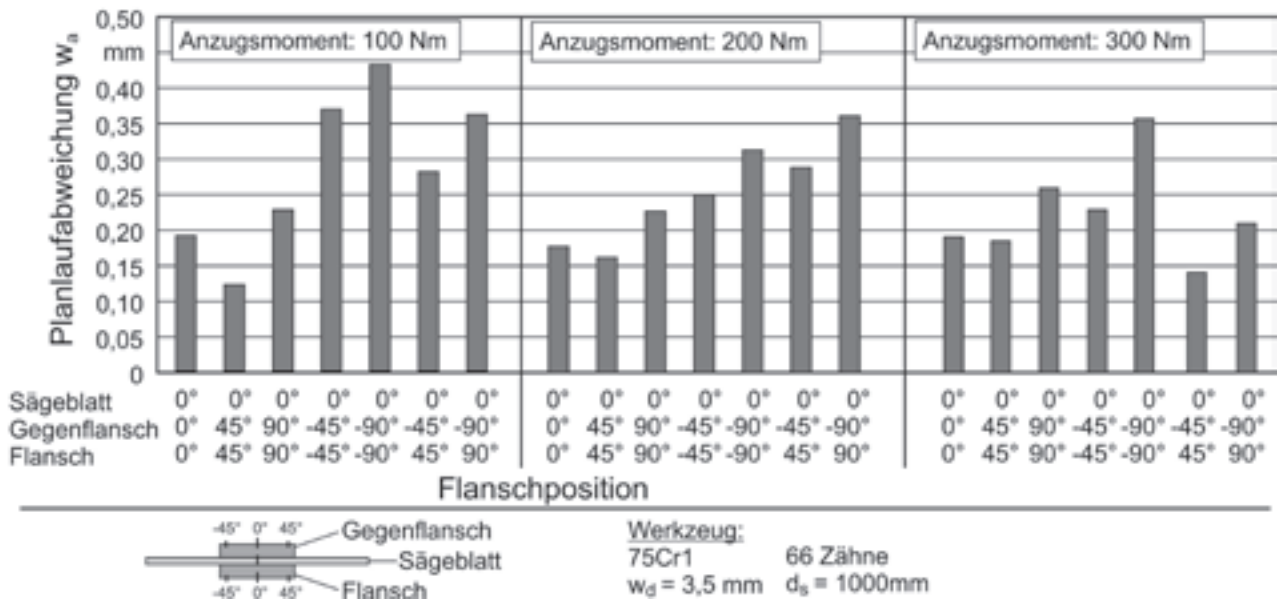


Bild 7
Planlaufabweichung [mm] für unterschiedliche Flanschorientierungen und Flanschanzugsmomente

liche Flanschorientierungen. Der verwendete Flansch hatte dabei einen Außendurchmesser von 320 mm, also circa 1/3 des Werkzeugdurchmessers.

Während die Flanschorientierung in ihrer Einflussnahme auf die Dämpfung unter dem Faktor „2“ bleibt (Ronde „C“ mit einem Anzugsmoment von 200 Nm), zeigt sich für das Flanschanzugsmoment, dass hier durch eine ungeeignete Wahl die Abklingzeit um mehr als das Fünffache ansteigt (Ronde „D“ für die Anzugsmomente 200 Nm und 300 Nm). Betrachtet man das Verhältnis von Flanschaußendurchmesser

zu Werkzeugaußendurchmesser so kann man aus den aufgenommenen Messwerten der jeweiligen Abklingzeiten für die Ronde „A“ und „B“ folgern, dass sich für Ronde „A“ mit einem Außendurchmesser von 985 mm und für die Ronde „B“ mit einem Außendurchmesser von 615 mm jeweils ein günstiger Flanschaußendurchmesser von ca. 1/4 des Werkzeugdurchmessers ergibt.

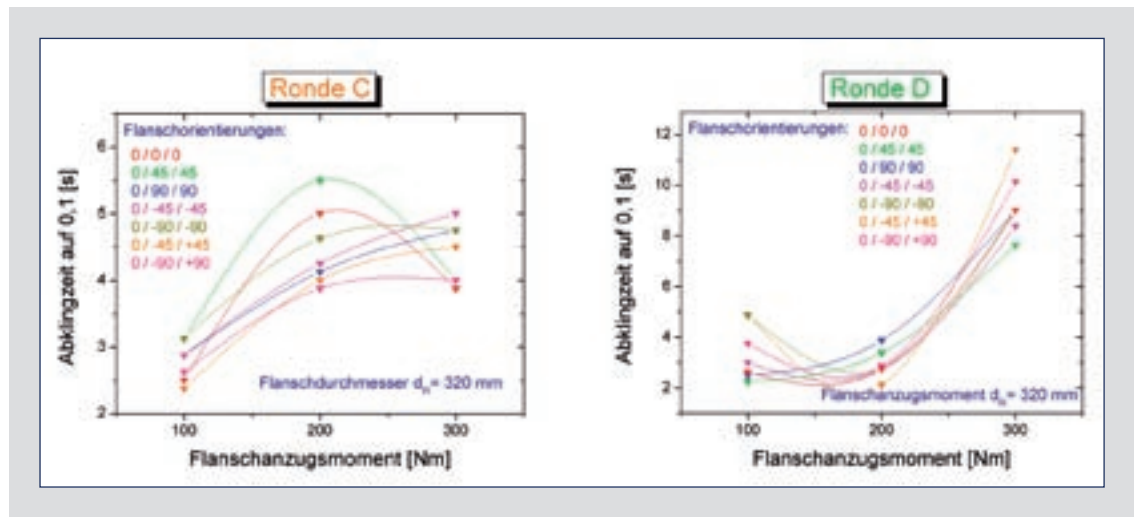
Dieses Verhältnis von Flanschdurchmesser zu Werkzeugdurchmesser und die Systematik, dass es einen individuell günstigen Flanschaußendurchmesser in Bezug auf die Abklingzeit gibt, wird

durch die Messungen an den bestückten und fertig gespannten Trennschleifscheiben bestätigt.

Einflüsse auf die Eigenfrequenzlagen

Aus den aufgenommenen Abklingssignalen nach impulsförmiger Anregung wurden mittels FFT die Eigenfrequenzlagen der Versuchswerkzeuge ermittelt. Es wurden sowohl statische Messungen, als auch Messungen unter Drehzahl durchgeführt und dabei die Flanschaußendurchmesser und die Flanschanzugsmomente variiert. Bild 9 gibt exemplarisch einen

Bild 8
Abklingzeiten auf 10% der Anfangsamplitude nach einmaliger impulsförmiger Anregung



Ausschnitt der MS-Excel®-Datei wieder, in der die jeweiligen Eigenfrequenzen zusammengetragen wurden. Dabei repräsentiert jede Zeile eine fortlaufende Eigenfrequenz von 1 Hz bis 500 Hz und jede Spalte im Tabellenblatt repräsentiert eine Parameterwahl des Versuchswerkzeugs. Die farbigen Einträge in den jeweiligen Zellen spiegeln die auftretende Eigenfrequenz wider. In der dritten Zeile des Tabellenausschnitts sind die vorgewählten Flanschdurchmesser und in der vierten Zeile die Flanschzugsmomente eingetragen, so dass der linke farbige Block die Messwerte für einen Flanschdurchmesser von 160 mm, der mittlere für 180 mm und der rechte Block die Eigenfrequenzen für einen Flanschdurchmesser von 200 mm repräsentiert. Innerhalb der Blöcke stellen die farbigen Einträge in den drei Spalten jeweils die ermittelten Eigenfrequenzen für die unterschiedlichen Flanschzugsmomente, von links nach rechts für 100 Nm, 200 Nm und 300 Nm, dar. Deutlich ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Flanschzugsmoment sich die Eigenfrequenzlagen zu kleineren Frequenzen hin verschieben (roter Pfeil in Bild 9) und mit größer werdendem Flanschdurchmesser eine Eigenfrequenzerhöhung einhergeht (blauer Pfeil in Bild 9).

Aufgrund des größeren Flanschaußendurchmessers bei gleich bleibendem Werkzeugdurchmesser erhöht sich das Verhältnis Flanschdurchmesser zu Werkzeugdurchmesser d_F/D . Hierdurch verkürzt sich die freie ungespannte Werkzeuglänge und somit die möglichen Wellenlängen bzw. Wellenlängenteile ($\lambda/2$), die sich auf dem Blatt ausbreiten können, was wiederum höhere Eigenfrequenzen impliziert. Dieser Argumentationen folgend entspricht eine Verringerung der Eigenfrequenzen einer Verlängerung der freien Werkzeuglänge, welches durch die Hinterdrehung der Flansche

Säge B	Durchmesser			Orientierung			Dicke		
	160	160	160	180	180	180	200	200	200
Flanschzugsmoment	100	200	300	100	200	300	100	200	300
v_c	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36									
37									
38									
39	Blue	Red	Green						
40	Green	Blue	Red						
41	Red	Green	Blue						
42	Blue	Red	Green						
43	Green	Blue	Red						
44	Red	Green	Blue						
45	Blue	Red	Green						
46	Green	Blue	Red						
47	Red	Green	Blue						
48	Blue	Red	Green						
49	Green	Blue	Red						
50	Red	Green	Blue						
51	Blue	Red	Green						
52	Green	Blue	Red						
53	Red	Green	Blue						
54	Blue	Red	Green						
55	Green	Blue	Red						
56	Red	Green	Blue						
57	Blue	Red	Green						
58	Green	Blue	Red						
59	Red	Green	Blue						
60	Blue	Red	Green						

erklärt werden kann, da diese sich mit zunehmendem Anzugsmoment aufgrund der Hinterdrehung stärker öffnen. Eigenfrequenzbestimmungen abhängig von den Flanschorientierungen wurden für den statischen Fall ($v_c=0$ m/s) exemplarisch durchgeführt. Dabei zeigten sich keine signifikanten Einflüsse. Geringfügige und regellose Variationen der Eigenfrequenzlagen werden dabei durch die individuellen Einspannverhältnisse aufgrund der unter-

schiedlichen Oberflächentopologien der aneinander liegenden Flächen von Flanschen und Werkzeug begründet.

Dynamische Werkzeugcharakterisierung mit Derotator

I. Entwicklung des Schwingungsmesssystems

Zur Charakterisierung der Werkzeugschwingungen wurde ein flächenhaft messendes Verfah-

Bild 9
Eigenfrequenzverschiebung exemplarisch und auszugsweise für Ronde „B“

ren entwickelt, das aus einem optischen Bildderotator und einem Laser-Scanning-Doppler-Vibrometer (SLDV) besteht. Durch den Derotator ist es möglich, Schwingungen ortsfest auf einem rotierenden Objekt zu messen.

Der optische Bildderotator

Wesentlicher Bestandteil des verwendeten Derotators ist ein Dove-Prisma. Wird ein rotierendes Objekt durch das Prisma,

das mit der halben Rotationsfrequenz des Objektes in gleicher Richtung rotiert, beobachtet, so erscheint das Objekt stehend. Der Derotator des IMR ist in Bild 10 dargestellt.

Das Dove-Prisma ist in einem Hohlwellenmotor (Gleichstrommotor) gelagert, der mit einer maximalen Drehzahl von 5000 U/min betrieben werden kann. Zur Drehzahlregelung des Derotators wird die Winkelposition von Prisma und Objekt mit

Drehgebern abgetastet und mit einer digitalen Echtzeitregelung gesteuert. Die Ausrichtung des Prismas auf die Objektdrehachse erfolgt mit Schrittmotoren.

Schwingungsmessung mit Derotator und Laser-Doppler-Vibrometer

Zur Schwingungsmessung wurde die Laser-Doppler-Vibrometrie eingesetzt^[1]. Um die Schwingungen ortsfest auf der rotierenden Trennscheibe zu messen, wird der Laserstrahl des Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) in den Derotator eingekoppelt. Durch den Derotator wird der Laserstrahl mit dem Objekt mitgeführt, so dass der Strahl mit der gleichen Drehfrequenz rotiert wie das Messobjekt. Der schematische Aufbau der einzelnen Komponenten des zur Schwingungsmessung entwickelten Gesamtmesssystems ist in Bild 11 dargestellt.

Das scannende Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV) ist schematisch durch ein Einpunkt-Vibrometer (LDV) und zwei schwenkbare

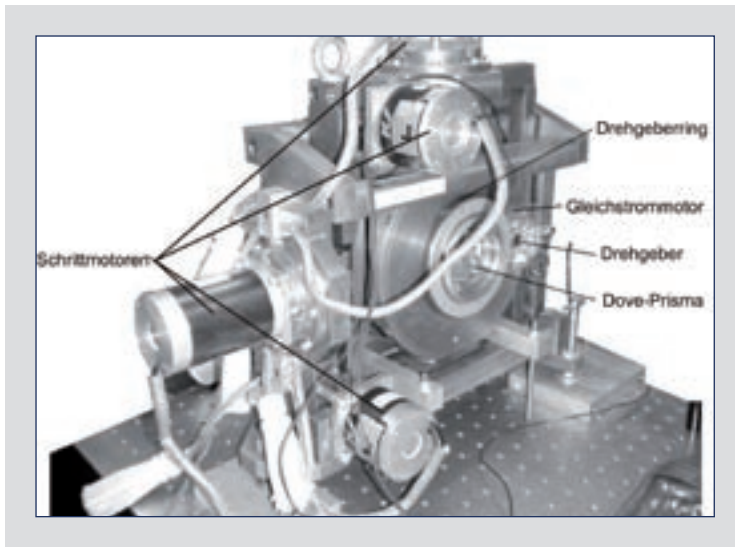


Bild 10
Optischer Derotator des IMR

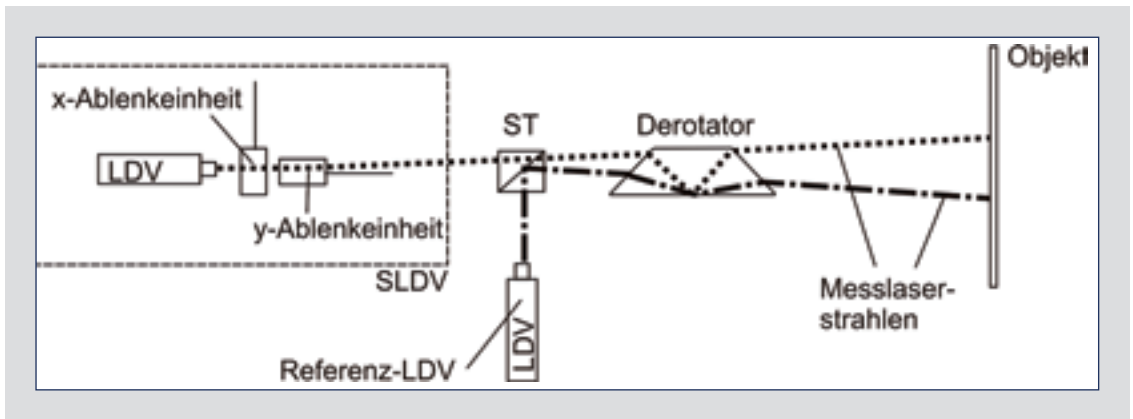


Bild 11
Schematische Darstellung der Messanordnung zur Bestimmung der Eigenschwingformen



Bild 12
Messaufbau im Versuchsfeld (Remscheid) mit Derotator (roter Pfeil rechts im Bild)

Spiegel, die die x- und y-Ablenkeinheit bilden, dargestellt. Mit Hilfe der schwenkbaren Spiegel-einheit lässt sich der Laserstrahl auf definierte Messpunkte auf dem Messobjekt lenken. Vor einer Messung wird ein Messpunkttraster auf dem Messobjekt definiert. Die Spiegeleinheit lenkt den Laserstrahl nacheinander auf die Messpunkte und führt pro Messpunkt Einzelmessungen durch. Aus den SLDV-

Einzelmessungen wird ein kontinuierliches Schwingungsbild berechnet. Hierfür muss der Phasenbezug zwischen den gemessenen Schwingungen an den Einzelmesspunkten bekannt sein. Hierfür wird ein Referenz-LDV verwendet, das kontinuierlich auf einem festen Objektpunkt misst. Der Laserstrahl Referenz-LDV wird über einen Strahlteiler (ST) in den Derotator eingekoppelt (Bild 11). Der Aufbau des Derotators am IFW Remscheid ist in Bild 12 dargestellt.

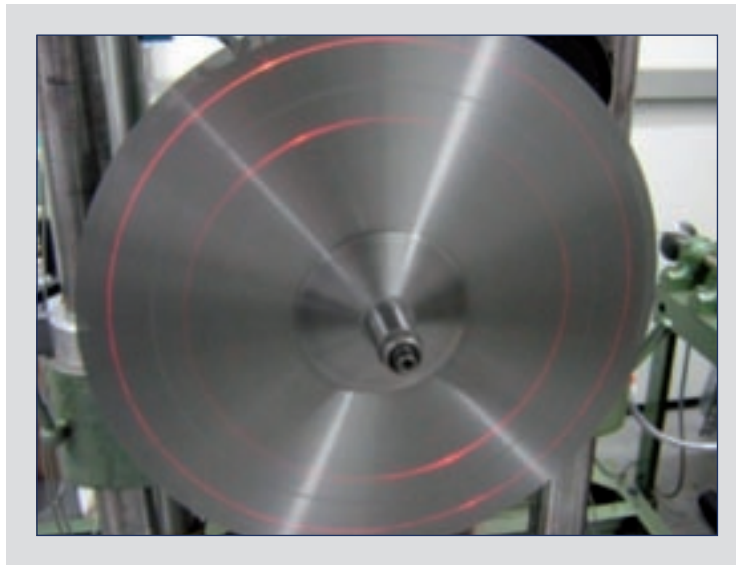


Bild 13
Objekt feste Messungen mittels rotierendem Lasermessfleck

Bild 13 zeigt den mit der Trennschleifscheibe rotierenden Lasermessfleck. Zur Schwingungserregung der Trennschleifscheibe wurde ein Shaker verwendet, der periodisch das Blatt anregte. Dabei wurde die Frequenz des Shakers mit der

Trennschleifscheibe synchronisiert, so dass die Shakerfrequenz immer einer Vielfachen der Rotationsfrequenz der Trennschleifscheibe entsprach.

Im zweiten Teil des Artikels wird auf die Messergebnisse mit Derotator und erste Ergebnisse der Trennschleifuntersuchungen eingegangen.

Bildnachweis Verfasser

Danksagung Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), welches das Forschungsvorhaben (14546 N) der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Remscheid, im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“ über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) finanziell gefördert hat.

Literaturnachweis [1] Drain, L. E.: *The Laser Doppler Technique*, John Wiley & Sons, Chichester (1980)

Service &

Vollstädt-Diamant GmbH
Schlunkendorfer Str. 21
14554 Seddiner See

Telefon 033205-7460
Fax 033205-74621
Internet www.vdiamant.de
E-mail info@vdiamant.de



Ausrüstungen

für Diamant und CBN

- Bildanalyse
- Bruchkraft- & Bruchfestigkeitsmessung



- TI & TTI Analyse
- komplette Analyse von Segmenten



- Kornformanalyse & Sortierung
- magnetische Analyse & Sortierung



- elektrostatische Sortierung
- Qualitätskontrolle

