

10 Jahre Forschung im Freiburger Schockwellenlabor

Thomas Schlothauer^{a,c}, Gerhard Heide^{a,c}, Kevin Keller^{a,c}, Marcus R. Schwarz^{b,c}, Edwin Kroke^{b,c}

Vor zehn Jahren, am 11. Juli 2011, wurde das Schockwellenlabor (SWL) des Freiburger Hochdruckforschungszentrums (FHP) durch den Rektor der TU Bergakademie Freiberg, Prof. Bernd Meyer, feierlich eingeweiht. Die Mitglieder der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung, Frau Dr. Erika Krüger, Herr Prof. Groll und Herr Lütke-Uhlenbrock waren Ehrengäste (Abb. 1 und 2). Die Festveranstaltung fand im Stufenkabinett des Forschungs- und Lehrbergwerks „Reiche Zeche und Alte Elisabeth“ (FLB) der TU Bergakademie statt und erreichte auf der 1. Sohle in 150 m Tiefe mit der Enthüllung der Stiftertafel am Eingangsbereich des Schockwellenlabors (Abb. 3) ihren Höhepunkt.



Abb. 1: Stifterratsmitglieder Frau Dr. Krüger und Herr Lütke-Uhlenbrock (v.r.n.l.) bei der feierlichen Eröffnung des Schockwellenlabors im Stufenkabinett (11.07.2011).

Abb. 2: Rektor Prof. Dr. Bernd Meyer eröffnet das Schockwellenlabor (11.07.2011).

Abb. 3: Frau Dr. Krüger und Herr Lütke-Uhlenbrock (v.l.n.r.) enthüllen die Tafel am Eingangsbereich des Schockwellenlabors (11.07.2011).

Bis zum Zeitpunkt der feierlichen Einweihung des Schockwellenlabors im Jahr 2011 hatte die Schockwellensynthese neuartiger Materialien hier in Freiberg bereits ein gutes Stück Strecke zurückgelegt. Angeregt durch Professor Wolfgang Voigt, unterhielten sich die im Jahr 2005 gerade neu berufenen Professoren Gerhard Heide, Kristallograph am Institut für Mineralogie, und Edwin Kroke, Molekül- und Festkörperchemiker am Institut für Anorganische Chemie, über ihre Forschungsinteressen. Als Prof. Heide erfuhr, dass Prof. Kroke am Ernst-Mach-Institut für Kurzzeitdynamik der Fraunhofer-Gesellschaft in Efringen-Kirchen (EMI-FhG) mit der Detonation von Sprengstoff Höchstdrucksynthesen erfolgreich durchgeführt hatte, schlug er – mehr im Scherz – vor, diese Experimente von nun an in unserem Bergwerk durchzuführen.

Gesagt, getan: Mit dem FLB verfügte die TU Bergakademie Freiberg bereits über eine komplette Infrastruktur als Zentrale Forschungseinheit mit qualifiziertem Personal und den Berechtigungen zur Durchführung von Sprengarbeiten. Die Gefahr von Schall- und Staubemission sowie unerwünschter Erschütterungen sind bei einer Teufe von ca. 150 m für Dritte nicht gegeben und die kostspielige Errichtung entsprechender Bauten mit den notwendigen, hohen Sicherheitsstandards über Tage konnte entfallen – ebenso die komplexen Genehmigungs- und Kontrollverfahren verschiedener Ämter. Für das FLB ist das Sächsische Oberbergamt die einzig zuständige Behörde, die sowohl über die Zulassung von Sprengarbeiten, deren Art und deren Durchführung als auch über die Art und Weise der sicheren Lagerung der Sprengstoffe auf der Grundlage des Berggesetzes entscheidet. Aus genau diesem Grunde ist die Anzahl derartiger für die zivile Nutzung zugänglicher Forschungseinrichtungen in Deutschland bzw. in ganz Europa stark limitiert. Von unschätzbarem Vorteil ist zudem, dass Planungen von Labor- und Versuchsräumen sowie deren Ausführung und Erweiterung durch das Personal des FLB selbst ausgeführt werden können.

Die ersten Schockwellensynthesen konnten bereits 2006 nach nur zwei Monaten Bauzeit in einem Versuchsort erfolgreich durchgeführt werden. Wertvolle Unterstützung wurde durch Herrn Dr. U. Hornemann, EMI der FhG (Fraunhofer-Gesellschaft) gegeben. Allerdings erwies sich dieser im FLB liegende Versuchsraum mit einer maximal möglichen Ladungsmenge von 1000 g Nettoexplosivmasse im Laufe der Jahre für den systematischen Auf- und Ausbau der Schockwellensynthese als zu klein und zu instabil (Abb. 4 und 5) – und erste Überlegungen über einen größeren Versuchsraum folgten.



Abb. 4: Der erste Sprengplatz im Abwetterbereich des Wilhelm Stehenden Nord vor dem Experiment (2006).

Abb. 5: Sprengplatz nach ca. 100 durchgeführten Sprengungen.

II

Während der Habilitationszeit von Prof. Kroke am Institut für Materialwissenschaften, TU Darmstadt, waren er und sein Mitarbeiter Dr. Marcus Schwarz an der Entdeckung und Synthese der Hochdruckmodifikation von Siliciumnitrid, dem

Kontakt

Thomas.Schlothauer@mineral.tu-freiberg.de, gerhard.heide@tu-freiberg.de

- a Institut für Mineralogie
- b Institut für Anorganische Chemie
- c Freiburger Hochdruckforschungszentrum (FHP)

γ - Si_3N_4 , beteiligt.¹ Dieses Material ist bereits in seinen unter Normaldruck hergestellten Modifikationen sehr hart und temperaturbeständig. Prof. Kroke wollte, basierend auf diesem Material, in Freiberg die Synthese von neuartigen Hartstoffen und -materialien aufbauen. Hierfür konnte er sehr frühzeitig einen Großgeräteantrag für eine 1000-Tonnen-Vielstempelpresse (multi anvil press - MAP) erfolgreich einwerben. Die Universität unterstützte diese Beschaffung mit dem Umbau eines ehemaligen Traföhäuschens in ein modernes Technikum für die MAP, das bereits am 29. November 2007 übergeben wurde (Abb. 6).² Damit war die Grundlage für die systematische Nutzung statischer Höchstdruckmethoden in Freiberg gelegt.



Abb. 6: Eröffnung des FHP-Technikums mit Schlüsselübergabe des SIB (29.11.2007).

Die Schockwellensynthese ihrerseits bietet gegenüber der MAP bzw. anderen Hochdruckpressen nicht nur den Vorteil, dass viel größere Stoffmengen hergestellt, sondern auch viel höhere Drücke und Temperaturen erzeugt werden können. Der Nachteil liegt in der Kurzzeiddynamik, das bedeutet, dass die Reaktionszeit im Bereich von wenigen Mikrosekunden liegt. Dies kann aber auch ein Vorteil sein, denn es können sich einerseits Teilchen im Nanobereich bilden, andererseits kann mit wesentlich höheren Abkühlgeschwindigkeiten gearbeitet werden. Somit können Materialien gewonnen werden, die mit anderen Methoden nicht darstellbar sind. Entsprechende Beispiele und Angaben zu den Syntheseparametern werden unten aufgeführt. Die statischen und dynamischen Methoden ergänzen sich in idealer Weise und sind in ihrer Kombination im Freiburger Hochdruckforschungszentrum an der TU Bergakademie Freiberg für eine Hochschule weltweit einmalig.

Die Erzeugung hoher dynamischer Drücke für die Materialsynthese erfolgt durch die Kollision von beschleunigten Metallscheiben oder auch Rohren mit dem Probenmaterial bzw. dem Probencontainer (Abb. 7 und 8). Hierfür sind hochbrisannte Sprengstoffe erforderlich, die durch ihre Detonation die Metallscheibe bis auf über 4.000 m/s beschleunigen können und damit kurzzeitig zu Probendrücken bis 200 Gigapascal (2 Megabar) führen. Gleichzeitig können infolge der adiabatischen Kompression der Probe sehr hohe Temperaturen von einigen Tausend Kelvin entstehen.

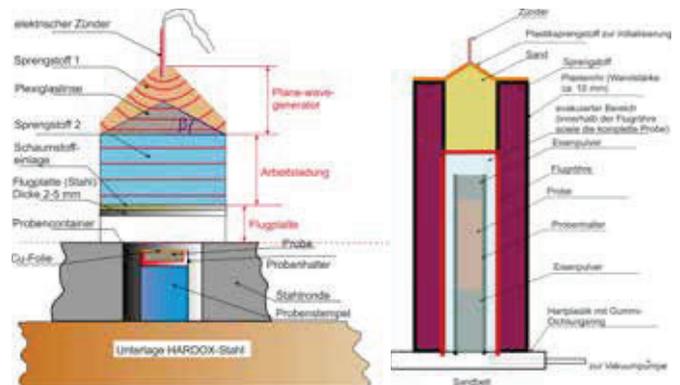


Abb. 7 (links): Schema der Standardversuchsanordnung eines Plane-Wave-Generators.

Durchmesser der Arbeitsladung ca. 80 mm.

Abb. 8 (rechts): Schema der zylindrischen Versuchsanordnungen (flyer tube).

III

Die erste Ausschreibung der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung für ein fakultätsübergreifendes, interdisziplinär aufgestelltes, anwendungsnahe Forschungskolleg kam genau zum richtigen Zeitpunkt.³ Die gemeinsamen Interessen der Kollegen Jens Kortus (Theoretische Physik), David Rafaja (Werkstoffwissenschaften: Hartstoffschichten und Charakterisierung), Hans Seifert (Werkstoffwissenschaften: Spark Plasma Sintering - SPS), Lutz Krüger (Werkstofftechnik: Werkstoffprüfung), Heinz Konietzky (Felsmechanik), Matthias Reich (Tiefbohrtechnik) und der Autoren führte zu der Idee, sich zu bewerben. Das Konzept, Hartstoffe - beginnend bei der Theorie über die Synthese und Charakterisierung bis hin zum Test - unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen, überzeugte den Stifterrat, und mit der daher zugesagten Finanzierung konnte das Freiburger Hochdruckforschungszentrum (Freiberg High-Pressure Research Center - FHP) gegründet werden.⁴ Ein Teil der Finanzierung stand für die Konzeption, den Aufbau und die Inbetriebnahme des angedachten Schockwellenlabors zur Verfügung, um in Zukunft langfristig, weit über die Laufzeit des Forschungskollegs hinaus Großversuche durchführen zu können und einen international ausstrahlenden Forschungsbereich zu etablieren.



Abb. 9: Überhauen im Bereich des Wilhelm Stehenden Nord vor der Aufwältigung des neuen Sprengraumes (08.07.2008).

Dieses Schockwellenlabor sollte nicht nur über den eigentlichen Sprengraum verfügen, sondern auch über einen sicheren Kontroll-, Mess-, Zünd- und Arbeitsraum. Das Volumen der

1 Schwarz, M., Mische, G., Zerr, A., Kroke, E., Poe, B. T., Fuess, H., Riedel, R.: *Spinel-Si₃N₄: Multi-Anvil Press Synthesis and Structural Refinement*. *Adv. Mat.*, 12 (2000) 883-887.

2 <https://tu-freiberg.de/presse/freiburger-krueger-kolleg-erhaelt-hochdruck-technikum>

3 <https://tu-freiberg.de/universitaet/stiftungen/krueger-stiftung>

4 <https://tu-freiberg.de/hochdruck>



Abb. 10: Mitarbeiter des FLB bei Aufführungsarbeiten für den neuen Sprengraum.



Abb. 11: Arbeiten am neuen Kontroll- und Messraum des SWL.

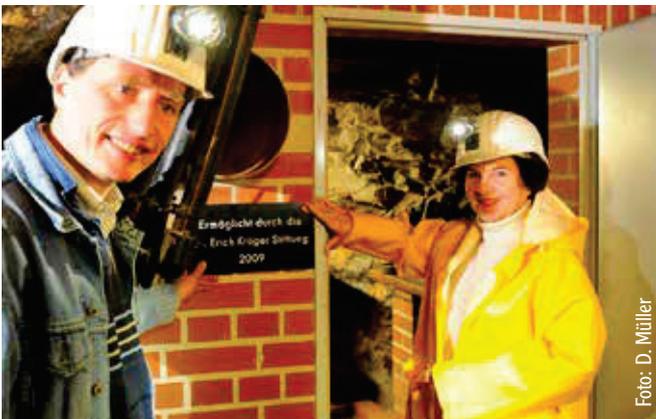


Abb. 12: Enthüllung der Stiftertafel am neu errichteten Kontrollraum durch Frau Dr. E. Krüger (06.12.2010).



Abb. 13: Besichtigung des SWL anlässlich der Feier des „Letzten Hutes“ (06.12.2010).

Neuauffahrung für den Sprengraum wurde so konzipiert, dass eine maximale Nettoexplosivmasse pro Versuch von 20 kg, äquivalent zum hochbrisanten Sprengstofftyp C4, umgesetzt werden kann. Die Berechnung des dafür erforderlichen Rauminhalts sowie die Ausführung und Dimensionierung des Verschlussbauwerks, das Zugangs- und Bewetterungsmöglichkeiten enthält, wurde von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin, Abteilung Chemische Sicherheit, Bereich Spreng-, Treibmittel und Pyrotechnik unter Leitung des Regierungsoberamtsrates Dr. Holger Krebs durchgeführt. Für das Labor wurde ein alter Überhau im Bereich des „Wilhelm Stehenden Nord“ ausgewählt, der einen Gleisanschluss (Abb. 9) besitzt und sich unweit des Sprengmittel-lagers befindet, um die entsprechenden Transportwege kurz zu halten und den Aufwand für die bergmännischen Arbeiten, die durch Mitarbeiter der Reichen Zeche in Eigenleistung durchgeführt wurden (Abb. 10) durch den Einbezug bereits vorhandenen Hohlräume zu minimieren. Der Kontrollraum konnte bereits 2009 fertiggestellt werden (Abb. 11 und 12), die bergmännischen Aufführungsarbeiten des eigentlichen Schockwellenlabors endeten am 6. Dezember 2010 (Abb. 13). Es folgte der Innenausbau, das Einbringen des Betons mit Stahlbewehrung sowie der Abschluss des Labors gegen die Strecke „Wilhelm Stehender Nord“ mit einem Verschlussmauerwerk (Abb. 14 und 15). Diese Arbeiten wurden durch die Belegschaft des FLB in hoher Qualität ausgeführt und am 11. Juli 2011 konnte das neue Schockwellenlabor mit der notwendigen Stellungnahme der BAM und dem Vollzug des Berggesetzes durch das Sächsische Oberbergamt den Testbetrieb aufnehmen. Die Testphase sollte mehrere Jahre umfassen und mit einer Zündung der Maximalladung beendet werden. Hierfür

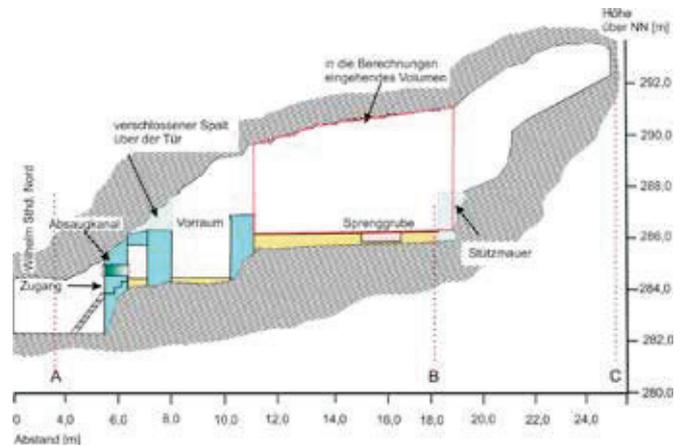


Abb. 14: Schematischer Grundriss des SWL (2011).

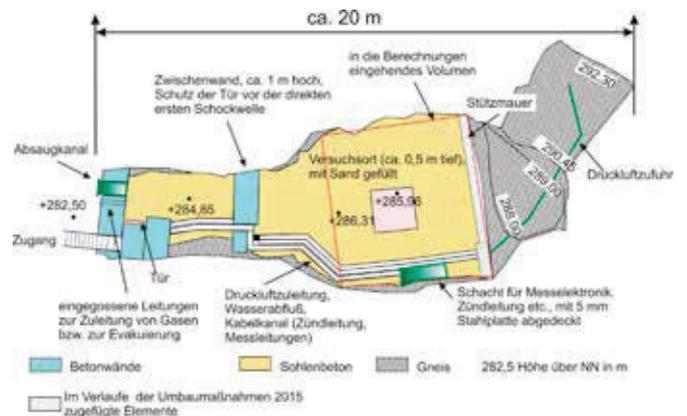


Abb. 15: Schematischer Querschnitt des SWL.

wurden 40 kg gewerblichen Sprengstoffs (als Äquivalent für den hochbrisanten und teuren plastifizierten Sprengstoff nach Militärstandard) eingesetzt. Die Erschütterungen dieses Belastungstests wurden durch eine unabhängige Firma und die Arbeitsgruppe von Prof. Thomas Buske (Geophysik/Seismik) überwacht, die markscheiderische Begleitung der Veränderung des Hohlraumes erfolgte (und erfolgt regelmäßig) durch Laserscans der Arbeitsgruppe von Prof. Jörg Benndorf (Markscheidekunde und Geodäsie). Das Sicherheitskonzept und das Bauwerk bewährten sich; lediglich der Raumverschluss selbst, die Zugangstür, hielt den Belastungen nicht vollumfänglich stand.

Diese neuartige Konzeption, die Entwicklung und der Betrieb eines universitären, untertägigen Schockwellenlabors und von Versuchsaufbauten, die erstmalig eine vollständige Probenrückgewinnung bei Versuchsbedingungen von bis ca. 200 GPa mit Probenmengen im Gramm-Bereich erlauben, war 2016 Gegenstand der Dissertationsschrift des Erstautors.⁵ Zu dem Zeitpunkt, als das SWL in Betrieb genommen wurde, existierte in der Schockwellentechnik noch keine Methode, die eine zuverlässige, reproduzierbare, wissenschaftlich fundierte Probenrückgewinnung bei Drücken unterhalb der Grenze Erdmantel/Erdkern gestattete. Hier herrschen Drücke von ca. 132 GPa⁶ sowie Temperaturen von ca. 3300 °C. Der Erstautor entwickelte auf der Grundlage der dynamischen Impedanztheorie eine an den Lade- und Entspannungskurven orientierte Lösung. Darüber hinaus wurden nicht nur Schocksynthesen als solche durchgeführt, sondern auch eine Vielzahl von Untersuchungen an dynamischer Belastung unterworfenen Materialien unternommen, um die durch die Schockwelle ausgelösten Mechanismen, die Wechselwirkung zwischen den unterschiedlichen Materialien und die Schockwellenphysik besser zu verstehen.⁷

In dieser Zeit bahnte sich auch eine Reihe von neuen Forschungsfeldern an (s. u.), die einen größeren und schwerlasttauglichen Zugang zur Sprengkammer erforderten. Daher wurde eine Erweiterung des SWL geplant. Diese umfasste nicht nur eine neue große, sichere, aber leicht zu bedienende Tür ähnlich einer Bunkertür (Abb. 16), sondern vor allem auch einen neuen Zugang mit Gleisen (Abb. 17) bis zur Sprenggrube, ferner Hebezeug für Schwerlasten sowie eine optimierte Bewetterung, um die Sprengschwaden nach einem Versuch schnell aus der Kammer entfernen zu können. Dankenswerterweise bewilligte der Stifterrat der Dr.-Erich-Krüger-Stiftung den Antrag auf Umbau und Erweiterung, und die hierfür erforderlichen Arbeiten konnten 2017 beginnen. Nach drei Jahren Umbau, die von den Mitarbeitern des FLB unter der

5 Schlothauer, T.: *Aufbau des Schockwellenlabors im Lehr- und Forschungsbergwerk „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg und die Entwicklung von dynamischen Höchstdrucksynthesemethoden*. TU Bergakademie Freiberg, Freiburger Forschungshefte, Reihe Werkstoffwissenschaften B 370, 2016.

6 1,32 Mbar

7 Schlothauer, T., Schimpf, C., Brendler, E., Keller, K., Kroke, E., Heide, G.: *Halide based shock-wave treatment of fluid-rich natural phases*. J. Phys. Conf. Series 653 (1), (2015) 12033. Schlothauer, T., Schimpf, C., Schwarz, M. R., Heide, G., Kroke, E.: *The role of decompression and micro-jetting in shock wave synthesis experiments*. J. Phys. Conf. Series (2016)774 (1), S. 12053. Schlothauer, T., Schimpf, C., Heide, G., Kroke, E.: *Mechanical Behavior of shocked porous tungsten carbide in the Mbar-range*. In: Golosova O A, Alymov M I (Hrsg.) *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations*. Torus Press, (2018) S. 225–231.



Abb. 16: Neue Bunkertür nach dem Umbau des SWL (2019).

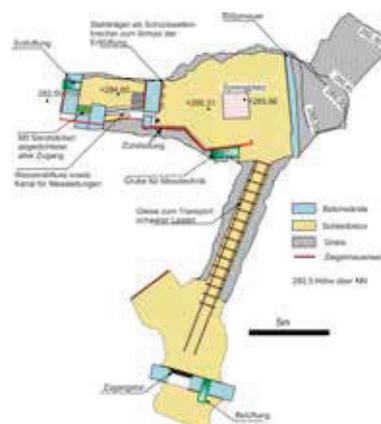


Abb. 17: Schematischer Grundriss des SWL (2019)

Regie des Grubenbetriebsleiters Frank Reuter durchgeführt wurden und den damit verbundenen Genehmigungsverfahren erfolgte die Abnahme im Jahr 2020 mit der für das Schockwellenlabor zulässigen maximalen Ladungsmenge. Die Tür, von einem Freiburger Maschinen- und Anlagenbauunternehmen geplant und gebaut, sowie alle neuen Bauten zeigten keine auf die Sprengung zurückzuführenden Veränderungen, sodass am 30. September 2020 dann auch die „Zulassung für den Regelbetrieb“, gültig bis zum Jahr 2023, durch das Sächsische Oberbergamt erteilt wurde.

IV

Bereits in der Aufbau-, Test- und Umbauphase konnte erfolgreich eine Vielzahl drittmittelbasierter Forschungsprojekte⁸ im Bereich der Synthese neuer Materialien eingeworben werden, aus denen zahlreiche Publikationen und Qualifizierungsarbeiten resultierten. Hier gelang beispielsweise Herrn Keller im Rahmen seiner Dissertation⁹ die erstmalige Schock-

8 DFG-SPP 1236 Strukturen und Eigenschaften von Kristallen bei extrem hohen Drücken und Temperaturen: *The System Si-Al-O-N at Extreme Pressures: A Synthetic and Computational Route to Novel Materials?* 2006–2011.; EFRE-ADDE: Funktionales Strukturdesign neuer Hochleistungswerkstoffe durch Atomares Design und Defekt-Engineering, Teilprojekt: *Neue Volumen-Hartstoffe*. 2009–2014.; Industriepartner: *Schockwellensynthese seltenerd-dotierter Oxo-Nitridosilikate*. 2013–2014.; BMWi-SIGNO: *Herstellung eines kompakten Sinterkörpers aus Aluminiumnitrid mit Kochsalzstruktur (rs-AIN) zur Bestimmung materialspezifischer Eigenschaften*. 2014–2015.; DFG-FOR 2125 CarboPaT Structures, properties and reactions of carbonates at high temperatures and pressures: *Carbonates under shock compression: stability, phase transitions, and chemical reactions with silicates*. 2015–2017.; Industriepartner: *Industrielle Herstellung von Nanokristallinen Hartstoffen*. 2016–2023.

9 Keller, K.. *Schockwellensynthese und Charakterisierung von Aluminiumnitrid*

wellensynthese der Hochdruckphase von Aluminiumnitrid bei gleichzeitigem Rückerhalt des geschockten Probenmaterials. Das nach seiner Kristallstruktur mit rs-AlN¹⁰ bezeichnete Hochdruck-AlN ist um 25 % dichter gepackt als das bei Normaldruck stabile w-AlN mit Wurtzit-Struktur. Dieses keramische Material zeichnet sich durch eine hohe Härte aus¹¹ und war in reiner Form bis dahin nicht in größeren Mengen herstellbar. Das von Keller und seinen Kollegen entwickelte Verfahren zur Schockwellensynthese von rs-AlN wurde erfolgreich zum Patent angemeldet.¹²

Diese Arbeiten waren so erfolgreich, dass es Herrn Keller gelungen ist, eine Nachwuchsforschergruppe im BMBF-Förderprogramm NanoMatFutur einzuwerben. Ziel der N³V-Gruppe¹³ ist es, nanostrukturierte Volumenhartstoffe auf der Basis von Hochdruckphasen aus den Materialsystemen Si-Al-O-N (γ -Si₃N₄, γ -Sialon, rs-AlN) und B-N (cBN/wBN) mit einer geeigneten Mikrostruktur zu entwickeln.¹⁴

V

Neben der Bedeutung der Höchstdrucksynthese für die Festkörperchemie und die Angewandte Mineralogie sind Versuche mit Mineralen bei Drücken von über 200 GPa, wie sie im unteren Erdmantel bzw. an der Kern-Mantel-Grenze herrschen (Abb. 18), von aktuell sehr großem Forschungsinteresse. Mit einem speziell entwickelten Probencontainer konnten Proben vollständig rückgewonnen werden, die Fluide wie CO₂ und H₂O enthalten und damit das Problem des Verhaltens von Kohlenstoff im globalen Kohlenstoffkreislauf der Erde, dem „deep carbon cycle“ untersucht werden. Fragen sind hier z. B., wie sich Diamant in Gegenwart unterschiedlicher car-



Abb. 18: Gleisanschluss in das SWL (2019).

mit Kochsalzstruktur. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 2013. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa-131930>

10 „rs“ für englisch rock salt = Steinsalz bzw. Halit (NaCl)

11 Schwarz, M.; Antlauf, M.; Schmerler, S.; Keller, K.; Schlothauer, T.; Kortus, J.; Heide, G.; Kroke, E. *Formation and properties of rock salt-type AlN and implications for high pressure phase relations in the system Si-Al-O-N*, High Pressure Research, 34 (2014) 22–38.

12 Keller, K.; Schlothauer, T.; Schwarz, M.; Heide, G. & Kroke, E.: *Verfahren und Verwendung einer Vorrichtung zur Herstellung von Aluminiumnitrid mit Kochsalzstruktur mittels Schockwellensynthese*. DE 10 2011 051 647 B4.

13 <https://tu-freiberg.de/bmbf-nachwuchsforschergruppe-n3v>

14 Keller, K.: *Neue nanostrukturierte Nitrid-Volumenhartstoffe – Mit Hochdruck an neuen Materialien forschen! – Die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung trägt weitere Früchte*. ACAMONTA 27 (2020) S. 9–12.

bonatischer bzw. silikatischer Gesteine bildet oder wie sich der Übergang von CO₃²⁻ zu CO₄⁴⁻ als Analogon zum SiO₄⁴⁻, das bei diesen Drücken bereits in ein SiO₄-Oktaeder übergegangen ist, vollzieht. Letzteres hat einen erheblichen Einfluss auf das Schmelzverhalten von Gesteinen an der Kern-Mantel-Grenze und die damit verbundene Ausbildung von „mantle plumes“. Die Aufschmelzungsgrade sind in hohem Maße von volatilen Phasen (CO₂, H₂O) abhängig.

VI

Diese Erfahrungen führten zu ersten Gesprächen darüber, dass das Freiburger SWL als Partner am neuen Protonenmikroskop PRIOR am neuen Schwerionenbeschleuniger FAIR¹⁵ in Darmstadt mitwirken könnte. Sie betrafen auch die Unterzeichnung eines Kooperationsabkommens mit dem „Institute of Problems of Chemical Physics“ der Russischen Akademie der Wissenschaften als russischem Partner der methodischen Entwicklung sowie den Aufbau der detonationsbasierten Schockwellentechnik vor Ort. Designvorschläge wurden dazu bereits ebenso eingereicht sowie Vorschläge für erste Messkampagnen in der dortigen „APPA-cave“, dem künftigen Standort des neuen Protonenmikroskops. Für einen internationalen Workshop am 24. April 2019 konnte Freiberg Gastgeber sein.¹⁶

VII

Die Höchstdrucksynthese mittels Schockwellen im SWL beschränkt sich aber nicht nur auf Minerale und neue Materialien, sondern tangiert auch Fragen der Werkstofftechnik, wie das bindemittelfreie Kompaktieren von Hartstoffpulvern oder das Plattieren von Metallblechen¹⁷ – wie auch das Upscaling der Hartstoffsynthese mit der „flyer-tube“-Technologie. Beim sogenannten Explosivplattieren ist die Herstellung eines flächenhaften Verbundes aus unterschiedlichen Materialien das Ziel. Es lassen sich dabei sehr verschiedene Materialien einsetzen: Metalle, Keramiken, Gläser, aber ebenso in Pulverform vorliegende Hartstoffe sowie Kohlenstoff-Nanoröhren. Dadurch können Werkstoffverbunde hergestellt werden, die sich mit konventionellen Schweißmethoden nicht realisieren lassen und somit völlig neue Werkstoffeigenschaften oder auch reduzierte Materialstärken erreicht werden. Das gleichzeitige Plattieren von bis zu sieben Metallblechen ist bereits gelungen.

Die Plattiertechnik wurde auch für die Prägung von Metalloberflächen weiterentwickelt – und es ist so möglich, Symbole, Texte oder auch Pflanzen unikal abzubilden, die eine bemerkenswerte ästhetische Wirkung haben.

VIII

Darüber hinaus können Schockwellen auch für die Erzeugung von Höchsttemperaturen von einigen Tausend Kelvin genutzt werden, um schwer schmelzende Verbindungen – z. B. durch Festkörperreaktionen – herzustellen. Entscheidend ist hierbei, dass das Probensystem geschlossen ist, sodass sich die Stöchiometrie der Ausgangsstoffe nicht verändern kann.

15 <https://fair-center.de>

16 <https://fair-center.de/de/fuer-nutzer/experimente/appa/newsview-appa/article/shock-wave-meeting-for-priorfair.html>

17 Schulze, J.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Sprengplattieren höherfester Metalllegierungen*. Diplomarbeit 2014, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Werkstofftechnik und FHP

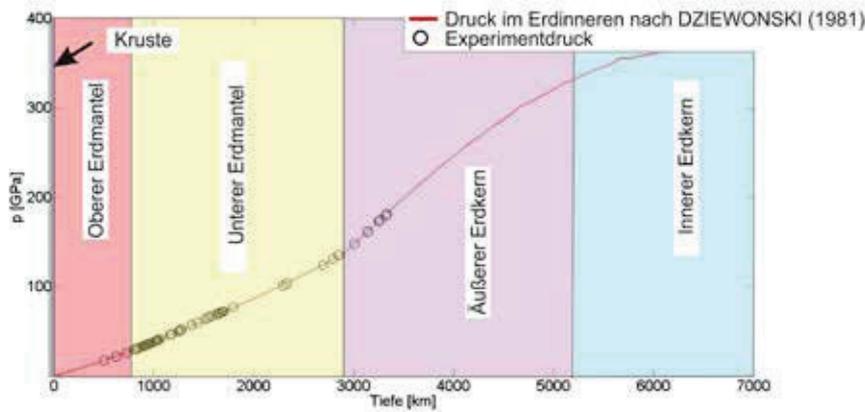


Abb. 19: Experimentell erreichte Drücke (Kreise) auf der Druckkurve nach Dziewonski A M, Anderson D L (1981) Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 25: 297–356.

Dieses Synthesekonzept konnte erfolgreich bei der Herstellung von Europium-dotierten Siliconitriden für nanodisperse, fluoreszierende Pigmente (Abb. 19) angewandt werden.¹⁸

IX

Die Möglichkeiten des Freiburger SWL sind nicht auf die Materialsynthese beschränkt. Fragestellungen des Schutzes vor der zerstörenden Wirkung von Sprengstoffexplosionen stellen sich auch im Bereich der Zivilen Sicherheit. Dies ist etwa bei der Beseitigung von Kampfmittelaltlasten im urbanen Raum oder von „Unkonventionellen Spreng- und Brandvorrichtungen“ (USBV), wie z. B. Brief- oder Paketbomben

durchgeführt. Auf Basis entsprechender Vorversuche wurde im März 2021 ein AiF-Antrag (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.) bewilligt. Die hierzu aufgenommene Arbeit betrifft die Entwicklung von Dämmsäcken aus Glasfasergewebe und eines Glasschaums als Füllmaterial und schließt – neben der Beurteilung entstandener Schäden bzw. der Schutzwirkung solcher Materialien – auch eine direkte Messung der in der Umgebung der zu testenden Objekte herrschenden Drücke ein.

X

Ein weiterer Ansatz, Splitterwirkungen und Druckwellen abzufangen, betrifft Sandwich-Strukturen, wie z. B. Metall-Kunststoff-Verbunde mit zusätzlichen Faservliesen in Plattenform, zumal sich diese neuartige Kombination für Leichtbau-Fassaden eignen würde. Hier sind die durch eine Detonation ausgelösten Materialverformungen noch unverstanden, schwer zu berechnen und somit kaum vorhersagbar. Erste Versuche mit neu entwickelten Platten zeigten erstaunliche Resultate (Abb. 20).

XI

Auch klassische Themen, wie die Untersuchung der Risentstehung und -ausbreitung im Gestein durch Sprengarbeiten sind Untersuchungsgegenstand. Bei konventionellen Ge-

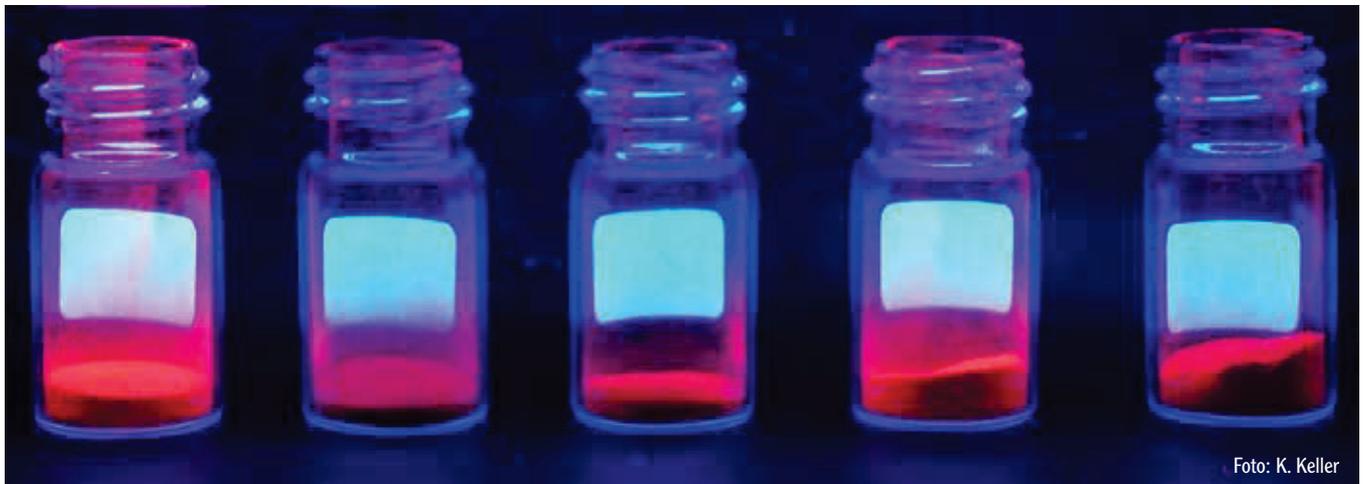


Foto: K. Keller

Abb. 20: Neuartige lumineszierende Pigmente ($\text{Sr}_2\text{Si}_3\text{N}_8\text{:Eu}^{2+}$) durch schockwelleninduzierte Festkörperreaktionen hergestellt, in Abhängigkeit des Eu^{2+} -Gehalts.

oder Gepäckstücken in öffentlichen Gebäuden von großer Aktualität. Der Bedarf an der Entwicklung und Testung von mobilen, nicht brennbaren, textilen Sicherheitsmaterialien als effektiven Dämm- und Schutzstoffen hat stark zugenommen. Es gilt dabei, die Evakuierungsräume und -zeiten so gering wie möglich zu halten. In Zusammenarbeit mit dem Sächsischen Textilforschungsinstitut Chemnitz (STFI)¹⁹ sowie dem Institut für Glas und Glastechnologie unserer Universität wurden dazu Voruntersuchungen an Textilien aus Glasfasern

winnungsarbeiten im Bergbau ist ein Wertverlust durch nicht nutzbares Fein- bzw. Unterkorn unvermeidbar. Im Rahmen der ESF-Nachwuchsforschergruppe „Innocrush“²⁰ wurde hierfür ein wiederverwendbarer Gesteinsprobenhalter entwickelt, der es gestattet, die Auswirkungen von Schockwellen auf eine Gesteinsprobe in größerem Maßstab ($220 \times 220 \times 45 \text{ mm}^3$) zu untersuchen. Der plane-wave-Generator wurde hier so weiterentwickelt, dass die Schockwelle als linienförmiger Impact auf die Gesteinsoberkante trifft (Abb. 21) um Einflüsse des Gesteinsgefüges reproduzierbar untersuchen zu können.²¹

18 Keller, K., Rösler, S., Schlothauer, T., Heide, G., Kroke, E.: *Shock synthesis of $\text{Sr}_2\text{Si}_3\text{N}_8\text{:Eu}^{2+}$ phosphor*. *J. Alloys Comp.*, 784 (2019) 1270–1275, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.040>.

19 <https://www.stfi.de>

20 <https://tu-freiberg.de/forschung/forschungsprojekte/projekte/innocrush>
21 Grafe, B., Bravo, A. H., Hesse, M., Morgenstern, R., Rosin, K., Schlothauer, T., Talovina, I. V., Nikiforova, V. S.: *InnoCrush: New Solutions for highly selec-*



Abb. 21: Versuchsaufbau für einen Schockwellen-Test einer Sandwich-Sicherheitsstruktur. Der Sprengstoff befindet sich oberhalb der Platte.



Abb. 22: Sandwich-Sicherheitsstruktur nach dem Explosionstest.

XII

Ähnlich dem zur Rissentstehung und seiner Ausbreitung ist ein Thema aus dem Gebiet des Recyclings gelagert. Für bestimmte großvolumige Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen - wie z. B. für Flügel von Windkraftanlagen - kann die Materialtrennung durch sprengstoffinduzierte Schockwellen eine ökonomisch vertretbare Alternative sein, da sie einen nur geringen technischen Aufwand erfordert. Die im Wasserbad durchgeführten Vorversuche zeigten die technische Realisierbarkeit dieser Methode, bei der das Wasser als Schockwellenüberträger dient und gleichzeitig das Auftreten

tive process chains. In: Litvinenko V (Hrsg.) *Innovation Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects.* 11th Conference of the Russian-German Raw Materials. Taylor & Francis Group, London, 2019, 21-37.



Abb. 23: Versuchsaufbau eines Line-Wave-Generators für Material- bzw. Gesteintest (Breite 400 mm).

gesundheitsschädlicher Stäube, wie z. B. lungengängiger Fasern, verhindert.

XIII

Neue Entwicklungen im SWL richten sich auf den Auf- und Ausbau der Messtechnik, da die quantitative Charakterisierung des Material-, Werkstoff- und Bauteilverhaltens für jedes Prozessverständnis und Simulationen unverzichtbar ist. Eine wichtige Größe ist die Geschwindigkeit von durch die Detonation beschleunigten Probenoberflächen, die durch eine VISAR-Messeinrichtung (Visible Interferometer Spectroscopy for any Reflector) ermittelt werden kann. Mit dieser Technik ist es möglich, Geschwindigkeiten bis zu einigen km/s zu bestimmen. Im Rahmen einer Forschungskoooperation mit der Firma Nordmetall, Adorf, wird zur Zeit ein Messstand für den Betrieb im SWL modifiziert und aufgebaut. Die Dämmwirkung von Schutzmaterialien wird mit piezoelektrischen Drucksensoren orts- und richtungsabhängig erfasst; auch diese Messeinrichtung befindet sich im Aufbau.

XIV

Die Dr.-Erich-Krüger-Stiftung ermöglichte durch ihre großzügige finanzielle Unterstützung im Rahmen des 1. Forschungskollegs somit den Aufbau und die Entwicklung einer völlig neuen, einzigartigen Forschungsinfrastruktur²², die im Zuge ihrer Nutzung auch zu drängenden Themen der Weltraumforschung einen wichtigen Beitrag leisten kann. Das Degradationsverhalten von Weltraummüll wäre eines dieser Themen. Die Autoren danken der Stiftung sehr herzlich. Ebenso danken die Autoren der Belegschaft des Forschungs- und Lehrbergwerks „Reiche Zeche und Alte Elisabeth“ für die kollegiale Zusammenarbeit und großartige Unterstützung. Dem Sächsischen Oberbergamt wird für die zügige Bearbeitung der entsprechenden Anträge ebenfalls herzlich gedankt.

²² Weiterführend: Schwarz, M., Schlothauer, T., Keller, K., Heide, G., Kroke, K.: *Statische und dynamische Ultrahochdruck-Synthesen am Freiberg Hochdruckforschungszentrum (FHP).* In: Groß, U. (Hrsg.) *Glanztlichter der Forschung an der TU Bergakademie Freiberg 250 Jahre nach ihrer Gründung.* TU Bergakademie Freiberg. 2016, S. 116-134.