

Diplomarbeit

Entwicklung einer Versuchseinrichtung zur Prüfung von Innenrundscheifkörpern

Name:

Rosenkranz

Vorname:

Marc

Matrikelnummer:

1860220

Studiengang

Maschinenbau und Produktion

vorgelegt am:

Erstprüfer:

Prof. Dr. Ing. Stark

Zweitprüfer:

Dr. Ing. Pähler

VORWORT

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Zeitraum von Juni bis Dezember 2011 im Technology Center der Firma Saint-Gobain Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG. Das Thema dieser Diplomarbeit ergab sich aus meiner vorherigen Praktikantenzeit in diesem Unternehmen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Stark von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, gilt mein Dank für die engagierte Betreuung dieser Diplomarbeit.

Außerdem möchte ich Herrn Dr.-Ing. Dietmar Pähler für seine Unterstützung, seinen fachlichen Rat und für die Möglichkeit danken, diese Arbeit im Technology Center der Firma Saint-Gobain Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG anfertigen zu dürfen.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Dipl.-Ing Thomas Tschernig aus der Abteilung Forschung und Entwicklung von Saint-Gobain Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG für sein Engagement, seinen fachlichen Rat und seine Unterstützung.

Des Weiteren danke ich sämtlichen Mitarbeitern des Technology Centers, die mir mit Rat und Tat im Rahmen meiner Diplomarbeit zur Seite standen.

Weiterhin möchte ich Herrn Schmidt und Herrn Lorentz von der Firma Overbeck für die hervorragende, telefonische Unterstützung bezüglich der Reparaturen danken.

Danken möchte ich auch meinen studentischen Kollegen bei Saint-Gobain Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG, Herrn Boris Bittner und Herrn Matthias Schreiber für ihren Rat und ihre Unterstützung während der Durchführung dieser Arbeit.

Schließlich danke ich meinen Eltern, die mir durch ihre finanzielle und moralische Unterstützung diese Ausbildung erst möglich gemacht haben.

Vielen Dank auch meinem guten Freund Herrn Dipl.-Ing. Michael Wild für die Durchsicht des Manuskriptes.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	i
Formelzeichen und Abkürzungen	ii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Grundlagen der Schleifwerkzeuge	2
2.1.1 Kornwerkstoffe	3
2.1.2 Körnungsgrößen und Konzentration	5
2.1.3 Grundkörperwerkstoffe	6
2.1.4 Bindungen	7
2.2 Keramisch gebundene cBN Schleifscheiben	10
2.2.1 Aufbau	10
2.2.2 Herstellung	10
2.2.3 Eigenschaften	11
2.3 Verschleiß	12
2.3.1 Kornverschleiß	12
2.3.2 Bindungsverschleiß	13
2.4 Konditionieren	15
2.4.1 Profilieren	16
2.4.2 Schärfen	18
2.5 Innenrundscheifen	18
2.5.1 Kennwerte beim Innenrundscheifen	19
2.5.2 Besondere Herausforderungen beim Innenrundscheifen	20
3 Einrichtung des Prüfstandes	23
3.1 Versuchsmaschine	23
Funktionsprüfung und Fehlerbeseitigung	29
3.2 Maschinenumbau	33
3.2.1 Werkstückspannfutter	34
3.2.2 Abrichteinheit	37

3.3	Installation der Messtechnik zur Datenerfassung	41
3.3.1	Leistungsmessung	42
3.3.2	Kraftmessung	42
3.3.3	Anschnitterkennung	45
3.3.4	Oberflächenmessung	48
3.4	Bestimmung der Maschinenfähigkeit	50
3.4.1	Rahmenbedingungen der Maschinenfähigkeitsuntersuchung	52
3.4.2	Ablauf der Untersuchung	53
3.4.3	Auswertung	54
4	Schleifversuche	56
4.1	Versuchswerkzeuge und -werkstücke	56
4.1.1	Spezifikationen	57
4.1.2	Herstellung der Versuchswerkzeuge	59
4.1.3	Werkstücke	61
4.2	Vorversuche zur Parameterbestimmung	62
4.2.1	Schnittgeschwindigkeitsvariation	66
4.2.2	Vorschubgeschwindigkeit	68
4.2.3	Werkstückdrehzahl / Geschwindigkeitsverhältnis	73
4.2.4	Gleichlaufschleifen gegenüber Gegenlaufschleifen	75
4.2.5	Fazit	78
4.3	Bindungsuntersuchung	80
4.3.1	Versuchsparameter	80
4.3.2	Auswertung Spezifikation 1 [B126 VSS 1427 H1AN V360]	82
4.3.3	Auswertung Spezifikation 2 [B126 VSS 0427 G1AN V364,4]	84
4.3.4	Auswertung Spezifikation 4 [B126 VSS 1027 M1AN V480]	86
4.3.5	Auswertung Spezifikation 5 [B126 VSS 1227 J1AN V422,4]	91
4.3.6	Auswertung Spezifikation 8 [B126 VSS 2027 M1AN V480]	95
4.3.7	Tiefenschädigung	98
4.3.8	Interpretation	99
4.4	Optimierungen und Ergänzungsversuche	103
4.4.1	Einflussverhalten verschiedener Kühlauslegungen	103
4.4.2	Vorschubsteigerung im kritischen Bereich	106
4.4.3	Schleifstiftvorbereitung durch Einschleifen	109

4.5	Erarbeitete Testprozedur	114
5	Zusammenfassung	116
6	Literaturliste	119
7	Abbildungsverzeichnis	121

Aufgabenstellung

Aufgabenstellung der Diplomarbeit

Entwicklung einer Versuchseinrichtung zur Prüfung von Innenrundscheifkörpern

für Herrn Marc Rosenkranz

Um die Entwicklung innovativer Innenschleifkörper voranzutreiben soll im Technologiezentrum der Saint-Gobain Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG eine Innenrundscheifmaschine in Betrieb genommen werden, um neu entwickelte Werkzeuge anwendungsnah auf ihre Leistungsfähigkeit testen zu können. Ziel der Diplomarbeit ist die Ermittlung eines geeigneten Testablaufs, mit dem Innenschleifkörper effizient und aussagekräftig auf ihre Prozesseigenschaften hin getestet werden können: Mit möglichst geringem Versuchsaufwand soll die Leistungsfähigkeit der Schleifstifte - und somit der jeweils eingeschlagene Entwicklungsweg - bewertet und miteinander vergleichbar gemacht werden. Die zu erledigenden Aufgaben umfassen:

- Inbetriebnahme der Versuchsmaschine, Installation eines geeigneten Abrichtsystems, Einarbeitung in die Maschinenbedienung
- Ermittlung des Einflusses der Prozessparameter Schleifscheiben- und Werkstückumfangsgeschwindigkeit sowie bezogenes Zeitspanvolumen auf die Prozess- und Ergebnisgrößen (Bearbeitungskräfte, Spindelleistung, Werkzeugverschleiß, Werkstückrauigkeit)
- Ableitung einer Versuchsmethodik, mit der die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Innenschleifkörper effizient und aussagekräftig verglichen werden kann

Die Planung und Auswertung der schleiftechnologischen Untersuchungen soll unter Einsatz der statistischen Versuchsmethodik erfolgen. Bei den Test kommen keramisch gebundene cBN-Schleifstifte zum Einsatz (Variation der Kornkonzentrationen und Bindungsspezifikation in mehreren Stufen; Korntyp und Stiftgeometrie bleiben unverändert). Als Werkstückmaterial wird gehärteter Kugellagerstahl 100Cr6 verwendet.

Die erhaltenen Ergebnisse sind umfassend zu dokumentieren und ausführlich zu diskutieren.



1. Prüfer/in



2. Prüfer/in

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

<i>Kürzel</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
a_e	mm	Zustellung
a_{ed}	μm	radiale Zustellung pro Abrichthub
$a_{ed \text{ gesamt}}$	μm	gesamte radiale Abrichtzustellung
A_s	mm^2	Kantenverschleißfläche
b_w	mm	Werkzeugbreite
C_m	--	Maschinenfähigkeitsindex
C_{mk}	--	kritischer Maschinenfähigkeitsindex
C_{mo}	--	oberer Maschinenfähigkeitsindex
C_{mu}	--	unterer Maschinenfähigkeitsindex
C_p	--	Prozessfähigkeitsindex
C_{pk}	--	kritischer Prozessfähigkeitsindex
d_s	mm	Schleifscheibendurchmesser
d_w	mm	Werkstückdurchmesser
G-Wert	--	Schleifverhältnis
l_k	mm	Kontaktlänge
n_w	1/min	Werkstückdrehzahl
q_d	--	Geschwindigkeitsquotient
Q_w	mm^3/min	Zeitspanvolumen
R	Mm	Toleranzradius
R_1	mm	Kantenverschleiß an der Seite
R_2	mm	Kantenverschleiß am Umfang
s	mm	Standardabweichung
T_o	mm	obere Toleranzgrenze
T_u	mm	untere Toleranzgrenze

v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_{fad}	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit beim Abrichten
v_{fr}	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
V_w	mm ³	Zerspanvolumen
v_w	m/s	Werkstückumfangsgeschwindigkeit
X_s	mm	Arithmetisches Mittel
ΔV_s	mm ³	verbrauchtes Schleifbelagvolumen

Abkürzung

<i>Kürzel</i>	<i>Beschreibung</i>
AE	Acoustic Emission
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
cBN	Kubisch kristallines Bornitrid
CNC	Computerized Numerical Control
DDS	Diamond Dressing System
DIN	Deutsche Industrie Norm
EGTC	European Grinding Technology Centre
HRC	Härtegrad Rockwell
HSS	Hochleistungsschnellarbeitsstahl
KSS	Kühlschmierstoff
PC	Personal Computer
REM	Rasterelektronenmikroskop
SiC	Siliciumkarbid
VSS	Saint-Gobain Bezeichnung für keramisch gebundene cBN Scheiben

1 Einleitung

Mit den immer anspruchsvolleren Fertigungsprozessen und der stetig steigenden Forderung bestimmte Qualitätsziele in der Fertigung zu erreichen, wächst auch der Anspruch an moderne Werkzeuge in gleichem Maße. Heutzutage sind im Bereich der Schleiftechnik oft schwierigste Herausforderungen zu bewältigen, insbesondere da das Schleifen oft dort zur Anwendung kommt, wo besonders hohe Toleranz- und Qualitätsanforderungen gestellt sind. Auch haben sich die Anwendungsbereiche für das Schleifen in den vergangenen Jahrzehnten stark ausgeweitet, so dass das Schleifen heute bei vielen neue Materialien zum Einsatz kommt, die mit anderen spanenden Fertigungsverfahren nicht bearbeitet werden können. Aus diesem Grund werden kontinuierlich große Bemühungen unternommen um die Optimierung und Weiterentwicklung von Schleifwerkzeugen immer weiter voranzutreiben.

Die Firma Saint-Gobain Diamantwerkzeuge hat für diesen Zweck neben ihrer Forschungs- und Entwicklungsabteilung das European Grinding Technology Center geschaffen. Hier soll die Entwicklung neuer Werkzeuge unterstützt und vorangetrieben werden. Mit umfangreichen Möglichkeiten, Werkzeuge für viele verschiedene Schleifprozesse direkt vor Ort und in enger Zusammenarbeit mit der Forschung und der Anwendungstechnik testen zu können, ist das EGTC in der Vergangenheit bereits an vielen Entwicklungen der Firma Saint-Gobain beteiligt gewesen.

Insbesondere das Innenrundsleifen stellt an die Schleifwerkzeuge hohe Anforderungen. Hier sind die Bedingungen in vielen Fällen besonders schwierig, was sich negativ auf die Werkstückqualität und die Standzeit der Werkzeuge auswirkt.

Aus diesem Grund besteht bei der Firma Saint-Gobain die Bestrebung die Entwicklung von speziell auf das Innenrundsleifen ausgerichteten Schleifkörpern voranzutreiben. Zu diesem Zweck sollte ein Prüfstand für Innenrundsleifwerkzeuge im EGTC eingerichtet werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Einrichtung dieses Prüfstandes und die anschließende Inbetriebnahme. Zudem sollen erste Schleifversuche mit dem Bindungssystem N7 gemacht werden. Diese wird für Innenschleifanwendungen bisher selten eingesetzt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollen dann Empfehlungen für zukünftige Testprozeduren abgeleitet werden.

2 Stand der Technik

Das Schleifen ist ein bedeutendes Fertigungsverfahren der Fein- und Endbearbeitung. Es zählt zu der Gruppe der spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide (siehe DIN 8589). Der Materialabtrag erfolgt durch eine Vielzahl unregelmäßig geformter Körner aus Hartstoffen deren Spitzen und Kanten als Schneiden fungieren und mit dem Werkstoff in nichtkontinuierlichen Eingriff gebracht werden. Das Schleifen zeichnet sich besonders bei schwierigen Arbeitsbedingungen mit hochharten Werkstoffen und beim Erreichen hoher Oberflächengüten aus. Ursprünglich fand das Schleifen lediglich Anwendung als Endbearbeitungsverfahren. Durch neue Hochleistungsschleifverfahren können heute jedoch auch große Werkstoffvolumina wirtschaftlich durch Schleifen zerspant werden. Dies geht unter anderem auf die Entwicklung neuer Hochleistungsmaterialien im Bereich der Schleifkörner und Bindungsmaterialien zurück [Koe96, Pau07].

2.1 Grundlagen der Schleifwerkzeuge

Bei der Einteilung von Schleifscheiben wird grundlegend zwischen sogenannten konventionellen und hochharten Werkzeugen unterschieden. Die Begriffe „konventionell“ und „hochhart“ nehmen hierbei Bezug auf den Schleifkornwerkstoff, der im Falle von hochharten Werkzeugen eine wesentlich höhere Härte aufweist. Von hochharten Werkzeugen oder auch Superabrasives spricht man, wenn als Schneidstoff Diamant oder kubisches Bornitrid (cBN) verwendet wird. In konventionellen Werkzeugen kommen hingegen Korund (Al_2O_3) und Siliziumkarbid (SiC) zum Einsatz

Um die Menge des teuren Schneidstoffes zu reduzieren bestehen hochharte Werkzeuge in der Regel aus einem dünnen Schleifbelag, der auf einen Grundkörper aufgebracht ist. Bei größeren Werkzeugdurchmessern wird der Schleifbelag aus fertigungstechnischen Gründen oft aus mehreren Segmenten zusammen gesetzt. Als Grundkörperwerkstoff kommen z.B. Aluminium, Aluminium/Kunstharz Verbundstoffe, CFK, Messing oder häufig auch Stahl zum Einsatz. Im Gegensatz dazu bestehen konventionelle Schleifscheiben gewöhnlich komplett aus Schleifbelag und verzichten auf einen Grundkörper [Hol88].

Der Schleifbelag besteht im Allgemeinen aus den Hartstoffkörnern und der Bindung. Unter den Begriff Bindung fällt gewöhnlich alles was nicht Schneidkorn ist, somit auch eventuell vorhandene Füllstoffe und Poren. Auch wenn es durch die verschiedenen zur Verfügung stehenden Hartstoffe und Bindungen viele Kombinationsmöglichkeiten gibt, so ist der grundlegende Gefügebau eines Schleifbelages in den meisten Fällen ähnlich.

Wie in **Bild 2.1** zu erkennen werden die Schleifkörner durch die Bindungsbrücken in einem festen Verbund gehalten. Ob Poren oder Füllstoffe in einem Schleifbelag vorkommen und wie ausgeprägt diese sind hängt vom Bindungstyp im Allgemeinen sowie der jeweiligen Bindungszusammensetzung im Speziellen ab. Das Bild zeigt in diesem Fall ein Gefüge ohne Füllstoffe, welches ein ausgeprägtes Porenvolumen aufweist.

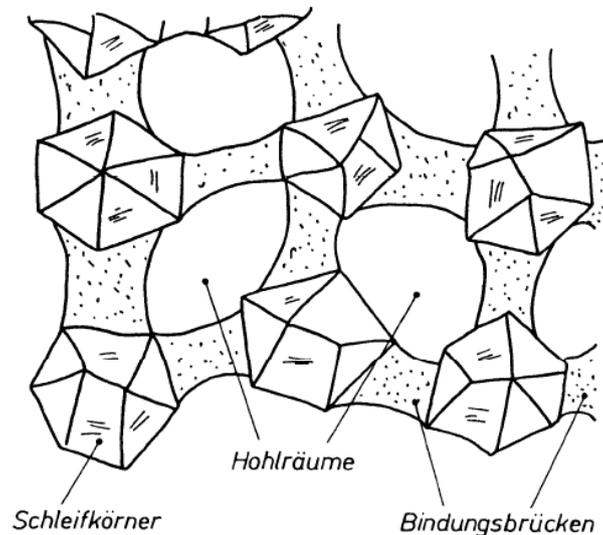


Bild 2.1: Bindungsgefüge ohne Füllstoffe [Pau07]

2.1.1 Kornwerkstoffe

Beim Schleifen erfolgt der Materialabtrag durch die Hartstoffkörner die in das zu zerspanende Material eingreifen. Daher werden an den Kornwerkstoff vor allem folgende Anforderungen gestellt:

- Hohe Härte und Zähigkeit, um die Schneiden des Kornes über einen langen Zeitraum scharf zu halten und um sicher zu stellen, dass ein Materialabtrag eindeutig auf Seiten des Werkstücks liegt
- Gute thermische Beständigkeit um den hohen Temperaturen im Schleifprozess standhalten zu können
- Gute Beständigkeit gegen thermischen Schock (schnelles Abkühlen, der nicht im Eingriff befindlichen Körner)
- Hohe chemische Beständigkeit um auch bei höheren Drücken und Temperaturen unerwünschte chemische Wechselwirkungen mit Luft, Kühlschmierstoff und Werkstückmaterial zu minimieren

Im Bereich der hochharten Schleifscheiben kommen wie gesagt als Kornwerkstoffe kubisches Bornitrid (cBN) und Diamant zum Einsatz. Aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit wird auf diese beiden Kornwerkstoffe folgend näher eingegangen [Koe96].

2.1.1.1 Diamant

Diamant ist das härteste bekannte Material und ist mit einer Knoop-Härte $HK = 7000$ bis 8000 etwa doppelt so hart wie die konventionelle Kornwerkstoffe Korund und Siliziumkarbid, was es zum Einsatz in Schleifscheiben prädestiniert. Als weitere positive Eigenschaft ist die gute Wärmeleitfähigkeit von Diamant zu nennen, wodurch die Wärme schnell aus der Schleifzone abgeführt werden kann [Koe96].

Als nachteilig erweist sich bei Diamant die verhältnismäßig schlechte Temperaturbeständigkeit. So graphitisiert Diamant unter Atmosphärenbedingungen bereits ab ca. 700°C . In diesem Zusammenhang steht auch die Neigung von Diamant bereits ab ca. 900K Kohlenstoff an niedrig legierte Eisenwerkstoffe abzugeben, so dass auf den Einsatz von Diamant beim Schleifen von Stählen im Allgemeinen verzichtet wird [Pau07].

Für den Einsatz in Diamantschleifscheiben werden zum überwiegenden Teil synthetisch hergestellte Diamanten verwendet, der Naturdiamant findet kaum noch Anwendung. Die Diamantsynthese erfolgt bei Temperaturen von über 3000K und Drücken von etwa 100kbar . Über die Parameter Druck, Temperatur und chemische Gegebenheiten kann die Wachstumsrate im Prozess eingestellt und somit Diamanten in brauchbarer Größe für die Schleifmittelherstellung gewonnen werden [Pau07].

2.1.1.2 kubisch kristallines Bornitrid (cBN)

Kubisch kristallines Bornitrid besitzt eine Knoop-Härte von etwa 4700 und ist damit das zweit härteste Schleifmittel nach Diamant. Im Vergleich zu Diamant besitzt Bornitrid eine deutlich überlegene Temperaturbeständigkeit und bleibt in sauerstoffhaltiger Atmosphäre bis etwa 1700K stabil. Dies liegt daran, dass sich eine schützende Boroxidschicht bildet, die das Korn umschließt und vor Zersetzung schützt. Allerdings löst sich Bornitrid in Wasser, weshalb Mineralöle oder synthetische Kühlschmierstoffe als Kühlmittel zu bevorzugen sind (alternativ: fettere Wasser-Öl-Emulsion) [Pau07; Rie11].

Im Gegensatz zu Diamant geht Bornitrid keine chemischen Reaktionen mit Eisenwerkstoffen ein und ist daher besonders gut für die Bearbeitung von gehärteten Stählen geeignet. Durch den wesentlich geringeren Verschleiß gegenüber konventionellen Kornwerkstoffen kann hierbei mit cBN in der Regel eine bessere Maß- und Formgenauigkeit erreicht werden. Zusätzlich schleift cBN aufgrund seiner guten Wärmeleitfähigkeit vergleichsweise kühl und bewirkt damit nur eine geringere Beeinflussung des Randzonengefüges [Sau88].

2.1.2 Körnungsgrößen und Konzentration

Die Korngrößen für Bornitrid- und Diamantkörner in Schleifwerkzeugen werden durch einen FEPA-Standard genormt. Dabei gibt die FEPA Kennzahl die durchschnittliche Korngröße in μm an und der Kennbuchstabe ob es sich um eine Bornitrid- (B) oder Diamant- (D) Körnung handelt. Die festgelegten Körnungsgrößen sind hierbei für Bornitrid und Diamant gleich und umfassen einen Bereich von $46 \mu\text{m}$ als feinste Körnung bis $1181 \mu\text{m}$ als größtes Korn. An diese Reihe schließt sich noch ein FEPA-Standard für Feinkörnung an. Die Firma Saint-Gobain Diamantwerkzeuge liefert hier nach eigenen Klassifizierungen Körnungen D25 bis D0,025 und B30 bis B1 [Hol88; Rie11].

Allgemein gelten die Grundsätze

- | | |
|----------------------------|---|
| Grobes Schleifkorn: | - hohe Abtragsleistung
- gute Standzeit |
| Feines Korn: | - gute Oberflächenrauheit
- geringere Abtragsleistung
- verringerte Standzeit |

Die Konzentration gibt den Anteil der Diamant- bzw. Bornitridkörner im Schleifbelag an. Die Angabe erfolgt im Falle von Diamant in Karat/cm^3 . Bei Diamantkörnungen steht der Basiswert C100 für einen Anteil von $4,4 \text{ Kt}/\text{cm}^3$ dies entspricht einem Anteil von 25 Volumenprozent. Der Basiswert für Bornitrid ist V240, was für einen Anteil von 24 Volumenprozent der Körnung am Belagvolumen steht. Die Tabelle 2.1 zeigt typische Konzentrationen für Diamant und cBN Schleifkörper.

Tabelle 2.1: Übliche Konzentrationen und verarbeitetes Karatgewicht [Hol88]

Diamant	Verarbeitetes Karatgewicht/cm ³ Belagvolumen	Bornitrid	Verarbeitetes Karatgewicht/ cm ³ Belagvolumen
C50	2,2 Kt/cm ³	V120	2,09 Kt/cm ³
C75	3,3 Kt/cm ³	V180	3,13 Kt/cm ³
100	4,4 Kt/cm ³	V240	4,18 Kt/cm ³
C125	5,5 Kt/cm ³	V300	5,22 Kt/cm ³

2.1.3 Grundkörperwerkstoffe

An den Grundkörper eines cBN oder Diamantwerkzeuges werden im Wesentlichen folgende Anforderungen gestellt:

- hohe Wärmeleitfähigkeit
- hohe mechanische Festigkeit
- gute Schwingungsdämpfung

Da diese Anforderungen zum Teil gegenläufig sind, müssen meistens Kompromisslösungen akzeptiert werden. Die häufigsten Grundkörperwerkstoffe sind [Hol88, Koe96]:

2.1.3.1 Stahl / Aluminium

Diese metallischen Grundkörper zeichnen sich durch hohe Festigkeit und gute Wärmeleitfähigkeit aus. Durch einen hohen E-Modul sind die resultierenden Dehnungen auch bei hohen Drehzahlen gering. Mit diesen Grundkörpern können daher hohe Umfangsgeschwindigkeiten erreicht werden. Zudem ist die Herstellung von Grundkörpern aus Stahl / Aluminium vergleichsweise einfach (Drehen, Bohren, Fräsen) [Hol88, Koe96].

2.1.3.2 Kunstharz / Kunstharz mit metallischen Füllstoffen

Kunstharzgrundkörper erreichen nicht die hohen Festigkeiten von Aluminium- und Stahlgrundkörpern. Auch die Wärmeleitfähigkeit ist geringer. Vorteilhaft sind jedoch die besseren Dämpfungseigenschaften. Durch das Hinzufügen von metallischen Füllstoffen, meistens Aluminium oder Kupfer, kann die Wärmeleitfähigkeit verbessert werden. Vorteilhaft sind auch die meist geringeren Materialkosten gegenüber Aluminium oder Stahl. Kunstharzgrundkörper werden meist urformtechnisch hergestellt und mittels Drehen / Fräsen auf Endmaß gebracht [Hol88, Koe96].

2.1.3.3 Faserverstärkte Kunststoffe

Grundkörper aus faserverstärkten Kunststoffen nutzen die sehr hohe Festigkeit von Kohle- oder Glasfasern eingebettet in einer Kunststoffmatrix. Die geringe Dichte der Fasern und ihre hohe Festigkeit ermöglichen höchste Umfangsgeschwindigkeiten. Außerdem bewirkt die Kunststoffmatrix eine bessere Schwingungsdämpfung gegenüber Stahl und Aluminium. Nachteilig sind die geringere Wärmeleitfähigkeit, der hohe Fertigungsaufwand und die hohen Materialkosten. Zurzeit befinden sich Grundkörper aus diesen Materialien noch im Versuchsstadium [Koe96].

2.1.4 Bindungen

Der Bindung fallen im Schleifkörper folgende Aufgaben zu

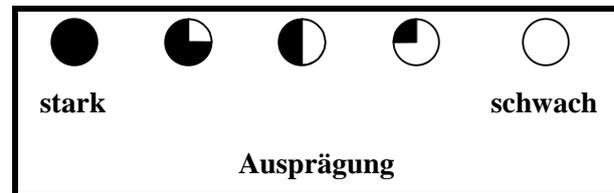
- Einbetten und Festhalten der scharfen Körner in ihrer Lage
- Freigeben eines Kornes, das nach mehrfachem Absplittern stumpf gewordenen ist und keine scharfen Schnittkanten mehr besitzt
- Bildung von Spanräumen vor den Schneidkanten

Um diese Anforderungen erfüllen zu können muss der Bindungswerkstoff eine der Anwendung möglichst gut angepasste Härte aufweisen damit die Körner genau zum richtigen Zeitpunkt freigegeben werden. Hierfür ist es außerdem notwendig, dass sich zwischen Korn und Bindung eine ausreichend feste Verbindung ausbilden kann. Im angestrebten Optimalfall verschleißt die Bindung beim Schleifen im gleichen Maße wie die Körner selbst, sodass diese genau dann von der Bindung freigegeben werden wenn sie abgestumpft sind. Ist dies der Fall, kann die Scheibe permanent „frei schleifen“, dies bezeichnet man als sogenannten „Selbstschärfeffekt“ [Pau07].

Im Wesentlichen unterscheidet man vier unterschiedliche Bindungssysteme. Auf diese wird im Folgenden eingegangen. In Tabelle 2.2 ist eine Kurzübersicht der wichtigsten Eigenschaften dargestellt:

Tabelle 2.2: Bindungseigenschaften der Bindungssysteme

	Kunstharz	Metall	Keramik		Galvanisch
	Dia + cBN	Dia + cBN	Dia	cBN	Dia + cBN
Selbstschärfung	●	◐	◑	◑	○
Verschleißfestigkeit	◑	●	◑	◑	●
Profilierbarkeit	◑	◑	●	●	○
Schärfbarkeit	●	◑	●	●	○
Temperaturresistenz	◑	◑	●	●	◑
Kornhaltekräfte	◑	◑	◑	◑	●
Formenvielfalt	◑	◐	◑	◑	●



2.1.4.1 Kunstharzbindungen

Kunstharzbindungen zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit und Elastizität aus, dadurch sind hohe Schnittgeschwindigkeiten möglich. Dies macht sie außerdem unempfindlich gegen Schläge und Stöße, und auch seitlichem Druck können Kunstharzscheiben überdurchschnittlich gut widerstehen. Durch die Verwendung verschiedener Harze sowie die Möglichkeit der Zugabe von Füllstoffen, lassen sich die Eigenschaften von Kunstharzbindungen über einen weiten Bereich einstellen. Schleifscheiben mit Kunstharzbindung erzeugen niedrige Schleifkräfte und schleifen kühl. Diese Eigenschaften liegen in dem vergleichsweise schnellen Verschleifen von Kunstharzbindungen begründet, was auch der Nachteil dieser Bindung ist [Pau07].

2.1.4.2 Metallsinterbindungen

Wie der Name bereits sagt bestehen Bindungen dieses Typs aus metallischen Werkstoffen. Es kommen überwiegend Sinterbronzebindungen oder seltener auch Stahl und Hartmetallbindungen zum Einsatz. Dieser Bindungstyp bindet das Korn besonders intensiv ein, wodurch sich im Vergleich zu anderen Bindungen längere Standzeiten ergeben. Besonders gegenüber kleinen Spänen, die bei kurzspanenden Werkstoffen auftreten, weist

dieser Bindungstyp einen hohen abrasiven Verschleißwiderstand auf. Daher eignet sich dieser Bindungstyp besonders für Werkstoffe, die auf die Bindung stark verschleißend wirken, wie z.B. Gläser, Keramiken oder Hartmetalle. Schleifscheiben mit Sinterbindungen schleifen im Allgemeinen stumpfer und somit unter Entwicklung größerer Schleifwärme als kunstharzgebundene Schleifscheiben. Allerdings besitzen sie auch eine gute Wärmeleitfähigkeit. Nachteilig bei Metallbindungen ist jedoch die schwierige Abrichtbarkeit [Koe96, Hol88].

2.1.4.3 Galvanische Metallbindung

Bei diesem Bindungstyp wird das Bindungsmaterial Nickel elektrolytisch auf dem Grundkörper abgeschieden und bindet dabei die Schleifkörner ein. Dazu muss der Grundkörper im belegten Bereich elektrisch leitend sein (überwiegend Stahlgrundkörper). Das Korn wird besonders stark in der Bindung festgehalten, wodurch die Kornspitzen 30-50% des durchschnittlichen Korndurchmessers über die Bindung hinausragen können. Dadurch ergeben sich besonders große Spanräume, allerdings nur für die oberste Kornschicht. Aus diesem Grund findet das Verfahren fast ausschließlich bei einschichtig belegten Werkzeugen Anwendung. **Bild 2.2** zeigt den Aufbau einer einschichtig belegten, galvanisch gebundenen Schleifscheibe mit entsprechend großem Kornüberstand.

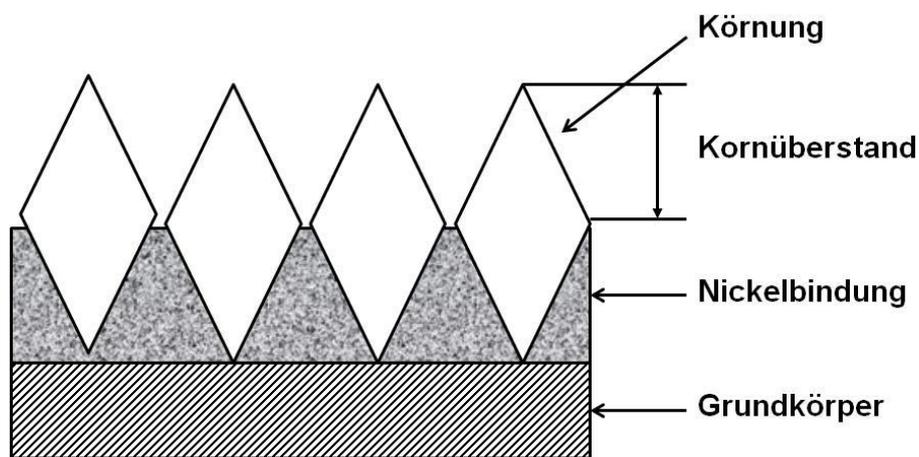


Bild 2.2: Galvanische Bindung bei einschichtig belegter Scheibe [Rie11]

Die galvanische Metallbindung ist hervorragend für profilierte Grundkörper geeignet, da eine hohe Profilgenauigkeit erreicht werden kann, wobei diese auch von der Körnungsgröße mit beeinflusst wird. Nachteilig bei einschichtig belegten Werkzeugen ist, dass das Werkzeug nach Verschleßen dieser einen Körnungsschicht nicht mehr einsatzbereit ist. Zudem kann sich kein stationärer Schleifvorgang einstellen, da nicht kontinuierlich neue, scharfe Körner freigelegt werden können. Somit ändert sich das Verhalten der Schleifscheibe über der Lebensdauer [Hol88; Koe96].

2.2 Keramisch gebundene cBN Schleifscheiben

2.2.1 Aufbau

Keramisch gebundene cBN Schleifscheiben bestehen, ähnlich wie kunstharzgebundene Scheiben, aus dem Hartstoff in Form von cBN Körner, dem Bindungsmaterial, Füllstoffen und einem gewissen Porenanteil (**Bild 2.3**).

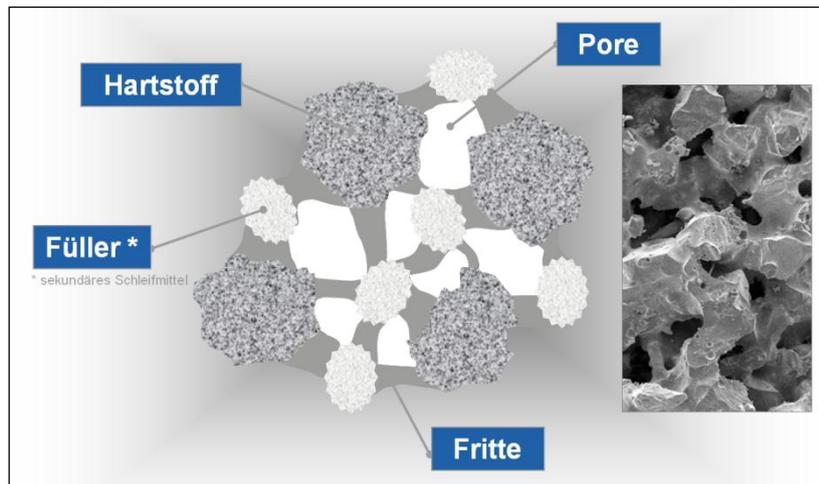


Bild 2.3: Bestandteile einer keramischen Bindung

Die Bindung selbst ist ein Gemisch aus natürlichen Silikaten, Quarz und sogenannten Fritten. Bei Fritten handelt es sich um glasartige Pulver aus anorganischen Stoffen. Sie dienen als Flussmittel und werden verwendet, um der Bindung bestimmte Eigenschaften zu verleihen. Zusammen mit den restlichen Bestandteilen der Bindung bestimmt sie die Festigkeit der Bindungsbrücken. Zusätzlich können der Bindung weitere Stoffe beigemischt sein, die die Porenbildung unterstützen. Außerdem sind neben der cBN-Körnung teilweise noch weitere konventionelle Schleifkörnungen als Stützkörnung beigemischt [Koe96].

2.2.2 Herstellung

Zunächst wird aus dem Bindungsmaterial und den Schleifkörnern ein Granulat hergestellt. Schon bei der Granulatherstellung haben verschiedene Faktoren Einfluss auf die späteren Eigenschaften des Schleifkörpers. So haben unter anderem die Restfeuchtigkeit im Granulat und die Korngröße der Granulatkörner Einfluss auf den Verdichtungs- und Brennprozess und somit auf das spätere Einsatzverhalten des Werkzeuges

Das Granulat wird dann in Form gepresst. Die so entstandenen rohen Schleifkörper werden Grünlinge genannt. Damit die Grünlinge beim Entformen nicht zerfallen wird dem Granulat ein temporäres Bindemittel beigemischt, das die Formhaltigkeit bis zum Brennen sicherstellt.

Anschließend werden die Grünlinge getrocknet und in Öfen bei Temperaturen zwischen 700°C und 1400°C gesintert. Die jeweilige Zusammensetzung der Bindung ist dabei entscheidend für die Sintertemperatur. Wird ein hoher Anteil an Fritten in Verbindung mit weiteren Zusätzen zum keramischen Bindemittel gegeben, so ergeben sich bereits bei niedrigen Temperaturen Schmelzen. Diese Bindungen zeichnen sich durch einen hohen Glasphasenanteil aus und zählen zu den Schmelzbindungen. Ist der Frittenanteil hingegen niedrig, liegt die Sintertemperatur wesentlich höher. Die Bindekraft entsteht dann hauptsächlich durch Umlagerungs- und Feststoffreaktionen. Eine solche Bindung zählt zu den Sinterbindungen [Koe96, Pau07].

Die gebrannten Schleifkörper werden anschließend mit Spezialklebstoffen auf die Grundkörper geklebt. Die verwendeten Kleber müssen hierbei hohen Anforderungen genügen und den im Schleifprozess auftretenden chemischen und physikalischen Belastungen standhalten. Abschließend werden die Schleifscheiben nachbearbeitet, um die geforderten Form- und Rundheitsgenauigkeiten zu erreichen, sowie die Unwucht der Scheiben zu minimieren.

2.2.3 Eigenschaften

Keramische Bindungen können über die in 2.2.1 genannten Variationen des Porenvolumens und der Härte über einen weiten Bereich auf die Anforderungen eines Schleifprozesses angepasst werden. Im Gegensatz zu dem weitgehend dichten Gefüge bei Metall- und Kunstharzbindungen, bringt das offenporige Gefüge der Keramikbindungen einige wesentliche Vorteile mit sich. Besonders bei Keramikbindungen mit einem großen Porenvolumen stehen entsprechend große Spanräume zur Verfügung. Auch kann auf diesem Weg das Kühlmittel gut in die Kontaktzone eingebracht werden.

Der Anteil des Porenvolumens einer Bindungsvariante hat hierbei, neben der Bindungszusammensetzung, einen großen Einfluss auf die Härte der Schleifscheibe. Als Härte ist in diesem Sinne nicht die tatsächliche Härte, sondern eher der Verschleißwiderstand der Schleifscheibe gemeint. Grundsätzlich gilt: je offenporiger das Gefüge, desto weicher ist auch die Schleifscheibe.

Harte Bindungen haben die Eigenschaft die Schleifkörner länger in der Bindung fest zu halten. Dadurch stumpfen die Schleifkörner bis zu ihrem Ausbrechen aus der Bindung stärker ab. Dies hat höhere Schleifkräfte und eine höhere Reibung zur Folge, wodurch unter größerer Wärmeentwicklung geschliffen wird. Im Gegenzug hat eine harte Scheibe eine längere Standzeit und eine bessere Formhaltigkeit. Analog dazu gibt eine weiche Schleifscheibe die

Schleifkörner schneller frei. Die Schneiden stumpfen bis zum Ausbrechen somit weniger stark ab. Die Schleifscheibe schleift unter geringeren Schleifkräften und somit kühler, allerdings auf Kosten der Standzeit [Hol88].

Keramische Bindungen weisen besonders beim Schleifen von Materialien die unter Bildung abrasiver Metallspäne zerspanen einen guten Verschleißwiderstand auf. Daher lassen sich keramische Bindungen besonders gut für cBN-Werkzeuge einsetzen. So lassen sich hohe Zeitspanvolumina erreichen und die Werkzeuge sind dementsprechend wirtschaftlich.

Vorteilhaft ist auch, dass keramische Bindungen resistent gegen Wasser und Öl sind. Zudem besitzt dieser Bindungstyp eine gute Temperaturbeständigkeit und ein gutes Selbstschärfvermögen [Pau07].

Nachteilig bei keramischen Bindungen sind ihre Stoßempfindlichkeit und ihre geringe Toleranz gegenüber raschen Temperaturwechseln. Auch ist die Wärmeleitfähigkeit einer keramischen Bindung gering, sodass die Schleifwärme hauptsächlich über das Werkstück abgeleitet werden muss und die Wärme der Schleifkörner nur schlecht an die Bindung weitergegeben werden kann.

Haupteinsatzzweck keramisch gebundener cBN Werkzeuge ist das Schleifen von Bauteilen aus gehärteten Stahlwerkstoffen, wie zum Beispiel das Bohrungsschleifen von einsatzgehärteten Getriebezahnradern, Innenschleifen von gehärteten Wälzlageringern, Schleifen der Laufbahnen von Lageraußenringen oder das Innenschleifen von Nocken für PKW-Nockenwellen und weitere [Hol88].

2.3 Verschleiß

Verschleiß tritt an Schleifscheiben in verschiedenen Formen auf. Zunächst unterscheidet man hierbei den Korn- und den Bindungsverleiß.

2.3.1 Kornverschleiß

Genau wie die Werkstücke sind auch die Körner mechanischer und thermischer Belastung während des Schleifprozesses ausgesetzt, was schlussendlich zum Verschleiben der Schleifkörner führt. Die typischen Verschleißarten sind in **Bild 2.4** dargestellt.

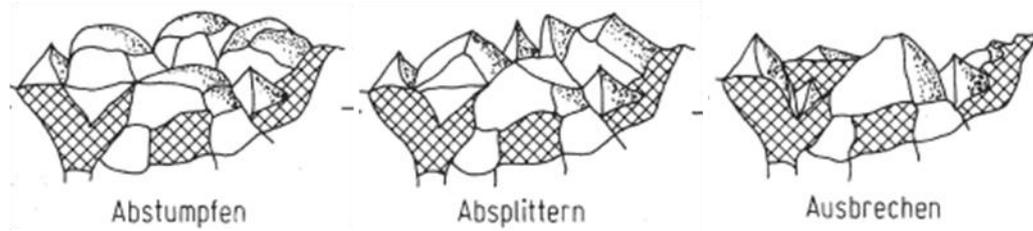


Bild 2.4: Verschleißarten [Gro07]

Der Kornverschleiß beginnt in den Kristallschichten an der Oberfläche des Kornes. Die auftretenden Drücke und Temperaturen setzen hierbei den Abriebwiderstand des Kornmaterials herab. Dies führt zu mechanischem Abrieb an den Schneidkanten der Körner, wodurch diese abstumpfen. Zusätzlich kann eine Ermüdung des Kristallverbundes auftreten, so dass an Schadstellen im Kristallgitter Ermüdungsrisse entstehen, wodurch ganze Segmente aus dem Korn herausbrechen können.

Durch das Abstumpfen nehmen einerseits die Prozesskräfte zu und andererseits erwärmt sich das Korn durch erhöhte Reibung stärker. Dies kann dazu führen, dass die Spannungen in den Bindungsbrücken so stark ansteigen, dass es zu einem Versagen kommt und somit das Korn oder sogar ein ganzer Kornverbund aus der Bindung ausbricht [Koe96, Pau07].

2.3.2 Bindungsverschleiß

Prinzipiell sind die Mechanismen die zum Kornverschleiß führen, die gleichen die auch den Bindungsverschleiß bewirken. Der Werkstoff und die Späne kommen nicht nur mit den Körnern, sondern auch mit der Bindung in Kontakt und wirken auf die Bindung abrasiv. Werden die Spannungen in einzelnen Bindungsbrücken zu groß, hervorgerufen durch Abstumpfung der Körner, kann dies zum Bruch der Bindungsbrücken führen.

Zudem kann die Bindung durch zu hohe Temperaturen oder chemische Einflüsse geschwächt werden, was zu einem stärkeren Bindungsverschleiß führt oder das frühzeitige Ausbrechen noch nicht abgestumpfter Körner bewirkt [Koe96].

Resultierende Geometrieabweichungen

Da sich der Verschleiß in der Praxis ungleichmäßig über die Bereiche des Schleifscheibenprofils ausbildet, kann ein Resultat dieses Verschleißeffekts eine Änderung der geometrischen Form des Schleifbelages über der Zeit sein. **Bild 2.5** zeigt die typischen Formen des Radial- und Kantenverschleißes.

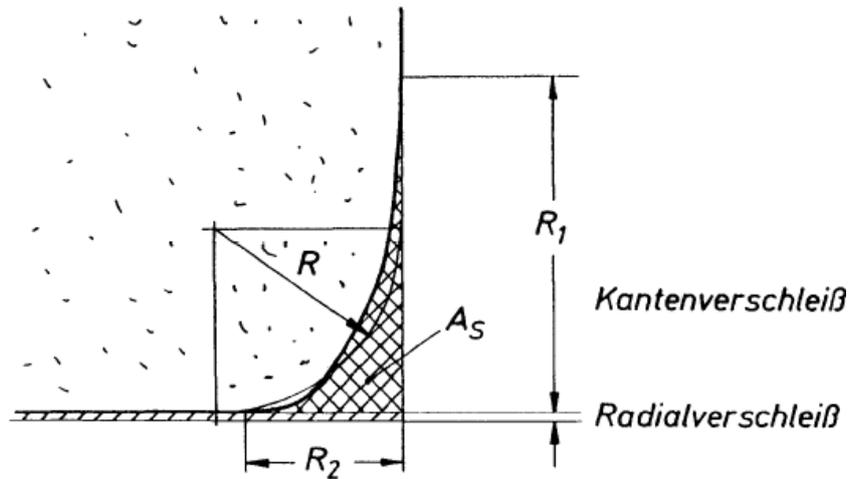


Bild 2.5: Radial und Kantenverschleiß [Pau07]

Wie der Begriff schon impliziert bewirkt der Radialverschleiß eine Verringerung des Werkzeugdurchmessers, da der Belag auf der gesamten Eingriffsbreite verschleißt. Der Verschleiß muss jedoch nicht, wie in **Bild 2.5** angedeutet, über der gesamten Breite konstant sein. Es kann sich zum Beispiel ein Abschrägen der Belagfläche ergeben. Der Radialverschleiß bewirkt somit, dass das endgültige Maß am Werkstück nach dem Schleifen um den Radialverschleiß vom theoretischen Maß abweicht, das aufgrund des Zustellbetrages hätte erreicht werden müssen. Die Maßhaltigkeit des Prozesses wird schlechter.

Der Kantenverschleiß bewirkt hingegen ein Abrunden der Belagkanten durch frühzeitiges Ausbrechen von Körnern. Ein Kantenverschleiß ist besonders beim Profilquerschleifen problematisch, da die Form der Werkstücke sich über der Zeit durch den Verschleiß ändert. Dies macht eine genaue Prozessüberwachung notwendig [Pau07].

2.4 Konditionieren

Um einen optimalen Schleifprozess zu gewährleisten müssen Schleifscheiben vor und während des Prozesses konditioniert werden. listet die einzelnen Unterarten des Konditionierens auf. Zunächst ist zwischen Abrichten und Reinigen zu unterscheiden.

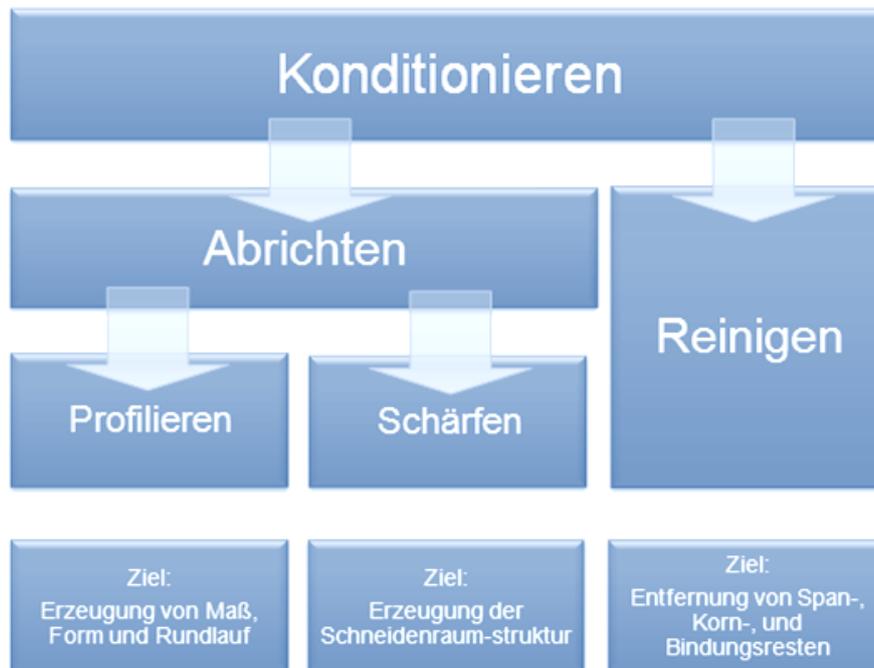


Bild 2.6: Definition des Konditionierens von Schleifscheiben [Min99]

Das **Abrichten** umfasst das Profilieren und Schärfen. Durch das Abrichten soll die Schleifscheibe in einen schleiftechnisch funktionsfähigen Zustand gebracht werden damit die geforderte Oberflächengüte und Maßtoleranz an dem zu schleifenden Werkstück unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erreicht werden kann. Für das wirtschaftliche Abrichten von cBN Werkzeugen werden heutzutage fast ausschließlich rotierende Diamantabrichter verwendet, da sie einem wesentlich geringeren Verschleiß unterliegen als stehende Diamantabrichter [Koe96, Rie11].

Während das Abrichten bestimmte Eigenschaften der Schleifscheibe wiederherstellen soll, hat das **Reinigen** lediglich den Zweck das Festsetzen von Fremdkörpern im Schleifbelag zu verhindern und die Spanräume freizuhalten.

2.4.1 Profilieren

Durch das Profilieren sollen in erster Linie die in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Formfehler beseitigt werden, die während des Schleifprozesses durch Schleifscheibenverschleiß verursacht werden. Die beim Profilieren gewählten Parameter beeinflussen die Wirkrautiefe des Werkzeuges, welche wiederum die Oberflächengüte am Werkstück bestimmt. Als bestimmende Parameter sind hier der Überdeckungsgrad U_d und der Geschwindigkeitsquotient q_d zu nennen (**Bild 2.7**).

Der Überdeckungsgrad U_d definiert die Anzahl der Umdrehungen die eine Schleifscheibe ausführt, bis die Eingriffsbreite a_{pd} genau einmal in Vorschubrichtung versetzt wurde.

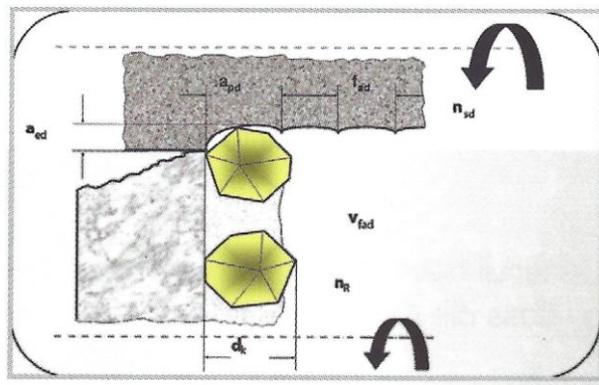


Bild 2.7: Überdeckungsgrad beim Abrichten [Win05]

$$U_d = \frac{a_{pd}}{f_{ad}} \quad (2.1)$$

$$U_d \approx \frac{d_k}{\left(\frac{v_{fad}}{n_{sd}}\right)} \quad (2.2)$$

$$U_d \approx \frac{d_k}{\left(\frac{v_{fad} \times d_s \times \pi}{v_{cd} \times 60.000}\right)} \quad (2.3)$$

Abhängig von dem gewählten v_{fad} ergibt sich nach dem Abrichten eine mehr oder weniger ausgeprägte spiralförmige Oberflächenstruktur des Schleifkörpers. Dabei bewirkt ein niedriger Überdeckungsgrad eine große Wirkrautiefe. Mit steigendem Überdeckungsgrad nimmt die Wirkrautiefe ab (**Bild 2.8**) [Koe96, WIN05].

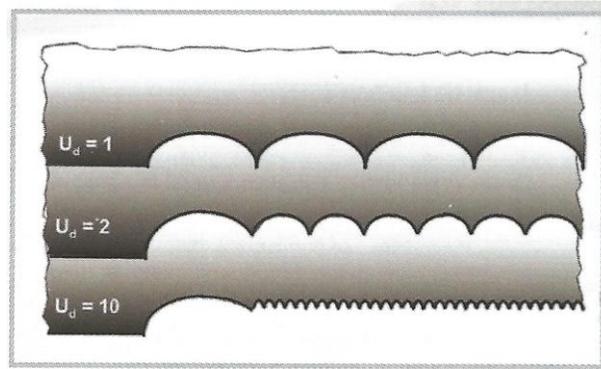


Bild 2.8: Einfluss des Überdeckungsgrads auf die Wirkrautiefe (schematisch) [Win05]

Das Geschwindigkeitsverhältnis q_d ist ein ebenso wichtiger Einflussfaktor im Abrichtprozess. Dabei ist zu beachten, dass bei rotieren Abrichtwerkzeugen dem Abrichten im Gleichlauf und dem Abrichten im Gegenlauf deutliche Unterschiede im Prozessergebnis zu eigen sind. In **Bild 2.9** wird der Verlauf der anfänglichen Wirkrautiefe für eine Schleifscheibe exemplarisch dargestellt.

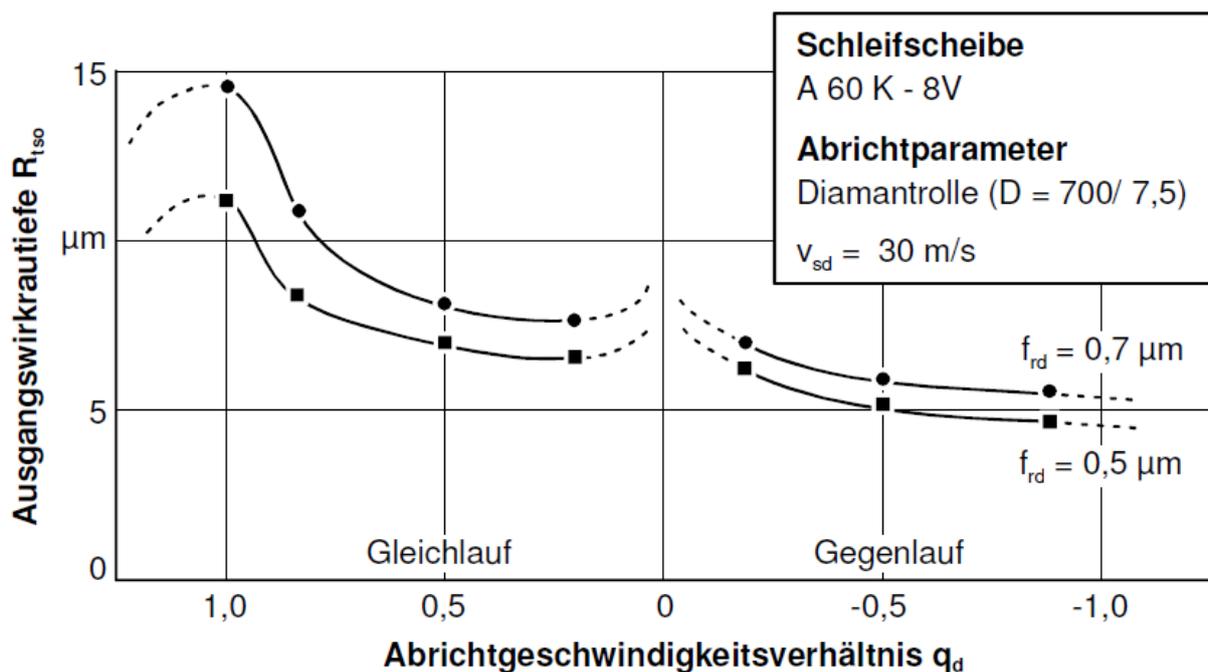


Bild 2.9: Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses auf die Ausgangswirkrautiefe [Koe96]

Das Abrichten keramisch gebundener cBN-Werkzeuge erfolgt häufig im Gleichlauf, um eine hohe Wirkrautiefe an der Schleifscheibe zu erzeugen. Üblicherweise wird mit einem Geschwindigkeitsverhältnis von $q_d \approx 0,8$ abgerichtet. Das Abrichten im Gleichlauf bietet den Vorteil auf das Schleifverhalten der Schleifscheibe einwirken zu können, setzt jedoch steife Abrichtsysteme voraus, da die Abrichtkräfte hoch sind [Koe96].

2.4.2 Schärfen

Die Schleifscheibe kann nach dem Profilieren eine sehr glatte Oberfläche aufweisen. Der Kornüberstand kann sehr gering sein (unzureichende Spanräume). Das Schärfen dient in einem solchen Fall dazu, die Bindung zurück zu setzen, wodurch die gewünschten Spanräume entstehen (**Bild 2.10**). Dies wird durch Einstechen der Schleifscheibe in einen Korund- oder Siliziumkarbidblock erreicht [Koe96].

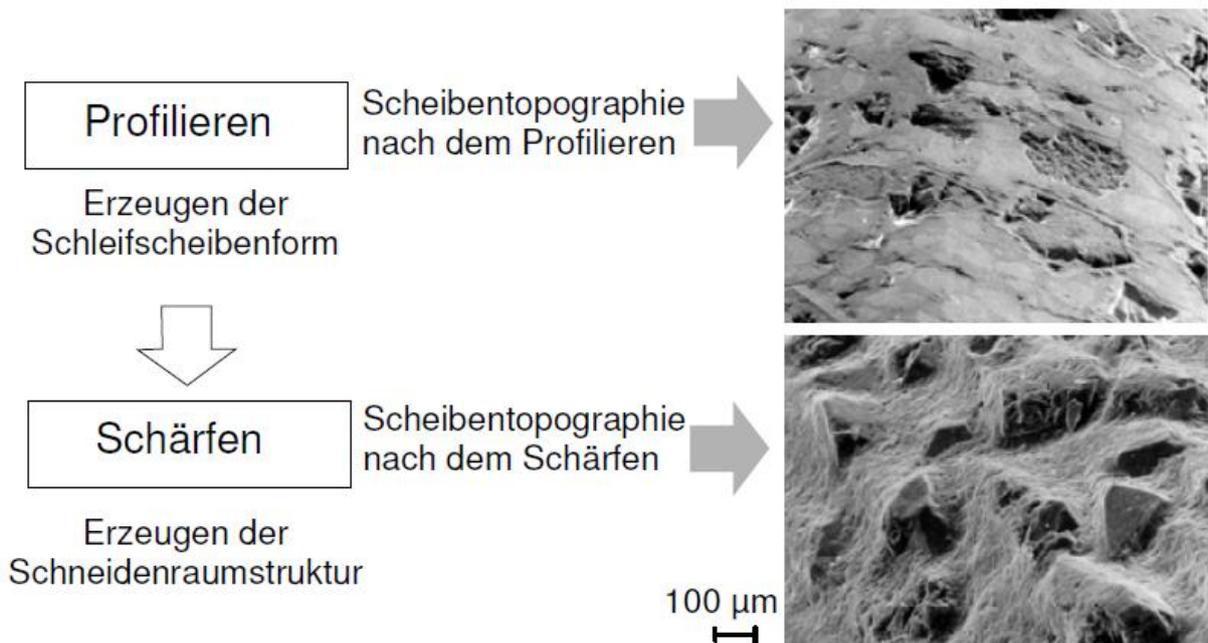


Bild 2.10: Topographieänderung durch Schärfen [Koe96]

2.5 Innenrundscheifen

Beim Innenrundscheifen führen sowohl die Schleifscheibe, als auch das Werkstück eine Rotationsbewegung aus. Genau wie beim Außenrundscheifen gibt es die Prozessvarianten Längsscheifen (**Bild 2.11**), bei der das Werkzeug zusätzlich zum Radialvorschub eine Bewegung in Richtung der Werkstückachse vollführt, und Quer- bzw. Einstechscheifen (**Bild 2.12**), wobei lediglich in Radialrichtung zugestellt wird. Typischen Anwendungen für das Innenscheifen sind z.B. das Bohrungsscheifen von einsatzgehärteten Zahnrädern, das Scheifen der Laufbahnen von Lageraußen- und Lagerinnenringen oder das Innenscheifen von Nockenbohrungen [Hol88].

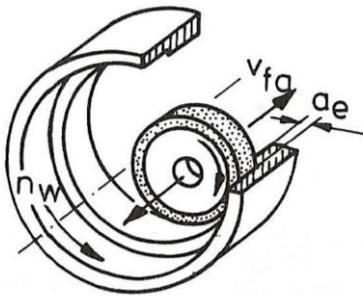


Bild 2.11: Längsumfangsinnenrundscheifen

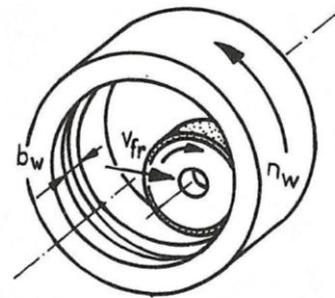


Bild 2.12: Querumfangsinnenrundscheifen

2.5.1 Kennwerte beim Innenrundscheifen

Zur Beurteilung des Schleifprozesses gelten hier die üblichen Größen. Der *G-Wert* (2.4) setzt das Verschleißvolumen der Schleifscheibe ΔV_s in Verhältnis zum zerspannten Werkstückvolumen V_w und stellt somit einen Indikator für die Standzeit des Werkzeugs dar.

$$G = \frac{V_w}{\Delta V_s} \quad (2.4)$$

Das Zeitspanvolumen Q_w ist eine Größe, die das zerspannte Werkstückvolumen pro Zeiteinheit angibt. Es ist somit ein Wert für die Leistungsfähigkeit einer Schleifscheibe bzw. eines Prozesses. In diesem Zusammenhang ist auch das bezogene Zeitspanvolumen Q'_w zu nennen. Es ist mit dem Zeitspanvolumen Q_w vergleichbar, jedoch auf eine Eingriffsbreite von 1 mm bezogen [Hol88].

Zeitspanvolumen und bezogenes Zeitspanvolumen beim Querumfangsinnenrundscheifen (siehe Bild 2.12):

$$Q_w = b_w \times d_w \times \pi \times v_{fr} \quad (2.5)$$

$$Q'_w = d_w \times \pi \times v_{fr} \quad (2.6)$$

Zeitspanvolumen und bezogenes Zeitspanvolumen beim Längsumfangsinnenrundscheifen (siehe Bild 2.11 und Bild 2.13):

$$Q_w = a_e \times d_w \times \pi \times v_{fa} \quad (2.7)$$

$$Q'_w = a_e \times d_w \times \pi \times n_w \quad (2.8)$$

Die Schnittgeschwindigkeit des Werkzeuges berechnet sich analog zum Außenrundscheifen.

$$v_c = n_s \times D_s \times \pi \quad (2.9)$$

Wie beim Abrichten auch sollte ein bestimmtes Verhältnis q von Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe v_c und des Werkstück v_w eingehalten werde. In **Tabelle 2.3** sind entsprechende Richtwerte für verschiedene Werkstoffe aufgelistet.

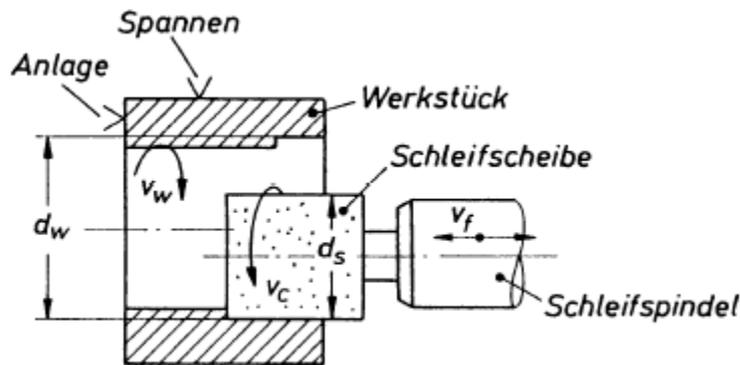


Bild 2.13: Schleifspindel und Werkstück Bewegung [Pau07]

$$q = \frac{v_c}{v_w} \quad (2.10)$$

$$v_w = \pi \times d_w \times n_w \quad (2.11)$$

Tabelle 2.3: Verhältniszahl q für verschiedene Werkstoffe [Tsch08]

Werkstoff	q
Stahl	125
Grauguss	100
Ms und Al	60

2.5.2 Besondere Herausforderungen beim Innenrundscheifen

Das Innenrundscheifen unterscheidet sich von anderen Schleifprozessen in erster Linie durch besonders schwierige Einsatzbedingungen für die verwendeten Werkzeuge.

2.5.2.1 Erreichbare Schnittgeschwindigkeit

Im Gegensatz zu vielen anderen Schleifprozessen, bei denen der Werkzeugdurchmesser häufig alleine durch den Bauraum begrenzt ist, ist beim Innenrundscheifen der Bohrungsdurchmesser das theoretische Maximum des Werkzeugdurchmessers. Da die Wahl des Werkzeugdurchmessers also in hohem Maße durch die Schleifaufgabe vorgegeben ist, können die gewünschten hohen Schnittgeschwindigkeiten v_c nach Formel (2.9) nur durch entsprechend hohe Drehzahlen der Werkzeugspindel erreicht werden. Da die Anschaffung entsprechender Spindeln mit teils erheblichen Kosten verbunden ist und auch hier

Obergrenzen existieren, können die optimalen Drehzahlen nicht immer erreicht werden. Man wählt deshalb beim Innenrundschleifen häufig den Werkzeugdurchmesser so groß wie möglich, um hierdurch hohe Schnittgeschwindigkeiten zu erreichen.

Kleine Werkzeugdurchmesser erweisen sich noch auf eine andere Weise als nachteilig. Durch den entsprechend geringen Umfang der Werkzeuge sind einzelne Schneiden wesentlich häufiger im Eingriff und stumpfen dadurch entsprechend schnell ab. Dies macht ein entsprechend häufiges Abrichten notwendig. Die erreichbaren G-Werte beim Innenrundschleifen sind als Folge häufig vergleichsweise gering.

2.5.2.2 Kontaktlänge

Ebenfalls ungünstig wirkt sich die große Kontaktlänge l_k (2.12) beim Innenrundschleifen aus (**Bild 2.14**). Eine große Kontaktlänge hat eine erhöhte Schleiftemperatur und somit eine größere Randzonenbeeinflussung zur Folge. Es kommt leicht zum Brand. Dies ist zudem besonders problematisch, da eine ausreichende Kühlmittelzufuhr beim Innenrundschleifen aufgrund der sehr beengten Platzverhältnisse nur schwierig zu realisieren ist. Somit wird die Abfuhr der ohnehin erhöhten Schleifwärme zusätzlich erschwert. Auch geht mit einer größeren Kontaktlänge ein Anstieg der Schleifnormalkräfte einher. Auch der Späneabtransport wird durch die beengten Verhältnisse wesentlich erschwert [Pau07, Koe96].

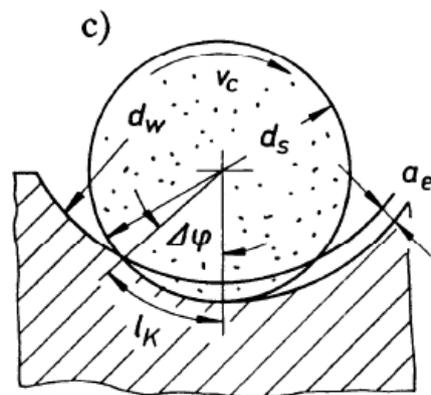


Bild 2.14: Kontaktlänge und Eingriffswinkel beim Innenschleifen [Pau07]

$$l_k = \sqrt{\frac{a_e \times d_s}{1 - d_s/d_w}} \quad (2.12)$$

Wie man leicht erkennt, stellen die verschiedenen Parameter gegensätzliche Anforderungen an den Werkzeugdurchmesser. Während zum Erreichen einer möglichst hohen Schnittgeschwindigkeit ein großer Werkzeugdurchmesser verlangt wird, ist für eine gute

Kühlung und eine kleine Kontaktlänge ein kleiner Werkzeugdurchmesser wünschenswert. Als Kompromiss hat sich in der Praxis das Durchmesserverhältnis

$$\frac{d_s}{d_w} \approx 0,8 \quad (2.13)$$

als optimal herausgestellt [Tsch08].

2.5.2.3 Elastische Verformung des Grundkörpers

Große Zustellungen sind beim Innenrundsleifen nicht möglich, da hohe Schleifkräfte bei den schlanken Schleifkörpern zu verhältnismäßig großen elastischen Verformungen führen und somit Formfehler beim Werkstück verursachen. **Bild 2.15** stellt diese Fehler exemplarisch da. Ein Ausgleichen der Formfehler ist über zum Ende des Schleifzyklus abnehmende Vorschubgeschwindigkeiten und einen längeren Ausfeuerzyklus zwar möglich, erhöht durch längere Hauptzeiten allerdings auch die Werkstückkosten [Pau07].

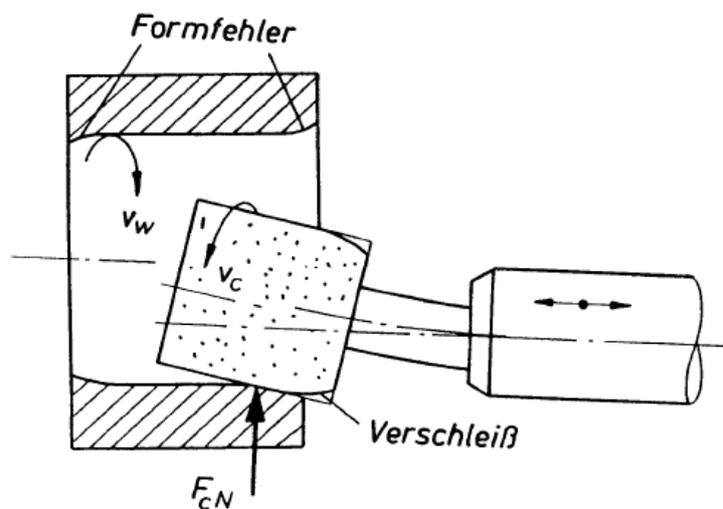


Bild 2.15: Formfehler durch zu große Zustellung beim Innenrundsleifen [Pau07]

3 Einrichtung des Prüfstandes

Im Folgenden Abschnitt wird die Einrichtung des Prüfstandes zum Test von Innenrundscheifkörper im European Grinding Technology Center der Firma Saint-Gobain Diamantwerkzeuge in Norderstedt beschrieben. Das Versuchsfeld des EGTC umfasst bereits eine große Anzahl an unterschiedlichen Schleifmaschinen um ein möglichst breites Spektrum an Verfahren im Bereich der Schleiftechnik abdecken zu können. Eine Innenrundscheifmaschine stand dem EGTC bisher noch nicht zur Verfügung so dass dieser Versuchstand es dem EGTC zukünftig ermöglichen soll, die Forschungs- und Entwicklungsabteilung bei der Weiterentwicklung von Innenrundscheifwerkzeugen und die Anwendungstechnik bei der Prozessoptimierung in Zusammenarbeit mit Kunden zu unterstützen.

3.1 Versuchsmaschine



Bild 3.1: Overbeck 610 I CNC nach der Anlieferung am Standort im EGTC

Als Versuchsmaschine dient eine Innenrundscheifmaschine der Firma Overbeck vom Typ 610 I CNC (siehe **Bild 3.1**). Diese Maschine wurde dazu entwickelt, sowohl Innen- als auch Außenrundscheifoperationen in einer Werkstückaufspannung durchführen zu können. Hierzu besitzt die Overbeck 610 I CNC einen Revolverspindelwechsler, der mit bis zu vier Schleifspindeln bestückt werden kann. Dadurch ist die Maschine für das Versuchsumfeld

besonders attraktiv, denn dies bietet die Möglichkeit Spindeln mit unterschiedlichen Eigenschaften für verschiedene Testprozeduren parallel auf der Maschine installiert zu haben. Dadurch erhöht sich die Flexibilität und die Rüstzeit zwischen Versuchsserien wird verringert. Die Maschine konnte vom Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover übernommen werden. Sie war dort bereits als Versuchsmaschine im Einsatz.

Die Overbeck 610 I CNC besitzt drei CNC gesteuerte Achsen X, Z und U, wobei über die X- und Z-Achse das Werkzeug in der Ebene verfahren wird und die U-Achse für das Verfahren der Werkstückspindel in gleicher Richtung wie die X-Achse dient. Zusätzlich erfolgt die Anwahl der Spindelposition im Spindelwechsler ebenfalls durch die CNC Steuerung, wodurch die kombinierte Bearbeitung des Werkstücks durch verschiedene Werkzeuge in einem einzigen CNC Programm ermöglicht wird. Als CNC Steuerung kommt eine Marposs E 9034 (Farbdisplay) zum Einsatz. Die Bedienung erfolgt durch Softkey Tasten zur Dateneingabe und OSB-Tasten am unteren Bildschirmrand.

Als Abrichteinheit ist in der Maschine eine Abrichtspindel der Firma IBAG für die Verwendung von Diamanttopfscheiben verbaut. Da ein rotierender Abrichter für die Overbeck 610 I CNC noch nicht Serienstandard war und die Maschine auch mit stehendem Abrichter verwendet werden konnte, ist die Abrichteinheit in die CNC Steuerung nicht voll integriert. Zwar wird die Abrichtspindel über die Steuerung beim Abrichten an- und abgeschaltet, allerdings müssen die Sollwertvorgaben für die Drehzahl separat direkt am Frequenzumrichter der Spindel erfolgen. Dadurch muss der Bediener darauf achten die Drehzahl der Abrichtspindel für unterschiedliche Abrichtzyklen selbständig und rechtzeitig anzupassen.

Tabelle 3.1: Technische Daten Overbeck 610 I CNC

Technische Daten Overbeck 610 I CNC				
Baujahr		1994		
Steuerung		Marposs E 9034		
Netzspannung		400 [V] 50 [Hz]		
Steuerspannung		230 [VAC] / 24 [VDC]		
Max. Aufnahme		51,7 [kVA] / 74,6 [A]		
Spindeln				
GMN HSX 120-60000/7		bis $n_s = 60000$ [1/min]	Spindelleistung	7 [kW]
TSSV 170-9000		bis $n_s = 9000$ [1/min]	Spindelleistung	9 [kW]
Achsen				
X-Achse	Verfahrgeschwindigkeit	2000 [mm/min]	Max. Verfahrweg	120 [mm]
Z-Achse	Verfahrgeschwindigkeit	2000 [mm/min]	Max. Verfahrweg	480 [mm]
U-Achse	Verfahrgeschwindigkeit	2000 [mm/min]	Max. Verfahrweg	220 [mm]

Aufstellung und Anschluss

Die größte Herausforderung für die Anlieferung und das Aufstellen der Maschine stellten zunächst die relativ großen Abmessungen der Maschine dar. Zunächst musste im Bereich des Versuchsfeldes des EGTC ein geeigneter Platz für die Maschine gefunden werden. Da keine geeignete Freifläche in entsprechender Größe zur Verfügung stand, musste zwangsläufig eine Neustrukturierung des Maschinenparks erfolgen. Natürlich durfte der laufende Versuchsbetrieb dadurch so wenig wie möglich gestört werden. Daher musste der Aufstellungsort so gewählt sein, das dazu möglichst wenige der bereits vorhandenen Maschinen an einen neuen Standort zu verbringen waren.

Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen kamen zwei mögliche Standorte in Frage. Um die Standortauswahl zu vereinfachen wurden Kriterien festgelegt, mit denen beide Standorte per Nutzwertanalyse verglichen wurden. Besonders vorteilhaft beim späteren Standort war der Umstand, dass die Versorgungsleitungen für Strom, Druckluft und die zentrale Naßabsaugung bereits vorlagen. Zusätzlich verliefen zu diesem Standort bereits eine Zu- und eine Ableitung

vom zentralen KSS-System. Dies war ein weiterer Vorteil, da bereits die Möglichkeit in Betracht gezogen wird, die Maschine in der Zukunft an dieses System anzuschließen.

Nach der Anlieferung konnte die Maschine nun an ihrem Aufstellungsort mit den notwendigen Versorgungsleitungen verbunden werden. Hierzu benötigt die Overbeck 610 I CNC die Anschlüsse an das Stromnetz und eine Druckluftversorgung für Sperrluft und Nebelschmiereinheiten. Außerdem sollen in dieser Phase bereits Vorbereitungen getroffen werden, zu einem späteren Zeitpunkt die Kühlmittelanlage der Overbeck mit dem zentralen Kühlmittelsystem des EGTC koppeln zu können.

3.1.1.1 Elektrik

Die Arbeiten im Rahmen der elektrischen Inbetriebnahme umfassten im Wesentlichen zwei Bereiche: Zum einen die Verbindung der einzelnen Maschinenkomponenten mit dem Schaltschrank und zum anderen den Anschluss des Schaltschranks an das Netz.

Die Verbindung aller Einzelkomponenten mit dem Schaltschrank erfolgte über Steckverbindungen. Hierzu wurde schon bei der Aufstellung der Maschine darauf geachtet, dass alle Komponenten so gruppiert wurden, dass mit den vorhandenen Kabellängen eine sichere und geordnete Verlegung der Anschlüsse möglich war.

Für den Netzanschluss der Overbeck musste ein Hauptanschluss von der elektrischen Sammelschiene der Halle zum Eingang des Schaltschranks gezogen werden. Dazu war es notwendig, zunächst einen neuen Sicherungskasten an der Sammelschiene anzubringen, da die Overbeck eine überdurchschnittlich große Nennstromaufnahme besitzt und die Standardanschlüsse der Sammelschiene hierzu nicht ausreichend abgesichert sind. Abschließend musste ein Kabelkanal und elektrische Leitungen mit einem ausreichend großen Querschnitt zum Schaltschrank gezogen und entsprechend angeschlossen werden.

3.1.1.2 Pneumatik

Zusätzlich zum elektrischen Anschluss benötigt die Overbeck noch einen Anschluss an eine stabile Druckluftversorgung mit mindestens 6 bar. Auch diese stand im EGTC bereits zu Verfügung, daher mussten lediglich noch Leitungen zum Eingang der Zentralschmierung gelegt werden. Die Druckluft wird bei der Overbeck 610 I CNC als Sperrluft für Spindeln und Führungen, sowie für die verschiedenen Ölnebelschmieraggregate der Zentralschmierung verwendet. Ein weiterer Anschluss wurde für das pneumatisch betriebene Kraftspannfutter

benötigt, das in der Maschine zum Zeitpunkt der Anlieferung verbaut war. In diesem Zuge wurde auch ein Schlauch mit Druckluftpistole für den Maschinenbediener zur Tür des Arbeitsraumes verlegt.

3.1.1.3 Kühlschmiermittelsystem

Die Overbeck 610 I CNC verwendet in ihrer Standardkonfiguration einen geschlossenen KKS-Kreislauf für Kühlschmieremulsion. Ein Betrieb mit Öl als Kühlschmiermittel ist ohne umfangreiche Umbauten nicht möglich, da hierzu die zwingend erforderlichen Sicherheitseinrichtungen (u.a. ein automatisches Feuerlöschsystem) erst nachgerüstet werden müssten. In der Emulsion wird das Kühlschmierkonzentrat Rotorol Syn der Firma Ölheld in 3%-iger Konzentration verwendet. Zur Filterung des Kühlschmierstoffes verwendet die Overbeck einen automatischen Schwerkraftbandfilter der Firma Faudi vom Typ ABF 0,7/700 (**Bild 3.2**). Dieser Filter besitzt eine Filterleistung von 80 l/min (Anhaltswerte für Viskosität 1 mm²/s und mittlere Vliesqualität) ein KSS-Fassungsvolumen von 250 l. Das verwendete Filtervlies ist FB 40 der Firma Fil-Tec mit einem Gewicht von 40 g/m² und Porengröße (größte/mittlere) 95/70 µm.



Bild 3.2: Faudi Schwerkraftbandfilter ABF 0,7/700

Da das EGTC bereits einen zentralen Kühlmittelkreislauf mit einer Zentrifuge zur Filterung der Kühlschmieremulsion besitzt, ist bereits während der Planungsphase für die Aufstellung der Maschine die Idee verfolgt worden, die Overbeck an dieses System anzuschließen. Wie in **Tabelle 3.2** dargestellt, besitzt eine Zentrifuge besonders im Bereich der Reinheit des gefilterten Mediums deutliche Vorteile gegenüber einem Bandfilter. Nachteil des zentralen Zentrifugensystem ist allerdings die Abhängig mehrerer Werkzeugmaschinen von einer Filteranlage. Sollte diese ausfallen, würden gleichzeitig mehrere Maschinen betriebsunfähig

werden. Außerdem ist ein solches System weniger flexibel; alle angeschlossenen Maschinen müssen zwangsläufig den gleichen KSS verwenden. Eine Anpassung auf einen speziellen Prozess oder Versuche mit verschiedenen KSS-Zusätzen sind somit kaum möglich.

Tabelle 3.2: Übersicht der Vor- und Nachteile von Bandfilter gegenüber Zentrifugalfilterung

	Vorteile	Nachteile
Schwerkraft Bandfilter	<ul style="list-style-type: none"> - einfach und zuverlässig - wartungsarm - vollautomatische Arbeitsweise - kontinuierliche Filterung 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Durchlaufleistung - lediglich mittlere Filterfeinheit
Zentrifugalfilterung	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Reinheitsgrad des KSS - Filterung von Feinstpartikeln - hohe Durchlaufmengen möglich - beliebig großes KSS-Reservoir - vollautomatische Arbeitsweise 	<ul style="list-style-type: none"> - aufwendigere Wartung - teure Anschaffung

In Anbetracht der geplanten Verwendung der Overbeck 610 I CNC als möglichst flexible Versuchsmaschine wurde somit entschieden, den vorhandenen Bandfilter zu verwenden. Um eine spätere Umrüstung auf Zentralkühlung zu vereinfachen wurde jedoch bereits eine Zulauf- und eine Rücklaufleitung vom/zum Zentrifugensystem in die Nähe der entsprechenden Maschinenanschlüsse gelegt.

Zusätzlich zu diesen Anschlüssen wird ein Sammelbecken an der Maschine benötigt, aus dem der KSS zurück in die Zentrifuge gepumpt werden kann, da der Kühlmittelabstrom aus dem Arbeitsraum in der Regel zu gering ist um direkt zurück gepumpt zu werden. Es wurde daher geplant, für diesen Zweck einfach die KSS-Wanne der Bandfilteranlage zu nutzen und die Pumpe der Bandfilteranlage zu verwenden, den KSS später in die Zentrifuge zurück zu pumpen. Dies setzt allerdings eine Änderung der Ansteuerung der KSS-Pumpe der Bandfilteranlage voraus. Bisher wird die Pumpe über die Maschinensteuerung geschaltet, sobald die Kühlmittelventile geöffnet werden. Erfolgt die Umstellung auf den Betrieb mit Zentrifugensystem, muss dies gegen eine Ansteuerung durch einen Schwimmerschalter ersetzt werden um sicher zu stellen, dass ein Überlaufen des Sammelbeckens vermieden wird.

3.1.1.4 Nassabsaugung

Bei der Arbeit mit Kühlschmierstoffen in Werkzeugmaschinen können gesundheitsschädliche Dämpfe entstehen (zum Beispiel durch Verspritzen und Vernebeln während des Arbeitszyklus). Außerdem kann der Kühlschmierstoff an stark erhitzten Teilen, wie Werkstücken, Werkzeugen oder Spänen verdampfen. Die auftretenden Aerosole bzw. Dämpfe können eingeatmet oder über Haut und Schleimhäute aufgenommen werden. So können sie Reizungen der Haut und Atemwege oder toxische Veränderung von Organen hervorrufen und unter Umständen, sogar krebserregend wirken. Aus diesem Grund ist eine Absaugung der Luft aus dem Maschineninneren als Maßnahme der Arbeitssicherheit von großer Bedeutung [VDMA02].

Da die Overbeck selbst keine eigenständige Aufbereitung der Luft im Arbeitsraum besitzt, musste die Maschine an eine externe Absauganlage angeschlossen werden. Eine Naßabsaugung steht in der Halle des EGTC zur Verfügung, somit war lediglich eine Verbindung mit diesem System erforderlich.

Funktionsprüfung und Fehlerbeseitigung

3.1.1.5 Steuerungsdisplay

Der erste Punkt bei der Fehlerbeseitigung betraf das Display der Marposssteuerung. Bei diesem handelte es sich, dem Baujahr der Maschine entsprechend, um einen Röhrenfarbmonitor. Durch einen Defekt in den Ablenkspulen oder deren elektrischer Ansteuerung war das Bild auf dem Display stark verzerrt und in Fehlfarben dargestellt. Besonders in den Randbereichen waren die Bildschirminformationen kaum zu entziffern.

Die Firma Marposs selbst bietet für ihre Steuerungen keinerlei Service mehr an, und auch Ersatzteile sind direkt über den Hersteller nicht mehr zu beziehen. Eine Lösung bietet hier die Firma Tsubis Electronic Display & System Solution, die für eine große Anzahl an Steuerungstypen Ersatzdisplay herstellt. Mit ihrer Unterstützung konnte der fehlerhafte CRT-Monitor durch ein modernes TFT-Display ersetzt werden. Die Geräte der Firma Tsubis sind speziell auf die Steuerung angepasst und mit genau gefertigten Vorsatzrahmen für die jeweilige Steuerung ausgestattet, so dass die Geräte elektrisch und mechanisch mit den Originaldisplays übereinstimmen und ein Austausch ohne weitere Anpassungen möglich ist.

3.1.1.6 Achsmesssystem X-Achse

Ein schwerwiegendes Problem das zunächst allerdings nicht auffiel betraf das Messsystem der X-Achse. Es stellte sich heraus, dass die tatsächliche Zustellung der X-Achse nicht mit den programmierten Werten übereinstimmte und Bohrungen stets auf zu kleine Durchmesser geschliffen wurden.

Während der Fehlersuche viel auf, dass der tatsächliche Verfahrweg der Achse genau einem Viertel der Bildschirmanzeige entsprach. Da die X-Achse als durchmesserbezogene Achse arbeitet wäre allerdings eine Zustellung zu erwarten, die der halben Bildschirmanzeige entspricht.

In Zusammenarbeit mit dem Serviceteam der Firma Overbeck konnte der Fehler auf den Glasmaßstab, seinen Tastkopf oder die dazugehörigen Übertragungselektronik eingegrenzt werden, die bei der Firma Overbeck unter der Bezeichnung EXE firmiert. Da eine Überprüfung von Glasmaßstab und Tastkopf keine Fehlerquellen offenbarte, musste der Fehler somit in der Übertragungselektronik zu finden sein. Nach Rücksprache mit dem Servicetechniker der Firma Overbeck wurde als Fehlerquelle eine falsche Einstellung der Dipschalter des Moduls als Fehlerquelle ausgemacht. Dieser Fehler ließ sich letztendlich einfach beheben.

3.1.1.7 Druckluftsystem

Das Druckluftsystem der Maschine erwies sich anfangs als sehr unzuverlässig. Selbst geringe Druckabfälle sorgten bereits zu einem Unterschreiten des Minimaldrucks eines der Druckwächter, wodurch häufige Fehlermeldungen ausgelöst wurden, die den Automatikbetrieb unterbrachen. Da der Eingangsdruck des Systems deutlich über den geforderten 6 bar lag war anzunehmen, dass auch in diesem Fall eine Störung vorlag die für die starken Druckabfälle im System verantwortlich war. Nach systematischer Untersuchung der verschiedenen Druckluftkreisläufe konnten ein Leck in einem der Sperrluftschläuche der Linearführung der Z-Achse und ein defektes, pneumatisch geschaltetes Kühlmittelventil als Hauptursache für den übermäßig starken Druckabfall des Systems ausgemacht werden. Nach dem Austausch des defekten Ventils und des Druckschlauches war der Druck im System fortan konstant auf einem Niveau, das ausreichend Sicherheit bei Druckschwankungen bot. Das häufige Auslösen des Druckwächters war somit behoben.

3.1.1.8 Eilgang X-Achse

Nach der in **Kapitel 3.1.1.6** beschriebenen Reparatur trat ein weiteres Problem im Zusammenhang mit der Achse auf. Nun löste ein schnelles Beschleunigen dieser Achse, wie es z.B. im Eilgang der Fall ist, einen schweren Ausnahmefehler aus, der lediglich durch einen Neustart der Steuerung zurückgesetzt werden kann.

Nach Angaben des Overbeck Service ist ein solcher Fehler entweder auf einen gelockerten Tastkopf der entsprechenden Achse oder zu große Reibungswiderstände beim Verfahren der Achse zurückzuführen. Da der Tastkopf als Fehlerquelle ausgeschlossen werden konnte, muss es sich um defekte Lager der Antriebsspindel dieser Achse oder einen ähnlichen Defekt handeln, der einen erhöhten Reibungswiderstand bewirkt. Dies führt beim Beschleunigen der Achse zu einer erhöhte Stromaufnahme des Achsenantriebs wodurch dieser sicherheitshalber von der Steuerung abschaltet wird.

Dennoch handelt es sich hierbei um ein eher geringfügiges Problem, da ein Auftreten durch eine geeignete Programmierung der Automatikzyklen weitgehend vermieden werden kann. Da eine Reparatur dieses Fehlers sehr zeitaufwendig ist und durch entsprechende Handhabung durch den Bediener weitestgehend vermieden werden kann, wurde entschieden, eine Reparatur zunächst zurückzustellen, um so eine weitere Verzögerung zu vermeiden.

3.1.1.9 HF-Umformer

Zu Beginn der Schleifversuche trat ein schwerwiegender Fehler auf, der sich darin äußerte, dass die Spindeln entweder gar nicht oder nur mit minimaler Drehzahl anliefen. Zunächst wurde geprüft ob die Arbeitsspindeln eventuell einen Defekt aufweisen. Dies erschien allerdings eher unwahrscheinlich, da der Fehler bei beiden Spindeln zeitgleich auftrat. Nach einer elektrischen Prüfung konnten die Motoren als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Daher blieben als potentielle Fehlerquellen die Steuerung und der HF-Umformer der Werkzeugspindeln.

Die Overbeck 610 I CNC verwendet einen Hochfrequenzumformer vom Typ CV4 18/380/300M der Firma Acomel (siehe **Bild 3.3**). Dabei wird der Umformer für alle angeschlossenen Werkzeugspindeln verwendet. Als erstes wurde überprüft ob die Steuerung das korrekte Sollwertsignal an den HF-Umformer sendet. Dies war der Fall, somit blieb als Fehlerquelle noch der HF-Umformer.

Anhand der Status-LEDs konnte mit Hilfe des Handbuches eine Fehlerfindungsprozedur abgearbeitet werden, die das Problem schlussendlich auf einen Defekt in einer der Halbleiterkarten des Umformers eingrenzte. Dies stellte sich als sehr problematisch heraus, da die Firma Acomel keinerlei Service oder Ersatzteile für die Umformer anbietet. Auch nach Rücksprache mit dem Service der Firma Overbeck konnte keine direkte Lösung gefunden werden, da auch die Firma Overbeck keine Restbestände an Ersatzteilen für diesen Umformertyp mehr besitzt.



Bild 3.3: Ansicht des geöffneten HF-Umformers (defekte Steuerungselektronik im vorderen Bereich sichtbar)

Eine unerwartete Lösung des Problems trat nach dem erneuten Zusammensetzen des Umformers auf, da er zunächst wieder einwandfrei funktionierte. Am darauffolgenden Tag versagte er jedoch erneut. Nach einem erneuten Zerlegen, Fehlersuche und Zusammensetzen arbeitet er seither jedoch wieder einwandfrei.

Nach einhelliger Meinung der Elektronikfachleute sowohl bei Overbeck als auch bei Saint-Gobain bleibt jedoch ein latenter Defekt in einer der analogen Steuerkarten des Umformers verborgen. Mit einem erneuten und eventuell dauerhaften Ausfall muss somit jederzeit gerechnet werden. Die Fehlerfindung bei einer analogen Steuerkarte ist sehr aufwendig, insbesondere da die notwendigen Schaltpläne dafür nicht zur Verfügung stehen. Somit ist eine

Reparatur des Acomel Umformers wahrscheinlich wirtschaftlich nicht ratsam. Als Alternative bleib hier nur ein kompletter Austausch des HF-Umformers. Da Firma Acomel keine Umformer mehr herstellt müsste ein Umrichter neueren Typs genau an die Gegebenheiten der Overbeck 610 I CNC angepasst werden, was sowohl den Kosten- als auch den Arbeitsaufwand für die Umrüstung signifikant in die Höhe treiben wird. Daher wurde beschlossen, die Umrüstung aus Zeitgründen zurück zu stellen, da eine Verwendung der Maschine im Zuge dieser Arbeit ansonsten wohl nicht mehr möglich gewesen wäre.

3.2 Maschinenumbau

Die Ansprüche an eine Versuchsmaschine in einer Entwicklungsabteilung sind naturgemäß anders, als die, die an eine Maschine in einer Produktionsumgebung gestellt werden. Im Versuchsumfeld ist es besonders wichtig bestimmte Prozessgrößen wie z.B. die Schleifleistung oder die Schleifkräfte messtechnisch zu erfassen und auswerten zu können. Auch ist es von großem Vorteil, wenn der Prüfstand möglichst flexibel einsetzbar ist, sodass eine große Bandbreite an Anwendungen, Werkzeugen und Prozessparametern untersucht werden kann.

Zuvor war die Overbeck beim Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Universität Hannover ebenfalls als Versuchsstand im Einsatz. Daher war es zunächst notwendig, die am IFW vorgenommenen Veränderungen rückzubauen und die Maschine damit wieder weitestgehend in den Originalzustand zu versetzen. Dies bezieht sich in erster Linie auf die Abrichteinheit der Maschine, da diese zu Versuchszwecken anders im Arbeitsraum positioniert worden war. Hierdurch waren Schleifoperationen nicht mehr möglich. Wie in **Bild 3.4** zu sehen ist, wurde die Abrichteinheit soweit vorgezogen montiert, dass das Werkzeug in der Z-Achse (im Bild horizontal) nicht mehr kollisionsfrei an dem Abrichter vorbei zum Werkstück verfahren werden konnte.

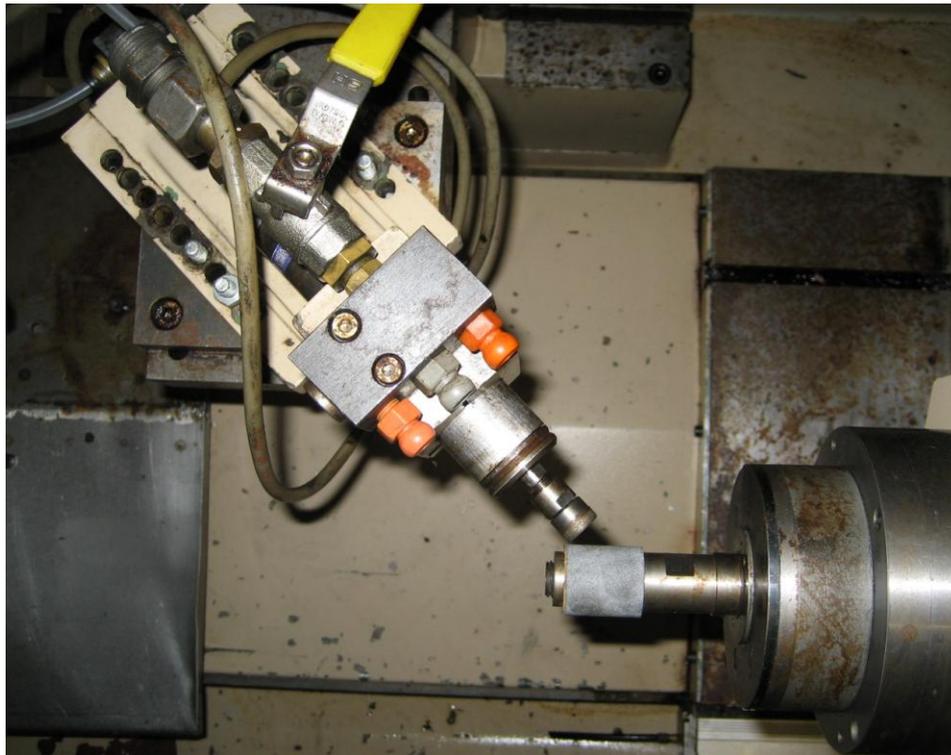


Bild 3.4: Draufsicht auf Schleifspindel und die weit in den Arbeitsraum vorgezogene Abrichteinheit

3.2.1 Werkstückspannfutter

Bei dem vorgefundenen Werkstückspannfutter handelte es sich um ein pneumatisch betätigtes Dreibacken-Vorderend-Futter der Firma PMH mit ausgedrehten Aufsatzbacken. Nachteilig an diesem Futter ist die geringe Flexibilität, da der Backenhub bei diesem Typ lediglich 3 mm beträgt. Daher müsste für jeden Werkstückdurchmesser, den man auf der Maschine spannen möchte, zunächst ein Satz Backen angefertigt werden.

Es ist jedoch abzusehen, dass im Rahmen der Versuche des EGTC verschiedenartige Werkstücke zum Einsatz kommen werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist ein Futter mit größerem Backenhub und Stufenaufsatzbacken, trotz geringerer Präzision, weitaus besser geeignet. Daher wurde beschlossen, das Futter dementsprechend auszutauschen.

3.2.1.1 Auswahl des Futters

Nachdem anfänglich eine Reihe verschiedener Optionen betrachtet wurde, konnte die Auswahl schließlich auf zwei Handspannfutter der Firma Röhm eingegrenzt werden. Zur Auswahl standen zum einen ein Dreibacken Planspiralfutter ZG Hi-Tru und zum anderen ein Dreibacken Keilstangenfutter Duro-T. Das Hi-Tru Futter besitzt hierbei den Vorteil, dass die Backen unabhängig radial nachgestellt werden können, um somit die Rundlaufgenauigkeit zu verbessern.

Zur Entscheidungsfindung wurde eine Nutzwertanalyse erstellt (siehe **Tabelle 3.3**). Hierzu wurden die wichtigsten Anforderungen an ein neues Futter als Kriterien für die Analyse festgelegt und mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Dann wurden die beiden Optionen in jeder Kategorie bewertet, hierbei steht ein Wert von:

- 0 = Erwartung mäßig erfüllt
- 1 = Erwartung weitestgehend erfüllt
- 2 = Erwartung voll erfüllt

Kriterien von hoher Bedeutung wurden mit einem Gewichtungsfaktor von 2 gewichtet. Hierunter fallen:

- Die Flexibilität, also die Möglichkeit, mit möglichst geringem Aufwand und geringer Vorbereitungszeit möglichst viele verschiedenartige Werkstücke spannen zu können
- Lieferzeit, um den Prüfstand termingerecht in Betrieb nehmen zu können

Alle Kriterien mit untergeordneter Bedeutung wurden mit einem Gewichtungsfaktor 1 gewichtet:

- Rundlaufgenauigkeit (für die Anforderungen des EGTC reicht hier eine normale Genauigkeit aus)
- Schmutzbeständigkeit
- Kosten

Tabelle 3.3: Nutzwertanalyse der verschiedenen Futtervarianten

Kriterien Futtertyp	Rundlaufgenauigkeit	Flexibilität der Spannmöglichkeiten	Schmutzbeständigkeit	Kosten	Lieferzeit	Ergebnis
Gewichtung	1	2	1	1	2	
Röhm Duro-T	1	2	2	1	2	12
Röhm ZG Hi-Tru	2	2	1	0	0	7

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse ergibt, dass das Duro-T Futter von Röhm für diesen Fall die geeignete Wahl ist, da es eine gleich hohe Flexibilität wie das High-Tru Futter besitzt, für

den Einsatz in Verbindung mit Schleifschlämmen besser geeignet ist und kurzfristig zur Verfügung steht.

3.2.1.2 Futterflansch

Die Werkstückspindel der Overbeck 610 I CNC besitzt keine Aufnahme für Spannfutter, die den heute gängigen Standards entspricht. Bereits das auf der Maschine vorgefundene Futter benötigte einen speziell angepassten Flansch. Da der vorhandene Flansch folgerichtig nicht für die von der Firma Röhm angebotenen Aufnahmevarianten geeignet war, musste zusätzlich ein Flansch zur Aufnahme des zugekauften Futters angefertigt werden.

Bild 3.5 zeigt eine Explosionszeichnung der Komponenten Werkstückspindel (links), Futterflansch (Mitte) und Futtergrundkörper (rechts). Der Futterflansch ist so konstruiert, dass er auf der einen Seite ein passendes Gegenstück für die zylindrische Zentrieraufnahme der Werkstückspindel darstellt und auf der anderen Seite eine zylindrische Zentrieraufnahme nach DIN 55021 für die Aufnahme des Futters besitzt. Der Flansch wurde auf der Futterseite gemäß DIN 55021 nach Angaben aus dem Produktdatenblatt konstruiert. Auf der Werkstückspindelenseite wurde der Flansch nach einer Fertigungszeichnung der Werkstückspindel aus der Dokumentation der Overbeck 610 I CNC konstruktiv ausgelegt. Die Bauhöhe des Flansches resultierte aus einer Anforderung des Abrichterumbaus und ergab sich durch die in diesem Zusammenhang notwendige Z-Achsen Position der Stirnseite des Futters im Arbeitsraum.

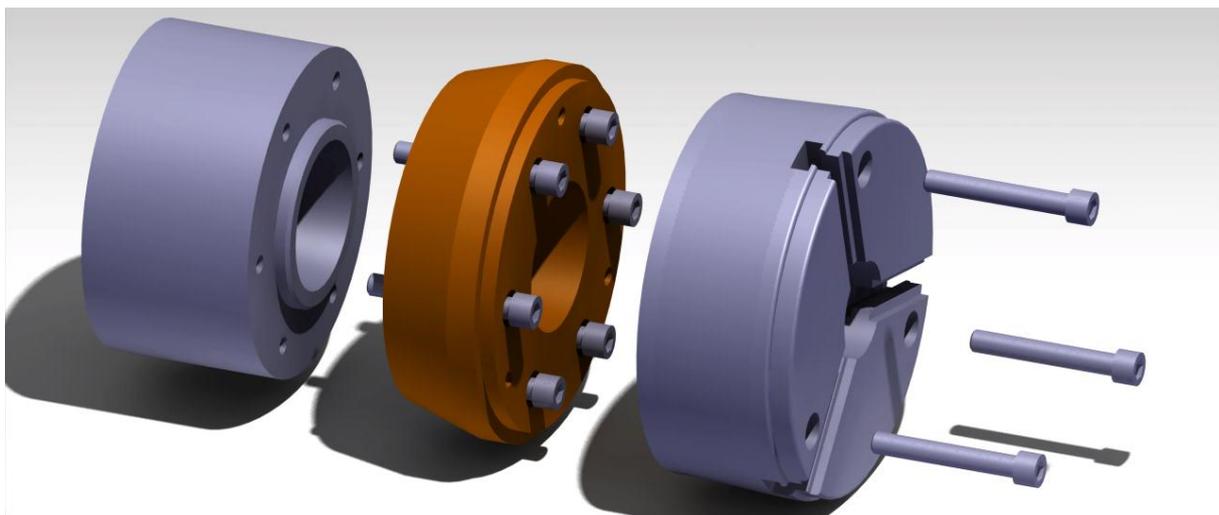


Bild 3.5: Futterflansch (Mitte) zur Montage des Futterkörpers an die Werkstückspindel

3.2.2 Abrichteinheit

Die Abrichteinheit (**Bild 3.6**), die vom IFW auf der Maschine zuvor genutzt wurde, war für die Verwendung von Topfabrichtstiften (**Bild 3.7**) vorgesehen. Für den Einsatz im EGTC sollte die Maschine mit einer Abrichteinheit ausgestattet werden, auf der DDS und Form-Rollen der Firma Saint-Gobain verwendet werden können. Aus diesem Grund wurde beschlossen, das vorhandene System gegen eine Abrichtspindel mit größerer Leistung und einer Aufnahme für die entsprechenden Werkzeuge auszutauschen.



Bild 3.6: IBAG-Abrichtspindel mit Spindelhalter



Bild 3.7: Diamanttopfabrichter

Die Overbeck 610 I CNC war ausgestattet mit einer Abrichtspindel der Firma IBAG (Kenndaten siehe **Tabelle 3.4**). Diese Spindel ist für die Verwendung von Diamant-Abrichttöpfen gedacht und üblicherweise senkrecht zur Werkzeugachse montiert. Angesteuert wurde diese Spindel über einen separaten Frequenzumformer, der im Bedienpult der Maschine verbaut war. Die Drehzahlregelung erfolgte direkt am Umformer und konnte nicht über die Maschinensteuerung beeinflusst werden.

Tabelle 3.4: Kenndaten der IBAG Abrichtspindel

Abrichtspindel IBAG HF-335-60	
Außendurchmesser [mm]	33
Max. Drehzahl [1/min]	6000 - 60.000
Leistung S6 60% [kW]	0,125
Schmierung	Öl-Nebel
Kühlung	Luft

3.2.2.1 Geplante Abrichteinheit

Als Ersatz sollte eine Abrichtspindel der Firma Fischer (Kenndaten siehe **Tabelle 3.5**) verwendet werden, die zuvor in einer Außenrundscheifmaschine der Firma Studer im Einsatz war und somit direkt eingesetzt werden konnte. Der passende Spindelblock für diese Spindel sollte ebenfalls möglichst weiter verwendet werden.

Tabelle 3.5: Kenndaten der Fischer Abrichtspindel

Abrichtspindel Fischer AES-72-230	
Außendurchmesser [mm]	72
Max. Drehzahl [1/min]	8979
Spannung [V]	220
Leistung S6 60% [kW]	0,4
Schmierung	Fett
Kühlung	Luft

Als Abrichtwerkzeug wurde eine Winter SG-Formrolle SG 71P-130-0,6 mit Stahlgrundkörper ausgewählt.

3.2.2.2 Platzbedarf- und Kollisionsanalyse

Im Zuge der Umbauplanung musste zunächst festgestellt werden, ob die Spindel so montiert werden kann, dass eine kollisionsfreie Verfahren aller Achsen weiterhin möglich ist. Obwohl der Arbeitsraum der Overbeck sehr groß gestaltet ist, stellten die maximalen Verfahrswege der Achsen eine erhebliche Einschränkung für die Montage der Spindel dar. Besonders problematisch ist der geringe Verfahrsweg der X-Achse von lediglich 120mm (siehe auch

Tabelle 3.1).

Problematisch ist auch die Ausrichtung der Spindel, da diese für die Verwendung der SG-Formrolle nun annähernd koaxial zu Werkzeugachse montiert sein muss. Daher muss die volle Länge der Abrichtspindel nun in dem Raum zwischen Werkstückspindelblock und Spindelwechsler untergebracht sein. Beim Einfahren des Werkzeuges in ein Werkstück verringert sich der Abstand zwischen den beiden Komponenten erheblich. Bei der Montage der Abrichtspindel rechtwinklig zur Werkzeugachse war dies unkritisch, bei einer Quermontage, wie sie für die neue Konfiguration nötig ist, ist der verbleibende Raum sehr gering.

Zusammengefasst war die Herausforderung im Wesentlichen drei gegensätzliche Anforderungen zu vereinen:

- Die Abrichtspindel muss so dicht an der Werkzeugachse montiert sein, dass das Werkzeug trotz des geringen Verfahrweges der X-Achse zum Abrichten an die Abrichtrolle herangefahren werden kann.
- Die Abrichtspindel muss ausreichend weit von der Werkzeugachse entfernt sein, dass beim Schleifen Werkzeug, Schleifspindel und Spindelwechsler kollisionsfrei verfahren können
- Beim Verfahren der U-Achse darf es zu keiner Kollision zwischen Futter und Abrichtspindel kommen

Aufgrund dieser komplizierten Kinematik im Arbeitsraum und der beengten Platzverhältnisse, wurde ein möglichst genaues digitales 3D Modell des Arbeitsraumes erstellt (**Bild 3.8**). Dazu wurden Position und Maße aller kritischen Bauteile sorgfältig vermessen und in das Modell übernommen, sowie die Verfahrswege aller Achsen und deren Endlagen korrekt nachgebildet.

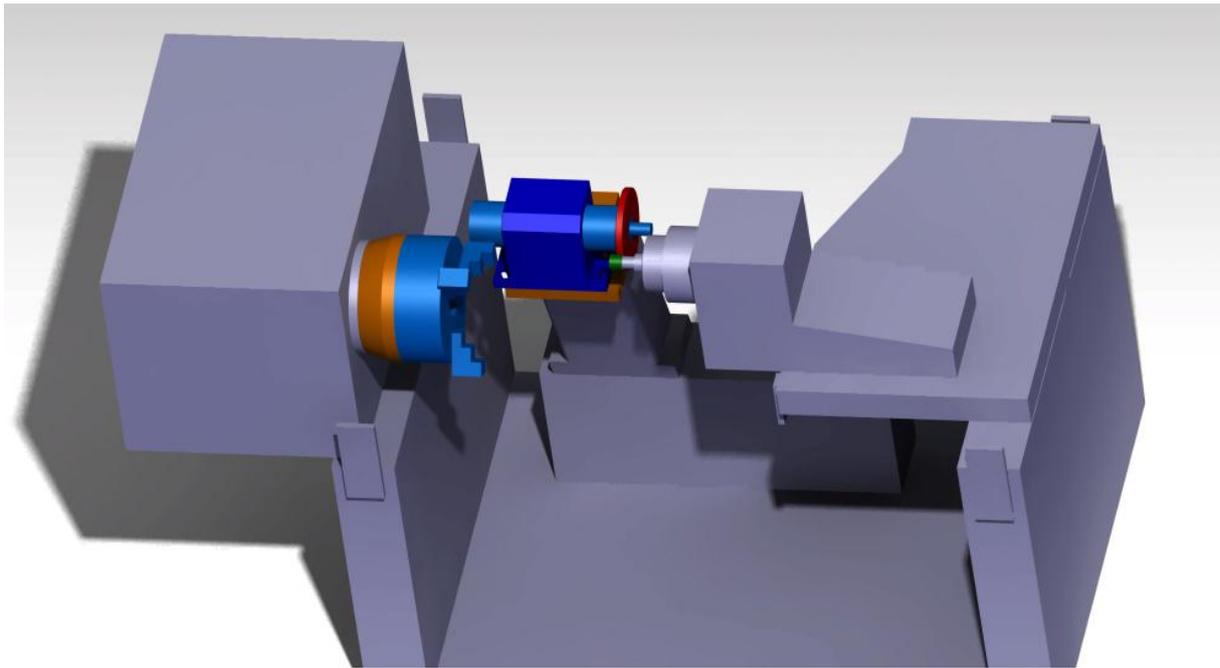


Bild 3.8: Frontansicht des 3D Modells des Arbeitsraumes der Overbeck 610 I CNC

Zunächst konnte das Modell nun dazu benutzt werden eine Position zu finden, an der die Abrichtspindel positioniert werden kann ohne in Konflikt mit anderen Maschinenteilen zu geraten. Im zweiten Schritt diente das Modell dann dazu einen Stützblock zu konstruieren, um die Abrichtspindel in ihrem Halteblock an der ermittelten Position zu montieren. **Bild 3.9** zeigt diesen Stützblock, in **Bild 3.8** ist er in der Bildmitte (orange) in seiner montierten Position zu sehen. Dieser Block ist so ausgelegt, dass der vorhandene Spindelblock (in **Bild 3.8** dunkelblau dargestellt) weiterverwendet werden kann und lediglich den Höhen- und Lateralversatz zum Montagesockel des Abrichters ausgleicht.

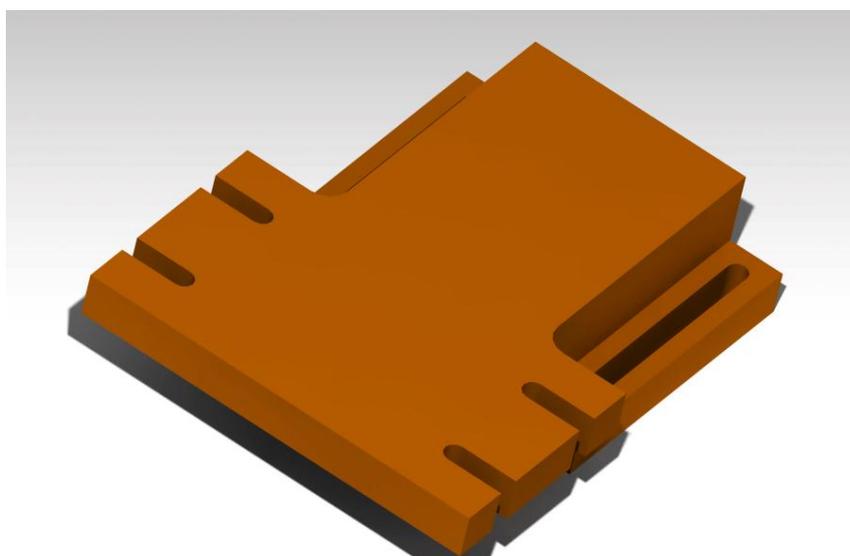


Bild 3.9: Detailansicht des Stützblocks der Werkstückspindel

3.2.2.3 Kühlung

Nach einer ersten Begutachtung stand bereits fest, dass für die Kühlung der Abrichtrolle die vorhandene Installation weitestgehend weiterverwendet werden konnte. Ein Kugelhahn zur Regulierung der Kühlmittelmenge und ein Dreiwegeverteiler zur Montage mehrerer Kühldüsen waren bereits vorhanden. Die Einheit wurde schließlich an geeigneter Position am Spindelblock der Abrichtspindel montiert. Die Kühlmittelzufuhr in die Kontaktzone erfolgt dann über eine Loc-Line Düse (**Bild 3.10**).

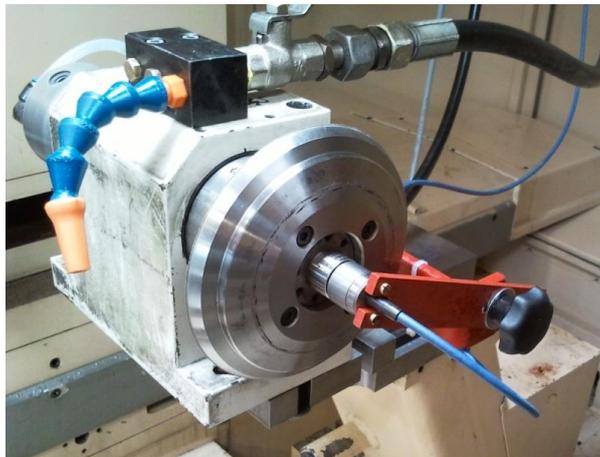


Bild 3.10: Die Umgerüstete Abrichteinheit, bereits mit montiertem AE-Sensor

3.3 Installation der Messtechnik zur Datenerfassung

Die Datenerfassung für diesen Prüfstand sollte im Wesentlichen die Prozessgrößen Schnittleistung und die Schleifkräfte umfassen. Ferner sollte ein Acoustic-Emission-System zur Anschnitterkennung an die Abrichtspindel montiert werden. Die erfassten Messdaten sollten dann auf einem herkömmlichen Windows PC gespeichert und angezeigt werden. Auf Grund einer Treiberinkompatibilität konnten das System zur Erfassung der Leistung und der Kräfte nicht auf demselben System installiert werden, so dass vorerst auf zwei verschiedene Rechner zur Datenerfassung zurückgegriffen werden muss.

3.3.1 Leistungsmessung

Für die Leistungsmessung kommt das hauseigene Field Instrumentation System (FIS) in der Version fünf der Firma Saint-Gobain zum Einsatz. Das FIS ist ein transportables System das dazu entwickelt wurde sehr einfach und schnell an jeder beliebigen Schleifmaschine die Schnittleistung messen zu können, um so auch z.B. bei Kunden deren Prozesse direkt vor Ort untersuchen zu können. Zusätzlich zur Leistungsmessung kann das FIS v5 noch die Signale von bis zu zwei LVDT-Wegmessensoren und über einen BNC-Anschluss ein weiteres beliebiges $\pm 10V$ Signal über den AD-Wandler an den Messrechner übertragen.

Für die Leistungsmessung werden die Spannungen und die Ströme, die der Frequenzumrichter an die Spindel gibt, gemessen. Zur Strommessung kommen drei induktiv arbeitende Stromzangen zum Einsatz, die um jeweils eine der Phasen gelegt werden. Zusätzlich müssen zur Spannungsmessung noch drei weitere Messleitungen an die jeweilige Phase geklemmt werden. Eine einfache Elektronik rechnet die Spannungen und Ströme dann in dann direkt in die abgegebene Leistung um und gibt diese als Spannung von 0V bis +10V aus. Schließlich wird das Analogsignal noch in einem AD-Wandler in ein digitales Messsignal gewandelt, dass dann per USB-Verbindung an dem Messrechner übertragen wird. Der Messbereich und die Datenrate können am Gerät mittels Drehknopf eingestellt werden.

3.3.2 Kraftmessung

Für die Erfassung der Schleifkräfte wurde ebenfalls ein FIS verwendet, in diesem Fall allerdings ein Gerät der Version 4. Diese Geräte unterscheiden sich von Aufbau her von den Nachfolgemodellen der Version 5 deutlich. Die Zentrale Einheit dieses FIS-Typs ist ein separater AD-Wandler. Er besitzt acht BNC-Eingänge über die beliebige Messsignale in der Form $\pm 10V$ verarbeitet werden können und zusätzlich einen separaten Anschluss für einen LFDT-Wegmesssensor. Die Datenübertragung erfolgt über eine parallele Schnittstelle und ist somit auch einer der großen Nachteile dieses Systems, da die heutzutage verwendeten Windows PCs meist nicht mehr über dies Schnittstelle verfügen.

Dennoch bietet das System, im Gegensatz zu Geräten der Version 5, die Möglichkeit mehrere Kraftmessensoren anzuschließen. Ursprünglich besaß auch diese FIS Version Leistungsmesseinheiten in Form separater, über einen der BNC-Anschlüsse verbundener, Geräte mit einer grundsätzlich gleichen Funktionsweise wie bei den Geräten der Version 5. Leider sind keine funktionstüchtigen Geräte mehr verfügbar, weswegen die Leistung, wie unter Kapitel 3.3.1 beschrieben, separat mit einem FIS V5 gemessen werden muss.

3.3.2.1 Kraftmessplattform

Als Sensor für die Kraftmessung ist in der Maschine eine Kraftmessplatte der Firma Kistler vom Typ Z11216 verbaut. Hierbei handelt es sich um eine piezoelektrisch arbeitenden Sensor. Die Einheit ist, wie in **Bild 3.11** gezeigt, direkt unter dem Gehäuse der Werkstückspindel verbaut. Gut zu erkennen ist auch der armierte Schlauch, in dem die Signalkabel verlegt sind und zum Kabelbaum der Maschine und von dort aus in die Bedientafel geführt werden. Die Kraftmessplatte ist damit optimal positioniert um die auftretenden Schleifkräfte zu messen. Zu beachten ist, dass die Kraftmessplatte auf dem Drehtisch montiert ist, mit dem die Werkstückspindel um $\pm 45^\circ$ um die Senkrechte Achse gedreht werden kann. Sollte eine solche Verdrehung stattfinden, ist das Koordinatensystem der Kraftmessplatte um einen entsprechenden Winkel zum Koordinatensystem der Maschine verdreht. Somit haben dann auch die in der X-Z-Ebene auftretenden Schnittkräfte Einfluss auf zwei Komponenten der Kraftmessung und können nicht mehr einfach abgelesen werden.



Bild 3.11: Direkt unterhalb der Werkstückspindel montierte Kraftmessplatte, hier ohne Abdeckung gezeigt

Dieser Umbau erfolgte schon durch das IFW und war nur in Zusammenarbeit mit der Firma Overbeck möglich, da die Bauhöhe der Kraftmessplatte sehr genau ausgeglichen werden musste, damit Werkstück- und Werkzeugachse weiterhin in derselben Ebene lagen.

3.3.2.2 Ladungsverstärker

Da die Kraftmessung piezoelektrisch erfolgt, sind zusätzlich zur Kraftmessplatte noch Ladungsverstärker notwendig, die die im Sensor erzeugten Ladungen in eine proportionale Spannung wandeln. Hierfür werden ebenfalls von der Firma Kistler drei Ladungsverstärker Type 5006 und 5007 verwendet.

Tabelle 3.6: Kennwerte Ladungsverstärker Kistler

Kistler Ladungsverstärker Type 5006/7/8/9	
Messbereich [pC]	$\pm 10 \dots \pm 500'000$
Frequenzbereich [Hz]	$\approx 0 \dots 180k$
Ausgangsspannung [V]	± 10
Betriebstemperaturbereich [°C]	$0 \dots 50$
Zulässige Abweichung [%]	$< \pm 3 (< 50 \text{ pC}); < \pm 1 (\geq 50 \text{ pC})$

Damit die Handhabung für den Bediener möglichst unproblematisch ist, wurden die Ladungsverstärker in das Bedienteil der Maschine integriert. Zusammen mit dem Frequenzumformer der Abrichtspindel wurden die Ladungsverstärker in einer eigens gefertigten Blende fest montiert und an die Stromversorgung der Maschine angeschlossen. Da die 230V Sammelschiene im Bedienteil bereits zu stark ausgelastet und für den zusätzlichen Strombedarf nicht ausreichend abgesichert war, musste hierfür noch ein separater Anschluss ins Bedienpult verlegt werden.



Bild 3.12: Bedienpult mit integrierten Ladungsverstärkern und Frequenzumformer



Bild 3.13: Ladungsverstärker Kistler Type 5006

3.3.3 Anschnitterkennung

Zum effizienten Abrichten von cBN-Werkzeugen wird heute meistens auf Körperschallsensoren zurückgegriffen. Diese Körperschall- oder Acoustic-Emission-Sensoren messen kontinuierlich den Körperschall des Werkzeuges. Um eine möglichst störungs- und dämpfungsfreie Signalerfassung zu erreichen, werden sie meistens direkt am Rotor der Schleif- oder Abrichtspindel montiert. Die aufgezeichneten Schwingungen werden dann auf einem separaten Display der AE-Einheit, auf dem Display der Maschinensteuerung oder auf einem Windows PC als X-Y-Plot visualisiert. Auf diese Weise kann beim Abrichten erfasst werden wann das Abrichtwerkzeug in Kontakt mit der Schleifscheibe kommt, da dies eine Zunahme der Körperschallschwingungen hervorruft. Zusätzlich kann man anhand der Messkurve des AE-Systems feststellen, ob über die volle Breite der Schleifscheibe durchgängig abgerichtet wurde. Nur so kann ein korrektes Abrichten mit Abrichtbeträgen von wenigen μm sichergestellt werden, wie es beim heute für cBN üblichen Touch-Dressing der Fall ist.

3.3.3.1 Auswahl des AE-Systems

Als AE-System wurde Produkt der Firma Dittel ausgewählt. Im EGTC sind bereits mehrere Maschinen mit einem AE-System dieses Herstellers ausgestattet, daher verfügen die Mitarbeiter bereits über umfangreiche Erfahrung mit diesen Geräten. Ein weiterer Vorteil ist, dass somit Komponenten zwischen den verschiedenen Systemen und Maschinen problemlos austauschbar sind.

Es wurde zum Einbau in die Overbeck 610 I CNC eine Kombination aus Dittel M-Sensorik (**Bild 3.14**) und dem Datenmodul Dittel AE 6000 verwendet. Die M-Sensorik ist eine Rotierender Sensor besteht aus zwei Komponenten, dem rotierenden Sensor (**Bild 3.15**) und dem statischen Empfänger.



Bild 3.14: AE-M-Sensor und Empfänger



Bild 3.15: AE-M-Sensor



Bild 3.16: Dittel AE 6000 Modul

Das AE 6000 Modul (**Bild 3.16**) ist für die Benutzung in Verbindung mit einem Windows PC konzipiert, da es über keinen eigenen Bildschirm zur Darstellung der AE-Signale verfügt. Das Modul muss mittels einer seriellen Schnittstelle RS-232 mit einem PC oder der Maschinensteuerung verbunden werden. Die Bedienung des Moduls erfolgt dann über die Dittel System Control Center Software, die auf dem PC installiert sein muss.

3.3.3.2 Moduleinbau

Da das Dittel AE 6000 Modul selbst über keine Bedienelemente verfügt, die zum Betrieb des Moduls erreichbar sein müssen, ist üblicherweise eine Montage im Schaltschrank der Maschine vorgesehen. In diesem Fall erschien war die Montage im Bedienpult jedoch einfacher. Hier war neben den Ladungsverstärkern noch ausreichend Bauraum vorhanden um das Modul unterzubringen. Zudem war die Verlegung des Datenkabels und des PC-Anschlusskabels in dieser Konfiguration einfacher. Der 24V Netzanschluss konnte in diesem Fall problemlos an die Sammelschiene der Konsole erfolgen.

3.3.3.3 Montage M-Sensorik

Die Montage des rotierenden Sensors der M-Sensorik gestaltete sich überaus einfach. Der Sensor besitzt einen Gewindeschaft, mit dem er lediglich in eine passende Gewindebohrung an der Stirnseite des Rotors der Abrichtspindel eingeschraubt werden musste.

Der feststehende Empfänger muss direkt vor dem Sensor montiert sein. Der Spalt zwischen Sensor und Empfänger sollte hierbei 0,5mm ... 1mm betragen und der Empfänger sollte möglichst konzentrisch zum Sensor platziert sein. Hierzu wurde eine einfache Halterung aus Flachstahlteilen gefertigt. Wie in **Bild 3.17** zu sehen ist, ist die Halterung am Spindelstock der Abrichtspindel montiert und zweiteilig ausgeführt. Dadurch kann der Querarm, in dem der Empfänger montiert ist, sehr einfach gelöst und aus dem Weg geschwenkt werden, wenn das Abrichtwerkzeug gewechselt werden muss.

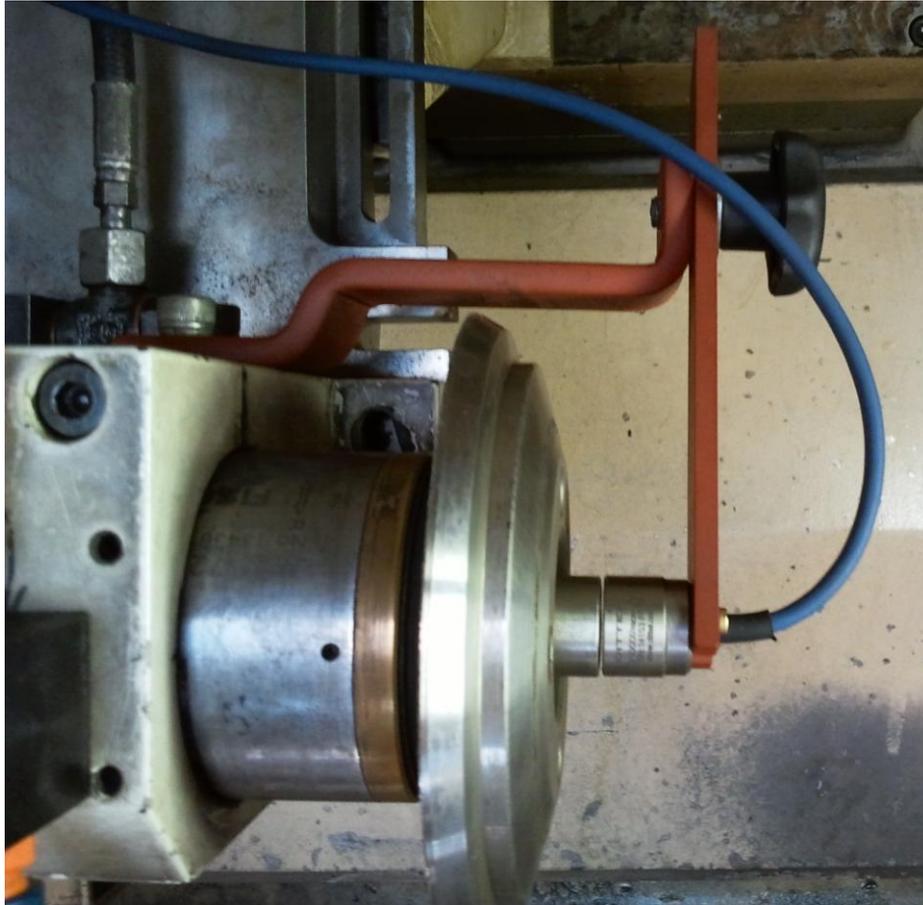


Bild 3.17: AE-Sensor und Empfänger mit Halterung

3.3.4 Oberflächenmessung

Bei den Vorüberlegungen im Hinblick auf kommende Versuche erschien es wünschenswert, die Oberflächengüte der geschliffenen Bohrungen messen zu können, wenn die Werkstücke noch in der Maschine eingespannt sind. Allerdings stellte dies keine Notwendigkeit dar und sollte nur umgesetzt werden, wenn es mit geringstem Arbeits- und Kostenaufwand möglich wäre.

Aufgrund dieser Voraussetzungen bestand die beste Möglichkeit darin, das mobile Oberflächenmessgerät MarSurf PS1 der Firma Mahr für die Messung zu verwenden, da es im EGTC bereits vorhanden war. Das Gerät besitzt höhenverstellbare Füße und einen dreh und

längsverschiebbaren Tastkopf, dennoch muss das Gerät entweder auf oder direkt neben der Messfläche auf gleicher Höhe sicher platziert werden können.

Um dies zu ermöglichen wurde eine einfache Plattform, bestehend aus einem Winkelprofil und einer Aluminiumplatte, direkt neben der Werkstückspindel am Spindelstock montiert (**Bild 3.20**). Die Aluminiumplatte ist über einen einfachen Bolzen schwenkbar am Winkelprofil gelagert, so dass die direkt vor das Werkstück geschwenkt werden kann (**Bild 3.21**).



Bild 3.18: MarSurf PS1

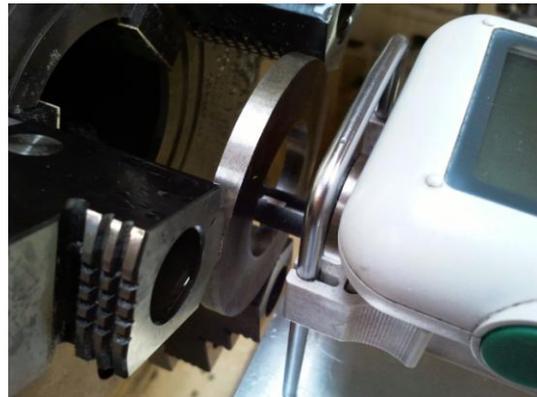


Bild 3.19: Tastkopf bei Messung der Bohrung



Bild 3.20: Plattform für MarSurf (in Schleifposition geschwenkt)



Bild 3.21: Plattform zum Messen eingeschwenkt

3.4 Bestimmung der Maschinenfähigkeit

Als Teil der Inbetriebnahme der Overbeck sollte nachgewiesen werden, dass die Maschine hinsichtlich der mit ihr erreichbaren Genauigkeiten für den späteren Einsatz im EGTC geeignet ist. Als Hilfsmittel hierfür sollte auf ein Werkzeug aus dem Bereich der statistischen Qualitätskontrolle zurückgegriffen werden, und zwar auf die Bestimmung des kritischen Maschinenfähigkeitsindex C_{mk} .

Die Maschinen- und Prozessfähigkeit entstammt der grundlegenden Idee, die Prozesssicherheit einer Werkzeugmaschine respektive eines Fertigungsprozesses in einer Kennzahl quantifizieren zu können. Die Maschinenfähigkeit grenzt sich von der Prozessfähigkeit wie folgt ab [GRA07]:

- Die Prozessfähigkeit dient der Untersuchung des *langfristen* Streuverhaltens der Bearbeitungsergebnisse einer Maschine. Hierbei ist die Prozessfähigkeit ein Maß für die tatsächliche Prozessgüte bezogen auf ein bestimmtes Bauteilmerkmal unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren wie Personal, Maschine, Einrichtung, Rohmaterial, Methoden und Arbeitswelt.
- Im Gegensatz hierzu stellt die Bestimmung der Maschinenfähigkeit eine *Kurzzeituntersuchung* des Streuverhaltens der Maschine da. Hierfür müssen die Randbedingungen so gut wie möglich konstant gehalten werden, um lediglich den Einfluss der Maschine selbst zu erfassen.

Als übliche Zielwerte für die Maschinen- und Prozessfähigkeit haben sich im allgemeinen Maschinenbau sowie der Automobilindustrie die in **Tabelle 3.7** aufgelisteten Grenzen etabliert.

Tabelle 3.7: Gänge Zielwerte für Maschinen- und Prozessfähigkeit [Gra07]

C_p	C_{pk}	C_m	C_{mk}	Automobil Industrie	allgemeiner Maschinenbau
<1,33	<1,00	<1,67	<1,33	nicht qualitätsfähig	nicht qualitätsfähig
>1,33	>1,00	>1,67	>1,33	bedingt qualitätsfähig	qualitätsfähig
>1,67	>1,33	>2,00	>1,67	qualitätsfähig	

Eine Untersuchung auf Prozessfähigkeit war in Anbetracht der Aufgabenstellung dieser Arbeit nicht sinnvoll. Hierfür wäre ein immer gleich ablaufender Arbeitsgang nötig, wie er üblicherweise bei Fertigungsmaschinen in einer Serienproduktion auftritt. Die Versuche im EGTC erfordern allerdings schon aus der Natur der Sache heraus eine Variation von einzelnen Parametern und bieten somit weder die Möglichkeit, noch die Notwendigkeit für eine Prozessfähigkeitsuntersuchung.

Die Berechnung des Maschinenfähigkeitsindex C_m erfolgt nach Formel (3.1), T_u und T_o sind hierbei die Toleranzgrenzen des untersuchten Merkmals und s die Standardabweichung. Entsprechend den Formeln (3.2) und (3.3) werden der obere und untere Maschinenfähigkeitsindex (C_{mo} und C_{mu}) berechnet. X_q ist hier das arithmetische Mittel der Messwerte. Der kritische Maschinenfähigkeitsindex C_{mk} ergibt sich dann als der kleinere Wert von C_{mo} (3.2) und C_{mu} (3.3).

$$C_m = \frac{T_o - T_u}{6s} \quad (3.1)$$

$$C_{mo} = \frac{T_o - X_q}{3s} \quad (3.2)$$

$$C_{mu} = \frac{X_q - T_u}{3s} \quad (3.3)$$

$$C_{mk} = \min(C_{mo}; C_{mu}) \quad (3.4)$$

Üblicherweise werden sowohl C_m als auch C_{mk} zur Beurteilung der Maschinenfähigkeit berechnet. C_{mk} ist ein Index für die Lage des Mittelwerts innerhalb der Toleranzgrenzen, wohingegen C_m ein Maß für die Streubreite der Messwerte ist [DIE07; GRA07].

3.4.1 Rahmenbedingungen der Maschinenfähigkeitsuntersuchung

Grundlegendes Merkmal der Maschinenfähigkeitsuntersuchung ist, wie oben erwähnt, eine Konstanz der Randbedingungen. Dadurch sollen alle Einflüsse auf das Bearbeitungsergebnis, die nicht direkt auf die Maschine zurückzuführen sind, minimiert werden. Die wichtigsten Maßnahmen um diese Voraussetzungen zu erfüllen sind daher wie folgt:

- nur einmaliges Einrichten der Maschine zu Beginn der Untersuchung
- gleichbleibender Bediener
- gleichbleibende Arbeitsabläufe
- gleichbleibende Werkzeuge, Mess- und Hilfsmittel
- Werkstücke möglichst aus der selben Charge
- kompakter zeitlicher Ablauf der Untersuchung (keine längeren Unterbrechungen)

Eine statistisch sichere Maschinenfähigkeitsuntersuchung sollte mindestens 30, besser 50 Teile umfassen, die hintereinander gefertigt werden. Das oder die Merkmale des Bearbeitungsschrittes werden anschließend erfasst. Hierbei ist nochmals zu beachten, dass auch die Messungen unter den gleichen Randbedingungen und somit immer gleich durchgeführt werden. Aus den ermittelten Werten werden dann die Standardabweichung und der Mittelwert berechnet [DIE09].

3.4.2 Ablauf der Untersuchung

Die Untersuchung der Maschinenfähigkeit sollte an einem Schleifvorgang mit industrieüblichen Maschinenparametern und Bedingungen vorgenommen werden.

Für die Untersuchung sollten die Standardrundwerkstücke verwendet werden, die im EGTC für eine Reihe anderer Versuche auf verschiedenen Maschinen verwendet werden. Sie haben einen Durchmesser von 120 mm, eine Bohrung mit Durchmesser 30 mm und eine Höhe von 5 mm. Das Material ist der weit verbreitete Wälzlagerstahl 100Cr6, welcher auf eine Härte von 60 HRC ± 2 gehärtet ist (Zulieferer: Eikko Drehteile GmbH). Im Sinne einer gesicherten Ergebnisfindung wurde für die Untersuchung eine Losgröße von 50 Werkstücken gewählt.

Das verwendete Werkzeug ist ein keramisch gebundener cBN Schleifstift der Spezifikation 1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1427 H1AN V360. Der Schaft ist aus legiertem Stahl SAE 8620 gefertigt und nicht gehärtet. Als Schleifdaten wurde eine Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60$ m/s und eine industriell übliche Vorschubgeschwindigkeit $v_{fr} = 1$ mm/min gewählt. Dies entspricht einem $Q'_w = 1,6 \frac{mm^3}{mm \times s}$. Der programmierte Bohrungsdurchmesser beträgt $d = 30,2$ mm. Das Schleifaufmaß ist somit 0,1 mm radial. Die Werkstückdrehzahl betrug $n_w = 650$ 1/min im Gegenlauf.

Als typische Bohrungstoleranz wurde H6 avisiert. Dies ist eine Toleranz der Toleranzklasse IT6 mit Toleranzbandbreite 16 μ m. Für den programmierten Bohrungsdurchmesser sind die Toleranzgrenzen einer H6 Bohrung daher $T_u = 30,200$ mm und $T_o = 30,216$ mm. Der Einfachheit halber wurde festgelegt, dass die Bohrung zwar für die gleiche Toleranzbandbreite, aber mit den Toleranzgrenzen $30,2 \pm 0,008$ mm geschliffen werden sollte.

Die Bohrungen wurden anschließend mit einer Innenmessschraube der Firma TESA mit Skalanzeige vermessen. Dabei wurden drei Messungen je Werkstück durchgeführt und dann der Mittelwert für die C_{mk} -Berechnung verwendet. Standardmäßig wurde bei allen Werkstücken ebenfalls die erreichte Oberflächenrauheit gemessen (3 Messungen, Mittelwertbildung). Zielgröße war ein R_a -Wert < 1 μ m. Auf Ergebnisdetails soll im Weiteren verzichtet werden, da alle geschliffenen Werkstücke signifikant bessere Rauheiten ($R_a < 0,7$ μ m) aufweisen und dieses Kriterium somit unproblematisch zu erreichen war.

3.4.3 Auswertung

Anhand der Messwerte der 50 gefertigten Werkstücke konnten alle notwendigen Kennwerte für die Bestimmung des Maschinenfähigkeitsindex errechnet werden. Gemäß der Formeln (3.1) bis (3.3) wurden der Maschinenfähigkeitsindex C_m sowie der obere und untere Maschinenfähigkeitsindex C_{mo} und C_{mu} errechnet. In **Tabelle 3.8** sind alle relevanten Werte aufgelistet.

Tabelle 3.8: Kenndaten der Maschinenfähigkeit

Kennwerte der Maschinenfähigkeit		
Losgröße	n	50
programmierter Bohrungsdurchmesser	d	30,200
arithmetisches Mittel [mm]	X_s	30,199
Standardabweichung [mm]	s	0,0014
obere Toleranzgrenze [mm]	T_o	30,208
untere Toleranzgrenze [mm]	T_u	30,192
Maschinenfähigkeitsindex	C_m	1,906
Maschinenfähigkeitsindex oben	C_{mo}	2,135
Maschinenfähigkeitsindex unten	C_{mu}	1,677
Kritischer Maschinenfähigkeitsindex	C_{mk}	1,677

In **Bild 3.22** ist die Häufigkeitsverteilung der Messwerte zur Maschinenfähigkeitsuntersuchung dargestellt. Zusätzlich sind die Lage des Mittelwertes (grün gestrichelt) und der Toleranzgrenzen T_o und T_u (rot) eingetragen. Die schwarze Kurve stellt hierbei den Verlauf einer Standardnormalverteilung (nach Gauss) für den Mittelwert X_q in Verbindung mit der Standardabweichung s dar und dient als Referenz zur Einordnung der realen Messwerte. Wie im Diagramm gut zu erkennen ist, sind die Messwerte sehr gut normalverteilt und das arithmetische Mittel liegt relativ nah zum Toleranzbandzentrum.

Fazit / Schlussfolgerung

Die erzielten Werte für $C_m = 1,906$ und $C_{mk} = 1,677$ liegen nach **Tabelle 3.7** für den allgemeinen Maschinenbau im qualitätsfähigen Bereich. Selbst hinsichtlich der hohen Ansprüche der Automobilindustrie ist von einer „bedingten Qualitätsfähigkeit“ auszugehen. Letztendlich ist die Maschine als „tauglich“ für den Versuchsbetrieb im EGTC zu bewerten.

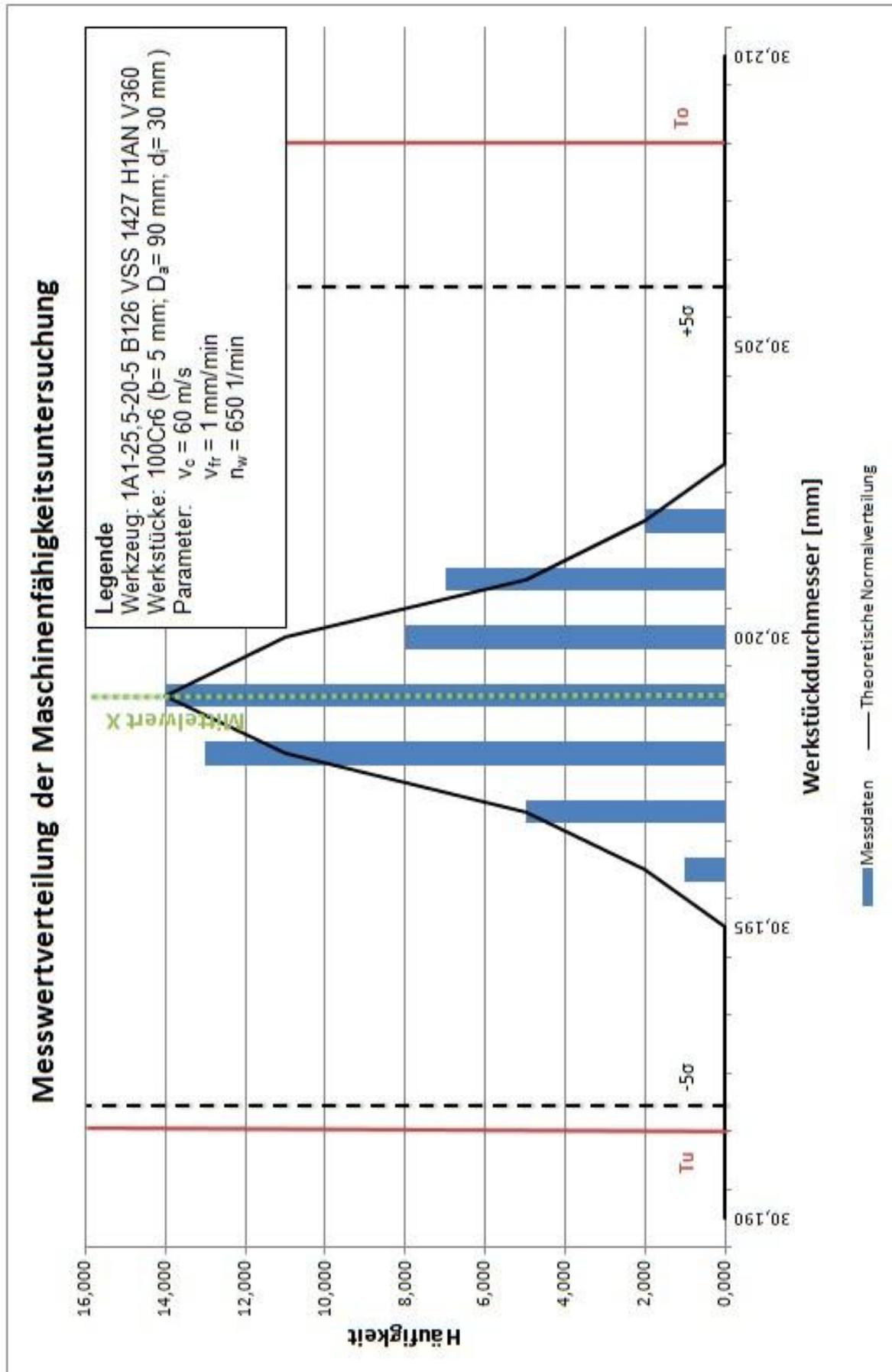


Bild 3.22: Messwertverteilung der Maschinenfähigkeitsuntersuchung

4 Schleifversuche

In diesem Abschnitt werden die Schleifversuche beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Mit den Ergebnissen dieser Versuche sind im Idealfall drei Ziele zu erreichen:

- 1) Der Versuchsstand sollte eingefahren und eventuelle Ansatzpunkte für Optimierung aufgezeigt werden.
- 2) Maschine und Werkzeuge sollten in einem breiten Bereich industrieüblicher Schleifparameter betrieben werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen sollten Vorschläge für zukünftige Testprozeduren abgeleitet werden.
- 3) Es sollten erste Daten über das Verhalten der N7-Bindung bei einer Innenschleifanwendung gesammelt werden.

Diese Ziele ließen sich hervorragend kombinieren. Die Prüfung der N7-Bindung beim Innenrundscheifen wird im Rahmen zukünftiger Versuche voraussichtlich einen hohen Stellenwert haben. Besonders unter diesem Aspekt ist es sinnvoll, Testprozeduren auf Basis von Daten zu entwickeln die mit dieser Bindung gesammelt wurden.

4.1 Versuchswerkzeuge und -werkstücke

Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit sollten keramisch gebundene cBN-Werkzeuge mit dem sog. N7-Bindungssystem eingesetzt werden, da Erfahrungen beim Innenrundscheifen mit diesem System bisher begrenzt sind. Das N7-Bindungssystem wurde von der Firma Saint-Gobain speziell für hoch effizientes Tiefscheifen entwickelt. Zurzeit wird N7 hauptsächlich für das Außenrundscheifen eingesetzt und erzielt dort sehr gute Ergebnisse. So ist es in der Lage, hohe Anforderungen in Bezug auf Abtragsrate, Oberflächengüte und Formtoleranz zu erfüllen. Die Innenschleifwerkzeuge, die im Rahmen dieser Arbeit zu Einsatz kamen, wurden in Zusammenarbeit mit der Forschungs- und Entwicklungsabteilung in Norderstedt speziell für die Versuche angefertigt.

4.1.1 Spezifikationen

Innerhalb des N7-Bindungssystems ist eine große Bandbreite an Bindungsvarianten möglich. **Bild 4.1** stellt eine Übersicht über das Variantenband des N7-Bindungssystems dar. Die grau markierten Felder stellen mögliche Varianten der Bindung dar. Die genaue Zusammensetzung der Bindung ist nicht für die Weitergabe freigegeben, daher enthält das Diagramm lediglich die firmenspezifischen Kennzeichen für Bindungshärte und Porosität. Die Härte der Bindungsbrücken ist nach rechts zunehmend aufgetragen, die Porosität nimmt nach unten hin zu.

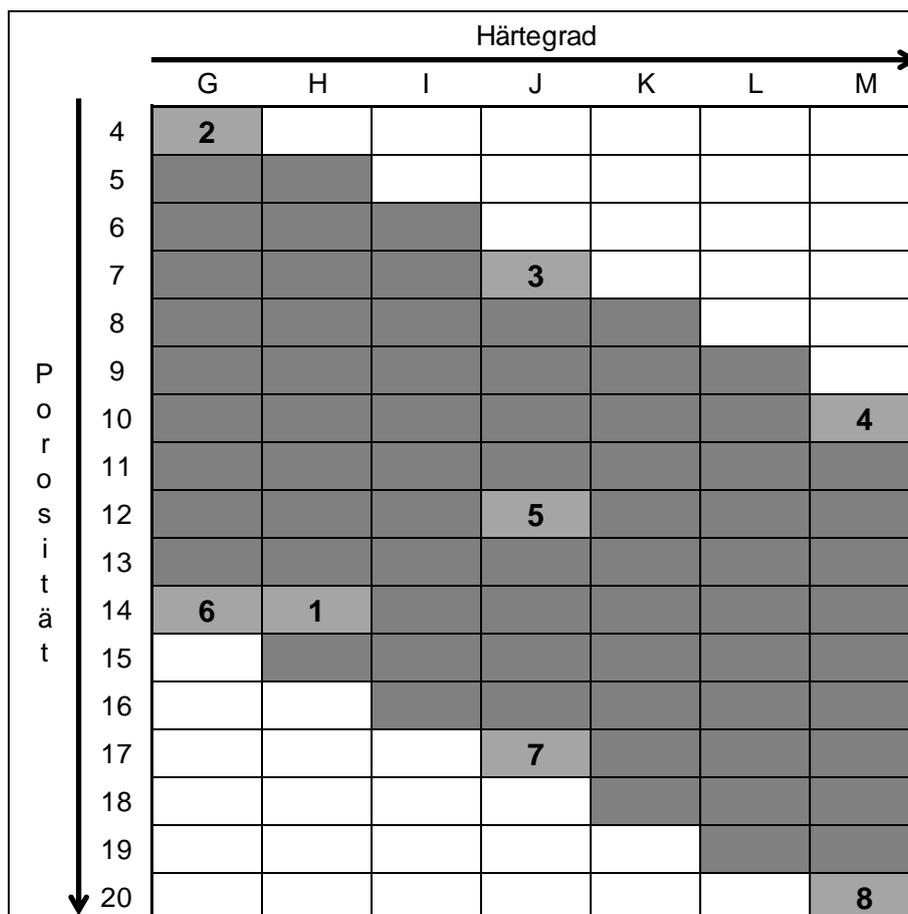


Bild 4.1: Varianzband der N7 Bindung

Da die Eigenschaften der N7-Bindung beim Innenrundsleifen weitgehend unbekannt sind wurde entschieden Werkzeuge herzustellen, die möglichst das gesamte Variantenband der Bindung abdecken. Für die hellgrau gekennzeichneten Bindungsvarianten hat die Forschung und Entwicklung das Granulat zur Herstellung der Schleifkörper zur Verfügung gestellt. Hiermit wurden die Eckpunkte des Bindungsspektrums, sowie einige Zwischenpunkte abgedeckt. Die mit *I* bezeichnete Variante ist eine typische Spezifikation für das Außenrundsleifen und wurde deshalb als Referenz verwendet.

Da in diesem Versuch lediglich der Einfluss der Bindung untersucht werden sollte, wurden alle anderen Parameter konstant gehalten. Aus diesem Grund wurde für alle Spezifikationen der identische cBN-Korntyp in der Korngröße B 126 verwendet. Die Abmessungen der Werkzeuge wurden dafür so ausgelegt, dass sie mit den vorgesehenen Werkstücken korrespondieren. Die Werkstücke besitzen eine Startbohrung mit Durchmesser $d_w = 30$ mm. Nach der Formel (2.13) aus Kapitel 2.5.2.2 ergibt sich der optimale Werkzeugdurchmesser zu $d_s \approx 24$ mm.

Im Rahmen der Versuchsvorplanung wurde festgelegt, dass mit den Werkzeugen auch Schnittgeschwindigkeiten von bis zu 70 m/s möglich sein sollten und dies möglichst auch noch bei einem Durchmessererschleiß der Werkzeuge von ca. 2 mm. Die Schnittgeschwindigkeit v_c ist nach Formel (2.9) abhängig von Werkzeugdrehzahl und Werkzeugdurchmesser. Die Drehzahl der Werkzeugspindel ist auf 60.000 1/min begrenzt, so dass mit 25,5 mm schließlich ein etwas größerer als der „optimale“ Durchmesser von 24 mm gewählt wurde. Die Schleifbelagbreite ist für die geplanten Versuche von untergeordneter Bedeutung, da die Werkstückbreite lediglich 5 mm beträgt. Um den Schleifbelag fertigungstechnisch einfach zu halten wurde als Schleifbelagbreite 20 mm fixiert. **Tabelle 4.1** listet die letztendlich gefertigten Werkzeuge auf.

Tabelle 4.1: Auflistung der gefertigten Bindungsvarianten

Spezifikationen der Versuchswerkzeuge				
Nr.	Bindung	Korngröße	Konzentration	Spezifikation
1	1427H	B 126	V 360	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1427 H1AN V360
2	0427G	B 126	V 364,8	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 0427 G1AN V364,4
3	0727J	B 126	V 422,4	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 0727 J1AN V422,4
4	1027M	B 126	V 480	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1027 M1AN V480
5	1227J	B 126	V 422,4	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1227 J1AN V422,4
6	1427G	B 126	V 364,8	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1427 G1AN V364,4
7	1727J	B 126	V 422,4	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1727 J1AN V422,4
8	2027M	B 126	V 480	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 2027 M1AN V480

4.1.2 Herstellung der Versuchswerkzeuge

Die Werkzeuge wurden als Teil dieser Arbeit mit Unterstützung durch die Forschung und Entwicklung sowie die reguläre Fertigung hergestellt. Der Ablauf der wichtigsten Arbeitsschritte wird im Folgenden beschrieben. Die Granulatherstellung muss hier unberücksichtigt bleiben.

Pressen / Sintern

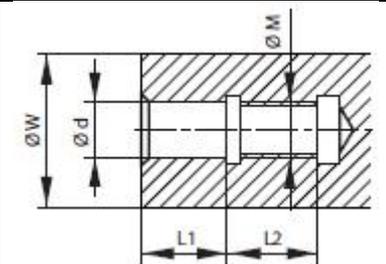
Als erster Teil der die Fertigung der Schleifbelagringe mussten zunächst Grünlinge gepresst werden. Dabei ist zu beachten, dass die Grünlinge beim späteren Sintern um einige Prozent schrumpfen. Aus diesem Grund musste die Pressformen entsprechend groß gewählt werden in diesem Fall eine Form mit Außendurchmesser $D = 26 \text{ mm}$. Die verwendeten Formen sind mehrteilig und die Verdichtung erfolgt axial in zwei Stufen. Eine genaue Granulateinwaage ist sehr wichtig, da die Granulatmenge einen großen Einfluss auf die Verdichtung hat.

Nach dem Pressen sind die Grünlinge noch sehr empfindlich und müssen mit großer Vorsicht behandelt werden um ein Zerschneiden zu vermeiden. Um ein Anhaften an der Brennplatte zu verhindern wurden die Grünlinge zum Sintern in ein Sandbett gestellt. Um die Stabilität zu erhöhen und ein Reißen während des Sinterns zu vermeiden wurden auch die Kerne der Ringe mit Sand gefüllt. Die Grünlinge werden mit einem mehrstufigen Sinterprofil unter Schutzgas gebrannt.

Grundkörper Halbfertigteil

Die Innenschleifspindel der Overbeck verfügt zum Spannen der Werkzeuge über eine Schleifdornaufnahme mit Paßloch-Gewinde-Plananlage der GMN-Bezeichnung D14/23. In **Tabelle 4.2** ist Spezifikation der Aufnahme dargestellt.

Tabelle 4.2: Spezifikation der GMN Schleifspindelaufnahme

GMN Schleifdornaufnahme						
	Bezeichnung	d [mm]	W [mm]	M	L1 [mm]	L2 [mm]
	D14/23	14	23	M14x1,5	20	19

Die Grundkörper wurden als Halbfertigteil mit Paßfläche, Plananlage und Gewinde nach entsprechender Spezifikation von einem Zulieferer geordert (Zulieferer Croft Engineering

Ltd.; siehe **Bild 4.2**). Als Material wurde der legierte Stahl SAE 8620 gewählt. Die Fertigbearbeitung erfolgte dann bei Saint-Gobain nach Fertigungszeichnung.



Bild 4.2: Grundkörperrohling

Kleben

Nach dem Sintern mussten die Grundkörper zunächst gesäubert werden. Besonders die Innenfläche der Ringe war mit Überresten des Stützsandes verklebt (siehe **Bild 4.3**). Um den Sand zu entfernen wurde die Innenfläche der Ringe mit einer groben Rundfeile bearbeitet. Die Außenflächen wurden mit grobem Sandpapier gesäubert. Anschließend wurde sandgestrahlt um einen besseren Haftgrund für die Verklebung zu bieten. Danach wurden die Klebeflächen der Grundkörper sorgfältig entfettet. Die Verklebung erfolgte dann einem Zweikomponenten Epoxidharzkleber. Er zeichnet sich durch Temperaturbeständigkeit, hohe chemisch Stabilität und ausgezeichnete Beständigkeit gegen Wasser und Feuchtigkeit aus. Weitere Einzelheiten sollen hier nicht genannt werden. Der Kleber wird beidseitig aufgetragen und der Ring auf den Grundkörper geschoben. So wird sichergestellt, dass der Kleber in alle Fugen dringen und porenfrei aushärten kann. Nach dem Aufschieben werden überflüssige Kleberreste entfernt.

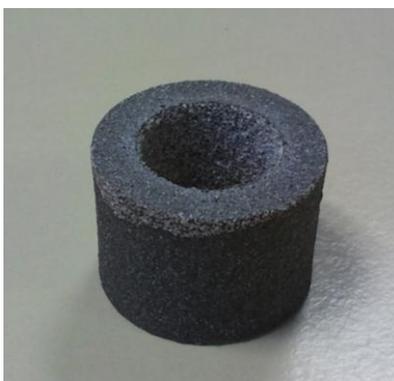


Bild 4.3: gesinterter Schleifbelagring mit Sandanhaftungen



Bild 4.4: fertiger Schleifstift

Fertigschleifen

Für die Verklebung ist ein kleiner Spalt zwischen Grundkörper und Ring notwendig, dadurch kann der Belag nach dem Verkleben eine Rundlaufabweichung zum Grundkörper aufweisen. Um diese Ungenauigkeit zu beheben wurden die Stifte dann auf den gewünschten Werkzeugdurchmesser und damit auch auf korrekten Rundlauf geschliffen. Verbliebene Kleberreste wurden ebenfalls entfernt.

4.1.3 Werkstücke

Als Versuchswerkstücke kamen Rondisten (**Bild 4.5**) mit einem Bohrungsdurchmesser $d = 30$ mm, Aussendurchmesser $D_a \approx 90$ mm und einer Werkstückbreite von $b = 5$ mm zum Einsatz. Bezogen werden die Werkstücke von der Firma Eikko Drehteile GmbH. Das Material der Werkstücke ist 100Cr6 Stahl, gehärtet auf 60 ± 2 HRC. Die Härte wurde bei 20% der Werkstücke stichprobenartig im Bereich der Bohrungen geprüft. Dabei wurden pro Werkstück drei Härtemessungen durchgeführt und gemittelt. Alle Ergebnisse der Stichprobe lagen im geforderten Bereich.



Bild 4.5: Werkstück 100Cr6 gehärtet

4.2 Vorversuche zur Parameterbestimmung

Zu Beginn der Versuche mussten zunächst Erfahrungen mit der Maschine und den verwendeten Werkzeugen gesammelt werden. Dazu war es nötig anhand einer Reihe von Vorversuchen den Einfluss verschiedener Prozessparameter auf das Schleifergebnis zu untersuchen. Als Erstes wurde hierzu eine Aufstellung der wichtigsten Schleifparameter gemacht, die typischerweise einen Einfluss auf einen Innenrundscheifprozess haben (**Tabelle 4.3**). Diese große Anzahl an Parametern konnte im Rahmen der Vorversuche jedoch nicht berücksichtigt werden. Auch ist zu erwarten, dass nicht alle Parameter einen gleichgroßen Einfluss auf das Schleifergebnis haben. Aus diesem Grund musste das Parameterfeld, das im Rahmen der Vorversuche untersucht werden sollte, noch eingegrenzt werden.

Tabelle 4.3: Typische Einflussgrößen beim Innenrundscheifen

Einflussparameter beim Innenrundscheifen	
Schnittgeschwindigkeit v_c	Ausfeuerzeit
Vorschubgeschwindigkeit v_{fr}	Kühldüsenposition
Zustellung / Schleifaufmaß a_e	Kühlmittelmenge
Oszillationsgeschwindigkeit	Umgebungstemperatur
Oszillationsweg	Kühlmitteltemperatur
Werkstückdrehzahl n_w	Werkstückcharge
Werkstückdrehrichtung	

Eine weitere Grundüberlegung war, dass die Versuche zur Beurteilung der Fähigkeit der Werkzeuge dienen sollten. Somit sollten alle Parameter, deren Variation keine direkte Aussage hinsichtlich der Werkzeugeigenschaften liefern, konstant gehalten werden. So hat beispielsweise die Ausfeuerzeit einen sehr großen Einfluss auf die Oberflächenrauheit des geschliffenen Werkstücks, lässt allerdings keine direkten Rückschlüsse auf Eigenschaften des verwendeten Werkzeugs zu. Aus diesem Grund wurde auch entschieden kein oszillierendes, sondern reines Einstechschleifen für die Versuche zu verwenden, da auch hier der Einfluss eher prozessbedingt ist.

In **Tabelle 4.4** sind die Parameter aufgelistet von denen der größte Einfluss auf das Schleifergebnis erwartet wurde. Als Punkt ist auch die Position der Kühldüsen genannt. In diesem Sinne ist hierunter die gesamte Art und Weise der Kühlung beim Schleifen zu verstehen. Die Kühlung hat zweifellos einen besonders großen Einfluss auf das

Schleifergebnis und ist auch als Einsatzparameter für die Schleifstifte von erheblicher Bedeutung. Allerdings sind Umbauten an der Kühlmittelzuführung im Allgemeinen aufwändig. Daher wurde entschieden im Rahmen dieser Arbeit zunächst nur eine möglichst gute Kühldüsenposition der Standardkühldüse zu verwenden. Aus diesem Grund wurden für die Vorversuche lediglich die vier erstgenannten Parameter variiert.

Tabelle 4.4: Vorversuchsparameter

Vorversuchsparameter
Schnittgeschwindigkeit v_c
Vorschubgeschwindigkeit v_{fr}
Werkstückdrehzahl n_w
Werkstückdrehrichtung
(Kühldüsenposition)

Versuchsparameter

Für alle Vorversuche diente ein gemeinsamer Parametersatz als Grundlage, von denen jeweils einer der oben genannten vier Parameter variiert und alle anderen konstant gehalten wurden.

- Schnittgeschwindigkeit $v_c = 40$ m/s
- Vorschubgeschwindigkeit $v_{fr} = 2$ mm/min
- Werkstückdrehzahl $n_w = 650$ 1/min
- Werkstückdrehrichtung: Gegenlauf
- Zustellung / Schleifaufmaß $a_e = 0,5$ mm (radial)
- Kühlmittelzuführung: tangential 90° gegen die Werkzeugdrehrichtung vor der Kontaktzone (siehe **Bild 4.6**)



Bild 4.6: Kühldüsenposition

Schleifstiftspezifikation

Für die Vorversuche wurde die Schleifscheibenspezifikation Nr.1 [1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1427 H1AN V360] verwendet. Diese Spezifikation wird bereits vielfach beim Außenrundscheifen eingesetzt. Daher wurde erwartet mit dieser Spezifikation auch beim Innenrundscheifen ein schleiffähiges Werkzeug zu haben.

Versuchsdurchführung

Vor dem eigentlichen Schleifen wurde das Werkzeug bei jeder Änderung eines Parameters abgerichtet. Dabei wurden immer dieselben Abrichtparameter verwendet:

- $U_d = 180$
- $q_d = 0,8$
- $v_c = 40 \text{ m/s}$
- $v_{fad} = 100 \text{ mm/min}$
- $a_{ed} = 3 \text{ }\mu\text{m pro Hub}$

Es wurden so viele Abrichthübe gefahren, bis das AE-Signal beim Abrichten über die gesamte Belagbreite konstant blieb. Die gesamte Abrichtzustellung $a_{ed \text{ gesamt}}$ richtete sich daher nach der Verschleißtiefe am Werkzeug. Dann wurden mit den eingestellten Parametern fünf Werkstücke geschliffen. Die Schliffe erfolgten so, dass immer der selbe Bereich des Schleifbelags im Eingriff war. Bei jedem Schliff wurden Tangentialkraft, Axialkraft und Schleifleistung kontinuierlich aufgezeichnet. Die Messwerte, während die Schleifscheibe im Eingriff war, wurden gemittelt und im Falle der Leistungsmessung vorher noch von der

Leerlaufleistung bereinigt. Nach jedem Schliff wurde außerdem die Oberflächenrauheit an drei Stellen gemessen (um 120° versetzt) und ebenfalls gemittelt.

Um den G-Wert berechnen zu können wurde bei jedem Schliff der Ausgangs- und Enddurchmesser der Bohrung mit einer Dreipunktmikrometerschraube gemessen, sodass das zerspannte Volumen nach fünf Schritten genau berechnet werden konnte. Die Messung des Radialverschleißes am Werkzeug erfolgte nach dem fünften Schliff mit einer Mikrometermessuhr. Dazu wurde die Messuhr in einem Bereich des Schleifstiftes genullt, der während des Schleifvorganges nicht im Eingriff war. Dann wurde der Schleifstift langsam manuell in Axialrichtung verfahren und die maximale radiale Verschleißtiefe gemessen (siehe **Bild 4.7**). Dies wurde viermal in 90° Schritten am Werkzeug wiederholt und die Ergebnisse gemittelt. Problematisch ist die Verschleißmessung immer dann wenn der Verschleiß besonders gering ist ($< 10 \mu\text{m}$), da die Oberflächenstruktur des Schleifbelages eine hohe Messgenauigkeit verhindert. Bei kleinen Verschleißwerten ist die Messungenauigkeit erwartungsgemäß in der Größenordnung wie der zu messende Wert. Aus diesem Grund können die ermittelten G-Werte bei niedrigem Verschleiß verhältnismäßig ungenau sein.

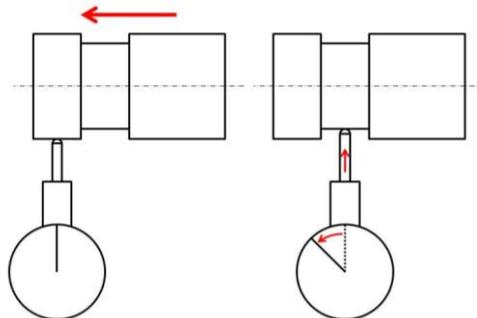


Bild 4.7: Prinzipskizze zur Verschleißmessung am Schleifstift

4.2.1 Schnittgeschwindigkeitsvariation

Von der Variation der Schnittgeschwindigkeit wurde Erfahrungsgemäß ein großer Einfluss auf das Schleifergebnis erwartet. Typische Schnittgeschwindigkeiten beim Innenrundsleifen bewegen sich im Bereich von 60 m/s. Die Schnittgeschwindigkeit wurde daher mit folgenden Werten variiert:

$$v_c \text{ [30 m/s, 40 m/s, 50 m/s, 60 m/s, 70 m/s]}$$

Die übrigen Schleifparameter wurden entsprechend **Kapitel 4.2** konstant gehalten.

Versuchsauswertung

Das in **Bild 4.8** dargestellte Diagramm zeigt die Oberflächengüte bei den unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten. Es ist gut zu erkennen, dass sich die erzielten Oberflächengüten mit steigender Schnittgeschwindigkeit geringfügig verbessern. Auffällig ist hierbei, dass die Mittenrautiefe bei $v_c = 30$ m/s besonders groß ist. Allerdings steigt die Mittenrautiefe auch bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 70$ m/s wieder leicht an.

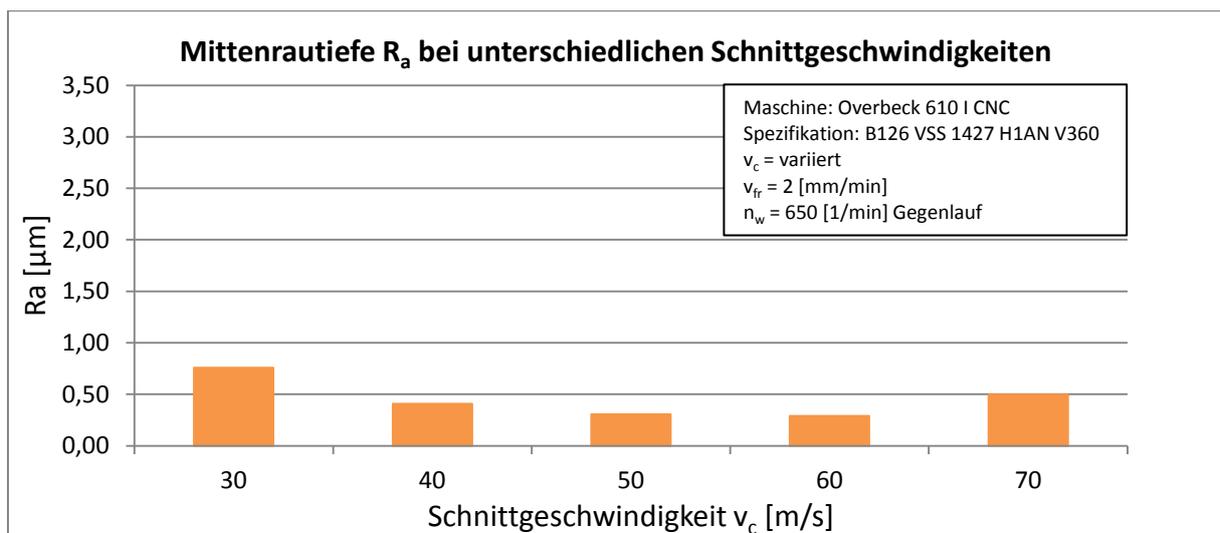


Bild 4.8: Diagramm Mittenrautiefen über Schnittgeschwindigkeit

Bild 4.9 zeigt die erreichten G-Werte aufgetragen über der Schnittgeschwindigkeit. Man kann erkennen, dass der G-Wert wie erwartet mit steigender Schnittgeschwindigkeit zunimmt. Hier ist ein besonders starker Anstieg zwischen $v_c = 30$ m/s und $v_c = 40$ m/s zu beobachten. Außerdem fällt auf, dass auch der G-Wert bei hohen Schnittgeschwindigkeiten wieder ein wenig absinkt. Hier schon ab 60 m/s.

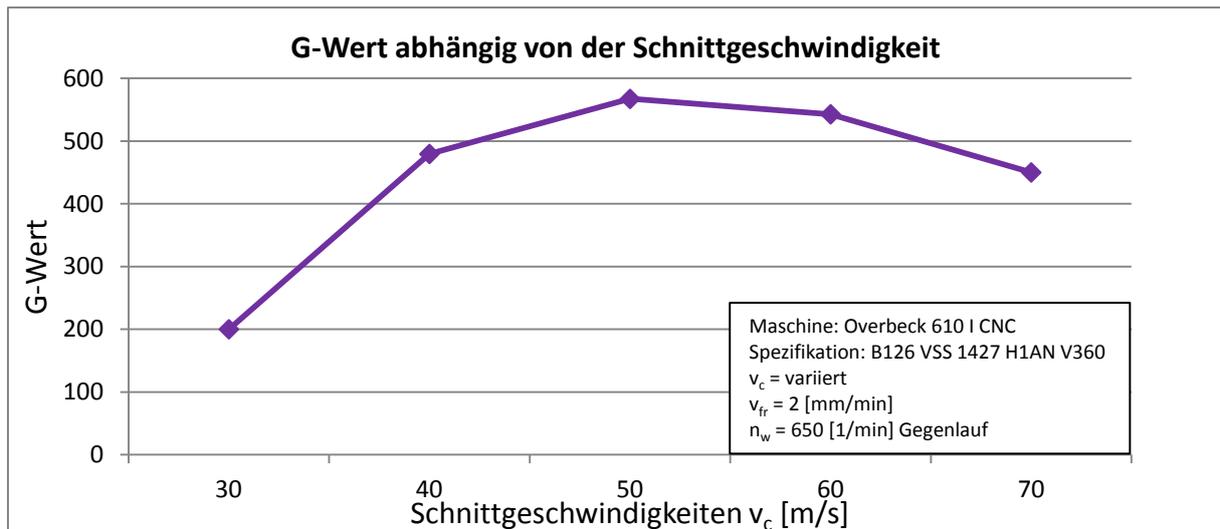


Bild 4.9: G-Wert über Schnittgeschwindigkeit

In **Bild 4.10** sind die Schleifkräfte und die Schnittleistung über der Schnittgeschwindigkeit aufgetragen. Die Schnittleistung nimmt mit steigender Schnittgeschwindigkeit erwartungsgemäß leicht zu. Bei den Schnittkräften ist ein leichter Abfall der Tangentialkraft zu beobachten. Die Normalkraft folgt hingegen keinem klaren Trend. Beachtenswert ist in diesem Zusammenhang, dass der niedrigste Wert der Tangentialkraft bei $v_c = 70$ m/s gemessen wurde.

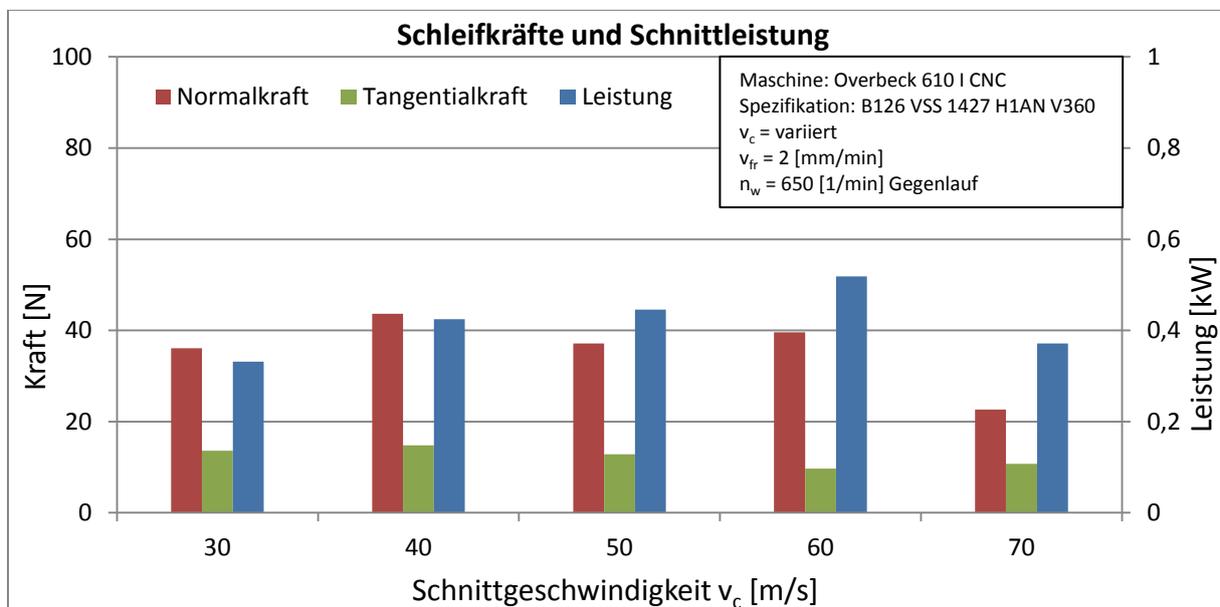


Bild 4.10: Schleifkräfte und Schnittleistung in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit

Zusammenfassung / Fazit

Die Erwartungen der Literatur werden weitgehend bestätigt. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit hat sowohl auf die Oberflächengüte als auch die Standzeit des Werkzeuges eine positive Auswirkung. Bemerkenswert ist, dass sich die Schnittgeschwindigkeit augenscheinlich nicht beliebig erhöhen lässt, da ab einem bestimmten Punkt das Schleifergebnis wieder schlechter wird. Eine weitere Erkenntnis ist, dass ein Reduzieren der Schnittgeschwindigkeit unter 40 m/s einen überdurchschnittlich negativen Effekt hat.

Im Hinblick auf die Schnittleistung und Schleifkräfte ist zunächst festzustellen, dass der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit eher gering ist. Aufgrund der Annahmen in der Literatur wäre für die Normalkraft, Tangentialkraft und Schnittleistung im Allgemeinen ein proportionales Verhalten zu erwarten. Dies ist darin begründet, dass die Schleifkräfte hauptsächlich für die Leistungsaufnahme der Schleifspindel sind. Dies konnte hier nicht sicher festgestellt werden. Allerdings liegen die gemessenen Werte in einem relativ engen Bereich, sodass möglicherweise die Streuung der Messwerte das erwartete Verhalten verzerrt.

4.2.2 Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit beim Schleifen ist für Anwender von besonders hoher Bedeutung. In der Produktion bedeuten höhere Vorschubgeschwindigkeiten gleichzeitig niedrige Taktzeiten und somit Einsparpotential. In dieser Versuchsreihe sollte ermittelt werden bis zu welchen Vorschubgeschwindigkeiten die Werkzeuge eingesetzt werden können. Die Vorschubgeschwindigkeit sollte daher ausgehend von $v_{fr} = 2$ mm/min in Schritten von 2 mm/min bis $v_{fr} = 10$ mm/min erhöht werden. Die übrigen Schleifparameter entsprachen den in **Kapitel 4.2** genannten Werten.

v_{fr} [2 mm/min; 4 mm/min; 6 mm/min; 8 mm/min; 10 mm/min]

Es muss vorweg erwähnt werden, dass der Verschleiß bereits bei $v_{fr} = 8$ mm/min so groß wurde, dass auf einen weiteren Versuch mit $v_{fr} = 10$ mm/min verzichtet wurde.

Versuchsauswertung

Die Mittenrauheiten (**Bild 4.11**) steigen mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten an. Dies entspricht den Annahmen der Literatur. Interessant ist, dass die Rauheit bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_{fr} = 2$ mm/min schon wesentlich höher ist als dies bei der Variation der Vorschubgeschwindigkeit der Fall war.

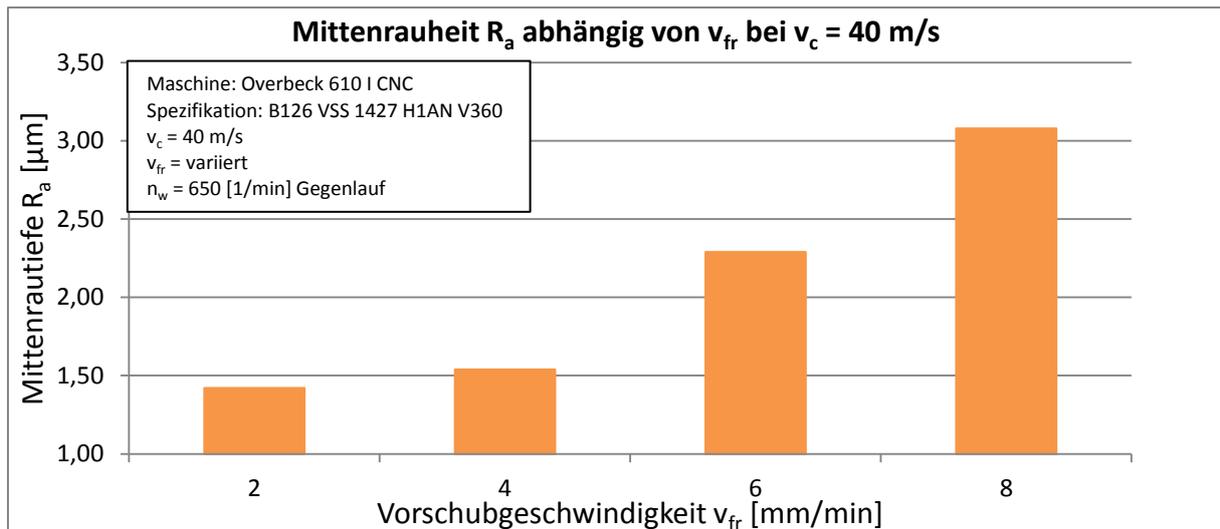


Bild 4.11: Mittenrauheit über Vorschubgeschwindigkeit

Im Diagramm in **Bild 4.12** ist der G-Wert in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit dargestellt. Wie erwartet steigt der Verschleiß bei zunehmendem v_{fr} an und somit sinkt der G-Wert. Bei $v_{fr} = 8$ mm/min betrug der Verschleiß bereits nach einem Werkstück $160 \mu\text{m}$ radial, sodass keine fünf Werkstücke geschliffen werden konnten. Im Gegensatz dazu betrug der Verschleiß bei $v_{fr} = 6$ mm/min ungefähr $18 \mu\text{m}$ pro geschliffenem Werkstück

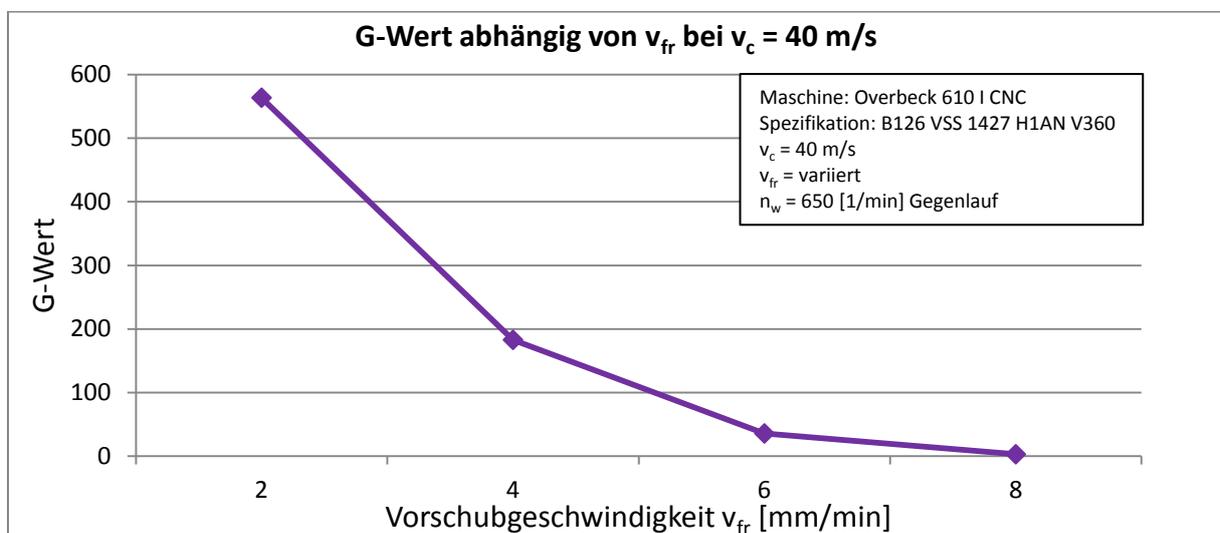


Bild 4.12: G-Wert über Vorschubgeschwindigkeit

Das Diagramm in **Bild 4.13** zeigt die Entwicklung der Schleifkräfte und Leistung bei steigender Vorschubgeschwindigkeit. Der Theorie entsprechend steigt die Schnittleistung kontinuierlich an. Auch die Tangentialkraft steigt bis 6 mm/min zunächst an. Bei 8 mm/min ist dann wiederum ein leichter Rückgang festzustellen. Da bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_{fr} = 8$ mm/min lediglich ein Werkstück geschliffen wurde, ist die Aussagekraft der Daten für diesen Messpunkt allerdings streitbar. Die Normalkraft erreicht ihr Maximum bereits bei $v_{fr} = 4$ mm/min und sinkt dann ebenfalls wieder ab.

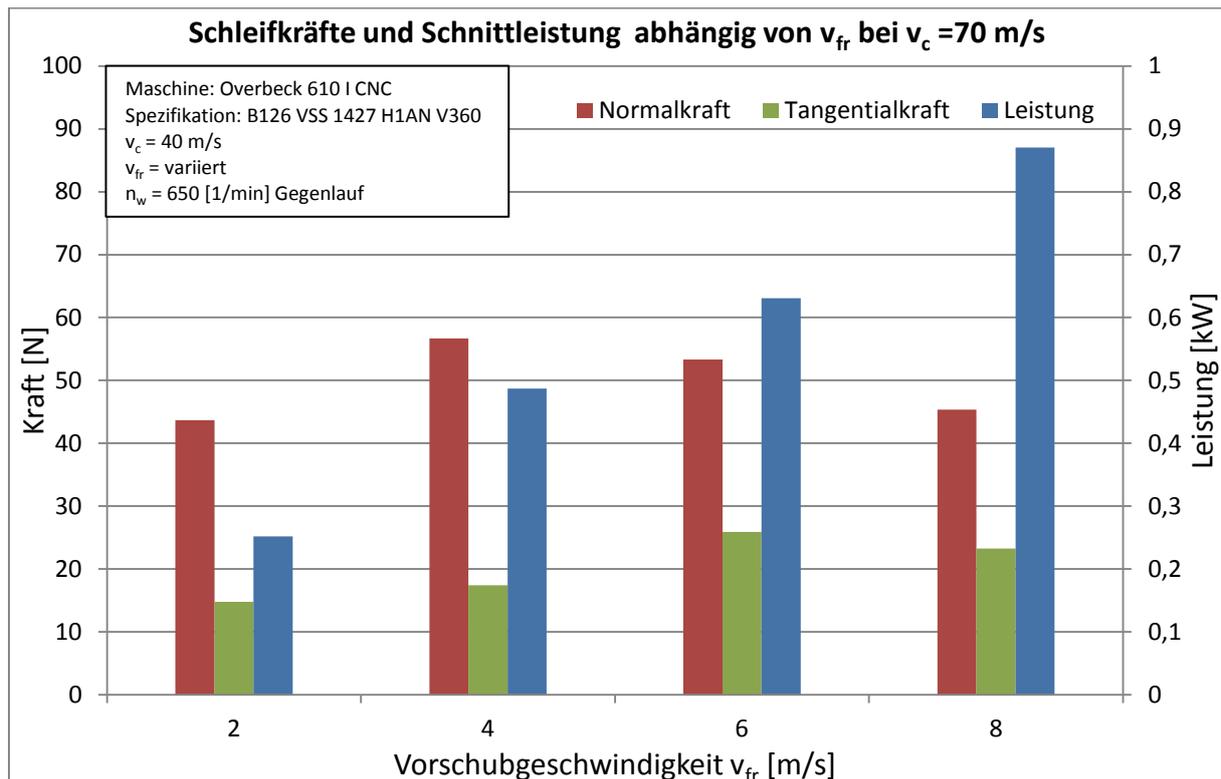


Bild 4.13: Schleifkräfte und Schnittleistung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

Aufgrund der Tatsache, dass der Verschleiß mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit so unerwartet stark anstieg, wurde entschieden eine weitere Versuchsreihe zur Variation der Vorschubgeschwindigkeit durchzuführen. Bei dieser Versuchsreihe wurde eine Schnittgeschwindigkeit $v_c = 70$ m/s verwendet. Hierdurch sollte überprüft werden, ob eine hohe Schnittgeschwindigkeit möglicherweise Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich über 6 mm/min ermöglicht. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde so weit erhöht bis der erreichte G-Wert unter 200 absank.

Die Diagramme (**Bild 4.14** bis **Bild 4.16**) auf der folgenden Seite fassen die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zusammen. Auch hier ist mit steigender Vorschubgeschwindigkeit ein Anstieg der Mittenrauheit und ein Absinken des G-Werts festzustellen. Allerdings liegt die Mittenrauheit bei $v_c = 70$ m/s in allen Variationen von v_{fr} deutlich unter ihrem entsprechenden Wert bei $v_c = 40$ m/s. Für den G-Wert gilt ein ähnliches Verhalten, auch wenn die Verbesserung gegenüber $v_c = 40$ m/s weniger stark ausgeprägt ist. Allerdings ist auch hier ein deutlicher Einbruch des G-Werts bei $v_{fr} = 6$ mm/min zu beobachten, sodass die G-Wert-Grenze hier unterschritten wurde. Die Schleifkräfte (**Bild 4.16**) liegen ebenfalls deutlich unter den Ergebnissen bei $v_c = 40$ m/s. Dies bekräftigen die Ergebnisse aus der Versuchsreihe zur Schnittgeschwindigkeitsvariation. Trotz erhöhter Schnittgeschwindigkeit liegen alle Schleifleistungen unter den Werten der ersten Versuchsreihe. Dies kann mit hoher Sicherheit auf die deutlich geringeren Schleifkräfte zurückgeführt werden, da entsprechend weniger Reibung auftritt.

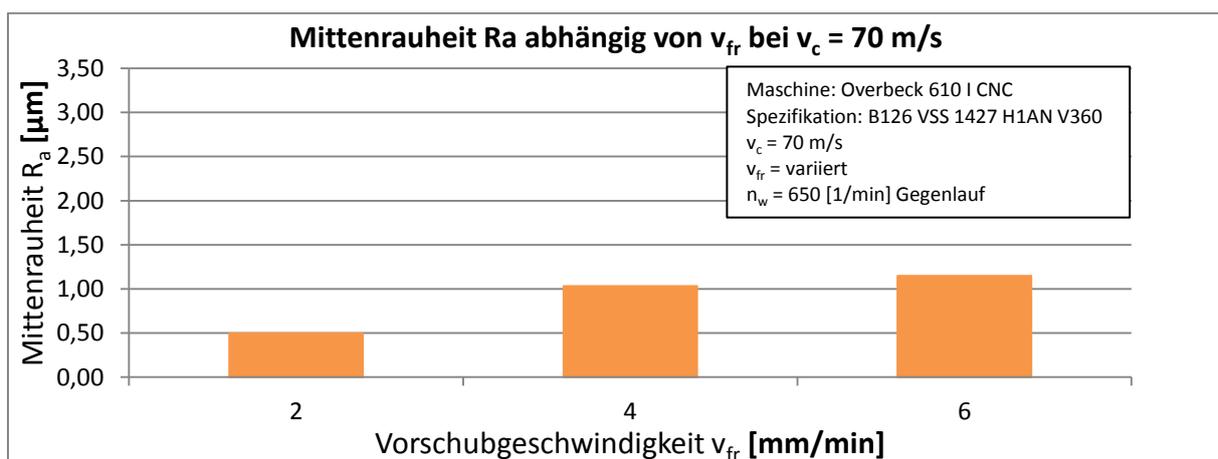


Bild 4.14: Mittenrauheit in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei $v_c = 70$ m/s

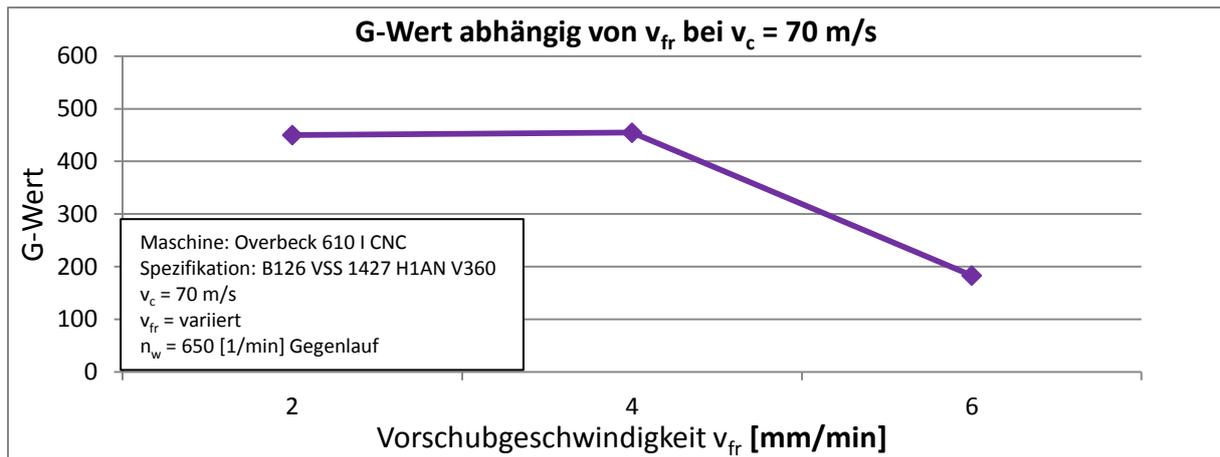


Bild 4.15: G-Wert in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei $v_c = 70$ m/s

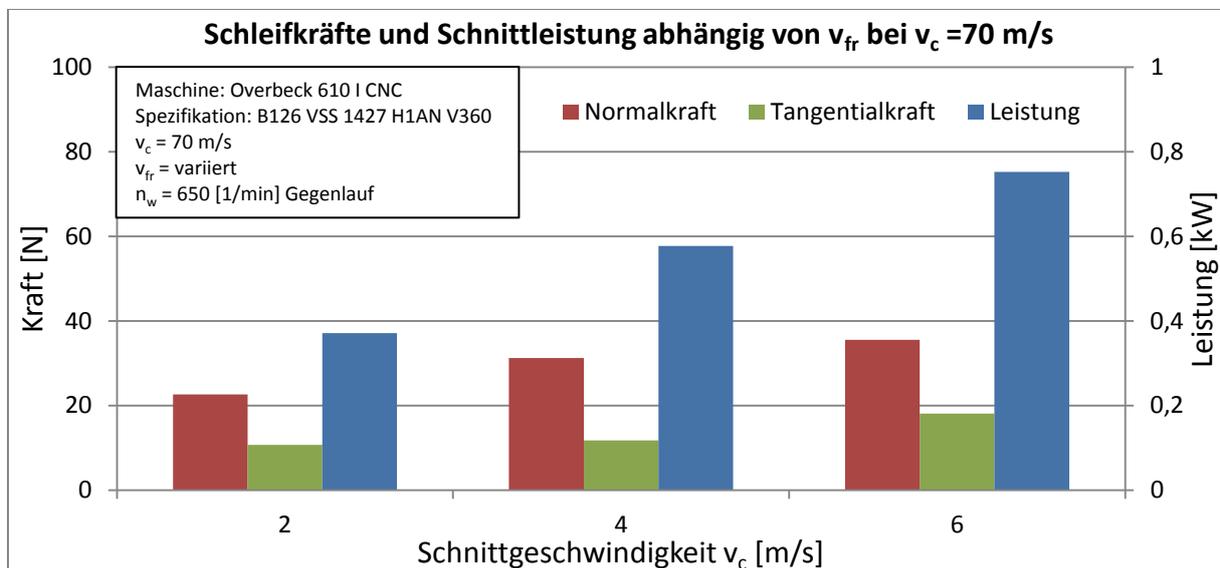


Bild 4.16: Schleifkräfte und Schnittleistung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei $v_c = 70$ m/s

Zusammenfassung / Fazit

Wie die theoretischen Annahmen der Literatur vermuten ließen hat eine Änderung der Vorschubgeschwindigkeit einen starken Einfluss auf das Schleifergebnis. Oberflächenrauheit, Schleifkräfte und Schnittleistung steigen mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten deutlich an und der G-Wert sinkt stark ab. Eine besonders wichtige Erkenntnis aus diesen Versuchsreihen ist die Obergrenze der Vorschubgeschwindigkeit für dieses Werkzeug. Auf Basis der vorliegenden Daten liegt sie im Bereich bei $v_{fr} = 6$ mm/min. Aufgrund des starken Anstieges des Verschleißes bei $v_{fr} = 8$ mm/min lässt sich vermuten, dass die Schleifbedingungen an diesem Punkt ein Zusammenbrechen der Bindung bewirkt haben.

4.2.3 Werkstückdrehzahl / Geschwindigkeitsverhältnis

Der Einfluss der Werkstückdrehzahl auf das Schleifergebnis wurde im Vergleich mit dem Einfluss von Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit als geringer angenommen. Im Gegenlauf bewirkt eine höhere Werkstückdrehzahl auch einen geringen Anstieg der relativen Schnittgeschwindigkeit, da das Werkstück sich mit einer Umfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt der Werkzeug Umfangsgeschwindigkeit relativ zu diesem bewegt.

Mit dieser Versuchsreihe sollte untersucht werden welche Auswirkungen eine Erhöhung und eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeit auf das Schleifergebnis hat. Wie in den vorangegangenen Versuchsreihen werden die übrigen Schleifparameter konstant gehalten. Die Werkstückdrehzahl wurde mit folgenden Werten variiert:

$$n_w \text{ [400 1/min, 650 1/min, 1000 1/min]}$$

Versuchsauswertung

In **Bild 4.17** ist die Mittenrautiefe über der Werkstückdrehzahl aufgetragen. Generell bewegen sich die Oberflächenrauheiten in einem engen Bereich. Die geringste Rauheit wurde bei der niedrigsten Werkstückdrehzahl erreicht. Bei $n_w = 650$ 1/min und $n_w = 1000$ 1/min ist die Mittenrautiefe annähernd gleich.

Bild 4.18 stellt die Veränderung des G-Werts bei unterschiedlichen Werkstückdrehzahlen dar. Der beste G-Wert wurde bei $n_w = 400$ 1/min erreicht und das Minimum liegt analog zum Verlauf der Mittenrautiefe ebenfalls bei $n_w = 650$ 1/min. Die Unterschiede sind ausgeprägter als die der Mittenrautiefe.

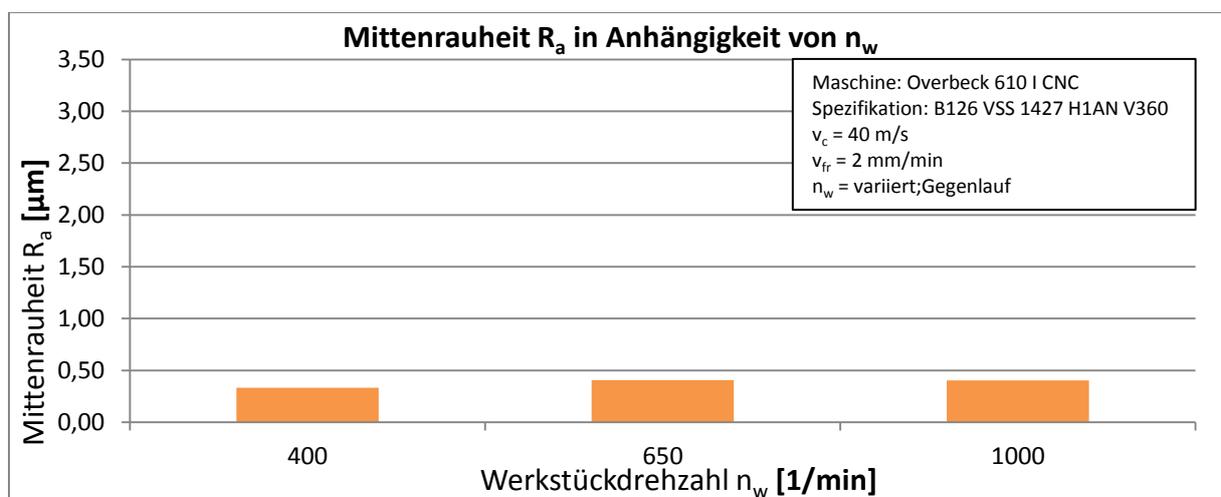


Bild 4.17: Mittenrauheit abhängig von n_w

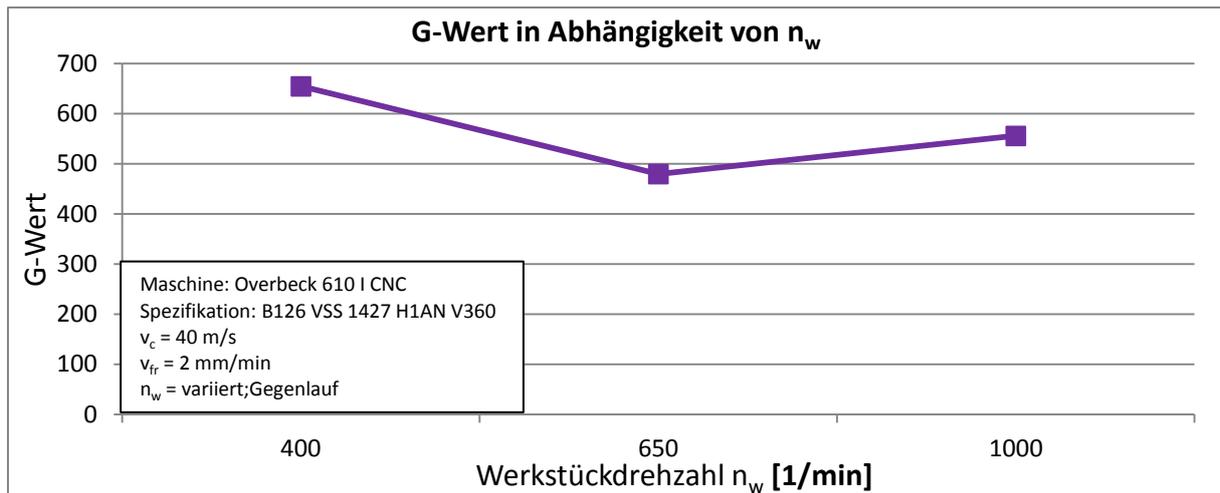


Bild 4.18: G-Wert abhängig von n_w

Das Diagramm in **Bild 4.19** zeigt nun allerdings ein abweichendes Verhalten der Kräfte und Leistung. Bei einem $n_w = 400$ 1/min sind sowohl die Schleifkräfte als auch die Schnittleistung am höchsten. Die niedrigste Schnittleistung wird dagegen bei $n_w = 650$ 1/min und die niedrigsten Schleifkräfte bei $n_w = 1000$ 1/min erreicht. Zu erwarten wäre ein analoges Verhalten der Schnittleistung zu den Schleifkräften, da die Schnittleistung rechnerisch von den Schleifkräften abgeleitet werden kann. Da die Werte der Schleifkräfte bei $n_w = 650$ 1/min und $n_w = 1000$ 1/min relativ dicht beieinander liegen kann man vermuten, dass es sich bei der Abweichung der Schnittleistung um eine Messungenauigkeit handelt.

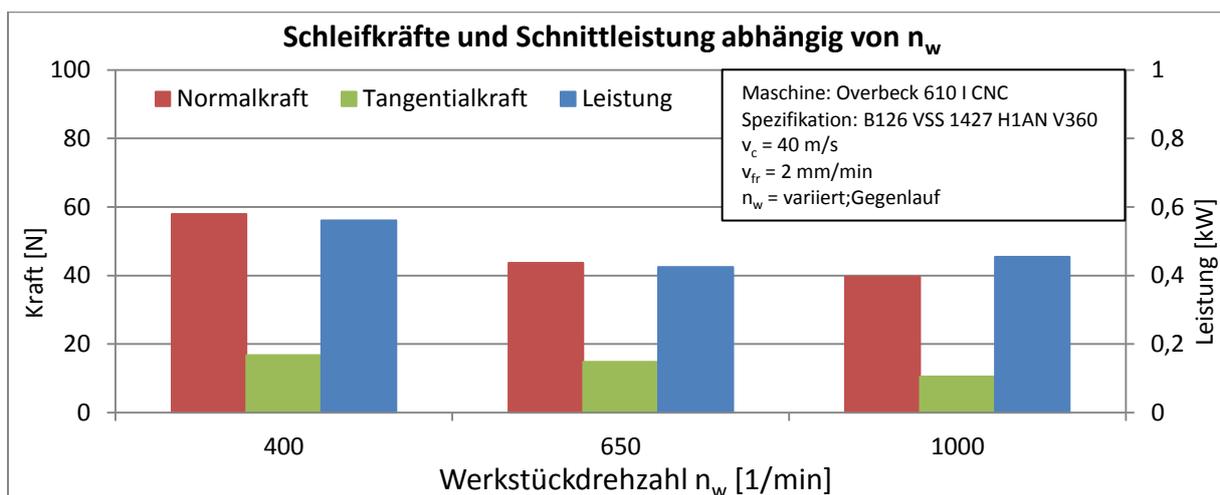


Bild 4.19: Schleifkräfte und Schnittleistung abhängig von n_w

Zusammenfassung / Fazit

Wie die Diagramme zeigen, ist der Einfluss der Werkstückgeschwindigkeit deutlich geringer als der Einfluss von Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit. Hinsichtlich der Oberflächenrauheit und des G-Werts ist eine niedrige Werkstückdrehzahl vorteilhaft. Bezüglich der Schnittleistung und der Schleifkräfte erweisen sich höhere Werkstückdrehzahlen als signifikant besser. Wie in **Kapitel 4.2.2** beschrieben, wird angenommen, dass hohe Schleifkräfte ein Zusammenbrechen der Bindung hervorrufen können. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll höhere Werkstückdrehzahlen zu wählen.

4.2.4 Gleichlaufschleifen gegenüber Gegenlaufschleifen

Um den Einfluss der Drehrichtung des Werkstücks zu überprüfen, wurden die Versuche zur Schnittgeschwindigkeitsvariation und die erste Versuchsreihe der Vorschubgeschwindigkeitsvariation nochmals im Gleichlauf wiederholt. Daher wurden für diese Untersuchung zwei Versuchsreihen durchgeführt:

Versuchsreihe 1 (Schnittgeschwindigkeit)

v_c [30 m/s, 40 m/s, 50 m/s, 60 m/s]

$v_{fr} = 2$ mm/min

$n_w = 650$ 1/min im Gleichlauf

Versuchsreihe 2 (Vorschubgeschwindigkeit)

$v_c = 40$ m/s

v_{fr} [2 mm/min, 4 mm/min, 6 mm/min]

$n_w = 650$ 1/min im Gleichlauf

Versuchsauswertung

Bild 4.20 zeigt die unterschiedlichen Rauheiten bei Gegenlauf [GGL] und bei Gleichlauf [GL] des Werkstücks. Die gefüllten Blasen geben die Verhältnisse im Gegenlauf an, die schwarzen Ringe die Verhältnisse im Gleichlauf. Zum Vergleich sind die Absoluten Zahlenwerte neben den Blasen in der jeweiligen Farbe angegeben. Wie man sehen kann, sind die Unterschiede in der Rauheit zwischen Gleichlauf und gegenlauf gering. Bei fast allen Parameterkombinationen treten im Gegenlauf geringfügig bessere Werte auf. Allerdings müssen die Unterschiede wohl eher den allgemeinen Schwankungen der Messwerte und der Messungenauigkeit zugeschrieben werden.

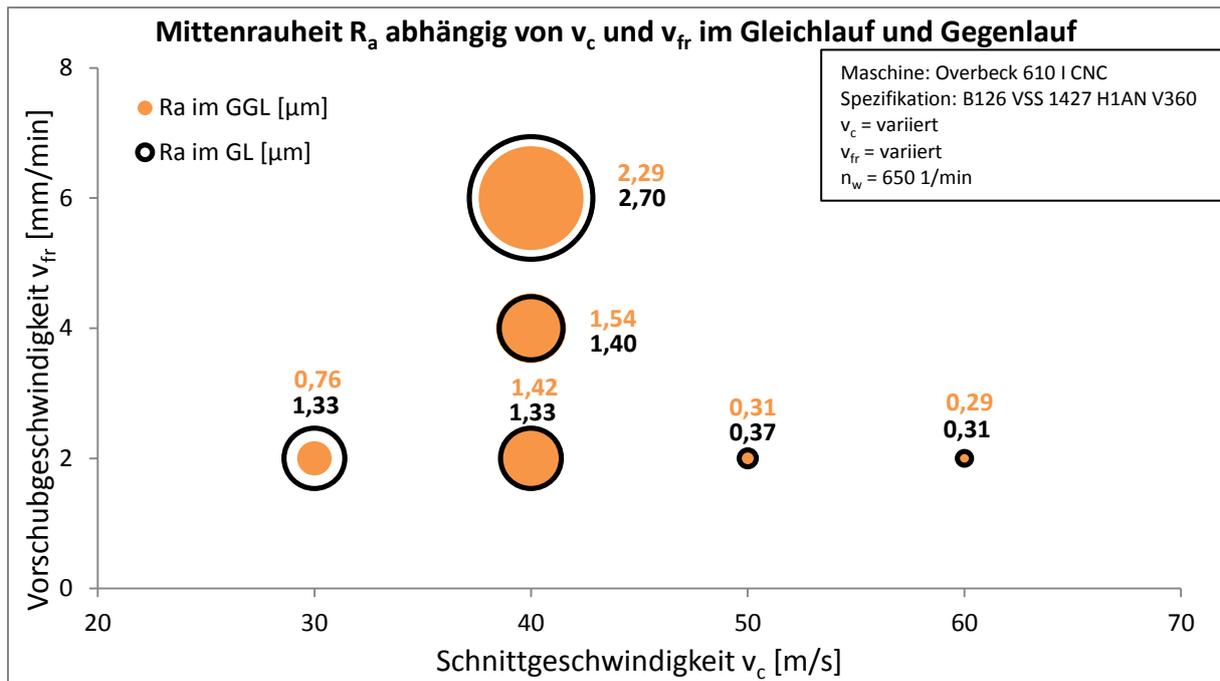


Bild 4.20: Gegenüberstellung von R_a im Gleichlauf und Gegenlauf

Das Diagramm in **Bild 4.21** stellt den G-Wert bei unterschiedlichen Werkstückdrehrichtungen gegenüber. Wie man sieht ist der G-Wert bei Schnittgeschwindigkeiten über 40 m/s im Gleichlauf besser als im Gegenlauf. Allerdings war der Verschleiß bei diesen beiden Datenpunkten $< 10 \mu\text{m}$. Da unter diesen Bedingungen der Messfehler Schwankungen des G-Werts von ca. 30% verursachen kann, kann dies eventuell der Messungenauigkeit zugeschrieben werden. Dennoch zeigt das Diagramm, dass auch hier das Verhalten von Gegenlauf zu Gleichlauf sehr ähnlich ist. Als Tendenz ist bei hohen Schnittgeschwindigkeiten der Gleichlauf leicht überlegen, bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten eher der Gegenlauf.

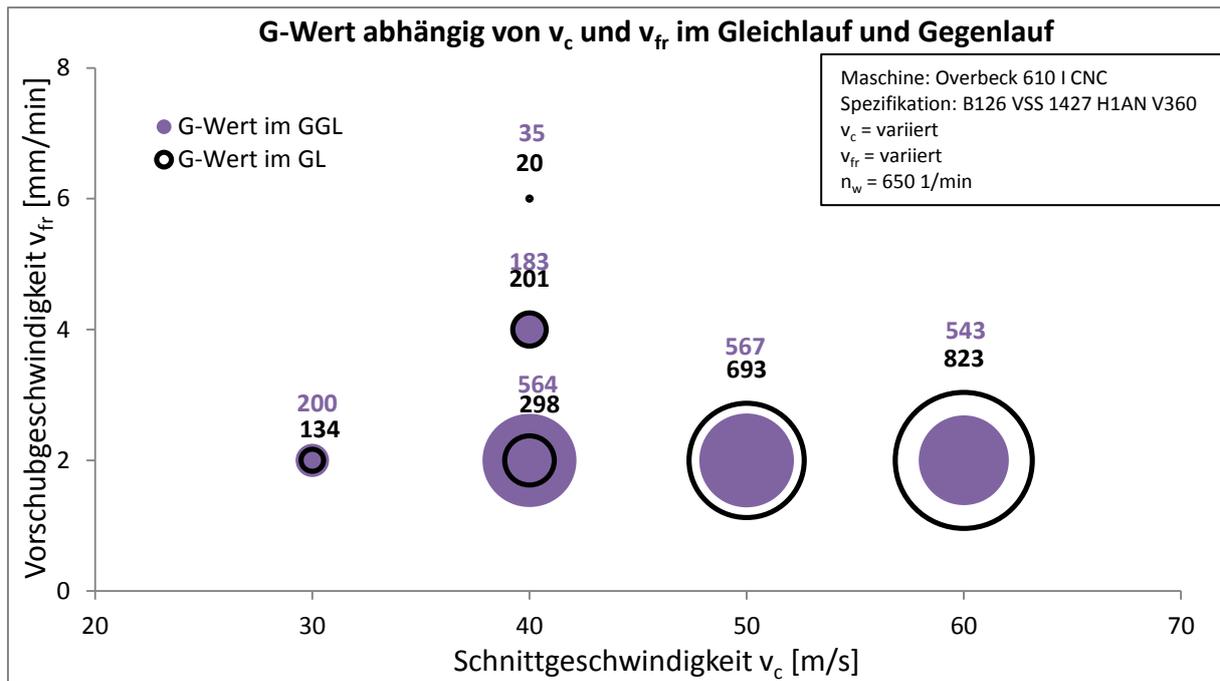


Bild 4.21: Gegenüberstellung des G-Werts im Gleichlauf und Gegenlauf

Auch die in **Bild 4.22** dargestellte Schnittleistung weist nur minimale Unterschiede zwischen Gleichlauf und Gegenlauf auf. Die Werte liegen in allen Fällen dicht zusammen, sodass die Schwankungen der zu erwartenden Streuung der Messwerte zuzuschreiben ist. Auf die Leistung hat die Drehrichtung des Werkstücks demnach keinen Einfluss.

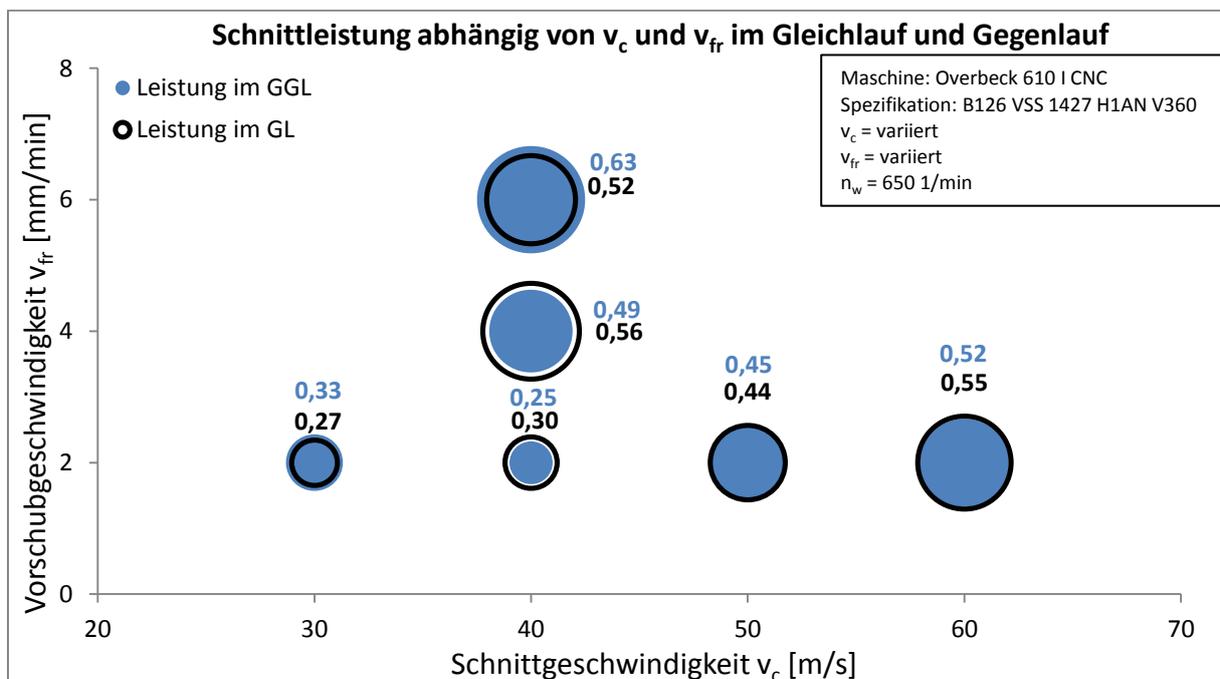


Bild 4.22: Gegenüberstellung der Schnittleistung im Gleichlauf und Gegenlauf

Schlussendlich zeigt auch das Diagramm zum Vergleich der Normalkraft (**Bild 4.23**) ein Verhalten mit annähernd gleichgroßen Kräften im Gegenlauf und im Gleichlauf. Bei diesem Diagramm können die minimalen Schwankungen als Messungengenauigkeit betrachtet werden.

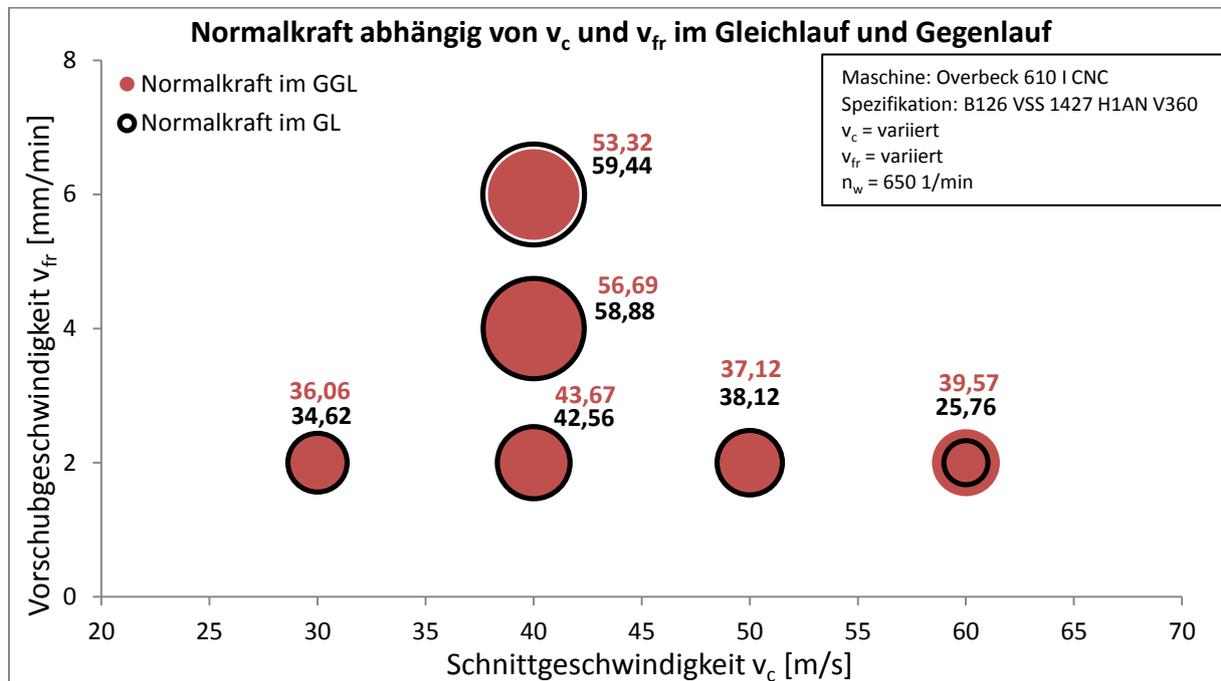


Bild 4.23: Gegenüberstellung der Schnittleistung im Gleichlauf und Gegenlauf

Zusammenfassung / Fazit

Anhand der Daten aus diesen Versuchsreihen lässt sich annehmen, dass die Drehrichtung des Werkstücks keinen nennenswerten Einfluss auf das Schleifergebnis hat. Die auftretenden Unterschiede in den Messwerten sind hierbei der normalen Schwankung der Messwerte und der Messungengenauigkeit zuzuschreiben. Ein Trend in eine bestimmte Richtung lässt sich nicht erkennen.

4.2.5 Fazit

Als Resultat der Versuchsreihen kann der Einfluss der vier überprüften Parameter eingeschätzt werden. Entsprechend den Erwartungen aus der Theorie haben die Schnittgeschwindigkeit und die Vorschubgeschwindigkeiten einen signifikanten Einfluss auf das Schleifergebnis. In diesem Zusammenhang ergab der Versuch der Schnittgeschwindigkeitsvariation, dass eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeiten unter $v_c = 40$ m/s eine überproportionale Verschlechterung der Schleifergebnisse bewirkt. Aus diesem Grund kann dies als Untergrenze der Schnittgeschwindigkeit für Schleifversuche mit

diesen Werkzeugen betrachtet werden. Die Variation der Vorschubgeschwindigkeit zeigte deutlich, dass diese einen noch größeren Einfluss als die Schnittgeschwindigkeit hat. Die Obergrenze der Vorschubgeschwindigkeit konnte im Bereich von $v_{fr} = 6$ mm/min gefunden werden. Auch wenn dieses Ergebnis deutlich niedriger ausfällt als die ursprünglichen Annahmen, so hat die zweite Versuchsreihe mit geänderter Schnittgeschwindigkeit dies noch einmal bestätigt.

Die Werkstückdrehrichtung hat sich hingegen als nahezu ohne Auswirkungen auf den Schleifprozess erwiesen. Wenn überhaupt, dann ist ein geringer Vorteil beim Gegenlaufschleifen zu vermuten. In der Praxis ist das Gegenlaufschleifen bei Innenrundscheifprozessen üblich. Aus diesen Gründen sollte es bei weiteren Versuchen zum Einsatz kommen.

Bei der Variation der Werkstückdrehzahl konnte ein eher geringer Einfluss festgestellt werden. Dabei boten die Ergebnisse kein schlüssiges Bild welche Werkstückdrehzahlen zu bevorzugen sind. Niedrige Drehzahlen wirken sich positiv auf Rauheit und G-Wert aus, hohe Drehzahlen hingegen bedingen niedrigere Schleifkräfte und Leistung.

4.3 Bindungsuntersuchung

Mit den Daten aus den Vorversuchen wurde ein Versuchsprogramm abgeleitet um weiter Bindungsspezifikationen zu testen. Das Ziel dieser Versuche sollte es sein, einen Überblick über die Eigenschaften des N7 Bindungssystems beim Innenrundsleifen zu bekommen. Weiterhin sollte überprüft werden in welchem Maße die Ergebnisse aus den Vorversuchen auf andere Bindungsspezifikationen übertragbar sind.

Als erstes wurde anhand der Ergebnisse der Vorversuche festgelegt welche Parameter im Versuchsprogramm variiert werden sollten. Im Zuge der Vorversuche wurden als Haupteinflussfaktoren die Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit erkannt. Die Werkstückdrehrichtung hatte keinen signifikanten Einfluss aufgezeigt und sollte somit nicht berücksichtigt werden. Auch der Einfluss der Werkstückdrehzahl wurde als eher geringfügig eingestuft und wurde daher ebenfalls nicht mehr berücksichtigt.

4.3.1 Versuchsparameter

Für die folgenden Versuchsreihen wurde daher der Versuchsparameter der Schnittgeschwindigkeitsvariation und der Vorschubvariation aus den Vorversuchen zu der Matrix in **Tabelle 4.5** kombiniert. Daher ergaben sich zwölf Parameterkombinationen, die mit jeder Bindungsspezifikation durchlaufen wurden.

Tabelle 4.5: Parametermatrix der Bindungsspezifikationsversuche

		Schnittgeschwindigkeit			
		40 m/s	50 m/s	60 m/s	70 m/s
Vorschub- geschwindigkeit	2 mm/min	X	X	X	X
	4 mm/min	X	X	X	X
	6 mm/min	X	X	X	X

Die Übrigen Parameter wurden erneut wie während der Vorversuche gewählt und konstant gehalten:

- Werkstückdrehzahl $n_w = 650$ 1/min
- Werkstückdrehrichtung: Gegenlauf
- Zustellung / Schleifaufmaß $a_e = 0,5$ mm (radial)

- Kühlmittelzuführung: tangential 90° gegen die Werkzeugdrehrichtung vor der Kontaktzone (siehe **Bild 4.6**)

Auch die Versuchsdurchführung sollte wiederum genauso wie während der Vorversuche erfolgen. Dabei erfolgte vor jedem Parametersatz ein Abrichten des Werkzeugs mit den gleichen Parametern wie während der Vorversuche:

- $U_d = 180$
- $q_d = 0,8$
- $v_c = 40$ m/s
- $v_{fad} = 100$ mm/min
- $a_{ed} = 3$ μ m pro Hub

Danach wurden fünf Werkstücke mit dem Parametersatz geschliffen wobei auch hier wieder vor und nach dem Schleifen die Bohrungen der Werkstücke und nach jedem Schliff die Oberfläche gemessen wurde. Die Verschleißmessung erfolgte analog zu den Vorversuchen wieder nach dem fünften Schliff.

Versuchsspezifikationen

Um ein möglichst breites Spektrum verschiedener Spezifikationen aus dem N7 Bindungssystem abzudecken und den Versuchsaufwand dennoch handhabbar zu halten wurde entschieden aus dem Bindungsschema in **Bild 4.1** jeweils die Eckpunkte und das Zentrum zu untersuchen. Da die Vorversuche mit der Bindung Nr. 1 durchgeführt wurden und hierfür bereits ein Teil der Daten vorhanden waren, sollte diese und die nicht die Bindung Nr. 6 in dieser Versuchsreihe verwendet werden. Daher ergaben sich folgende Bindungen in **Tabelle 4.6**, die im Rahmen dieser Versuchsreihen untersucht werden sollten.

Tabelle 4.6: Bindungsspezifikationen im Einsatz beim Bindungsvergleich

Spezifikationen der Versuchswerkzeuge				
Nr.	Bindung	Korngröße	Konzentration	Spezifikation
1	1427H	B 126	V 360	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1427 H1AN V360
2	0427G	B 126	V 364,8	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 0427 G1AN V364,4
4	1027M	B 126	V 480	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1027 M1AN V480
5	1227J	B 126	V 422,4	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 1227 J1AN V422,4
8	2027M	B 126	V 480	1A1-25,5-20-5 B126 VSS 2027 M1AN V480

4.3.2 Auswertung Spezifikation 1 [B126 VSS 1427 H1AN V360]

Diese Spezifikation wurde bereits für die Vorversuche verwendet. Sie befindet sich im linken unteren Bereich des Spezifikationsspektrums und weist daher ein hohes Porenvolumen in Verbindung mit einem geringen Härtegrad auf. **Bild 4.24** zeigt eine Matrix der erzielten Mittenrauheiten für alle Parameterkombinationen, die im Zuge dieser Versuche für die Spezifikation getestet wurden. Die Spezifikation erreicht über weite Bereiche der Matrix gute Oberflächenwerte. Erwartungsgemäß steigen die Mittenrauheiten mit steigenden Vorschubgeschwindigkeiten. Auffällig ist, dass sich die Rauheiten sowohl bei $v_c = 40$ m/s als auch $v_c = 70$ m/s oberhalb von $v_{fr} = 2$ mm/min stark verschlechtern.

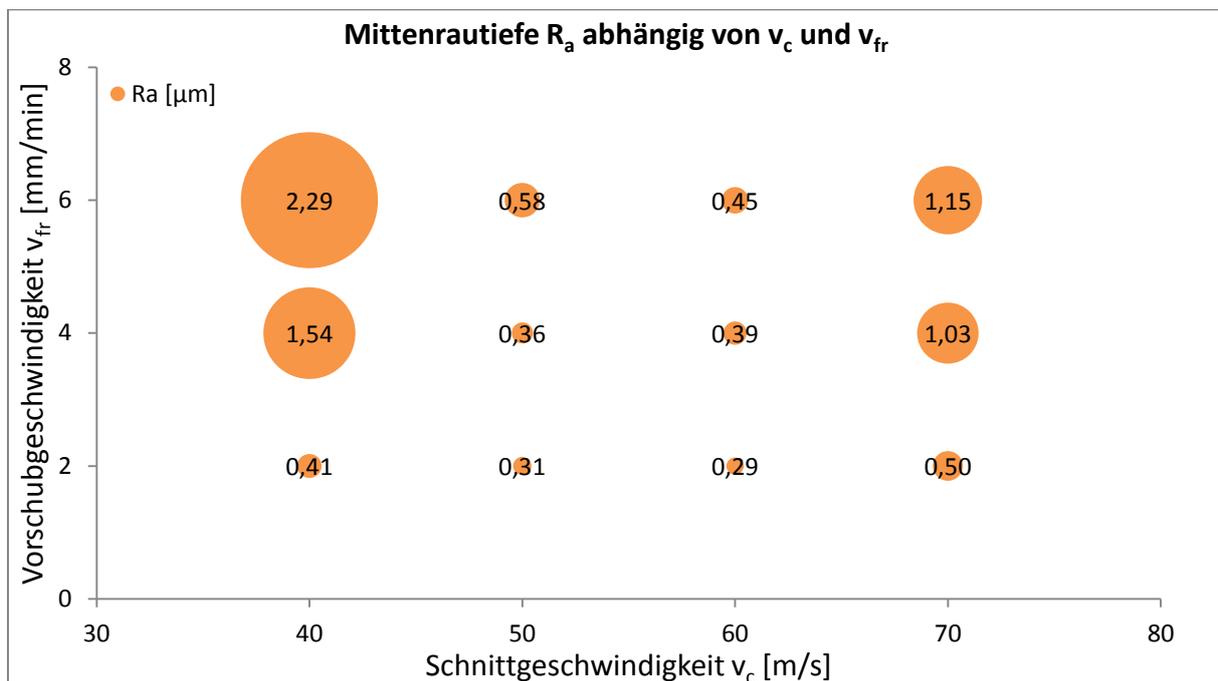


Bild 4.24: Mittenrauheiten der Spezifikation 1

Das Diagramm in **Bild 4.25** stellt die Schleifkräfte und Schnittleistungen für alle Punkte der Parametermatrix geordnet nach Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit dar. Auffällig ist zunächst, dass die Schleifkräfte und auch die Schnittleistungen sich durchgängig auf einem niedrigen Niveau befinden. Vergleicht man Kräfte und Leistung bei gleichen Vorschubgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten sieht man, dass bei Schnittgeschwindigkeit 40 m/s und 70 m/ die Kräfte und Leistungen niedriger sind als bei $v_c = 50$ m/s bzw. 60 m/s.

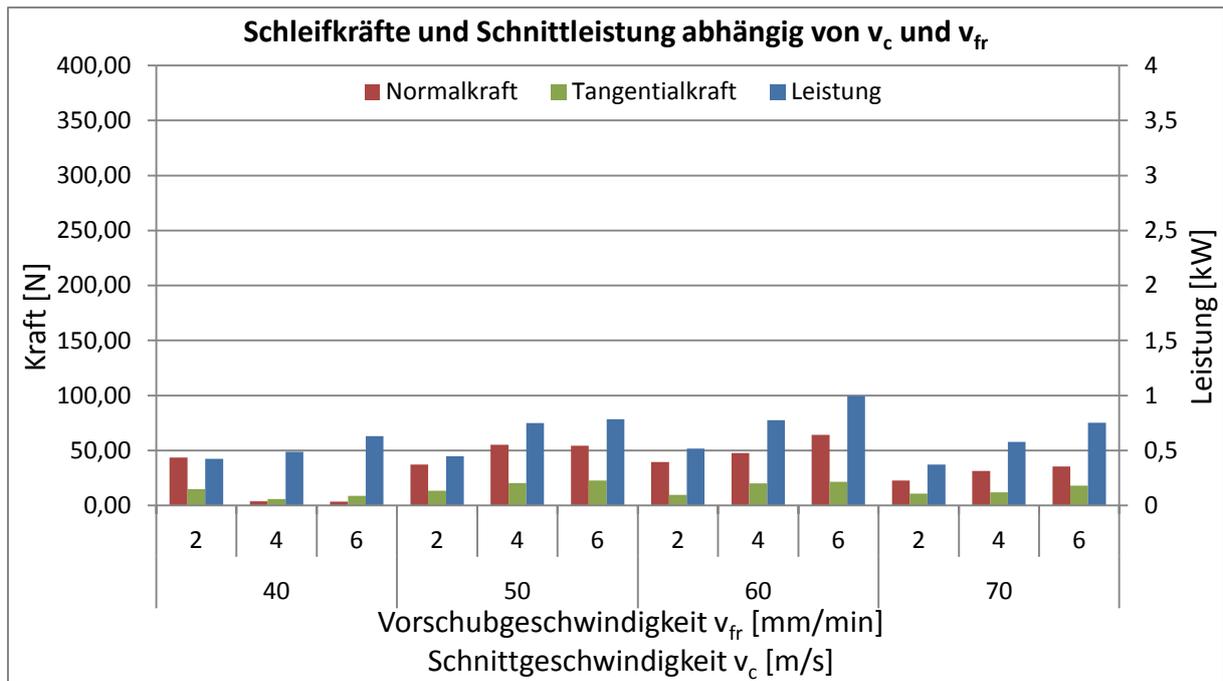


Bild 4.25: Schleifkräfte und Schnittleistungen der Spezifikation 1

Der G-Wert für alle Punkte der Parametermatrix ist in **Bild 4.26** dargestellt. Die erzielten G-Werte sind über die komplette Matrix hinweg als eher gering einzustufen. Die verschiedenen Parameterkombinationen verhalten sich für den G-Wert nahezu analog zum Verhalten der Mittenrauheit. Die besten Ergebnisse wurden bei den Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 50$ m/s und 60 m/s erzielt. Auch hier sind die erreichten G-Werte bei $v_c = 40$ m/s und 70 m/s oberhalb von $v_{fr} = 2$ mm/min besonders niedrig.

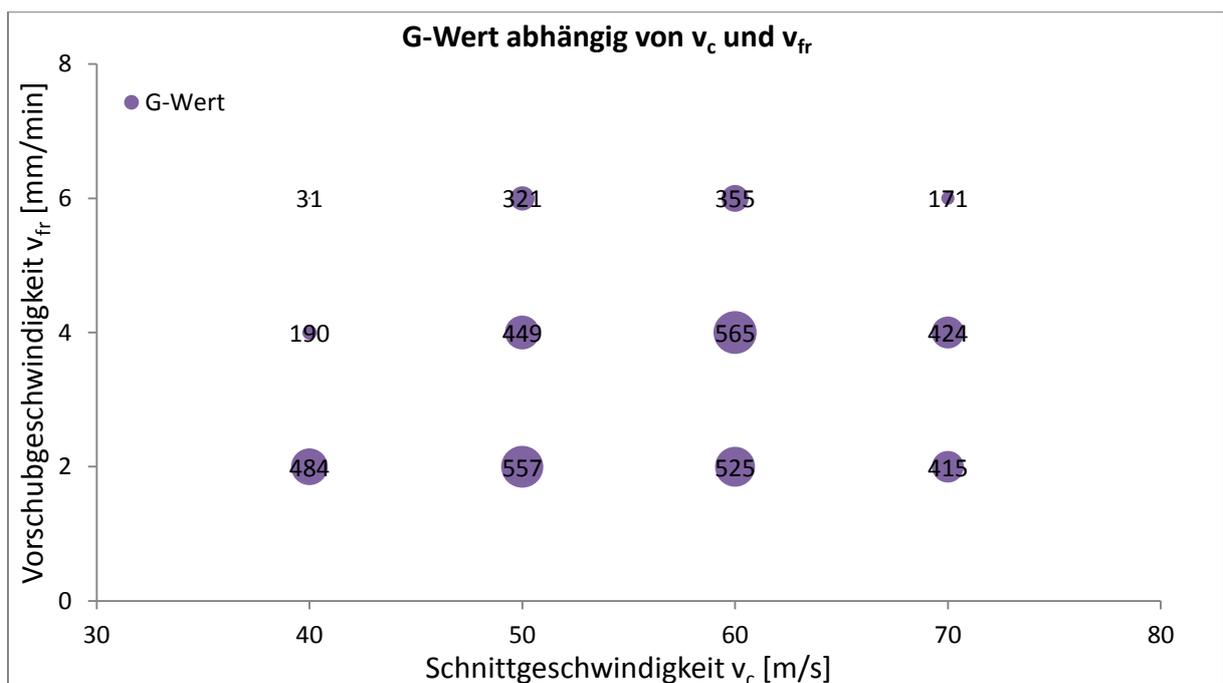


Bild 4.26: G-Werte der Spezifikation 1

Zusammenfassung / Fazit

Diese Spezifikation schleift über den gesamten Bereich der Versuchsparameter unter niedrigen Kräften und Leistungen. Auch die erreichbaren G-Werte sind eher niedrig. Da die Bindung sowohl einen niedrigen Härtegrad als auch eine hohe Porosität aufweist ist dieses Verhalten schlüssig. Hierbei handelt es sich um eine weiche Bindung, die der Theorie gemäß unter geringen Schleifkräften schleift, dies allerdings durch hohen Verschleiß (repräsentiert durch einen niedrigen G-Wert) erkauft. Die erzielten Oberflächenergebnisse sind hingegen über weite Bereiche der Parametermatrix sehr gut.

4.3.3 Auswertung Spezifikation 2 [B126 VSS 0427 G1AN V364,4]

Die Spezifikation 2 ist am oberen linken Rand des Bindungsspektrums lokalisiert. Die Porosität und der Härtegrad sind niedrig. **Bild 4.27** zeigt die Mittenrauheiten die mit dieser Spezifikation erzielt wurden. Die Rauheiten sind über den gesamten Bereich der Matrix sehr gut. Genau wie im Fall der Spezifikation 1 ist bei v_c 40 m/s und 70 m/s ein Anstieg der Rauheit zu verzeichnen.

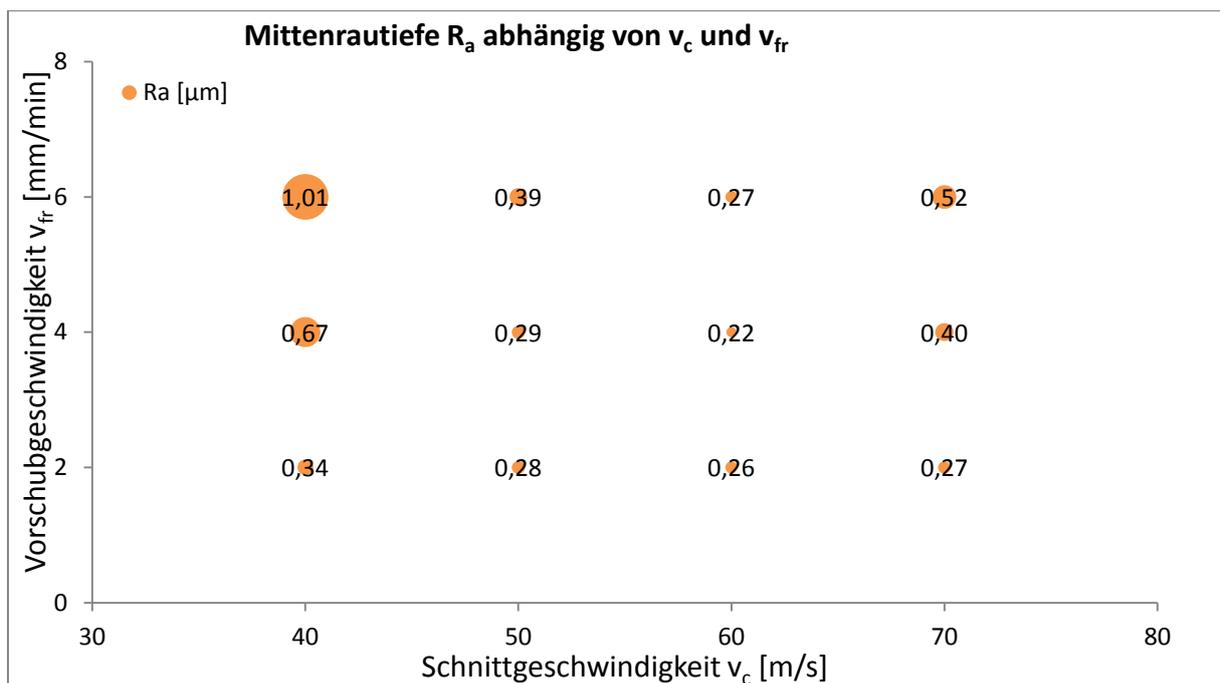


Bild 4.27: Mittenrauheiten der Spezifikation 2

Das Diagramm der Schleifkräfte und Schnittleistungen (Bild 4.28) zeigt hierbei eine Abweichung zu den Ergebnissen der Vorversuche. Vergleicht man die Ergebnisse gleicher Vorschubgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten zeigt sich, dass hier die Kräfte und Leistung mit steigender Schnittgeschwindigkeit zunächst ebenfalls steigen. bei $v_c = 70$ m/s ist dann wiederum eher ein Absinken von Kräften und Leistung festzustellen.

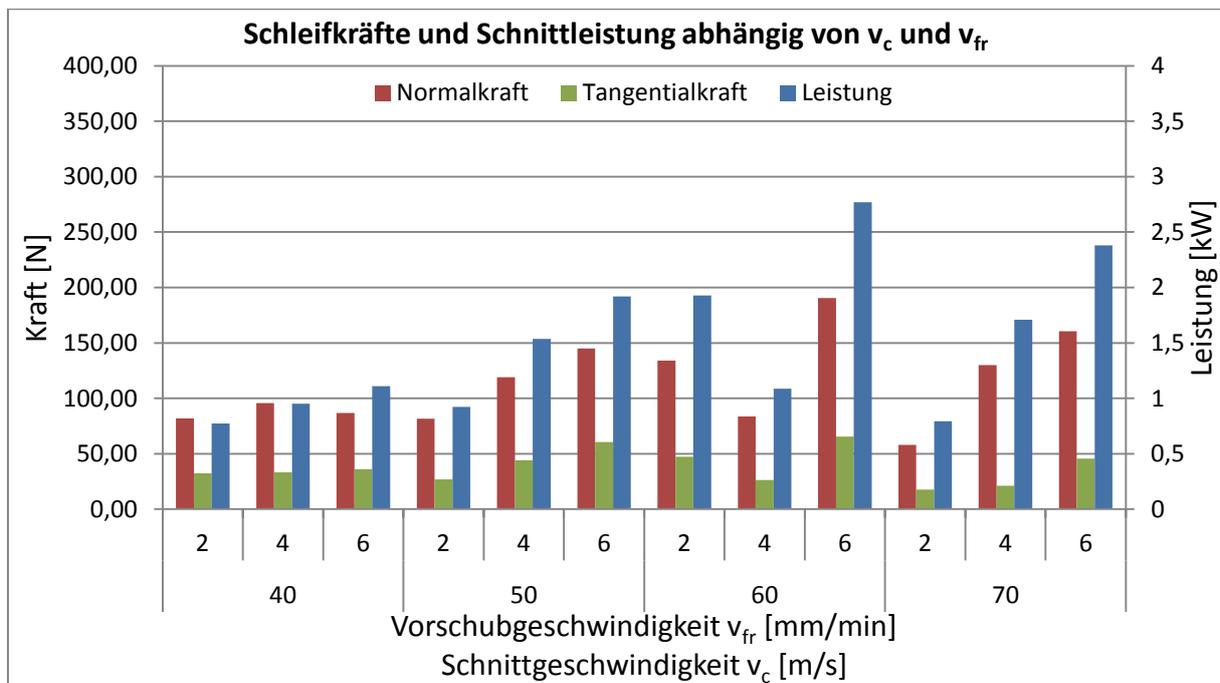


Bild 4.28: Schleifkräfte und Schnittleistungen der Spezifikation 2

In **Bild 4.29** sind die G-Werte dargestellt. Die G-Werte sind über weite Bereiche der Parametermatrix herausragend. Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass die Schnittgeschwindigkeit $v_c = 60$ m/s die besten Ergebnisse erzeugt aber auch bei $v_c = 70$ m/s sind die G-Werte durchweg sehr gut. Lediglich im Bereich $v_c \leq 50$ m/s und $v_{fr} \geq 4$ mm/min sind die erzielten G-Werte eher durchschnittlich. Auffällig ist lediglich die besonders große Differenz der G-Werte zwischen $v_c \leq 50$ m/s und $v_c \geq 60$ m/s.

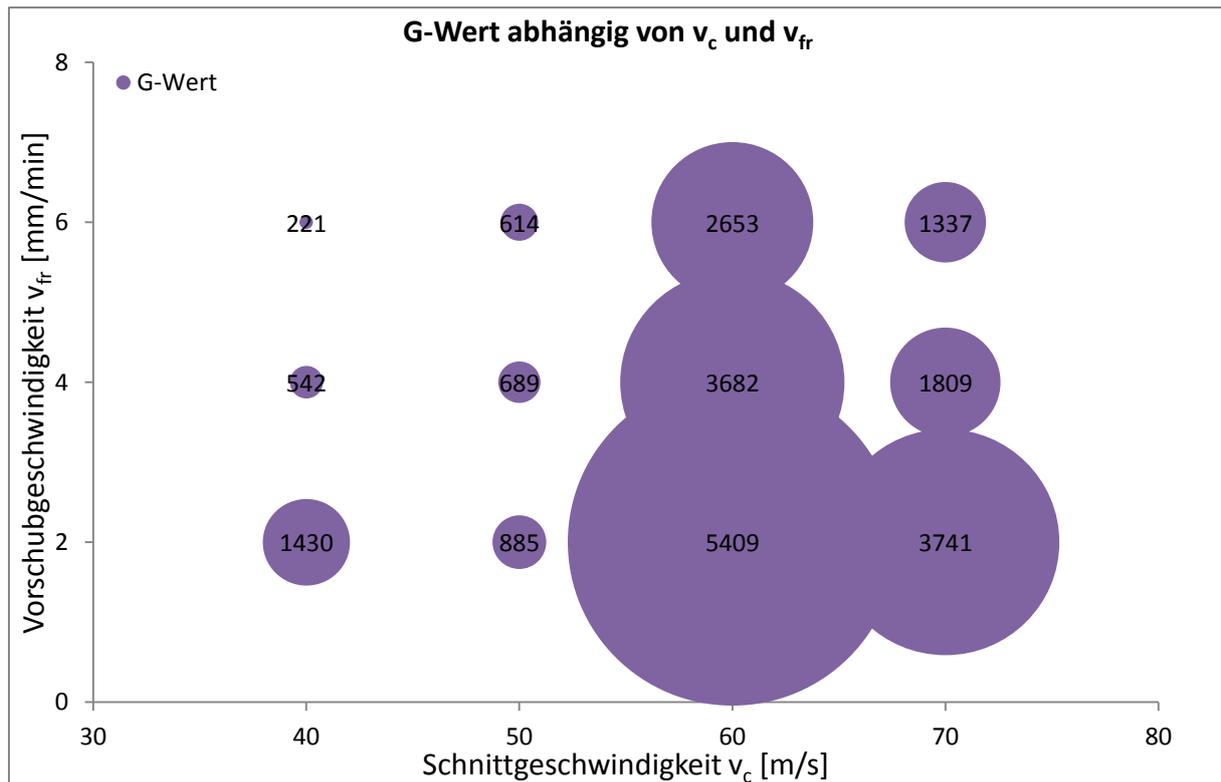


Bild 4.29: G-Werte der Spezifikation 2

Zusammenfassung / Fazit

Diese Bindung zeigt über den gesamten Bereich sehr gute Rauheiten und überwiegend auch sehr gute G-Werte. Diese Versuchsreihe bietet für die große Differenz der G-Werte zwischen $v_c \leq 50$ m/s und $v_c \geq 60$ m/s keine konkreten Erklärungsansätze. Weder die Schleifkräfte, noch die Rauheiten spiegeln dieses Verhalten wieder. Da es sich um eine Bindung mit einem niedrigen Härtegrad handelt, wäre eher mit einem höheren Verschleiß zu rechnen gewesen. Eine mögliche Erklärung könnte ein systematischer Fehler sein, der bei der Versuchsdurchführung aufgetreten ist, jedoch gibt es hierfür ebenfalls keine konkreten Anhaltspunkte.

4.3.4 Auswertung Spezifikation 4 [B126 VSS 1027 M1AN V480]

Die Spezifikation 4 ist im rechten oberen Bereich des Spezifikationsspektrums zu finden und weist somit einen hohen Härtegrad und eine niedrige Porosität auf. Vorausschickend muss erwähnt werden, dass diese Spezifikation unter den gegebenen Bedingungen kaum schleiffähig war. Der Schleifbelag wurde durch das zerspannte Material sehr stark zugesetzt. Dies führte dazu, dass der Verschleiß bei Schnittgeschwindigkeiten unter 60 m/s und niedrigster Vorschubgeschwindigkeit bereits nach einem Werkstück > 100 μm war (**Bild**

4.30). Um die Parametermatrix dennoch komplett testen zu können wurde daher entschieden, für die Versuche bei $v_c \leq 50$ m/s eine verbesserte Kühlung zu verwenden.



Bild 4.30: Bindungsspezifikation 4 mit Zusetzungen bei Standradkühlung [$v_c = 40$ m/s; $v_{fr} = 4$ mm/min]

Im Rahmen der Kühlungsverbesserung wurde die Standardkühlung (**Bild 4.31**) um eine zusätzliche Loc-Line Düse erweitert. Diese führt zusätzliches Kühlmittel tangential um 90° nach der Kontaktzone zu (siehe **Bild 4.32**). Zusätzlich wurde eine weitere Kühlmitteldüse in der Werkstückspindel montiert. Diese fördert einen großen Kühlmittelvolumenstrom ungezielt durch das Futter in die Bohrung des Werkstücks und auf das Werkzeug.



Bild 4.31: Standardkühlung



Bild 4.32: Veränderte Kühlung für Spezifikation 4

Diese Änderung der Kühlung bedeutet eine grundlegende Änderung der Basisparameter. Damit sind die Ergebnisse die mit der neuen Kühlung erzielt wurden nicht mehr direkt vergleichbar mit den Übrigen, bei denen die Standardkühlung verwendet wurde. Daher noch einmal zur Verdeutlichung:

Versuche mit $v_c = 60$ und 70 m/s -> **Standardkühlung**

Versuche mit $v_c = 40$ und 50 m/s -> **verbesserte Kühlung**

Das Diagramm in **Bild 4.33** zeigt die Entwicklung der Mittenrauheiten. Mit dieser Bindung werden im Bereich von $v_c \geq 60$ m/s und $v_{fr} < 6$ mm/min durchaus gute Oberflächenergebnisse erzielt und dies sogar unter Verwendung der Standardkühlung. Betrachtet man den Bereich der Parametermatrix für den die verbesserte Kühlung verwendet wurde, ist festzustellen, dass die Mittenrauheiten hier deutlich höher liegen. Berücksichtigt man, dass dieses Werkzeug bei diesen Parametern und unter Standardkühlbedingungen nicht schleiffähig war, so sind die erzielten Oberflächenergebnisse als durchaus zufriedenstellen zu betrachten.

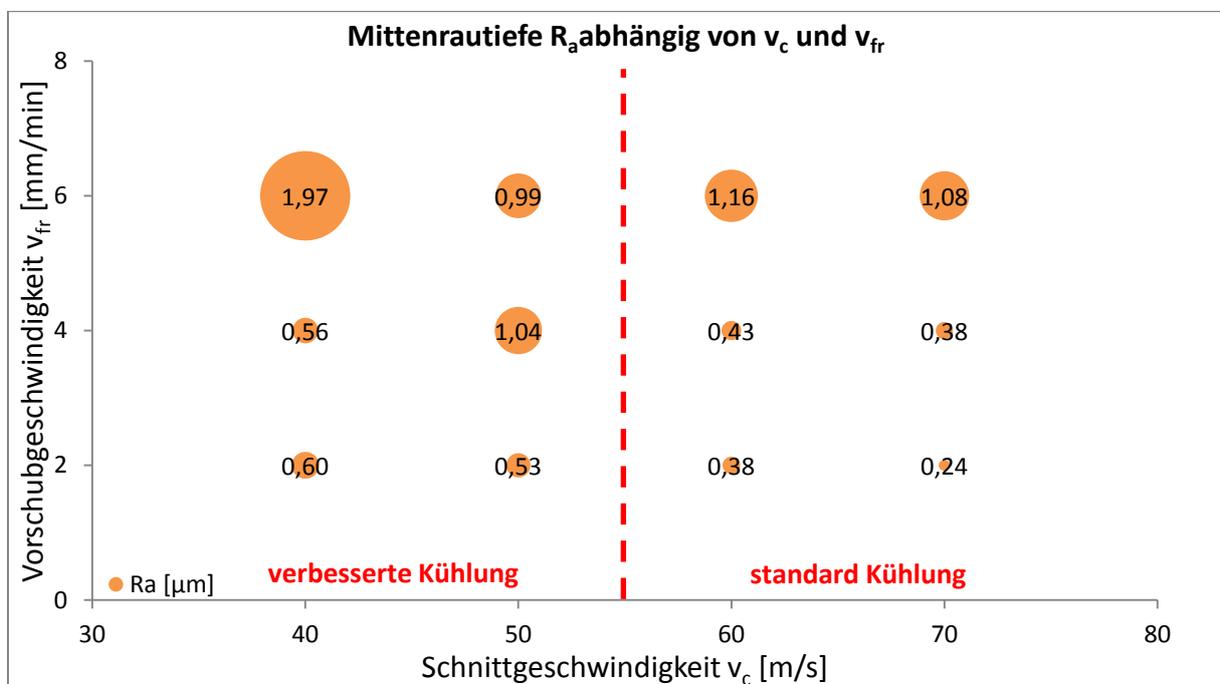


Bild 4.33: Mittenrauheiten der Spezifikation 4

Bild 4.34 zeigt die Schleifkräfte und Schnittleistung der Parametermatrix für die Spezifikation 4. Auch in diesem Fall müssen die Bereiche mit Standardkühlung und verbesserter Kühlung separat betrachtet werden. Im Bereich der Standardkühlung [v_c 60 m/s und 70 m/s] fällt auf, dass die Schleifkräfte und Schnittleistung sich mit steigendem v_{fr} beinahe exponentiell entwickeln. Bei $v_{fr} = 2$ mm/min sind die Schleifkräfte auf ähnlichem Niveau auf dem sich die anderen Bindungen in diesem Versuch unter gleichen Bedingungen bewegen. Die Schleifkräfte steigen dann jedoch stark an und erreichen bei $v_{fr} = 6$ mm/min extrem hohe

Werte. Für die Ergebnisse bei $v_{fr} = 6$ mm/min ist jedoch zu beachten, dass hier aufgrund zu hohen Verschleißes jeweils nur ein Werkstück geschliffen werden konnte.

Anhand der Ergebnisse im Bereich mit verbesserter Kühlung [$v_c \leq 50$ m/s] erkennt man, dass die Entwicklung der Kräfte in diesem Bereich mit steigender Vorschubgeschwindigkeit eher linear ist. Zudem sind die auftretenden Kräfte im moderaten Bereich. Auch ist unter diesen Bedingungen noch bei $v_{fr} = 6$ mm/min das Schleifen von jeweils fünf Werkstücken möglich gewesen. Dies ist ein deutliches Anzeichen für den besonders großen Einfluss der Kühlung auf das Schleifergebnis.

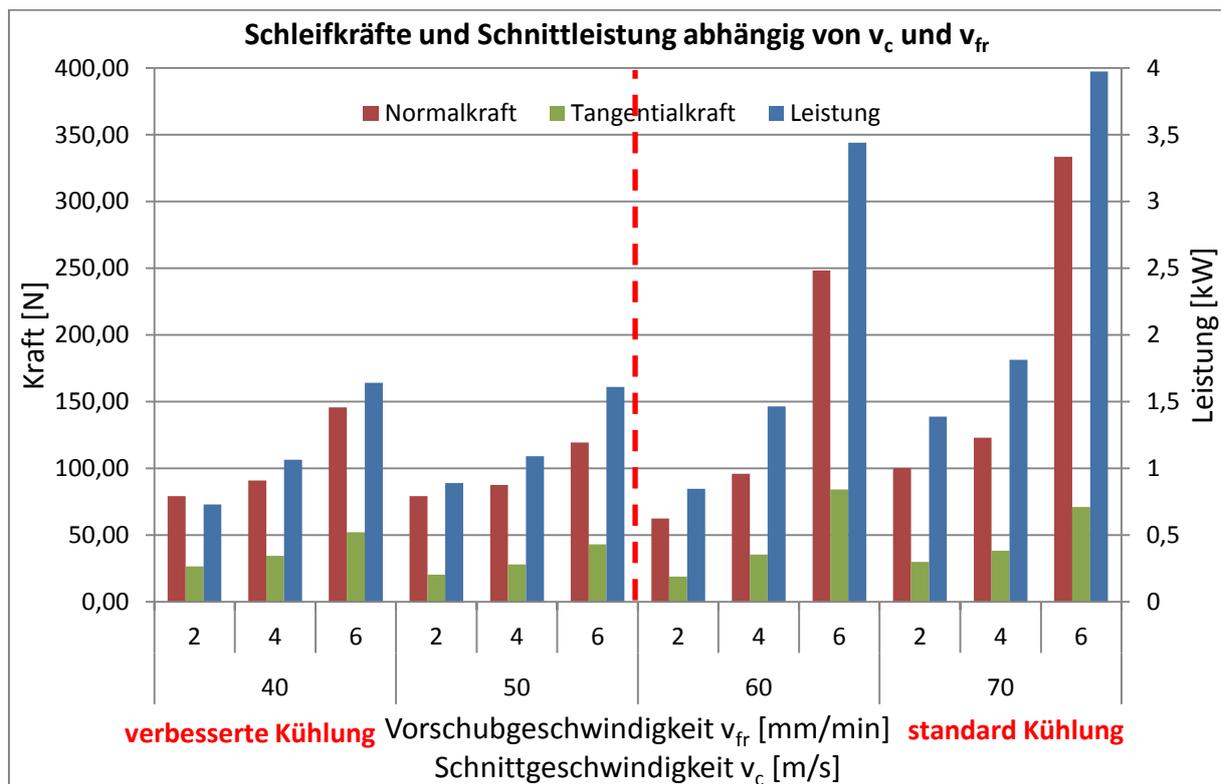


Bild 4.34: Schleifkräfte und Schnittleistung der Spezifikation 4

Das Diagramm in **Bild 4.35** zeigt die erzielten G-Werte für diese Versuchsreihe. Auch hier wird zwischen verbesserter und Standardkühlung unterschieden. Wie man sieht, werden auch mit Standardkühlung gute G-Werte für Vorschubgeschwindigkeiten unter 6 mm/min erreicht. Dies gilt ebenso für den Bereich der verbesserten Kühlung. Allerdings ist zu beachten, dass die erzielten G-Werte, trotz stark verbesserter Kühlbedingungen, noch eher unter den erreichten Werten bei höherem v_c mit Standardkühlung liegen.

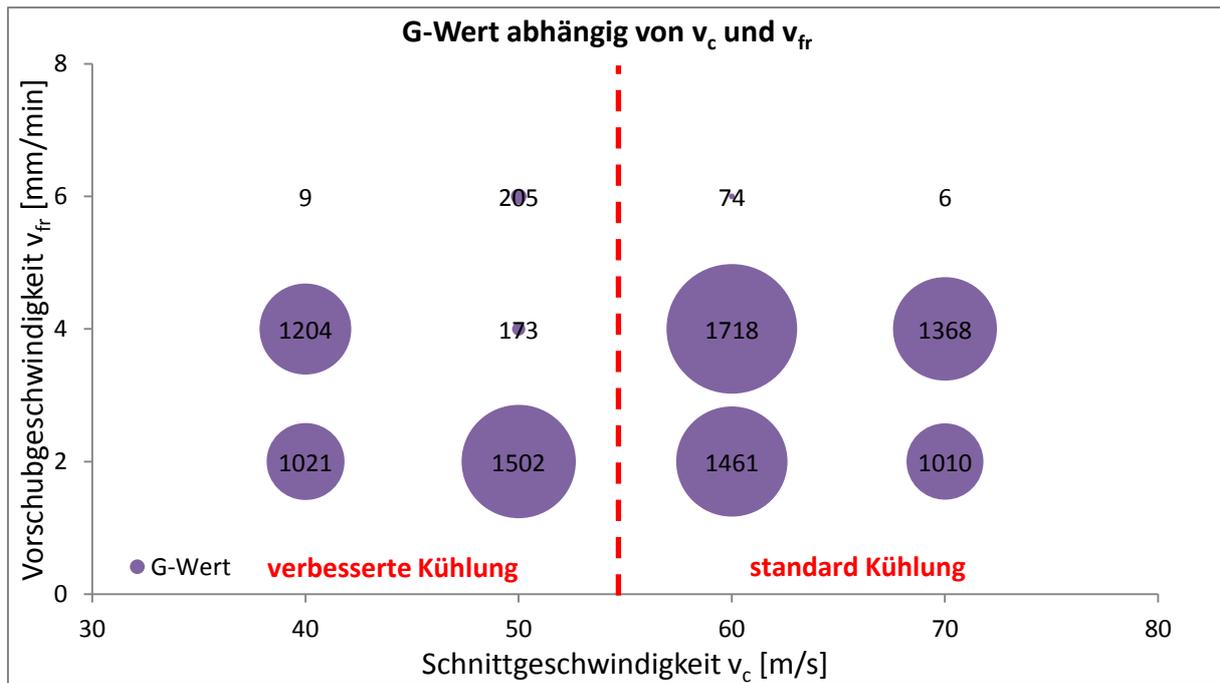


Bild 4.35: G-Werte der Spezifikation 4

Zusammenfassung / Fazit

Diese Bindung wies das schwierigste Schleifverhalten aller Bindungen aus diesem Versuchsprogramm auf. Bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten war sie unter Standardkühlbedingungen nicht schleiffähig, da der Verschleiß und die Zusetzungen zu groß waren. In dieser Hinsicht lässt sich eine Parallele zu Spezifikation 2 erkennen. Diese weist ebenfalls einen starken Anstieg des Verschleißes unter $v_c = 60$ m/s auf. Im Gegensatz zu Spezifikation 2 ist Spezifikation 4 jedoch auch stärker eingeschränkt, was die Vorschubgeschwindigkeit angeht. Vorschubgeschwindigkeiten von 6 mm/min lassen sich weder mit Standard-, noch mit verbesserter Kühlung erfolgreich schleifen, da der Schleifkörper zu stark verschleißt. Zudem sind die Schleifkräfte unter Standardkühlbedingungen so hoch, dass der Werkzeugschaft verformt wird und das programmierte Maß nicht mehr erreicht wird. In engen Parametergrenzen sind mit dieser Spezifikation dennoch gute Ergebnisse hinsichtlich Rauheit und G-Wert erzielbar. Für diese Spezifikation wäre eine weitere Versuchsreihe unter durchgehend verbesserten Kühlungsbedingungen sinnvoll, um festzustellen ob sich die Schleifergebnisse bei hohen Schnittgeschwindigkeiten noch verbessern lassen.

4.3.5 Auswertung Spezifikation 5 [B126 VSS 1227 J1AN V422,4]

Die Spezifikation 5 befindet sich im Zentrum des Bindungsschemas. Härtegran und Porosität sind somit jeweils durchschnittlich. Auch bei dieser Spezifikation traten Zusetzungen in geringem Umfang auf. **Bild 4.36** zeigt die stärkste Ausprägung der Zusetzungen dieser Spezifikation [$v_c = 40$ m/s; $v_{fr} = 4$ mm/min].



Bild 4.36: Zusetzungen der Spezifikation 5 [$v_c = 40$ m/s; $v_{fr} = 4$ mm/min]

In **Bild 4.37** sind die Mittenrauheiten dargestellt, die mit Spezifikation 5 erzielt wurden. Die Rauheiten sind über einen großen Bereich der Parametermatrix hinweg sehr gut. Bei Vorschubgeschwindigkeit $v_{fr} = 6$ mm/min verschlechtert sich das Oberflächenergebnis allerdings signifikant. Lediglich bei einer Schnittgeschwindigkeit von 60 m/s sind die Rauheiten durchweg gut.

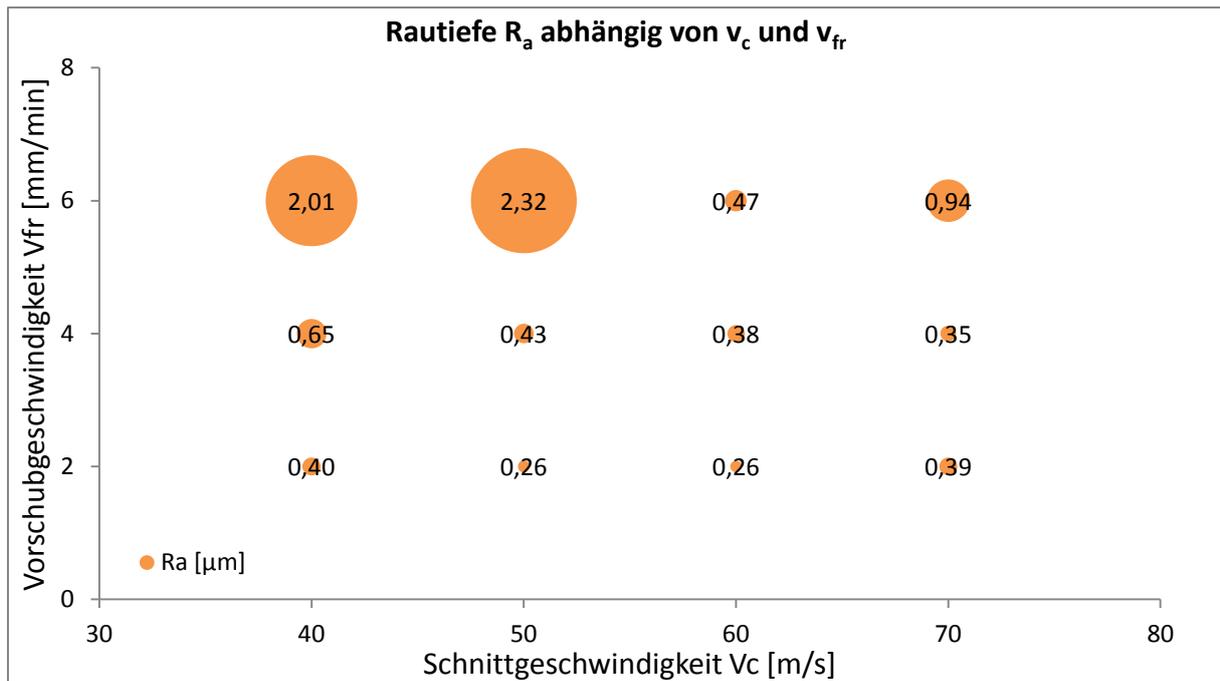


Bild 4.37: Mittenrauheiten der Spezifikation 5

Das Diagramm der Schleifkräfte und Schnittleistung (**Bild 4.38**) zeigt eine interessante Auffälligkeit. Während die Schleifkräfte bei $v_{fr} = 2$ mm/min bzw. 4 mm/min mit steigenden Schnittgeschwindigkeiten leicht ansteigen, ist das Maximum der Schleifkräfte für $v_{fr} = 6$ mm/min bei $v_c = 40$ m/s erreicht und sinkt dann mit steigender Schnittgeschwindigkeit ab. Bei $v_{fr} = 6$ mm/min und $v_c = 40$ m/s und 50 m/s sind die Schleifkräfte überdurchschnittlich groß. In diesem Bereich war der Verschleiß so groß, dass keine fünf Werkstücke geschliffen werden konnten.

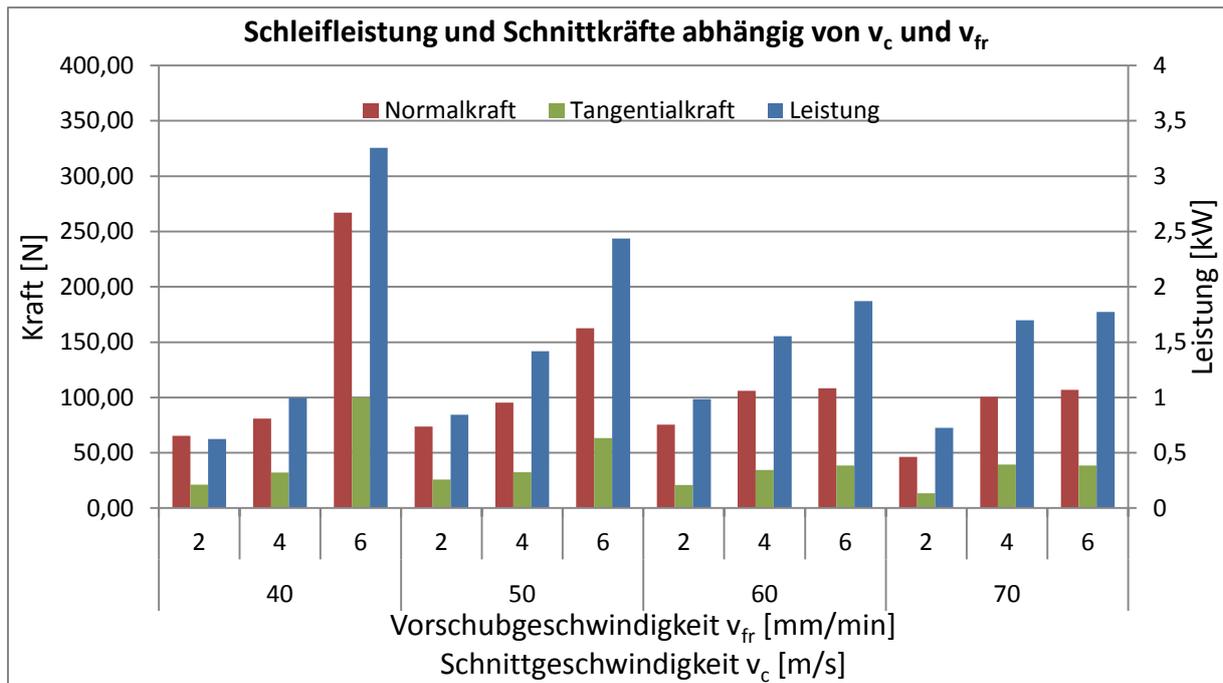


Bild 4.38: Schleifkräfte und Schnittleistung der Spezifikation 5

Die Entwicklung des G-Werts ist in **Bild 4.39** dargestellt. Der G-Wert liegt über fast die gesamte Parametermatrix in derselben Größenordnung. Lediglich bei $v_{fr} = 6$ mm/min und $v_c = 40$ m/s und 50 m/s ist ein starker Einbruch des G-Werts zu erkennen. Die übrigen Schwankungen des G-Werts sind, wie bereits oben erwähnt, höchstwahrscheinlich auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Verschleiß bei dieser Bindung weitgehend parameterunabhängig ist.

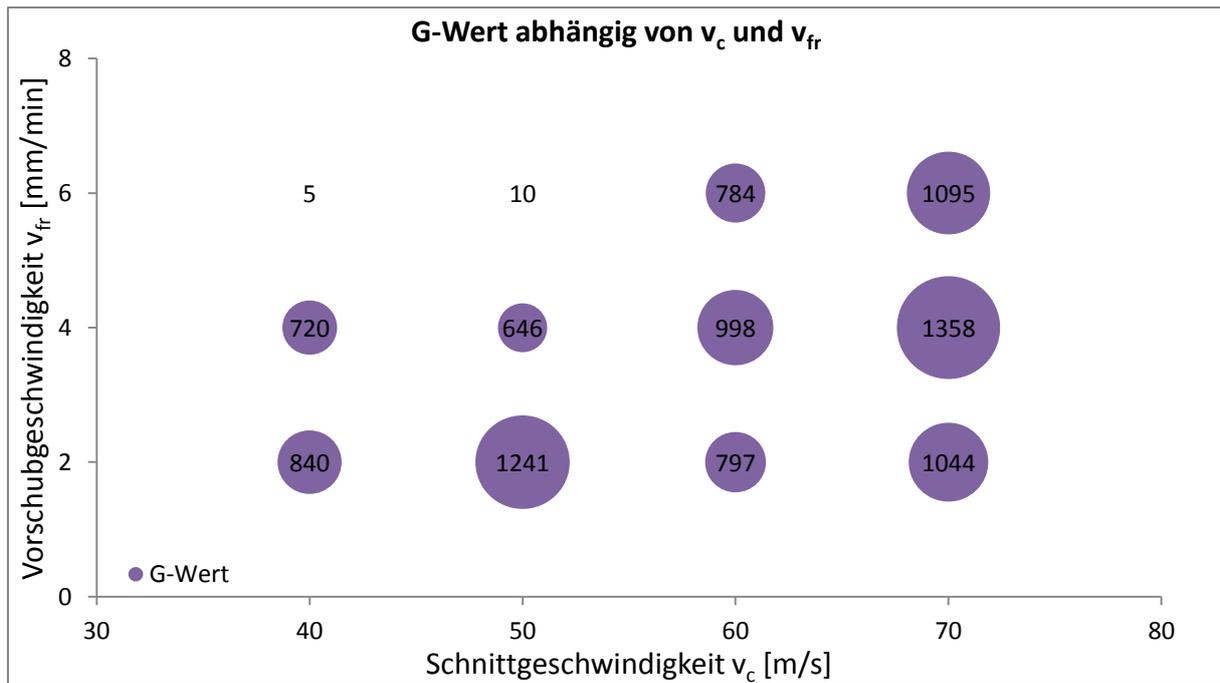


Bild 4.39: G-Werte von Spezifikation 5

Zusammenfassung / Fazit

Diese Spezifikation erzielt überwiegend sehr gute Oberflächenergebnisse. Die optimalen Bedingungen in Hinblick auf die Rauheit herrschen bei $v_c = 60$ m/s. Auch der G-Wert ist über große Bereiche der Parametermatrix akzeptabel; hier ist das Optimum bei $v_c = 70$ m/s zu finden. Die Schnittkräfte und Leistung sind im Wesentlichen durchschnittlich. Auch hier ist wieder bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und hoher Vorschubgeschwindigkeit das schlechteste Ergebnis zu verzeichnen. Somit lässt sich zusammenfassend sagen, dass diese Bindung weitestgehend parameterunabhängige Ergebnisse erzeugt. Lediglich bei $v_{fr} = 6$ mm/min und $v_c = 40$ m/s und 50 m/s trifft dies nicht zu. Die sehr konsistenten Schleifergebnisse legen die Vermutung nahe, dass in diesem Bereich die Bindung aufgrund zu hoher Schleifkräfte zusammenbricht und der Verschleiß dadurch extrem ansteigt.

4.3.6 Auswertung Spezifikation 8 [B126 VSS 2027 M1AN V480]

Diese Spezifikation hat eine hohe Porosität und einen hohen Härtegrad. Damit befindet sich die Spezifikation im unteren rechten Bereich des Bindungsschemas. Diese Bindung neigte ebenfalls sehr stark dazu zuzusetzen. Auch in diesem Fall nahm der Umfang der Zusetzungen mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit zu. **Bild 4.40** zeigt den zugesetzten Schleifbelag nach dem Schleifen mit den Parametern $v_c = 40$ m/s und $v_{fr} = 6$ mm/min. Es lässt sich leicht erkennen, dass die Zusetzungen sehr großflächig sind. In **Bild 4.41** ist eine um den Faktor 100x vergrößerte Ansicht einer solchen Verschmierung des Werkstückmaterials dargestellt. Wie man sieht, handelt es sich tatsächlich eher um verschmiertes Material als um eine Aufschmelzung. Daher lässt sich vermuten, dass das Zusetzen des Schleifstiftes nicht als Ursache zu hoher Temperaturen in der Kontaktzone geschieht. Vielmehr lässt sich vermuten, dass sich zunächst Späne im Belag verhaken und danach mit jedem Durchlaufen der Kontaktzone mehr Material anhaften bleibt.



Bild 4.40: Zusetzung Spezifikation 8
[$v_c = 40$ m/s $v_{fr} = 6$ mm/min]

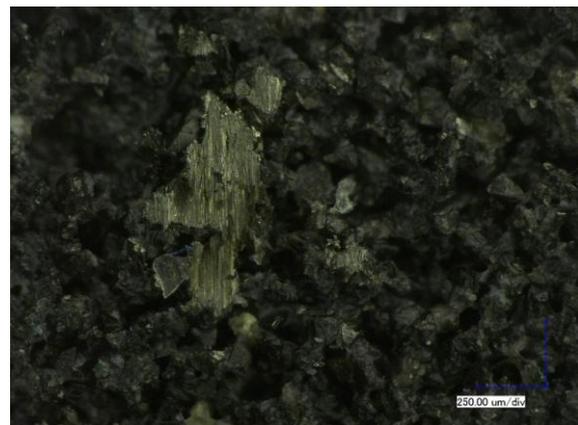


Bild 4.41: Einhundertfache Vergrößerung der Zusetzung

Das Mittenrauheitdiagramm in **Bild 4.42** zeigt bereits auf den ersten Blick, dass diese Spezifikation unterdurchschnittliche Oberflächenergebnisse produziert. Bei sämtlichen Parameterkombinationen mit Schnittgeschwindigkeit oberhalb 50 m/s oder Vorschubgeschwindigkeit oberhalb 4 mm/min ist der Mittenrauwert signifikant größer als 1 µm. Somit bleibt lediglich der relativ kleine Bereich niedriger Schnittgeschwindigkeit und geringer Vorschubgeschwindigkeit, in dem diese Spezifikation akzeptable Ergebnisse in Hinblick auf die Rauheit erreicht. Und hierbei liegt das beste Ergebnis dieser Bindung immer noch um etwa den Faktor zwei höher als die Spitzenwerte der meisten anderen Bindungen in diesem Testfeld.

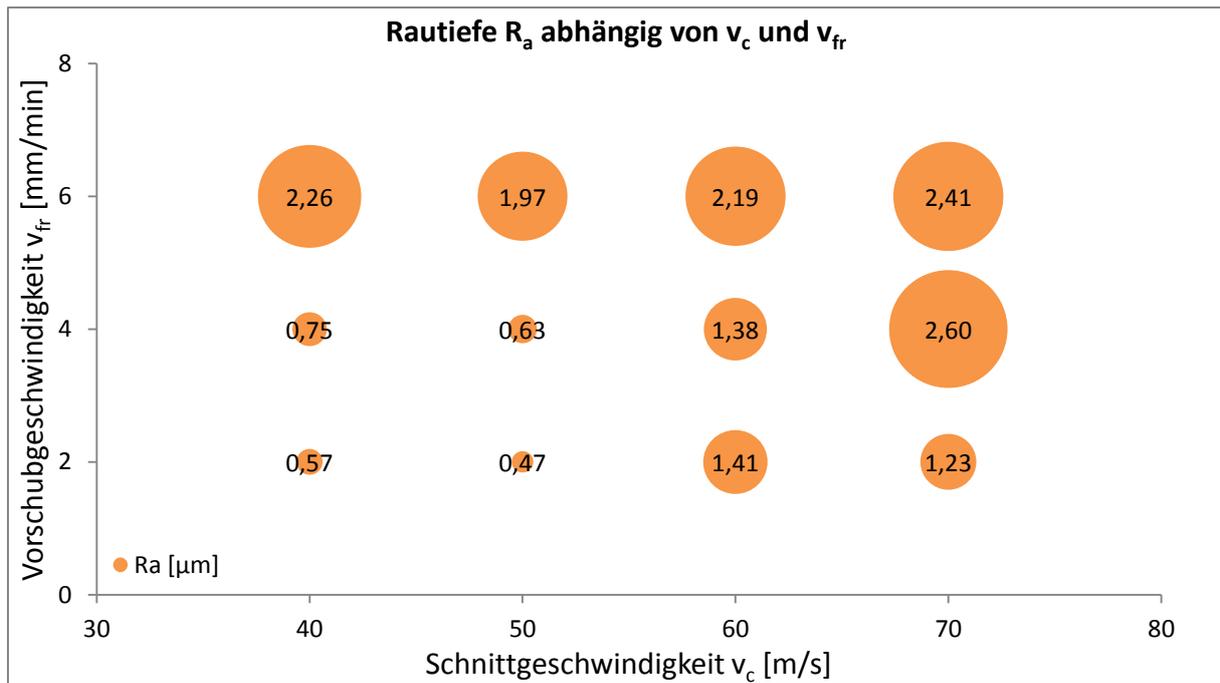


Bild 4.42: Mittenrauwerte der Spezifikation 8

Die Schleifkräfte und Schnittleistung dieser Bindung ist nach dem Diagramm in Bild 4.43 durchgängig auf niedrigem Niveau. Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit bewirkt jeweils ein Ansteigen der Kräfte und Leistung. Die Veränderung der Schnittgeschwindigkeit bewirkt hingegen keine nennenswerten Veränderungen. Lediglich bei $v_c = 40$ m/s sind Kräfte und Leistung gegenüber den restlichen Schnittgeschwindigkeiten leicht erhöht. Damit ähnelt diese Bindung dem Verhalten, das in den Vorversuchen beobachtet wurde, am meisten.

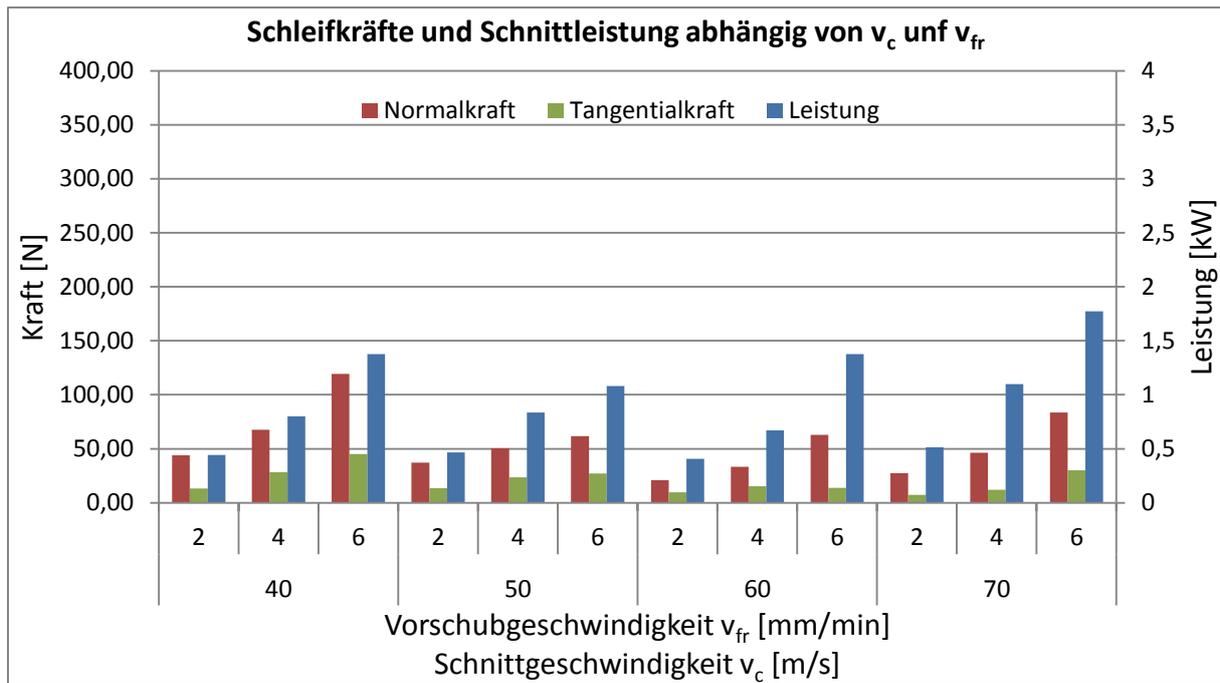


Bild 4.43: Schleifkräfte und Schnittleistung der Spezifikation 8

Bild 4.44 zeigt die Entwicklung des G-Werts bei unterschiedlichen Parameterkombinationen. Wie man sieht sind sämtliche G-Werte dieser Spezifikation extrem niedrig. Lediglich bei $v_c = 40$ m/s und $v_{fr} = 2$ mm/min ist ein akzeptabler G-Wert erreicht worden. Hierbei ist zu erwähnen, dass bei allen Parameterkombinationen mit $v_{fr} = 6$ mm/min keine fünf Werkstücke geschliffen werden konnten, da der Verschleiß zu groß war. Auffällig ist die Tatsache, dass diese Spezifikation sich hinsichtlich des G-Werts ähnlich wie Spezifikation 1 verhält, jedoch einem noch größeren Verschleiß unterliegt. Dabei befindet sich diese Spezifikation aber am gegenüberliegenden Ende des Härtegradspektrums. Zu erwarten wäre eher ein verschleißärmeres Verhalten.

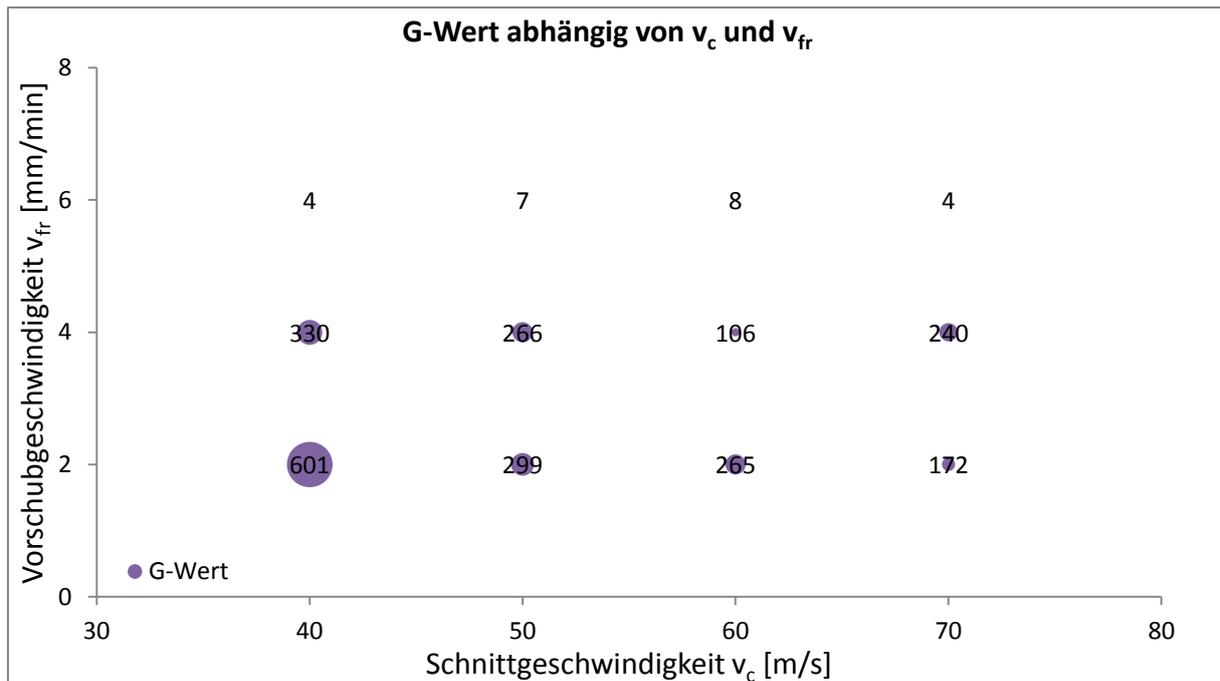


Bild 4.44: G-Werte der Spezifikation 8

Zusammenfassung / Fazit

Spezifikation 8 kann hinsichtlich der Rauheit und G-Werte lediglich als schlecht eingestuft werden. Diese Spezifikation hat nur bei $v_c = 40$ m/s und $v_{fr} = 2$ mm/min ein akzeptables Schleifergebnis erzielt. Bei allen anderen Parameterkombinationen wäre das Schleifen unwirtschaftlich. Die niedrigen Schleifkräfte resultieren vermutlich aus dem hohen Verschleiß und stellen den einzigen Vorzug dieser Spezifikation dar. Insgesamt muss diese Spezifikation dennoch also untauglich eingestuft werden.

4.3.7 Tiefenschädigung

Dieser Abschnitt soll ein Problem behandeln, welches bei allen Spezifikationen in ähnlichem Maß aufgetreten ist und damit als übergeordnet betrachtet werden muss. Anhand der AE-Signale beim Abrichten konnte eine Tiefenschädigung des Schleifbelages festgestellt werden. Diese trat über der Zeit in den Randbereichen des im Eingriff befindlichen Teils des Schleifbelages auf. Das Diagramm in **Bild 4.45** zeigt einen Abrichthub bei einem fertig abgerichteten Schleifstift ohne Tiefenschädigung (blau) und daneben einen Abrichthub bei einem fertig abgerichteten Schleifstift mit Tiefenschädigung (rot). Die Tiefenschädigungen traten auf und verstärkten sich, je mehr Werkstücke mit einem Schleifstift geschliffen wurden. Die blaue Kurve stellt eine Abrichtkurve für einen neuen Schleifstift dar. Die rote Kurve ist ein typisches Abrichtkurve für einen Schleifstift nach Durchlaufen der Parametermatrix.

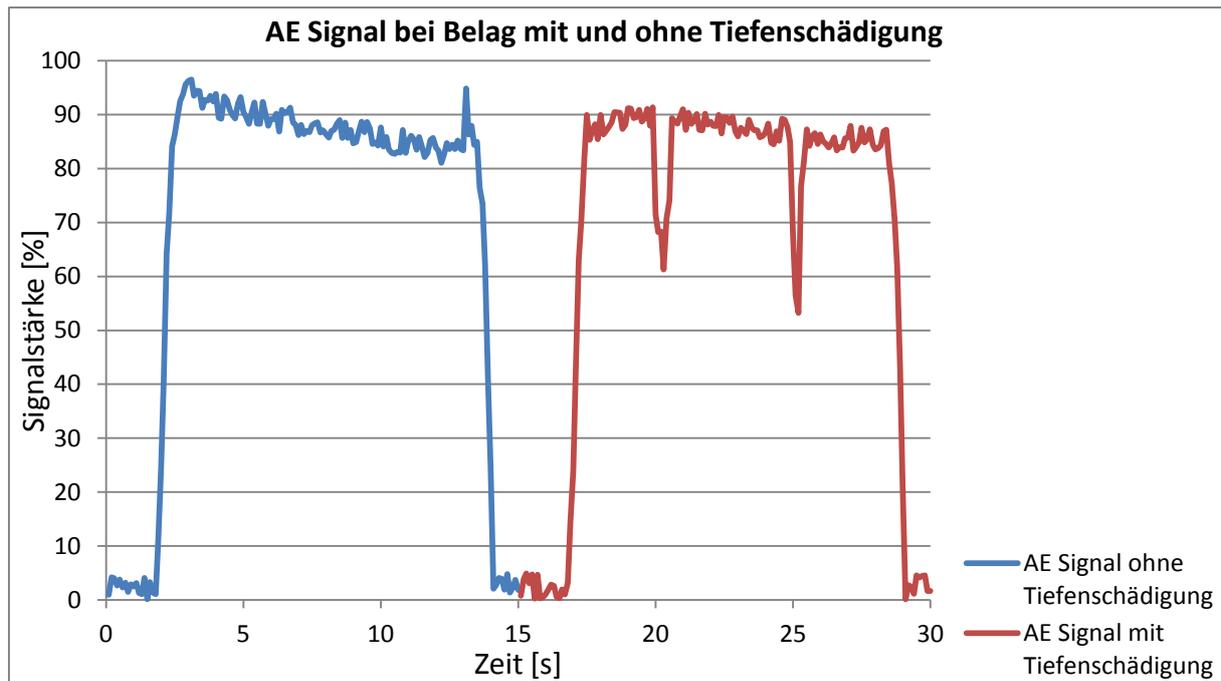


Bild 4.45: AE Signal bei Belag mit und ohne Tiefenschädigung

Diese Tiefenschädigungen waren an den Schleifstiften optisch nicht erkennbar. An den geschliffenen Werkstücken konnte jedoch festgestellt werden, dass die geschliffenen Bohrungen scharfkantiger wurden, je mehr Werkstücke mit dem gleichen Werkzeug geschliffen wurden. Die Ursache für dieses Phänomen ist ohne weitere Untersuchungen nicht sicher festzustellen. Möglicherweise führt eine Spannungsüberhöhung im Schleifbelag an in den Bereichen der Werkstückkanten zu einem lokalen Zusammenbruch des Schleifbelages. Auch könnten Zusetzungen an den Werkstückkanten verantwortlich sein.

4.3.8 Interpretation

Die Auswertung der Versuchsreihen mit den verschiedenen Bindungsspezifikationen zeigen deutlich Unterschiede in deren Schleifverhalten auf. Betrachtet man die Ergebnisse im Ganzen, so lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Bindungsspezifikationen mit niedrigem Härtegrad unter diesen Versuchsbedingungen ein weniger problematisches Schleifverhalten aufwiesen als die Schleifstifte mit hohem Härtegrad. Bei hohem Härtegrad neigten die Schleifstifte teilweise stark dazu zuzusetzen. Im Fall von Spezifikation B126 VSS 1027 M1AN V480 waren die Anforderungen in Bezug auf die Kühlung zudem noch wesentlich höher, als bei den übrigen Bindungsspezifikationen im Test.

Als beste Spezifikation im Test erwies sich Spezifikation 2 [B126 VSS 0427 G1AN V364,4] mit niedrigem Härtegrad und niedriger Porosität. Hinsichtlich der Oberflächenrauheit erzielt diese Spezifikation im Vergleich sehr gute Ergebnisse und die mit dieser Spezifikation erreichten G-Werte sind im Vergleich allen anderen überlegen. Auch zeigte diese Spezifikation annähernd kein Zusetzen des Schleifbelages. Die Spezifikation (Spezifikation 8), die an der gegenüberliegenden Ecke des Bindungsspektrums lag und somit eine hohe Porosität und einen hohen Härtegrad aufwies, war auch tatsächlich die schlechteste Spezifikation im Test. Sowohl im Hinblick auf die Rauheiten als auch auf die G-Werte hat diese die mit Abstand schlechtesten Ergebnisse erbracht. Zudem neigte Spezifikation 8 am stärksten zum Zusetzen.

Es sollen nun zunächst einmal nur die erzielten G-Werte betrachtet werden. **Tabelle 4.7** stellt den maximal Erreichten G-Wert einer jeden Spezifikation gegenüber ihrer jeweiligen Porosität dar. Hierbei lässt sich erkennen, dass mit steigender Porosität der Bindung der maximal erreichte G-Wert sank.

Tabelle 4.7: Gegenüberstellung von Porosität und maximalem G-Wert

Gegenüberstellung von Porosität und maximalem G-Wert		
Spezifikation	maximaler G-Wert	Porosität
B126 VSS 0427 G1AN V364,4	5409	4
B126 VSS 1027 M1AN V480	1718	10
B126 VSS 1227 J1AN V422,4	1358	12
B126 VSS 1427 H1AN V360	557	14
B126 VSS 2027 M1AN V480	601	20

Erstellt man eine gleiche Aufstellung (Tabelle 4.8) bezogen auf den Härtegrad, sind hierbei keine Korrelationen zu erkennen. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da man vermuten würde, dass der Härtegrad maßgeblichen Einfluss auf die Verschleißfestigkeit hat. Eine mögliche Erklärung könnte darin bestehen, dass der Einfluss des Härtegrades größenordnungsmäßig niedriger ist als der der Porosität und daher von diesem überlagert wird. Als Fazit lässt sich demnach vermuten, dass im Falle der N7 Bindung beim Innenrundsleifen die Porosität den maßgebliche Faktor zur Bestimmung des Verschleißverhaltens darstellt.

Tabelle 4.8: Gegenüberstellung von Härtegrad und maximalem G-Wert

Gegenüberstellung von Härtegrad und maximalem G-Wert		
Spezifikation	maximaler G-Wert	Härtegrad
B126 VSS 0427 G1AN V364,4	5409	G
B126 VSS 1427 H1AN V360	557	H
B126 VSS 1227 J1AN V422,4	1358	J
B126 VSS 2027 M1AN V480	601	M
B126 VSS 1027 M1AN V480	1718	M

Betrachtet man nun die erzielten Oberflächenergebnisse, so stellt man fest, dass mit allen Spezifikationen Mittenrauheiten von $< 1 \mu\text{m}$ erreicht werden konnten. Hierbei ist der Einfluss der Spezifikation wesentlich geringer als der Einfluss der gewählten Schleifparameter. In diesem Zusammenhang ist die richtige Auswahl der Schleifparameter in Abhängigkeit von der Spezifikation entscheidend. Die Ergebnisse aus den Vorversuchen werden nochmal in vollem Umfang bestätigt, die Vorschubgeschwindigkeit ist der Haupteinflussfaktor für die Oberflächenrauheit.

Die Schleifkräfte und Schnittleistung weisen in im Wesentlich ein Verhalten auf, dass durch die Vorversuche zu erwarten war. Bei Spezifikation 4 und 5 war festzustellen, dass die Schleifkräfte sehr hohe Werte annahmen, sobald die Vorschubgeschwindigkeit ein Niveau erreichte bei dem der Verschleiß so groß wurde, dass keine fünf Werkstücke mehr geschliffen werden konnten. Es lässt sich daher vermuten, dass die hohen Schleifkräfte die Bindung überlasten und diese als Folge davon zusammenbricht. In diesem Fall wäre somit zum größten Teil mechanische Überbeanspruchung für den Verschleiß verantwortlich und nicht ein abrasiver Abtrag der Bindung durch die Schleifspäne. Hier wäre zu überprüfen ob eine Möglichkeit besteht die auftretenden Schleifkräfte und dadurch auch den Verschleiß auf ein akzeptables Maß zu verringern. In diesem Zusammenhang könnte ein vorheriges Einschleifen der Werkzeuge mit weniger kritischen Parametern sinnvoll sein.

Wie sich durch die Verbesserung der Kühlung für einen Teil der Versuche mit Spezifikation 4 bestätigt hat, ist die Kühlmittelzuführung von entscheidender Bedeutung für das Schleifergebnis. Aus diesem Grund erscheint es sehr vielversprechend bei der Kühlung Verbesserungen vorzunehmen.

Die auftretenden Tiefenschädigungen im Schleifbelag stellen eine bemerkenswerte Auffälligkeit dar die alle Spezifikationen teilen. Ob diese Tiefenschädigungen einen Einfluss auf das Schleifergebnis haben lässt sich anhand der verfügbaren Daten nicht feststellen. Es ist jedoch zu erwarten, dass zumindest bei ausgeprägter Tiefenschädigung ein Einfluss auf die Kanten der geschliffenen Werkstücke einstellt. Aus diesem Grund sind weitere Versuche in dieser Richtung sinnvoll.

4.4 Optimierungen und Ergänzungsversuche

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Vorversuchen und dem Test der verschiedenen Bindungsspezifikationen sollten einige weitere Stichversuche durchgeführt werden. Da Spezifikation 4 an die Kühlung besonders hohe Anforderungen stellt sollte untersucht werden, wie sich eine Veränderung der Kühlung generell auswirkt. Ein weiterer Punkt besonderen Interesses war der oftmals große Sprung des G-Werts und der Rauheit bei der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit.

4.4.1 Einflussverhalten verschiedener Kühlauslegungen

Mit dieser Versuchsreihe sollte anhand eines Stichversuchs genauer untersucht werden, wie sich verschiedene Kühldüsenanordnungen auf das Schleifergebnis auswirken. Dazu sollten drei Kühsituationen miteinander verglichen werden. Den Ausgangspunkt dieser Untersuchung bildete die Standardkühlung, die in den Vorversuchen und er Spezifikationsuntersuchung verwendet wurde (**Bild 4.46**). Diese Anordnung soll im Folgenden als „1 Düse“ bezeichnet werden. Als zweite Kühsituation wurde die in **Bild 4.47** dargestellte Anordnung verwendet. Hierbei wurde mit zwei tangentialen Kühldüsen das KSS 90° vor und hinter der Kontaktzone in den Schleifspalt gespritzt. Für diese Anordnung wird im Folgenden die Bezeichnung „2 Düsen“ verwendet. Die dritte Kühlanordnung verwendet ebenfalls die in **Bild 4.47** gezeigten Kühldüsen. Zusätzlich wurde noch ein großer KSS-Volumenstrom durch das Werkstückfutter ungerichtet in die Bohrung gefördert. Dies entspricht somit derselben Kühldüsenanordnung, die auch bei den Tests der niedrigen Schnittgeschwindigkeiten von Spezifikation 4 verwendet wurde. Sie wird mit „2Düsen + Wkst“ bezeichnet werden.



Bild 4.46: Standardkühlung



Bild 4.47: Zwei tangentielle Kühldüsen

Diese Versuchsreihe wurde unter denselben Bedingungen hinsichtlich Abrichten, Anzahl der Werkstücke und Erfassung der Schleifdaten durchgeführt wie bisher. Für die Durchführung der Versuchsreihe wurde ein Schleifstift der Spezifikation 4 mit folgenden Schleifparametern verwendet:

- $v_c = 70 \text{ m/s}$
- $v_{fr} = 6 \text{ mm/min}$
- $n_w = 650 \text{ 1/min}$ Gegenlauf

Diese Parameter wurden gewählt, da die Spezifikation am diesem Parameterpunkt in der Versuchsmatrix einen niedrigen G-Wert aufweist und keine fünf Werkstücke geschliffen werden konnten. Es sollte geprüft werden, ob die Verbesserung der Kühlbedingungen dazu führt, dass der Schleifstift in diesem Bereich schleiffähig wird.

Versuchsauswertung

Bild 4.48 zeigt die Mittenrauheit bei verschiedenen Kühlbedingungen. Wie man sieht bewirkt eine zweite Kühlmitteldüse am Werkzeug alleine noch keine Verbesserung. Lediglich nachdem auch die Kühlmittelzufuhr durch die Werkstückspindel verwendet wurde ist eine Verbesserung eingetreten. Wie man sieht ist der Vorteil sehr deutlich, da die Mittenrauheit annähernd halbiert wurde.

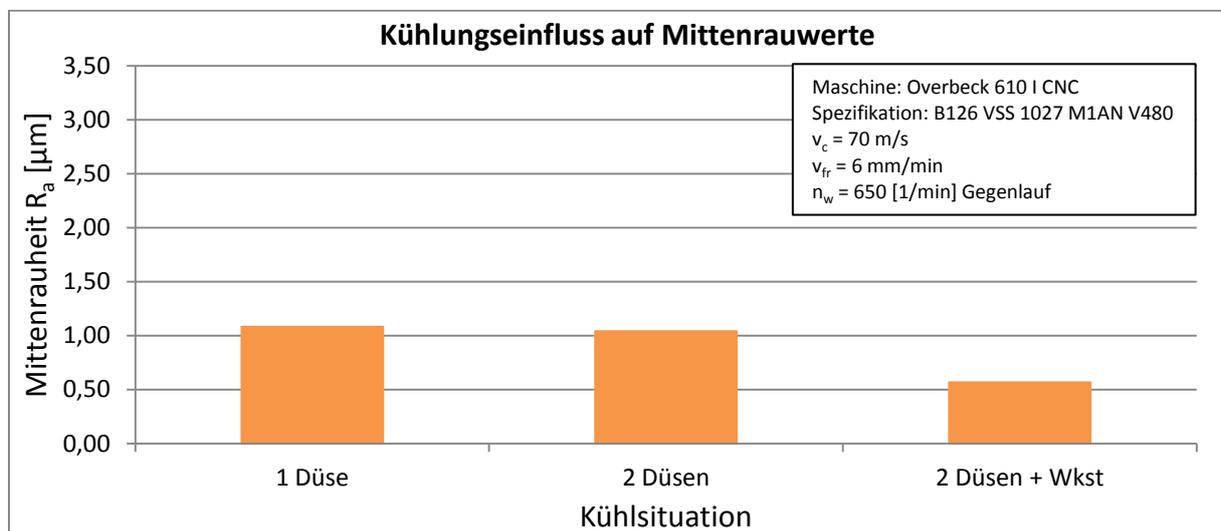


Bild 4.48: Kühlungseinfluss auf die Mittenrauheit

Das Diagramm der Schleifkräfte und Schnittleistung in **Bild 4.49** zeigt für diese ein anderes Verhalten. Hieraus geht hervor, dass bereits das Hinzufügen der zweiten Kühldüse die Schleifkräfte und Leistung dramatisch reduziert. Die Zuführung von KSS durch die Werkstückspindel bewirkt dann wiederum keine weitere Verbesserung.

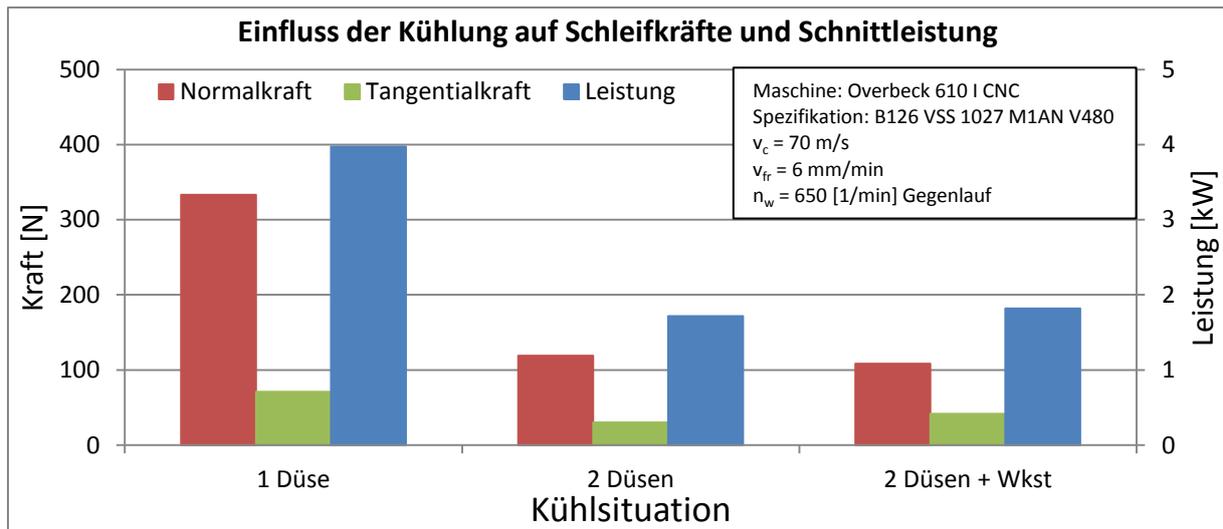


Bild 4.49: Kühlungseinfluss auf die Schleifkräfte und Schnittleistung

In **Bild 4.50** ist die Veränderung des G-Werts bei den unterschiedlichen Kühlbedingungen aufgezeigt. Dieses zeigt wiederum ein abweichendes Verhalten gegenüber den Schleifkräften und der Mittenrauheit. Bereits die zusätzliche Kühldüse ist ausreichend damit diese Spezifikation schleiffähig wird und somit ein starker Anstieg des G-Werts zu verzeichnen ist. Die zusätzliche Kühlung durch die Werkstückspindel verbessert den G-Wert nochmals signifikant.

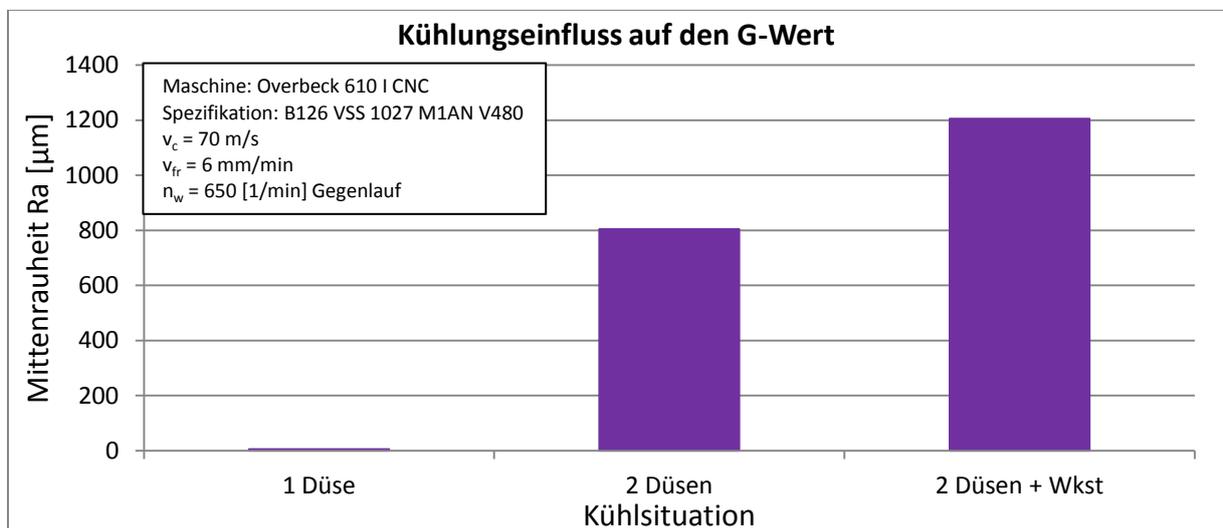


Bild 4.50: Kühlungseinfluss auf den G-Wert

Zusammenfassung / Fazit

Wie erwartet zeigt die Versuchsreihe eine sehr deutliche Verbesserung der Schleifergebnisse unter verbesserten Kühlbedingungen. Bemerkenswert ist das unterschiedliche Verhalten der Schleifkräfte gegenüber der Rauheit. Betrachtet man zunächst G-Wert und Schleifkräfte, so erkennt man, dass bereits das Hinzufügen der zweiten Kühldüse eine starke Verbesserung der Schleiffähigkeit bewirkt. Diese Verbesserung ist so groß, dass mit dem Schleifstift bei diesem Parametersatz anschließend fünf Werkstücke geschliffen werden und dabei ein guter G-Wert erzielt werden konnte, was vorher ausgeschlossen war. Die Mittenrautiefe verbessert sich jedoch erst mit Hinzufügen der Werkstückspindelkühlung. Dieses Verhalten kann ohne weitere Untersuchung nicht sicher erklärt werden. Möglicherweise bewirkt die ungerichtete Kühlmittelzufuhr durch die Werkstückspindel, dass Späne aus der Bohrung gewaschen werden, die andernfalls an der Bohrungsfläche haften bleiben und durch die Werkstückrotation wieder in die Schleifzone befördert werden würden. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe lassen annehmen, dass noch ein hohes Optimierungspotential in der Kühlmittelauslegung existiert. Weitere Versuche in dieser Richtung erscheinen sehr vielversprechend.

4.4.2 Vorschubsteigerung im kritischen Bereich

Die verschiedenen Versuchsreihen der unterschiedlichen Bindungsspezifikationen haben aufgezeigt, dass die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit irgendwann zu einem Punkt führt, an dem das Werkzeug nicht mehr schleiffähig ist. Die bisherigen Versuchsergebnisse geben jedoch keinen Aufschluss darüber, ob der G-Wert ab einer bestimmten Vorschubgeschwindigkeit schlagartig abnimmt, oder sich über einen begrenzten Bereich graduell verringert. Mit dieser Untersuchung sollte dies nun überprüft werden. Dazu sollte die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeiten in kleineren Schritten stattfinden als bisher üblich.

Aufgrund der Erkenntnis aus **Kapitel 4.4.1** war zudem bekannt, dass eine Änderung der Kühlungsbedingungen diesen Punkt verschieben kann. Daher wurde entschieden jeweils eine Versuchsreihe mit den drei unterschiedlichen Kühlungsansätzen (siehe **Kapitel 4.4.1**) durchzuführen. Bei jeder Versuchsreihe wurde die Vorschubgeschwindigkeit in Schritten von 0,5 mm/min erhöht, bis der Verschleiß so groß wurde, dass keine fünf Werkstücke mehr geschliffen werden konnten.

Diese Versuchsreihe wurden unter denselben Bedingungen hinsichtlich Abrichten, Anzahl der Werkstücke und Erfassung der Schleifdaten durchgeführt wie bisher. Für die Durchführung der Versuchsreihe wurde ein Schleifstift der Spezifikation 4 mit folgenden Schleifparametern verwendet:

- $v_c = 40 \text{ m/s}$
- $v_{fr} = \text{variiert}$
- $n_w = 650 \text{ 1/min}$ Gegenlauf

Versuchsauswertung

Das Diagramm in **Bild 4.51** zeigt die Entwicklung des G-Werts bei steigender Vorschubgeschwindigkeit für alle drei Kühlsituationen. Für die Kühlung „1 Düse“ (grün) ist das Ergebnis recht deutlich. Der G-Wert sinkt zwischen $v_{fr} = 2,5 \text{ mm/min}$ und $v_{fr} = 3 \text{ mm/min}$ schlagartig ab. Der weitere Rückgang zwischen 3 mm/min und 4 mm/min ist eher gering.

Betrachtet man den Verlauf mit der Kühlung „2Düsen + Wkst“ (blau), so kann man ein etwas anderes Verhalten erkennen. Der Abfall des G-Werts erfolgt zunächst eher langsam bis bei $v_{fr} = 5,25 \text{ mm/min}$ in etwa das Minimum erreicht ist und der G-Wert von da ab auf diesem Niveau bleibt.

Die Entwicklung des G-Werts mit der Kühlung „2 Düsen“ (rot) lässt auf den ersten Blick ein unerwartetes Verhalten erkennen. Zunächst befindet sich der G-Wert bei $v_{fr} = 4 \text{ mm/min}$ auf gleichem Niveau, wie mit der Kühlung „2 Düsen +Wkst“. Dies entspricht den Erwartungen aus der Versuchsreihe zum Kühlungseinfluss. Dann sinkt der G-Wert bis $v_{fr} = 5,5 \text{ mm/min}$ kontinuierlich ab, allerdings bereits langsamer als es bei der Kühlung „2 Düsen +Wkst“ der Fall war. Bei $v_{fr} = 6 \text{ mm/min}$ ist dann ein starker Anstieg zu verzeichnen, woraufhin der G-Wert bei $v_{fr} = 6,5 \text{ mm/min}$ direkt auf ein Minimum absinkt. Dies wird wiederum von einem leichten Anstieg bei $v_{fr} = 7 \text{ mm/min}$ gefolgt, um dann bei $v_{fr} = 8 \text{ mm/min}$ auf ein absolutes Minimum abzusinken. Dieses Verhalten läuft allen bisherigen Erkenntnissen zu wieder. Man könnte zunächst einmal annehmen, das die Ergebnisse bei den Datenpunkten $v_{fr} = 6 \text{ mm/min}$ und $6,5 \text{ mm/min}$ fehlerhaft sind. Unterstellt man stattdessen, das eine Interpolation eher dem tatsächlichen Verlauf entspricht, so würde sich ein in sich konsistenter Verlauf ergeben. Unter diesen Voraussetzungen ist allerdings immer noch ungeklärt wieso das Werkzeug bei dieser vermeintlich schlechteren Kühlsituation länger schleiffähig bleibt, als bei der Kühlsituation „2 Düsen+ Wkst“.

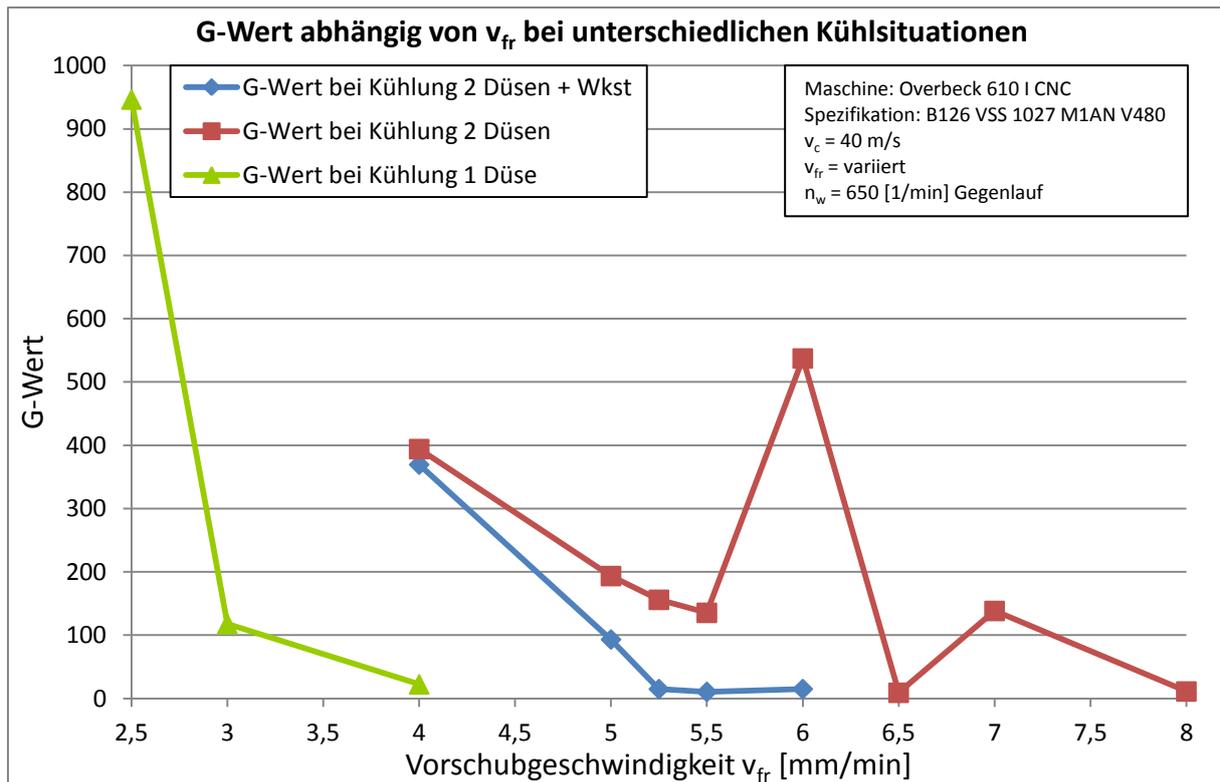


Bild 4.51: G-Wert abhängig von v_{fr} bei unterschiedlichen Kühsituationen

Zusammenfassung / Fazit

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind nicht ganz eindeutig. Bei der Kühsituation „1 Düse“ ist ein rascher Abfall des G-Werts zu beobachten. Mit der Kühlung „2 Düsen + Wkst“ nimmt der G-Wert hingegen eher langsam ab. Allerdings bestätigen die Verläufe die Ergebnisse aus dem **Kapitel 4.4.1**. Durch eine verbesserte Kühlung bleibt die Spezifikation noch bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten schleiffähig. Somit könnte auch das unterschiedlich starke Abfallen des G-Werts eine Eigenschaft einer schlechteren Kühlung sein. Dennoch weist die Versuchsreihe mit der Kühlung „2 Düsen“ ein so stark abweichendes Verhalten von vorherigen Ergebnissen auf, dass hier mit hoher Wahrscheinlichkeit eine fehlerhafte Versuchsdurchführung angenommen werden muss. In jedem Fall erscheint eine nähere Untersuchung dieses Phänomens sinnvoll.

4.4.3 Schleifstiftvorbereitung durch Einschleifen

Im Verlauf der Spezifikationsuntersuchung ist aufgefallen, dass die Schleifleistung in der Regel beim ersten geschliffenen Werkstück nach dem Abrichten wesentlich höher ist, als bei den darauffolgenden Schliften. Auch konnte hiermit einhergehend oft eine schlechtere Mittenrauheit beobachtet werden. **Bild 4.52** zeigt den Verlauf der Schnittleistung über fünf geschliffene Werkstücke mit einem Werkzeug der Spezifikation 5 bei $v_c = 40$ m/s und $v_{fr} = 6$ mm/min. Man erkennt deutlich die stark erhöhte Schnittleistung beim ersten geschliffenen Werkstück.

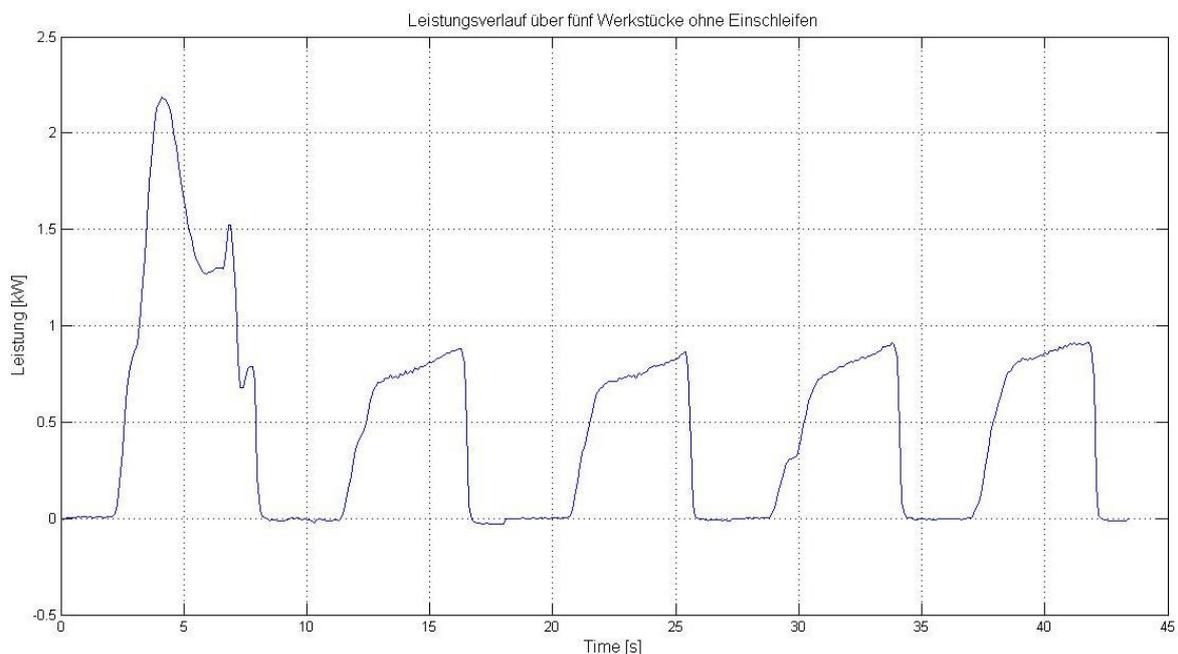


Bild 4.52: Verlauf der Schnittleistung über fünf Werkstücke [$v_c = 40$ m/s; $v_{fr} = 6$ mm/min; $n_w = 650$ 1/min]

Mit dieser Versuchsreihe wurde untersucht, ob sich diese Problematik durch das Einschleifen des Werkzeuges vor dem eigentlichen Schleifen verringern oder ganz umgehen lässt. Eine weitere Überlegung zu diesem Phänomen befasste sich in diesem Zusammenhang mit der Schleiffähigkeit der Werkzeuge. Vorausgegangene Ergebnisse lassen vermuten, dass sehr hohe Schleifkräfte zu extremem Verschleiß führen. Daher liegt die Vermutung nahe, dass dieses Verhalten dafür verantwortlich ist, dass die Werkzeuge während der Spezifikationsuntersuchung in einigen der Fälle nicht schleiffähig waren. Könnte man demnach diese überhöhten Schleifkräfte und Schnittleistungen verringern, wären manche Spezifikationen eventuell noch bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten schleiffähig.

Für diese Versuchsreihe wurde ein Werkzeug der Spezifikation 5 verwendet. Die Schleifparameter wurden wie folgt gewählt, da unter diesen Bedingungen ein niedriger G-Wert und eine hohe Mittenrauheit auftraten und daher eine starke Verbesserung durch das Einschleifen erhofft wurde:

- $v_c = 40 \text{ m/s}$
- $v_{fr} = 6 \text{ mm/min}$
- $n_w = 650 \text{ 1/min}$; Gegenlauf

Diese Versuchsreihe wurden unter denselben Bedingungen hinsichtlich Abrichten, Anzahl der Werkstücke und Erfassung der Schleifdaten durchgeführt wie bisher. Das Einschleifen erfolgte mit reduzierter Vorschubgeschwindigkeit $v_{fr} = 1 \text{ mm/min}$. Es wurden drei unterschiedliche Einschleifvolumina getestet:

$$V_{\text{einschleif}} = [0 \text{ mm}^3; 23,8 \text{ mm}^3; 47,9 \text{ mm}^3]$$

Dies bedeutet, ein Versuch wurde ohne Einschleifen durchgeführt, der Zweite mit einem Schleifaufmaß $a_e = 0,25 \text{ mm}$ und der Dritte mit $a_e = 0,5 \text{ mm}$.

Versuchsauswertung

Bild 4.53 zeigt den Verlauf der Mittenrauheit über die geschliffenen Werkstücke für die drei Einschleifvarianten. Man sieht deutlich, dass ohne Einschleifen die Rauheit zuerst sehr hoch ist und dann mit jedem Werkstück abnimmt. Im Gegensatz dazu ist die Rauheit bei beiden Einschleifvarianten vom ersten Werkstück an niedrig steigt dann an. Wie man sieht liegen die Mittenrauheiten bei der Versuchsreihe mit dem niedrigeren Einschleifvolumen unter denen der Versuchsreihe mit hohem Einschleifvolumen. Dies spiegelt sich auch in den Mittelwerten der Rauheit R_a (**Bild 4.54**Bild 4.53) wieder.

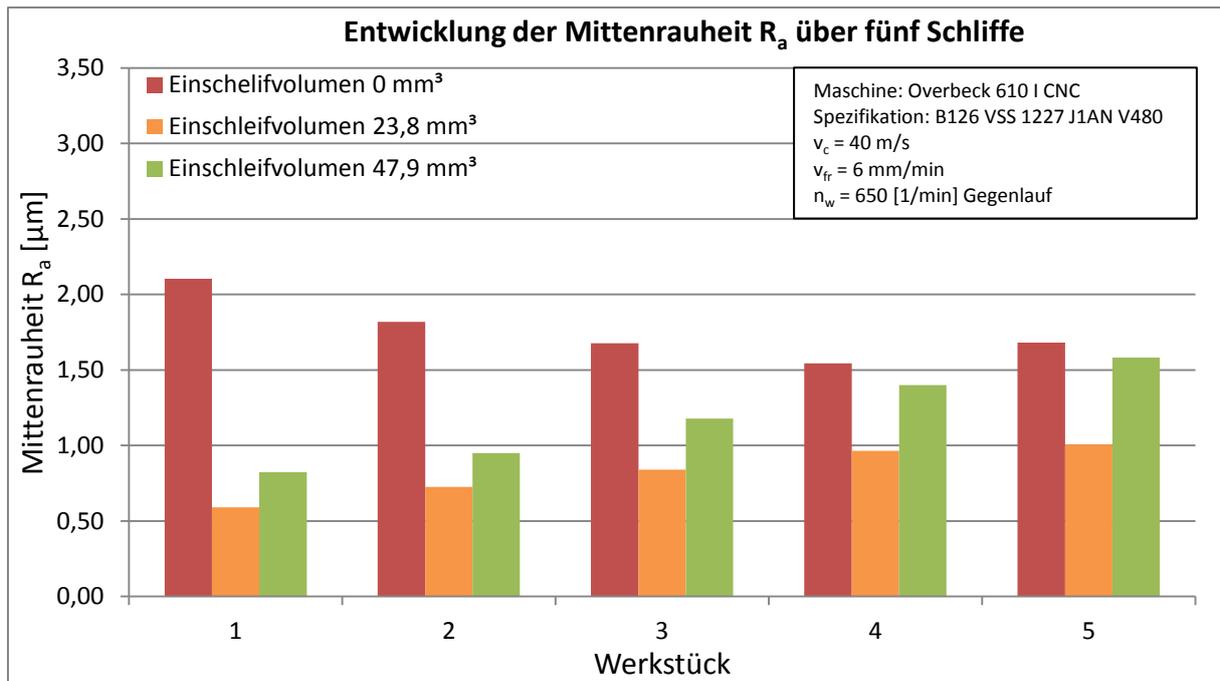


Bild 4.53: Entwicklung der Mittenrauheit über fünf Schriffe

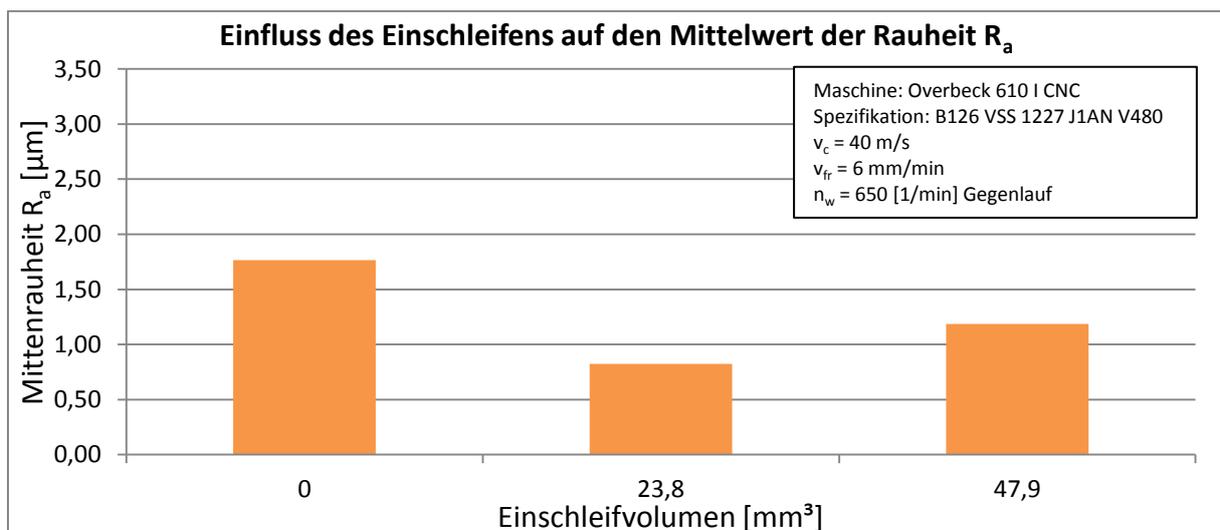


Bild 4.54: Einfluss der Einschleifens auf den Mittelwert der Mittenrauheit

Das Diagramm in **Bild 4.55** zeigt den Einfluss des Einschleifens auf den G-Wert. Man erkennt den deutlichen Vorteil, den das Einschleifen hier bewirkt. Auch für den G-Wert ist das Einschleifen mit niedrigerem Volumen vorteilhaft.

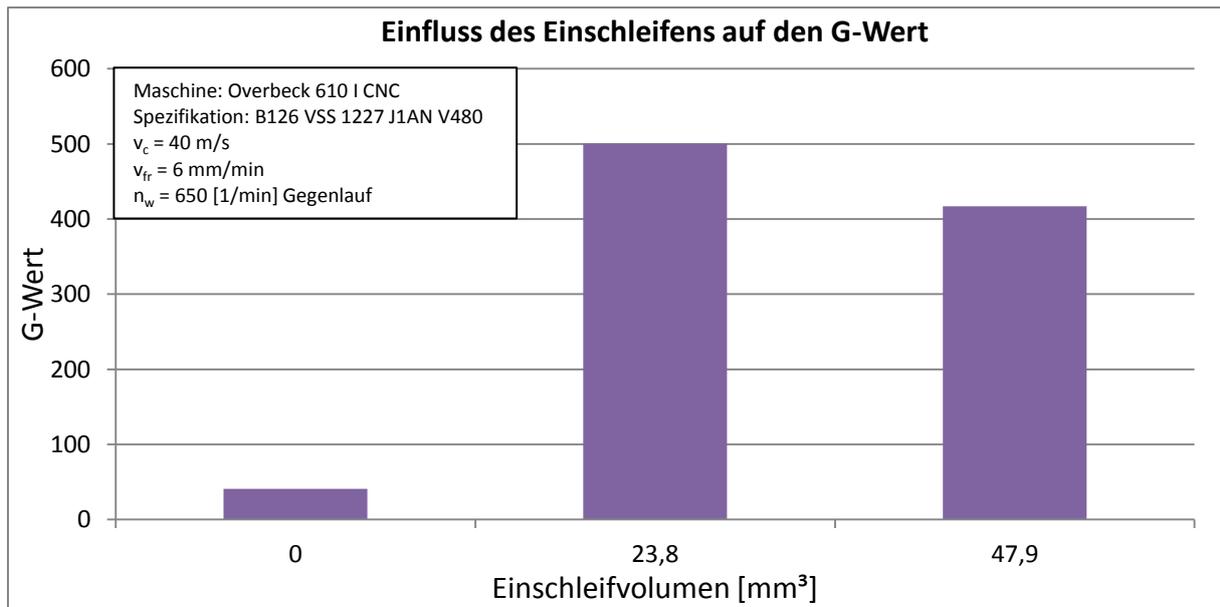


Bild 4.55: Einfluss des Einschleifens auf den G-Wert

Vergleicht man nun die resultierenden Leistungsverläufe für das niedrige Einschleifvolumen (**Bild 4.56**) und das hohe Einschleifvolumen (**Bild 4.57**) mit dem Verlauf ohne vorheriges Einschleifen (**Bild 4.52**), so lässt sich feststellen, dass hier kein signifikanter Unterschied zu erkennen ist. Sowohl an der Spitzenleistung wie auch dem Leistungsverlauf hat das Einschleifen keine großen Veränderungen bewirken können.

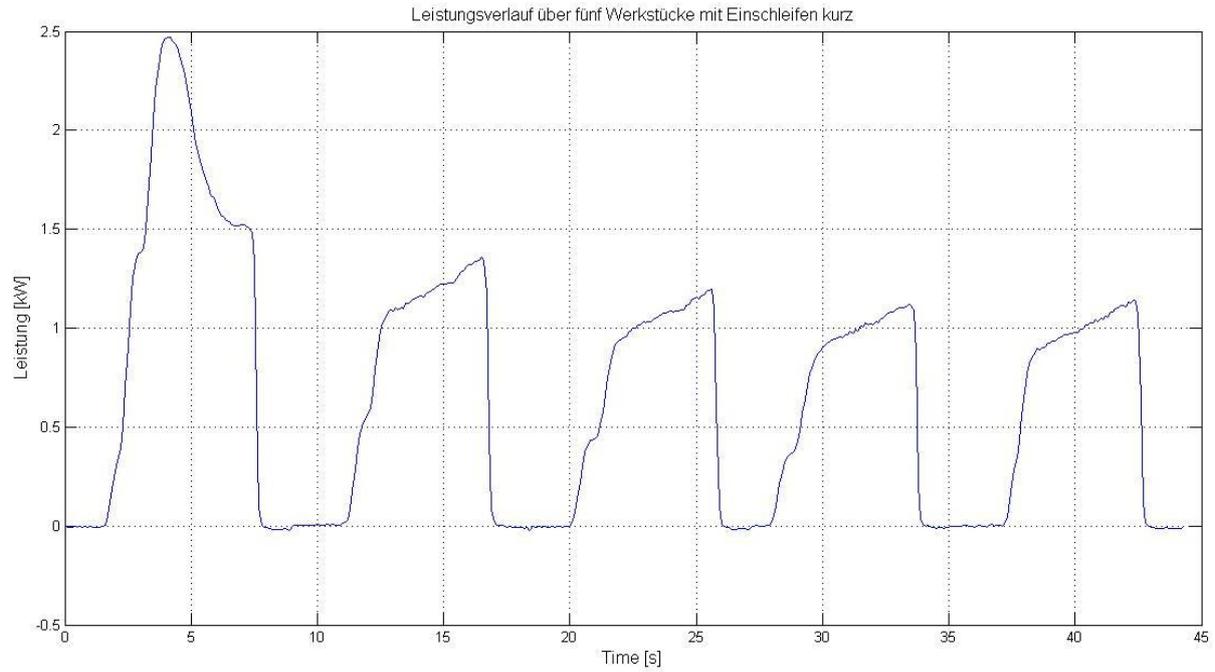


Bild 4.56: Verlauf der Schnittleistung über fünf Werkstücke bei Einschleifvolumen $23,8 \text{ mm}^3$

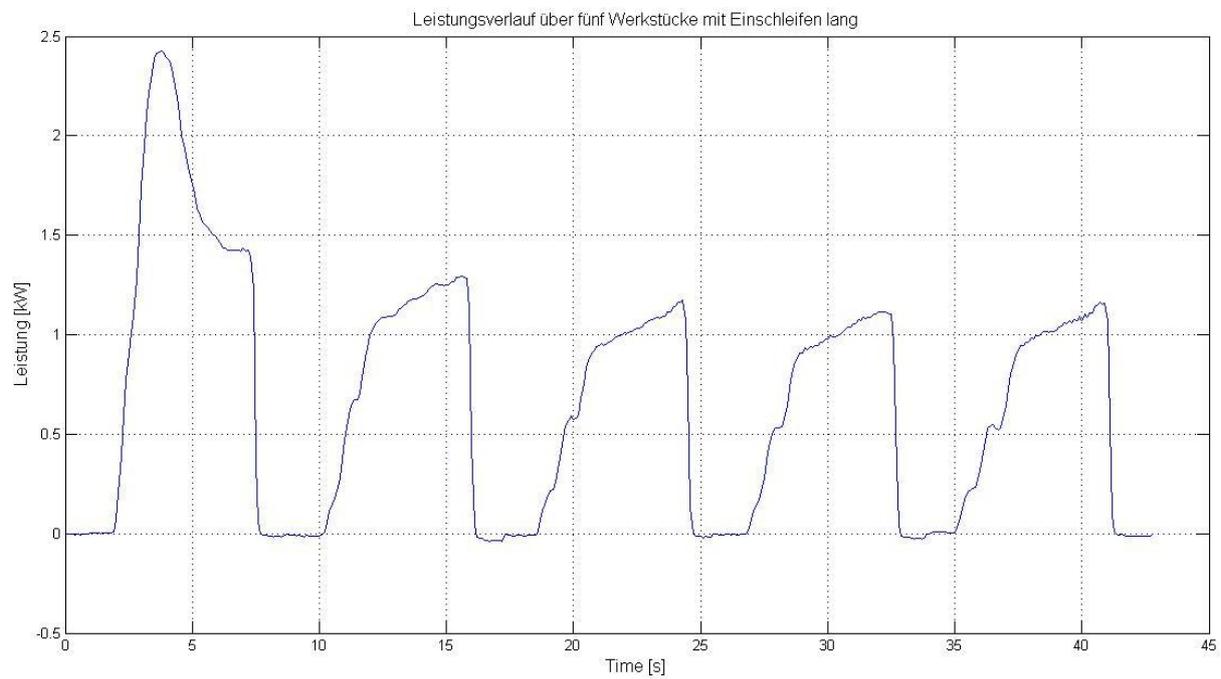


Bild 4.57: Verlauf der Schnittleistung über fünf Werkstücke bei Einschleifvolumen $47,9 \text{ mm}^3$

Zusammenfassung / Fazit

Anhand der Ergebnisse dieser Versuchsreihen lässt sich feststellen, dass das Einschleifen einen durchaus positiven Effekt auf das Schleifergebnis hat. Die erzielbaren Rauheiten haben sich durch das Einschleifen deutlich verbessert. Die Verbesserung des G-Wertes ist noch bedeutender. Dieser konnte um etwa um das Zehnfache verbessert werden. Hiermit wird die Vermutung bestätigt, dass das Einschleifen dazu beitragen kann das Werkzeug bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten schleiffähig zu machen. Entgegen der Erwartungen hat sich für die Schnittleistung keine Veränderung ergeben, obwohl sich das Schleifergebnis in den anderen Belangen stark verbessert hat. Die Ergebnisse deuten tatsächlich eher darauf hin, dass sich die durchschnittliche Schnittleistung noch erhöht hat.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Einschleifen weitgehend den erwarteten positiven Einfluss auf das Schleifergebnis hat. Es empfiehlt sich die erkennbaren Tendenzen aus diesem Stichversuchs intensiver zu untersuchen. Insbesondere auch im Hinblick auf das Verhalten der Schleifkräfte und Schnittleistung.

4.5 Erarbeitete Testprozedur

Auf Basis der Daten der durchgeführten Versuche sollte eine Testprozedur vorgeschlagen werden. Die verwendete Testprozedur in **Kapitel 4.3** hat gute Ergebnisse zur Untersuchung von Schleifkörpern geliefert. Daher sollte sie als Basis für eine zukünftige Testprozedur dienen. Die Variation der Vorschubgeschwindigkeit erschien in einigen Fällen etwas zu grobschrittig. Der Vorschub sollte daher eher in Schritten von 1 mm/min variiert werden. Die Parametergrenzen der Vorschubgeschwindigkeit haben sich als sinnvoll herausgestellt.

Anhand der Versuchsreihen mit Bindung 4 wurde aufgezeigt, dass die verwendete Kühlung verbessert werden sollte. Daher sollte statt der Standardkühlung generell besser die Variante „2 Düsen +Wkst“ verwendet werden. Allerdings ist auch hier das Optimierungspotential noch nicht ausgeschöpft. Daher sollten im Idealfall noch weitere Versuche zur Kühlungsoptimierung gemacht werden um deren Ergebnisse in die Testprozedur einfließen zu lassen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird folgende Testprozedur vorgeschlagen.

Variation der Parameter Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit:

v_c [40 m/s, 50 m/s, 60 m/s, 70 m/s]

v_{fr} [2 mm/min, 3 mm/min, 4 mm/min, 5 mm/min, 6 mm/min]

Daraus resultiert eine Matrix aus 20 Parameterkombinationen. Alle weiteren Parameter bleiben wie folgt konstant:

Werkstückdrehzahl	n_w [650 1/min]; Gegenlauf
Schleifaufmaß	a_e [1 mm bezogen auf den Durchmesser]
Werkstückdurchmesser	d_w [30 mm]
Kühlung	„2 Düsen +Wkst“ (siehe Kapitel 4.4.1)

Abrichtparameter:

Abrichtvorschubgeschwindigkeit	v_{fad} [100 mm/min]
radial Abrichtzustellung pro Hub	a_{ed} [3 μ m]
Geschwindigkeitsverhältnis	q_d [0,8]

Gesamtzustellung nach AE-Signal

Für jede Parameterkombination wird eine Versuchsreihe durchgeführt. Dazu wird als erster Schritt das Werkzeug abgerichtet. Anschließend werden ohne zwischenzeitiges Abrichten fünf Werkstücke geschliffen. Vor und nach jedem Schliff wird der Werkstückdurchmesser gemessen. Bei jedem Schliff werden Kräfte und Leistung aufgezeichnet. Zusätzlich wird nach jedem Schliff die Oberfläche der Bohrung an drei Stellen gemessen. Zum Abschluss der Versuchsreihe wird der Verschleiß des Werkzeugs nach der Methode aus **Kapitel 4.2** gemessen.

Diese Testprozedur kann lediglich die Ausgangsbasis verstanden werden. Weitere Grundlagenversuche zu Themen wie Kühlung, Abrichten und Einschleifen der Werkzeuge sollten auf Basis dieser Arbeit folgen und ihre Ergebnisse sollten in eine finale Testprozedur einfließen. Auch kann die Testprozedur um eine Langzeituntersuchung mit ausgewählten Parameterkombinationen erweitert werden, um eine genauere Bestimmung des G-Werts zu ermöglichen.

5 Zusammenfassung

Die Kombination aus keramischer Bindung und cBN-Könung besitzt eine Reihe von positiven Eigenschaften beim schleifen von Stahlwerkstoffen. Da bei typischen Innenschleifanwendungen oftmals bei diesen Materialien zum Einsatz kommen, haben keramisch gebundene cBN-Schleifscheiben hier ein hohes Potential. Die Fähigkeit dieser Schleifwerkzeuge wird dabei von den Eigenschaften des Schleifbelags, unter anderem Bindungstyp, Korngröße und Konzentration wesentlich bestimmt. Die Bindungsparameter müssen daher möglichst gut auf einander und die Schleifanwendung eingestellt sein. Aus diesem Grund sind Schleifversuche mit verschiedenen Testwerkzeugen von hohem Wert für die Werkzeugentwicklung. Ziel dieser Arbeit war das Einrichten eines Prüfstandes für Innenrundscheifkörper, grundlegende Eigenschaften des N7 Bindungssystems zu ermitteln und eine Testprozedur für Innenrundscheifkörper vorzuschlagen.

Zunächst wurden mit einer einzelnen Spezifikation verschiedene Schleifparameter und ihr Einfluss auf das Schleifergebnis beim Innenrundscheifen in Form von Vorversuchen untersucht. Hierbei konnten für die N7 Spezifikation Parametergrenzen für die Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit ermittelt werden. Für die Schnittgeschwindigkeit ergab sich eine Untergrenze von $v_c = 40$ m/s. Der Vorschubgeschwindigkeit sind im Bereich von $v_{fr} = 6$ mm/min Grenzen gesetzt. Zudem wurden die Werkstückgeschwindigkeit und der Unterschied zwischen Gleichlauf- und Gegenlaufschleifen als weniger bedeutende Faktoren erkannt.

Anhand dieser Erkenntnisse wurde eine vorläufige Testprozedur ausgearbeitet. Diese umfasst insgesamt zwölf Parameterkombinationen aus Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit, mit Hilfe derer das Schleifverhalten einer Bindungsspezifikation beurteilt werden soll. Diese Testprozedur wurde dann mit fünf verschiedenen Bindungsspezifikationen durchlaufen. Zum einen haben die Ergebnisse dieser Untersuchung ergeben, dass die Testprozedur geeignet ist Unterschiede im Verhalten verschiedener Spezifikationen aufzuzeigen. Zum Anderen haben sich deutliche Unterschiede in den verschiedenen Bindungsspezifikationen der N7 Bindung offenbart. Als Ergebnis dieser Versuchsreihen konnte abgeleitet werden, dass Spezifikationen mit niedriger Porosität im Allgemeinen ein besseres Schleifverhalten aufweisen.

Ausgehend von den Erfahrungen, die beim Testen der unterschiedlichen Spezifikationen gesammelt wurden, wurden dann einige Stichversuche durchgeführt um bestimmte Eigenschaften der Bindungen näher zu untersuchen. Hiermit sollte vor allem aufgezeigt

werden, ob zukünftige Untersuchungen in dem jeweiligen Bereich lohnenswert erscheinen und es sollten gegebenenfalls erste Tendenzen der jeweiligen Einflüsse ermittelt werden.

Der erste Stichversuch hatte die Verbesserung der Kühlung zum Thema. Aus der Schleifpraxis ist weithin bekannt, dass dem Thema Kühlung beim Schleifen eine besonders große Bedeutung zukommt. Im Rahmen der Versuchsreihe wurden drei verschiedene Kühlungen untersucht. Es konnte zwar nachgewiesen werden, dass eine Verbesserung der Kühlung einen positiven Effekt auf das Schleifergebnis hat, jedoch war dieser aufgrund des geringen Versuchsumfangs nur schwer quantifizierbar.

Mit dem zweiten Stichversuche wurde untersucht, wie sich das Schleifergebnis verändert, wenn die Schleifparameter schrittweise vom schleiffähigen in den nichtschleiffähigen Arbeitsbereich eines Werkzeugs erhöht werden. Dieser Versuch wurde unter jeder der drei Kühlbedingungen aus der vorangegangenen Versuchsreihe durchgeführt. Daher ergaben sich aus diesem Stichversuch zwei Erkenntnisse. Zum einen bewirkt eine bessere Kühlung, dass die Grenze des schleiffähigen Bereichs sich verschob und das Werkzeug unter bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten noch schleiffähig ist. Zum Anderen wurde festgestellt, dass der Übergang vom schleiffähigen in den nicht schleiffähigen Zustand bei unterschiedlichen Kühlungen unterschiedlich verläuft. Generell lässt sich sagen, dass der Übergang eher graduell als schlagartig erfolgt.

Im letzten Stichversuch wurde getestet wie sich die Schleifergebnisse verändern, wenn das Werkzeug vor den eigentlichen Schleifversuchen eingeschliffen wird. Grundlegen hat die Versuchsreihe ergeben, dass das Einschleifen die Schleifergebnisse stark verbessern kann. Darüber hinaus kann auch das Einschleifen eines Werkzeugs bewirken, dass es unter kritischen Einsatzbedingungen schleiffähig ist.

Mit der Gesamtheit der durchgeführten Versuche wurde insgesamt auch nachgewiesen, dass der Prüfstand auf Basis der Overbeck 610 I CNC für die Testung von Innenrundsleifkörpern geeignet ist. Durch diese verschiedenen Versuchsreihen konnten vielfältige Erfahrungen im Umgang mit Maschine und Messtechnik gesammelt werden.

Ausblick

Die vorgeschlagene Testprozedur ist geeignet einen raschen Überblick über das Schleifverhalten eines Innenrundscheifwerkzeuges zu geben und diesen mit anderen Werkzeugen, die diese Testprozedur durchlaufen haben, zu vergleichen. Dennoch besteht hier Erweiterungspotential, um die Aussagekraft der Testprozedur zu erhöhen. So kann die Testprozedur etwa um eine Langzeittestreihe für bestimmte Parameterkombinationen erweitert werden, um somit eine genauere Bestimmung des G-Werts zu ermöglichen. Dazu sollten zunächst einige Versuche durchgeführt werden, um die optimale Durchführung einer solchen Langzeittestreihe zu ermitteln. Auch ist der Einfluss der Kontaktlänge auf das Schleifergebnis bisher noch nicht untersucht. Dieser ändert sich mit abnehmendem Werkzeugdurchmesser unweigerlich. Ein entscheidender Faktor, der im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt gelassen werden musste ist das Abrichten. Die bisherigen Versuche wurden alle mit derselben Abrichtprozedur durchgeführt, die aus industrieüblichen Einsatzparametern abgeleitet wurde. Hier besteht ein weites Feld für Untersuchung und Optimierung des Abrichtvorgangs.

Anhand der drei Stichversuche wurden weitere Bereiche aufgezeigt, in denen Optimierungspotential besteht. So kann die Kühlung der Versuchsmaschine noch optimiert und der Einfluss unterschiedlicher Kühlsituationen untersucht und verglichen werden. Auch das Einschleifen bietet viel Potential die Schleiffähigkeit zu verbessern und sollte daher weiter untersucht und eventuell in die Testprozedur aufgenommen werden.

6 Literaturliste

- Die09 Dietrich, E.; Schulze A.
Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation
Hanser 2009
- Fil11 Fil-Tec Filter
Bandfilter
Stand 21.11.2011
http://www.fil-tec-filter.de/produkte_bf.php
- Gra07 Gravel, G.
Arbeitsmaterial der Vorlesung Qualitätsmanagment
Stand 2007
- Gro07 Grote, H.-K.; Feldhusen J.:
Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau.
Springer 2007.
- Hol88 Holz, R.; Sauren, J.:
Schleifen mit Diamant und CBN.
Hrsg.: Fa. E. Winter & Sohn GmbH Co., 1988.
- Koe96 Koenig, W.; Klocke, F.:
Fertigungsverfahren Band 2, Schleifen, Honen, Läppen.
VDI Verlag, 1996
- Min99 Mineke, E.
Handbuch der Abrichttechnik
Fa. Riegger Diamantwerkzeuge GmbH, 1999
- Pau07 Pauksch, E.; Holsten S.; Linß M.; Tikal F.:
Zerspantechnik, Prozesse, Werkzeuge, Technologien.
Vieweg und Teubner Verlag, 2008
- Rie11 Riegger Diamant- und CBN Werkzeuge
Die Grundlagen der Schleif- und Abrichttechnik
Stand 03.11.2011
<http://www.riegger-diamant.de/grundlagen/grundlagen.php>

- Sgd11 Saint-Gobain Diamantwerkzeuge
Keramisch gebundene cBN Schleifscheiben
Stand 03.11.2011
<http://www.winter-superabrasives.com/DE-keramisch-gebundene-cBN-Schleifscheiben.aspx>
- Tsch08 Tschätsch h.; Dietrich J.:
Praxis der Zerspantechnik, Verfahren, Werkzeuge, Berechnungen
Vieweg und Teubner, 2008
- VDMA02 VDMA
Fachverband Allgemeine Lufttechnik Arbeitsgruppe Aerosole
Kühlschmierstoffe, Frische Luft am Arbeitsplatz, Ein Leitfaden für die Praxis
VDMA 2002
- Win05 Winter Katalog Nr. 5
Abrichtwerkzeuge
Stand 2011

7 Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Bindungsgefüge ohne Füllstoffe [Pau07]	3
Bild 2.2: Galvanische Bindung bei einschichtig belegter Scheibe [Rie11]	9
Bild 2.3: Bestandteile einer keramischen Bindung	10
Bild 2.4: Verschleißarten [Gro07]	13
Bild 2.5: Radial und Kantenverschleiß [Pau07]	14
Bild 2.6: Definition des Konditionierens von Schleifscheiben [Min99]	15
Bild 2.7: Überdeckungsgrad beim Abrichten [Win05]	16
Bild 2.8: Einfluss des Überdeckungsgrads auf die Wirkrautiefe (schematisch) [Win05]	17
Bild 2.9: Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnises auf die Ausgangswirkrautiefe [Koe96]	17
Bild 2.10: Topographieänderung durch Schärpen [Koe96]	18
Bild 2.11: Längsumfangsinnenrundscheifen	19
Bild 2.12: Querumfangsinnenrundscheifen	19
Bild 2.13: Schleifspindel und Werkstück Bewegung [Pau07]	20
Bild 2.14: Kontaktlänge und Eingriffswinkel beim Innenschleifen [Pau07]	21
Bild 2.15: Formfehler durch zu große Zustellung beim Innenrundscheifen [Pau07]	22
Bild 3.1: Overbeck 610 I CNC nach der Anlieferung am Standort im EGTC	23
Bild 3.2: Faudi Schwerkraftbandfilter ABF 0,7/700	27
Bild 3.3: Ansicht des geöffneten HF-Umformers (defekte Steuerungselektronik im vorderen Bereich sichtbar)	32
Bild 3.4: Draufsicht auf Schleifspindel und die weit in den Arbeitsraum vorgezogene Abrichteinheit	34
Bild 3.5: Futterflansch (Mitte) zur Montage des Futterkörpers an die Werkstückspindel	36
Bild 3.6: IBAG-Abrichtspindel mit Spindelhalter	37
Bild 3.7: Diamanttopfabrichter	37
Bild 3.8: Frontansicht des 3D Modells des Arbeitsraumes der Overbeck 610 I CNC	40
Bild 3.9: Detailansicht des Stützblocks der Werkstückspindel	40
Bild 3.10: Die Umgerüstete Abrichteinheit, bereits mit montiertem AE-Sensor	41
Bild 3.11: Direkt unterhalb der Werkstückspindel montierte Kraftmessplatte, hier ohne Abdeckung gezeigt	43
Bild 3.12: Bedienpult mit integrierten Ladungsverstärkern und Frequenzumformer	45
Bild 3.13: Ladungsverstärker Kistler Type 5006	45

Bild 3.14: AE-M-Sensor und Empfänger	46
Bild 3.15: AE-M-Sensor	46
Bild 3.16: Dittel AE 6000 Modul	47
Bild 3.17: AE-Sensor und Empfänger mit Halterung	48
Bild 3.18: MarSurf PS1	49
Bild 3.19: Tastkopf bei Messung der Bohrung	49
Bild 3.20: Plattform für MarSurf (in Schleifposition geschwenkt)	49
Bild 3.21: Plattform zum Messen eingeschwenkt	49
Bild 3.22: Messwertverteilung der Maschinenfähigkeitsuntersuchung	55
Bild 4.1: Varianzband der N7 Bindung	57
Bild 4.2: Grundkörperrohling	60
Bild 4.3: gesinterter Schleifbelagring mit Sandanhaftungen	60
Bild 4.4: fertiger Schleifstift	60
Bild 4.5: Werkstück 100Cr6 gehärtet	61
Bild 4.6: Kühldüsenposition	64
Bild 4.7: Prinzipskizze zur Verschleißmessung am Schleifstift	65
Bild 4.8: Diagramm Mittenrautiefen über Schnittgeschwindigkeit	66
Bild 4.9: G-Wert über Schnittgeschwindigkeit	67
Bild 4.10: Schleifkräfte und Schnittleistung in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit	67
Bild 4.11: Mittenrauheit über Vorschubgeschwindigkeit	69
Bild 4.12: G-Wert über Vorschubgeschwindigkeit	69
Bild 4.13: Schleifkräfte und Schnittleistung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit	70
Bild 4.14: Mittenrauheit in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei $v_c = 70$ m/s	71
Bild 4.15: G-Wert in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei $v_c = 70$ m/s	72
Bild 4.16: Schleifkräfte und Schnittleistung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei $v_c = 70$ m/s	72
Bild 4.17: Mittenrauheit abhängig von n_w	73
Bild 4.18: G-Wert abhängig von n_w	74
Bild 4.19: Schleifkräfte und Schnittleistung abhängig von n_w	74
Bild 4.20: Gegenüberstellung von R_a im Gleichlauf und Gegenlauf	76
Bild 4.21: Gegenüberstellung des G-Werts im Gleichlauf und Gegenlauf	77
Bild 4.22: Gegenüberstellung der Schnittleistung im Gleichlauf und Gegenlauf	77
Bild 4.23: Gegenüberstellung der Schnittleistung im Gleichlauf und Gegenlauf	78
Bild 4.24: Mittenrauheiten der Spezifikation 1	82

Bild 4.25: Schleifkräfte und Schnittleistungen der Spezifikation 1	83
Bild 4.26: G-Werte der Spezifikation 1	83
Bild 4.27: Mittenrauheiten der Spezifikation 2	84
Bild 4.28: Schleifkräfte und Schnittleistungen der Spezifikation 2	85
Bild 4.29: G-Werte der Spezifikation 2	86
Bild 4.30: Bindungsspezifikation 4 mit Zusetzungen bei Standardkühlung [$v_c = 40$ m/s; $v_{fr} = 4$ mm/min]	87
Bild 4.31: Standardkühlung	87
Bild 4.32: Veränderte Kühlung für Spezifikation 4	87
Bild 4.33: Mittenrauheiten der Spezifikation 4	88
Bild 4.34: Schleifkräfte und Schnittleistung der Spezifikation 4	89
Bild 4.35: G-Werte der Spezifikation 4	90
Bild 4.36: Zusetzungen der Spezifikation 5 [$v_c = 40$ m/s; $v_{fr} = 4$ mm/min]	91
Bild 4.37: Mittenrauheiten der Spezifikation 5	92
Bild 4.38: Schleifkräfte und Schnittleistung der Spezifikation 5	93
Bild 4.39: G-Werte von Spezifikation 5	94
Bild 4.40: Zusetzung Spezifikation 8	95
Bild 4.41: Einhundertfache Vergrößerung der Zusetzung	95
Bild 4.42: Mittenrauwerte der Spezifikation 8	96
Bild 4.43: Schleifkräfte und Schnittleistung der Spezifikation 8	97
Bild 4.44: G-Werte der Spezifikation 8	98
Bild 4.45: AE Signal bei Belag mit und ohne Tiefenschädigung	99
Bild 4.46: Standardkühlung	103
Bild 4.47: Zwei tangentielle Kühldüsen	103
Bild 4.48: Kühlungseinfluss auf die Mittenrauheit	104
Bild 4.49: Kühlungseinfluss auf die Schleifkräfte und Schnittleistung	105
Bild 4.50: Kühlungseinfluss auf den G-Wert	105
Bild 4.51: G-Wert abhängig von v_{fr} bei unterschiedlichen Kühlsituationen	108
Bild 4.52: Verlauf der Schnittleistung über fünf Werkstücke [$v_c = 40$ m/s; $v_{fr} = 6$ mm/min; $n_w = 650$ 1/min]	109
Bild 4.53: Entwicklung der Mittenrauheit über fünf Schlitze	111
Bild 4.54: Einfluss der Einschleifens auf den Mittelwert der Mittenrauheit	111
Bild 4.55: Einfluss des Einschleifens auf den G-Wert	112

Bild 4.56: Verlauf der Schnittleistung über fünf Werkstücke bei Einschleifvolumen $23,8 \text{ mm}^3$

113

Bild 4.57: Verlauf der Schnittleistung über fünf Werkstücke bei Einschleifvolumen $47,9 \text{ mm}^3$

113

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema „Entwicklung einer Versuchseinrichtung zur Prüfung von Innenrundsleifkörpern“ ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Henstedt-Ulzburg, den 02.01.2012

.....
Marc Rosenkranz