



Permanentmagnete sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken, aber werden in naher Zukunft noch deutlich häufiger benötigt werden, denn sie sind unter anderem für den Betrieb von Windkraftträdern, Elektroautos und Robotern unverzichtbar. Allerdings beinhalten die heutzutage stärksten Permanentmagneten das Element Neodym, das auf der Erde nur begrenzt zur Verfügung steht. Ein ressourcenschonender Umgang ist entsprechend unumgänglich und soll hier durch das Einbringen von Nanopartikeln gewährleistet werden. Diese winzig kleinen Partikel übernehmen dabei gleich zwei Aufgaben: Sie sollen den Materialeinsatz der seltenen Erden reduzieren und die magnetischen und mechanischen Eigenschaften 3D-gedruckter Magnete verbessern. Ganz schön große Aufgaben für solch kleine Teilchen...

Kleine Partikel mit großer Wirkung

...wie Laser-generierte Nanopartikel den 3D-Druck von
Permanentmagneten revolutionieren könnten

Von Philipp Gabriel, Stephan Barcikowski & Anna Rosa Ziefuß

Was sind eigentlich Permanentmagnete?

Permanentmagnete behalten ihre Magnetkraft kontinuierlich bei, solange sie nicht über einen materialabhängigen Schwellenwert, die so genannte Curie-Temperatur, erhitzt werden, bei der sie ihre Magnetisierung verlieren. Dies unterscheidet sie von den sogenannten Weichmagneten, die nur so lange magnetisch sind, wie ein äußeres Magnetfeld vorhanden ist. Permanentmagnete kennen Sie zum Beispiel als die typischen runden Magnete, mit denen Sie Ihre Bilder an der Kühlschrankschranktür befestigen oder in Besprechungen Notizen auf einem Flipchart festhalten.

Sie werden auch für die Elektrifizierung unseres Verkehrs benötigt, zum Beispiel für Elektromotoren in Autos, Elektrofahrzeugen und ähnlichen Systemen. Auch für einige Arten von Windkraftanlagen werden große Permanentmagnete benötigt. Um den Umbau unserer regenerativen Energieversorgung und die Elektrifizierung des Verkehrs erfolgreich zu vollziehen und unseren Einfluss auf die Natur und das Klima zu verringern, werden wir viele solcher starken Magnete brauchen – je stärker, desto besser. Dabei kann man Magnetismus als volumenabhängige Größe verstehen, vergleichbar mit der Dichte von Bauteilen. Wenn es zum Beispiel gelingt, einen Magneten in Größe eines Würfels 10 Prozent stärker zu machen, dann kann man auch den Würfel 10 Prozent kleiner machen und bleibt dadurch bei der ursprünglichen Kraft des Magneten, aber benötigt weniger Platz beziehungsweise Gewicht. Das bedeutet für ein E-Auto mehr Reichweite bei gleichem (oder ggf. sogar geringerem) Gewicht. Denn bewegte Objekte sind immer energieeffizienter, wenn ihr Gewicht reduziert wird.

Die stärksten heute im Handel erhältlichen Dauermagnete werden aus Neodym (Nd), Eisen (Fe) und Bor (B) hergestellt, aber je nach Anwendung werden auch die Ele-

mente Dysprosium (Dy), Praseodym (Pr), Terbium (Tb) oder Cer (Ce) in kleineren Mengen verwendet (all diese Elemente zählen zu den sog. Seltenen Erdmetallen). Die dauermagnetischen Eigenschaften beruhen auf einer intermetallischen Phase mit einer Stöchiometrie von $2\text{Nd}:14\text{Fe}:1\text{B}$ (kurz: 2:14:1). Die magnetische Stärke von Neodym-Magneten ist hauptsächlich auf ihre tetragonale Kristallstruktur mit sehr hoher einachsiger magnetokristalliner Anisotropie zurückzuführen. Das bedeutet, dass ein Kristall dieses Materials bevorzugt entlang einer bestimmten Kristallachse magnetisiert wird, aber nur sehr schwer in andere Richtungen magnetisiert werden kann. Um die intrinsischen Eigenschaften der intermetallischen Phase auf den Magneten zu übertragen, ist jedoch eine geeignete mikrostrukturelle Gestaltung erforderlich. Die Mikrostruktur von Neodym-Magneten in festem Zustand besteht abhängig vom Fertigungsprozess aus Körnern mit einer Größe von Nanometern oder Mikrometern, was dazu führt, dass diese Magnete ihre Magnetisierungsrichtung nur schwer ändern oder verlieren können, was sich in einem hohen Wert der sogenannten Koerzitivfeldstärke zeigt, die den Widerstand des Magneten gegen Entmagnetisierung in einem äußeren Magnetfeld angibt. Die kommerzielle pulvermetallurgische Herstellung von Nd-Fe-B-Magneten kann unterteilt werden in 1) heiß verformte Magnete aus nanokristallinem Material, die durch schnelle Erstarrung hergestellt werden, oder 2) gesinterte Magnete aus mikrokristallinen Pulvern, die durch Wasserstoffbehandlung(en) und Mahlen hergestellt werden. Ziel der Magnetherstellung ist es, ein Gefüge zu erhalten, das aufgrund eines hohen Texturierungsgrades der 2:14:1-Phase/Körner die höchste Remanenz und zeitgleich eine starke Koerzitivfeldstärke aufweist.

Das Problem mit dem Neodym

Man könnte zunächst vermuten, dass das Hauptproblem bei Neodym ist, dass es sich um ein Seltenes-Erd-Material handelt, das in der Erdkruste nur begrenzt verfügbar ist. Auch wenn es verglichen mit anderen Elementen durchaus selten ist, so ist das Material gar nicht so selten, wie der Name dieser Materialgruppe vermuten lässt (in der Erdkruste etwa so häufig wie Kupfer oder Kobalt). Es kommt in der Natur nur gebunden in Erzen vor, und zudem nicht in metallischer Form oder unvermischt (rein) und erfordert daher teure und nicht unbedingt umweltschonende Extraktions- und Raffinationsschritte, bevor es in Magneten verwendet werden kann. Diese Erze enthalten viele verschiedene Elemente und nur geringe Mengen an Nd. Die typischen Schritte zur Gewinnung von Nd aus diesen Erzen sind Zerkleinern und Mahlen, gefolgt von einer Behandlung mit heißer Schwefelsäure, wobei Kohlendioxid entsteht, dann Fluorwasserstoff und Siliciumtetrafluorid, schließlich Trocknen und Auslaugen mit Wasser.

Die aktuellen Hauptabbaugebiete sind vor allem China (39,8 %), USA (34,2 %), Russland (25,2 %), Vietnam (0,4 %) und Malaysia (0,3 %), aber es gäbe weltweit noch einige weitere mögliche Abbaugebiete, die sich zur Zeit vor allem nur aus wirtschaftlichen Gründen nicht rentieren. Natürlich sind die Gewinnung, die aufwendige Raffinierung oder die wirtschaftliche und politische Abhängigkeit von Herkunftsländern schon genug Gründe, sich nach Möglichkeiten umzusehen, um den Bedarf zu reduzieren, aber noch keine Ausschlusskriterien für ein so nützliches Element. Problematisch ist der rapide zunehmende Verbrauch durch die bereits eingangs geschilderten Einsatzbereiche, die in den kommenden Jahren noch deutlich zunehmen werden. So geht eine Studie der Europäischen Kommission aus dem Jahre 2020,

die die wichtigsten Materialien für die zukünftige Wirtschaft und deren Verfügbarkeiten für die EU unter die Lupe nimmt, davon aus, dass bereits bis 2025 die benötigte Menge an Nd um das 120-Fache zunehmen wird. [1]

Additive Fertigung von Permanentmagneten

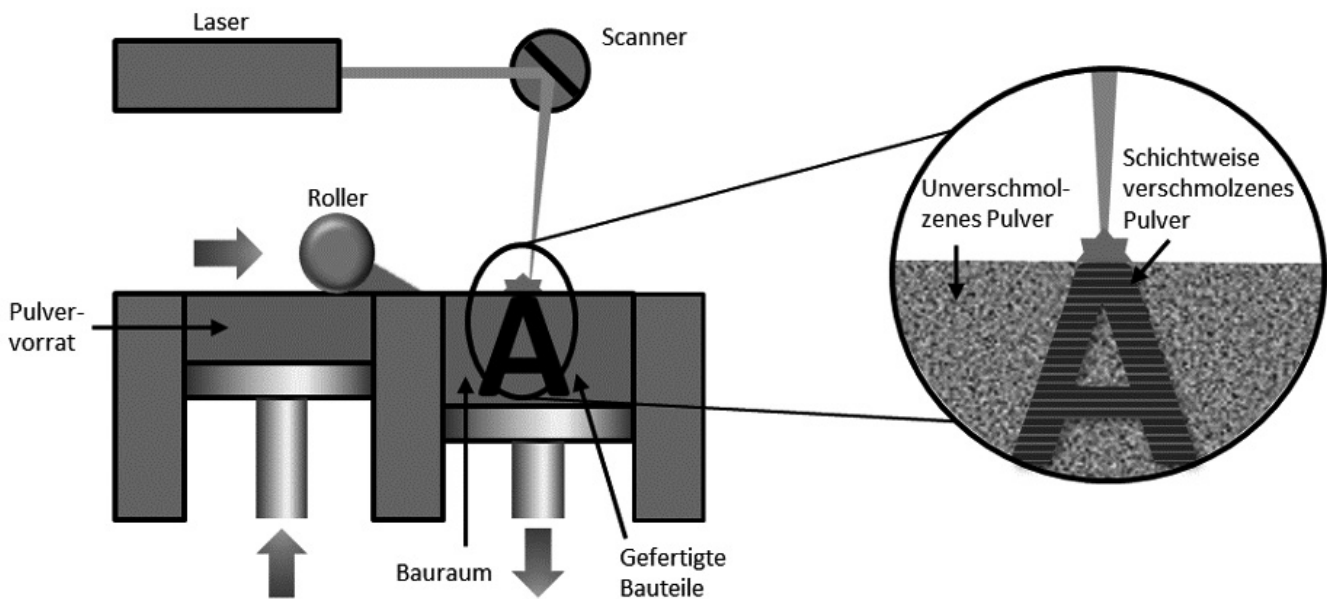
Die additive Fertigung von Metallen (engl. Additive Manufacturing, kurz AM), auch bekannt als Metall-3D-Druck, wird definiert als „der Prozess des Verbindens von Materialien zur Herstellung von Teilen aus 3D-Modelldaten, in der Regel Schicht für Schicht, im Gegensatz zur subtraktiven Fertigung und zu formativen Fertigungsmethoden“ [2]. Der Begriff „additiv“ stammt von der Anhäufung von Schichten übereinander zur Herstellung von Teilen, im Gegensatz zu subtraktiven Technologien, bei denen Material durch Drehen, Fräsen oder Bohren entfernt wird. Dies bringt viele Vorteile mit sich, zum Beispiel die Möglichkeit, Material nur dort zu positionieren, wo es für die endgültige Teilegeometrie

benötigt wird. Wenn man sich eine geometrisch komplexe Struktur vorstellt, die normalerweise aus einem Metallblock herausgefräst würde, würde man viele Metallspäne erhalten. Man könnte diese Späne recyceln, um einen anderen Metallblock zu erhalten und dieses wertvolle Material wiederzuverwenden, aber dies wäre mit einem zusätzlichen Preis- und Zeitfaktor verbunden – außerdem wäre die Materialqualität aufgrund von umwelt- und verfahrensbedingten Einflüssen wie Kühlmitteln nie wieder so hoch wie ursprünglich.

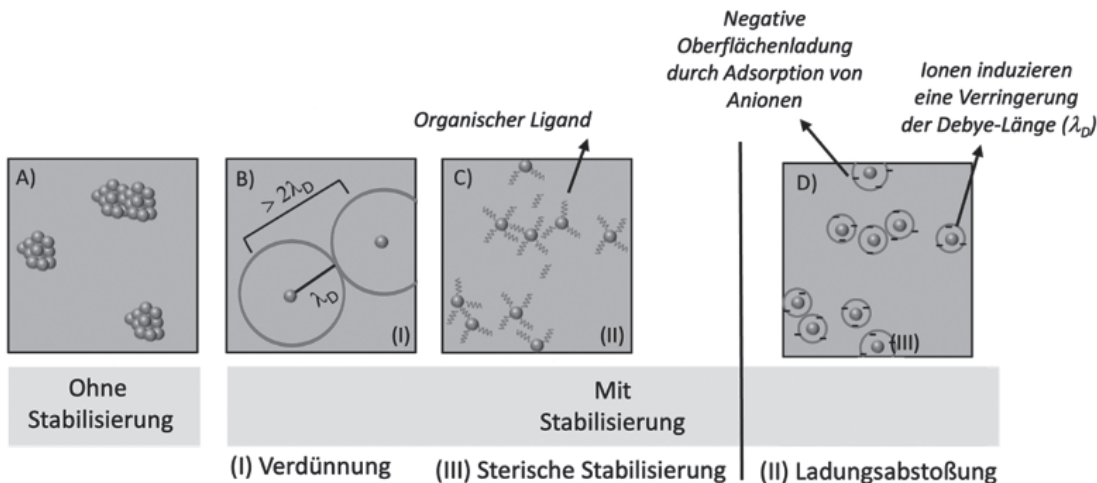
Für Guss- oder Spritzgussverfahren werden Werkzeuge oder Formen benötigt, was bei AM nicht der Fall ist. Für die Herstellung von Teilen, für die Werkzeuge erforderlich sind, muss ein Mindestproduktionsvolumen erreicht werden, um die Investitionen zu kompensieren. Durch die rasante Entwicklung der AM-Technologien in den letzten drei Jahrzehnten sind heute auch Produktionsmengen von Zehntausenden von Produkten pro Maschine und Jahr möglich. AM ist eine relativ neue Art der Fertigung, die grob auf die ersten Patente in den späten 1980er Jahren

zurückgeht. Sie diente zunächst dem Rapid Prototyping und ließ sich leicht für Polymere anpassen. In den 1990er Jahren begann man, es für Metalle zu verwenden, wobei ein Laser eine dünne Schicht Metallpulver aufschmolz – der Beginn der AM-Prozessart, die heute als „Powder Bed Fusion“ unter Verwendung eines Laserstrahls, engl. „Laser Beam“, (PBF-LB) bekannt ist (schematischer Aufbau gezeigt in Abb. 1).

Die pulverbettbasierten Systeme haben ihren Namen von der Methode des Pulverauftrags erhalten, bei der eine dünne Schicht mit einer gleichmäßigen Dicke von 20 bis 100 µm aufgetragen wird (abhängig von der Materialart, der Größe der Pulverpartikel, der Produktivität, den gewünschten Eigenschaften des Endprodukts wie der Oberflächenrauheit und vielen anderen Faktoren) und dem Laserstrahl, der die Pulverschicht an den gewünschten Stellen aufschmilzt, um ein 3D-Produkt durch den Aufbau in horizontalen Schichten herzustellen. In letzter Zeit wurden die Systeme durch den Einsatz mehrerer Lasersysteme in derselben Anlage verbessert, um mehrere



(1) Schematische Darstellung des PBF-LB-Prozesses zur Erstellung von Permanentmagneten
 Quelle: eigene Darstellung



(2) Grafische Darstellung von nicht-stabilisierten Nanopartikelsystemen, die zur Aggregation neigen (A) und stabilisierten Nanopartikelsystemen, in denen Aggregation durch (B) Verdünnung, (C) Sterische Stabilisierung und (D) Ladungsabstoßung verhindert wird.

Quelle: [5]: Ziefuß, A. R. Synthesis, Surface Chemistry, and Application of Fully Inorganic Gold Nanoclusters by Pulsed Laser Fragmentation in Liquids, DuEPublico: Duisburg-Essen Publications online, University of Duisburg-Essen, Germany, 2022. <https://doi.org/10.17185/DUEPUBLICO/76118>

Bereiche gleichzeitig zu bearbeiten und die Produktivität zu steigern. Mittels AM lassen sich zudem komplexere Geometrien herstellen als mit den meisten konventionellen Fertigungstechnologien.

Serienmäßig werden Permanentmagnete heutzutage per Pressen und Sintern, Spritzgießen (magnetische Metallpartikel gebunden in einer erhitzbaren Kunststoffmatrix) oder vergleichbaren Fertigungstechnologien gefertigt. Diese sind in der Regel auf formgebende Werkzeuge angewiesen und sind entsprechend limitiert in der (wirtschaftlichen) Realisierbarkeit von komplexeren Geometrien. Um die benötigte Gesamtmenge an Seltenen Erden zu reduzieren, wird seit kurzem ein neuer Weg erprobt: die Fertigung von Permanentmagneten mittels additiver Fertigung, die an die jeweilige Anwendung angepasste Geometrien besitzen.

Als geeignetstes Verfahren der inzwischen großen Zahl an verschiedenen Varianten, wurde das pulverbettbasierte Schmelzen mittels Laserstrahl ermittelt. Wenn das metallische Pulvermaterial durch den Laserstrahl geschmolzen wird, erstarrt es mit hohen Raten von 10^3 – 10^5 K/s [3], was zu einem schnellen „Einfrieren“ der

Kornstrukturen führt, was sich positiv auf das funktionale Verhalten von Permanentmagneten auswirken kann. Allerdings können sich im erstarrten Bauteil viele Poren und Spannungsrisse unterschiedlicher Größe bilden, was generell zu einer geringeren Bauteildichte, aber auch zu verringerten mechanischen und magnetischen Eigenschaften führt.

An dieser Stelle setzt das Teilprojekt A11 des Sonderforschungsbereich-Transregio 270 „HoMMage“ an. Unser Hauptziel ist es, Permanentmagnete, ressourcenschonend und in geometrisch anspruchsvollen Formen mittels des 3D-Druckverfahrens PBF-LB zu erzeugen. Die Funktionalität darf darunter natürlich nicht leiden und könnte sogar verbessert werden, da abhängig von der Formgebung der Fluss des Magnetfeldes optimiert werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, verwenden wir ultrakleine Helfer im Nanometermaßstab, mit denen wir handelsübliche magnetische Pulver beschichten.

Die verwendeten Nanopartikel besitzen dabei selbst keine permanentmagnetischen Eigenschaften. Bei geschickter Wahl des Materials können jedoch andere Eigenschaften der Metallnanopartikel als Stell-

schrauben genutzt werden, um die magnetischen Eigenschaften des finalen Bauteils deutlich zu beeinflussen.

Das Teilprojekt A11 hat sich zum Ziel gesetzt, genau diese Parameter ausfindig zu machen, zu verstehen und kontrolliert einsetzen zu können. Als Modellmaterialien werden dabei folgende Metallnanopartikeltypen untersucht:

(1) Silbernanopartikel (Ag NP):

Ag NP besitzen einen geringeren Schmelzpunkt als das Nd-basierte Mikropulver. Während PFB-LB wird dieses entsprechend zuerst schmelzen, sodass die Hohlräume im Pulverbett zunächst durch Ag befüllt werden und somit die Packungsdichte des Pulverbetts (Masse pro Volumeneinheit) zunimmt. Basierend auf bereits existierenden Studien korreliert eine Zunahme der Packungsdichte im Pulverbett mit einer Verbesserung der finalen Bauteildichte [4], was wiederum einen positiven Einfluss auf die permanentmagnetischen Eigenschaften haben soll, da der Volumenanteil der Nd-reichen Phasen in den Magneten erhöht wird. Die Körner bestehen in der Regel aus NdFeB in einer

Zusammensetzung von 2:14:1. Aber, was auf den ersten Blick vielleicht überrascht: die Korngrenzen (engl. Grain Boundaries, kurz GB), die sich zwischen den Körnern bilden, bestehen typischerweise aus deutlich höheren Mengen an Nd (metallisches Nd oder Nd-reiche intermetallische Verbindungen). Es ist bekannt, dass diese Phasen der Hauptgrund für die hohe Stärke dieser Art von Permanentmagneten sind, da sie eine magnetische Isolierung der Körner voneinander bilden:

(2) *Zirkoniumdiborid-Nanopartikel (ZrB₂ NP):*

ZrB₂ NP besitzen einen höheren Schmelzpunkt als das Nd-basierte Pulver und zudem eine höhere Rekristallisationstemperatur, erstarrt also bei höheren Temperaturen als die übrigen Elemente im Pulverbett. Von diesen Ausgangspunkten aus, die auch als Keimbildungsstellen bezeichnet werden, ist es für die Magnetlegierung in der Umgebung dieser Keime thermodynamisch einfacher (d.h. es wird weniger Energie benötigt) den Phasenübergang zu vollziehen und ebenfalls zu erstarren. Bei Permanentmagneten hat man festgestellt, dass die magnetische Stärke durch viele kleine Körner höher ist. Folglich könnte man durch schnelles Abkühlen stärkere Magnete erzeugen. Allerdings ist dies nicht so leicht, wie man erwarten könnte, denn es gibt einen Geschwindigkeitsbereich für die Abkühlung, den wir nutzen müssen, um schnell abzukühlen, um kleinere Körner zu erhalten, aber nicht zu schnell, um schwache Magnete mit spröder Struktur zu vermeiden. Die Verwendung zusätzlicher, künstlich hinzugefügter Keimbildungsstellen (z.B. ZrB₂-NP) hilft dabei, die Geschwindigkeiten dieses Prozesses innerhalb dieses nutzbaren Zwischenbereichs zu halten, aber viele zusätzliche Startpunkte für die leichte Bildung weiterer Körner zu gewinnen, was zu stärkeren Magneten führt, die nicht so spröde sind.

(3) *Kupfernanopartikel (Cu NP), Entkoppelte Körner:*

Cu NP sind besonders interessant, denn sie kombinieren teilweise die unter (1) und (2) beschriebenen Eigenschaften. Cu kann aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften besonders in die Korngrenzen und die Zwischenphasen wandern und so die Nd₂Fe₁₄B-Körner besser voneinander isolieren (entkoppeln), wodurch besonders die Koerzitivfeldstärke verbessert werden kann. Zudem hat es ebenso wie Ag einen niedrigeren Schmelzpunkt als das Magnetpulver und kann dabei helfen, die Packungsdichte des Pulvers im Prozess und dadurch die finale Dichte von Bauteilen zu verbessern. Zu guter Letzt ist Cu für seine außerordentliche Wärmeleitfähigkeit bekannt und kann so bereits in geringen Mengen dabei helfen die Verarbeitbarkeit von NdFeB im PBF-LB-Verfahren zu verbessern.

Laser-basierte Synthese von Nanopartikeln

Nun stellt sich natürlich noch die Frage, wie eben solche Nanopartikel hergestellt werden. Zunächst einmal stellt sich die Frage, ob die Partikel trocken als Pulver oder in Flüssigkeit verteilt vorliegen sollen. Trockene Nanopulver bergen ein erhebliches Gesundheitsrisiko bei der Handhabung, da diese zum Stäuben neigen; zudem haben wir in Vorarbeiten gezeigt, dass das Aufbringen der Nanopartikel auf die 3D-Druck-Pulver deutlich gleichmäßiger ist, wenn dies nass geschieht, die Nanopartikel also als Kolloid vorliegen. Der dabei wohl wichtigste Faktor ist ihre Stabilität, denn solche ultrakleine Teilchen tendieren aufgrund ihrer hohen Oberfläche zu Aggregationserscheinungen (Zusammenlagerung einzelner Nanopartikel zu einem größeren Verband). Aggregation führt dabei zu einer Verringerung der spezifischen Oberfläche und damit zu einer Verringerung der freien Enthalpie des Systems, sodass eben solche Pro-

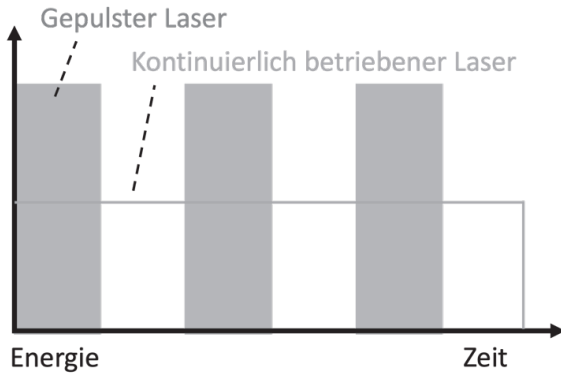
zesse thermodynamisch begünstigt werden (Abb. 2A). Stabilisierung von Nanopartikeln in Flüssigkeit wird deswegen häufig durch einen der drei Ansätze erreicht, die in Abbildung (2 B–D) dargestellt sind.

(1) Der erste Ansatz, die Verdünnung, zielt darauf ab, den Abstand zwischen den Partikeln zu vergrößern und damit die Kollisionswahrscheinlichkeit der Partikel zu verringern, was die Kinetik der Aggregation verlangsamt. Der Abstand zweier Partikel sollte dabei doppelt so groß sein wie die sogenannte Debyelänge (D), welche ein charakteristischer Maßstab dafür ist, wann das Potential eines elektrischen Feldes von Ladungsträgern (in unserem Fall den NP) auf einen sehr geringen Wert (1/e) abfällt. Sie beschreibt also die Reichweite eines Schutzschildes, das sich um jedes einzelne NP in Flüssigkeit befindet. Bei diesem Ansatz ist die zu erzielende Partikelkonzentration in Lösung naturgemäß gering und ein effizientes Arbeiten ist kaum möglich.

(2) Daher werden häufig organische Liganden als sterische Stabilisatoren eingesetzt. Der Ligand wirkt wie eine Schutzhülle und verhindert, dass sich zwei Teilchen zu nahe kommen. Hierbei handelt es sich häufig um organische Verbindungen, sodass die Partikel anschließend durch den in Abbildung (2C) skizzierten Mechanismus stabilisiert werden. Die dabei erzeugte Ligandenhülle wird entsprechend zu einem Teil des Nanopartikelsystems. Allerdings würden derartige Zusatzstoffe beim Laser-3D-Druck (PBF-LB) zersetzt werden und Gase bilden, sodass ein Popcorn-Effekt auftreten würde, was den Druckprozess erheblich stören würde. Wie bereits eingangs erwähnt, gibt es noch eine dritte Möglichkeit

(3), Nanopartikel zu stabilisieren – durch Ladungsabstoßung. In dieser Methode werden Nanopartikel mit einer geladenen Oberfläche erzeugt, sodass sich die Einzelpartikel aufgrund ihrer Oberflächenladungen in Flüssigkeit abstoßen.





(3) Darstellung der Energie pro Zeiteinheit eines kontinuierlichen vs. eines gepulsten Laser-Systems.
Quelle: eigene Darstellung

Die am Lehrstuhl für Technische Chemie der Universität Duisburg-Essen unter Leitung von Professor Stephan Barcikowski entwickelte Laser-basierte Synthese von Nanopartikeln in Flüssigkeit erlaubt die kontinuierliche Herstellung eben solcher stabilisierter Nanopartikel. Hierbei wird ein gepulster Laser auf ein in einer Flüssigkeit befindliches Metallplättchen fokussiert. Jeder Laserpuls induziert dabei einen lokalen Abtrag der Oberfläche, wobei die Nanopartikel gebildet werden. Um dies zu realisieren, werden gepulste Lasersysteme benötigt. Diese emittieren pro Sekunde mehrere Tausende bis Millionen Pulse. Jeder Puls hat dabei eine Beleuchtungsdauer von nur wenigen Nano- bis Pikosekunden, also unvorstellbar kurze Lichtblitze. Im Mittel ist die emittierte Energie eines gepulsten Lasers zwar vergleichbar mit einem kontinuierlichen Lasersystem, in der Spitze erreicht der gepulste Laser aber höhere Leistungen (Abb. 3). Dennoch und genau aus diesem Grund kann mit diesen Lasersystemen Großes bewegt werden.

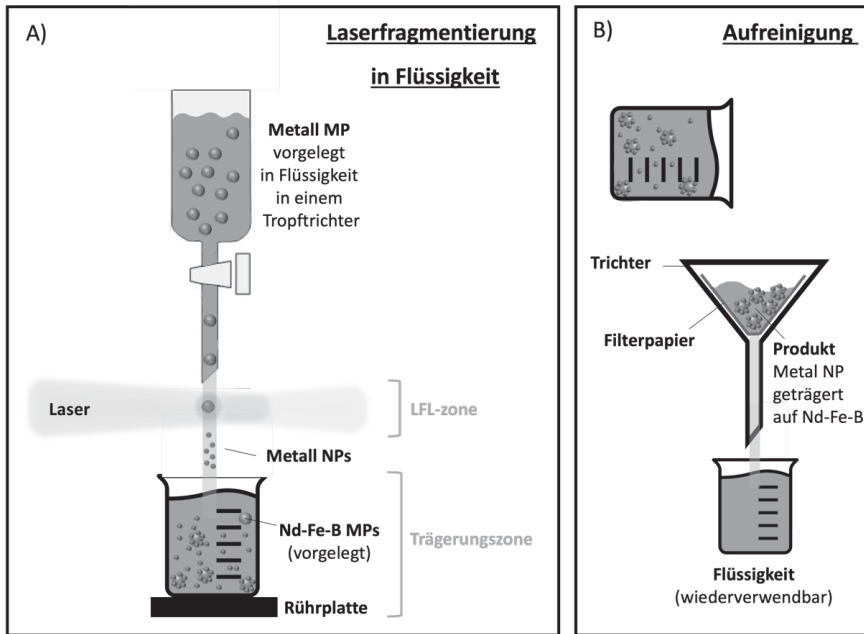
Jeder Laserpuls bewirkt eine augenblickliche Verdampfung des getroffenen Bereichs. Vielleicht haben Sie schonmal gesehen, was mit Wasser passiert, wenn man es bei eiskalten Temperaturen (etwa -50 °C) in die Luft schleudert. Genau, es bildet sich feiner Schnee, da die Wassermoleküle instantan

einfröhen. Ähnlich ergeht es unserem heißen Dampf, der in die noch kühle Umgebung (Raumtemperatur) geschleudert wird. Die Atome des verdampften Materials frieren ein und es bilden sich die gewünschten Nanopartikel. Aufgrund der lokal sehr extremen Bedingungen kommt es dabei zur Oberflächenaufladung der gebildeten Nanopartikeloberfläche, sodass sich in wässriger Lösung eine elektrochemische Doppelschicht ausbildet, die merklich zur Stabilität unserer Partikel beiträgt. Eine schematische Darstellung des Prozesses, ist in Abbildung (4A) zu finden. Im Grunde dispergieren wir Mikropartikel in einer Flüssigkeit (Wasser, Alkohol, ...) und lassen diese Dispersion durch einen Flüssigkeitsstrahl fließen. Der Laser eintrag geschieht horizontal und ist so an die Flussgeschwindigkeit des Flüssigkeitsstrahls gekoppelt, dass jedes Volumenelement mindestens einmal durch den Laser getroffen wird. Wie oben beschrieben, führt dies zur Erzeugung von Nanopartikeln, die wir anschließend in ein Becherglas überführen. Aufgrund der Abwesenheit von Liganden, können die so erzeugten Nanopartikel durch einfaches Mischen auf den Nd-Fe-B Mikropartikeln abgeschieden werden. Das Nd-Fe-B wird also in dem Becherglas vorgelegt und die Trägerung findet instantan statt. Anschließend muss das finale Pulver natürlich noch

vom Lösungsmittel getrennt und getrocknet werden (Abb. 4B). Das Lösungsmittel kann dabei aufgefangen werden und umweltfreundlich erneut für die laserbasierte Synthese weiterer Nanopartikel eingesetzt werden. Natürlich stellt sich hier die Frage, welchen Massenanteil die Nanopartikel im finalen Produkt haben müssen, damit überhaupt ein Effekt zu sehen ist. Um dies zu beantworten, werden sukzessive Beladungsreihen gefahren und die finalen magnetischen Eigenschaften der nano-funktionalisierten, 3D-gedruckten Bauteile überprüft. Unsere aktuellen Ergebnisse lassen darauf schließen, dass jedes Nd-Fe-B-Mikropartikel eine halbe Schicht aus Metallnanopartikeln benötigt, um einen maximalen Einfluss zu beobachten. [6,7] Dies entspricht einer Menge von etwa einem Massenprozent NP (abhängig von Materialeigenschaften), bei einer Magnet-Gesamtmasse von einem Kilogramm (übliche Pulvermenge pro Bauprozess), also lediglich einem Gramm und vergleichbar mit dem Gewicht eines halben Gummibärcchens.

Summary

Permanent magnets have become an indispensable part of our everyday lives as they are needed to operate wind turbines, electric cars and



(4A) Schematische Darstellung der Laserfragmentierung in Flüssigkeit mit nachgeschalteter Trägerung der erzeugten Nanopartikel auf Nd-Fe-B-Mikropulver
(4B) Aufreinigung des magnetischen Materials
Quelle: eigene Darstellung

robots, among other things. However, today's strongest permanent magnets contain the element neodymium, which is only available in limited quantities on earth. Resource conservation is therefore essential and is to be ensured by the addition of nanoparticles. These tiny particles perform two tasks at once: reducing the use of rare earths and improving the stability and performance of 3D-printed magnets.

Anmerkungen/Literatur

- [1] RMIS – Raw Materials Information System <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6> (accessed May 29, 2023).
 [2] DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03, Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie; Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/3290011>.
 [3] Hooper, P. A. Melt Pool Temperature and Cooling Rates in Laser Powder Bed Fusion. *Addit. Manuf.*, 2018, 22, 548–559. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.032>.
 [4] Onbattuvelli, V. P.; Enneti, R. K.; Park,

- S.-J.; Atre, S. V. The Effects of Nanoparticle Addition on SiC and AlN Powder–Polymer Mixtures: Packing and Flow Behavior. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2013, 36, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2012.08.014>.
 [5] Ziefuß, A. R. Synthesis, Surface Chemistry, and Application of Fully Inorganic Gold Nanoclusters by Pulsed Laser Fragmentation in Liquids, DuEPublico: Duisburg-Essen Publications online, University of Duisburg-Essen, Germany, 2022. <https://doi.org/10.17185/DUEPUBLICO/76118>.
 [6] Gabriel, P.; Liu, J.; Staab, F.; Oyedeji, T. D.; Yang, Y.; Hantke, N.; Scheibel, F.; Adabifiroozjaei, E.; Recalde-Benitez, O.; Molina-Luna, L.; Rao, Z.; Gault, B.; Sehr, J. T.; Skokov, K.; Xu, B.-X.; Durst, K.; Gutfleisch, O.; Barcikowski, S.; Ziefuß, A. R. Influence of Silver Nanoparticle Addition on Nd-Fe-B Permanent Magnets Produced by Laser Powder Bed Fusion. *ChemRxiv* May 5, 2023. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-7pmp2>.
 [7] Liu, J.; Yang, Y.; Staab, F.; Doñate-Buendia, C.; Streubel, R.; Gökce, B.; Macarri, F.; Gabriel, P.; Zingsem, B.; Spoddig, D.; Skokov, K.; Gutfleisch, O.; Farle, M.; Barcikowski, S.; Ziefuß, A. R. Influence of Colloidal Surface-Addition with Surfactant-Free Laser-Generated Metal Nanoparticles on Nd-Fe-B Permanent Magnets Produced by Suction Casting. *ChemRxiv* May 24, 2023. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-vw29k-v2>

Die Autor*innen

Philipp Gabriel hat 2017 sein Maschinenbaustudium an der Technischen Hochschule Köln abgeschlossen und war im Anschluss für fünf Jahre bei der Firma „GKN Powder Metallurgy“ tätig. Als Entwicklungsingenieur konzentrierte er sich besonders auf die industrielle Entwicklung von additiven Fertigungstechnologien für Metallbauteile. Aktuell promoviert er im Arbeitskreis von Prof. Dr.-Ing. Stephan Barcikowski und untersucht als SFB/TRR 270 HoMMage-assoziiierter Student die Laser-basierte Synthese und Trägerung von Nanopartikeln für den Einsatz in der additiven Fertigung.

Stephan Barcikowski studierte Chemie an der Leibniz Universität Hannover und promovierte im Jahr 2004 mit Auszeichnung im Fachbereich Maschinenbau. Im Anschluss übernahm er die Leitung einer Forschungsgruppe am Laserzentrum Hannover. Er habilitierte 2011 an der Leibniz Universität Hannover. Noch im selben Jahr folgte er seinem Ruf auf den Lehrstuhl für Technische Chemie I an der Universität Duisburg-Essen. Hier befasst er sich mit der laserbasierten Synthese von Nanomaterialien, deren Charakterisierung und ihrem Einsatz in den Themengebieten Katalyse, Biomedizin und der additiven Fertigung.

Anna Rosa Ziefuß studierte Chemie an der Universität Duisburg-Essen. Sie promovierte dort im Jahr 2022 im Fachbereich der technischen Chemie mit Auszeichnung und erhielt im Anschluss an ihre Promotion ein Stipendium der UDE für hochqualifizierte Nachwuchswissenschaftlerinnen. Bereits seit 2021 leitet sie an der UDE eine Forschungsgruppe mit dem Schwerpunkt Oberflächenchemie und Laserbearbeitung, die sich maßgeblich mit der laserbasierten Synthese von Nanopartikeln zur Erzeugung neuer Materialien für das Laserschmelzdruckverfahren beschäftigt.



Stephan Barckowski. Foto: Vladimir Unkovic

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/81850

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240417-072045-2

Erschienen in: UNIKATE 60 (2024), S. 38-47

Alle Rechte vorbehalten.