

# » Stahlzerspanung in der Ultrapräzisionstechnik «

Abschlussbericht zum AiF-Projekt 17359

Berichtszeitraum:

01. Januar 2012 – 30. Juni 2014

Projektlaufzeit:

01. Januar 2012 – 30. Juni 2014

**Fraunhofer-Institut für  
Produktionstechnologie IPT**

Steinbachstraße 17

52074 Aachen

Telefon: +49 (0) 2 41 / 89 04 – 279

Fax: +49 (0) 2 41 / 89 04 – 6279

Erstellt von

Daniel De Simone

Aachen, Oktober 2014

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1	Forschungsthema	6
1.2	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	6
<b>2</b>	<b>Wissenschaftlich-technische Problemstellung</b>	<b>7</b>
2.1	Ausgangssituation und Stand der Forschung	7
<b>3</b>	<b>Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen</b>	<b>16</b>
3.1	Forschungsziel	16
<b>4</b>	<b>Forschungsergebnisse</b>	<b>17</b>
4.1	Zerspanprozessuntersuchungen	18
4.2	Prozessentwicklung zum Schleifen von Werkzeugen	39
<b>5</b>	<b>Wirtschaftliche Bedeutung für kleine und mittlere Unternehmen</b>	<b>62</b>
5.1	Nutzung der Forschungsergebnisse	62
5.2	Einsatzgebiete	62
5.3	Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU	63
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Veröffentlichung der Ergebnisse</b>	<b>65</b>
7.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	65
7.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit und des eingesetzten Personals	66

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verbesserungspotential in der Ultrapräzisionsbearbeitung für harte Werkstoffe	7
Abbildung 2: Wirtschaftliches Potential der Technologie	9
Abbildung 3: Prozessschritte zur Erzeugung von UP-Flächen auf Stahl	10
Abbildung 4: Prozesskenndaten Ultrapräzisionsbearbeitung	12
Abbildung 5: Verringerte Prozesskräfte durch Verringerung von Zustellung und Vorschub	13
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Schneidkantenverrundung und Spannungsdicke	14
Abbildung 7: Maschine zum Werkzeugschleifen	15
Abbildung 8: Forschungsziel des Vorhabens - Etablierung der Fertigung von Stahlbauteilen auf UP-Maschinen	16
Abbildung 9: Ultrapräzisionsdrehmaschine LT Ultra MTC410	17
Abbildung 10: Einfluss des Werkzeugradius auf die Prozessparameter	18
Abbildung 11: Darstellung der Schneide eines Diamant- und eines CBN-Werkzeuges	19
Abbildung 12: Ergebnisse der Bearbeitung von Nicht-Eisenmetallen mit monokristallinen Diamantwerkzeugen und variablem Vorschub	20
Abbildung 13: Vergleich des Werkzeugverschleißes von CBN Werkzeugen des Herstellers 1 an Aluminium und gehärtetem Stahl	21
Abbildung 14: Weißlichtinterferometrie von mit CBN bearbeiteten Oberflächen	22
Abbildung 15: Prozessversuche an Messing und Stahl mit CBN Werkzeugen des Herstellers 2	23
Abbildung 16: Vergleich einer aerostatischen und hydrostatischen Bearbeitungsspindel	24

Abbildung 17: Referenzoberfläche in mit Nickel-Phosphor beschichtetem Stahl	25
Abbildung 18: Vergleich der Oberflächenkennwerte binderloser und konventioneller CBN Werkzeuge	26
Abbildung 19: Prozessalternativen zur Erreichung optischer Ultrapräzisionsoberflächen	27
Abbildung 20: Einfluss der Spindeldrehzahl auf die Oberflächengüte und den Werkzeugverschleiß	29
Abbildung 21: Einfluss der Schnitttiefe auf die Oberflächengüte und den Werkzeugverschleiß	30
Abbildung 22: Einfluss des Vorschubes auf die Oberflächengüte und den Werkzeugverschleiß	31
Abbildung 23: Kopplung einer Vorbearbeitung durch CBN Werkzeuge und der Nachbearbeitung durch automatisierte Politur	33
Abbildung 24: Konvexe Stahlprobe mit Radius 25 mm durch CBN vorbereitete und automatisiert poliert	34
Abbildung 25: Kopplung einer Vorbearbeitung durch CBN Werkzeuge und der Nachbearbeitung durch ultraschallunterstütztes Drehen	34
Abbildung 26: Ultraschallunterstützt-bearbeiteter Stahlformeinsatz mit Mikrostrukturen	35
Abbildung 27: Vergleichsversuche mit CBN Fräswerkzeugen an einer Kern Pyramid Nano	36
Abbildung 28: Oberflächenkennwerte bei Bearbeitung an gehärtetem Stahl 1.2083 mit SiC Fräswerkzeugen	37
Abbildung 29: Oberflächenkennwerte bei Bearbeitung an gehärtetem Stahl 1.2083 mit CBN Fräswerkzeugen	38
Abbildung 30: Geometrische Konturen an einem Bearbeitungswerkzeug	39
Abbildung 31: Nachschliff von CBN Werkzeugen zur Erreichung hoher Schneidkantenschärfe	40

Abbildung 32: Ebenen und richtungsabhängige Abtragsraten im Diamanten	41
Abbildung 33: Orientierungen am Diamantoktaeder und Gestaltung der Werkzeuggeometrie	42
Abbildung 34: Achskinematik zum Schleifen von Bearbeitungswerkzeugen	43
Abbildung 35: Qualitätsmerkmale eines Bearbeitungswerkzeuges	46
Abbildung 36: Signifikanz der Faktoren der ersten Versuchsreihe	47
Abbildung 37: Einfluss der Schnitttrichtung auf die sich ausbildende Schneidkante	49
Abbildung 38: Signifikanz der Faktoren der zweiten Versuchsreihe	51
Abbildung 39: Test zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	53
Abbildung 40: Kraft und Körperschall in Abhängigkeit der Kristallorientierung	54
Abbildung 41: Kraft und Körperschall bei verschiedenen Zustellungen	57
Abbildung 42: Geschliffenes Radiuswerkzeug und geschnittenes Probewerkstück	58
Abbildung 43: Geschliffenes asphärisches Radiuswerkzeug und geschnittenes Probewerkstück	60

# 1 Einleitung

## 1.1 Forschungsthema

Erweiterung der Verfahrensgrenzen der Ultrapräzisionszerspanung zur Bearbeitung harter Werkstoffe durch angepasste Werkzeugtechnik und optimierte Prozessführung.

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die AiF gefördert.

## 1.2 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Der aktuelle Trend der stetigen Miniaturisierung findet sich in den unterschiedlichen Märkten der Medizintechnik, der Optik und der Mikromechanik wieder. Neben immer kleineren Produkten, die höhere Genauigkeiten erfordern, wächst insbesondere das Produktionsvolumen für miniaturisierte und optische Komponenten stetig. Die Komponenten werden vorwiegend in den Verfahren Kunststoffspritzguss, Spritzprägen und Heißprägen hergestellt.

Größter und entscheidender Nachteil der heutigen Bearbeitungsverfahren für Werkzeugformeinsätze ist, dass Einsätze aus harten Materialien wie Stahl bei der geforderten geometrischen Komplexität nicht mit der notwendigen Präzision hergestellt werden können (Abbildung 1). Gründe dafür sind, dass die existierenden Herstellungsverfahren für Formeinsätze aus harten Materialien auf Zerspanungsprozessen mit geometrisch unbestimmten Schneiden (z.B. Schleifen) beruhen, welche nur einfache Geometrien zulassen. Im Forschungsprojekt wurden daher eine neuartige Herangehensweise an die Herstellung von Stahlformeinsätzen beleuchtet. Dies beinhaltete einerseits CBN-Werkzeuge im Prozess im Hinblick auf optische Oberflächen zu qualifizieren und den Fertigungsprozess zu optimieren, als auch die Herangehensweise an die Herstellung von Werkzeugen für die Zerspanung mit Maschinenteknik zu automatisieren und so hochqualitative Werkzeuge für die Stahlzerspanung herzustellen.

*Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.*

## 2 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

### 2.1 Ausgangssituation und Stand der Forschung



**Abbildung 1: Verbesserungspotential in der Ultrapräzisionsbearbeitung für harte Werkstoffe**

Derzeit stehen zur Herstellung von Werkzeugformeinsätzen verschiedene Herstellungsprozesse zur Verfügung.

#### UP-Bearbeitung von Nichteisen (NE-) Metallen

Die Ultrapräzisionszerspanung mittels Drehbearbeitung wird zur Herstellung von Formeinsätzen aus Nichteisenmetallen verwendet. Mit Hilfe der spanenden UP-Bearbeitung werden optische Oberflächen und Mikrostrukturen unter Einsatz monokristalliner Diamantwerkzeuge (MKD) in NE-Metallen oder in Kunststoffen für den Prototypenbau erzeugt. Es werden Oberflächenrauheiten  $R_a$  im niedrigen einstelligen Nanometerbereich und Formgenauigkeiten im Submikrometerbereich ermöglicht. Dies wird unter anderem durch die extrem hohe Schneidkantenschärfe der monokristallinen Diamantwerkzeuge und die daraus resultierenden geringen Prozesskräfte möglich. Die Beschränkung der konventionellen UP-Bearbeitung auf NE-Metalle hat zur Folge, dass die gefertigten Bauteile nicht die notwendige Härte und Robustheit besitzen, um lange Standzeiten von Werkzeugformeinsätzen zu ermöglichen.

Demgegenüber steht die Möglichkeit einer hochflexiblen Fertigung von komplexen Freiformflächen und Mikrostrukturen.

### **Hartbearbeitung von Stahl**

Zur Herstellung von Formeinsätzen aus Stahl wird die Hartbearbeitung herangezogen, die sich je nach Bauteil und Anforderung aus den Prozessschritten Fräsen-Härten-Feinfräsen-Polieren oder Härten-Hartdrehen(oder Schleifen)-Polieren zusammensetzt. Mit diesen Prozessketten ist es möglich, eine große Vielzahl an Werkstoffen inkl. gehärteter Stähle zu bearbeiten. Grundlegende Nachteile und zugleich Ausschlusskriterien für diese Verfahren in der Fertigung von Ultrapräzisionsbauteilen sind die nicht hinreichende Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich der Formabweichung P-V und die den steigenden Anforderungen nicht gerecht werdende Einschränkung der geometrischen Bauteilkomplexität sowie die fehlende Möglichkeit der Herstellung von Mikrostrukturen.

### **Derzeitige UP-Bearbeitung von Stahl**

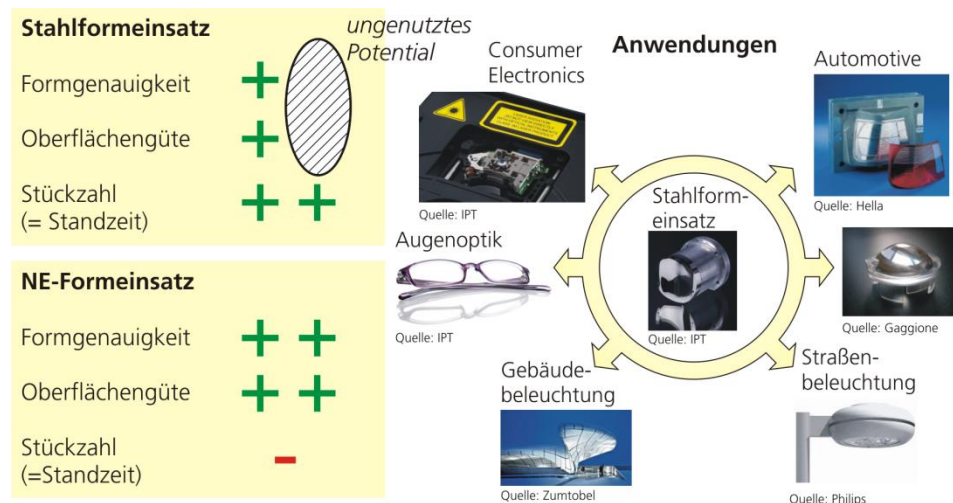
Zur direkten UP-Bearbeitung von Stahl werden aufwendige Verfahren wie die ultraschallunterstützte Diamantbearbeitung und die Diamantzerspannung nitrierter Stahloberflächen eingesetzt. Diese durchaus vielversprechenden Ansätze weisen jedoch einige Nachteile auf. Neben der aufwendigen und teuren Anlagentechnik für die ultraschallunterstützte Bearbeitung können mit diesem Verfahren nur einfache Geometrien gefertigt werden. Das Nitrieren des Stahls, um diesen für die Diamantzerspannung vorzubereiten, führt zu einer Randzonenveränderung. Dieser sogenannte Eierschaleneffekt kann zu einem Abplatzen der Oberfläche führen, so dass das Bauteil nicht mehr zu verwenden ist. Zudem schränkt die maximal mögliche Schichtdicke die Herstellung von Mikrostrukturen ein.

### **Nutzung innovativer Schneidwerkstoffe**

Weiterentwicklungen hochharter Schneidstoffe wie cBN und PKD hin zu binderlosem cBN und PKD, weisen enormes Potential zur Herstellung von Werkzeugen mit hohen Schneidkantenschärfen auf. Mit einem Volumenanteil von 99,9 % an cBN und einer Korngröße kleiner 0,5  $\mu\text{m}$  lassen sich derzeit beim Fräsen von gehärtetem Stahl (59 HRC) Oberflächenrauheiten von 50 nm Ra erzielen. Demgegenüber können mit konventionellen CBN-Werkzeugen lediglich Oberflächenrauheiten von 193 nm erzielt werden. Darüber hinaus verspricht der Einsatz auf Ultrapräzisionsdrehmaschinen, die eine hohe

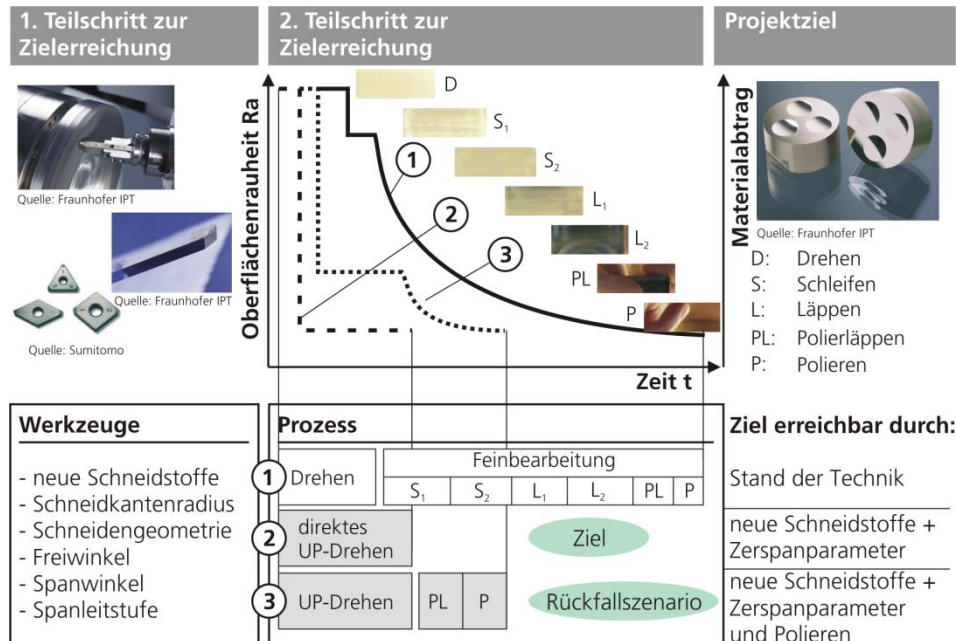


Dämpfung aufweisen, weitere, deutliche Verbesserungen der Oberflächenrauheit hin zu optischen Oberflächen. Die genannten Werkstoffe sind derzeit noch Stand der Forschung und bringen zukünftig ein hohes Potential für die Ultrapräzisionsbearbeitung. Die Bearbeitung harter Materialien insbesondere Stahl, kann daher mit diesen neuen Schneidstoffen im UP-Bereich umgesetzt werden. Zur ultrapräzisen Stahlzerspanung mit diesen Schneidstoffen fehlt derzeit jedoch das geeignete Werkzeugdesign und das Wissen über die Einstellung geeigneter Prozessparameter bei der Bearbeitung von Stahl.



**Abbildung 2: Wirtschaftliches Potential der Technologie**

In Abbildung 2 sind Anwenderbranchen von Stahlformeinsätzen aufgeführt – es wird deutlich, welch enormes wirtschaftliches Potential bei der Anwendung von Formeinsätzen aus harten Materialien wie zum Beispiel Stahl vorhanden ist. Deren Einsatz bringt sowohl eine Vergünstigung der Produktion durch längere Werkzeugstandzeiten als auch eine größere Ausfallsicherheit durch den robusteren Werkzeugaufbau. Das Forschungsprojekt fokussierte auf die Erschließung der Branchen durch den in Abbildung 3 dargestellten Ansatz.



**Abbildung 3: Prozessschritte zur Erzeugung von UP-Flächen auf Stahl**

**Prozesskette 1: Stand der Technik**

Der Stand der Technik zur Herstellung von Formeinsätzen mit optischen Oberflächen aus Stahl ist durch die erste Prozesskette wiedergegeben. An eine Vorbearbeitung zur groben Fertigung der Form schließt sich eine zeitaufwendige Feinbearbeitung an, welche aus verschiedenen Prozessschritten besteht. Dabei ist festzuhalten, dass der Materialabtrag und die Verbesserung der Oberflächengüte in den ersten Prozessschritten hoch sind. Für die Erzielung von optischen Oberflächen ist in den letzten Prozessschritten ein geringer Zeitaufwand notwendig bei nur geringem Materialabtrag. Die Gefahr von negativen Formänderungen ist in den letzten Prozessschritten nur noch sehr gering.

**Prozesskette 2: Zielsetzung des Projekts**

Die zweite Prozesskette repräsentiert die allgemeine Zielvorstellung, welche in diesem Forschungsvorhaben angestrebt wird. Da mit dem Verfahren UP-Drehen die Möglichkeit besteht direkt, optische Oberflächen und Formgenauigkeiten zu erzielen, können hierdurch relevante Zeitvorteile erschlossen werden. Zudem muss in diesem Fall nur noch ein Prozess sicher beherrscht werden, was die Komplexität reduziert. Zur Zeit scheitert die Umsetzung dieses Verfahren an den zur Verfügung stehenden Werkzeugen. Neue Werkzeuge wurden in

Hinblick auf die UP-Zerspanung von Stahl einsatzspezifisch gefertigt und qualifiziert. Schließlich wurden sie anhand von Prozessuntersuchungen optimiert und verifiziert. Der zweite Forschungsschwerpunkt war folglich die Prozessentwicklung zur UP-Zerspanung von Stahl.

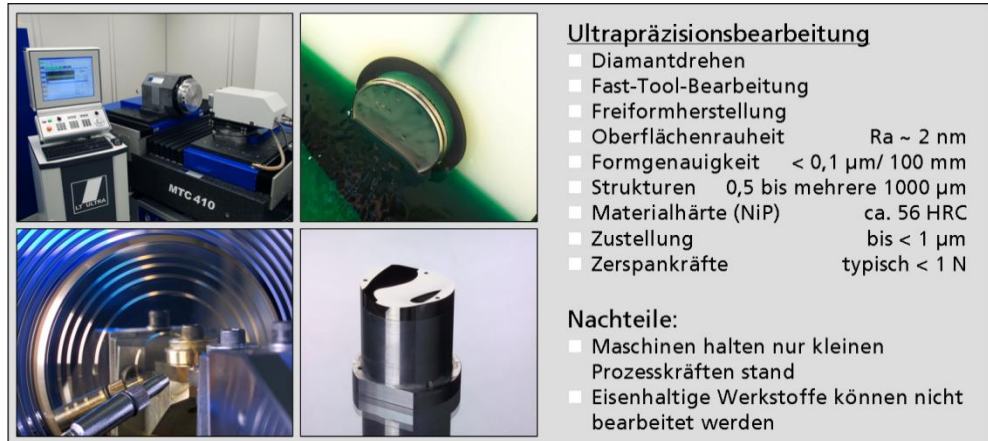
### **Prozesskette 3: Rückfallszenario**

Da die zweite Prozesskette einige Entwicklungsrisiken birgt, soll die dritte Prozesskette als Rückfallszenario mitbetrachtet werden. Durch die Entwicklung von Werkzeugen basierend auf den neuen Schneidstoffen kann das UP-Drehen befähigt werden, eine hohe Oberflächengüte zu erzielen. Der letzte Schritt zur Erzeugung einer optischen Oberflächengüte wird durch eine Polierbearbeitung erreicht. Im Vergleich zur ersten Prozesskette ist in diesem Fall nur noch ein sehr geringer Materialabtrag notwendig, der lediglich dazu dient, die Rauheit zu verringern. Dadurch kann im Gegensatz zur ersten Prozesskette eine insgesamt kürzere Prozesszeit mit geringem Risiko der Einbringung von Formfehlern erzielt werden.

### **Werkzeugtechnik**

Basis der spanenden UP-Bearbeitung sind hoch spezialisierte Maschinen, deren Achsen für hohe Genauigkeit und Dämpfung hydrostatisch gelagert sowie mit Lineardirektantrieben und mit glaskeramischen Maßstäben ausgestattet sind. So kann eine exakte Positionierung erreicht werden, die frei von Umkehrspiel und Stick-Slip-Effekt ist. Darüber hinaus werden mit heutigen Linearmaßstäben Auflösungen im Picometerbereich erzielt, wodurch Positionswiederholungen im einstelligen Nanometerbereich sicher möglich sind.

Die einzige nicht hydrostatisch gelagerte Komponente dieser spezialisierten Drehmaschinen ist die Hauptspindel, welche aerostatisch gelagert ist. Diese haben zwar einen Rundlauf im niedrigen zweistelligen Nanometerbereich und ermöglichen Positioniergenauigkeiten im Bereich weniger Winkelsekunden und eine schwingungsarme Bearbeitung, können aber nur geringen Zerspankräften standhalten, wie sie bei der Zerspanung von NE-Metallen und Kunststoffen mit geometrisch bestimmten Diamantschneiden auftreten (Abbildung 4). Daher stellen sie bei der Bearbeitung harter Materialien, wo höhere Prozesskräfte auftreten, einen entscheidenden Schwachpunkt der Ultrapräzisionsmaschinen dar.

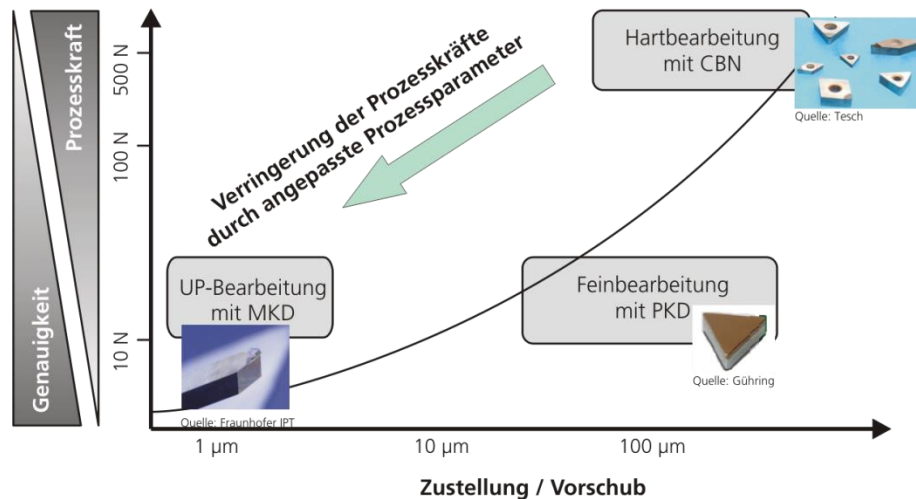


**Abbildung 4: Prozesskenndaten Ultrapräzisionsbearbeitung**

Auf der anderen Seite steht die Hartbearbeitung in Form des Hartdrehens. Diese dient der Bearbeitung von Funktionsflächen mittels Keramik- oder CBN-Werkzeugen und der Herstellung von Bauteilen mit hohen Anforderungen an dessen mechanisch abrasive Eigenschaften. Die Herstellung optisch spiegelnder Oberflächen ist mit diesem Verfahren nicht direkt möglich, denn die beim Hartdrehen eingesetzten Werkzeuge weisen eine gegenüber MKD-Werkzeugen deutlich höhere Schneidkantenverrundung auf, was die erzielbare Werkstückqualität negativ beeinflusst. Die erzielbare Oberflächenrauheit lag mindestens um Faktor 10 bis 100 über dem der UP-Zerspanung.

Während die Schnittkräfte aufgrund der Erwärmung und der damit verbundenen Aufweichung des Materials mit steigender Schnittgeschwindigkeit sinken, steigen Sie mit wachsender Härte des Materials. Im Gegensatz zur Härte ist die Abhängigkeit der Schnittkräfte von der Schnittgeschwindigkeit wenig ausgeprägt. Ebenfalls einen deutlichen Einfluss haben die Zustellung (Schnitttiefe  $a_p$ ) und der Vorschub  $f$  auf die Schnittkraft, die mit einem Anstieg der beiden Größen ebenfalls wächst.

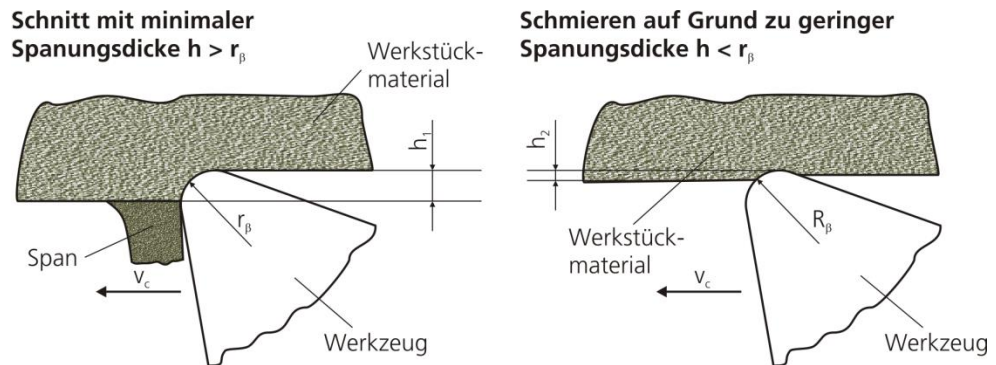
Das beantragte Forschungsvorhaben zielte demzufolge auf den in Abbildung 5 dargestellten Zusammenhang ab - der Verringerung der Zustellungen und Vorschübe durch Verbesserung der Werkzeugtechnik.



**Abbildung 5: Verringerte Prozesskräfte durch Verringerung von Zustellung und Vorschub**

Alternativ zur Bearbeitung von Stahl mit CBN- und Keramik-Werkzeugen gab es auch am Fraunhofer IPT den verfolgten Konkurrenzansatz der ultraschallunterstützten UP-Bearbeitung von Stählen mittels Diamantwerkzeugen. Dabei wird das Werkzeug in Schnittrichtung mit einer Frequenz im Ultraschallbereich in Schwingungen versetzt. Entscheidende Verbesserungen konnten in den vergangenen Jahren durch die Erhöhung der Ultraschallfrequenz erreicht werden, sodass heute ein breites Prozessfenster zur Verfügung steht, in dem Stahlwerkstoffe bis 53 HRC erfolgreich bearbeitet werden.

Im Bereich der Präzisions- und Ultrapräzisionsbearbeitung werden die angestrebten Genauigkeiten mit Hilfe geringster Zustellungen des Werkzeugs relativ zum Werkstück erzielt. Durch die Zustellung wird die Spanungsdicke  $h$  im Prozess eingestellt. Die minimal möglichen Spanungsdicken, welche mit einem Werkzeug umgesetzt werden können, hängen in erster Linie vom Schneidkantenradius  $r_E$  ab. Ist die Zustellung und damit die Spanungsdicke geringer als der Schneidkantenradius, so besteht die Gefahr, dass kein Schnitt erfolgt, sondern das Werkzeug über das Werkstück schmiert [KOEN02].

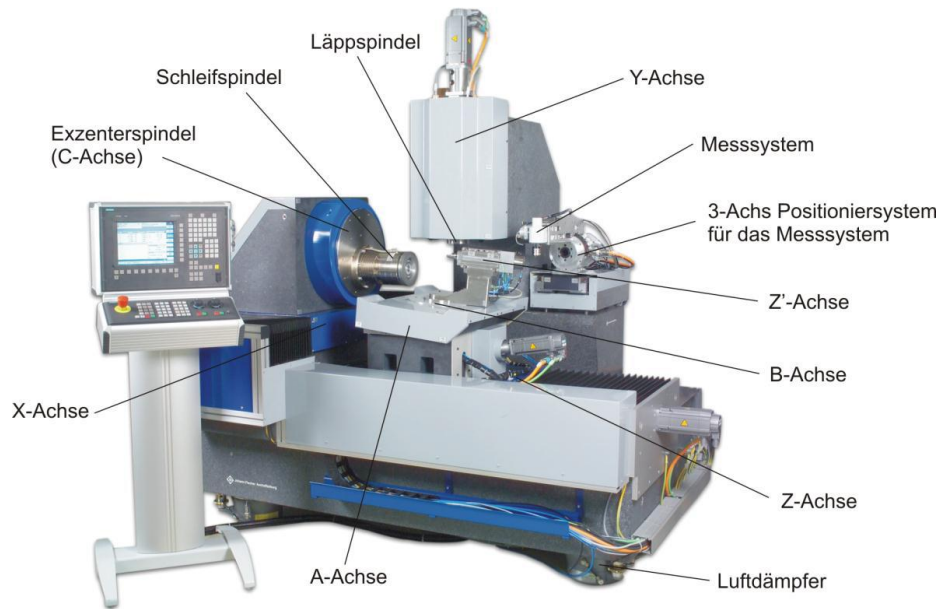


**Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Schneidkantenverrundung und Spanungsdicke**

Demzufolge ist die Voraussetzung für die Durchführung einer Ultrapräzisionszerspanung ein Werkzeug mit einem sehr geringen Schneidkantenradius. Im Stand der Technik werden hierzu monokristalline Diamantwerkzeuge eingesetzt, welche über Schneidkantenradien bis zu 30 nm verfügen [ZONG08]. Der theoretisch erzielbare Schneidkantenradius bei monokristallinen Diamantwerkzeugen liegt bei 6 nm [ZONG07]. Diese Werte erreicht zur Zeit kein anderer der genannten Schneidstoffe. Da sich jedoch der Diamant nicht dazu eignet, Stahl zu bearbeiten (s. Gläbe [GLAE99]), besteht der Fokus auf der Reduzierung des Schneidkantenradius der anderen Schneidstoffe.

### Werkzeugschleifen

Der Stand der Technik im Bereich des Werkzeugschleifens hochpräziser Werkzeuge, wie zum Beispiel Diamantwerkzeuge, ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Fertigung der Werkzeuge verschiedene Maschinen zum Einsatz kommen. Bei der Fertigung eines Diamantwerkzeugs wird zunächst die Freifläche und damit die Kontur des Werkzeugs geschliffen. Im darauffolgenden Schritt wird die Spanfläche geläpft, um die beim Schleifen der Freifläche entstandenen Ausbrüche an der Schneidkante zu entfernen und die Schärfe der Schneidkante zu erhalten. Die Genauigkeit der Werkzeuge war hierbei begrenzt, da durch das Umspannen auf verschiedenen Maschinen die Referenzpositionen verschoben wird.



**Abbildung 7: Maschine zum Werkzeugschleifen**

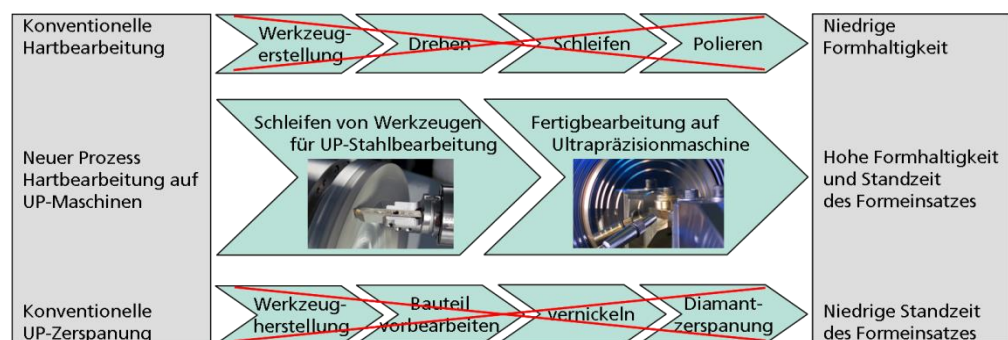
### 3 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen

#### 3.1 Forschungsziel

Die bisherigen Fertigungsprozesse für optische Produkte, bestehend aus mehreren sequentiellen Schritten, wie dem Hartdrehen, dem Schleifen und dem nachgelagerten Polieren, können die zukünftigen Anforderungen nicht mehr erfüllen. Komplexe Strukturen und die zunehmende Miniaturisierung für Lab-on-a-Chip Anwendungen lassen den wirtschaftlichen Einsatz von Schleifen oder Polieren nicht weiter zu.

Das Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war daher die Etablierung eines Fertigungsprozesses für die Herstellung von Stahlbauteilen auf Ultrapräzisionsmaschinen zur Realisierung von Stahlformeinsätzen die den Anforderungen des Spritzgusses von optischen Massenprodukten gerecht werden.

Dies schließt die Entwicklung von Werkzeugen zur ultrapräzisen Bearbeitung von Stahlwerkstoffen sowie die Prozessentwicklung und -optimierung für die Bearbeitung von Stahlwerkstoffen auf Ultrapräzisionsmaschinen ein. Es werden innerhalb des Forschungsvorhabens außerdem die Prozesse zur Bearbeitung von Stahl so adaptiert, dass eine Bearbeitung auf Ultrapräzisionsmaschinen möglich ist.



**Abbildung 8: Forschungsziel des Vorhabens - Etablierung der Fertigung von Stahlbauteilen auf UP-Maschinen**

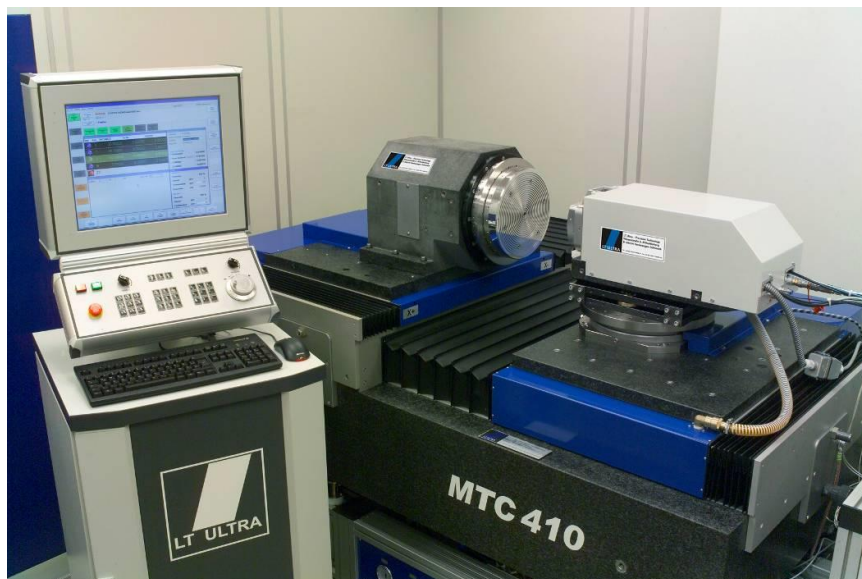


## 4 Forschungsergebnisse

In Anlehnung an Abbildung 3 sollte in diesem Projekt eine Herangehensweise geschaffen werden, die es erlaubt auch Stahl mit optischen Oberflächen und ultrapräzisen Formgenauigkeiten zu bearbeiten. Wie bereits erwähnt, sollten hierzu einerseits neue Werkzeuge entwickelt als auch neue Parameter zur UP-Bearbeitung von Stahl mit diesen Werkzeugen gefunden werden.

Die Entwicklung und Bearbeitung neuer Werkzeuge erfolgte dabei auf der in Abbildung 7 dargestellten Maschine. Die Prozessuntersuchungen wurden an zwei verschiedenen Ultrapräzisionsdrehmaschinen namhafter Hersteller durchgeführt – einer Precitech Nanoform 250 Ultra und einer LT Ultra MTC410.

Größter Unterschied der beiden Drehmaschinen besteht im Aufbau der Bearbeitungsspindel – während diese bei der Precitech aerostatisch gelagert wird, ist diese bei der LT Ultra hydrostatisch gelagert.



**Abbildung 9: Ultrapräzisionsdrehmaschine LT Ultra MTC410**

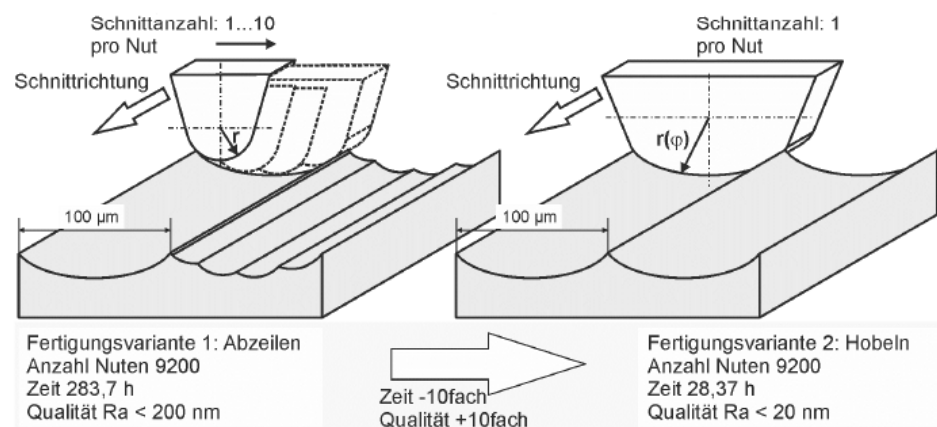
## 4.1 Zerspanprozessuntersuchungen

Die Drehbearbeitung teilt sich generell in die Bereiche der konventionellen Bearbeitung und der Ultrapräzisionsbearbeitung – während im konventionellen Bereich zumeist keramische oder CBN Bearbeitungswerkzeuge genutzt werden, ist zur Erreichung der hohen Genauigkeit im Ultrapräzisionsbereich die Verwendung von monokristallinen Diamantwerkzeugen mit scharfen Werkzeugschneiden unabdingbar.

Keramische und CBN Werkzeuge eignen sich gleichermaßen für Eisen- und Nicht-Eisenmetallbearbeitung, wohingegen mono- und polykristalline Diamantwerkzeuge auf Grund von hohem chemischem Verschleiß bei eisenhaltigen Werkzeugen nicht eingesetzt werden können.

Für die Prozessuntersuchungen wurden verschiedene Stahllegierungen bearbeitet, die im optischen Formenbau etabliert sind – hierzu zählen beispielsweise die Legierungen X42Cr13 (1.2083) oder 45NiCrMo16 (1.2767).

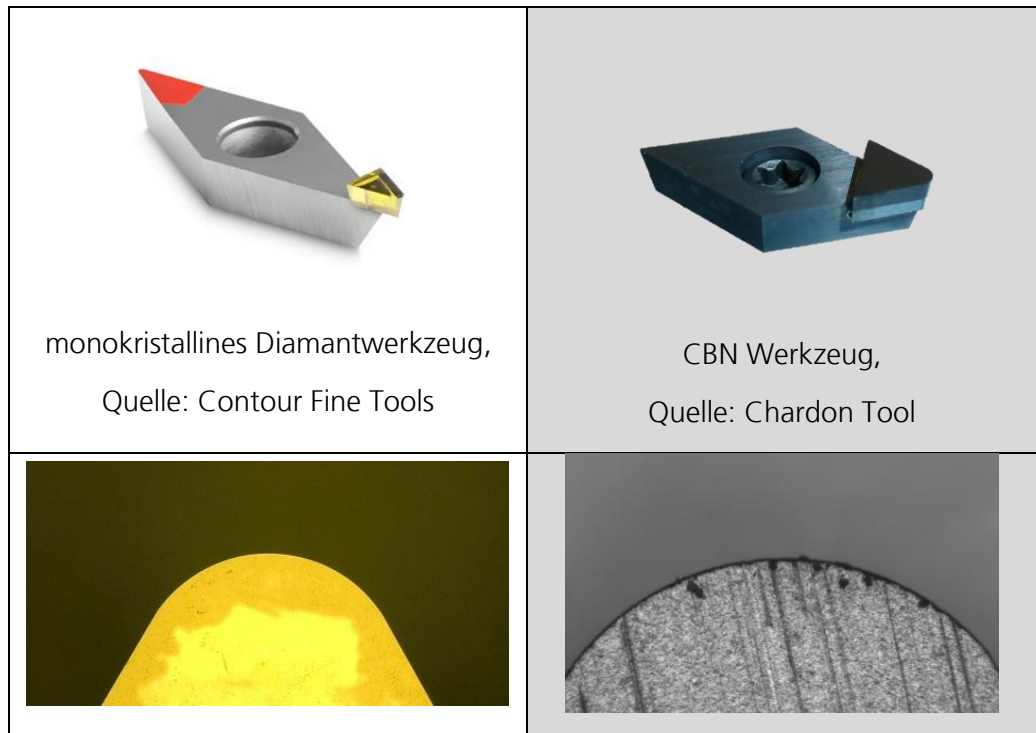
Vergleichsweise wurden Nicht-Eisenmetalle bearbeitet, die ebenso im optischen Formenbau etabliert sind – dazu zählt etwa Messing oder mit Nickel-Phosphor beschichtete Stahlkerne. Besonders Nickel-Phosphorbeschichtungen werden auf Grund der höheren Verschleißfestigkeit gegenüber Messing-Formeinsätzen oft eingesetzt.



**Abbildung 10: Einfluss des Werkzeugradius auf die Prozessparameter**

Die für die Drehbearbeitung relevanten Prozessparameter sind hierbei die Drehzahl der Bearbeitungsspindel, der Vorschub des Werkzeuges entlang des Bearbeitungspfades, sowie die Eingriffstiefe des Werkzeuges in den Bearbeitungswerkstoff. Neben den maschinenseitigen Parametern besitzt

ebenso die Geometrie des Bearbeitungswerkzeuges Einfluss auf die sich ausbildende Fläche und die Wahl der Prozessparameter – hier vornehmlich der Werkzeugradius (Abbildung 10). Für eine adäquate Bearbeitungszeit ist dieser so groß wie für die Fertigungsaufgabe möglich zu wählen.

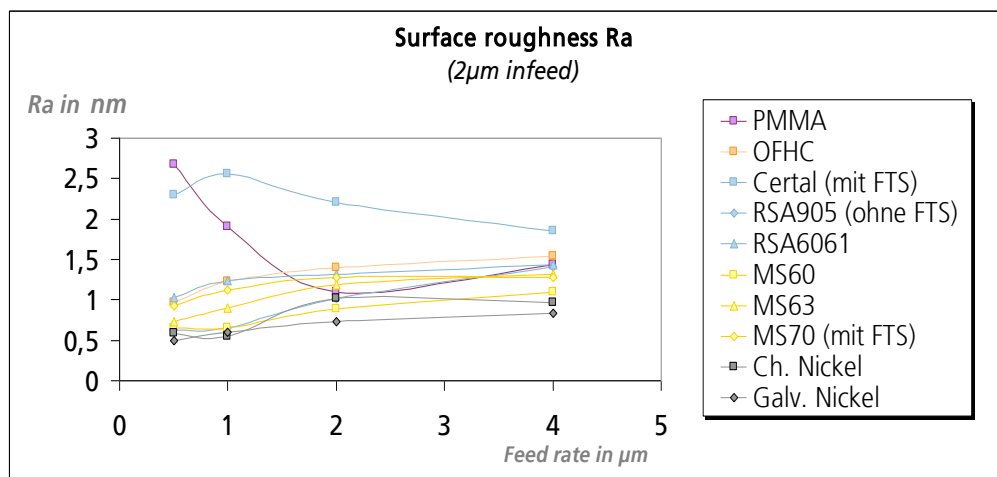


**Abbildung 11: Darstellung der Schneide eines Diamant- und eines CBN-Werkzeuges**

Bereits unter dem Mikroskop können deutliche Unterschiede zwischen den beiden Werkzeugarten festgestellt werden. Während an monokristallinen Werkzeugen eine deutlich feinere Kontur mit Schneidkantenradius von unter 50 nm und eine Spanfläche mit optischer Oberfläche erreicht werden kann, ist die Beschaffenheit des CBN-Werkzeuges deutlich gröber. Die Spanfläche ist deutlich rauer und der Schneidkantenradius liegt in der Größenordnung von etwa 7  $\mu\text{m}$  und ist somit etwa 140-fach größer als dieser an Diamantwerkzeugen.

Um eine Referenz und einen Vergleich zu mit Diamant bearbeitbaren Materialien zu erhalten, wurden zunächst Bearbeitungen von verschiedenen Nicht-Eisenmetallen durchgeführt. Dazu zählten unter anderem eine Kupferlegierung, verschiedene Aluminium- als auch Messinglegierungen und Nickel-Phosphorschichten.

Als Prozessparameter wurden die Bearbeitungsspindel mit 1200 U/min und die Zustellung auf 2  $\mu\text{m}$  konstant eingestellt. Unten stehende Abbildung 12 zeigt die sich ausbildenden Oberflächenwerte Ra in Nanometern bei variablen Vorschüben – diese wurden variiert von 0,5  $\mu\text{m}/\text{U}$  bis zu 4  $\mu\text{m}/\text{U}$  und liegen damit im in der Ultrapräzisionstechnik üblichen Bereich.

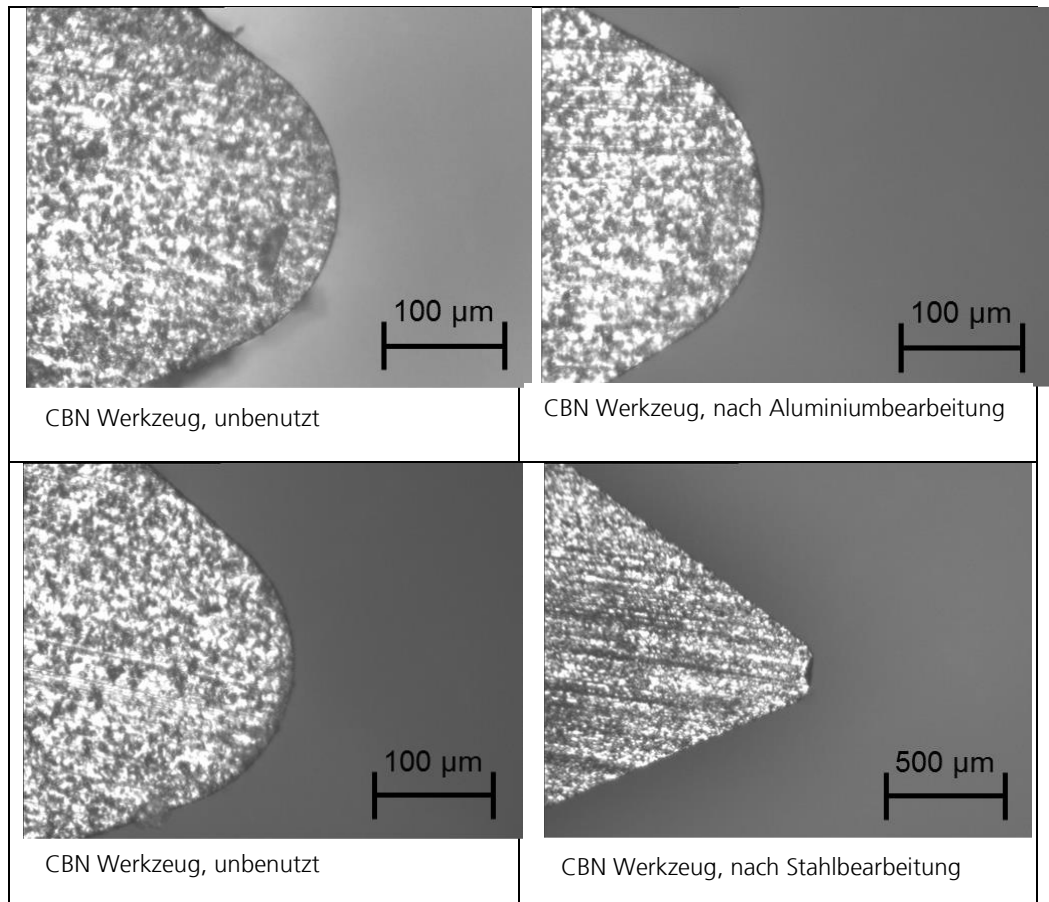


**Abbildung 12: Ergebnisse der Bearbeitung von Nicht-Eisenmetallen mit monokristallinen Diamantwerkzeugen und variablem Vorschub**

Die Bearbeitungsversuche mit einem monokristallinen Werkzeug mit Radius 500  $\mu\text{m}$  zeigen, dass an Nicht-Eisenmetallen durchweg optische Oberflächen mit Rauheitswerten Ra im niedrigen einstelligen Nanometerbereich erhalten werden können. Zudem zeigt sich, dass die Variation des Vorschubes nur geringfügig Einfluss auf die erreichbare Oberflächengüte besitzt und ebenso vom Gefüge des bearbeiteten Materials abhängig ist. Die Vermessung der Rauheitswerte erfolgte durch Weißlichtinterferometrie.

Nach Bearbeitung der Referenzflächen erfolgte die Bearbeitung von Stahloberflächen mit CBN Werkzeugen – zum Vergleich wurden hier ebenso Messing- und Aluminiumoberflächen bearbeitet, um einen direkten Vergleich zu den mit monokristallinen Werkzeugen erzielbaren Oberflächenrauheit zu erhalten.

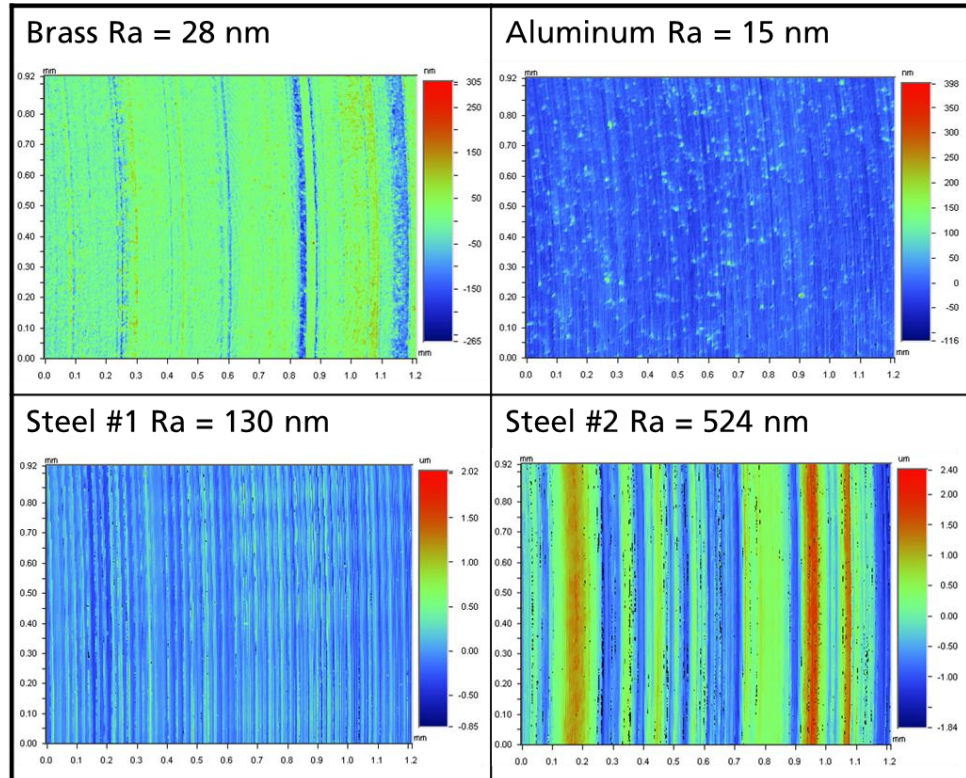
Abbildung 13 zeigt beispielhaft den Vergleich der Verschleißerscheinungen der genutzten CBN Werkzeuge eines ersten Herstellers in Aluminium und Messing (Abbildung 13, oben) und ungehärtetem Stahl (Abbildung 13, unten). Die Werkzeuge besitzen einen Schneideckenradius von 100  $\mu\text{m}$  und einen Freiwinkel von 10°.



**Abbildung 13: Vergleich des Werkzeugverschleißes von CBN Werkzeugen des Herstellers 1 an Aluminium und gehärtetem Stahl**

Während das oben dargestellte Werkzeug sowohl nach der Bearbeitung von Aluminium als auch Messing keinerlei Verschleißerscheinungen aufweist, ist bei unten abgebildetem Werkzeug bereits bei kleinerer Vergrößerung massiver Werkzeugverschleiß in Form eines Ausbruchs erkennbar.

Für die Versuche wurden die Drehzahl der Spindel konstant auf 2000 U/min eingestellt, der Vorschub auf 3 µm/U und die Zustellung auf 4 µm. Die Aufnahmen der Oberflächenwerte per Weißlichtinterferometrie zeigen, dass durch die Bearbeitung mit CBN-Werkzeugen an Stahl deutlich größere Oberflächenstrukturen entstehen, die eine größere Oberflächenrauigkeit bedingen.

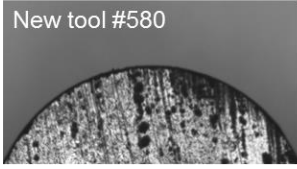
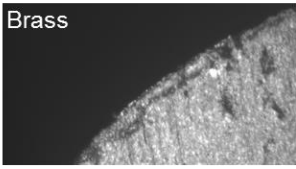
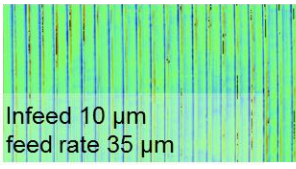

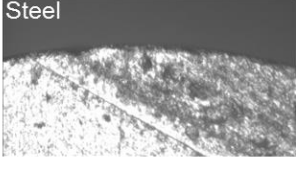
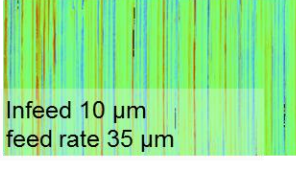
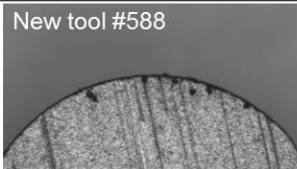
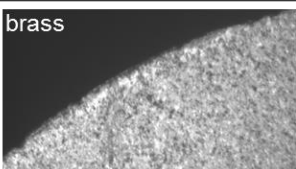
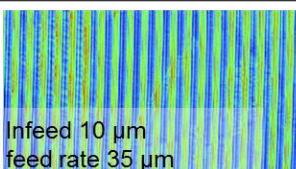
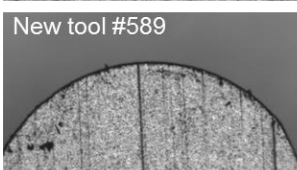
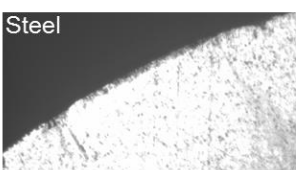
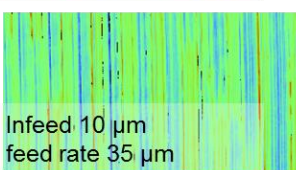


**Abbildung 14: Weißlichtinterferometrie von mit CBN bearbeiteten Oberflächen**

So konnten sowohl in Messing als auch in Aluminium annähernd optische Oberflächenwerte erreicht werden, während die Oberflächen bei der Bearbeitung von bereits ungehärtetem Stahl (1.2083) mit 130 nm respektive 524 nm deutlich gröber sind.

Die Bearbeitung von sowohl Messing als auch ungehärteten Stahlflächen wurde mit Werkzeugen eines zweiten Herstellers erneut durchgeführt. Diese besitzen einen Radius von 750  $\mu\text{m}$  mit einem Freiwinkel von 7°.

Die bei diesen Versuchen eingestellte Spindeldrehzahl wurde über der Oberfläche kontinuierlich angepasst, um eine konstante Schnittgeschwindigkeit von in diesem Fall 20 m/min zu erhalten. Der Vorschub wurde bei diesen Versuchen zwischen 10 und 35  $\mu\text{m}/\text{U}$  variiert und die Zustellung von 3  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  geändert. Zudem können bei diesem Hersteller verschiedene Feinheitsgrade der Körnung gewählt werden – die Feinkorn-Werkzeuge enthalten Korngrößen zwischen 0,8  $\mu\text{m}$  und 1,3  $\mu\text{m}$ , während die Feinstkornwerkzeuge mit Korngrößen zwischen 0,5  $\mu\text{m}$  und 0,8  $\mu\text{m}$  erhältlich sind.

	Neues Werkzeug	Nach Bearbeitung von	Oberflächentopologie
Feinkörniges CBN	New tool #580 	Brass 	 Infeed 10 µm feed rate 35 µm
	New tool #581 	Steel 	 Infeed 10 µm feed rate 35 µm
Feinstkörniges CBN	New tool #588 	brass 	 Infeed 10 µm feed rate 35 µm
	New tool #589 	Steel 	 Infeed 10 µm feed rate 35 µm

**Abbildung 15: Prozessversuche an Messing und Stahl mit CBN Werkzeugen des Herstellers 2**

Auch bei den Werkzeugen des Herstellers 2 ist ein leicht gesteigerter Verschleiß bei der Bearbeitung von Stahl (1.2083, ungehärtet) an der Schneidkante erkennbar. Die Oberflächenwerte  $R_a$  dieser Prozessuntersuchungen schwankten in Abhängigkeit von den eingestellten Parametern für Zustellung und Vorschub (hier Zustellung=10 µm; Vorschub=35 µm/U) für Feinkornwerkzeuge bei Messing zwischen 105 nm und 180 nm, wohingegen mit den Feinstkornwerkzeugen Oberflächenwerte  $R_a$  zwischen 60 nm und 160 nm erreicht werden können.

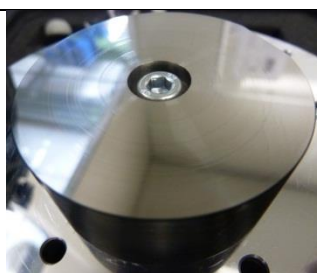
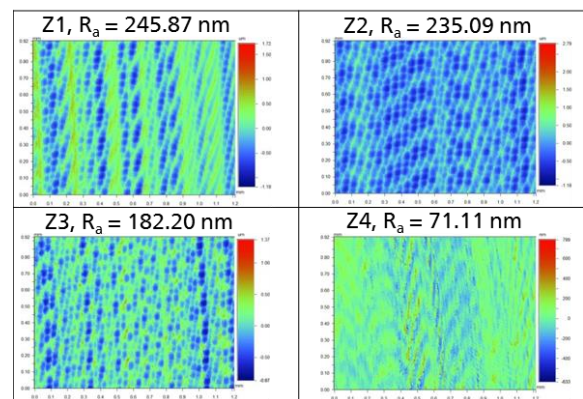
Verglichen mit den Oberflächenkennwerten  $R_a$  der Messingoberflächen, liegen diese der Stahloberflächen in vergleichbaren Größenordnungen. Während mit den Feinkornwerkzeugen Oberflächenrauheiten zwischen 110 nm und 180 nm erreicht werden können, ist die Streuung bei der Bearbeitung mit den Feinstkornwerkzeugen geringer – hier wurden Oberflächenrauheiten zwischen 130 nm und 140 nm erreicht.

Grundsätzlich kann anhand der Bearbeitungsergebnisse kaum ein Unterschied zwischen den verschiedenen Korngrößen der Werkzeuge erkannt werden. Ebenso scheint die Änderung des Vorschubs oder der Zustellung auf die sich einstellende Oberflächenrauheit keinen Einfluss zu haben. Dies kann durch die im Vergleich zum Diamantwerkzeug raue Oberfläche der CBN Schneide erklärt werden.

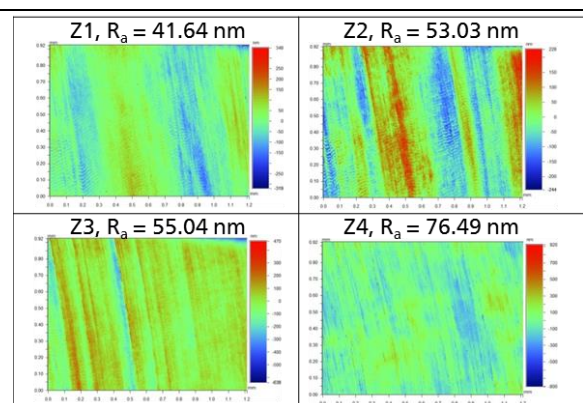
Der Vergleich der Bearbeitungsergebnisse der beiden eingesetzten Maschinen zeigt nachfolgend ebenso, dass die höhere Dämpfung, die durch die hydrostatische im Gegensatz zur aerostatischen Spindel vorliegt, eine gesteigerte Oberflächenqualität hervorruft. In Vergleichsaufnahmen sind auf den auf der aerostatischen Spindel gefertigten Oberflächen deutliche Rattermarken erkennbar, die auf zu geringe Dämpfung schließen lassen.



aerostat. Spindel;  $v = 80\text{m/min}$ ,  
 $f = 4,8\text{ mm/min}$ ,  $a = 10\text{ }\mu\text{m}$



hydrost. Spindel,  $n = 1600\text{ U/min}$ ,  
 $f = 4,8\text{ mm/min}$ ,  $a = 10\text{ }\mu\text{m}$

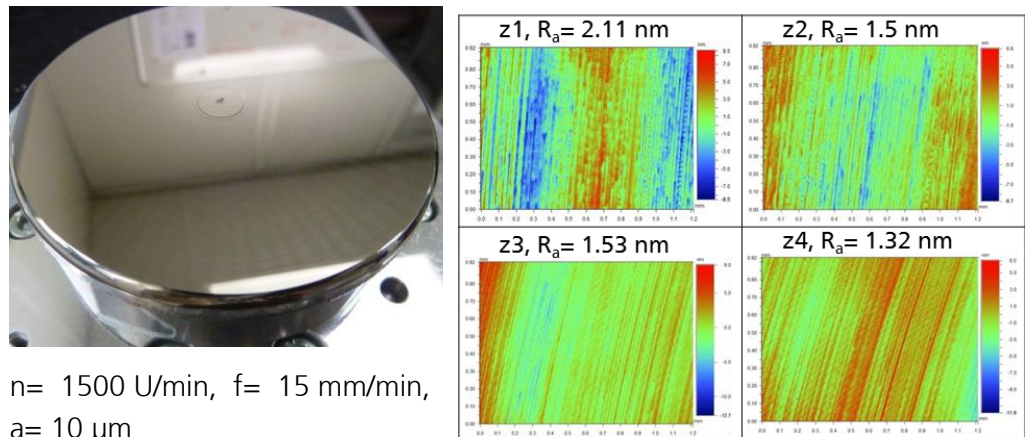


**Abbildung 16: Vergleich einer aerostatischen und hydrostatischen Bearbeitungsspindel**

Die Bearbeitung der Referenzflächen in Nickel-Phosphor wurde auf beiden Maschinensystemen durchgeführt. Die Nutzung der scharfen

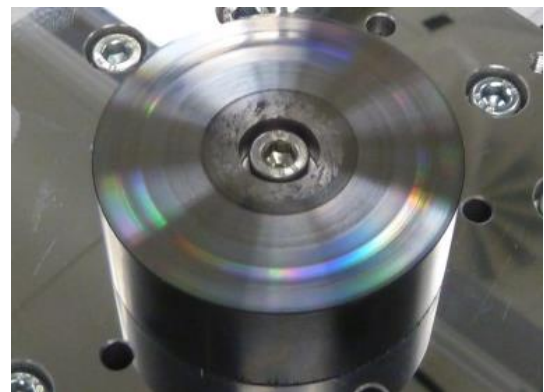
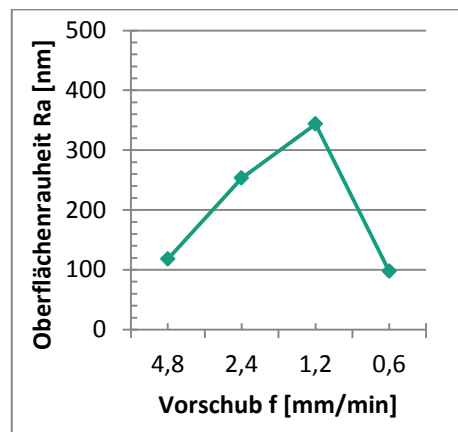


Diamantwerkzeuge erzeugte dabei auf beiden Maschinensystemen optische Oberflächenqualität im unteren einstelligen Nanometerbereich- Abbildung 17.



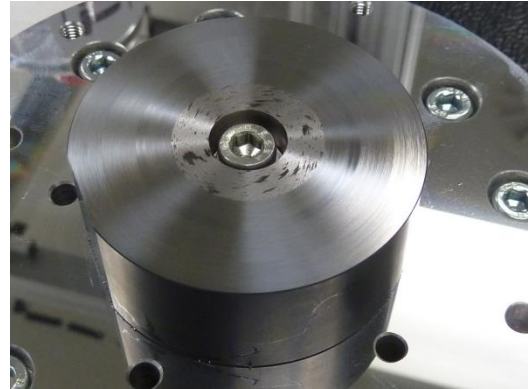
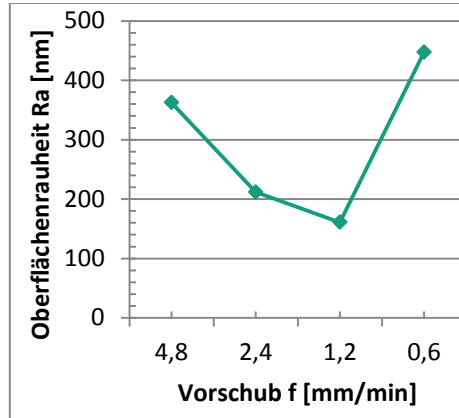
**Abbildung 17: Referenzoberfläche in mit Nickel-Phosphor beschichtetem Stahl**

Durch die verringerten Körngrößen, durch die ebenso schärfere Schneidkanten erreicht werden sollten, wurden Drehversuche mit binderlosen CBN Werkzeugen des Herstellers Sumitomo durchgeführt, die durch ihre Struktur und die schärfere Schneidkante zu verbesserten Oberflächenwerten führen sollten.



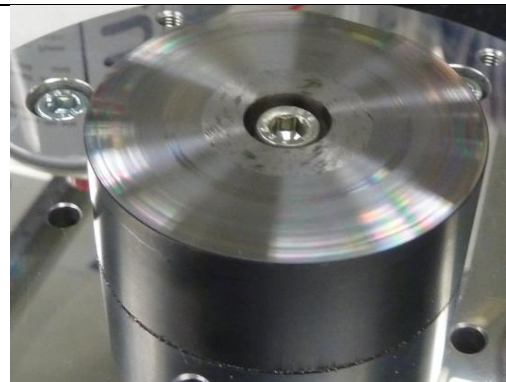
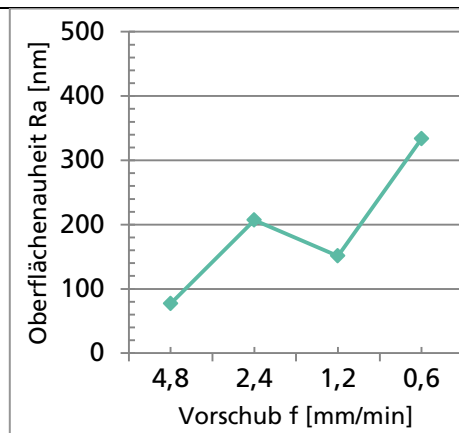
Binderless Tool #1

$n = 2425 \text{ U/min}$ ,  $a = 5 \text{ }\mu\text{m}$



Binderless Tool #2

$v = 80 \text{ m/min}$ ,  $a = 5 \text{ }\mu\text{m}$



CBN Tool #3

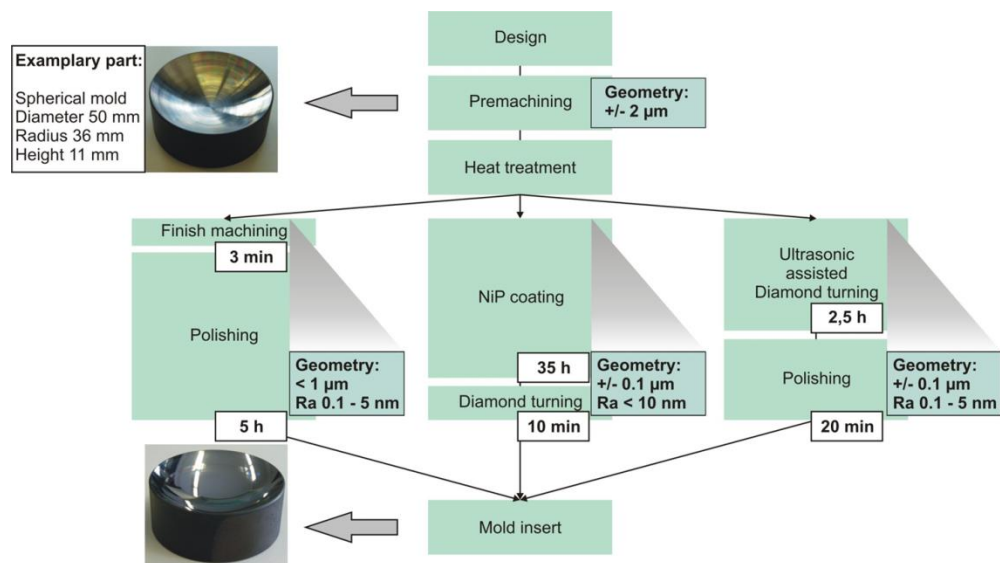
$v = 80 \text{ m/min}$ ,  $a = 5 \text{ }\mu\text{m}$

**Abbildung 18: Vergleich der Oberflächenkennwerte binderloser und konventioneller CBN Werkzeuge**

Dadurch, dass sich bekannte Werkzeughersteller während der Projektlaufzeit selbst noch in der Konzept- und Testphase binderloser CBN Werkzeuge befanden und der Vertrieb wie erwartet nicht kommerziell gestartet war, konnten lediglich zwei Werkzeuge auf Anfrage und lediglich als Leihgabe von Sumitomo erhalten werden. Wie bereits die Versuche zuvor, wurden auch diese Werkzeuge an gehärtetem Stahl 1.2083 mit 53 HRC eingesetzt. Die Werkzeuge besaßen einen Radius von  $750 \text{ }\mu\text{m}$ , einen Spanwinkel von  $0^\circ$  und einen Freiwinkel von  $7^\circ$ .

Die Bearbeitung erfolgte unter Variation des Vorschubes zwischen 0,6 mm/min bis 4,8 mm/min bei konstanter Schnitttiefe  $a$  von 5  $\mu\text{m}$  und einmal bei konstanter Drehzahl von 2425 U/min, sowie konstanter Schnittgeschwindigkeit von 80 m/min. Trotz der feineren Schneidkante der binderlosen CBN Werkzeuge zeigt sich in der Prozessuntersuchung, dass auch diese Werkzeuge im Ansatz des Drehens nicht zum Erfolg führen und keine optische Oberfläche erzeugen - Abbildung 18.

Gekoppelt mit dem hohen Werkzeugverschleiß, der sich sowohl bei den binderlosen CBN Werkzeugen, als auch bei denen des Herstellers aus Abbildung 15 zeigt, sollte eine Optimierung der Bearbeitungsparameter für konventionelle CBN Werkzeuge erfolgen. Dadurch, dass durch keines der eingesetzten CBN Werkzeuge optische Oberflächenqualität in Stahl erreicht werden konnte, musste der Prozess unter Einsatz herkömmlicher Werkzeuge optimiert werden und ein nachgelagerter Prozessschritt, etwa Polieren, zum Erreichen der optischen Oberflächenqualität in Stahl hinzugezogen werden - Abbildung 19.



**Abbildung 19: Prozessalternativen zur Erreichung optischer Ultrapräzisionsoberflächen**

Durch die gesteigerte Dämpfung des hydrostatischen Maschinensystems wurden die Bearbeitungsversuche nachfolgend ausschließlich mit diesem durchgeführt und der Einfluss der einzelnen Prozessparameter Spindeldrehzahl, Vorschub und Eingriffstiefe der Werkzeuge untersucht. Außerdem zeigt sich

wie in Abbildung 13, dass besonders die im Fokus stehenden scharfen Werkzeuge teilweise bei der Bearbeitung gehärteten Stahls unter massivem Schneidkantenausbruch leiden, der eine weitere Bearbeitung ausschließt. Aus diesem Grund wurden die Prozessuntersuchungen mit den CBN Werkzeugen der Körnungen BN2000, BN700 und BN250 des Herstellers Sumitomo durchgeführt. Die gemessenen Schneidkantenradien liegen hier bei BN700 mit etwa 4 µm über denen des Herstellers aus Abbildung 15, der knapp unter 1 µm liegt, jedoch leiden die obengenannten Sumitomo-Werkzeuge nicht unter Schneidkantenausbruch während der Prozessuntersuchungen, dadurch dass die Schneidkante der Werkzeuge wie exemplarisch in Abbildung 20 zu erkennen eine Fase besitzt. Die Werkzeuge werden dabei vom Hersteller für folgende Bearbeitungsschwerpunkte angegeben:

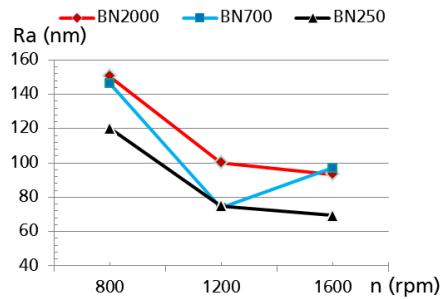
- BN2000: Finish Bearbeitung von gehärtetem Stahl
- BN700: HSC Bearbeitung von Gusseisen und pulvermetallurgischen Legierungen
- BN250: Leichte und mittlere Schnittunterbrechungen an gehärtetem Stahl und Gusseisen

Alle Werkzeuge besitzen dabei einen Schneideckenradius von 800 µm. Die Schneidkantenradien der Werkzeuge wurde exemplarisch vermessen:

- BN2000: 10,5 µm
- BN700: 7,0 µm
- BN250: 27,5 µm

Vergleichbare Schneidkantenradien an monokristallinen Diamantwerkzeugen liegen dabei im Bereich von etwa 50 nm.

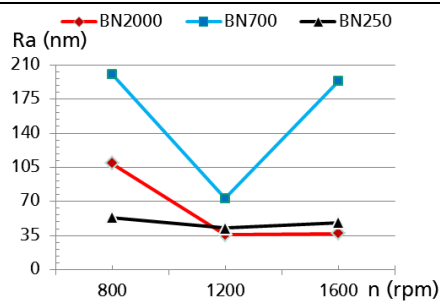
Die Untersuchungen der maschinenseitigen Prozessparameter erfolgte dabei nachfolgend an drei verschiedenen Stahllegierungen – 42CrMo4 (1.7225), 45NiCrMo16 (1.2767) und X42Cr13 (1.2083). Zunächst wurde bei konstantem Vorschub von 4,8 mm/min und konstanter Schnitttiefe von 10 µm eine Bearbeitung bei variablen Spindeldrehzahlen durchgeführt. Diese wurde während der Versuche auf 800, 1200 und 1600 U/min eingestellt. Die Versuche haben gezeigt, dass die besten Oberflächenqualitäten dabei bei 1200 U/min erzeugt werden können - Abbildung 20.



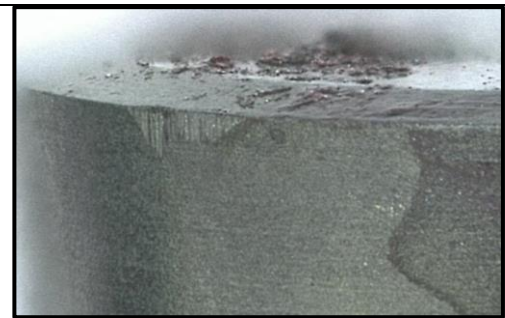
Legierung 1.7225



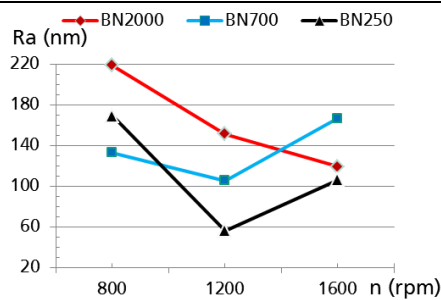
Schneidkante des BN2000, n=800 U/min



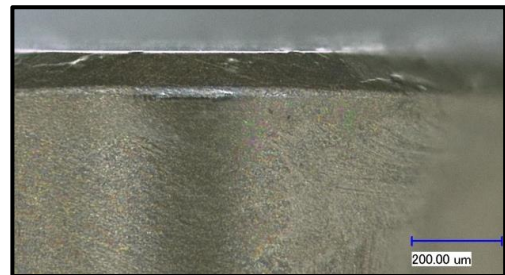
Legierung 1.2767



Schneidkante des BN700, n=1600 U/min



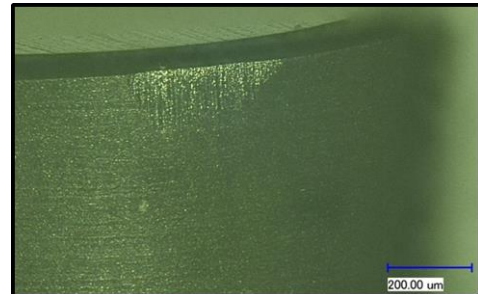
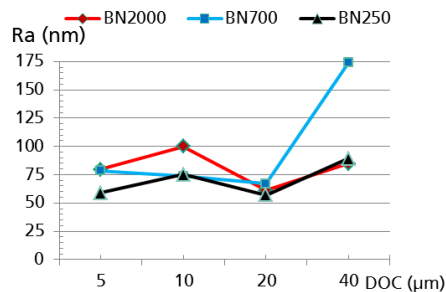
Legierung 1.2083



Schneidkante des BN250, n=1200 U/min

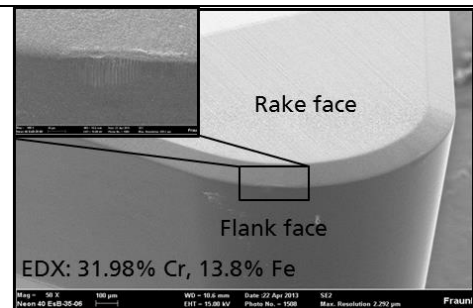
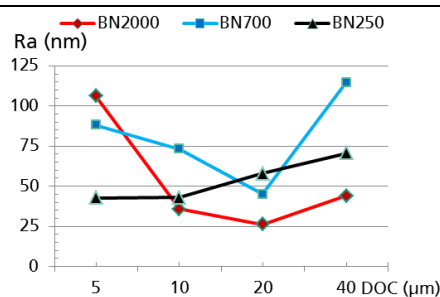
### Abbildung 20: Einfluss der Spindeldrehzahl auf die Oberflächengüte und den Werkzeugverschleiß

Ebenso zeigt sich, dass auch hier ein gesteigerter Verschleiß des Werkzeuges bei schärferer Schneidkante vorliegt und das Werkzeug des BN250 resistenter gegen Verschleiß ist. Für die nachfolgenden Versuche wurde die Spindeldrehzahl von 1200 U/min und der Vorschub von 4,8 mm/min konstant gehalten und die Schnitttiefe zwischen 5 und 40  $\mu\text{m}$  variiert.



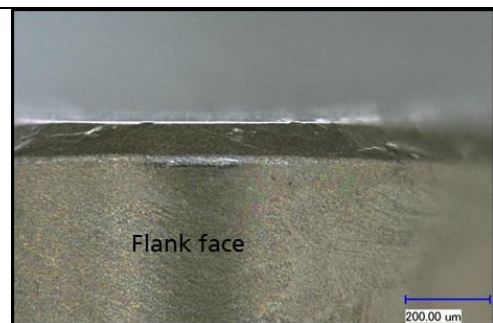
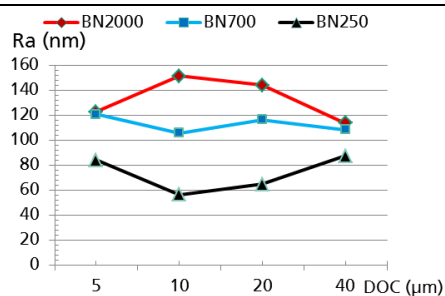
Legierung 1.7225

Schneidkante des BN700, a= 40 μm



Legierung 1.2767

Schneidkante des BN2000, a= 5 μm



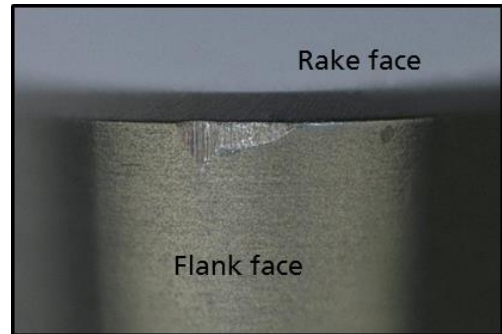
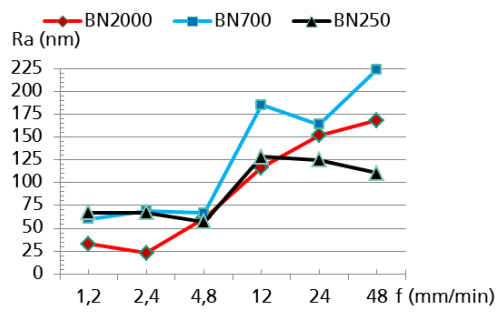
Legierung 1.2083

Schneidkante des BN250, a= 5 μm

### Abbildung 21: Einfluss der Schnitttiefe auf die Oberflächengüte und den Werkzeugverschleiß

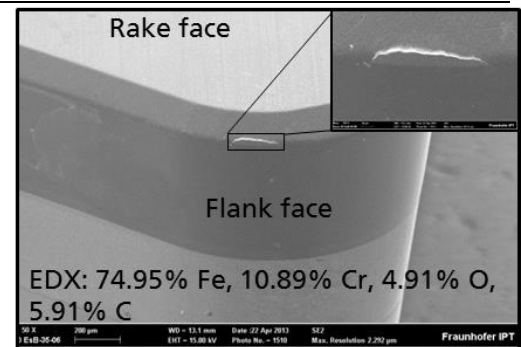
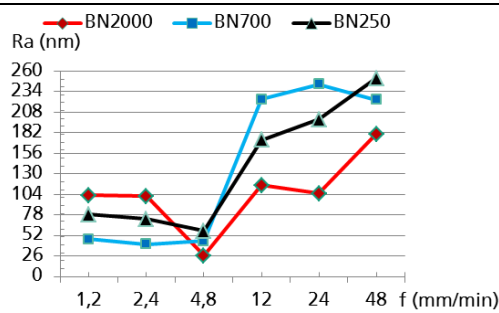
Es zeigt sich, dass die geringere Schneidkantenverrundung des BN700 sensibler auf große Eingriffstiefen reagiert und gegenüber BN250 und BN2000 stärker verschleißt - Abbildung 21. Eine EDX Untersuchung des BN2000 zeigte nach der Bearbeitung ebenso Ablagerungen des bearbeiteten Materials an der Schneidkante, wodurch die Schneidhaltigkeit des Werkzeuges weiter herabgesetzt wird. Generell zeigt sich nach dieser Versuchsreihe allerdings, dass

die höchsten Oberflächengüten von knapp 20 nm bei 20 µm Schnitttiefe erreicht werden.



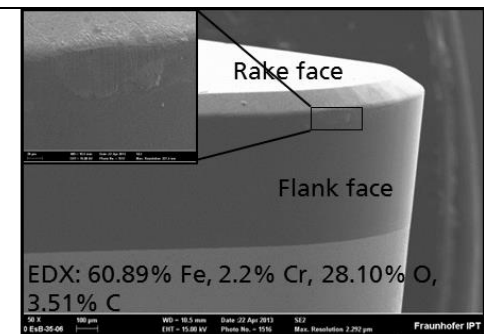
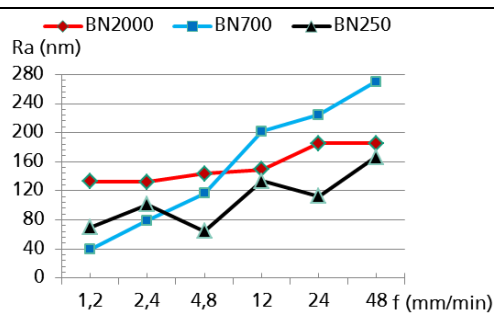
Legierung 1.7225

Schneidkante des BN2000,  $f=1,2$  mm/min



Legierung 1.2767

Schneidkante des BN250,  $f=48$  mm/min



Legierung 1.2083

Schneidkante des BN250,  $f=2,4$  mm/min

**Abbildung 22: Einfluss des Vorschubes auf die Oberflächengüte und den Werkzeugverschleiß**

In Kombination mit der optimierten Spindeldrehzahl von 1200 U/min und einer Schnitttiefe von 20 µm wurden Untersuchungen zum Einfluss des Vorschubes durchgeführt - Abbildung 22.

Die Prozessuntersuchungen zur Variation des Vorschubes haben gezeigt, dass die Oberflächengüte bei steigender Vorschubraterate wie zu erwarten abnimmt, besonders jedoch für das Werkzeug BN700. Die Abnahme ist auch hier wiederum mit verstärktem Verschleiß der feineren Schneidkante zu begründen. Die beste Oberflächengüte wurde mit Ra 23 nm mit dem Werkzeug BN2000 an 1.7225 für einen Vorschub von 2,4 mm/min erreicht. Ebenfalls mit dem Werkzeug BN2000 wurde an 1.2767 eine vergleichbare Oberflächengüte von Ra 26 nm bei einem Vorschub von 4,8 mm/min erreicht. Leicht höhere Oberflächenrauheit stellte sich bei der Legierung 1.2083 ein, bei der trotz verringertem Vorschub nur eine Rauheit Ra von 40 nm bei einem Vorschub von 1,2 mm/min erreicht werden konnte.

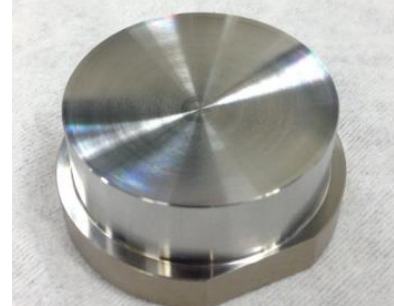
Grundsätzlich ist somit auch mit konventionellen CBN Werkzeugen eine annähernd optische Oberfläche erzielbar, die jedoch für eine den optischen Ansprüchen genügende Oberfläche einen nachgelagerten Prozessschritt gemäß Abbildung 19 erfordert. Durch die für das Erreichen der Oberflächenqualität nötigen Schnitttiefen und somit dem Auftreten hoher Prozesskräfte leidet allerdings die Formgenauigkeit verglichen mit der durch monokristalline Diamantwerkzeuge erzielbaren.

Die Kopplung der Drehbearbeitung mit einem nachgelagerten Polierschritt schließt an dieser Stelle zwar eine Einbringung von Mikrostrukturen aus, durch den Verschleiß der CBN Werkzeuge und den Verlust der Schneidhaltigkeit hätte eine Strukturierung den Ansprüchen der Ultrapräzisionsbearbeitung in erster Instanz nicht entsprochen und die nachgelagerte Politur hätte zu einer Formverfälschung geführt. Deshalb wurden an dieser Stelle vordergründig plane als auch konvex und konkav gekrümmte, rotationssymmetrische Probenkörper bearbeitet. Für diese Untersuchungen wurden die Werkzeuge des Herstellers aus Abbildung 15 herangezogen, die verglichen zu herkömmlichen Werkzeugen eine höhere Schneidkantenschärfe aufweisen.





Automatisierte Politur



Vorher



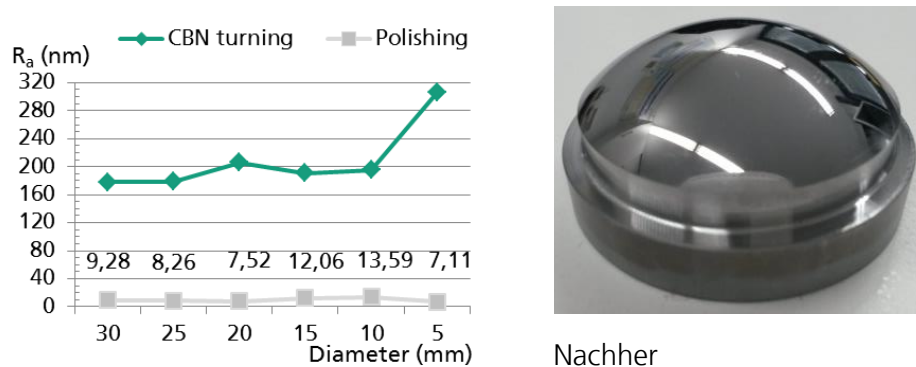
Nachher

**Abbildung 23: Kopplung einer Vorbearbeitung durch CBN Werkzeuge und der Nachbearbeitung durch automatisierte Politur**

Während durch die Vorbearbeitung der Oberfläche mit CBN Werkzeugen eine Oberflächenrauheit zwischen 100 nm und 220 nm Ra bei einer Formgenauigkeit von 1,7  $\mu\text{m}$  in einer Bearbeitungszeit von 4 Minuten erreicht werden konnte, wurde die optische Oberfläche durch den nachgelagerten Polierschritt erzeugt - Abbildung 23. Dazu wurden sukzessive Diamantschleifpasten mit Korngrößen zwischen 3  $\mu\text{m}$  bis 0,25  $\mu\text{m}$  eingesetzt. In einer Gesamtbearbeitungsdauer von 62 Minuten, konnte mit dem nachgelagerten Polierschritt eine konkave Sphäre mit einem Radius von 75 mm erfolgreich mit optischer Oberflächengüte gefertigt werden. Die durch das Polieren erreichte Oberflächenrauheit liegt zwischen 8 nm und 10 nm, wobei die Formgenauigkeit bei 2  $\mu\text{m}$  liegt.

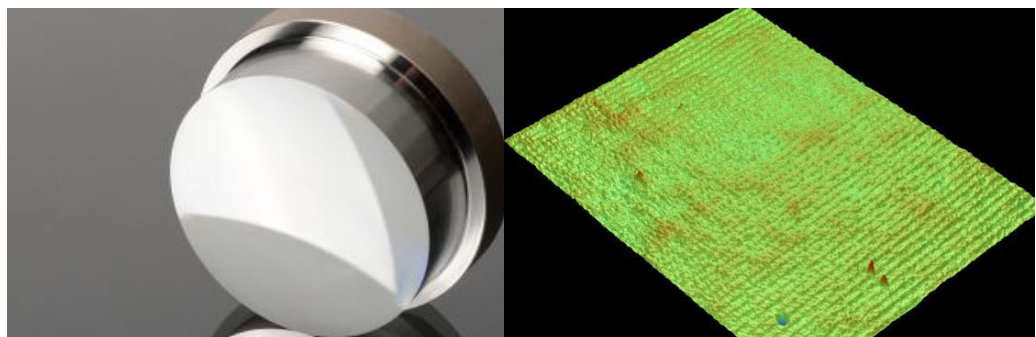
Ein weitere Bearbeitung erfolgte auch an einer konvex gekrümmten Oberfläche mit Radius 25 mm. Durch die Vorbearbeitung wurde hier eine durchschnittliche Oberflächenrauheit von 260 nm in einer Bearbeitungsdauer von 2 Minuten erzielt. Der rapide Anstieg der Rauheit bei den letzten 10 mm der Bearbeitung

ist mit einer Werkzeugbeschädigung zu begründen. Durch eine vierstufige Nachbearbeitung mittels automatisierter Politur konnte innerhalb von 30 Minuten eine Oberflächenrauheit  $R_a$  zwischen 7 nm und 13 nm erhalten werden - Abbildung 24.



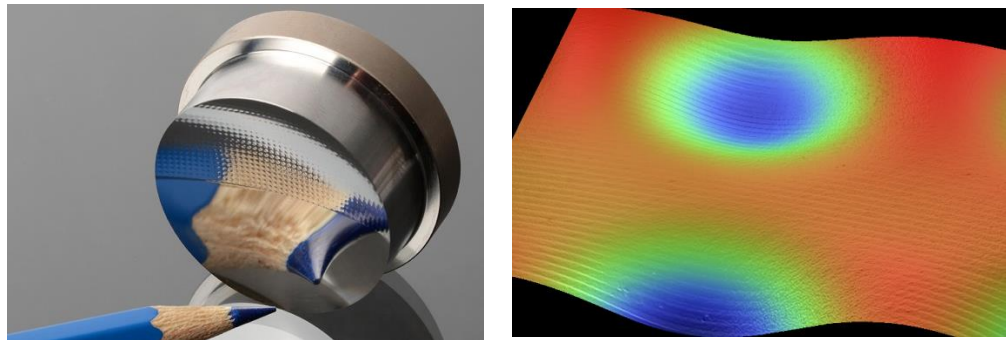
**Abbildung 24: Konvexe Stahlprobe mit Radius 25 mm durch CBN vorbearbeitet und automatisiert poliert**

Eine weitere Herangehensweise zur Erreichung optischer Oberflächen in Stahl bot die ultraschallunterstützte Bearbeitung mit monokristallinen Diamantwerkzeugen. Durch die Überlagerung des Werkzeuges mit einer hochfrequenten Ultraschallschwingung, können Verschleißvorgänge drastisch minimiert und die Bearbeitung von Stahl so ermöglicht werden. Da die Ultraschallbearbeitung durch die begrenzte Bearbeitungsgeschwindigkeit deutlich langsamer als eine konventionelle Drehbearbeitung ist, ist auch hier eine Vorbearbeitung mit CBN Werkzeugen zur Erreichung der Grundgeometrie unabdingbar – es erfolgte die Bearbeitung der gleichen konkaven Grundgeometrie aus Abbildung 23 mit Radius 75 mm.



**Abbildung 25: Kopplung einer Vorbearbeitung durch CBN Werkzeuge und der Nachbearbeitung durch ultraschallunterstütztes Drehen**

Wie in Abbildung 25 zu erkennen, konnte durch den Ansatz der ultraschallunterstützten Nachbearbeitung optische Oberflächenqualität erreicht werden. Der Oberflächenkennwert Ra lag zwischen 3,6 nm und 7 nm, wobei die Formgenauigkeit bei 1,5  $\mu\text{m}$  lag. Die Gesamtbearbeitungsdauer lag für diese Geometrie bei etwa 75 Minuten und ist somit konkurrenzfähig zur vorangehend beschriebenen automatisierten Politur.



**Abbildung 26: Ultraschallunterstützt-bearbeiteter Stahlformeinsatz mit Mikrostrukturen**

Durch stetige Weiterentwicklungen im Bereich der ultraschallunterstützten Drehbearbeitung können auch mikrostrukturierte Oberflächen (Abbildung 26) durch diesen Ansatz in optischer Oberflächengüte eingebracht werden. Obig abgebildeter Demonstrator wurde ebenso in 1.2083 (50 HRC) bearbeitet und weist eine Oberflächenrauheit von etwa 7 nm und eine Formgenauigkeit in der Sphäre von 1,3  $\mu\text{m}$  auf.

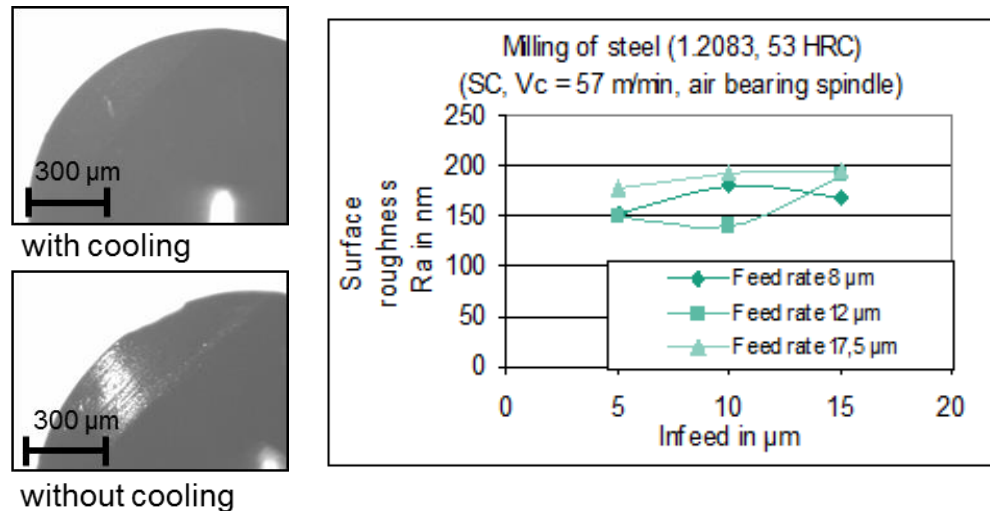
Als Vergleich zur Drehbearbeitung wurden Bearbeitungsversuche auf einer Fräsmaschine (Kern Pyramid Nano) an der Stahllegierung 1.2083 mit CBN Fräsern durchgeführt. Die Welligkeit die für Diamantwerkzeuge mit bis zu 50 nm an der Schneide erhältlich ist, ist jedoch bei den CBN Fräsworkzeugen deutlich größer – die mittlere Abweichung aller Hersteller liegt hier bei etwa 10  $\mu\text{m}$  Welligkeit. Vor allem im Bereich der Fräsworkzeuge sind Sonderanfertigungen eine Ausnahme und so musste auf konventionell erhältliche Werkzeuge zurückgegriffen werden.



**Abbildung 27: Vergleichsversuche mit CBN Fräs Werkzeugen an einer Kern Pyramid Nano**

Um auch hier eine Vergleichbarkeit zwischen den Bearbeitungsergebnissen von Diamantwerkzeugen und CBN Werkzeugen zu besitzen, wurden Bearbeitungsversuche an Messing und Nickel-Phosphorschichten mit monokristallinen Diamantfräsern durchgeführt. Bei Variation der Schnittgeschwindigkeit zwischen 57, 94 und 188 m/min, respektive 24.000 bis 80.000 U/min konnten an Messing lediglich Oberflächenwerte Ra von 85 nm bis 120 nm erreicht werden – der Vorschub wurde zwischen 5,5  $\mu\text{m}$  und 8  $\mu\text{m}$  geändert. Die Vergleichsversuche an Nickel-Phosphor führten zu konstanten Oberflächenkennwerten von etwa 100 nm Ra. Bei allen Versuchen zeigten sich jedoch Vibrationen des Maschinensystems und der Fräser, wodurch hier die Oberflächenqualität herabgesetzt wurde.

Nachfolgend wurde zu Bearbeitungsversuchen an gehärtetem Stahl (1.2083, 53 HRC) unter der Nutzung von Silicium-Carbid Fräs Werkzeugen eines ersten Herstellers übergegangen.



**Abbildung 28: Oberflächenkennwerte bei Bearbeitung an gehärtetem Stahl 1.2083 mit SiC Fräswerkzeugen**

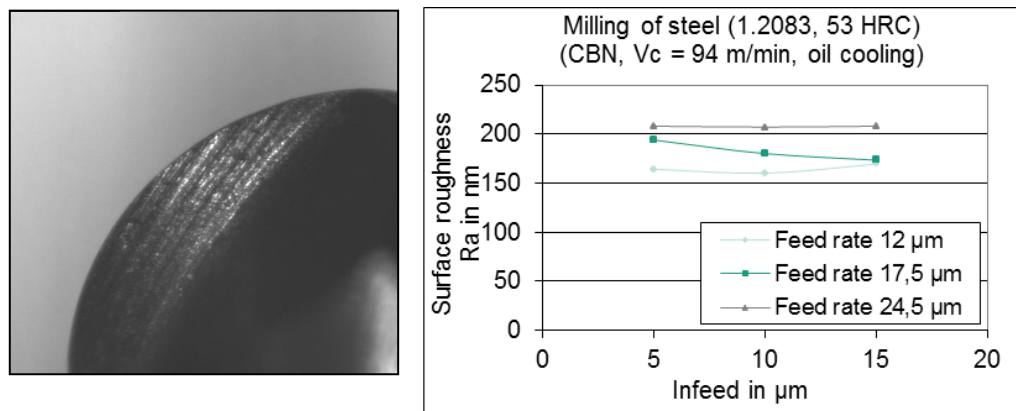
Bei Variation des Vorschubs zwischen 8 µm und 17,5 µm konnten bei diesen Bearbeitungsversuchen mit einer Schnittgeschwindigkeit von 57 m/min lediglich Oberflächenkennwerte von 200 nm bis 150 nm erreicht werden, welches nicht der gewünschten optischen Oberfläche entspricht. Es ist zu erkennen, dass verminderte Vorschubwerte konstantere Oberflächenwerte bedingen. Auch tragen verminderte Zerspankräfte durch geringere Eingriffstiefen dazu bei, dass leicht bessere Oberflächen erreicht werden können.

Drastisch zeigt sich auch der Einfluss der Werkzeugkühlung auf dessen Standzeit - Abbildung 28 links. Während die Verschleißerscheinungen im Eingriff bei Luft- und Minimalmengenschmierung kaum erkennbar sind, ist bei Bearbeitung ohne Kühlung ein drastischer Verschleiß eingetreten, der eine weitere Benutzung des Werkzeugs für eine Präzisionsbearbeitung ausschließt.

Neben der Bearbeitung mit Silizium-Carbid (SiC) Werkzeugen wurden ebenso Fräsversuche mit CBN Werkzeugen eines zweiten Herstellers durchgeführt. Wie bereits für die Vergleichsversuche mit SiC-Werkzeugen wurde auch hier die Kern Pyramid Nano mit einer luftgelagerten Westwind D1722-Spindel eingesetzt.

Auch bei diesen Versuchen zeigen sich aus dem Maschinensystem induzierte Schwingungen, die das Bearbeitungsergebnis verschlechtern und auch die hohe Abweichung zwischen theoretischer und gemessener Oberflächenrauheit bedingen. Es zeigt sich jedoch auch, dass durch die Nutzung von

Minimalmengenschmierung und Druckluft der Werkzeugverschleiß verringert werden kann und eine geringe Streuung der Oberflächenwerte bei der Bearbeitung vorliegt. Die hier erreichten Werte zwischen 200 nm und 160 nm Ra entsprechen jedoch ebenso wenig einer optischen Oberflächengüte - Abbildung 29. Jedoch führt gegenüber der Bearbeitung mit SiC-Werkzeugen eine höhere Schnittgeschwindigkeit zu ähnlichen Oberflächenkennwerten, wodurch eine Beschleunigung des Prozesses erreicht werden kann.



**Abbildung 29: Oberflächenkennwerte bei Bearbeitung an gehärtetem Stahl 1.2083 mit CBN Fräswerkzeugen**

Zusammenfassend haben die Vergleichsversuche auf einer Fräsmaschine gezeigt, dass in allen Fällen eine hohe Abweichung zwischen theoretischer und realer Rauheit vorliegen, die jedoch durch vom Maschinensystem induzierte Schwingungen erklärt werden können – hier vor allem durch die aerostatisch gelagerte Bearbeitungsspindel. Es zeigt sich auch, dass die genutzten Werkzeuge eine hohe Standzeit haben, zur Erreichung dergleichen jedoch eine ausreichende Kühlung erfolgen muss.

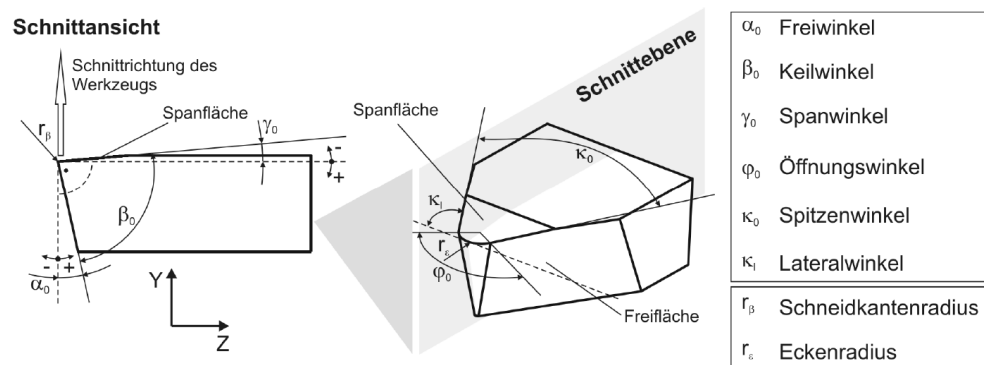
Verglichen mit den Oberflächenrauheiten der Drehversuche zeigt sich, dass durch die Drehbearbeitung niedrigere Oberflächenkennwerte Ra vor allem an Messing oder Nickel-Phosphor erreicht werden können – die Fräsbearbeitung der gehärteten Stahlbauteile resultiert verglichen mit der Drehbearbeitung in höheren Oberflächenwerten, die ebenso wenig den Anforderungen an optische Oberflächen entspricht.

Für eine Erreichung optischer Oberflächen in Stahl sind hier besonders die vorgelagerte Drehbearbeitung mit anschließender Politur und das ultraschallunterstützte Drehen von Stahl mit Diamantwerkzeugen von Interesse,

Abbildung 19 – der konventionelle Weg der Beschichtung von Stahlkernen mit Nickel-Phosphor sollte an dieser Stelle bewusst umgangen werden.

#### 4.2 Prozessentwicklung zum Schleifen von Werkzeugen

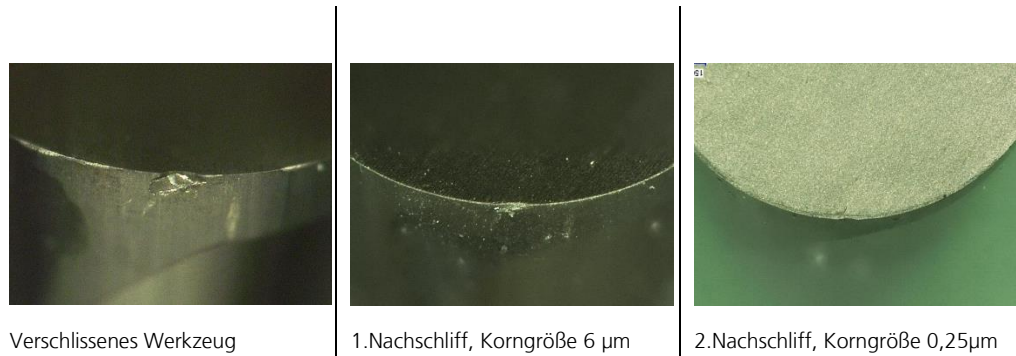
Abbildung 30 zeigt die geometrischen Merkmale eines Bearbeitungswerkzeugs auf – besonders von Interesse sind der eingestellte Radius des Werkzeugs als auch der Spanwinkel und der Freiwinkel. Der Spanwinkel ist für die konventionelle Bearbeitung meist auf  $0^\circ$  eingestellt, während der Freiwinkel zwischen  $5^\circ$  und etwa  $20^\circ$  der Bearbeitungsaufgabe angepasst werden kann.



**Abbildung 30: Geometrische Konturen an einem Bearbeitungswerkzeug**

Das Schleifen von Werkzeugen sollte in diesem Projekt auf der in Abbildung 7 gezeigten Schleifmaschine erfolgen. Diese verfügt über alle nötigen Achsen um die Geometrien am Werkzeug einzustellen und die Schneidfläche zu schärfen. Da die genutzten binderlosen und feinstkörnigen CBN Werkzeuge unter massivem und unvorhersehbarem Verschleiß litten, wurde eine Grundkonturierung dergleichen auf Grund der kurzen Standzeit ausgeschlossen. Vielmehr sollte der Fokus auf die Bearbeitung von monokristallinen Diamantwerkzeugen gerichtet werden, um diese etwa für die ultraschallunterstützte Bearbeitung einzusetzen.

Das Schleifen der CBN-Werkzeuge konnte dabei erfolgreich durchgeführt werden. Die Schneidkantenverrundung lag bei den Werkzeugen des Herstellers 2 (Abbildung 15) bei Auslieferung im Bereich von etwa  $7 \mu\text{m}$  und konnte im Nachschliff sogar auf  $4 \mu\text{m}$  bis  $5 \mu\text{m}$  verbessert werden, allerdings erleidet die nachgeschliffene Schneidkante im Eingriff sehr starken Verschleiß, der die Nutzung für die Ultrapräzisionsanwendung ausschließt.

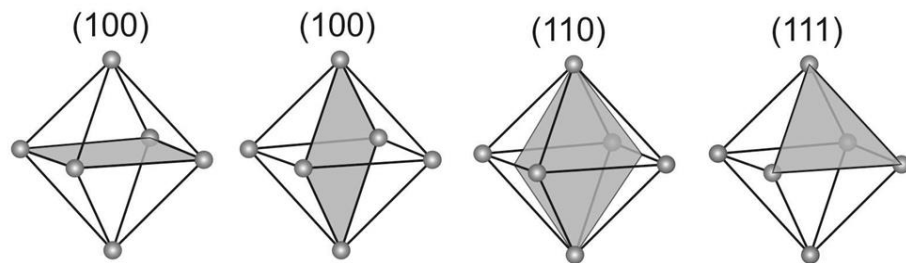


**Abbildung 31: Nachschliff von CBN Werkzeugen zur Erreichung hoher Schneidkantenschärfe**

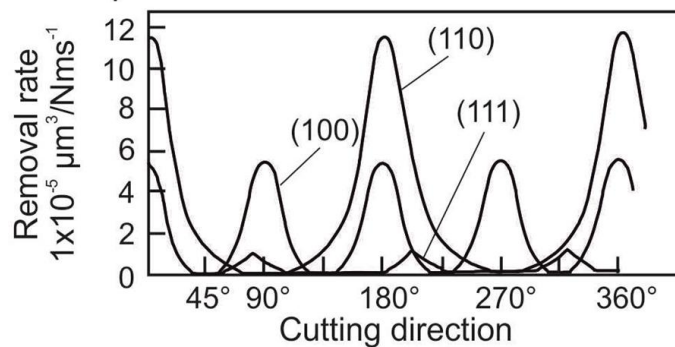
Auch die für die Prozessoptimierungen eingesetzten Werkzeuge des Typs BN700 konnten auf eine Schneidkantenverrundung zwischen 4 µm bis 5 µm geschliffen werden, leiden allerdings ebenso unter massiven Verschleißerscheinungen.

Das Schleifen von Diamantwerkzeugen ist von besonderem Interesse. Da Diamant das härteste existente Material ist, erfordert es eine besondere Herangehensweise. Die Bearbeitung erfolgt hierbei ebenso mit Diamantschleifscheiben – um einen Abtrag am monokristallinen Diamantwerkzeug zu erzeugen wird die Abhängigkeit des Abtrags von der Schleifrichtung genutzt. Die Ebenen im Oktaeder des Diamanten werden dabei als (100), (110) und (111) Ebenen angegeben.





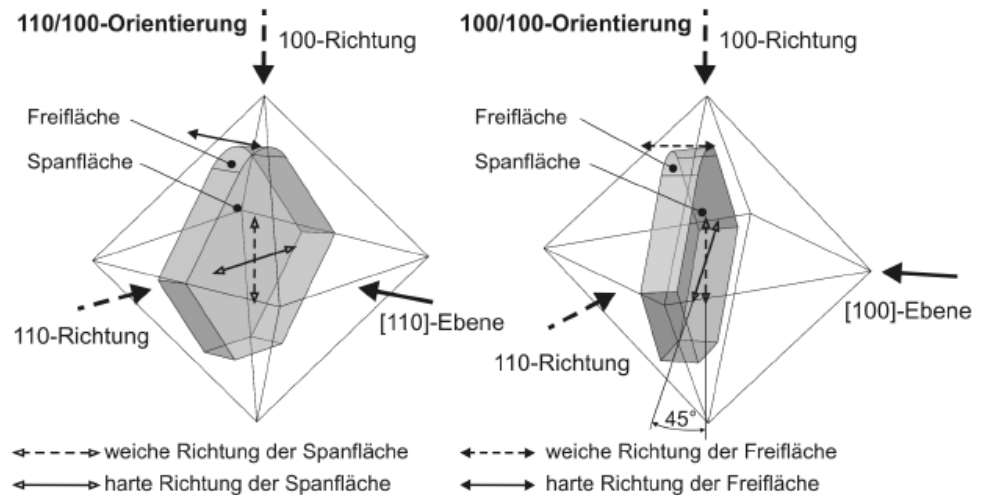
Dependency of removal rate due to plane and direction



**Abbildung 32: Ebenen und richtungsabhängige Abtragsraten im Diamanten**

Obenstehende Abbildung 32 zeigt deutlich, dass die Abtragsraten im Schleifprozess an Diamant von der Richtung der Schleifbearbeitung abhängen. Für die (111) Ebene sind die geringsten Abtragsraten erzielbar, während die Abtragsrate in der (100) Ebene etwa verdreifacht werden kann und in der (110) Ebene verglichen mit der (111) Ebene sogar eine sechsfach höhere Abtragsrate möglich ist. Während der Abtrag im Schleifprozess von Vorteil ist, bedingt eine höhere Abtragsrate jedoch auch eine verringerte Standzeit im Bearbeitungsprozess.

Die Ebenen am Bearbeitungswerkzeug müssen demnach so gewählt werden, dass eine hohe Standzeit der Werkzeuge mit einer effizienten Abtragscharakteristik kombiniert wird.



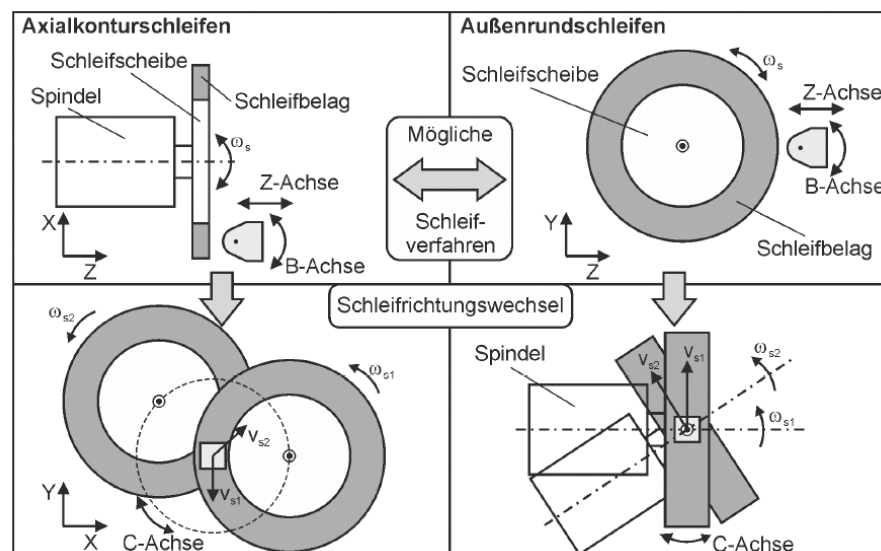
**Abbildung 33: Orientierungen am Diamantoktaeder und Gestaltung der Werkzeuggeometrie**

Wie in Abbildung 33 ersichtlich, werden die Ebenen am Diamantoktaeder gemäß der späteren Funktion (Spanfläche, Freifläche) auf der Werkzeughalterung ausgerichtet und anschließend zur Schleifbearbeitung herangezogen. Die richtungsabhängige Abtragscharakteristik bedingt ebenso eine variable Schnittrichtung, um während der Bearbeitung einen gleichmäßigen Abtrag zu gewährleisten.

Ein wichtiges Element bei der Konturierung des Diamantwerkzeugs ist die Schleifscheibe. Die richtige Wahl der Schleifscheibe ist daher entscheidend für das Prozessergebnis der Schleifbearbeitung. An erster Stelle muss ein geeigneter Schleifbelag für die Schleifscheibe gewählt werden. Diamant als der härteste bekannte Werkstoff lässt sich folglich nur mit Diamant bearbeiten, was jedoch nur auf Grund seiner anisotropen Kristalleigenschaften gelingt. Um eine hochgenaue Bearbeitung der Diamantwerkzeuge durchführen zu können, wurden Schleifscheiben mit Korngrößen D20 (20 – 30  $\mu\text{m}$ ) und D9 (6 – 12  $\mu\text{m}$ ) in einer Stahlbindung gewählt. Da die Körner in der metallischen Bindung fest sind, kann davon ausgegangen werden, dass 67% der Korngröße in der Bindung gebunden sind, so dass sich ein effektiver Überstand der Körner von maximal 9,9  $\mu\text{m}$  bei einer D20-Scheibe und 3,96  $\mu\text{m}$  bei einer D9-Scheibe ergibt. Für die ersten Prozessuntersuchungen kann dies als ausreichend fein angesehen werden, da zunächst ein relevanter Abtrag erzeugt werden soll. Die Form der Schleifscheibe ist auf Grund des Axialkonturschleifens nach VDI3394 eine Topfschleifscheibe der Grundform 6A2, deren Geometrie jedoch wie im

Folgenden beschrieben an die Bedingungen in der Diamantschleifmaschine individuell angepasst wurde.

Neben diesen technologischen Kenngrößen der Schleifscheibe mussten die geometrischen Abmessungen der Schleifscheibe dem Maschinensystem entsprechend ausgelegt werden. Um die richtungsabhängige Härteanisotropie des zu bearbeitenden Diamanten mit dem Ziel eines hohen Abtrags zu nutzen, wurde die Diamantschleifmaschine mit einer Exzenter spindle ausgestattet (Abbildung 34). Die Exzenter spindle, welche auch als C-Achse verwendet werden kann, wurde durch einen luftgelagerten Rundtisch gebildet, auf dessen Planscheibe die Schleifspindel mit der Schleifscheibe exzentrisch montiert wurde.



**Abbildung 34: Achskinematik zum Schleifen von Bearbeitungswerkzeugen**

Für die Umsetzung eines hochgenauen Schleifprozesses ist die Erzielung eines gleichmäßigen Verschleißes der Schleifscheibe über die gesamte Breite ein weiterer wichtiger Faktor. Dies konnte durch eine relative Oszillationsbewegung zwischen dem Diamantwerkzeug und der Schleifscheibe in X-Richtung erreicht werden. Bei der genutzten Diamantschleifmaschine kann dies zum einen über die X-Achse erfolgen, auf welcher die Exzenter spindle mit der Schleifspindel montiert ist. Zum anderen kann diese Funktion ebenfalls mit der C-Achse umgesetzt werden. Unter der Voraussetzung, dass der äußere Radius der Schleifscheibe größer ist als der Exzenteradius, ergibt sich eine Überlappfläche bei der Rotation um die C-Achse. Befindet sich das Diamantwerkzeug in einem

Abstand  $\Delta x$ , welcher durch die X-Achse direkt eingestellt werden kann, vom Drehmittelpunkt der C-Achse entfernt, so bewegt sich das Diamantwerkzeug von der Schleifscheibe aus betrachtet auf einer virtuellen Kreisbahn um den Drehmittelpunkt der C-Achse. Ziel der Auslegung der Schleifscheibe war es, die Überlappfläche so zu gestalten, dass sich das Diamantwerkzeug auf seiner virtuellen Kreisbahn immer innerhalb der Überlappfläche befindet.

Der Fokus der Prozessuntersuchungen liegt dabei im Wesentlichen auf der Korrelation zwischen den Prozesskennwerten und der kristallinen Orientierung des Diamanten. Im Anschluss wurden mit Hilfe der ermittelten Kenngrößen unter Berücksichtigung der Maschinenkinematik Prozessstrategien abgeleitet, um die Herstellung monokristalliner Diamantwerkzeuge zu ermöglichen.

Die schleifende Bearbeitung von monokristallinen Diamanten ist insbesondere in Bezug auf die Herstellung von hochpräzisen Diamantwerkzeugen bisher nur in geringem Maße untersucht. Vielfach handelt es sich um empirische Untersuchungen der Werkzeughersteller, die kaum dokumentiert sind und zum Firmenwissen der jeweiligen Hersteller gehören. Mit dem hier vorliegenden neuen Maschinensystem steht eine Plattform zur Verfügung, um Prozessuntersuchungen zum Schleifen von monokristallinen Diamantwerkzeugen auf wissenschaftlicher Basis durchführen zu können.

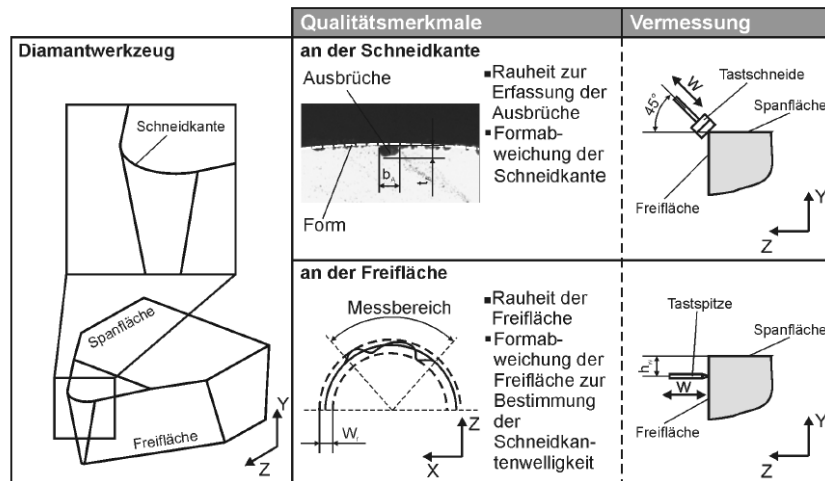
Da zum einen der Prozess als relativ unbekannt angesehen werden konnte, als auch das Verhalten und die Eigenschaften des Maschinensystems eine Unbekannte darstellten, mussten zunächst die wesentlichen Einflussgrößen bei der schleifenden Bearbeitung von monokristallinen Diamanten auf diesem neuen Maschinensystem ermittelt werden. Für diesen Fall war die statistische Versuchsmethodik ein geeignetes Hilfsmittel. Die statistische Versuchsmethodik ist eine systematische Vorgehensweise, welche statistisch abgesicherte Ergebnisse hervorbringt. Zusammenhänge können transparent dargestellt und der Versuchsaufwand kann abgeschätzt und reduziert werden. Mit einer geeigneten Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) können die Effekte mehrerer Eingangsgrößen auf mehrere Ausgangsgrößen simultan untersucht werden. Bei der Durchführung der Versuche wurden systematisch gezielte Änderungen an den Eingangsgrößen vorgenommen. Die Reihenfolge der Änderungen sowie die Reihenfolge der Versuche wurden bei der Versuchsplanung festgelegt. Somit war es möglich, die Parameter zu isolieren, welche die Ausgangsgrößen in dem gewünschten Maße beeinflussten. Wird ein neues oder unbekanntes System betrachtet, so sollten am Anfang

sogenannte Screening-Experimente durchgeführt werden [PETE91]. Solche Experimente ermöglichen es, viele Eingangsgrößen bei vertretbarem Versuchsaufwand mit dem Ziel gegenüberzustellen, signifikante Eingangsgrößen zu identifizieren. Im Folgenden können dann die weniger wichtigen Eingangsgrößen vernachlässigt werden.

Bei der Werkzeugkonturierung wird über das Schleifen der Freifläche die Geometrie des Werkzeugs und der Schneidkante hergestellt. Die Güte eines Diamantwerkzeugs definiert sich hauptsächlich über die Schneidkante. Auf der einen Seite sollte die Schneidkante eine möglichst gute Formgenauigkeit, meist Schneidkantenwelligkeit genannt, aufweisen, da sich die Formabweichung je nach Zerspanprozess direkt im Werkstück abbildet. Zusätzlich sollte die Schneidkante keine Ausbrüche aufweisen, was sich in diesem Genauigkeitsbereich über die Rauheit definieren lässt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Diamantwerkzeuge über ein zweistufiges Verfahren hergestellt werden. Zunächst wird die Kontur des Werkzeugs über Schleifen hergestellt, dann wird die Spanfläche geläpft, um eine scharfe und ausbruchsfreie Schneidkante zu erhalten.

Da beim Läppen der Spanfläche Material entlang der Freifläche abgetragen wird, entsteht die Schneidkante aus der Freifläche heraus. Aus diesem Grund muss auch die Form und Rauheit der Freifläche genauso gut sein, wie die der Schneidkante. Fehler in der Freifläche setzen sich in die Schneidkante fort. Daher ist es sinnvoll, die Rauheit und Form der Schneidkante und der Freifläche als Qualitätsmerkmale heranzuziehen - Abbildung 35.

Die Formabweichungen und die Rauheiten konnten mit einem taktilen Verfahren bestimmt werden. Für die Vermessung der Schneidkante wurde eine Tastschneide unter  $45^\circ$  an der Schneidkante entlang geführt. Mit diesem Verfahren konnten die Ausbrüche, welche beim Schleifen entstanden, in der Größe und der Anzahl quantitativ erfasst werden. Je geringer die Größe und Anzahl der Ausbrüche, desto weniger Material muss beim anschließenden Läppen der Spanfläche abgetragen werden, um die Ausbrüche zu entfernen.



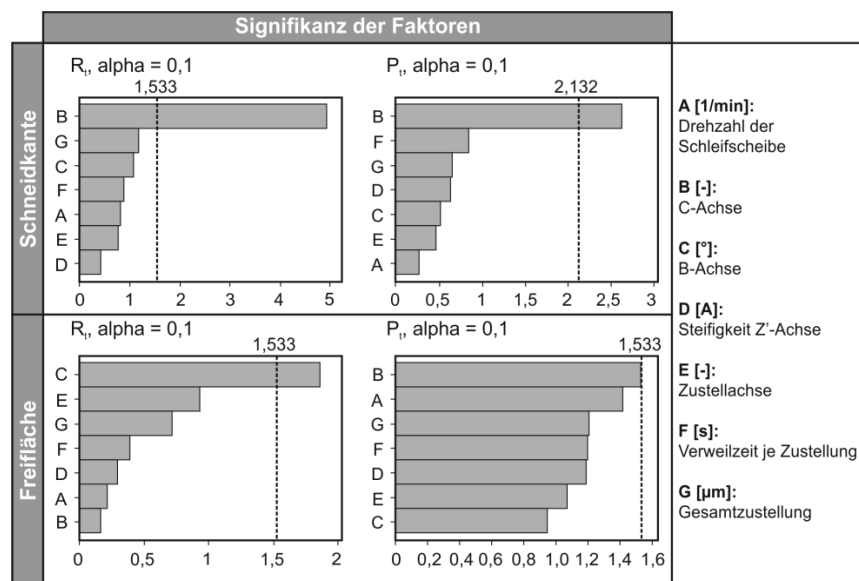
**Abbildung 35: Qualitätsmerkmale eines Bearbeitungswerkzeuges**

Dieses taktile Messverfahren für die Schneidkante kann bei Diamantwerkzeugen, welche nach der Fertigung für die UP-Zerspanung verwendet werden, nicht durchgeführt werden, da die taktile Vermessung die Schneidkante beschädigen kann. Aus diesem Grund wurde die Vermessung der Freifläche mit einer Tastspitze unterhalb der Schneidkante zur Qualifizierung und Prüfung der Werkzeuge herangezogen. Da Diamantwerkzeuge je nach Bedarf nach dem Gebrauch nachgeläppt werden und dabei ein unter der ursprünglichen Schneidkante liegender Bereich der Freifläche zur neuen Schneidkante wird, musste die Freifläche die gleiche Qualität wie die Schneidkante in Bezug auf Formgenauigkeit und Rauheit aufweisen. Folglich war die Vermessung der Freifläche eine wichtige Methode, um Diamantwerkzeuge zu charakterisieren. Auf diese Weise werden beispielsweise Diamantwerkzeuge mit kontrollierter Welligkeit, welche eine maximale Formabweichung von unter 50 nm auf einem Öffnungswinkel von 90° aufweisen können, beim Hersteller geprüft.

Mit dem beschriebenen taktilen Verfahren wurden die maximale Rautiefe  $R_t$  und die maximale Formabweichung  $P_t$  ermittelt und zur Bewertung des Schleifprozesses herangezogen. Im Gegensatz zu Mittenrauwerten  $R_a$  wurde bei diesen Werten keine Mittelung durchgeführt, so dass die Werte  $R_t$  und  $P_t$  die Fehler real abbilden. Durch die Ermittlung der Formabweichung an der Schneidkante konnte der maximal auftretende Ausbruch am besten erfasst werden. Da nur der größte Ausbruch die Qualität der Schneidkante bestimmt,

ist dieser von zentralem Interesse. Schließlich kann über die Formabweichung der langwellige Fehler über den betrachteten Messbereich ermittelt werden und über die Rauheit der kurzwellige Fehler. Damit konnte das entsprechende Geometrieelement vollständig charakterisiert werden.

Aus der Versuchsreihe wurde zunächst der Einfluss der C-Achse auf die Ausbrüche an der Schneidkante abgeleitet. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 37 in chronologischer Reihenfolge der Versuchsdurchführung dargestellt. Zudem sind zur besseren Darstellung nur die Versuche abgebildet, bei denen die B-Achse auf eine Position von 0° eingestellt wurde und die vordere Fläche des Werkzeugs bearbeitet wird. Die Faktorstufen der C-Achse waren bei dieser Versuchsreihe zum einen eine feste Winkelposition von 0°, was einer konstanten Schnittrichtung an der Bearbeitungsstelle entlang der Y-Richtung entspricht. Zum anderen wurde eine konstante Rotation der C-Achse mit einer Drehzahl von 1 1/min eingestellt. Basierend auf den Versuchsergebnissen konnte festgestellt werden, dass eine feste Position der C-Achse zu geringeren Ausbrüchen an der Schneidkante führt.



**Abbildung 36: Signifikanz der Faktoren der ersten Versuchsreihe**

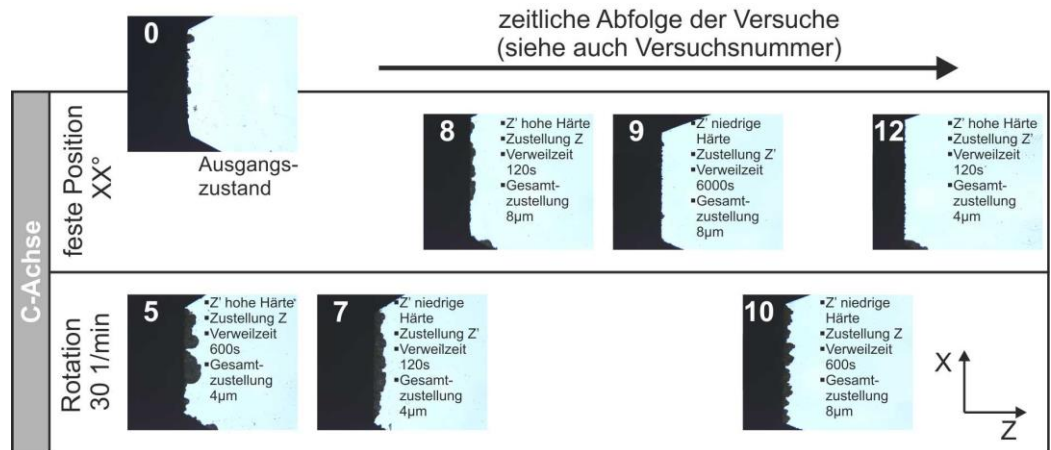
Für diesen Effekt können zwei Gründe angeführt werden. Auf der einen Seite führten Planlauffehler der Schleifspindel, der Schleifscheibe und der C-Achse dazu, dass eine kontinuierliche Veränderung des Kontaktpunktes zwischen Scheibe und Werkzeug in Z-Richtung infolge der Rotation der jeweiligen Achse auftrat. Daraus resultierte eine stoßartige Belastung des Diamantwerkzeugs,

was bei sprödhartem Material zu Ausbrüchen führt. Die Fehler wirkten sich in einer Veränderung des Kontaktpunktes in Z-Richtung aus. Da bei der festen Position der C-Achse die gesamte Schleifscheibenbreite durch eine Oszillation der X-Achse abgedeckt wurde, ist der Fehler in Z-Richtung geringer als bei einer Rotation der C-Achse wie bereits bei der Vermessung der C- und X-Achse. Auf der anderen Seite entsprach die bei dieser Versuchsreihe eingestellte Schnittrichtung bei einer festen Position der C-Achse der (100)-Kristallrichtung auf der hier geschliffenen (100)-Kristallebene des Diamanten.

Da dies die ideale Schnittrichtung auf dieser Kristallebene ist, lässt sich infolge des guten Abtragverhaltens auch die geringere Neigung zu Ausbrüchen erklären. Im Gegensatz dazu findet die Bearbeitung bei einer kontinuierlichen Rotation der C-Achse auch in ungünstigen Schnittrichtungen statt. Diese führt stellenweise zu schlechten Prozessbedingungen, welche in Ausbrüchen an der Schneidkante resultierten.

Alle Untersuchungen der ersten Versuchsreihe wurden am gleichen Diamantwerkzeug durchgeführt, um konstante Materialbedingungen zu gewährleisten. Anhand der Nummerierung in Abbildung 37 wurde die zeitliche Abfolge der Versuche dokumentiert. Zwischen den in diesem Bild dargestellten Versuchen wurden lediglich Versuche an den anderen Flächen des Werkzeugs durchgeführt, sodass die gezeigten Versuche eine direkte Abfolge an der vorderen Fläche darstellen. Da bei den einzelnen Versuchen verschiedene Gesamtzustellungen realisiert wurden, kann der Abtrag von einem Versuch zum anderen Versuch nachvollzogen werden. Beispielsweise kann zwischen Versuchsnummer 5 und 7 sowie zwischen der Versuchsnummer 7 und 8 anhand einer qualitativen Begutachtung der Form der Ausbrüche gezeigt werden, dass ein Abtrag stattgefunden hat, dieser jedoch nicht zur vollständigen Beseitigung der Ausbrüche vom vorhergehenden Versuch ausgereicht hat. Deutlich wird der Effekt der Gesamtzustellung und der C-Achse an den Versuchen 9, 10 und 12. Durch die Rotation der C-Achse bei Versuch 10 entstehen relativ große Ausbrüche an der Schneidkante. Die darauffolgende Bearbeitung an der vorderen Fläche des Werkzeugs in Versuch 12 führte auf Grund der hier ausreichenden Gesamtzustellung und einer festen Position der C-Achse zu kleineren Ausbrüchen und damit zu einer besseren Qualität der Schneidkante.





**Abbildung 37: Einfluss der Schnittrichtung auf die sich ausbildende Schneidkante**

Im betrachteten System für das Schleifen von Diamantwerkzeugen gibt es weitere Faktoren, deren Einfluss auf die Qualitätsparameter von Interesse war. Deshalb wurde zur Untersuchung dieser Parameter eine zweite Versuchsreihe aufgesetzt. Innerhalb dieser zweiten Versuchsreihe wurden die Parameter, welche sich auf Basis der ersten Versuchsreihe als zielführend für eine gute Qualität der Schneidkante und der Freifläche herausgestellt hatten, mit der jeweiligen Faktorstufe als feste Parameter gewählt. Zudem wurde bei der zweiten Versuchsreihe der Fokus auf die Untersuchung der Faktoren gelegt, welche im Zusammenhang mit der kristallinen Orientierung des Diamantwerkzeugs lagen.

Bei einer zerspanenden Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen ist es notwendig, dass die Diamantwerkzeuge auf den Anwendungsfall angepasste Freiwinkel aufweisen. Der Freiwinkel wird beim System zum Diamantschleifen über die A-Achse eingestellt. Weiterhin bedingt eine veränderte Position der A-Achse analog zur B-Achse eine Änderung der in Eingriff mit der Schleifscheibe befindlichen Kristallebene des Diamanten. Aus diesen beiden Gründen war eine Betrachtung der A-Achse in der Versuchsreihe unabdingbar. Für die Faktorstufen der A-Achse wurden 0° und -10° gewählt. Obwohl die A-Achse bis zu einem maximalen Winkel von -20° verfahren werden konnte, wurde als Faktorstufe lediglich -10° gewählt, da die meisten Diamantwerkzeuge einen Freiwinkel in diesem Bereich aufweisen, um eine bessere Stabilität des Werkzeugs sicherzustellen. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe haben gezeigt, dass eine feste Position der C-Achse einen positiven Einfluss auf die

Güte der Schneidkante und der Freifläche hat. Um diesen Faktor C genauer zu untersuchen, wurde er in die zweite Versuchsreihe übernommen. Die Faktorstufen dieser festen Position waren zum einen eine 0°-Position, bei der die Schnittrichtung entlang der Y-Richtung erfolgte und eine 90°-Position, bei der die Schnittrichtung entlang der X-Richtung verlief. Bei einem Werkzeug, welches an der vorderen Freifläche wie bei der ersten Versuchsreihe eine (100)-Ebene aufweist, entspricht die 0°-Position einer Schnittrichtung in [100]-Richtung und die 90°-Position einer Schnittrichtung in [110]-Richtung. Analog zu Faktor C wurde auch der Faktor B, welcher die Position der B-Achse beinhaltet, in die zweite Versuchsreihe mit aufgenommen. Es wurden die Faktorstufen 0° und -45° gewählt, da bei dem verwendeten Diamantwerkzeug in der 0°-Stellung der B-Achse die (100)-Ebene bearbeitet wird und in der 45°-Stellung eine (110)-Ebene. Somit wurden wie beim Faktor C über diese Positionen der B-Achse zwei Extremfälle abgedeckt. Um einen möglichst gleichmäßigen Verschleiß an der Schleifscheibe über die gesamte Belagbreite zu erzielen, ist bei einer festen Position der C-Achse eine Oszillation der X-Achse erforderlich, wie sie auch schon in diesem Fall bei der ersten Versuchsreihe verwendet wurde. Jedoch wurde bei der ersten Versuchsreihe nur eine feste Oszillationsgeschwindigkeit der X-Achse eingestellt. Über den Faktor D werden in der zweiten Versuchsreihe mit den Faktorstufen 20 mm/min und 60 mm/min die Einflüsse verschiedener Oszillationsgeschwindigkeiten untersucht. Aufbauend auf den Ergebnissen der 1. Versuchsreihe und als Ergänzung dieser, sind die Zielsetzungen der 2. Versuchsreihe wie folgt definiert:

- Untersuchung der Korrelation zwischen Kristallebenen und Schnittrichtungen auf dem prototypischen Maschinensystem durch Verwendung aller Achsen, die diese beiden Parameter variieren.
- Ermittlung einer geeigneten Oszillationsgeschwindigkeit für die X-Achse.

Im Vergleich zur ersten Versuchsreihe war ein starker Unterschied bezüglich des Qualitätsparameters Rauheit an der Freifläche festzustellen. Basierend auf den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe hatte die Position der B-Achse, welche über den Faktor B repräsentiert wird, einen signifikanten Einfluss auf die Rauheit der Freifläche. Weiterhin lag der Effekt der C-Achse, welcher über den Faktor C repräsentiert wird, weit unterhalb des MIN-Werts. Auf Grund der kristallinen Orientierung konnte die bessere Oberflächengüte an der Freifläche

bei einem größeren Winkel der B-Achse beschrieben werden. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zeigten bezüglich der Rauheit der Freifläche ein gegenteiliges Verhalten. Zum einen musste beachtet werden, dass die Effekte aller Faktoren in Bezug auf die Rauheit der Freifläche unterhalb des MIN-Wertes liegen, und damit ein statistisch schlecht abgesichertes Ergebnis darstellen. Dies gilt insbesondere für den Faktor B. Zum anderen musste bei der Auswertung berücksichtigt werden, dass der Faktor C bei der zweiten Versuchsreihe nicht exakt den gleichen Parameter wie bei der ersten Versuchsreihe darstellte. In der ersten Versuchsreihe wurde der Faktor C mit den Faktorstufen feste Position bei 0° und kontinuierlicher Rotation eingestellt, wohingegen dieser Faktor bei der zweiten Versuchsreihe mit den Faktorstufen feste Position 0° und feste Position 90° untersucht wurde. Die getesteten Faktorstufen für die C-Achse in der ersten Versuchsreihe bedingen, dass bei beiden ein Abtrag am Diamant erzeugt werden konnte. Im Gegensatz dazu trat bei der Faktorstufe feste Position 90° für die C-Achse und 45° der B-Achse der Fall auf, dass kein Abtrag erzeugt wurde. Dadurch war in diesem Fall der Effekt der C-Achse auf die Rauheit der Freifläche deutlich höher und überlagert den Effekt der B-Achse bei den Ergebnissen der zweiten Versuchsreihe, wodurch sich der Unterschied zur ersten Versuchsreihe erklären ließ - Abbildung 38.

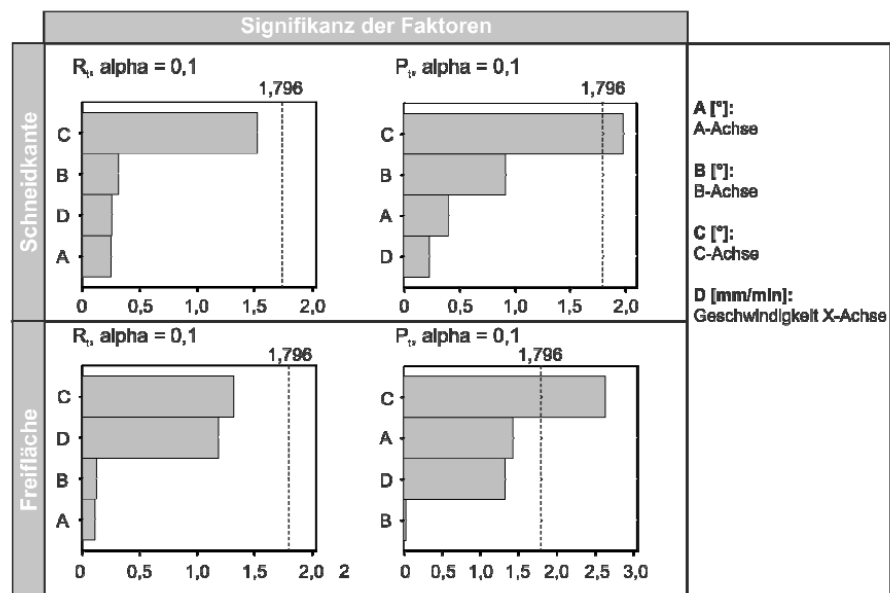


Abbildung 38: Signifikanz der Faktoren der zweiten Versuchsreihe

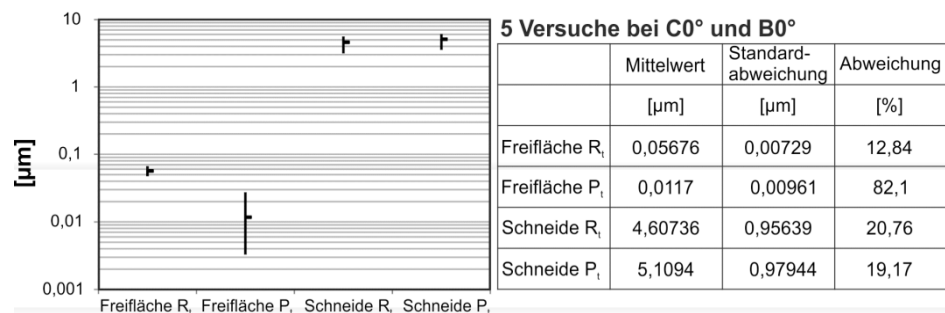
Analog zu den Haupteffekten der ersten Versuchsreihe hatte lediglich der erste aufgeführte Faktor einen signifikanten Einfluss auf den jeweiligen Qualitätsparameter, was durch den MIN-Wert dargestellt wird. Sowohl in Bezug auf die Schneidkante als auch in Bezug auf die Freifläche führte die 0°-Position der C-Achse zu einer geringeren Formabweichung. Da bei der 0°-Position die Schnittrichtung der [100]-Kristallrichtung entsprach, welche die weiche Richtung auf einer Diamantebene darstellt, konnte das Material hierbei besser abgetragen werden. Die günstigeren Abtragbedingungen resultierten in einer besseren Formgenauigkeit.

Die Effekte der anderen drei Faktoren konnten auf Grund ihrer geringen Signifikanz, welche geringer ist als der MIN-Wert, nicht zur weiteren Prozessoptimierung herangezogen werden. Insbesondere war der Effekt der B-Achse konträr zur ersten Versuchsreihe. Der Grund hierfür lag jedoch darin, dass der starke Effekt der C-Achse die Effekte aller anderen Faktoren überlagerte. Insbesondere in Bezug auf die B-Achse trat dies überproportional stark auf. Da bei einer Faktorkombination der C-Achse an der 90°-Position und der B-Achse an der 45°-Position die nicht schleifbare Richtung bearbeitet wird, führte die obige Auswertung dazu, dass die 45°-Position der B-Achse immer mit den schlechtesten Ergebnissen für die Qualitätsparameter zusammenhing.

Zusammenfassend ließ sich aus den durchgeführten Versuchen ableiten, dass als signifikante Faktoren für das Konturschleifen monokristalliner Diamantwerkzeuge die Schnittrichtung, welche über die Position der C-Achse eingestellt werden kann, und die Kristallebene die über die B-Achse verändert wird, identifiziert werden konnten. Obwohl die Versuche mit Unsicherheiten behaftet waren, konnten die abgeleiteten günstigen Einstellungen und Prozessparameter für die Fertigung monokristalliner Diamantwerkzeuge verwendet werden, da sich die Versuchsergebnisse in guter Übereinstimmung mit den kristallographischen Eigenschaften von Diamant befanden.

Zur Abschätzung der Unsicherheiten wurden beim Prozesspunkt C-Achse 0° und B-Achse 0° fünf identische Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 39 dargestellt. Da die Werte an der Freifläche im Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich lagen und die Werte an der Schneide im einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich, ist die Skalierung logarithmisch, um beides in einem Diagramm wiedergeben zu können. Im Diagramm wurden die Versuchsstreuungen für jeden Parameter durch den höchsten und niedrigsten Wert sowie der jeweilige Mittelwert der fünf Versuche dargestellt. Mit Ausnahme der Formgenauigkeit Pt an der

Freifläche wiesen alle Parameter eine ausreichend geringe Abweichung auf. Durch die geringen Abmessungen des Diamanten ist auch eine geringe Messlänge zur Ermittlung der vier Parameter bedingt. Dies wirkt sich in der hohen Abweichung bei der Bestimmung der Formgenauigkeit an der Freifläche aus.



**Abbildung 39: Test zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse**

Im Gegensatz dazu bewertet der Parameter Pt an der Schneide die Größe der Ausbrüche und weist demnach trotz geringer Messlänge eine bessere Varianz auf. Die Ergebnisse dieses Tests zur Reproduzierbarkeit decken sich mit denen aus den durchgeführten Versuchsreihen. In Bezug auf die Signifikanz weisen die Rauheit Rt der Freifläche und die Form Pt der Schneide die höchsten Werte auf.

Wie bereits dargelegt, ist das Abtragverhalten sowohl von der Schnittrichtung als auch von der zu bearbeitenden Kristallebene abhängig. Bisher wurde dieses Verhalten lediglich beim Läppen von monokristallinem Diamant untersucht. Da jedoch beim Schleifen die Diamantkörner zur Bearbeitung im Gegensatz zum Läppen in der metallischen Bindung der Schleifscheibe fest gebunden sind, konnte eine davon abweichende Charakteristik der Prozessgrößen auftreten. Zudem könnten auch die Eigenschaften des Maschinensystems einen Einfluss auf die Prozessgrößen haben. Bei der Konturierung eines Diamantwerkzeugs in der geläufigen 100/100-Orientierung werden nur die (100)- und die (110)-Ebene bearbeitet. Aus den Abtragfunktionen dieser Kristallebenen war zu entnehmen, dass die weiche Richtung jeweils die [100]-Richtung ist. Der Abtrag ist jedoch in dieser Richtung auf der (110)-Ebene deutlich höher. Daher konnte zusammengefasst werden, dass die günstigste Bearbeitung auf der (110)-Ebene in [100]-Richtung erzielt werden kann. In dem Maschinensystem tritt dieser Bearbeitungsfall bei einer B-Achsposition von 45° und einer C-Achsposition von

0° auf. Im Gegensatz dazu wird die (100)-Ebene bei einer Position der B-Achse von 0° bearbeitet.

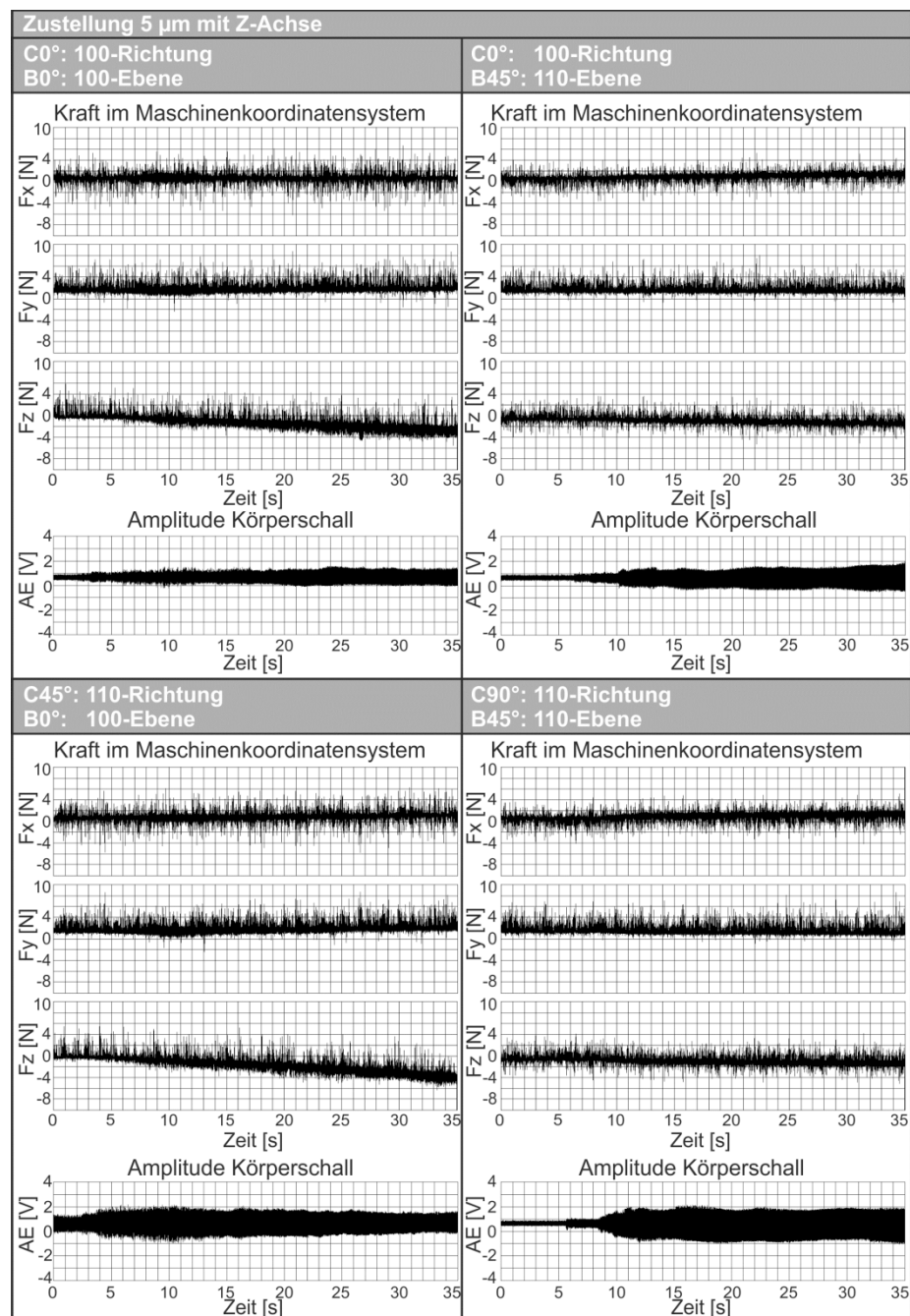


Abbildung 40: Kraft und Körperschall in Abhängigkeit der Kristallorientierung

Die [110]-Richtung, in welcher kein Abtrag generiert wird, wurde bei der (100)-Ebene erreicht, wenn die C-Achse eine Position von  $45^\circ$  hatte. Auf der (110)-Ebene wurde die [110]-Richtung erreicht, wenn die C-Achse dort eine Position von  $90^\circ$  einnahm. Aus diesen Gründen wurden die beschriebenen vier Extremfälle der Bearbeitung zur Untersuchung der auftretenden Prozesskräfte und des Körperschalls herangezogen.

Die Messschriebe für eine Zustellung von  $5\ \mu\text{m}$  sind in Abbildung 40 aufgeführt. Die im relativen Koordinatensystem der Z'-Achse gemessenen Prozesskräfte wurden in das Maschinenkoordinatensystem überführt, um eine einheitliche Darstellung und bessere Vergleichbarkeit zu erzielen. Zudem wurde eine Zustellung über die Z-Achse realisiert, um immer eine Zustellung von  $5\ \mu\text{m}$  in Richtung der absoluten Maschinenrichtung z zu erhalten. Anhand des Körperschallsignals ließ sich der Abtrag gut erfassen. Die Amplitude des Körperschallsignals war bei einer Bearbeitung entlang der harten [110]-Richtung bei Betrachtung der gesamten Prozesszeit höher als entlang der weichen [100]-Richtung. Damit kann anhand der Amplitude des Körperschallsignals festgestellt werden, ob ein Abtrag erzeugt wird. Weiterhin lässt sich mit dem Körperschallsignal der erste Kontakt des Werkzeugs mit der Schleifscheibe anhand des abrupten Signalanstiegs zu Beginn der Bearbeitung gut detektieren.

Die Prozesskräfte, welche in Abbildung 40 im absoluten Maschinenkoordinatensystem dargestellt sind, stellten im Unterschied zum Körperschallsignal einen weniger klaren Zusammenhang zur Kristallographie des Diamanten dar. Insgesamt lagen die Prozesskräfte im unteren einstelligen Newtonbereich. In den zur Bearbeitung tangentialen Richtungen x und y liegen die durchschnittlichen Kräfte bei maximal 2 N. Bei einer C-Achsposition von  $0^\circ$  entspricht die Bearbeitungsrichtung [100] der y-Richtung im Maschinenkoordinatensystem. Hier war geringfügig zu erkennen, dass die Prozesskraft in y-Richtung bei Kontakt im Gegensatz zur Prozesskraft in x-Richtung leicht anstieg. Analog dazu konnte dies bei  $F_x$  beobachtet werden, wenn die Schnittrichtung entlang der [110]-Richtung erfolgte, welche bei einer C-Achsposition von  $90^\circ$  der x-Richtung im Maschinenkoordinatensystem entsprach.

Bezüglich der Prozessnormalkräfte in Z-Richtung war ein anderes Verhalten zu beobachten. Sie wiesen für die (110)-Ebene einen Wert zwischen 0,5 N und 1 N auf. Bei der (100)-Ebene konnte festgestellt werden, dass die

Prozessnormalkraft kontinuierlich in Bezug auf den durchschnittlichen Wert anstieg. Da dies entlang der harten Richtung [110] als auch der weichen Richtung [100] auftrat, konnte dies darauf zurückgeführt werden, dass bei der Bearbeitung der (100)-Ebene die Tauchspule direkt in Richtung der Kraft  $F_z$  im absoluten Maschinenkoordinatensystem ausgerichtet war.

Die Wegregelung der Tauchspule verstärkte kontinuierlich die Kraft der Tauchspule, um die eingestellte Position zu erreichen. Innerhalb der betrachteten Prozesszeit reichte der Abtrag nicht aus, um die Position zu erreichen, so dass die Prozesskraft in z-Richtung kontinuierlich anstieg. Dieser Effekt trat durch die Anstellung der Z'-Achse zur Schleifscheibe unter  $45^\circ$  bei Bearbeitung der (110)-Ebene nicht auf, da die Zustellung über die Z-Achse erfolgte, und die Nachgiebigkeit des gesamten Systems Schlitten der Z'-Achse mit Werkzeughalter, Lagerung und Werkzeug eine Verkippung um die y-Achse bewirkte. Hierdurch wurde eine Verlagerung am TCP in z-Richtung bedingt, so dass die Prozesskraft in z-Richtung vermindert wurde. Zudem wurde die Verkippung nicht durch das Wegmesssystem der Z'-Achse erfasst und führte demzufolge nicht zu einer Erhöhung der Kraft durch die Tauchspule.

Zusätzlich wurde der Effekt verschiedener Zustellungen auf das Körperschallsignal und die Prozesskräfte bei einer Bearbeitung der (100)-Ebene entlang der [100]-Richtung untersucht. Die zugehörigen Messschriebe sind in Abbildung 41 aufgetragen. Bezüglich des Körperschallsignals war zu erkennen, dass die Amplitude mit zunehmender Zustellung ebenfalls anstieg. Jedoch war der Anstieg zwischen einer Zustellung von  $1\ \mu\text{m}$  und  $5\ \mu\text{m}$  deutlich stärker als zwischen einer Zustellung von  $5\ \mu\text{m}$  und  $10\ \mu\text{m}$ . Bei allen drei Zustellungen war der erste Kontakt mit der Schleifscheibe detektierbar.

Das Verhalten der Prozesskräfte unterstrich die Beobachtungen, welche in Abbildung 40 dargestellt wurden. Die Prozesskraft  $F_x$  war nahezu null, wohingegen die Prozesskraft  $F_y$ , welche in Schnittrichtung liegt, mit steigender Zustellung zunahm. Für die Prozesskraft  $F_z$  gilt dies ebenfalls. Durch den minimalen Kontakt bei einer Zustellung von  $1\ \mu\text{m}$  steigt  $F_z$  hier nicht an, da die Wegregelung auf kleinste Schritte von  $1\ \mu\text{m}$  eingestellt wurde.

Zusammenfassend konnte festgehalten werden, dass das Körperschallsignal eine bessere Aussagekraft über den Schleifprozess von monokristallinen Diamanten aufweist, da der Abtrag hiermit besser überwacht werden kann. Zusätzlich ließ sich mit dem Körperschallsignal eine gute Anschnitterkennung, auch mit geringen Zustellungen, umsetzen. Das System zur Messung der



Prozesskraft eignete sich jedoch dazu, eine Bewertung des Schleifprozesses durchzuführen und die Eigenschaften des Maschinensystems zu analysieren. So konnte in erster Linie festgestellt werden, dass die Kräfte auch beim Schleifen bei geringen Zustellungen auf dem verwendeten Maschinensystem im unteren einstelligen Newtonbereich liegen. Dies validiert das Maschinensystem für die Bearbeitung von monokristallinen Diamantwerkzeugen.

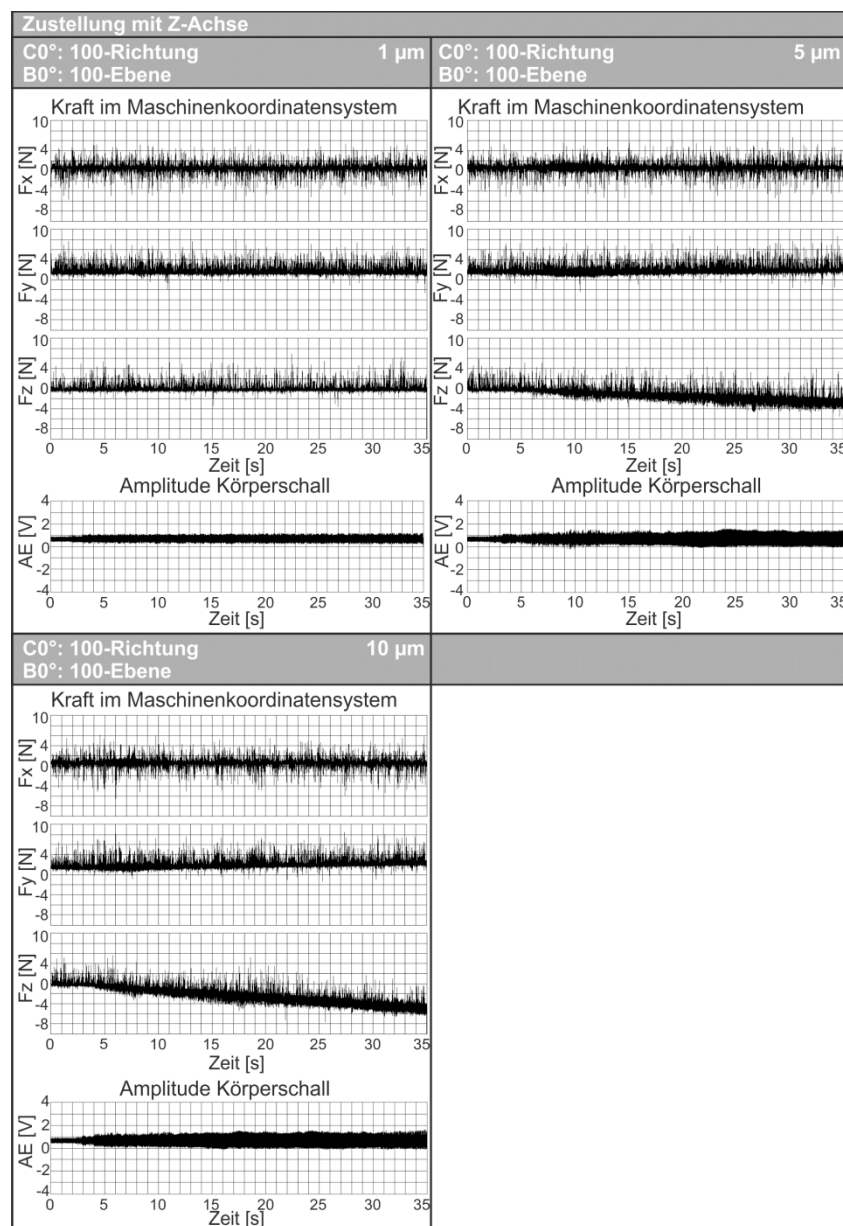
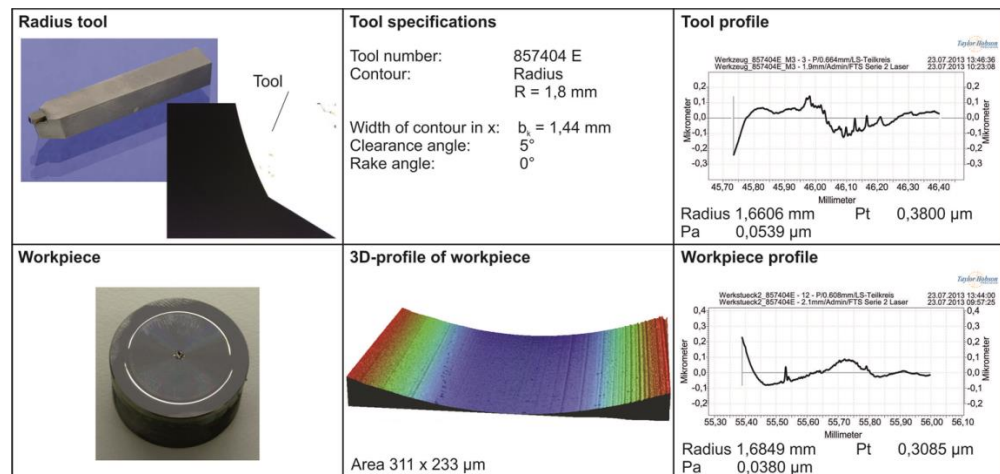


Abbildung 41: Kraft und Körperschall bei verschiedenen Zustellungen

Die Prozessstrategie zur Herstellung monokristalliner Diamantwerkzeuge beinhaltet im Wesentlichen die Ableitung der Verfahrensbewegungen der Achsen auf Basis der Maschinenkinematik, um die gewünschte Kontur des Werkzeugs herzustellen. Da die Zielkontur die Schneidkante des Werkzeugs darstellt, ist der Schleifprozess eine zweidimensionale Kinematik in der Ebene. Bei der Konzeption der Maschine wurde dies berücksichtigt mit dem Ziel, möglichst wenige Achsen während der Bearbeitung zu gebrauchen, um damit die Genauigkeit der Bearbeitung zu erhöhen. Zur Erzeugung der Werkzeugkontur werden bei dem aufgebauten Maschinensystem nur die B-, Z- und Z'-Achse benötigt. Die A-Achse hat keinen direkten Einfluss auf die Kontur der Schneidkante, weswegen sie an dieser Stelle zunächst nicht betrachtet wird.



**Abbildung 42: Geschliffenes Radiuswerkzeug und geschnittenes Probewerkstück**

Das erste Demonstratorwerkzeug hatte eine Radiuskontur mit einem konstanten Radius von 1,8 mm und einem Freiwinkel von  $5^\circ$ . Die Eigenschaften des Werkzeugs und das mit dem Werkzeug gefertigte Probewerkstück sind in Abbildung 42 dargestellt. Das Probewerkstück bestand aus einem Stahlgrundkörper mit einem Durchmesser von 15 mm, welcher mit einer 500  $\mu$ m dicken Nickelphosphorschicht (NiP) beschichtet wurde. Durch die NiP-Schicht konnte das Probewerkstück mit einem monokristallinen Diamantwerkzeug bearbeitet werden. Zudem lassen sich in NiP auf Grund seiner amorphen Struktur die höchsten Oberflächengüten erzielen, und es können Mikrostrukturen am besten abgebildet werden. Daher wurde mit dem Demonstratorwerkzeug über ein Einstechdrehverfahren eine Nut in das Probewerkstück eingebracht, um die Werkzeugkontur direkt im Werkstück

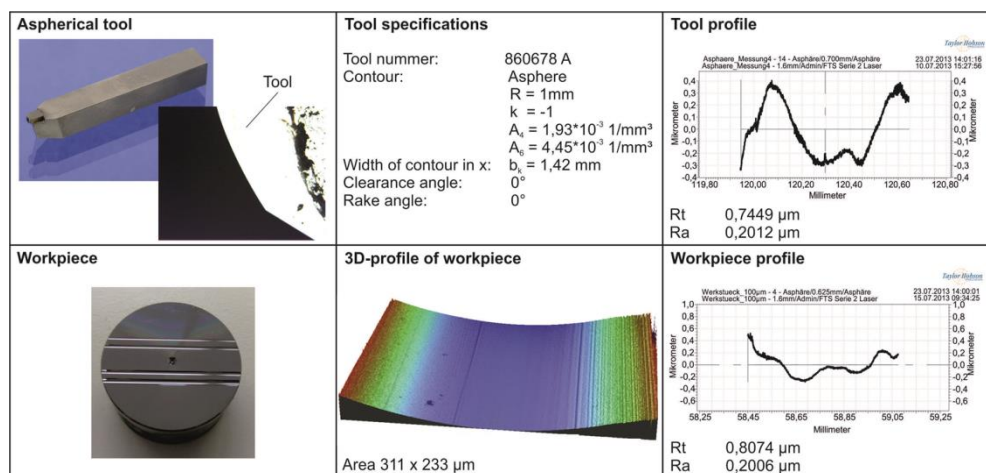
abzubilden. Dies ermöglichte zum einen die indirekte Charakterisierung der Werkzeugkontur über eine taktile Vermessung der gefertigten Nut und zum anderen eine Charakterisierung der Schneidkante des Werkzeugs in Bezug auf Ausbrüche.

In Abbildung 42 sind die Messergebnisse der Werkzeugcharakterisierung dargestellt. Mit dem Messgerät Taylor Hobson Form Talysurf wurde sowohl die Kontur des Diamantwerkzeugs als auch die mit dem Werkzeug gefertigte Nut vermessen. Der Radius der Schneidkante bildet sich direkt im Werkstück ab. Zur Überprüfung des Fehlermodells aus Kapitel 7.4 wurde das Radiuswerkzeug mit einem Sollradius von 1,8 mm und einem Freiwinkel von  $5^\circ$ , welcher den notwendigen Schwenkwinkel der A-Achse vorgibt, ohne Kompensation des Radiusfehlers gefertigt. Nach der Bearbeitung konnte ein Istradius von 1,646 mm ermittelt werden. Über das Fehlermodell und die gemessenen Achsfehler errechnet sich ein Radiusfehler von -0,120 mm. Das gefertigte Werkzeug weist eine Abweichung von -0,154 mm auf. Damit besteht zwischen berechnetem Fehler und am gefertigten Werkzeug gemessenen Fehler eine geringe Abweichung von 34  $\mu\text{m}$ . Gründe für den Unterschied sind die Messfehler bei der Bestimmung des Werkzeugradius als auch bei der Bestimmung der Achsfehler. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Achsfehler abhängig vom Schwenkwinkel der A-Achse sind, was durch die Kreisinterpolation geglättet wurde. Insgesamt kann das Modell damit zur Berechnung der Radiuskorrektur herangezogen werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass der gemessene Radius am Werkzeug kleiner ist als am Werkstück, da die Kontur des Werkzeugs an dessen Freifläche unterhalb der Schneidkante vermessen wurde. Auf Grund der konischen Form der Freifläche ist der Radius an der gemessenen Stelle kleiner. Über den Wert  $P_t$  wird die Formabweichung des Werkzeugs beschrieben. Diese ist im Fall eines Radiuswerkzeugs die sogenannte Radiuswelligkeit und liegt mit einem Wert unterhalb von 0,4  $\mu\text{m}$  über einer Länge von 0,66 mm, welches einem Öffnungswinkel von  $22,7^\circ$  entspricht, in einem mittleren Qualitätsniveau für monokristalline Diamantwerkzeuge. Das 3D-Profil im Nutgrund zeigt, dass das Werkzeug eine gute Ausbildung der Schneidkante aufweist. Lediglich einige Ausbrüche, welche kleiner als 0,5  $\mu\text{m}$  sind, werden als Riefen im 3D-Profil wiedergegeben. Die Rauheit in der Nut beträgt 15,1 nm Ra und liegt damit in einem guten Qualitätsbereich. Anhand der Fotos in Abbildung 42 wird die Qualität des gefertigten Werkstücks deutlich. Der Bereich zwischen der Nut und

der Außenkontur des Werkstücks wurde zusätzlich mit dem Diamantwerkzeug plangedreht. An dieser Stelle ist eine Rauheit von 0,48 nm Ra messbar, was in NiP typischerweise erreichbar ist. Dies validiert die hohe Schärfe des gefertigten Radiuswerkzeugs.

Das zweite Demonstratorwerkzeug weist eine asphärische Kontur mit einem Grundradius von 1 mm, einer konischen Konstante von  $k = -1$  und den Asphärenkoeffizienten  $A_4 = 1,93 \cdot 10^{-3} \text{ 1/mm}^3$  und  $A_6 = 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ 1/mm}^3$  auf. Zur Charakterisierung wurden die gleichen Methoden wie für das Radiuswerkzeug angewandt und in Abbildung 43 dokumentiert. Für die Probebearbeitung des Testwerkstücks wurde jedoch ein Hobelprozess verwendet, da das Werkzeug mit  $0^\circ$  keinen Freiwinkel aufweist, welcher bei der Drehbearbeitung eine Kollision der Freifläche mit den Flanken der Nut ergeben würde. Die Formgenauigkeit der asphärischen Kontur kann mit dem Tastschnittgerät Taylor Hobson Form Talysurf analog zum Radiuswerkzeug bestimmt werden. An der Nut im Werkstück ergibt sich eine Formgenauigkeit von  $0,8 \text{ }\mu\text{m}$  über einer Länge von  $0,6 \text{ mm}$ . Analog zum Radiuswerkzeug werden im 3D-Profil einige Riefen wiedergegeben, die auf kleine Ausbrüche an der Schneidkante zurückzuführen sind. Insgesamt ergibt sich beim asphärischen Werkzeuge eine Rauheit in der Nut von  $52 \text{ nm Ra}$ , welche durch das Foto des Werkstücks unterstrichen wird. Die schlechtere Rauheit im Vergleich zum Radiuswerkzeug begründet sich dadurch, dass die Nuten im Probewerkstück beim asphärischen Werkzeug mittels Hobeln erzeugt wurden. Dadurch können die Werte auch nicht exakt miteinander verglichen werden.



**Abbildung 43: Geschliffenes asphärisches Radiuswerkzeug und geschnittenes Probewerkstück**

Es kann abschließend festgestellt werden, dass eine scharfe Schneide an CBN Werkzeugen durch Schleifen gemäß Abbildung 31 grundsätzlich erreichbar ist. Schneidkantenverrundungen im Bereich zwischen 4 µm bis 5 µm wurden in diesem Forschungsvorhaben erreicht – diese liegen jedoch weit über denen der an Diamantwerkzeugen erreichbaren von etwa 50 nm.

Es zeigte sich während der Prozessuntersuchungen ebenso, dass vor allem die CBN Werkzeuge mit scharf geschliffener Schneidkante unter massivem Verschleiß leiden und so eine Bearbeitung mit konstanter Oberflächengüte im optischen Bereich und hoher Formgenauigkeit nicht erreicht werden kann. Durch die gröbere Schneidkante und die Körnigkeit der CBN Werkzeuge liegt die mittlere erreichbare Oberflächenrauheit Ra deutlich über der mit monokristallinen Diamantwerkzeugen erreichbaren.

In den durch CBN Werkzeugen bearbeiteten Oberflächen konnte erst durch einen nachgelagerten Polierschritt optische Oberflächenqualität im einstelligen Nanometerbereich erhalten werden. Eine gute Alternative stellt hier auch die ultraschallunterstützte Bearbeitung mit monokristallinen Diamantwerkzeugen dar, die verglichen mit der konventionellen Drehbearbeitung lediglich eine begrenzte Prozessgeschwindigkeit erlaubt, jedoch in einem Arbeitsschritt optische Oberflächenqualität im niedrigen einstelligen Nanometerbereich in Stahl erzeugen kann. Durch stetige Weiterentwicklung der Ultraschallwerkzeuge (vgl. IGF 17112) können in der Zwischenzeit ebenso mikrostrukturierte Oberflächen in optischer Qualität gefertigt werden.

Im Verlauf des Projekts wurde für das automatisierte Schleifen von Diamantwerkzeugen als auch CBN Werkzeugen Prozesswissen aufgebaut und Demonstratorwerkzeuge (Abbildung 42, Abbildung 43) erfolgreich bearbeitet. Die Werkzeuge entsprechen der Qualität herkömmlicher Diamantwerkzeuge mit jedoch asphärischer bzw. freier Kontur durch Mehrachsbearbeitung in Bezug auf die Formgenauigkeit und Schärfe, was in Bearbeitungsversuchen validiert werden konnte.

## 5 Wirtschaftliche Bedeutung für kleine und mittlere Unternehmen

### 5.1 Nutzung der Forschungsergebnisse

Die Verwendung der in diesem Forschungsprojekt entwickelten Werkzeuge und Zerspanprozesse zur UP-Bearbeitung von Stahl durch kleine und mittlere Unternehmen führt zu einer signifikanten Reduktion der Kosten. Auf der einen Seite können Formenbauer ihre bestehenden Ultrapräzisionsmaschinen zur Bearbeitung von Stahl nutzen, so dass keine hohen Investitionskosten anfallen. Auf der anderen Seite wird durch den Einsatz von Stahlformen ein erhebliches Potential zur Kosteneinsparung erschlossen, da die Standzeit von Stahlformen wesentlich höher ist als bei den zur Zeit verwendeten Formen aus Nichteisenmetallen. Dies ist ein entscheidender Vorteil für Hersteller im Bereich von Kunststoffoptiken, welche als Massenprodukt hergestellt werden. Somit werden die Marktchancen und die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen über den vermehrten industriellen Einsatz von Stahlformen zur Massenfertigung deutlich erhöht.

### 5.2 Einsatzgebiete

Die durch die F&E-Ergebnisse erzielbaren Kosteneinsparungen in den Branchen, in denen die Ultrapräzisionsbearbeitung wesentlich genutzt werden kann (Automobilindustrie, Kunststofftechnik, Elektronik, Werkstoffbearbeitung, Medizintechnik etc.) ist als treibender Faktor für die industrielle Umsetzung der Projektergebnisse zu benennen. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden direkt zur Fertigung von Stahlformen für die Massenfertigung optischer Komponenten genutzt. Durch die Befähigung zur Ultrapräzisionsbearbeitung von Stahl wird der industrielle Einsatz von Stahl im optischen Werkzeug- und Formenbau begünstigt. Herstellern von Schneidplatten aus hochharten Materialien wurde die Möglichkeit gegeben neue Werkzeuge zu entwickeln

und zu vertreiben. Weiterhin führt der durch die Forschungsergebnisse mögliche Einsatz von kostengünstigen Stahlformen mit höheren Standzeiten dazu, dass Hersteller von Kunststoffoptiken für den Massenmarkt diese kostengünstiger anbieten können. Dies stellt einen Wettbewerbsvorteil dar. Eine Umsetzung der Projektergebnisse in der industriellen Praxis kann für etwa 1 bis 2 Jahre nach Projektabschluss erwartet werden. Damit kann ein entscheidender Beitrag geleistet werden, die ultrapräzise Stahlzerspanung markt- und serientauglich zu machen. Darüber hinaus fördern intensive Kontakte des Fraunhofer IPT zur Industrie und hier insbesondere zu Herstellern, Anbietern und Anwendern von Formen für den Kunststoffspritzguss und Zerspanwerkzeugen die Verwendung der Projektergebnisse.

### **5.3 Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der KMU**

Sowohl die Hersteller von Kunststoffoptiken, Spritzgussformen, Ultrapräzisionsmaschinen, Schneidplatten und hochpräzisen Werkzeugen sind in der Sparte kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) vertreten. Frühzeitige Erfahrung mit den Prozessen zur UP-Zerspanung von Stahl und den zugehörigen angepassten Werkzeugen können aufgrund genannter Vorteile zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit dieser kleinen und mittleren Unternehmen führen. Dadurch ist eine viel breitere Nutzung der ultrapräzisen Stahlzerspanung im Formenbau, der Optik und der Fertigungstechnik möglich, und die Wettbewerbsfähigkeit deutscher KMU (Werkzeughersteller und Anwender) auf dem internationalen Markt wird enorm gesteigert.

## 6 Literaturverzeichnis

- [BRE09] Brecher, C.; Wenzel, C.; Hannig, S.; Schug, R.; Weber, A.: *New Systematic and Time-Saving Procedure to Design Cup Grinding Wheels for the Application of Ultrasonics Assisted Grinding*. IJAMT, Springer-Verlag, 2009
- [DEB02] Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T.: *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, S. 182-197, 2002
- [FU06] Fu, B.; Hemsell, T.; Wallascheck, J.: *Piezoelectric Transducer Design via Multiobjective Optimization*. Ultrasonics, Vol. 44, S. 747-752, 2006
- [KÖN05] König, W.; Klocke, F.: *Fertigungsverfahren, Band 2: Schleifen, Honen, Läppen*. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [KON06] Konak, A.; Coit, D.; Smith, A.: *Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial*. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 91, S. 992-1007, 2006
- [KUT04] Kuttruff, H.: *Akustik*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 2004
- [KUT88] Kuttruff, H.: *Physik und Technik des Ultraschalls*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1988
- [MAR66] Markov, A. I.: *Ultrasonic Machining of Intractable Materials*. London Iliffe Books Ltd., 1967



## 7 Veröffentlichung der Ergebnisse

### 7.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Nach Projektabschluss erfolgte eine beschreibende Veröffentlichung auf der Internetpräsenz des Fraunhofer-Institutes für Produktionstechnologie IPT.

#### **Transfermaßnahmen**

##### Maßnahmen während der Projektlaufzeit

Ausstellung auf Messen:

- Precisiebeurs 2012 (Veldhoven, Niederlande)
- Optatec 2014 (Frankfurt, Deutschland)
- Euromold 2012 (Frankfurt, Deutschland)

Vorstellung auf Tagungen der  
Forschungsgemeinschaft Ultrapräzisionstechnik e.V.:

- Herbst 2011, Frankfurt
- Frühjahr und Herbst 2012, Aachen/Frankfurt
- Frühjahr und Herbst 2013, Aachen/Frankfurt
- Frühjahr 2014, Aachen

Veröffentlichungen

- „Investigation of ultra-precision turning using aerostatic and hydrostatic spindles“, American Society for Precision Engineering (ASPE), 2012
- Poster zu Projektergebnissen, Annual Meeting Paper zur 27th ASPE, 2012
- Präsentation und Veröffentlichung der Ergebnisse zum  
Werkzeugschleifen, Lamdamap-Konferenz, Buckinghamshire, 2013

### Maßnahmen nach Ende der Projektlaufzeit

Ausstellung auf Messen:

- Precisiebeurs 2014 (Veldhoven, Niederlande)
- Fakuma 2014 (Friedrichshafen, Deutschland)

Akquise von Industrieprojekten zur ultrapräzisen Zerspanung von Stahl,

Akquise von Industrieprojekten zur Herstellung von Stahlformeinsätzen

Durch die während der Projektlaufzeit durchgeführten Maßnahmen ist ein optimaler Transfer in die Wirtschaft gelungen.

## **7.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit und des eingesetzten Personals**

Die UP-Bearbeitung von Stahl war vor Beginn des Projekts auf aufwendige Verfahren wie die ultraschallunterstützte Diamantbearbeitung und die Diamantzerspannung nitrierter Stahloberflächen angewiesen.

Weiterentwicklungen hochharter Schneidstoffe wie CBN und PKD führten im Verlauf des Projekts zu Werkzeugen mit hohen Schneidkantenschärfen. Durch die im Projekt erarbeitete, angepasste Werkzeugtechnik wurden bei der Hartzerspannung von Stahl Oberflächengüten von bis zu 40 nm erreicht. Dies führt zu einer Reduktion der für das Nachpolieren benötigten Zeit und damit des Risikos der Beeinträchtigung der Formgenauigkeit. Formeinsätze aus Stahl können so einfacher und vor allem schneller und kostenreduziert hergestellt werden. Die angepasste Werkzeugtechnik bedurfte einer neuen Herangehensweise an die Zerspanung – besonders im Hinblick auf den Einsatz in der Ultrapräzisionstechnik mussten neue Prozessparameter ermittelt und validiert werden. Gemäß des beantragten Finanzierungsplans wurde ein Wissenschaftler für das Gebiet der angepassten Werkzeugtechnik und der Herstellung der neuartigen Werkzeuge und ein zweiter zur Validierung der optimierten Werkzeuge im Zerspanprozess eingesetzt. Während der Projektlaufzeit wurden keine Geräte mit einem Wert über 2.500€ beschafft.