

## Titel

# Entwicklung von neuartigen Algorithmen zur optoelektronischen Erfassung und Analyse der Verschleißmerkmale an CBN- und Diamant-Schleifwerkzeugen in Korrelation zum Standzeitverhalten

IGF-Nr.: 482 ZGB

---

## Forschungsstellen

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

Forschungsstelle 2: GFE – Gesellschaft für Fertigungstechnik Schmalkalden e.V.



Ansprechpartner beim IFW-Remscheid:

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

Ansprechpartner bei GFE-Schmalkalden:

Dipl.- Ing. (FH) Jan Klemm  
03683 / 690036  
j.klemm@gfe-net.de

---

## Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 482 ZGB der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



---

## Ausgangssituation

Die in Deutschland hergestellten Diamantwerkzeuge, wie z.B. Schleifscheiben, Schleifstifte und Schleifbänder, haben dank ihrer exzellenten Qualität sowohl national als auch international, einen sehr guten Ruf. Seit mehreren Jahren werden immer wieder von verschiedenen Schleifwerkzeugproduzenten und von den Anwendern dieser Werkzeuge die Forderungen gestellt, relevante Oberflächenmerkmale zur objektiven Charakterisierung des Verschleißzustandes, insbesondere von galvanisch gebundenen Schleifwerkzeugen zu erfassen und zu bewerten sowie darauf basierend Zusammenhänge zum Standzeitverhalten der Werkzeuge in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstoffes und der Bearbeitungsparameter zu untersuchen.

Aufgrund der großen Bedeutung des Schleifprozesses für fertigungstechnische Aufgaben in der metallverarbeitenden Industrie wie auch in weiteren Industriebranchen (z.B. in der Optikindustrie) bedarf es einer Steigerung der Leistungsfähigkeit dieser Werkzeuge, wobei eine hohe Prozesssicherheit und eine möglichst präzise Vorhersage des Schleifergebnisses und der Werkzeugstandzeit unter Berücksichtigung der konkreten Bearbeitungsparameter und Prozessbedingungen gewährleistet sein muss. Dazu ist es erforderlich zu klären, welche Oberflächenkenngrößen das Verschleißverhalten der Schleifwerkzeuge in Abhängigkeit der Einsatzbedingungen am besten beschreiben und wie die genauen Auswirkungen auf den Bearbeitungsprozess und das -ergebnis sowie die Leistungsfähigkeit der Schleifwerkzeuge sind. Die maximal erreichbare Standzeit der Werkzeuge bei Erzielung einer gleichbleibend hohen Bearbeitungsqualität soll möglichst optimal ausgenutzt werden.

Da die Oberflächentopographie des Schleifwerkzeuges die Werkstückoberfläche in entscheidendem Maße beeinflusst, ist die Kenntnis von den Verschleißerscheinungen, -ausprägungen und -verhalten der eingebundenen Schleifkörner und damit dem gesamten Verschleißverhalten des Werkzeuges von wesentlicher Bedeutung. Auch die Gewinnung von Erkenntnissen zum möglichen Einfluss der Oberflächentopographie auf die auftretenden Schleifkräfte während des Bearbeitungsprozesses und die Randzonenbeeinflussung waren Gründe für die Bearbeitung des durchgeführten Forschungsvorhabens.

---

## Forschungsziel

Die ganzheitliche Betrachtung des komplexen Schleifprozesses verlangt von den Schleifwerkzeugherstellern, detailliert auf Kundenwünsche bezogen auf den jeweiligen Einsatzfall eingehen zu können. Verstärkt wird diese Anforderung dadurch, dass neue Hochleistungswerkstoffe zu besonderen Herausforderungen beim Schleifen führen. Dieses kann der Werkzeughersteller nur gewährleisten, wenn der Fertigungsprozess genau beherrscht wird und mit Hilfe modernster Messtechnik auch der Nachweis über den erreichten Zustand und die erzielte Qualität der Werkzeuge geliefert werden kann. Von den genannten Forderungen ausgehend müssen Messverfahren und entsprechende technische Lösungen entwickelt und realisiert werden, die letztendlich auch dem Anspruch der zu erreichenden Qualitätsanforderungen im deutschen und europäischen Normenwerk Rechnung tragen.

Nach wie vor war kein berührungslos arbeitendes Verfahren bzw. Prüfsystem bekannt, welches unter vertretbaren technischen, zeitlichen und auch finanziellen Aufwand eine objektive Erfassung von Verschleißmerkmalen gestattet. Das Ziel des Vorhabens war es daher, auf Basis moderner optoelektronischer Verfahren zur Erfassung und Analyse die Verschleißmerkmale an CBN- und Diamant-Schleifwerkzeugen im industriellen Umfeld objektiv und schnell zu ermitteln und eine Lösung zur Definition objektiver Verschleißmerkmale zu erarbeiten. Um eine Vorhersagbarkeit der Standzeiten zu erreichen, wurden Korrelationsuntersuchungen zu den Bearbeitungsergebnissen der galvanisch gebundenen Schleifscheiben mit CBN – und Diamantkörnung in Abhängigkeit vom Werkzeugtyp, der zu bearbeitenden Werkstücke und den Bearbeitungsparametern durchgeführt und in Bezug zum erzielten Ergebnis gesetzt.

Der Stand der Technik hat die Defizite bei der Aufnahme und Auswertung der verschleißbestimmenden Form-, Lage- und Oberflächenmerkmale aufgezeigt. Dem gegenüber steht der dringende Bedarf seitens der Industrie, auf Grundlage einer vermessenen Topographie Aussagen zum Verschleißzustand und ggf. zum Standzeitverhalten zu treffen. Ziel des Vorhabens war es daher, ein System zu entwickeln, welches qualitative Aussagen über die Verschleißmerkmale durch die optoelektronische Erfassung und Analyse der Topographie zulässt.

Ziel war es, eine galvanisch belegte Schleifscheibe, unabhängig von der Kenntnis ihres Ausgangszustandes, hinsichtlich des zum Zeitpunkt der optoelektronischen Erfassung vorliegenden Verschleißzustandes, zu beschreiben.

## Forschungsergebnisse

### Entwicklung der adaptiven Beleuchtung

Eine der Hauptaufgabe im Forschungsprojekt war die Entwicklung einer Beleuchtungseinheit. Das Grundproblem bei der lichtmikroskopischen Bildaufnahmetechnik von Schleifwerkzeugoberflächen mit CBN-Körnung und Diamantkörnung liegt in der optischen Wechselwirkung physikalischer Effekte, die sich überlagern.

Daher galt es, den Einfluss von Streulichtanteilen und damit die Überlagerungsfähigkeit von Licht auf unterschiedlich langen optischen Wegen einzuschränken.

An den komplexen Oberflächenstrukturen wurden daher verschiedene Beleuchtungsanordnungen getestet und bewertet, um aus möglichst einer bestimmten räumlichen Richtung die Schleifmitteloberfläche zu beleuchten und gleichzeitig die Lichtmenge möglichst gering zu halten, so dass die Streulichtanteile möglichst stark unterdrückt werden.

Hierzu wurden zwei unterschiedliche Beleuchtungskonzepte untersucht:

1. Selektive Hellfeldbeleuchtung mit selektiver Dunkelschaltung beliebig anwählbarer lateraler Bereiche und
2. Gerichtete Dunkelfeldbeleuchtung aus unterschiedlicher Richtung und Neigung, wobei der Normalenvektor der Messfeldebene gleich der optischen Achse des Strahlgangs, gleich der Z-Achse ist und die Drehwinkelposition um die Z-Achse und die Neigung zur Messfeldebene variiert wird.

Um dem Ziel der Isolation von optischen Störungen und Wechselwirkungen näher zu kommen, wurden Beleuchtungseinstellungen gewählt, wo ein möglichst minimaler Lichtstrom des Hellfeldes das Messfeld beleuchtet und aus möglichst nur einer Richtung und Neigung die Dunkelfeldbeleuchtung Flanken und kleiner Teilflächen der Körner anstrahlt, so dass diese in den Öffnungskegel des Objektivs fallen und als reflektierte Konturen im Kamerabild sichtbar werden. Damit kommt es zu Verschattungen und alle anderweitig ausgerichteten Mikrostrukturen und Flächen, deren Licht nicht in den Öffnungskegel des Objektivs zurückgeworfen werden, erscheinen als sehr dunkle Bereiche. Somit wurde es möglich den Streulichtanteil massiv zu unterdrücken und weitere parasitäre Reflektionen minimal in ihrer Störwirkung zu halten.

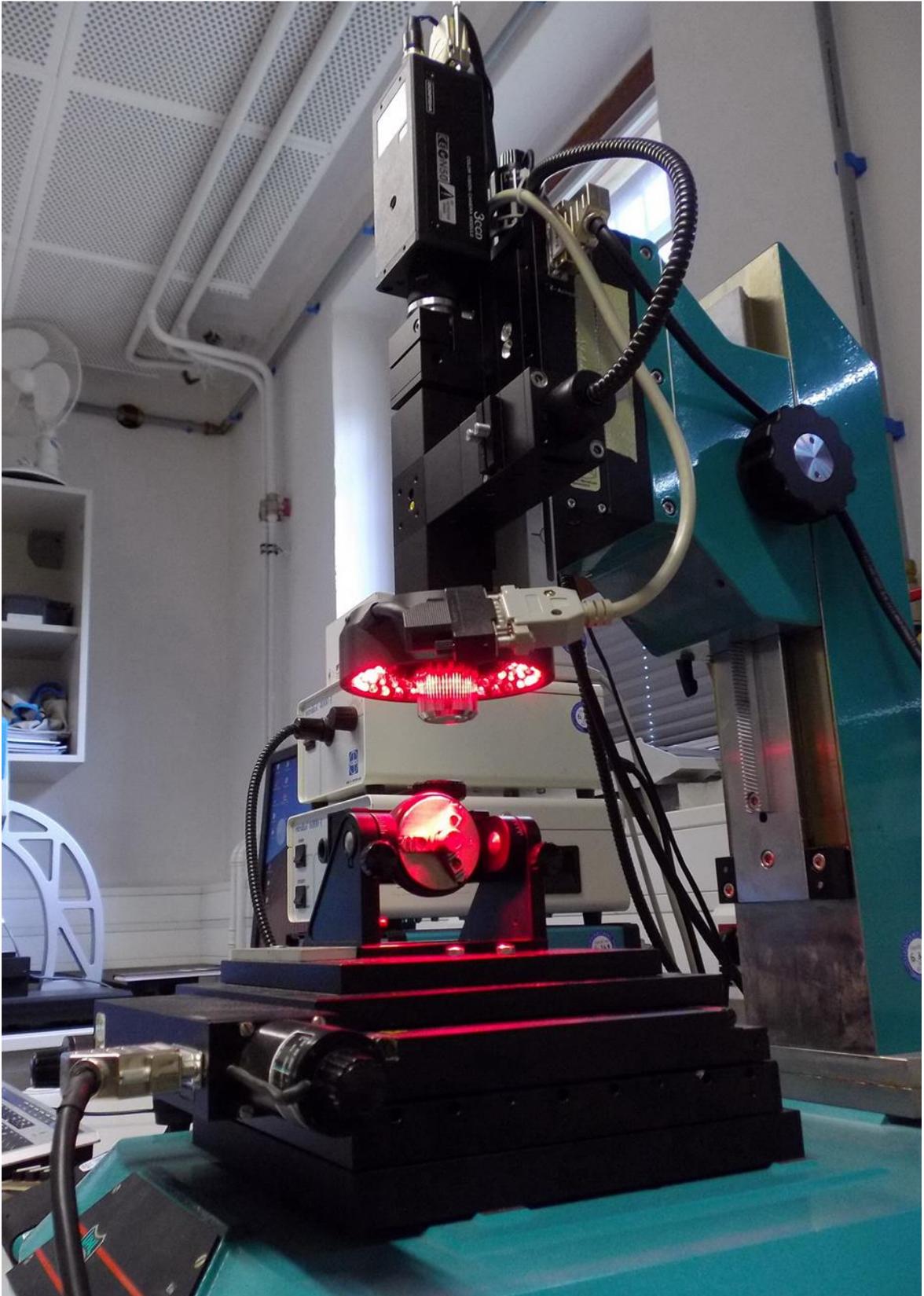


Abbildung 1: Optisches Messgerät (OMG) mit Dunkelfeldbeleuchtung und Hellfeldeinkopplung

## Entwicklung des Bildverarbeitungssystems

Zusätzlich wurde die Entwicklung des Bildverarbeitungssystems vorangetrieben. Die Arbeiten bezogen sich auf die folgenden Schwerpunkte:

- Durchführung von Messreihen zur Analyse der bestmöglichen Kombination der Dunkelfeld- und Hellfeld-Beleuchtungseinstellungen,
- Analyse und Bewertung der Bildinformation und des Bildkontrastes in Gegenüberstellung zu deren Störgrößen wie Streulichtanteil, parasitärer Reflexion und Überlagerung (Interferenzen) mittels der Simulationsumgebung Matlab / Octave,
- Entwicklung von Bildverarbeitungsmethoden und Algorithmen zur sicheren Erkennung von Kanten und Konturen der Mikrogeometrie von Schleifmitteloberflächen mit möglichst hohem Kontrast,
- Erstellung einer Bedienoberfläche und Automatisierung der Beleuchtungssequenzen zur Aufnahme von Bildstapeln der Mikrogeometrie unter verschiedenen Beleuchtungskonfigurationen,
- Datenanalyse der unterschiedlichen Bilddatenstapel mittels der Simulationsumgebung Matlab / Octave hinsichtlich nutzbarem Informationsgehalt für die Kanten- und Konturerkennung,
- Entwicklung der 3D-Konturerkennung und des Zusammenfügens der 3D-Punktewolke aus Höhenstapeln unterschiedlicher Beleuchtungskonfiguration,
- Implementierung der Bildverarbeitungsalgorithmen in der Programmiersprache C / C++

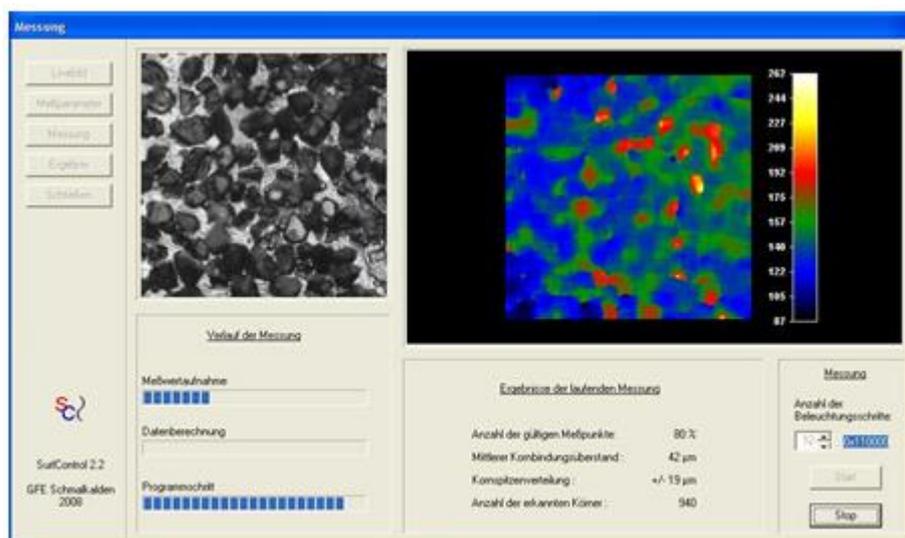


Abbildung 2: Modifizierte Bedienoberfläche

Diese Arbeiten wurden teilweise parallel laufend abgearbeitet, so dass zeitnah die Versuchsergebnisse und Bildaufnahmen hinsichtlich ihres Informationsgehaltes zur kontrastreichen Kontur- und Kantenerkennung analysiert und validiert wurden. Ähnlich einer Regelschleife wurden in mehreren Durchläufen verschiedene Beleuchtungskonfigurationen angewendet und die erzielten 3D-Messdaten validiert, um Optimierungsmaßnahmen zu erarbeiten und erfolgreich anzuwenden.

### Verschleißerzeugung unter Einbeziehung des Schleifprozesses

Es wurde eine repräsentative Auswahl an Schleifwerkzeugen laut Festlegungen im industriellen Schleifprozess unter realen Prozessparametern zum Schleifen eingesetzt. Ziel war die Anwendung realer Prozessparameter im oberen Grenzbereich, so dass sich in absehbarer Zeit Verschleißerscheinungen einstellen sollten.

Es wurden teilweise Schleifversuche durchgeführt mit den Schleifrollen, die vom Industriepartner zur Verfügung gestellt worden. Hierbei wurden vier Versuchsreihen gefahren, wobei festzustellen war, dass diese einschichtig besetzten Schleifrollen unter realen Prozessparametern eine hohe Standzeit aufwiesen.

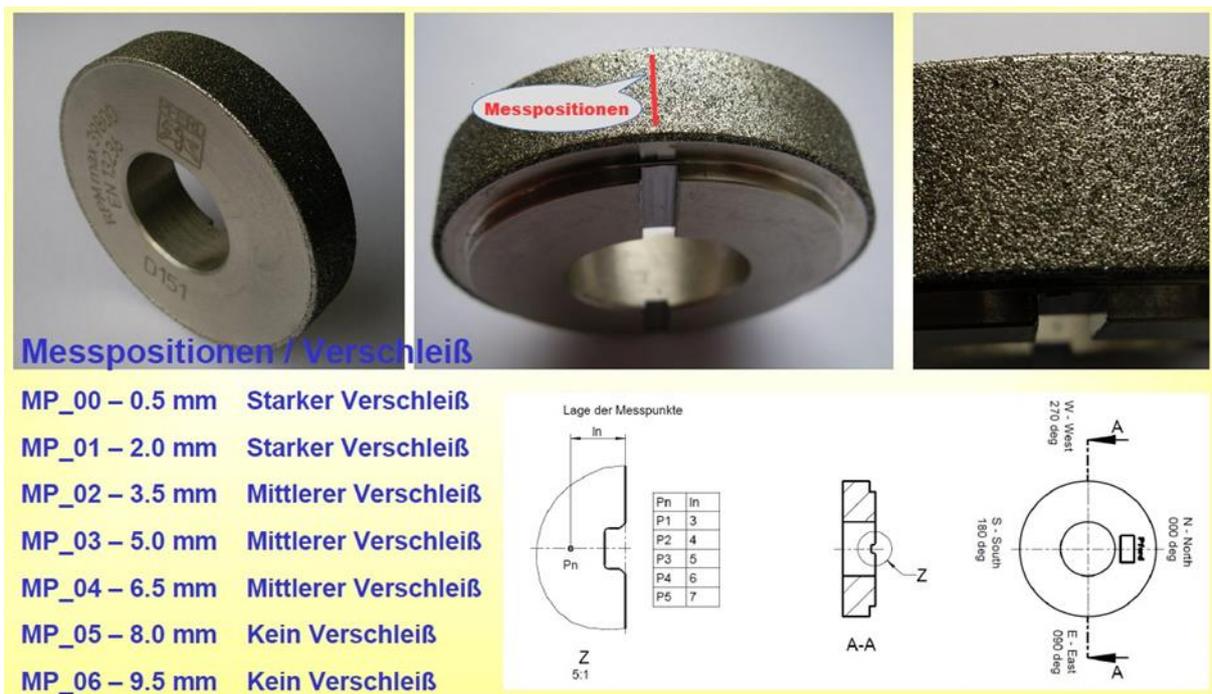


Abbildung 3: Diamantschleifrolle D1A\_50-10-20 D151

### Entwicklung topographieabhängiger Verschleißzustandserkennung

Es wurden Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, um optisch und in der digitalisierten 3D-Punktwolke der Schleifmitteloberfläche wesentliche Verschleißmerkmale nachzuweisen.

Im industriellen Schleifprozess, wie er unter normalen empfohlenen Prozessparametern mit den Schleifrollen D1A501020\_D151 und D1A501020\_D91 durchgeführt wurde, ergaben sich folgende Verschleißerscheinungen:

- Abplattung der Kornspitzen
- Kornausbruch in der Bindungsebene
- Auswaschung und unregelmäßige Abtragung der Bindungsschicht.

Ebenfalls ergeben sich beim industriellen Schleifprozess unter normalen und empfohlenen Prozessparametern in Folge des sehr starken Werkzeugverschleißes unmittelbar vor dem Werkzeugversagen folgende zusätzlichen Verschleißmerkmale:

- Zusetzen der Bindungsschicht, bis keine Schneidkanten mehr herausstehen,
- Ausbrennen der Diamantkörner infolge der unzulässigen Temperaturbelastung.

Die nachfolgenden Messaufnahmen bei unterschiedlich gerichteter Dunkelfeldbeleuchtung lassen nahezu alle Bereiche und Konturen der Schleifmitteloberfläche sichtbar werden. Die neu entwickelte Bildverarbeitungslösung ermöglicht die Berechnung der 3D-Punktwolken aus unterschiedlichen Beleuchtungseinstellungen, so dass das Ergebnisbild aus allen Beleuchtungsperspektiven zusammengefügt wird. In dieser 3D-Ergebnispunktwolke wurde exemplarisch an manuell definierten Tastschnittlinien das Höhenprofil der lokal ausgewählten Schleifkörner visualisiert. Anhand dieser Messreihen konnte umfassend gezeigt werden, dass die erwarteten Verschleißmerkmale je nach lokalem Verschleißgrad unterschiedlich stark in Erscheinung treten. Je nach gewählter Richtung der DF-Beleuchtung kommt es lokal zu Verschattungen bestimmter Oberflächenkonturen.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse beziehen sich auf folgende Schwerpunkte:

- Beschreibung der Werkzeuge, Haltevorrichtungen und Messorte
- Beschreibung der Durchführung der Verschleißversuche
- Beschreibung der Messreihen mit Beleuchtungsszenen und Messorten um wiederholbar Vergleichsdaten gewinnen zu können
- Beschreibung und Strukturierung der Messprozess-Steuerung zur automatisierten Bildaufnahmetechnik
- Beschreibung der 3D-Ergebnisdatenberechnung
- Beschreibung der 3D-Auswertemechanismen zum Abplattungsnachweis

Die vorgelegten Arbeiten und besonders die objektive, von der Schleifkornform unabhängige, 3D-Abplattungsauswertung eignen sich als Messverfahren, um sicher den Verschleißgrad eines Schleifwerkzeugs nachzuweisen.

Ebenfalls kann durch die gezielte Beleuchtungsvariation dieses Mess- und Auswerteverfahren für Diamant- und CBN-Schleifwerkzeuge verwendet werden. Die Rohdatenqualität der zusammengesetzten und berechneten Ergebnispunktwolke gibt in einer bisher nicht gekannten Qualität die individuelle Form der teilweise abgeflachten Diamantkörner und ebenfalls die unregelmäßige Oberflächenstruktur der ausgewaschenen Bindungsebene wieder. Auf dieser Grundlage wurde ein Mess- und Auswerteverfahren zur Detektion von Schleifkornabplattung entwickelt und als vollautomatisch ablaufendes Messsystem realisiert.

Weitere Messkriterien beispielsweise zur Auswertung der Auswaschung bzw. Deformation der Bindungsebene sind denkbar und mögliche Lösungsansätze. Der Informationsgehalt der errechneten 3D-Punktwolke ist sehr gut, so dass auf dieser Grundlage weitere Auswerteverfahren der 3D-Daten möglich wurden.

---

## Zusammenfassung

Vorangegangene Forschungsvorhaben und Diskussionen mit Industriepartnern im Hause IFW und GFE zeigten die Problemstellung in der Schleifindustrie auf, den Verschleißgrad von Schleifwerkzeugen objektiv bewerten zu können. Es bestand der Bedarf nach neuen Algorithmen zur optoelektronischen Erfassung und Analyse der Verschleißmerkmale an Schleifwerkzeugen.

Der Lösungsweg untergliederte sich in zehn Arbeitspakete (AP). Nach der Spezifikation der zu untersuchenden Werkzeuge erfolgen zunächst die Werkzeugauswahl und Referenzvermessungen am Rasterelektronenmikroskop, um eine Klassifizierung der Merkmale vornehmen zu können (AP1 und AP2). Parallel hierzu wurde die Beleuchtungseinheit entwickelt, um optimale Ausgangsbilddaten zu erhalten (AP3). Anschließend mussten die Algorithmen zur Beschreibung der Oberfläche aufgestellt und getestet werden (AP4). Währenddessen wurden die spezifizierten Bauteile mit den zu untersuchenden Schleifwerkzeugen bearbeitet. Durch detaillierte Standzeit-Untersuchungen wurde Verschleiß erzeugt, optoelektronisch erfasst sowie eine Klassifizierung durchgeführt (AP5). Hierbei wurden der Schleifprozess und dessen Parameter genauestens berücksichtigt. Die verschlissenen Werkzeuge wurden zusammen mit den Referenzproben auf dem neuentwickelten Gesamtsystem vermessen und ausgewertet (AP6). Darauf aufbauend erfolgte in AP7 die Ergebnisverifikation und somit der Abgleich mit der Qualifizierung aus AP5. Die gewonnenen Erkenntnisse führten zur Optimierung des Messsystems. Feldversuche wurden unter Praxisbedingungen durchgeführt, wodurch die Robustheit des Systems geprüft wurde (AP8). Nachdem das System reproduzierbare und interpretierbare Ergebnisse lieferte, wurde eine Bedienoberfläche angefertigt, die den Umgang mit dem System erleichtert und zusätzliche Funktionalitäten beinhaltet (AP9). Abschließend wurden die Ergebnisse in Form von Handlungsempfehlungen für die Praxis und für den Abschlussbericht zusammengetragen und eine Übertragbarkeit der Erfahrungen in die Normierung wurde vorbereitet (AP 10).

Am Ende des FuE-Vorhabens konnte anhand eines Demonstrators vorgeführt werden, dass die objektive Bewertung von Verschleißerscheinungen, speziell der Abplattung der Schleifkörner, im automatisierten optischen Oberflächen-Messverfahren erfolgreich umgesetzt wurde.

Den Industriepartnern wurde im Rahmen des projektbegleitenden Industrieausschuss (PA) diese Lösung und alle erreichten Erkenntnisse zum Verschleißverhalten der eingesetzten Schleifwerkzeuge vorgestellt. Ebenfalls wurde der Vorschlag im PA unterbreitet als eine mögliche Lösung das objektive Auswerteverfahren zur Bestimmung des Abplattungsgrades als Normenentwurf zu empfehlen.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Dominik Lenz unter 02191 59 21.123.