

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-05-83
Datum der Einreichung: 13.02.2026
Datum der Annahme: 08.04.2026
Datum der Veröffentlichung: 24.06.2026

Titanbeschichtete Diamanten

Mehr Kornhaltekraft in galvanischen Schleifstiften

M. Maier, B. Denkena, B. Bergmann

ZUSAMMENFASSUNG Galvanisch nickelgebundene Dentschleifwerkzeuge sind mit Umwelt- und Gesundheitsrisiken verbunden. Im Forschungsprojekt „GreenDentalGrind“ wird daher eine nachhaltige Kupferbindung als Alternative entwickelt. Durch den Einsatz titanbeschichteter Diamantkörner und eine prozessintegrierte Wärmebehandlung zur Bildung von Titankarbid soll die Anbindung der Körner verbessert und eine vergleichbare Leistungsfähigkeit zu konventionellen Nickelsystemen erreicht werden.

STICHWÖRTER

Dentaltechnik, Galvanik, Schleifwerkzeugherstellung

Titanium-Coated Diamonds – Improved Abrasive Grain Retention in Electroplated Grinding Tools

ABSTRACT Electroplated nickel-bonded dental grinding tools are associated with environmental and health concerns. Within the “GreenDentalGrind” project, a sustainable copper bond is being developed as an alternative. By using titanium-coated diamond grits and a process-integrated heat treatment to form titanium carbide, grit retention is enhanced to achieve performance comparable to conventional nickel-bonded systems.

1 Einleitung

Diamantschleifstifte zur Bearbeitung von Dentalkeramiken werden industriell überwiegend galvanisch mit Nickelbindung hergestellt. Die Nickelgalvanik ist jedoch mit relevanten Umwelt- und Gesundheitsrisiken verbunden. So erfordern toxische Abwässer beispielsweise eine aufwendige Reinigung. Zudem können während der Nutzung Nickelionen freigesetzt werden, die Kontaktallergien begünstigen und das Krebsrisiko bei Exposition erhöhen. Nickelrückstände in geschliffenen Zahnprothesen sind potenziell kritisch. Zudem ist Nickel mit 14 225 €/t teurer und weniger verfügbar als Kupfer mit circa 11 775 €/t, während in Europa rund die Hälfte des Kupfers aus Recycling stammt [1–3].

Um das Potenzial von Kupfer zu nutzen, wird am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover im Projekt „GreenDentalGrind“ gemeinsam mit der Firma Philipp Persch Nachf. KG ein umweltfreundliches und gesundheitsschonendes Dentschleifwerkzeug mit Kupferbindung entwickelt. Da Nickel im Vergleich zu Kupfer eine geringere Duktilität, eine höhere Festigkeit sowie eine stärkere Affinität zum Diamanten aufweist, werden bei nickelgebundenen Werkzeugen unbeschichtete Diamantkörner eingesetzt. Zur Kompensation der Nachteile der Kupferbindung wird hingegen ein Haftvermittler in Form von Titankarbid (TiC) genutzt. Dafür werden titanbeschichtete Diamantkörner eingesetzt, die durch eine Wärmebehandlung zu Titankarbid reagieren. Dies führt zu höheren Kornhaltekräften. Untersuchungen am IFW haben gezeigt, dass Karbide bei Zugabe von pulverförmigem Chrom in einer Sintermischung mit Diamanten bereits bei etwa 720 °C entstehen können [4, 5]. Das Ziel besteht darin, eine nachhaltige Alternative

zur Nickelgalvanik zu entwickeln, die die Umwelt- und Gesundheitsrisiken reduziert und ein vergleichbares Einsatz- und Verschleißverhalten wie Nickel ermöglicht. Insbesondere wird dadurch das Risiko einer Kontamination der Dentalkeramiken mit Nickelrückständen sowohl während der Bearbeitung als auch bei der Herstellung der Schleifwerkzeuge minimiert, wodurch sich die Biokompatibilität der Dentalkeramiken zusätzlich erhöht.

2 Projektbeschreibung

Für die Untersuchung wurden Probekörper entwickelt, die eine detaillierte Untersuchung der grundlegenden Karbidbildung nach einer Wärmebehandlung ermöglichen. Die galvanische Herstellung der einschichtig belegten Probekörper aus Kupfer und Nickel wurde von der Firma Philipp Persch Nachf. KG übernommen. Am IFW wurde die Wärmebehandlung mit anschließender Charakterisierung der Probekörper durchgeführt.

Zur prozessintegrierten Synthese der Titankarbidsschicht wurden Flachstahlproben in einem Kupferelektrolyt mit titanbeschichteten Diamanten belegt und galvanisiert. Anschließend wurden die Proben in der FAST-Sinterpresse „DSP510“ der Dr. Fritsch Sondermaschinen GmbH unter Vakuum bei 800 °C beziehungsweise 900 °C für 900 s wärmebehandelt, sodass der Kohlenstoff des Diamanten mit der Titanbeschichtung reagierte und im Grenzbereich zwischen Diamantoberfläche und Beschichtung TiC bildete. Aufgrund der gemischt metallisch-kovalenten Bindungsnatur des Titankarbids kann es sich sowohl mit Diamanten als auch mit metallischen Bindungen verknüpfen [6]. Die resultierende TiC-Grenzschicht bewirkt eine stärkere Anbindung der Diamanten an die Kupfermatrix und kompensiert ihr duktilen

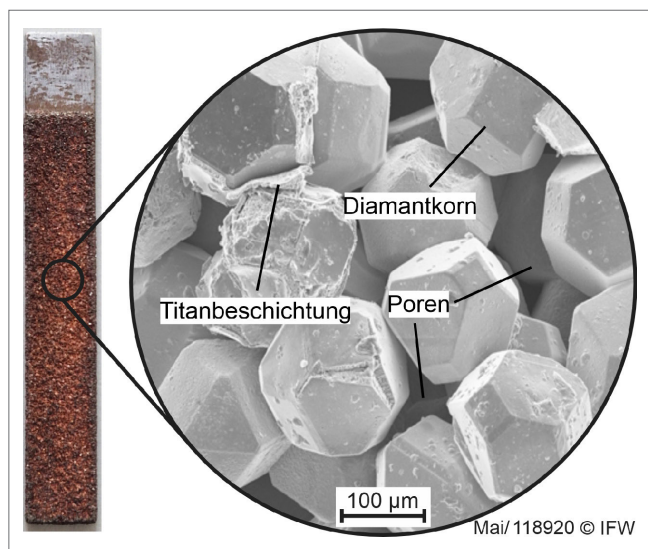


Bild 1 Flachstahlprobe mit galvanisch abgeschiedenen, titanbeschichteten Diamantkörnern in einer Kupfermatrix. Grafik: IFW, Leibniz Uni Hannover

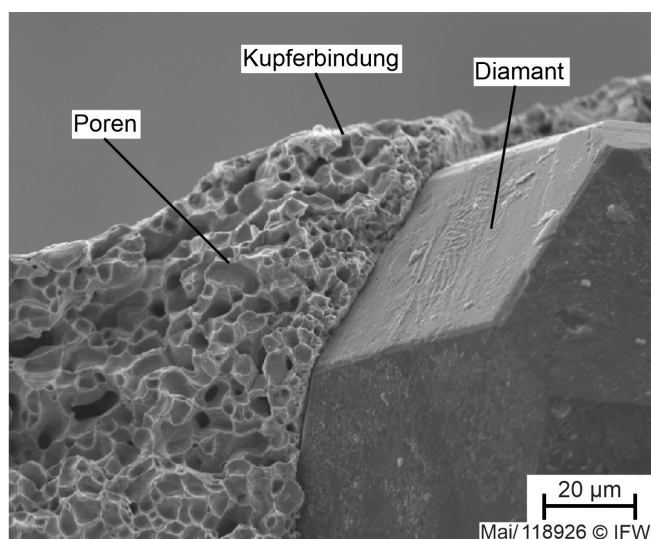


Bild 2 Morphologie der Probekörper. Grafik: IFW, Leibniz Uni Hannover

Verhalten. Dadurch steigt die Kornhaltekraft und es wird eine Steigerung der Werkzeugstandzeit und der Produktivität ermöglicht.

Zum Nachweis der Karbidschichten wurden die Flachproben nach der Wärmebehandlung angeschnitten und gebrochen, um Bruchflächen mit freiliegenden beziehungsweise ausgebrochenen Diamanten zu erzeugen. Rasterelektronenmikroskopische (REM)-Aufnahmen mit einem energie-dispersivem (EDX)-Mapping visualisieren die Elemente Titan, Kohlenstoff und Kupfer, erlauben jedoch keinen direkten Phasennachweis. Daher wird ergänzend eine röntgendiffraktometrische Analyse (XRD) durchgeführt, indem die Proben in 65 %iger Salpetersäure entkupfert werden, die freigelegten Diamanten mit Kobalt-K α -Strahlung gemessen und die Reflexe mit der Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) abgeglichen.

3 Prozessoptimierung

Eine der größten technischen Herausforderungen bei der Umsetzung des Projekts lag in der Sicherstellung einer gut handhabbaren und reproduzierbaren galvanischen Abscheidung. Da titanbeschichtete Diamantkörner elektrisch leitfähig sind, lagern sich Kupferionen während der Galvanisierung bevorzugt an exponierten Stellen der Körner an. Dies führt zur Porenbildung, **Bild 1**, was sowohl die mechanische Bindung als auch die Wärmeleitfähigkeit der Kupfermatrix erheblich beeinträchtigt. Die REM-Aufnahmen zeigen zudem, dass die Diamanten teilweise gestapelt vorliegen und keine ausreichende Verbindung zueinander ausbilden. Um diese Effekte zu minimieren, wurden die Prozessparameter der Galvanik iterativ angepasst, um eine gleichmäßigere Kornverteilung und eine verbesserte Einbettung der Diamantkörner zu erreichen. Die ersten hergestellten Probekörper wiesen daher im Vergleich zu galvanisierten oder gesinterten Schleifbelägen aufgrund einer starken Porenbildung nur eine sehr geringe Festigkeit auf, sodass Diamantkörner bereits bei geringer mechanischer Belastung aus der Matrix herausbrachen.

Neben dem galvanischen Aufbau erwies sich auch die Wärmebehandlung als zentraler Prozessschritt. Sie wurde bei 800 °C und 900 °C durchgeführt, den Prozesstemperaturen, bei denen eine Karbidbildung erfahrungsgemäß erwartet wird. In diesem Temperaturbereich sollte sich eine Titankarbidschicht an der Diamantoberfläche ausbilden, die für eine verbesserte Anbindung der Diamantkörner an die Kupfermatrix essenziell ist. Der Nachweis des Karbids erfolgte anschließend qualitativ mittels XRD.

Eine weitere Herausforderung bestand in der Übertragung des optimierten Galvanikprozesses von einfachen Flachstahlproben auf geometrisch komplexere Schleifstifte. Für diese Werkzeuge mussten die Prozessparameter erneut angepasst werden, um trotz der anspruchsvolleren Bauteilgeometrie eine gleichmäßige, belastbare sowie funktionsgerechte Anbindung der Diamantkörner sicherzustellen.

4 Ergebnisse

Nach iterativer Optimierung des Galvanikprozesses zeigt **Bild 2** einen kupfergebundenen Probekörper mit reduzierter Porosität. Die Festigkeit dieser angepassten Bindung ist hoch genug, sodass eine feste Bindung vorliegt. Diese ist auf die elektrische Leitfähigkeit der Titanbeschichtung zurückzuführen und konnte bislang nicht vollständig vermieden werden.

Im Anschluss an die Herstellung der Flachstahlproben erfolgte die Wärmebehandlung. Dabei ist eine Veränderung des Probenerscheinungsbildes von glänzend zu matt zu beobachten, die auf Veränderungen in der Oberflächenstruktur hinweist. Die logarithmische Auftragung der Intensitätspeaks der Röntgendiffraktometrie (XRD), dargestellt in **Bild 3**, weist für beide untersuchten Temperaturen (800 °C und 900 °C) charakteristische Reflexe von Titankarbid (TiC) bei 2 θ -Werten von 42,1° und 49° nach.

Auffällig ist, dass die Peaks bei 800 °C deutlich ausgeprägter erscheinen, was an lokalen Messbedingungen oder der Orientierung der TiC-Kristallite auf den Diamantkörnern liegen kann.

Des Weiteren kann bei Temperaturen über 800 °C eine weniger intensive Ausbildung der TiC-Kristallite vorliegen, aufgrund von Nebenreaktionen oder Rückreaktionen. Eine Quantifizierung des Anteils von Titankarbid ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich.

Zur Bewertung der Kornhaltekraft im direkten Vergleich von konventionell nickelgebundenen Schleifstiften und den neuen kupfergebundenen Varianten wurden Einzelkornproben mit D851-Körnern gefertigt (**Bild 4**).

In Übereinstimmung mit der industriellen Praxis wurden die Nickel-Referenzproben mit unbeschichteten Diamanten gefertigt, wohingegen die neuen kupfergebundenen Proben titanbeschichtete Diamanten enthielten und anschließend wärmebehandelt wurden. Die mechanische Prüfung erfolgte mittels Scherkraftmessung. Genutzt wurde das Messgerät von Royce Instrumentals mit einem Wolframkarbidmeißel. Der Scherkraftmeißel drückt dabei das Diamantkorn bis zum Ausbruch aus der Matrix oder bis zum Bruch des Diamanten (vgl. **Bild 5**). Dabei wird die maximale Kraft, die zum Ausbruch oder Kornbruch benötigt wird, gemessen.

Die Analyse der Ausbruchmechanismen ergab, dass bei nickelgebundenen Proben infolge der spröden Matrix nahezu ausschließlich Kornbruch beobachtet wurde. Demgegenüber dominierte bei kupfergebundenen Proben der Ausbruch der Diamanten in Form eines Herausdrückens oder Hineindrückens, das auf die ausgeprägte Duktilität der Kupfermatrix zurückzuführen ist. Auffällig war zudem, dass sich die Kupferschicht während des Versuchs teilweise in die Diamanten eindrückte oder abgescher wurde (vgl. **Bild 5**).

Insgesamt zeigen die kupfergebundenen Proben nach einer Wärmebehandlung bei 900 °C die geringsten Kornhaltekräfte mit durchschnittlich $81,1 \text{ N} \pm 14,4 \text{ N}$. Die kupfergebundenen Einzelkornproben erreichen mit $89,5 \text{ N} \pm 22,3 \text{ N}$ vergleichbare Kornhaltekräfte wie die nickelgebundenen Referenzproben mit $93,3 \text{ N} \pm 21,5 \text{ N}$. Als Versagensmechanismus tritt bei den nickelgebundenen Einzelkornproben überwiegend Kornbruch auf, was auf die vergleichsweise geringe Duktilität der Bindung zurückzuführen ist. Bei den kupfergebundenen Proben führen die duktilen Eigenschaften des Kupfers hingegen dazu, dass die Diamantkörner vermehrt aus der Bindung herausgedrückt werden. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Wärmebehandlung im richtigen Temperaturbereich gezielt die Kornhaltekräfte erhöht. Insbesondere die bei 800 °C behandelten Kupferproben erreichen im Mittel höhere Kornhaltekräfte als die bei 900 °C behandelten Proben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei 800 °C mehr TiC aus den titanbeschichteten Diamantkörnern gebildet wird, wodurch die Bindung zwischen Diamant und Kupfermatrix stärker ist. So kann die Kornhaltekraft gezielt durch die Wahl der geeigneten Wärmebehandlung optimiert werden. Aufgrund der hohen Streuung der Einzelkornmessungen ist jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Bindungssystemen und Wärmebehandlungen hinsichtlich der Diamantanbindung feststellbar. Dennoch wird deutlich, dass kupfergebundene titanbeschichtete Diamantwerkzeuge Kornhaltekräfte auf dem Niveau konventioneller Nickelsysteme erreichen. Somit stellen Dentschleifwerkzeuge mit Kupfergalvanik eine vielversprechende Alternative zur Nickelgalvanik dar. Das Einsatzverhalten dieser neuartigen Werkzeuge wird daher im nächsten Schritt untersucht und mit nickelgebundenen Werkzeugen verglichen.

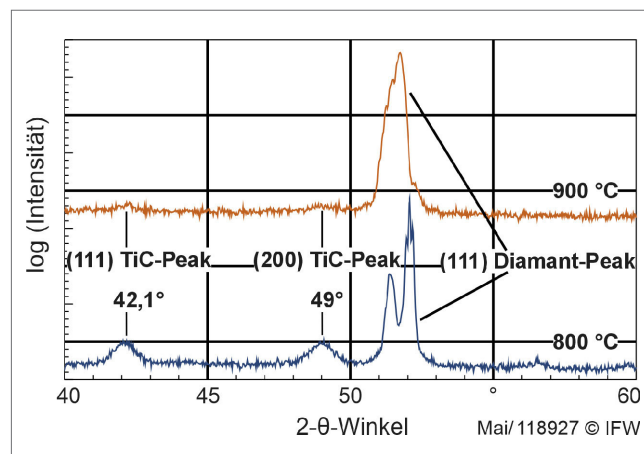


Bild 3 XRD-Messung der wärmebehandelten Diamanten (oben 900 °C, unten 800 °C). Grafik: IFW, Leibniz Uni Hannover

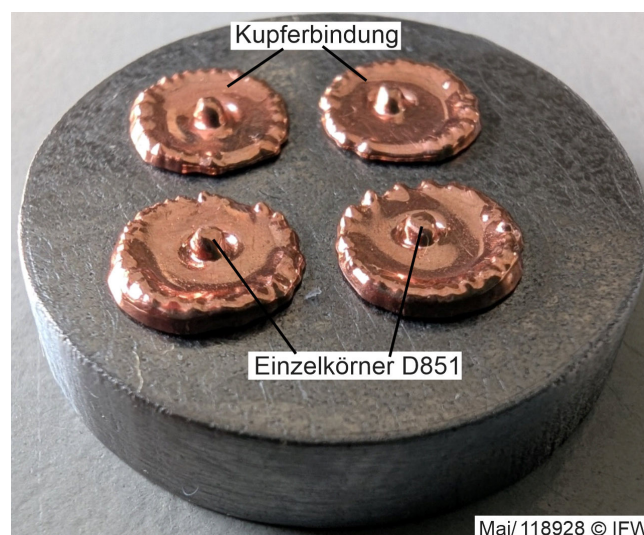


Bild 4 Exemplarischer Probekörper der Einzelkornproben mit Kupferbindung. Grafik: IFW, Leibniz Uni Hannover

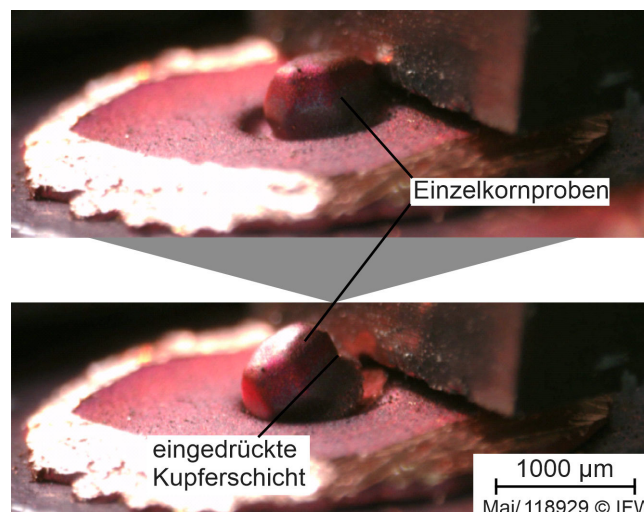


Bild 5 Einzelkornproben vor und nach dem Scherversuch. Grafik: IFW, Leibniz Uni Hannover

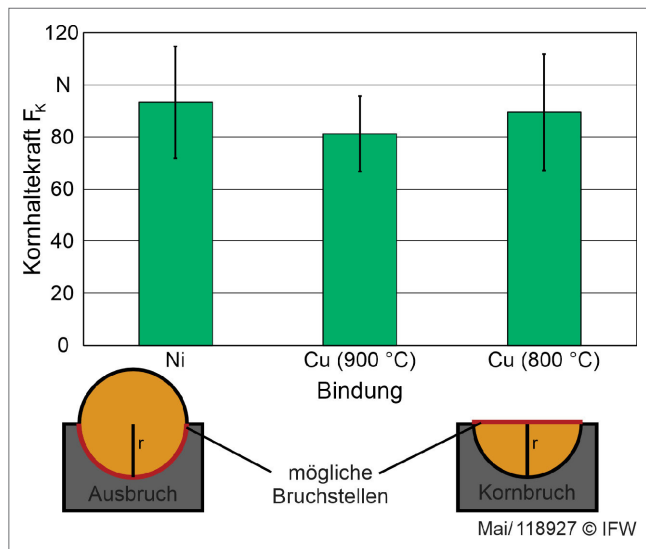


Bild 6 Kornhaltekraft der Einzelkornproben und Darstellung der Ausbruchstellen. Grafik: IFW, Leibniz Uni Hannover

5 Ausblick

Zur Verifizierung des Potenzials der Kupferbindung werden im nächsten Schritt experimentelle Einsatzuntersuchungen mit kupfer- und nickelgalvanisierten Schleifstiften durchgeführt. Die Versuche erfolgen auf einer „Ultrasonic 10“ von DMG. Zunächst werden zylindrische Schleifstifte mit flacher Stirnfläche und einem Durchmesser von 6 mm hergestellt und in Flachsleifprozessen eingesetzt. Als Werkstoff dienen Zirkoniumdioxidplatten mit einer Dicke von 5 mm. Ziel dieser Untersuchungen ist die Ermittlung der maximal zulässigen Prozessstellgrößen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden die ermittelten Prozessparameter anschließend auf einen 5-Achs-Schleifprozess übertragen. Dabei erfolgt die Fertigung einer komplexen Geometrie aus der Dentaltechnik unter Verwendung von Zirkoniumdioxid-Keramik-

blöcken. Hierfür kommen abgestuft zylindrisch geformte Schleifstifte zum Einsatz, die ebenfalls in Kupfer- beziehungsweise Nickelgalvanik hergestellt werden. Die Wärmebehandlung der titanbeschichteten Diamantschleifwerkzeuge in Kupfermatrix erfolgt gezielt bei 800 °C, da unter diesen Bedingungen die höchsten Kraftwerte sowie die besten Ergebnisse in den XRD-Messungen erzielt wurden.

Literatur

- [1] Ahlström, M. G.; Thyssen, J. P.; Wennervaldt, M. et al.: Nickel allergy and allergic contact dermatitis: A clinical review of immunology, epidemiology, exposure, and treatment. Wiley 81 (2019) 4, S. 227–241
- [2] KME, M. P.: London Metal Exchange Referenzpreise. Internet: <https://www.kme.com/en/services/metal-prices>. Zugriff am 16.12.2025
- [3] Symeon Christofyllidis: Europe's demand for copper is increasingly met by recycling. Stand: 09.11.2020. Internet: <https://internationalcopper.org/resource/circularity-and-recycling-in-the-eu/>. Zugriff am 29.07.2025
- [4] Denkena, B.; Bergmann, B.; Lang, R.: Optimierung von Diamantschleifscheiben. VDI-Z (2022) 64, S. 42–44
- [5] Denkena, B.; Bergmann, B.; Lang, R.: Metallisch gebundene Diamantschleifscheiben mit Zugabe von Chrom als Karbidbildner. Diamond Business (2022) 4, S. 26–31
- [6] Råsander, M.: A Theoretical Perspective on the Chemical Bonding and Structure of Transition Metal Carbides and Multilayers. Dissertation, Uppsala University, 2010

Michael Maier 
maier@ifw.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

Dr. Benjamin Bergmann

IFW - Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen 
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifw.uni-hannover.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)