

Pressemeldung

11. Dezember 2024

Metallproduktion neu gedacht: CO₂-frei und energieeffizient in einem einzigen Schritt

Max-Planck-Wissenschaftler kombinieren die Gewinnung, Herstellung, Mischung und Verarbeitung von Metallen und Legierungen in einem einzigen, umweltfreundlichen Schritt. Ihre Ergebnisse sind jetzt in der Zeitschrift Nature veröffentlicht.

Die Produktion von jährlich etwa zwei Milliarden Tonnen Metalle ist für 10% der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich. Allein um eine Tonne Eisen zu produzieren, werden zwei Tonnen CO₂ ausgestoßen. Bei der Produktion von einer Tonne Nickel fallen sogar 14 Tonnen oder mehr CO₂ an. Dabei sind Eisen und Nickel für die Luft- und Raumfahrt, den Transport von flüssigem Wasserstoff und für die Energiewende von entscheidender Bedeutung. Aus ihnen entstehen sogenannte Invarlegierungen, die aufgrund ihrer geringen thermischen Ausdehnung ideal für diese Anwendungsfelder sind.

Wie lassen sich solche **Legierungen CO₂-frei und mit geringem Energieverbrauch** herstellen? Dazu haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Nachhaltige Materialien (MPI-SusMat) eine radikal **neue Strategie** entwickelt. In einem einzigen Prozessschritt und Reaktor werden die Metallgewinnung, das Legieren, also das Mischen, und die thermomechanische Verarbeitung integriert, so daß am Ende das fertige Material entsteht. Diese Methode ermöglicht die direkte Umwandlung von Erzen in anwendungsfähige Produkte. Das Max-Planck Team hat seine Ergebnisse in der Fachzeitschrift Nature veröffentlicht.

Kompakt-Metallurgie spart bis zu 40% Energie und ist CO₂-frei

„Wir haben uns gefragt: Können wir eine Legierung mit optimalen Eigenschaften direkt aus Erzen herstellen und ohne CO₂-Emissionen?“, sagt Dr. Shaolou Wei, Humboldt-Forschungsstipendiat am MPI-SusMat und Erstautor der Publikation. Die konventionelle Legierungsproduktion ist seit mehr als 6000 Jahren in der Regel ein dreistufiger Prozess: Zuerst wird Sauerstoff aus den Erzen entfernt, um das reine Metall zu erhalten. Dieser Schritt heißt Reduktion: Eisen- oder Nickelerz werden somit zu Metall reduziert. Danach werden mehrere Metalle oder andere Elemente erhitzt und verflüssigt, um sie miteinander zu vermischen, das sogenannte Legieren. Zum Schluss wird die Legierung thermomechanisch bearbeitet, also geschmiedet, gewalzt, erhitzt, um die gewünschten Eigenschaften zu erzielen. Jeder dieser Schritte ist energieintensiv, vor allem da die Erze und Metalle mehrmals erhitzt, verflüssigt und wieder abgekühlt werden. Zudem wird bisher Kohlenstoff als Energieträger und Reduktionsmittel genutzt, was zu erheblichen CO₂-Emissionen führt.

„Der Schlüsselgedanke besteht darin, die **Thermodynamik und Kinetik** jedes beteiligten Elements zu verstehen und Elemente mit ähnlichem Reduktions- und Mischverhalten bei etwa 700°C zu verwenden“, erklärt Wei. „Bei 700°C können wir den Sauerstoff aus den Erzen entfernen und die so entstehenden Metalle in einem einzigen Schritt legieren, und zwar ohne das Material verflüssigen zu müssen. Dies spart enorme Mengen Energie.“ Im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden, bei denen Erze mit Kohlenstoff reduziert werden, verwenden die Max-Planck-Wissenschaftler

Wasserstoff als Reduktionsmittel. „Die Verwendung von Wasserstoff anstelle von Kohlenstoff bringt vier entscheidende Vorteile mit sich“, erklärt Professor Dierk Raabe, geschäftsführender Direktor am MPI-SusMat und korrespondierender Autor der Studie. „Erstens entsteht bei der wasserstoffbasierten Reduktion nur Wasser als Nebenprodukt, und kein CO₂. Zweitens werden direkt reine Metalle beziehungsweise sogar gleich deren fertige Legierungen gewonnen. Man muss also keinen verbliebenen Kohlenstoff aus dem Endprodukt entfernen. Dies spart Zeit und Energie. Drittens führen wir den Prozess bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen und in der festen Phase, also nicht in flüssigen Schmelzen, durch und sparen damit erneut Energie. Viertens vermeiden wir das häufige Abkühlen und Wiedererhitzen, das für herkömmliche metallurgische Prozesse charakteristisch ist. Und können auch hier erheblich Energie sparen.“ Insgesamt wird der Energieverbrauch im Vergleich zur konventionellen Metallurgie um bis zu 40% gesenkt.

Die mit dieser Methode hergestellten Invar-Legierungen haben dieselbe geringe Wärmeausdehnung wie die konventionell hergestellten Invar-Legierungen, und bieten aufgrund der verfeinerten Mikrostruktur, die aus diesem Verfahren resultiert, sogar eine bessere mechanische Festigkeit.

Vom Labor zur Industrie

Die Max-Planck-Wissenschaftler konnten zeigen, dass die Herstellung von Invar-Legierungen durch ein schnelles, CO₂-freies und energieeffizientes Verfahren vielversprechend ist. Um diese Methode vom jetzigen Labormaßstab zur industriellen Anwendung zu bringen, müssen die Wissenschaftler **drei zentrale Herausforderungen** überwinden:

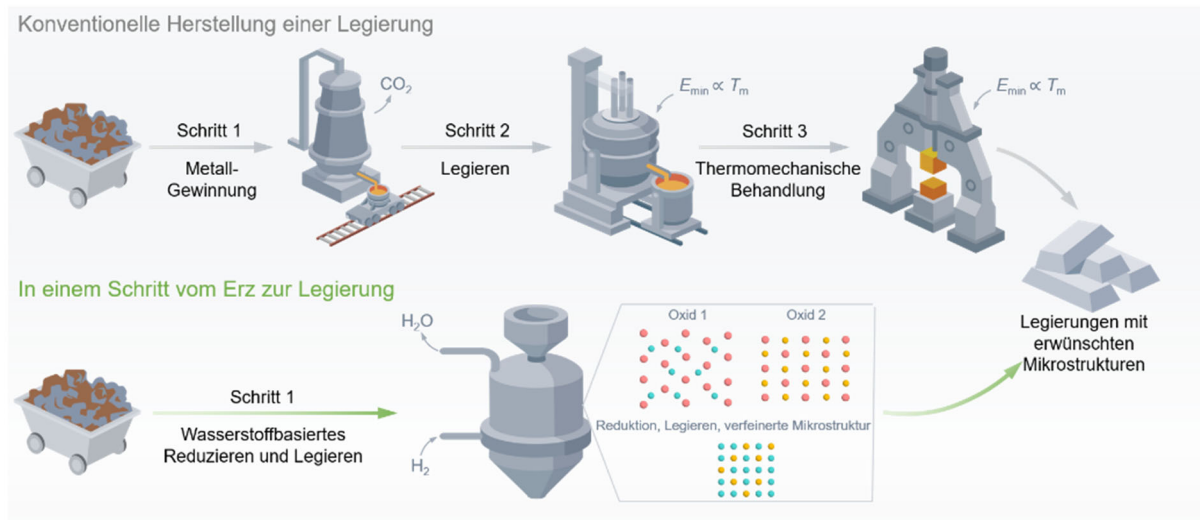
Erstens: in der jetzigen Forschungsarbeit verwendeten die Wissenschaftler reine Oxide. In der Industrie hingegen werden günstigere, verunreinigte Oxide verwendet. Das heißt für das Max-Planck-Team, dass sie ihren Prozess anpassen müssen, um weiterhin dieselbe Qualität der Legierungen zu erhalten. Zweitens: Die Verwendung von reinem Wasserstoff im Reduktionsprozess ist zwar effektiv, aber für industrielle Anwendungen kostspielig. Das Team führt nun Experimente mit niedrigeren Wasserstoffkonzentrationen bei höheren Temperaturen durch, um ein optimales Gleichgewicht zwischen Wasserstoffverbrauch und Energiekosten zu finden und den Prozess für die Industrie wirtschaftlicher zu machen. Drittens: für industrielle Zwecke werden sehr fein porige Metalle gebraucht, die mit der neuen Methode der Max-Planck-Wissenschaftler nicht direkt, sondern mit einem zusätzlichen Schritt, dem Sintering, hergestellt werden müssten.

Das neue Verfahren ist nicht nur für Invar-Legierungen interessant, sondern für alle Legierungen auf der Basis von Eisen, Nickel, Kupfer oder Kobalt. Im Fokus des Düsseldorfer Max-Planck-Teams stehen jetzt auch komplexe Legierungen, die aus mehr als fünf verschiedenen Elementen bestehen, sogenannte Hoch-Entropie-Legierungen. Diese werden zum Beispiel in **Flugzeugturbinen und Elektromotoren** eingesetzt. Eine weitere vielversprechende Richtung könnte die Verwendung von metallurgischen Abfällen, anstatt reiner Oxide, sein.

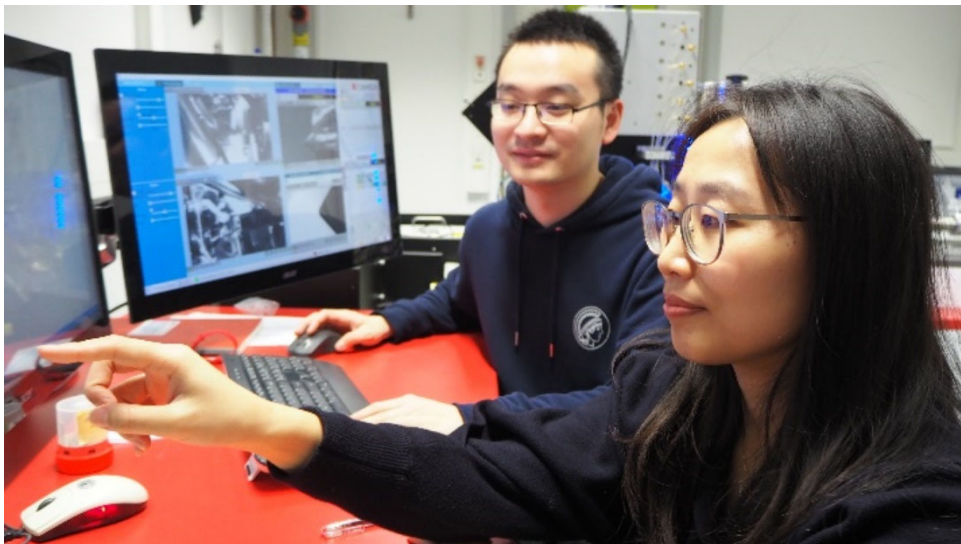
Da keine hohen Temperaturen und fossilen Brennstoffe mehr erforderlich sind, könnte dieser einstufige, wasserstoffbasierte Prozess den ökologischen Fußabdruck der

Legierungsproduktion drastisch reduzieren und den Weg für eine grünere, nachhaltigere Zukunft in der Metallurgie ebnen.

Die Forschung wurde durch ein Stipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung für Shaolou Wei und einen European Advanced Research Grant von Dierk Raabe finanziert.



Eine neue Designstrategie revolutioniert die bereits seit 6000 Jahren bestehende konventionelle Metallurgie und ist dabei CO_2 -frei und energiesparend. Die Metallgewinnung, Herstellung, Mischung und Verarbeitung werden in nur einem Prozessschritt und Reaktor zusammengefasst. Copyright: Shaolou Wei, Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien GmbH



Unterscheidet sich die Mikrostruktur der neuen Invar-Legierungen von denen der konventionell hergestellten? Xizhen Dong (im Vordergrund) und Shaolou Wei vergleichen die Legierungen mit der dreidimensionalen Atomsondentomographie und stellen fest, dass die neuen Legierungen sogar feinporiger sind und dadurch mechanisch fester. Copyright: Yasmin Ahmed Salem, Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien GmbH



Original-Publikation:

S.L. Wei, Y. Ma, D. Raabe: One step from oxides to sustainable bulk alloys. In: Nature 633 (2024) 816-822. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07932-w>

Die Materialwissenschaften stehen vor großen Aufgaben: Alleine die Stahlindustrie verursacht acht Prozent der weltweiten Kohlendioxidemissionen. Der Großteil der jährlich anfallenden Menge an Elektroschrott, der so viel wiegt wie 350 Mega-Kreuzfahrtschiffe, wird deponiert oder verbrannt und nicht recycelt, obwohl er viele wertvolle Metalle enthält. Das Max-Planck-Institut für Nachhaltige Materialien (MPI-SusMat) erforscht, wie sich Materialien, die für moderne Gesellschaften essentiell sind, klimaneutral und ressourcenschonend produzieren, nutzen und recyceln lassen. So suchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Wege, Metalle mit Wasserstoff anstelle fossiler Brennstoffe zu gewinnen, die Lebensdauer von Werkstoffen zu verlängern, diese nahezu endlos wiederverwertbar zu machen und die Abfallmenge zu reduzieren. Bei der Entwicklung von Materialien, die diese Anforderungen erfüllen, setzen die Forschenden vermehrt auf künstliche Intelligenz und machen den Prozess auf diese Weise deutlich effizienter. Das Institut forscht bis 2024 unter dem Namen Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH.

Mehr Neuigkeiten aus dem MPI-SusMat gibt es bei [LinkedIn](#), [YouTube](#) und [X](#).

Kontakt:

Yasmin Ahmed Salem, M.A.
Referentin für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
E-Mail: y.ahmedsalem@mpie.de
Tel.: +49 (0) 211 6792 722
<https://www.mpi-susmat.de>

