

Neue nanostrukturierte Nitrid-Volumenhardtstoffe – Mit Hochdruck an neuen Materialien forschen! – Die Dr. Erich-Krüger-Stiftung trägt weitere Früchte –

Kevin Keller



Abb. 1: Labore des Freiburger Hochdruckforschungszentrums (FHP). (a) 1000-t-Hochdruckpresse mit verschiedenen Modulen (Multi-anvil Walker-Modul und Toroid-Modul), (b) Sprengkammer des untertägigen Schockwellenlabors, errichtet mit Mitteln der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung

Warum neue Hartstoffe?

Hartstoffe stellen eine bedeutende Schlüsseltechnologie für eine Vielzahl von High-Tec-Branchen u. a. im Bereich des Maschinenbaus und des Bergbaus dar. Vor allem in der Metall- und Keramikbearbeitung (Sägen, Schneiden, Bohren, Drehen, Fräsen, Schleifen, Polieren) sowie der Rohstoffgewinnung, -aufbereitung und -bearbeitung (Tiefbohren, Sägen, Brechen, Mahlen, Meisseln) kommen in zahlreichen Prozessen Hartstoffe zum Einsatz – überall da, wo Materialien möglichst lange und möglichst schnell kontinuierlich bearbeitet werden müssen.

Die Hälfte der dabei eingesetzten Hartstoffe gehört zur Gruppe der Hartmetalle (insbesondere WC-Co) und ein Viertel sind Schnellarbeitsstähle (HSS). Das verbleibende Viertel teilen sich Keramiken, Cermets (Keramiken mit metallischem Binder), Diamant und kubisches Bornitrid (c-BN). Insbesondere die letzten beiden Hartstoffe – die zwei härtesten bekannten Stoffe – werden aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften für die Bearbeitung besonders harter und zäher Werkstoffe und in Gebieten, in denen es auf eine hohe Präzision ankommt, eingesetzt.

Aber selbst diese Materialien haben ihre Grenzen: Diamant verbrennt bei zu hohen Temperaturen bzw. wandelt sich in Graphit um. Außerdem reagiert Diamant mit Eisen, weshalb er nicht für die Bearbeitung eisenhaltiger Legierungen eingesetzt werden kann. Diamant und c-BN werden in der Regel durch einen sogenannten Binder zu einem kompakten Körper zusammengefügt, wobei diese metallischen oder keramischen Binderphasen den Schwachpunkt des Werkstoffs darstellen und damit den Einsatz insbesondere bezüglich der erreichten Härten und der maximalen Temperatur limitieren. Daneben wird in vielen Prozessen ein immer höherer Anspruch an die Oberflächenqualität des bearbeiteten Werkstücks gestellt, wobei die bisherigen zumeist mikroskaligen Hartstoffe an ihre Grenzen kommen. Darüber hinaus müssen selbst diese Hochleistungshartstoffe gekühlt werden, um eine lange Standzeit des Werkzeugs zu gewährleisten und ein vorzeitiges Versagen zu verhindern. Aufgrund der Zusammensetzung der Kühlflüssigkeiten stellt dies einen

zusätzlichen nicht zu vernachlässigenden Umweltaspekt dar.

Ein weiterer Nachteil einer Vielzahl der derzeit eingesetzten Hartstoffe ist, dass sie oftmals die kritischen Rohstoffe¹ Wolfram und Kobalt enthalten. Insbesondere in den weit verbreiteten Hartmetallen, aber auch den metallisch gebundenen Diamant-Hartstoffen (PKD), werden Wolfram und/oder Kobalt eingesetzt.² Aufgrund des wirtschaftlichen Risikos hinsichtlich der Verfügbarkeit der Rohstoffe, aber auch sozioökonomischer und ethischer Gesichtspunkte (Kinderarbeit, Einsatz giftiger und umweltschädlicher Chemikalien) wird eine Umstellung auf Materialien, die auf kritische Rohstoffe verzichten, angestrebt.

An diesen Punkten setzt die BMBF-Nachwuchsforschergruppe N³V an, mit dem Ziel neue Hartstoffe zu entwickeln, welche die oben genannten Nachteile nicht besitzen und auf den Einsatz kritischer Rohstoffe komplett verzichten können.

Das Freiburger Hochdruckforschungszentrum (FHP) und die bisherige Hartstoff-Forschung

Die beiden Professoren Dr. Gerhard Heide (Institut für Mineralogie) und Dr. Edwin Kroke (Institut für Anorganische Chemie) forschen seit 2005 an der TU Bergakademie Freiberg an Hochdruckverfahren mit der Entwicklung neuer Hartstoffe als einem Schwerpunkt. Es wurden parallel zwei Hochdruck-Labore aufgebaut: ein Labor für statische Experimente mit einer 1000-t-Hochdruckpresse sowie das Schockwellenlabor im Forschungs- und Lehrbergwerk „Reiche Zeche“ für dynamische Versuche (Abbildung 1).

- 1 Rohstoffe, die von hoher ökonomischer Bedeutung sind, bei denen jedoch kein freier und fairer Zugang auf dem Weltmarkt sowie keine dauerhafte Versorgung aus Rohstoffquellen innerhalb Europas gegeben ist. Quelle: Europäische Kommission, https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- 2 In 80 Prozent der eingesetzten Werkzeuge in der Metallzerspanung sind kritische Rohstoffe enthalten. Der jährliche Verbrauch in der Metall- und Gesteinsbearbeitung beträgt 28.000 t Wolfram und 6.000 t Kobalt. Quelle: K. Brookes (2001) „There's more to hard materials than tungsten carbide alone“, Metal Powder Report 66 (2), S. 36–45

In einer Reihe von Projekten wurden gemeinsam mit Kollegen anderer Institute und Fachrichtungen neue Materialien mittels Hochdrucksynthesen hergestellt, charakterisiert und getestet. Der Einsatz hoher Drücke ($> 1 \text{ GPa} = 10.000 \text{ bar}$) und hoher Temperaturen führt bei vielen Stoffen zu einer strukturellen Umwandlung und damit zur Veränderung der makroskopischen Eigenschaften. Durch die dichtere Neuordnung der Atome und Moleküle können stärkere chemische Bindungen entstehen und damit härtere Phasen hergestellt werden. So ist es z. B. auch bei Diamant, dem härtesten bekannten Material (Mohs-Härte 10). Chemisch gesehen ist der Diamant nur Kohlenstoff – wie auch das viel weichere Ausgangsmaterial Graphit (Mohs-Härte 1), das für Bleistiftminen eingesetzt wird. Durch den Einsatz hoher Drücke ($> 13 \text{ GPa}$) und Temperaturen ($> 3000 \text{ °C}$) werden die Kohlenstoffatome des Graphits dazu gezwungen, neue Bindungen auszubilden, was beispielsweise in einer höheren Dichte und der extremen Härtesteigerung resultiert.

Einen besonderen Aufwind bekam die Hochdruckforschung in Freiberg im Jahr 2006 durch die Ausschreibung des ersten Dr.-Erich-Krüger-Forschungskollegs. Acht Professoren aus vier Fakultäten stellten ihre Idee zur Entwicklung neuer Materialien für Tiefbohrungen vor und konnten sich damit gegen die anderen Vorschläge durchsetzen: das Freiburger Hochdruckforschungszentrum (FHP) war geboren (Abbildung 2). Das über sechs Jahre laufende Projekt (2007–2012) brachte die Wissenschaftler eng zusammen, um entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu forschen – angefangen von der Simulation neuer Materialien (Theoretische Physik), der Synthese und Verdichtung neuer Materialien (Anorganische Chemie, Mineralogie und Werkstoffwissenschaften), der Untersuchung von Struktur-Eigenschaftskorrelationen (Werkstoffwissenschaften), dem Test der Materialien unter extremen Bedingungen (Werkstofftechnik), der Untersuchung der Prozesse bei der Gesteinsbearbeitung (Geotechnik), bis hin zum Prototypenbau (Bohrtechnik und Fluidbergbau). Die Ergebnisse des Projekts waren so vielversprechend, dass ausgewählte Themen in einem Transferprojekt (2012–2015) weitergeführt wurden. Auch der durch das Projekt finanzierte Bau des untertägigen Schockwellenlabors, das 2011 in Betrieb genommen werden konnte, ermöglicht neue Dimensionen von Versuchen und schafft damit in der Forschungslandschaft einzigartige Bedingungen, neue Materialien durch Sprengstoffdetonation zu erzeugen. Das Plattieren, Delaminieren, Sintern, Umformen und auch das Testen sind dadurch ebenso möglich geworden wie auch die Synthese von Phasen, wie sie beispielsweise im unteren Erdmantel auftreten.



Abb. 2: Beteiligte Professoren bei der Gründung des Freiburger Hochdruckforschungszentrum (v.l.): Edwin Kroke, Gerhard Heide, Hans-Jürgen Seifert, Matthias Reich, David Rafaja, Jens Kortus, Lutz Krüger und Heinz Konietzky

Das Freiburger Hochdruckforschungszentrum (FHP) hat sich über die letzten 13 Jahre zu einer international angesehenen Einrichtung der Hochdruckforschung entwickelt. Durch die methodische Kombination von statischen und dynamischen Versuchen konnten einzigartige Forschungsvoraussetzungen geschaffen werden. Durch mehrere Anschlussprojekte und Kooperationen mit Firmen hat die Förderung des ursprünglichen FHP durch die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung auch heute noch eine große Auswirkung. So führten nicht zuletzt die große Expertise durch thematisch bezogene Projekte und die außergewöhnlichen Forschungsbedingungen dazu, dass die BMBF-Nachwuchsforschungsgruppe *Neue nanostrukturierte Nitrid-Volumenhardtstoffe* (N^3V), Laufzeit 2020–2025, durch Dr. Kevin Keller nach einem mehrstufigen Bewerbungsprozess eingeworben werden konnte.

In den vielen Forschungsprojekten wurden verschiedene Hochdruckphasen vor allem aus den Elementen Silicium, Aluminium, Sauerstoff und Stickstoff (Si-Al-O-N) synthetisiert und untersucht. An der Herstellung kompakter Hartstoffkörper auf der Basis von Diamant und c-BN wurde im EU-Forschungsprojekt *Flintstone2020* (Laufzeit 2016–2020) durch die Entwicklung geeigneter keramischer Binder geforscht. Des Weiteren wurde ein besonders harter Werkstoff aus binderlos gesintertem kubischen Bornitrid mit Nanostruktur (BNNC) entwickelt und in verschiedenen Anwendungen getestet (Abbildung 3).

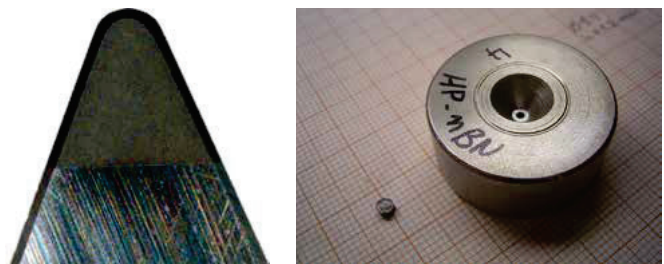


Abb. 3: Aus dem am FHP entwickelten Hartstoff BNNC (binderlos gesintertes Bornitrid-Nanokomposit) hergestellte Prototypen. (a) Wendschneidplatte zur spanenden Metallbearbeitung, (b) Werkzeug zum Drahtziehen mit Ziehstein aus BNNC

Neue Versuchsmöglichkeiten mit Diamantstempelzellen

Im März dieses Jahres wurde Dr. Sindy Fuhrmann als neue Juniorprofessorin an die TU Bergakademie Freiberg berufen. Sie ist hier keine Unbekannte, hat sie doch bei Prof. Gerhard Heide Mineralogie studiert und ist eine Freiburger Hochdruckforscherin der ersten Stunde. Nun kommt sie nach einigen Jahren mit viel Erfahrung im Bereich von Gläsern und amorphen Materialien zurück nach Freiberg.

Gegenwärtig baut sie ein neues Labor auf, in dem mit Diamantstempelzellen (DAC) extrem hohe Drücke erzeugt werden können. Obwohl die Probenmengen – selbst im Vergleich zur oben erwähnten 1000-t-Hochdruckpresse – geradezu winzig sind (Mikrogramm-Bereich), bietet diese Methode den großen Vorteil, dass eine Vielzahl an chemisch-physikalisch und strukturellen Untersuchungen der Materialien in situ durchgeführt werden können. Hierdurch lassen sich Phasenumwandlungen und strukturelle sowie Eigenschaftsänderungen „live“ verfolgen. Mit dieser Methode wird das Portfolio des FHP stark erweitert: Alle drei wichtigen Hochdruckforschungsmethoden – großvolumige Pressen, In-situ-Untersuchungen in Diamantstempelzellen und dynamische Versuche mit Schockwellen – können so durchgeführt werden. Damit erlangt Freiberg ein weiteres Alleinstellungsmerkmal in der Hochdruckforschung.

N³V – Ziele und Lösungsansatz

In der Nachwuchsforschergruppe N³V sollen nun anknüpfend an die Vorarbeiten neue Hartstoffe mit verbesserter Performance im Vergleich zu den heute üblichen Materialien entwickelt werden. Die neuen Materialien sollen eine hohe Härte und Zähigkeit bei gleichzeitig erhöhter thermischer und chemischer Stabilität besitzen. Dadurch können längere Werkzeugstandzeiten und bessere Oberflächenqualitäten der zu bearbeitenden Werkstücke erreicht werden. In einigen Anwendungen soll auf den Einsatz von Kühlmitteln vollständig verzichtet werden. Insbesondere die beiden besonders harten Materialien Diamant und mikrokristallines c-BN sollen damit in bekannten Anwendungen substituiert und neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Ein Ziel ist dabei, auf den Einsatz von kritischen Rohstoffen komplett zu verzichten. Ein besonderer Fokus liegt in dem Projekt auf der Verdichtung der Hartstoffpulver zu kompakten nanostrukturierten Körpern, um daraus Werkzeuge verschiedener Geometrien herzustellen.

Der Lösungsansatz für die Entwicklung neuer Hartstoffe im Rahmen dieses Vorhabens besteht in der Kombination von geeigneten Materialien, die eine besondere Mikrostruktur aufweisen und durch Anwendung verschiedener Hochdruck-Verfahren hergestellt werden können (Abbildung 4).

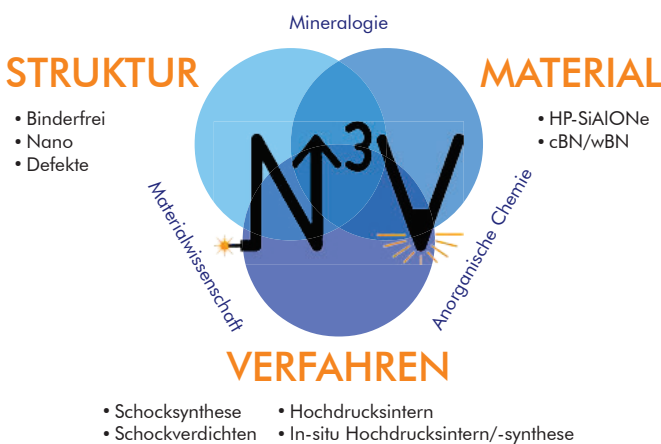


Abb. 4: Lösungsansatz zur Entwicklung und Herstellung neuer nanostrukturierter Nitrid-Volumenhartstoffe

Materialien für die neuen Hartstoffe

Als neue Hartstoffe sollen zum einen Materialien im System Si-Al-O-N eingesetzt werden. In diesem System sind eine Vielzahl an Hochdruckphasen bekannt, die bereits erfolgreich mit den unterschiedlichen Hochdruck-Synthesemethoden hergestellt wurden.³ Das kubische Siliciumnitrid in der Spinellstruktur (γ -Si₃N₄) zeichnet sich durch eine hohe Härte (34 GPa) und außerordentliche thermische Stabilität (> 1400 °C) aus.⁴ Die im Jahr 1999 entdeckte Substanz kann inzwischen in hoher Reinheit mittels statischer Synthese und Schockwellensynthese hergestellt werden. Strukturell sehr ähnlich sind die γ -Sialone. Bei diesen Verbindungen wird ein Teil der Silicium- und Stickstoffplätze im

Gitter mit Aluminium und Sauerstoff substituiert. Ein weiteres sehr interessantes Material ist die Hochdruckphase des Aluminiumnitrids in der Kochsalzstruktur (rs-AlN). Im Jahr 2010 konnte dieses Material erstmals durch Schockwellenmethoden hergestellt werden. Neben einer hohen Härte (ca. 30 GPa) besitzt es eine hohe Wärmeleitfähigkeit, sodass durch passive Kühlung ein Großteil der bei Bearbeitungsprozessen entstehenden Wärme abtransportiert werden kann.⁵

Das zweite Materialsystem sind Bor-Stickstoffverbindungen (Bornitrid) und hier besonders Mischungen aus kubischem Bornitrid (c-BN) mit wurztitischem Bornitrid (w-BN). Beide Phasen sind mit einer Härte von 50 GPa bzw. 40 GPa sehr hart. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Kombination der verschiedenen Phasen sowie das gezielte Einstellen des Mikrogefüges besonders harte und zähe Werkstoffe erzeugt werden können.⁶ Insbesondere die Schockwellensynthese eignet sich, um eine Mischung der beiden Phasen herzustellen, während bei der alternativen statischen Synthese fast ausschließlich c-BN entsteht.

Struktur der neuen Hartstoffe

Die Mikrostruktur der neuen Hartstoffe wird gezielt eingestellt und ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

1. Die zu entwickelnden Werkstoffe werden durch binderfreies Kompaktieren der Hartstoffpulver hergestellt. Damit werden die Eigenschaften des Werkstoffs nicht mehr durch die Binderphase limitiert, sondern lediglich durch die Anordnung und Haftung der einzelnen Hartstoffkörner. Damit sollen höhere Härten, Warmhärten und Temperaturstabilitäten erreicht werden.

2. Das Gefüge der neuen Werkstoffe ist nanoskalig, d. h. die Größe der einzelnen Körner beträgt wenige bis zu 100 Nanometer. Um das Kornwachstum zu verhindern, ist dafür der Einsatz besonders feiner Ausgangsstoffe und ein besonders rasches Kompaktieren nötig. Durch die Nanostruktur können Eigenschaften verbessert (größere Härte) und eine höhere Präzision bei der Bearbeitung von Materialien erreicht werden.

3. Durch gezieltes Modifizieren des Gefüges und der Erzeugung von Defektstrukturen (Defekt-Engineering) durch Einbringen von Fremdphasen, der Bildung (semi)kohärenter Phasengrenzen und modulierter Nanostrukturen (wellenförmige Gefügeänderungen durch Entmischung) soll Versetzungsgleiten minimiert und damit die Härte positiv beeinflusst werden.⁷

Verfahren zur Herstellung der neuen Hartstoffe

Die Herstellung von Pulvern und kompaktierten Werkstoffen mit den oben genannten Mikrostrukturmerkmalen wird erst durch die sinnvolle Kombination verschiedener Hochdruck-Hochtemperatur-Prozesse möglich (Abbildung 5):

1. Schocksynthesen von nanoskaligen Pulvern werden mittels der sogenannten *flyer-plate*- und auch der *flyer-tube*-Methode durchgeführt. Hierbei wirken durch die Kollision einer durch die Sprengstoffdetonation beschleunigten Flugplatte mit dem Probenhalter im Probeninneren Drücke bis über 100 Gigapascal (1.000.000 bar) und Temperaturen bis über 5.000 °C. Dabei

3 T. Schlothauer et al. (2012) „Shock Wave Synthesis of Oxygen-bearing Spinel-type Silicon Nitride γ -Si₃(O,N)₄ in the Pressure Range from 30 to 72 GPa with High Purity“, in: Minerals as Advanced Materials II, Hrsg. S. V. Krivovichev, Springer Berlin/Heidelberg, S. 389-401; K. Keller et al. (2012) „Shock Wave Synthesis of Aluminium Nitride with Rocksalt Structure“, High Pressure Research 32(1), S. 23-29.
4 M. R. Schwarz (2003) „High Pressure Synthesis of Novel Hard Materials: Spinel-Si₃N₄ and Derivatives“ Dissertation, TU Darmstadt.

5 H. Vollstädt und H. Recht (1991) „Verfahren zur Herstellung von kubischem Aluminiumnitrid“ Patent DD292903A5; K. Keller (2013) „Schockwellensynthese und Charakterisierung von Aluminiumnitrid mit Kochsalzstruktur“, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg.
6 D. Rafaja et al. (2008) „Synthesis, microstructure and hardness of bulk ultrahard BN nanocomposites“, J. Mater. Res. 23(4), S. 981-993.
7 D. Rafaja et al. (2012) „Interface Phenomena in (Super)hard Nitride Nanocomposites from Coatings to Bulk Materials“, Chem. Soc. Rev. 41, S. 5081-8101.

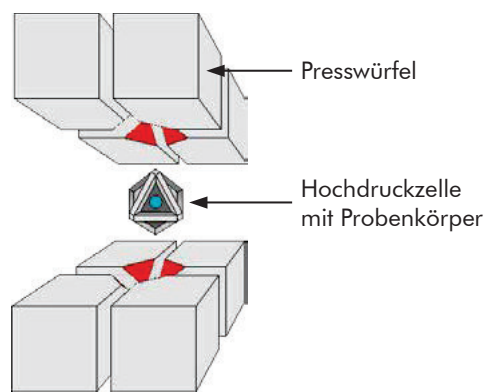
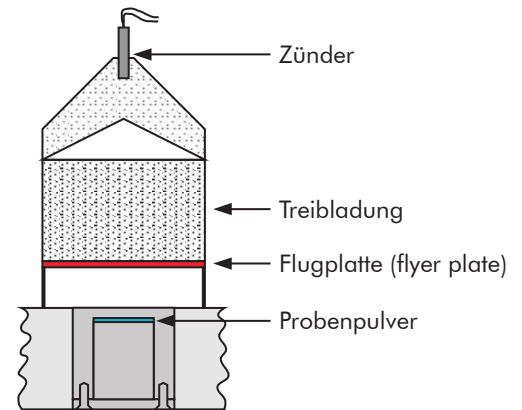


Abb. 5: Prinzipskizze der eingesetzten Hochdruckverfahren zur Synthese und Verdichtung. (a) Vielstempel- und Direktsynthese neuer Hartstoffe (b) Flyer-plate (FP) Methode zur Schocksynthese von Hochdruckphasen



wandelt sich das Ausgangsmaterial in die Hochdruckphase innerhalb von einer Mikrosekunde um. Durch ein Upscaling soll über eine zylinderförmige Versuchsanordnung (*flyer-tube*) die Synthese von bis zu 50 Gramm Pulver pro Schuss ermöglicht werden.

2. Durch Hochdrucksintern mit einer Vielstempel-Pressen (engl. multi anvil press) werden die Pulver binderfrei verdichtet. Über ein spezielles Modul mit acht Würfeln wird die Kraft der uniaxialen 1000 t-Pressen auf eine in der oktaederförmigen Hochdruckzelle befindlichen Pulverprobe übertragen und erzeugt dabei Drücke bis 15 Gigapascal (150.000 bar). Ein spezielles Heizelement (z. B. aus Graphit oder Metallfolie) erzeugt durch Stromdurchfluss eine Proben temperatur bis ca. 2.500 °C. Unter diesen Bedingungen sintern die Körner zu einer kompakten Masse zusammen. Durch Aufrechterhaltung des Drucks muss eine spontane Rückumwandlung der metastabilen Hochdruckphase in die Normalmodifikation verhindert werden.

3. Eine weitere Methode zur Herstellung dichter, binderfreier Körper ist das Schockkompaktieren. Hier kommt es wie auch bei der Schocksynthese durch Sprengstoffdetonation zur Erzeugung extrem hoher Drücke und Temperaturen und damit zur Bildung eines festen Werkstoffs. Diese Methode wurde bisher nur für Metalle erfolgreich angewendet und soll nun auch für die untersuchten Hartstoffpulver entwickelt werden. Der Vorteil dieser Methode gegenüber dem Hochdrucksintern ist, dass sehr große Körper hergestellt werden können. Da diese Methoden nur wenige Mikrosekunden dauern, kommt es zu nahezu keinem Kornwachstum, sodass ein sehr feinkörniges (nanoskaliges) Gefüge entsteht.

4. Eine weitere statische Methode vereint die Synthese und Verdichtung der Hartstoffpulver in einem Schritt. Dafür soll ebenfalls die 1000-t-Vielstempel-Pressen zum Einsatz kommen.

Arbeitsgruppe und Ablauf

Seit April 2020 forscht die interdisziplinäre Gruppe von N³V (Mineralogen, Chemiker, Materialwissenschaftler) an den neuen Materialien. Im Herbst dieses Jahres wird der erste Doktorand mit der Verdichtung der Hartstoffpulver mit der 1000-t-Hochdruckpressen beginnen. Ein zweiter Doktorand wird einige Zeit später die verdichteten Probenkörper hinsichtlich ihrer Mikrostruktur detailliert untersuchen und durch gezieltes Struktur-Design und Anpassung der Herstellungsmethoden die Eigenschaften noch weiter optimieren.

Begleitet wird das Projekt durch sieben Firmen aus den Bereichen Testen, Synthese und Werkzeugherstellung während der gesamten Projektlaufzeit von fünf Jahren in einem industriellen Beirat. Durch fachliche Beratung und die Herstellung von

Werkzeugprototypen aus eigenen Proben, die dann bei Partnern realitätsnah getestet werden, soll ein hoher Anwendungsbezug hergestellt werden. Bei vielversprechenden Ergebnissen können die neuen Hartstoffe – zunächst in Kleinserie – produziert werden. Ein Upscaling der Produktion der Hartstoffpulver in den industriellen Maßstab durch Schocksynthesen ist ebenso geplant. Dazu wird ein zylindrischer Versuchsaufbau (*flyer-tube*) entwickelt und getestet.

Danksagung

Der Autor dankt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung der Nachwuchsforschergruppe „N³V“ im Rahmen des Nachwuchswettbewerbs NanoMatFutur. Ein herzlicher Dank gebührt der Dr. Erich-Krüger-Stiftung für die Finanzierung des 1. Graduiertenkollegs „FHP“ (2007–2012) und des Transferprojekts „FHP Phase 2“ (2012–2015). Durch die großzügige Förderung konnte die Forschung an neuen Materialien über viele Jahre sowie der Bau des Schockwellenlabors ermöglicht werden.

Außerdem wird der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Grundlagenforschung im Bereich der Hochdruckverfahren und neuen Materialien (Großgeräteförderung für die MAP, SPP1181, SPP1236 und FOR 2125) gedankt. Weiterer Dank für die Förderung von Forschungsprojekten gilt: EU und SMWK (Landesexzellenzinitiative „ADDE“), Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ZIM-Projekt „BNNC als Schneidwerkstoff“, SIGNO-Patentverwertung „Sinterkörper aus rs-AIN“) und der Europäischen Union (Horizon2020 „Flintstone2020 – Non-CRM materials and solutions“).

Die Mitglieder des FHP danken Frau Dr. Erika Krüger ganz besonders herzlich für ihr stetiges und wohlwollendes Interesse an unseren Arbeiten.

Förderhinweis



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das Vorhaben wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ gefördert. (Förderkennzeichen 03XP0262)

tu-freiberg.de/bmbf-nachwuchsforschergruppe-n3v

Kontaktadresse:

Dr. Kevin Keller, Freiburger Hochdruckforschungszentrum (FHP), Institut für Mineralogie, Brennhausgasse 14, 09599 Freiberg



**FREIBERGER
HOCHDRUCK
FORSCHUNGSZENTRUM**