



Institut für Fertigungstechnik  
und Werkzeugmaschinen

# Abschlussbericht

für die

## Deutsche Forschungsgemeinschaft

zum DFG-Forschungsvorhaben DE 447/184-1

### **Einsatzverhalten sintermetallischer Diamantschleifscheiben mit chemisch angebundenen Schleifkörnern**

**Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena**

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)

der Leibniz Universität Hannover

Garbsen, Oktober 2023



Produktionstechnisches  
Zentrum Hannover

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ALLGEMEINE ANGABEN.....</b>	<b>3</b>
1.1	DFG-Geschäftszeichen.....	3
1.2	Antragssteller.....	3
1.3	Institut bzw. Lehrstuhl.....	3
1.4	Thema des Projektes.....	3
1.5	Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt .....	3
1.6	Liste der wichtigsten Publikationen aus diesem Projekt .....	3
1.6.1	Veröffentlichte Arbeiten aus Publikationsorganen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung, die zum Zeitpunkt der Berichterstattung erschienen oder endgültig angenommen sind	3
1.6.2	Andere Veröffentlichungen	4
<b>2</b>	<b>ARBEITS- UND ERGEBNISBERICHT.....</b>	<b>5</b>
2.1	Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts .....	5
2.2	Beschreibung der durchgeführten Arbeiten und Darstellung der erzielten Ergebnisse .....	5
<b>3</b>	<b>AUSBLICK AUF ZUKÜNFTIGE ARBEITEN.....</b>	<b>13</b>
3.1	Beteiligte Wissenschaftler .....	14
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>15</b>

## 1 Allgemeine Angaben

### 1.1 DFG-Geschäftszeichen

Das Forschungsvorhaben wurde von der DFG unter dem Geschäftszeichen DE447/184-1 bewilligt.

### 1.2 Antragssteller

**Name:** Denkena, Berend  
**Akademischer Grad:** Prof. Dr.-Ing.  
**Dienststellung:** Institutsleiter  
**Geboren am:** 05.11.1959  
**Nationalität:** deutsch  
**Institut:** Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)  
**Dienstliche Adresse:** An der Universität 2, 30823 Garbsen  
**Telefon:** 0511 / 762-2553  
**Fax:** 0511 / 762-5115  
**E-Mail:** denkena@ifw.uni-hannover.de

### 1.3 Institut bzw. Lehrstuhl

Siehe oben

### 1.4 Thema des Projektes

Einsatzverhalten sintermetallischer Diamantschleifscheiben mit chemisch angebundenen Schleifkörnern

### 1.5 Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

- Vorhaben läuft seit: 15.07.2020
- Förderzeitraum des IFW durch die DFG: 15.07.2020 bis 15.07.2023
- Gesamtdauer: 36 Monate
- Berichtszeitraum: 15.07.2020 bis 15.07.2023

### 1.6 Liste der wichtigsten Publikationen aus diesem Projekt

#### 1.6.1 Veröffentlichte Arbeiten aus Publikationsorganen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung, die zum Zeitpunkt der Berichterstattung erschienen oder endgültig angenommen sind

Veröffentlicht:

- [DEN21a] Denkena, B.; Krödel, A.; Lang, R. Fabrication and use of Cu-Cr-diamond composites for the application in deep feed grinding of tungsten carbide, Diamond and Related Materials, Volume 120 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108668>
- [DEN22a] Denkena, B.; Bergmann, B.; Lang, R. Influence of the powder metallurgy route on the mechanical properties of Cu–Cr–diamond composites. SN Appl. Sci. 4, 161 (2022) <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05048-2>
- [DEN22b] Denkena, B.; Bergmann, B.; Lang, R. Grinding behaviour of metal-bonded diamond grinding wheels with an additive of chromium as a carbide-forming element, WorldPM Proceedings, European Powder Metallurgy Association, (2022) ISBN: 978-1-899072-55-2

## 1.6.2 Andere Veröffentlichungen

- [DEN21b] Berend Denkena, Alexander Krödel, Roman Lang: Diamantanbindung durch Carbiddbildung, Diamond Business, Ausgabe 2 (2021)
- [DEN22c] Berend Denkena, Benjamin Bergmann, Roman Lang: Optimierung der Schleifbelagseigenschaften von Diamantschleifscheiben, VDI-Z, Ausgabe 7/8 (2022)
- [DEN22d] Berend Denkena, Benjamin Bergmann, Roman Lang: Metallisch gebundene Diamantschleifscheiben mit Zugabe von Chrom als Karbidbildner, Diamond Business, Ausgabe 4 (2022)

## 2 Arbeits- und Ergebnisbericht

### 2.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Die Eigenschaften sintermetallisch gebundener Diamantschleifscheiben sind von den Schneidstoffeigenschaften, den Bestandteilen des Bindungssystems und den Prozessstellgrößen bei der Herstellung der Schleifscheiben abhängig. Die Bestandteile des Bindungssystems beeinflussen die mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie die Einbindung des Schneidstoffs in der Bindungsmatrix. Die Gesamtheit dieser Eigenschaften bestimmt das Einsatzverhalten des Schleifwerkzeugs. In industriell verwendeten bronzegebundenen Schleifscheiben sind die Diamantkörner ausschließlich formschlüssig gebunden. Eine chemische und damit stoffschlüssige Verbindung zwischen Korn und Bindung könnte jedoch die Kornhaltekraft und somit den Verschleißwiderstand der Schleifscheibe deutlich erhöhen. Eine stoffschlüssige Anbindung kann unter anderem durch die Zugabe von Karbidbildnern wie Chrom zur Schleifwerkzeugbindung erreicht werden. Dabei spielen die Zusammensetzung der Bindung, aber auch die Sinterprozessgrößen, die an die Zusammensetzung angepasst werden müssen, eine wesentliche Rolle. Für die Herstellung von Schleifwerkzeugen sind diese Erkenntnisse bisher nicht zusammenhängend erschlossen. Durch ein Verständnis des Einflusses der Herstellungsstellgrößen und der Bindungszusammensetzung auf das Einsatzverhalten, können gezielt Schleifwerkzeuge hergestellt und an die Erfordernisse aus dem Einsatz angepasst werden.

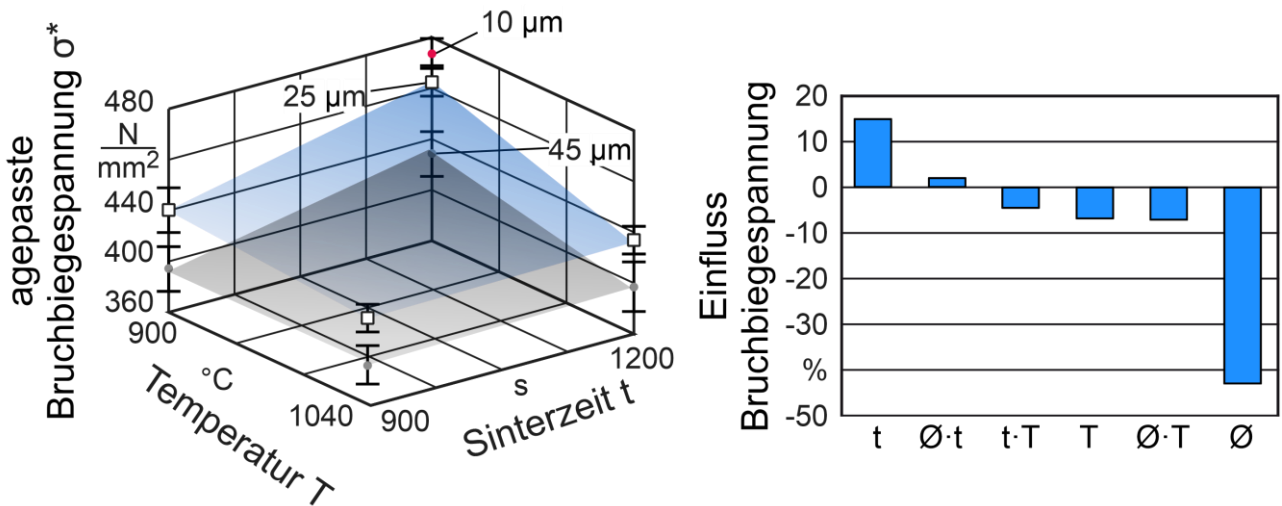
Das Hauptziel des Vorhabens ist es, die **Zusammenhänge zwischen der Ausprägung der chemischen Anbindung zwischen Schleifkorn und Bindungsmatrix, den daraus resultierenden Schleifbelageigenschaften sowie dem Einsatzverhalten sintermetallischer Diamantschleifscheiben zu verstehen und anhand von Kennwerten zu beschreiben**. Zur Erfüllung des Hauptziels wurden folgende Fragestellungen betrachtet:

- 1) Wie lässt sich die chemische Anbindung der Diamanten innerhalb der Bindungsmatrix einstellen?
- 2) Wie ändert sich das Einsatzverhalten in Abhängigkeit der chemischen Anbindung auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene?
- 3) Lässt sich neben den mechanischen Eigenschaften auch die thermischen Eigenschaften der Schleifscheibe durch die chemische Anbindung steuern?
- 4) Wie können die o.g. Eigenschaften und das Einsatzverhalten mittels Kennwerte beschrieben werden und wie in Einklang mit einem FEM Simulationsmodell gebracht werden?

### 2.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten und Darstellung der erzielten Ergebnisse AP1: Anbindungsmechanismen

*Ziel dieses Arbeitspakets ist es, Kenntnisse über die Ausprägung der chemischen Anbindung von Diamantkörnern und Kupfer und die Einstellbarkeit dieser zur erlangen. Dieses bildet die Grundlage für das weitere Vorgehen, insbesondere der notwendigen Sinterstellgrößen für die Herstellung von Probekörpern mit chemisch angebonden Diamantkörnern für die weitere Charakterisierung.*

Um das Ziel des ersten Arbeitspakets zu erreichen, erfolgten zunächst experimentelle Sinteruntersuchungen. Dabei wurde die Sintertemperatur  $T$  zwischen  $900\text{ °C}$  und  $1.040\text{ °C}$ , die Sinterzeit  $t$  zwischen  $900\text{ s}$  und  $1.200\text{ s}$  und die Chrom Partikelgröße  $d_{cr}$  zwischen  $25\text{ }\mu\text{m}$  und  $45\text{ }\mu\text{m}$  variiert. Eine Erhöhung der Sintertemperatur und der Sinterzeit resultiert zu einer Reduzierung der Porosität und damit verbunden in einer Erhöhung der Bruchbiegespannung. Die Änderung der Partikelgröße des Chromzuschlags zeigt hingegen keinen Einfluss auf die Porosität, jedoch führt die Abnahme von  $45\text{ }\mu\text{m}$  auf  $25\text{ }\mu\text{m}$  der Partikelgröße zu einer deutlichen Steigerung der Bruchbiegespannung um  $+12\%$ . Zusätzlich wurden die Versuche mit einer Chrompartikelgröße von  $10\text{ }\mu\text{m}$  durchgeführt. Hier konnte die höchste angepasste Bruchbiegespannung von  $475\text{ N/mm}^2$  bei  $900\text{ °C}$  Sintertemperatur und  $1.200\text{ s}$  Haltezeit erreicht werden (Abbildung 1). Eine Reaktion zwischen Diamant und Chrom und damit eine Anbindung der Diamanten konnte bei jedem Versuchspunkt durch den Nachweis von Chromkarbid  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  mittels Röntgenbeugung (XRD) bestätigt werden.



Sinterparameter	Schleifkorn	Zuschlag
Temperatur = var.	Diamant	Chrom
Sinterdruck = 35 MPa	Korngröße = D46	Partikelgröße = 25 & 45 μm
Haltezeit = var.	Konzentration = 50 Vol.-%	Konzentration = 5 Gew.-%

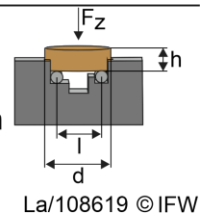


Abbildung 1 3D-Plot des Einflusses von Sintertemperatur, Sinterzeit und Chrompartikelgröße auf die angepasste Bruchbiegespannung (links), Einflussdiagramm auf die Bruchspannung innerhalb der untersuchten Sinterstellgrößen (rechts).

REM-Aufnahmen zeigen, dass die Zugabe von 5 Gew.-% Chrompulver mit einer Partikelgröße von 45 μm nur zu einer Teilbenetzung führt, was die geringere Bruchbiegespannung erklärt. Die gleiche prozentuale Zugabe von Chrompulver mit kleinerer Partikelgröße führt zu einer vollständigen Benetzung der Diamantenoberfläche mit Chromkarbid (Abbildung 2, links). Die Karbidbildung ist vor allem auf die Reaktion direkt an der Grenzfläche zwischen Kupfer und Diamant zurückzuführen. Aufgrund der kleineren Partikelgröße erhöht sich die Anzahl der Chrompartikel innerhalb der Matrix, wenn der Massenanteil konstant gehalten wird. Daher steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Chrompartikel mit einem Diamantkorn in Kontakt kommt, da dies von der Anzahl der Partikel innerhalb der Matrix abhängt. Darüber hinaus führt die Verringerung der Partikelgröße zu einer größeren spezifischen Oberfläche der Chrompartikel. Da die Oberflächendiffusion zwischen den Partikeln der vorherrschende Mechanismus während des Sinterprozesses ist, kann angenommen werden, dass die relativ größere Oberfläche bei abnehmender Partikelgröße zu einer höheren Reaktivität und einer stärker ausgeprägten Karbidbildung und somit zu einer höheren Adhäsion führt. Über den Arbeitsplan hinaus wurde der Einfluss der Diamantkornkonzentration und des Drucks p auf die Porosität Φ und die Bruchbiegespannung σ untersucht. Die Porosität steigt ab einer Kornkonzentration von 37,5 Vol.-% signifikant an. Grund hierfür ist das Stützen und die Clusterbildung der inkompressiblen Diamantkörner. Hier führt eine weitere Erhöhung der Kornkonzentration zu einer Abnahme der Bruchbiegespannung. Unterhalb von 37,5 Vol.-% kommt es nicht mehr zum Bruch der Schleifbelagsprobekörper, sondern zu Durchbiegung aufgrund der höheren Duktilität. Die Erhöhung des Sinterdrucks bei 50 Vol.-% Kornkonzentration führt zu einer Abnahme der Porosität durch die stärkere Verdichtung und bewirkt eine Steigerung der Bruchbiegespannung [DEN22a].

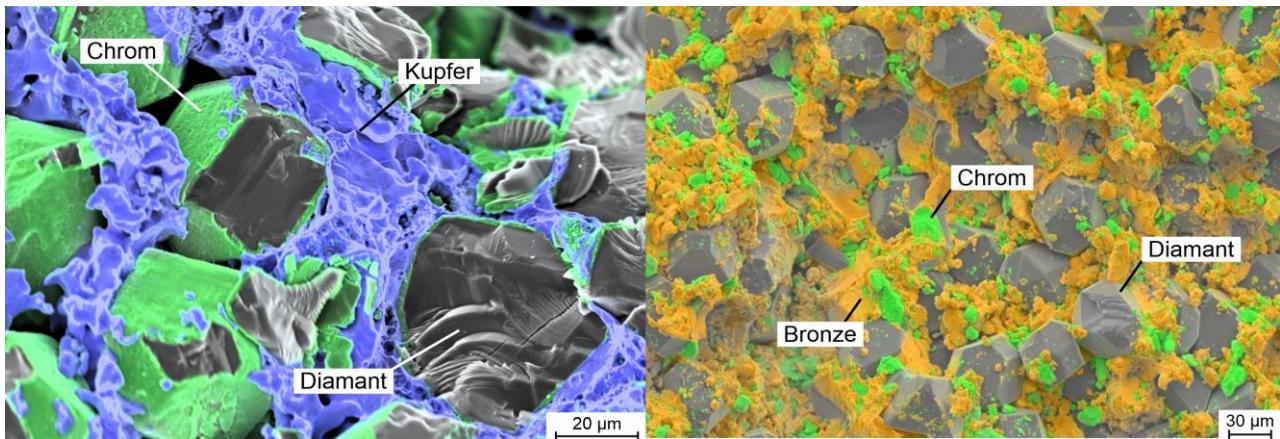


Abbildung 2 EDX-Mapping der Bruchflächen der Schleifbelagsprobekörper nach dem Biegebruchversuch. Kupfer-Chrom Bindung mit 50 Vol.-% Diamant (links). Bronze-Chrom-Bindung mit 50 Vol.-% Diamant (rechts).

## AP 2: Mechanische und thermische Kennwerte der Anbindung

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, Kenntnisse über die mechanischen und thermischen Kennwerte der Anbindungsmechanismen zu erlangen. Dafür werden die Untersuchungen in statische und dynamische sowie auf mikroskopischer und makroskopischer Betrachtungsebene aufgeteilt. Als mechanische Kenngröße wird die Bruchspannung betrachtet. Sie gibt Auskunft über den Gefügezusammenhalt und somit auch indirekt über die Anbindung der Körner in der Bindung. Die Wärmeleitfähigkeit als thermischer Kennwert hat Einfluss auf die Temperaturabfuhr aus der Kontaktzone beim Schleifen.

### AP 2.1 Makroskopisch – statisch: Konzentrationsreihen

Die Erkenntnisse aus AP 1 wurden erneut durch das Sintern einer Kornkonzentrationsreihe zwischen 0 und 50 Vol.-% Diamant und einem Zuschlag 0 - 8 Gew.-% Chrom mit einer Partikelgröße von 10 µm validiert. Zusätzlich wurde bei einer Kornkonzentration von 37,5 Vol.-% und 50 Vol.-% der Chromgehalt in acht Stufen (0; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 4; 8 Gew.-%) variiert (Abbildung 23). Die Ergebnisse zeigen den starken Anstieg der Bruchbiegespannung durch die Zugabe von Chrom mit einer maximalen Bruchbiegespannung bei 2 Gew.-% um +363 % gegenüber der Proben ohne Chromzugabe. Ab einer Zugabe von mehr als 2 Gew.-% verringert sich die Bruchbiegespannung durch den Verbleib von überschüssigem Chrom, das nicht an der Einbindung der Diamanten beteiligt ist. Hierdurch kommt es zu einer Versprödung der Bindung [DEN21a]. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  kann durch die Karbidbildung und damit der stoffschlüssigen Anbindung ebenfalls stark erhöht werden. Eine minimale Zugabe von 0,1 Gew.-% Chrom zur Bindungsmatrix bewirkt bereits eine Steigerung von +102 %. Die maximale Wärmeleitfähigkeit wird bei einer Zugabe von 0,5 Gew.-% erreicht (Abbildung 3). Bei weiterer Zugabe kommt es auch hier zu einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit durch zwei Effekte. Zum einen kommt es auch hier zu einem Verbleib von Chrom mit einer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit in der Kupferbindung und zum anderen kommt es zu einer Zunahme der Dicke der Karbidschicht, die in einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit resultiert [ZHAN11]. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die maximale Wärmeleitfähigkeit nicht gleichzeitig mit der maximalen Bruchbiegespannung erreichen lassen, jedoch bereits geringe Mengen an Chrom einen signifikanten Einfluss haben. Die Diamantkonzentration beeinflusst im Vergleich zum Chromgehalt nur geringfügig die Wärmeleitfähigkeit. Bei Zugabe von Chrom kommt es bis zu einer Kornkonzentration von 37,5 Vol.-% zu einer Steigerung von +25 % der Wärmeleitfähigkeit. Bei weiterer Steigerung kommt es zu einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit.

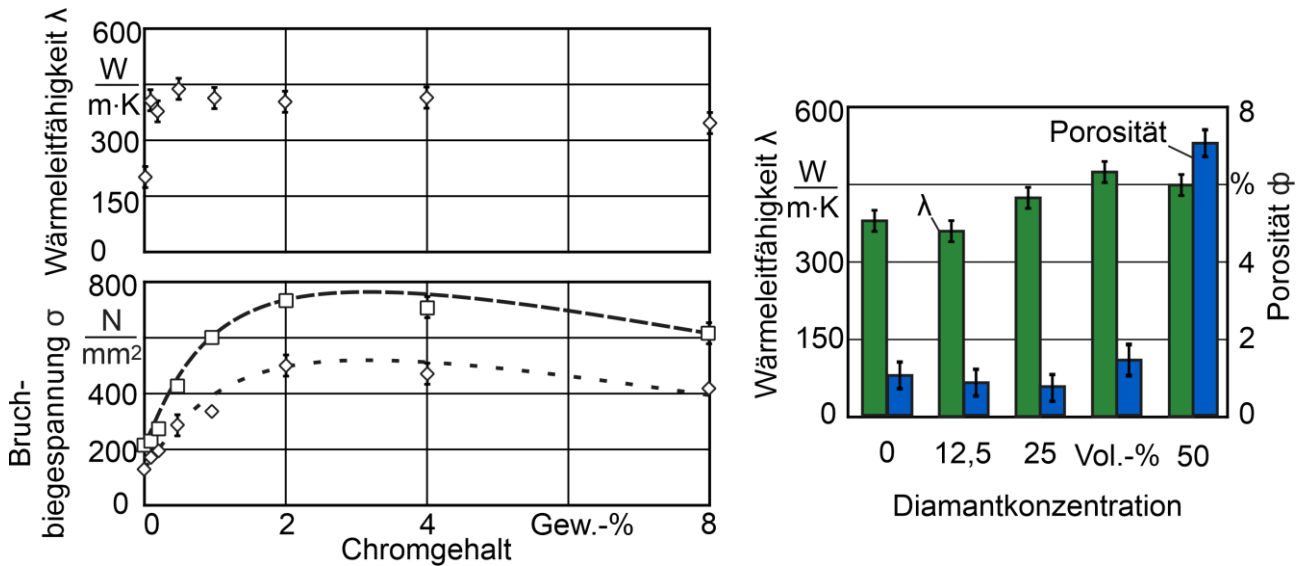


Abbildung 3 Bruchbiegespannung und Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Chromgehaltes der Schleifbelagsprobekörper (links). Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Diamantkonzentration (rechts).

Dies wird auf den in AP1 untersuchten Effekte der Clusterbildung bei höheren Diamantkornkonzentration und die damit verbundene Steigerung der Porosität zurückgeführt. Neben der Kupfer-Chrombindung wurde auch eine Bronze-Chrombindung untersucht. Aufgrund des geringeren Schmelzpunkts der vorlegierten Bronze mit 10 Gew.-% Zinn wurde, im Vergleich zum Kupfer, eine Sinter Temperatur von 720 °C gewählt. Bei dieser Sinter Temperatur kam es durch die Zugabe von Chrom nicht zur Bildung von Chromkarbid und damit auch zu keiner signifikanten Änderung der mechanischen oder thermischen Eigenschaften. Nach dem Sinterprozess liegen die Chrompartikel gleichmäßig verteilt in der Bindung vor (Abbildung 2, rechts), im Gegensatz zur Kupfer-Chrombindung bei 900 °C, bei der sich die deutliche Benetzung der Diamanten durch Chromkarbid mittels EDX beobachten lassen (Abbildung 2, links) [DEN22b].

## AP 2.2 Makroskopisch – dynamisch: Einsatzverhalten von Schleifscheiben mit chemisch angebundenen Schleifkörnern

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Kenntnis über das Einsatzverhalten von Schleifscheiben mit chemisch angebundenen Schleifkörnern.

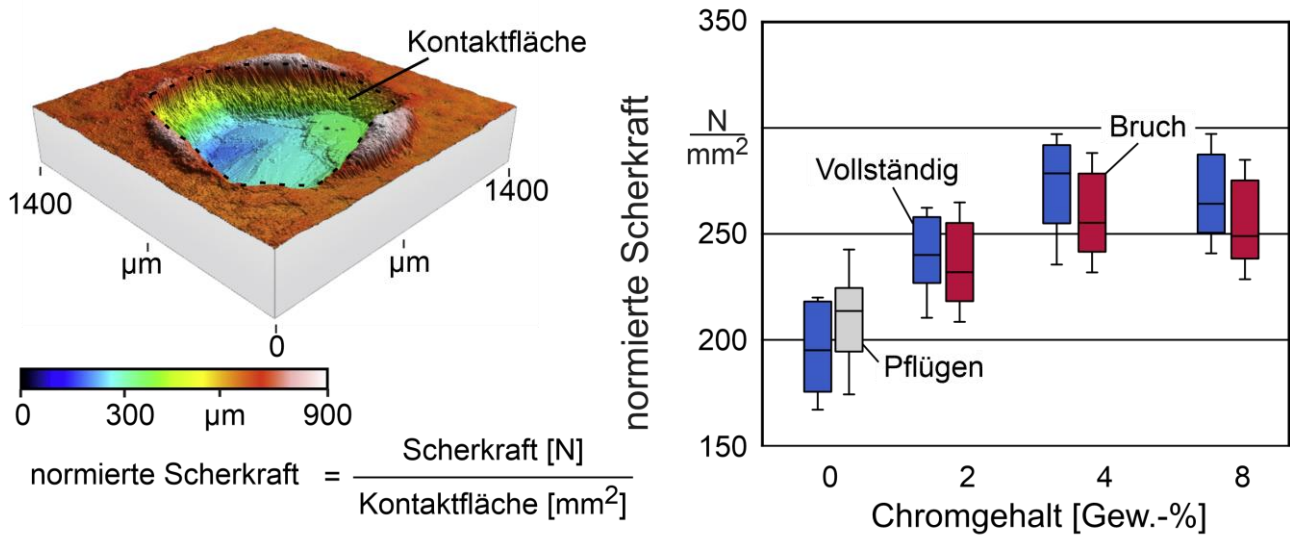
Es wurden 1A1 Schleifscheiben mit Kupfer und Bronze sowie einer Kornkonzentration von 37,5 Vol.-% und 50 Vol.-% hergestellt. Der Chromgehalt wurde dabei in vier Stufen (0, 2, 4 und 8 Gew.-%) variiert. Die Sinterstellgrößen wurden analog zu AP2.1 gewählt. Die Untersuchungen erfolgten beim Längs-Umfangs-Planschleifen von Hartmetall mit einer Korngröße von 0,8  $\mu\text{m}$  und einem Kobaltanteil von 10 % auf einer Präzisions-Flachschleifmaschine des Typs FS840 KT CNC der Firma Geibel & Hotz. Anders als im Arbeitsplan beschrieben, wurde nicht ein Zerspanvolumen von  $V_w = 800 \text{ mm}^3$ , sondern von  $V_w = 10.000 \text{ mm}^3$  abgetragen, da sich die Schleifscheiben bei den gewählten Stellgrößen als verschleißresistenter erwiesen als angenommen. Für die Versuche wurde die Vorschubgeschwindigkeit zwischen 150 und 200 mm/min und die Zustellung pro Hub zwischen 1 und 1,67 mm variiert. Somit ergeben sich äquivalente Spannungsdicken  $h_{eq}$  von 0,1 bis 0,23  $\mu\text{m}$ , welche industrierelevante Prozessstellgrößen entsprechen. Die Ergebnisse der Untersuchung der Kupferbindung zeigen für alle Schleifscheiben einen Anstieg der Normal- und Tangentialkräfte über das Zerspanvolumen und einen Anstieg der Prozesskräfte mit Erhöhung der äquivalenten Spannungsdicke. Grundsätzlich zeigen die Schleifscheiben ohne Karbidbildung die höchsten Prozesskräfte. Grund hierfür ist die Bildung von Aufschweißungen auf der Schleifbelagsoberfläche. Durch die verstärkte Bildung der Aufschweißungen bei Erhöhung der äquivalenten Spannungsdicke mussten Versuche bei einem Arbeitseingriff von  $a_e = 1,67 \text{ mm}$  abgebrochen werden. Hier wurde

neben der starken Bildung von Aufschweißungen auch eine plastische Deformation der Schleifscheibe beobachtet. Die Duktilität der Bindung verhindert hier einen Einsatz bei höheren äquivalenten Spannungsdicken, bzw. Zeitspannvolumina. Die Duktilität fördert zusätzlich die Bewegung von Diamanten innerhalb der Bindung. Dies wird insbesondere in den mikroskopischen Betrachtungen, die in AP 2.3 und 2.4 durchgeführt wurden, deutlich. Durch die Karbidbildung nehmen die Schleifkräfte mit Zunahme der Bruchbiegespannung und der Wärmeleitfähigkeit ab. Die niedrigsten Schleifkräfte werden bei einem Chromgehalt von 2 Gew.-% erreicht, wobei es hier zu einem stetigen Anstieg der Schleifkräfte und zu keiner Bildung von großflächigen Aufschweißungen kommt. Mit höherem Chromgehalt steigen und reduzieren sich die Prozesskräfte über das Zerspanvolumen. Grund für den Anstieg sind großflächige Aufschweißungen, die die Schneiden der Diamantkörner überdecken und somit aus dem Schleifprozess ausschleifen. Im Verlauf des Schleifversuchs führt dies zu einer lokalen Überlastung des Schleifbelags und zum Herausbrechen einer Kornlage im Bereich der Aufschweißung. Der Radialverschleiß, der mit  $97,9 \mu\text{m}$  über der Korngröße der Diamantkörner (D46) liegt, bestätigt, dass es hier zu einem Kornverschleiß, bedingt durch das Ausbrechen der Abrasivkörner kommt. Der Radialverschleiß von  $29,9 \mu\text{m}$  bei einem Chromgehalt von 2 Gew.-% spricht für einen Bindungsverschleiß sowie einen anfänglichen Verschleiß der Schneidkörner. Durch den gleichmäßigen Verschleiß von Bindung und Schneidkörnern kommt es zu einer Selbstschärfung der Schleifscheiben im Schleifprozess [DEN21a].

### **AP 2.3 Mikroskopisch – statisch: Einkornproben**

*Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Kenntnis über die Kornhaltekräfte eines chemisch angebonden Diamanten in der Bindungsmatrix.*

Hierzu wurden Einkornproben unter Variation des Chromgehaltes der Bindung in vier Stufen (0, 2, 4, 8 Gew.-%), des Kornüberstandes in drei Stufen (30, 50, 70 %) und des Korndurchmessers in drei Stufen (D601, D851, D1181), hergestellt. Je Variation wurden 18 Einkornproben hergestellt und untersucht, sodass sich 684 Scherversuche ergeben. Mit einem Hartmetall-Schermeißel wurden diese auf einem Universal-Scherkrafttester Modell 552 von Fa. Royce Instruments tangential belastet und stellt somit maßgeblich die Schleiftangentialkraft des Schleifprozesses dar. Die Scherversuche lassen die Identifikation und Charakterisierung von drei verschiedenen Ausbruchsmechanismen zu. Beim vollständigen Ausbruch des Diamanten aus der Bindungsmatrix kommt es zu einer vollständigen Ablösung des Diamanten, ohne dass es zu einer sichtbaren plastischen Deformation innerhalb der Bindungsmatrix kommt. Dieses Verhalten ist bei allen Chromgehalten zu beobachten. Beim Ausbruchsmechanismus Pflügen kommt es zu einer Verdrehung und Bewegung des Diamantkornes in der Bindungsmatrix, meist bei Bindungen mit 0 oder 2 Gew.-% Chrom. Durch die fehlende oder verringerte Chromzugabe verfügt die Bindung über verringerte Härte sowie einer nicht vollständigen Anbindung der Körner mit der Bindung. Folglich kommt es zu einer plastischen Verformung der Bindung, bedingt durch die erhöhte Duktilität. Der Ausbruchsmechanismus Bruch führt nicht zu einer vollständigen Ablösung des Diamantkornes von der Bindungsmatrix, sondern zu einem interkristallinen Bruch des Diamantkornes. Innerhalb der Bindung sind dabei keine plastischen Deformationen zu beobachten. Die erhöhte Chromaddition führt zu einer Abnahme der Duktilität und damit auch zu einer Abnahme der plastischen Deformationen der Bindung. Durch die verbesserte Anbindung, bedingt durch die Karbidbildung, kommt es zur Steigerung der Kornhaltekräfte (Abbildung 4). Weiterhin wurde die normierte Scherkraft bestimmt. Zur Berechnung der normierten Scherkraft wird die aufgezeichnete Scherkraft auf die Kornkontaktfläche bezogen. Hier zeigt sich, dass die normierte Scherkraft mit Zunahme der Korngröße, aufgrund der geringeren spezifischen Oberfläche abnimmt. Es zeigt sich, im Gegensatz zu den Versuchen aus AP2.1, dass bei einer Korngröße von D46 das Maximum der normierten Scherkraft nicht bei einem Chromgehalt von 2 Gew.-% liegt, sondern sich zu einem höheren Chromgehalt von bei 4 Gew.-% verschiebt. Die geringere spezifische Oberfläche der größeren Diamantkörner führt hierbei zu einer Abnahme der Wahrscheinlichkeit einer Karbidanbindung durch den Kontakt von Chrompartikeln und Diamantoberflächen.



**Sinterprozess**

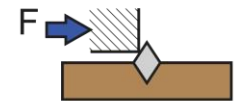
Temperatur = 900 °C  
 Druck = 35 MPa  
 Dauer = 1.200 s  
 Heizrate = 100 °C/min

**Schleifkorn**

Diamant CNF3100  
 Korngröße = D1181  
 Einzelkorn

**Schertest**

Royce Instruments  
 Bond Tester 552  
 Scherwerkzeug: Hartmetall



La/108646 © IFW

Abbildung 4 Topographie der Ausbruchsstelle nach dem Scherversuch. Abhängigkeit der normierten Scherkraft von dem Chromgehalt der Bindung im Einzelkornversuch.

**AP 2.4 Mikroskopisch – dynamisch: Ritzpyramide**

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Kenntnis über das Einsatz- und Verschleißverhalten eines einzelnen chemisch angebondenen Diamantkorns.

Dazu wurden Einkornproben analog zu AP2.3 hergestellt, die mittels dem Wasserstrahlschneiden getrennt und auf einen Trägerstift gefügt wurden. Anschließend wurden Ritzversuche in der Kinetik des Querritzens an einem poliertem K40UF Hartmetall durchgeführt. Hierbei wurden pro Variation des Chromgehaltes in der Bindung (0, 2, 4, 8 Gew.-%) jeweils 18 Einkornproben untersucht. Das Ausbruchs- bzw. Verschleißverhalten lässt sich analog zu AP2.3 klassifizieren (Abbildung 5). Durch die Belastung resultiert bei allen Versuchen, in denen das Korn nach 25 Ritzten noch in der Bindung verbleibt, ein Verdrehen und Einsinken der Körner aufgrund der Duktilität der Bindung. Dabei sinkt das Diamantkorn zusammen mit der Karbidschicht in die Bindung ein. Die Kraft ab der dies geschieht hängt von der Duktilität der Bindung ab und steigt somit mit Erhöhung des Korngehaltes. Betrachtet man die maximale Kraft und die maximale Ritzquerschnittsfläche, steigen diese ebenfalls mit Erhöhung des Chromgehaltes. Eine hohe Härte und somit Steifigkeit der Bindung fördern somit die maximale Belastbarkeit des Korns im Einzelkornritzen. Es ist davon auszugehen, dass thermische Effekte eine untergeordnete Rolle spielen, da keine Bindungsreibung am Prozess beteiligt ist. Die Schlussfolgerungen lassen sich also nicht direkt auf den Einsatz vollständiger Schleifscheiben übertragen, da Wechselwirkungen zwischen thermischen und mechanischen Belastungen sowohl im Schleifwerkzeug, als auch im Werkstück bestehen.

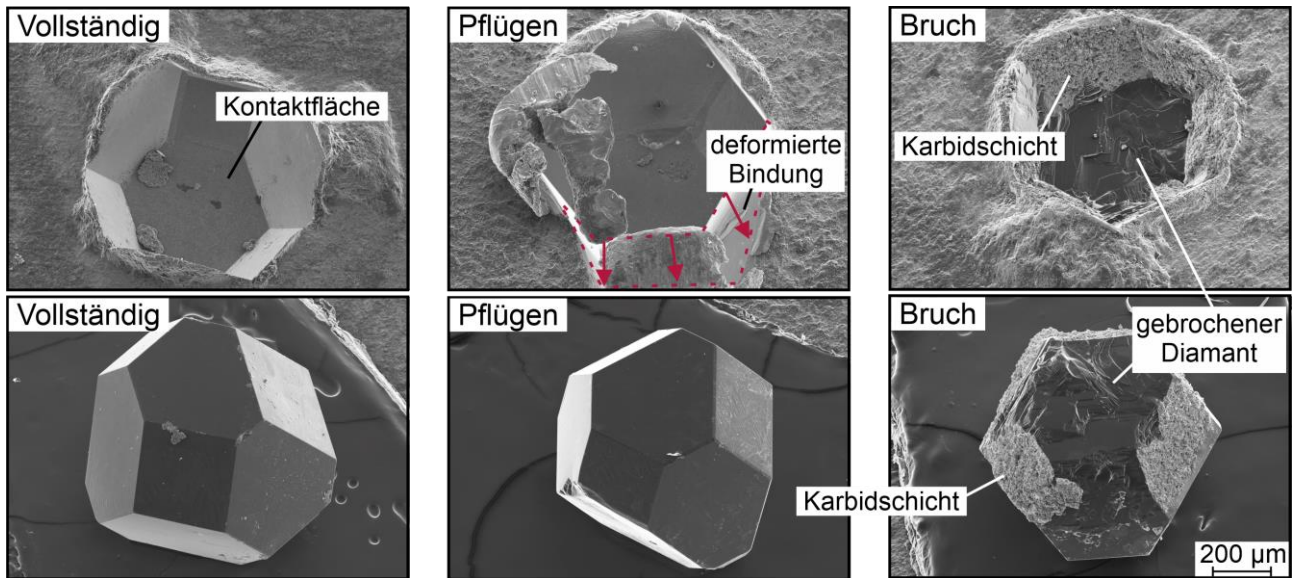


Abbildung 5 Rasterelektronenmikroskopie der Ausbruchsstelle nach 25 Ritzversuchen (oben) und dem dazugehörigen Diamantkorn (unten)

### AP3: Modellbildung

*Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Verfügbarkeit eines Modells zur Beschreibung des Einsatzverhaltens sintermetallischer Diamantschleifscheiben in Abhängigkeit des Anbindungsmechanismus.*

Dazu wurde ein erstes empirisches Teilmodell aus den Ergebnissen aus Arbeitspaket 1 abgeleitet, das den Einfluss der Herstellungsgrößen Temperatur, Sinterzeit und Partikelgröße des Chromzuschlags auf die Porosität und Bruchbiegespannung beschreibt. Zusätzlich wurde ein Modell für den Einfluss der Herstellungsgrößen auf die Wärmeleitfähigkeit erstellt. Die in AP2.3 und AP2.4 gewonnenen Ergebnisse wurden genutzt, um den Zusammenhang zwischen Kornhaltekraft und dem Verschleißverhalten aus AP2.2 zu beschreiben. Hier wird ersichtlich, dass unter Vernachlässigung von thermischen Effekten eine höhere Kornhaltekraft, zusammen mit einer Abnahme der Duktilität der Bindung, zu einem geringeren Verschleiß der einzelnen Körner führt. Im Einsatz von Schleifscheiben kann dieses Verhalten nicht beobachtet werden. Hier zeigt sich vor allem der limitierende Faktor der Kühlung und damit der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Produktivität bzw. den Verschleiß im Schleifprozess. Die maximale Wärmeleitfähigkeit wird bei geringen Chromgehalten erreicht und nimmt mit weiterer Zugabe von Chrom ab. Die geringere Wärmeleitfähigkeit führt, unabhängig von der mechanischen Belastbarkeit, zu einer höheren thermischen Belastung des Werkstücks und einem erhöhten Verschleiß, durch die Bildung von Aufschweißungen. Durch die Modelle kann gezeigt werden, dass sowohl thermische als auch mechanische Effekte bei der Schleifwerkzeugherstellung berücksichtigt werden müssen.

### AP 4: Simulationsmodelle

*Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Verfügbarkeit von Simulationsmodellen zur Beschreibung von Schleifbelägen. Dabei soll insbesondere die Temperaturverteilung innerhalb des Schleifbelags in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit beim Schleifprozess betrachtet werden.*

Um die Temperaturverteilung innerhalb der Schleifscheibe zu beschreiben und zu virtualisieren wurde eine Simulation in der Simulationssoftware ABAQUS aufgebaut. Die Simulation bildet den stationären Zustand des Nutentiefschleifens mit einer Zustellung von 1 mm, einer Eingriffsbreite von 10 mm, einer Schnittgeschwindigkeit von 18 m/s und einer Vorschubgeschwindigkeit von

150 mm/min ab. Die gewählten Prozessstellgrößen stellen Prozessstellgrößen aus AP 2.2 dar, bei denen bei keiner Schleifscheibe eine großflächige Bildung von Aufschweißungen beobachtet wurde. Mittels des Ansatzes von [ROWE95] wurde zunächst der Wärmeverteilungskoeffizient zwischen Werkstück und Werkzeug berechnet. Anschließend konnte über den Gesamtwärmestrom und den Ansatz von [MALK89] der Wärmestrom in Werkstück und Werkzeug berechnet werden. Die berechneten Wärmeströme wurden in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug angelegt und dort die Wärmeübertragung mittels der Annahme von [ÖZER00] berechnet. Außerhalb der Kontaktzone wurde die Wärmeleitung über den Ansatz von [BIRD07] modelliert und dabei eine Umgebungstemperatur von 25 °C angenommen. Die Simulation wurde für die Schleifscheiben mit 50 Vol.-% Diamant unter vierstufiger Variation der Chromgehalte durchgeführt. Für die thermischen Eigenschaften des Schleifbelages wurden die in AP2.1 ermittelte thermischen Eigenschaften der Schleifbelagsprobekörper verwendet. Aus AP2.2 ist die durchschnittliche Schleiftangentialkraft  $F_t$  für die untersuchten Prozessstellgrößen bekannt und dient zur Anpassung des Gesamtwärmestroms an die Variation der Bindung.

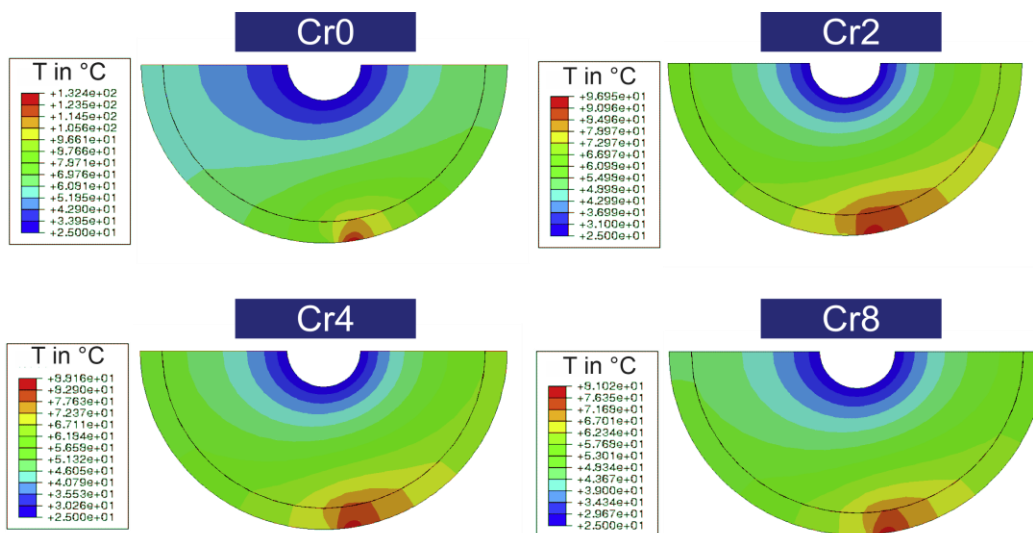


Abbildung 6 ABAQUS-Simulation der Wärmeverteilung innerhalb der Schleifscheibe unter Variation des Chromgehaltes.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit des Schleifbelages eine größere Verteilung der, beim Schleifen entstehenden Wärme, an der Schleifscheibe bewirkt (Abbildung 6). Hierdurch kann in der Simulation die maximale Temperatur in der Schleifkontaktzone um bis zu 51 °C relativ zur Schleifscheibe ohne Karbidbildung gesenkt werden. Die Simulation wurde mittels Temperaturmessung beim Schleifen innerhalb des Schleifbelages verifiziert. Hierzu wurde die im DFG-Vorhaben GR 4878/8-1 entwickelte Vorrichtung genutzt, um die Schleifscheibentemperatur in einer Entfernung von 2,75 mm vom Schleifkontakt im Schleifbelag zu messen (Abbildung 7). Bei dieser Messmethode kommt es ebenfalls zu einer Abnahme der maximalen Temperatur mit der Steigerung der Wärmeleitfähigkeit des Schleifbelages. Der Einfluss der Karbidbildung auf die Wärmeverteilung kann durch die Temperatur bestimmt werden, die auf die bezogene Schleifleistung normalisiert ist. In der Simulation kommt es zu einer geringen, aber stetigen Abnahme, während in den Experimenten ein Minimum bei 2 Gew.-% Chrom besteht, was sich mit den Beobachtungen in AP2.2 deckt. Die Karbidbildung und die damit verbesserte Wärmeleitfähigkeit führt somit zu einer maximalen Abnahme der normalisierten Kontaktzonentemperatur von 17 %. Dies führt zu Abnahme der thermischen Belastung des Werkstücks und verhindert so Randzonenschäden des Hartmetalls. Die verringerte thermische Belastung des Werkstücks zeigen ebenfalls die resultierenden Eigenspannungen. Dabei erhöhen sich die Druckeigenspannungen im Werkstück, beim Einsatz der Schleifscheibe mit einem Chromgehalt von 2 Gew.-%, um +18 % verglichen mit dem Einsatz der Schleifscheibe ohne Karbidbildung.

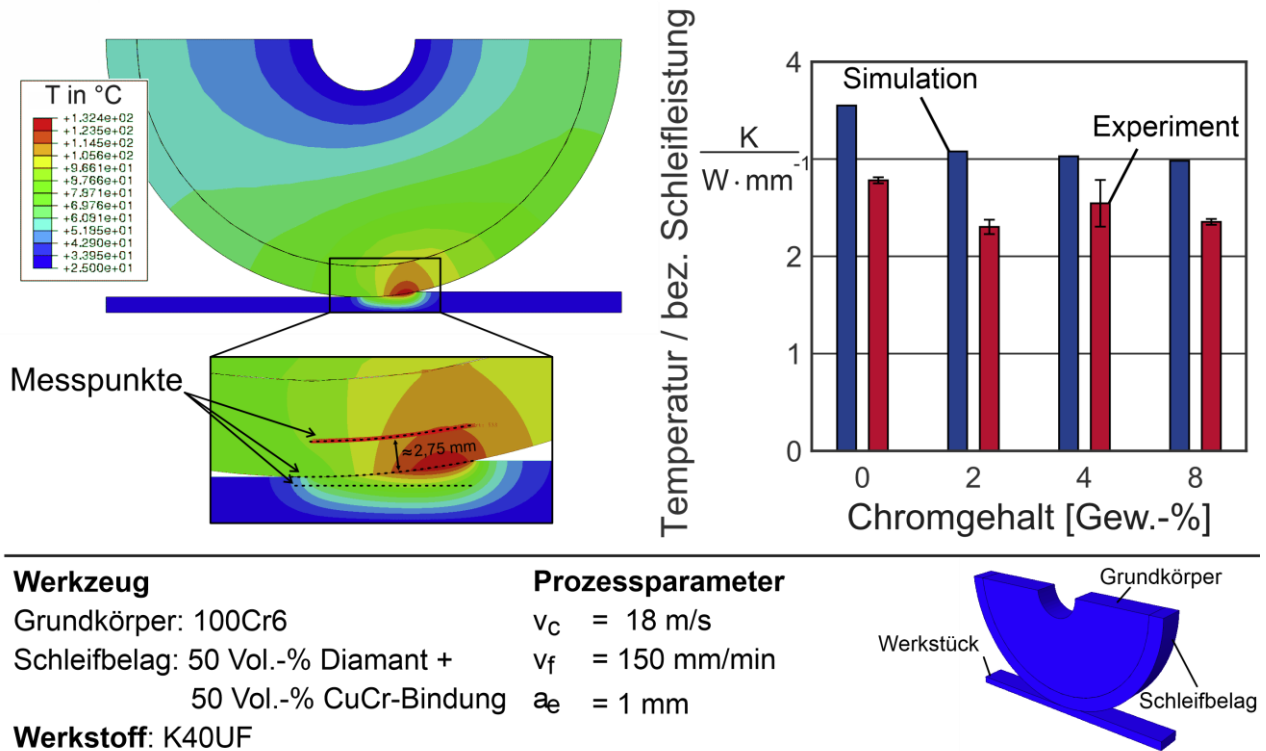


Abbildung 7 Vergleich der, auf die spezifische Schleifleistung bezogene, Temperatur zwischen der Wärmeverteilungs-Simulation und den In-Prozess-Temperaturmessungen-Versuchen.

Neben der thermischen Simulation wurde auch eine mechanische Simulation durchgeführt. Hier wurde, aufgrund des hohen Grades an plastischer Verformung innerhalb der Bindung, bewusst auf die Verwendung von IFW CutS verzichtet und die Simulation mittels FEM in ABAQUS durchgeführt. Die Simulation bildet den Scherversuch aus AP2.3 ab und ermöglicht die Berechnung von Spannungen am Korn-Bindungs-Interface. Hier zeigt sich erneut der Zusammenhang zwischen Steigerung der Kornhaltekräft bzw. der maximal möglichen Spannung am Korn-Bindungs-Interface und der Erhöhung der spezifischen Oberfläche bei Verringerung der Korngröße.

### 3 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Die im Forschungsvorhaben DE447/184-1 erzielten Ergebnisse zur chemischen Anbindung wurden am IFW bereits auf andere Bindungssysteme angewendet. In ersten Versuchen zur Verwendung von keramischer Bindung mit Chrom als Karbidbildner, konnten bereits eine Steigerung der Bruchbiegespannung und der Produktivität der Schleifscheiben gezeigt werden. Der im Projekt entwickelte Analogieversuch zur Bestimmung der Kornhaltekräft aus Arbeitspaket 2.3 soll ebenfalls in einem bereits bewilligten ZIM-Projekt genutzt werden. Hier sollen die Ergebnisse auf die Karbidbildung in galvanischen Bindungen übertragen werden. Weiterhin konnten die Ergebnisse als Vorarbeiten für das bewilligte DFG-Forschungsvorhaben DE 447/286-1 genutzt werden, dessen Bearbeitung 2024 startet. Graphit soll hier zusätzlich zur Karbidbildung die Einbringung von Poren fördern und gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit weiter erhöhen. Durch ein gezieltes paralleles Anpassen der Kornhaltekräfte und der mechanischen Belastbarkeit der Bindung kann dies genutzt werden, um die Freigabe von Körnern aus der Bindung während des Schleifens zu steuern und so eine Selbstschärfung des Schleifbelages zu ermöglichen. Inwiefern sich die Schleifbelageigenschaften durch eine unterschiedliche Ausprägung der Karbidbildung am Korn-Bindungsinterface bzw. am Interface zwischen den Graphitpartikeln und der Bindung ändern und welche Wechselwirkungen zwischen der Chrom- und der Graphitzugabe bestehen, ist bisher nicht bekannt und soll in diesem Forschungsvorhaben untersucht werden. Die Synergien zwischen den beiden Forschungsvorhaben sollen genutzt werden und bereits gewonnene Erkenntnisse zusammen mit neuen Ergebnissen veröffentlicht werden. Verwertungspotential

Die in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse über die chemische Anbindung ermöglichen eine wissensbasierte Auslegung und Anpassung von metallisch gebundenen Schleifscheiben durch die Zugabe von Chrom. Die Forschungsergebnisse können zusätzlich auf andere Bindungssysteme übertragen werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Schleifwerkzeugen mit verschiedenen Eigenschaften, die den Anforderungen verschiedener Anwendungen gerecht werden. Die wissenschaftliche Betrachtung des Einflusses der Karbidbildung auf das Einsatzverhalten ermöglicht schaffte grundlegendes Wissen, dass nicht an einen Anwender bzw. Hersteller gebunden ist und ermöglicht so einen Wissenstransfer über Generationen und verhindert so den Verlust von Wissen in der Schleifwerkzeugherstellung.

### 3.1 Beteiligte Wissenschaftler

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, Institutsleiter

- Wissenschaftliche Begleitung der Arbeiten im Projekt und Diskussion der Ergebnisse

Dr.-Ing. Alexander Krödel-Worbes, ehemaliger Leiter des Bereichs Fertigungsverfahren

- Wissenschaftliche Begleitung der Arbeiten im Projekt und Diskussion der Ergebnisse

Dr.-Ing. Benjamin Bergmann, amtierender Leiter des Bereichs Fertigungsverfahren

- Wissenschaftliche Begleitung der Arbeiten im Projekt und Diskussion der Ergebnisse

M. Sc. Roman Lang, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

- Planung und Durchführung bzw. Begleitung der experimentellen Arbeiten
- Auswertung, Interpretation und Dokumentation der erzielten Ergebnisse
- Betreuung der studentischen Hilfskräfte und studentischen Arbeiten

### Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

#### Studien-/Projektarbeit:

Alexandros Georgiadis:	„Untersuchung des Einflusses der Belagszusammensetzung von Schleifscheiben mit chemisch angebundenem Schleifkorn auf das Einsatzverhalten“
Felix Dücke:	„Untersuchung des Einflusses des Chromgehaltes in bronze-gebundenen Schleifscheiben auf die Diamantkornanbindung und das Einsatzverhalten“
Xing Zheng	„Simulation des Kornausbruchverhaltens in kupfer-gebundenen Diamantschleifscheiben in Abhängigkeit des Chromgehaltes“
Othman Rashidat	„Untersuchung des Einflusses der Belagszusammensetzung von Schleifscheiben mit chemisch angebundenem Schleifkorn auf das Einsatzverhalten“

#### Masterarbeit:

Alexandros Georgiadis:	„Untersuchung des Einflusses der Chrom-Karbidanbindung von Diamant in Kupfermatrix auf die Haltekräfte eines Einzelkorns“
Malte Siegfried	„Untersuchung des Einflusses der Chrom-Karbidanbindung von Diamant in Kupfermatrix auf das dynamische Einsatzverhalten eines Einzelkorns“
Nima Farahmandpour	„Einfluss der thermischen Eigenschaften einer CuCr-Bindung auf die Wärmeaufteilungsfaktoren beim Flachsleifen von Hartmetall“

## 4 Zusammenfassung

Das Einsatzverhalten von sintermetallisch gebundenen Diamantschleifscheiben ist von verschiedenen Faktoren abhängig, darunter den Eigenschaften des Bindungssystems und ihrer Herstellungsprozesse. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Zusammenhänge zwischen der chemischen Bindung von Diamanten im Bindungssystem, den Schleifbelageigenschaften und dem Einsatzverhalten der Werkzeuge im Schleifprozess zu verstehen. Arbeitspaket 1 befasst sich mit den Bindungsmechanismen. Es wurden Sinterversuche durchgeführt, um die Auswirkungen von Sinter-temperatur, Sinterzeit und Chrompartikelgröße auf die Bruchbiegespannung zu untersuchen. Eine Bildung von Chromkarbid konnte nachgewiesen werden, wobei niedrigere Partikelgrößen zu einer erhöhten Benetzung der Diamantoberfläche führten. Arbeitspaket 2 untersucht die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Bindung. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Zugabe von Chrom die Bruchbiegespannung und die Wärmeleitfähigkeit signifikant erhöhen kann. In AP2.1 wurden makroskopisch-statisch die Auswirkungen von Chromgehalten und Diamantkonzentrationen auf die Bruchbiegespannung und die Wärmeleitfähigkeit der Schleifscheiben analysiert. AP2.2 betrachtete makroskopisch-dynamisch das Einsatzverhalten der Schleifscheiben und zeigte, dass eine moderate Zugabe von Chrom die Schleifkräfte senkt. AP2.3 fokussierte sich mikroskopisch-statisch auf Einzelkornproben und untersuchte die Kornhaltekraft und die Ausbruchmechanismen. Eine höhere Chromkonzentration führte zu einer erhöhten Kornhaltekraft. AP2.4 betrachtete mikroskopisch-dynamisch das Verschleißverhalten eines einzelnen Diamantkorns. Es zeigt sich, dass eine höhere Härte der Bindung die Belastbarkeit des Korns erhöht. In AP 4 wurden Simulationsmodelle zur Beschreibung der Schleifbeläge entwickelt. Die Simulationen zeigen, dass eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit zu einer besseren Wärmeverteilung und niedrigeren Temperaturen in der Schleifkontaktzone führt. Insgesamt liefert diese Forschung wichtige Erkenntnisse über die chemische Bindung von Diamanten in Schleifscheiben, die Auswirkungen auf ihre Eigenschaften und ihr Einsatzverhalten haben. Die gewonnenen Erkenntnisse können dazu beitragen, Schleifwerkzeuge gezielt anwendungsspezifisch anzupassen und deren Leistungsfähigkeit zu steigern.

## 5 Literaturverzeichnis

- [BIRD07] Bird, R.; Byron, S. Warren, E. Edwin, N. Transport phenomena Volume 1, Wiley & Sons, New York, NY (2007).
- [MALK89] Malkin, S.; Ritter, J. E. Grinding Mechanisms and Strength Degradation for Ceramics. ASME. J. Eng. Ind. 111(2): 167-174. (1989).
- [ÖZER00] Özerdem, B. Measurement of convective heat transfer coefficient for a horizontal cylinder rotating in quiescent air. International Communications in Heat and Mass Transfer. Volume 27, Issue 3. (2000). [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(00\)00119-6](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(00)00119-6)
- [ROWE95] Rowe, W. B.; Black, S.C.E.; Mills, B.; Qi, H. S.; Morgan, M. N. Experimental Investigation of Heat Transfer in Grinding. CIRP Annals Volume 44, Issue 1 (1995). [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62336-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62336-1)
- [ZHAN11] Zhang, X.; Guo, H.; Yin, F. et al. Interfacial microstructure and properties of diamond/Cu-xCr composites for electronic packaging applications. Rare Metals 30, 94-98 (2011). <https://doi.org/10.1007/s12598-011-0204-x>