



The background of the entire page is a close-up photograph of various metal components, possibly from a mechanical assembly. The image is heavily tinted with a vibrant blue color. The lighting creates strong highlights and deep shadows, emphasizing the textures and geometric shapes of the metal parts. Some parts appear to be cylindrical or rectangular in cross-section, while others have more complex, angular forms. The overall composition is abstract and industrial.

Metall kennen wir als biegsamen Draht, dünne Folie, harte Klinge oder stabile Konstruktion. Trotz aller Funktionalität beim Einsatz von Metallwerkstoffen kommt es aber auch immer wieder zu Unfällen, weil das Material »ermüdet« und bricht, so geschehen beim Zugunglück in Eschede im Jahr 1998. Wie die atomare Struktur von Metall unter Beigabe bestimmter Zusatzstoffe gezielt verändert und gehärtet werden kann, erforschen Materialwissenschaftler der Georg-August-Universität Göttingen. Dabei setzen sie modernste Untersuchungsmethoden ein, darunter eine tomographische Atomsonde, die weltweit nur in zehn Laboratorien vorhanden ist.

Härte und Nachgiebigkeit

Was Metalle hart macht und wann sie nachgeben

Reiner Kirchheim

Vergleichen wir einen Blumen- draht mit einem Nagel, so ist der Draht weich, so dass er mühelos um Pflanze und Stützstange ge- wickelt werden kann. Der Nagel ist hart, damit er beim Einschlagen gerade bleibt. Eine chemische Analyse würde allerdings in bei- den Fällen das gleiche Ergebnis liefern. Blumen draht und Nagel bestehen aus Eisen, dem etwas Kohlenstoff zugemischt ist. Blu- mendraht und Nagel können sich also nur dadurch unterscheiden, dass ihre Eisen- und Kohlenstoff-

atome unterschiedlich angeord- net sind. Wir selbst können diese Anordnung verändern, indem wir den Blumen draht mehrfach bie- gen, wobei er zunehmend härter wird und schließlich bricht.

Ähnliche Beispiele lassen sich für nahezu alle Gebrauchsmetalle und Metalllegierungen finden, wobei das tiefere Verständnis für deren Eigenschaften immer eng mit der Atomanordnung verbun- den ist. Wie sich die Positionen von Atomen bestimmen lassen und welchen Einfluss diese An- ordnung auf die mechanischen Ei- genschaften haben kann, soll im Folgenden erläutert werden.

Über die Streuung von Rönt- genstrahlen oder auch durch di- rekte Beobachtung im Elektronen- oder Feldionenmikroskop (Abbil- dung 1) kann man erkennen, dass die meisten Metallatome einer Probe regelmäßig auf einem Gitter, einem so genannten Kristall- gitter angeordnet sind. Zwei der bei Metallen häufigsten periodi- schen Anordnungen – das ku- bisch-raumzentrierte (krz) und das kubisch-flächenzentrierte (kfz) Gitter – sind in Abbildung 2 darge- stellt. Eisenatome nehmen bei Raumtemperatur die Plätze des kubisch-raumzentrierten Gitters ein und ordnen sich oberhalb von

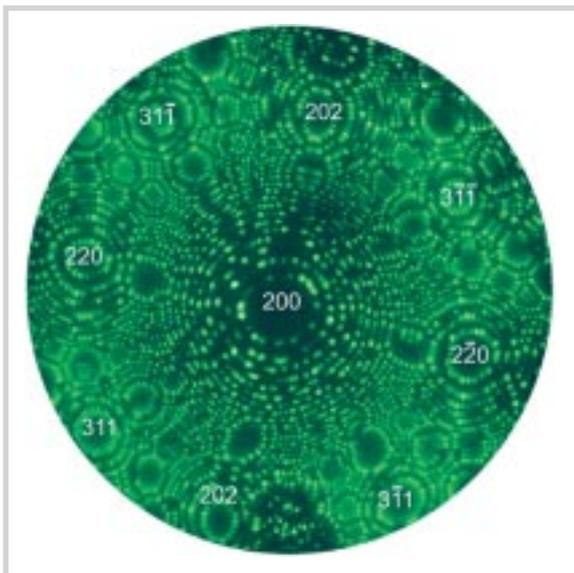
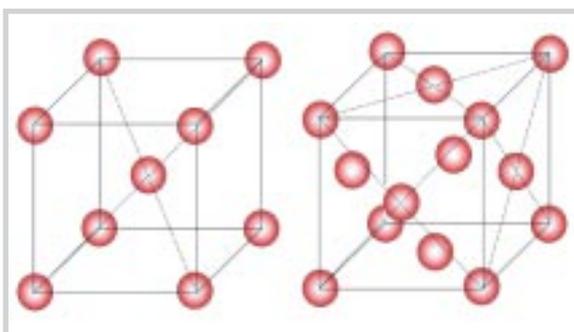


Abbildung 1: Feldionenmikroskopische Aufnahme einer Kupferspitze, auf der die hellen Punkte Kupferatome und die Ringe Begrenzungen von Atomlagen darstellen. Durch die Zahlen werden bestimmte Richtungen des Gitters beschrieben.

Abbildung 2: Atompositionen in zwei häufigen Gittertypen. Im kubisch raumzentrierten Gitter (links) sitzen die Atome auf den Ecken und in der Mitte des Würfels. Im kubisch flächenzentrierten auf den Ecken und den Flächenmitten. Tatsächlich sind die Atome größer und berühren sich.



Tomographische Atomsonde

Mit der tomographischen Atomsonde gibt es am Institut für Materialphysik der Universität Göttingen ein Gerät, mit dem Metalle im Nanometerbereich in ihrer Struktur und Zusammensetzung analysiert werden können. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine gezielte Optimierung der Werkstoffe. Eine tomographische Atomsonde gibt es weltweit zurzeit nur in zehn Laboratorien, die über die erforderlichen, umfangreichen Erfahrungen für den Betrieb dieser komplexen Methode verfügen. Die zu untersuchenden Materialien müssen in Form dünner Spitzen mit einem Krümmungsradius von etwa 50 Nanometern vorliegen. Wie spitz und filligran das ist, zeigt der Vergleich mit einer Nähnadelspitze unter dem Elektronenmikroskop. Die Nähnadel erscheint um ein Vielfaches breiter und in ihrer Spitze rund und großflächig.

Wird an diese ultradünne Spitze ein kurzer Hochspannungsimpuls angelegt, fliegen geladene Atome der Probe von der Spitze zu einer Detektorscheibe, also umgekehrt zu einem Blitzableiter, bei dem die elektrischen Ladungen von einer Wolke zu einer Spitze fliegen. Mit dem Hochspannungsimpuls und dem damit verbundenen Abflug eines Atoms wird eine Uhr gestartet und beim Auftreffen auf den Detektor gestoppt. Aus der anliegenden elektrischen Spannung und der so gemessenen Flugzeit lässt sich die Masse und damit die chemische Natur des abgelösten Probenatoms über eine einfache Energiebilanz errechnen. Auf dem Detektor der Atomsonde kann man weiterhin den Auftreffort des Atoms und damit rückwärts über seine gerade Flugbahn die Position auf der Probenspitze ermitteln. Unter günstigen Bedingungen können Wissenschaftler bis zu zwei Millionen Atome von einer Fläche von zirka 100 Quadrat-Nanometern ablösen und so auch in die Tiefe der Probe hinein analysieren. Schließlich erhält man die Verteilung der chemischen Elemente in einem Volumen von zirka zehn mal zehn mal hundert Nanometern und kann sie auf einem Computerbildschirm darstellen. Da bei einer Betrachtung dieses Volumens die äußeren Atome die inneren verdecken, wird es in Scheiben zerlegt, die separat dargestellt werden. Ein Verfahren, das auch in der Medizin bei der Kernspintomographie oder bei der Röntgentomographie verwandt wird und zu dem Namen tomographische Atomsonde geführt hat.

912 Grad Celsius in einem kubisch-flächenzentrierten Gitter an. Letzteres ist leichter verformbar, weshalb die Schmiede seit Jahrtausenden das Eisen erst zum Glühen bringen, bevor sie es hämmern oder biegen.

Feste Metalle bilden sich durch Erstarrung aus der Schmelze, wobei beim Abkühlen zunächst Kristallkeime mit einer periodischen Anordnung der Metallatome entstehen. Diese Keime wachsen zu so genannten Körnern heran, deren Oberflächen sich daraufhin annähern, aufeinander treffen und schließlich Korngrenzen generieren. Da die Kristallkeime in der Regel unabhängig voneinander entstehen, sind die zugehörigen Gitter gegeneinander verdreht oder verkippt, was sich wiederum direkt mit unseren hochauflösenden Mikroskopen zeigen lässt. Eine periodische Anordnung in abgegrenzten Bereichen und deren Trennung durch Korngrenzen kann auch in Schüttungen von gleich großen Kugeln beobachtet werden (Abbildung 3). Oftmals werden die Körner von Metallen so groß, dass man sie mit dem bloßen Auge sehen kann. Ihre Anordnung gleicht einem Patchwork und kann beispielsweise auf feuerverzinkten Eisenteilen direkt erkannt werden. Je nach Orientierung der einzelnen Zinkkörner bilden sich an der Luft unterschiedlich dicke Zinkoxidhäute, so dass sich die Körner in verschiedenen Graustufen voneinander abheben.

Neben der Oxidation hängen viele andere Eigenschaften von Metallen davon ab, wie die einzelnen Körner angeordnet sind beziehungsweise wie die Korngrenzen liegen. So wird ein Metall durch viele Korngrenzen und kleine Körner härter gemacht. Die Korngrenzen als flächenhafte Defekte des Kristallgitters wirken bei der plastischen Verformung der Metalle als Hindernisse. Diesen Zusammenhang kann man auf der atomaren Ebene am besten verste-

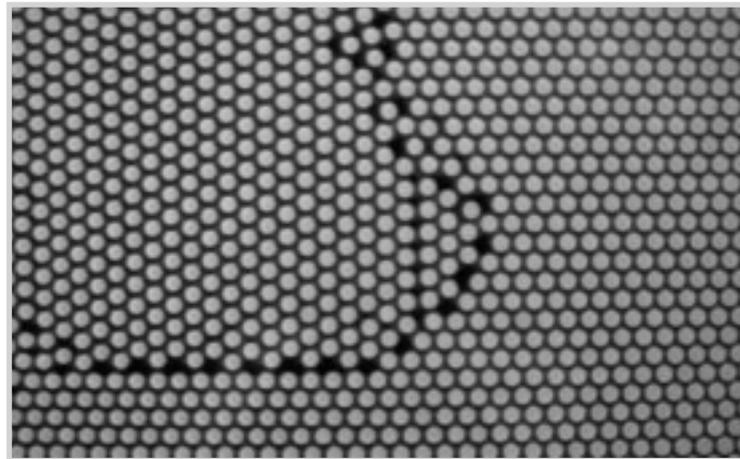


Abbildung 3: Zweidimensionale Schüttung von Kugeln. Zwei Bereiche mit unterschiedlich orientierten Richtungen der Kugelanordnung werden von einer »Korngrenze« getrennt.

hen, wenn man weitere linienhafte Defekte des Kristallgitters, die so genannten Versetzungen, betrachtet.

Wie die Korngrenzen lassen sich auch die Versetzungen im Elektronenmikroskop sichtbar machen (Abbildung 4) und zum Beispiel als Begrenzungslinien von Gitterebenen erkennen. Eine im Kristall eingeschobene Halbebene von Atomen führt dann zu der in Abbildung 5 dargestellten Atomanordnung und ihrer Verschiebung innerhalb des Gitters. Statt die obere und die untere Hälfte des Kristallgitters auf einmal gegeneinander zu verschieben, wobei gleichzeitig alle Bindungen gebrochen werden müssen, aber sofort vom Ausgangs- in den Endzustand übergegangen wird, wählt die Natur einen kraftsparenden Weg: Durch Erzeugung einer Versetzung werden nur lokal wenige Bindungen unterbrochen.

Dieses Prinzip der lokalen Verformung und deren Bewegung durch einen Körper werden auch beim Verschieben eines Teppichs durch Faltenbildung oder bei der Bewegung einer Raupe realisiert. In diesen beiden Fällen würde es ebenfalls mehr Kraft erfordern, die Körper starr zu verschieben.

In anderen kristallinen Materialien, wie Keramiken oder Salzen, sind die Bindungen der Atome starrer und stärker. Versetzungen lassen sich deshalb nur schwer generieren und nur schwer bewegen. Bei äußerer Krafteinwirkung bildet sich eher ein Riss, als dass der Körper durch Versetzungsbildung und Versetzungswanderung ausweicht. Die Sprödigkeit dieser Materialien lässt sich also aus den Eigenschaften der Versetzungen verstehen. Die bereits erwähnte leichte Versetzungsbildung in Metallen führt dazu, dass alle Metalle im reinen Zustand und mit we-

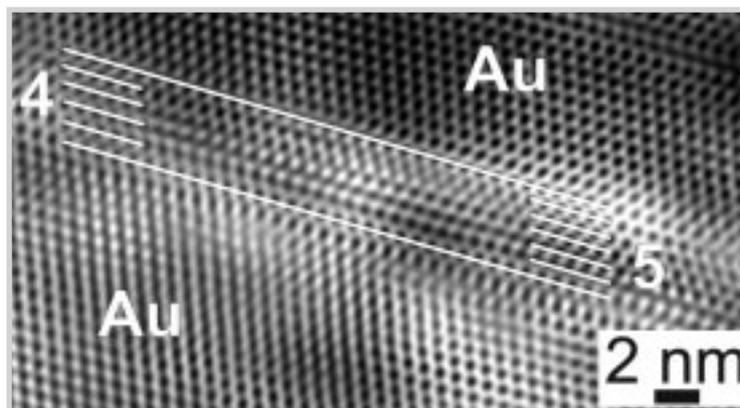


Abbildung 4: Hochauflösende elektronenmikroskopische Aufnahme einer Versetzung in Gold. Diese ist als eine von schräg rechts eingeschobene Gitterebene markiert. Von den fünf eintretenden Ebenen treten links nur vier aus.

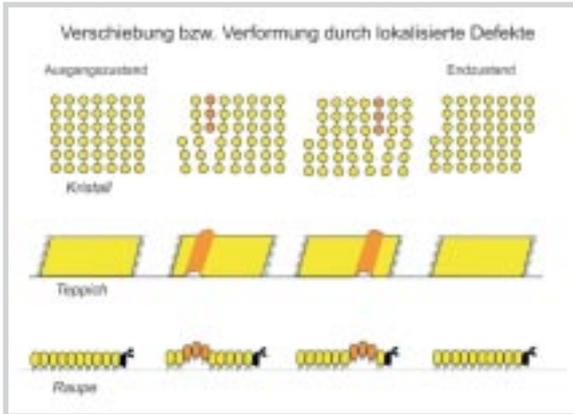


Abbildung 5: In einem Gitter wird der obere Teil nicht simultan gegenüber dem unteren durch Aufreißen aller Bindungen verschoben, sondern über eine Versetzung schrittweise realisiert. Dieses Kraft sparende Prinzip der lokalen Verformung und ihrer Bewegung wird an zwei weiteren Beispielen einer Teppichfalte und einer Raupe dargestellt.

nigen Korngrenzen sehr weich sind und sich oftmals schon unter dem Eigengewicht verformen. Diese an das Fließen grenzende leichte Verformbarkeit wird beispielsweise bei der Herstellung von Metaldichtungen genutzt.

Ansonsten ist man eher bestrebt, Metalle zu härten. Alle Maßnahmen die dafür entwickelt wurden zielen darauf ab, die Bewegung der Versetzungen zu behindern. So kann man zum Beispiel dem Metall andere Atome beimischen und Legierungen bilden. Diese Fremdatome können sich bevorzugt an die Versetzungen anlagern und müssen dann von diesen »mitgeschleppt«

werden. Aber auch Versetzungen selbst behindern die Bewegung anderer Versetzungen. So führt das mehrmalige Biegen eines Drahtes zu einer zunehmenden Versetzungszahl und der gegenseitigen Behinderung ihrer Bewegung. Schließlich werden ihre Wege so kurz, dass sie der aufgezogenen Verbiegung nicht mehr genügen können und ein Riss gebildet werden muss. Dieses Phänomen wird bei Metallen Ermüdung genannt. Ermüdung war letztlich die Ursache des Zugunglücks bei Eschede im Jahr 1998, bei dem ein Rad der Lokomotive brach.

Weitere Hindernisse sind die Korngrenzen, da eine Versetzung beim Passieren dieser Grenzen ihre kristallographische Ebene und ihre kristallographische Richtung ändern muss. In der aktuellen Metallforschung versucht man deshalb, Legierungen so herzustellen, dass sie möglichst viele Korngrenzen enthalten, was gleichbedeutend mit einer geringen Korngröße ist. Ein weiteres bewährtes Verfahren zur Härtung besteht in dem Einbau oder der Erzeugung unlöslicher Stoffe innerhalb des metallischen Gitters. Diese Stoffe sollten in Form kleiner Partikel, auch Ausscheidungen genannt, fein verteilt vorliegen, um so den Versetzungen vielfältigen Widerstand entgegenzusetzen zu können.

Sowohl bei der Korngrenzenhärtung als auch bei der Aus-

scheidungshärtung sind die Wissenschaftler bei der Materialentwicklung bezüglich der Korngröße – oder auch Partikelgröße – in den Nanometerbereich vorgestoßen. So enthalten hochfeste Stähle Karbidausscheidungen von nur wenigen Nanometern Durchmesser (1 Nanometer = 1 Milliardstel Meter). Die Entwicklung solcher fortgeschrittenen Werkstoffe ist weitgehend empirisch in der Industrie erfolgt, da einerseits unter dem dort herrschenden Konkurrenzdruck eine zeitaufwändige grundlegende Untersuchung nicht angebracht erschien und andererseits die experimentellen Methoden der Naturwissenschaften es noch nicht erlaubten, Materialien auf der Nanometerskala zu charakterisieren. Mit der tomographischen Atomsonde gibt es jedoch seit einigen Jahren am Göttinger Institut für Materialphysik ein Gerät, das es ermöglicht, Metalle im Nanometerbereich auf ihre Struktur und Zusammensetzung hin zu analysieren. Die mit der Atomsonde durchgeführten Untersuchungen sollen das Verständnis für die Entstehung und Stabilität von Ausscheidungen und Korngrenzen vertiefen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine gezielte Optimierung der Werkstoffe, was bei der erreichten Komplexität dieser Materialien mit einer rein empirischen Entwicklung nicht mehr zielführend möglich wäre.

Wie alle hochgezüchteten Produkte reagieren auch moderne Legierungen sensibel auf externe Einflüsse. Bei Temperaturänderungen während der Herstellung oder im Einsatz können Körner wachsen oder die kleinen Ausscheidungen vergrößern und so zu einem Härteverlust führen. Besonders gefürchtet ist der Wasserstoff, der entweder schon ungewollt bei der Herstellung oder beim Einsatz durch Kor-



rosionsvorgänge in einen metallischen Werkstoff gelangen kann. Dabei kommt es zur Wasserstoffversprödung. Wasserstoffversprödungen haben zu spektakulären Schadensfällen geführt, darunter dem Zusammenbruch der Berliner Kongresshalle im Mai 1980. Schadhafte Armierungseisen hatten die Decke einstürzen lassen. Oftmals genügen nur wenige Wasserstoffatome in einer Million Metallatomen, um auf bisher unverstandene Weise den Werkstoff zu schwächen.

Anhand von drei Beispielen der aktuellen Forschung aus dem Institut für Materialphysik der Universität Göttingen soll nun ausführlicher auf die Stabilität von Korngrenzen und Ausscheidungen, wie sie mit der tomographischen Atomsonde untersucht wurden, und die damit verbundene mechanische Stabilität eingegangen werden.

In Abbildung 6 ist die Verteilung von Phosphoratomen in einer Nickellegierung, die 3,6 Prozent Phosphor enthielt, wiedergegeben. Deutlich erkennt man eine heterogene Verteilung der Phosphoratome, wobei mit einer detaillierteren Analyse die Orte hoher Phosphorkonzentration als Korngrenzen identifiziert werden können und die davon umschlossenen Körner einen Durchmesser von zirka zehn Nanometern haben. Die Anreicherung des Phosphors an den Korngrenzen hat zwei Konsequenzen: Einerseits wird dadurch – wie im folgenden Abschnitt diskutiert – das Anwachsen der Körner bei höheren Temperaturen verhindert, andererseits führt eine Ausscheidung von Elementen wie Phosphor und Schwefel an den Korngrenzen zu einer Materialversprödung. Wie eine spätere Analyse der Schiffsplanken der gesunkenen Titanic ergab, enthielt der Stahl relativ viel Phosphor und Schwefel, die angelagert an Korngrenzen und bei Temperaturen um null Grad Celsius die Rissbildung entlang

Sonderforschungsbereich 602: Komplexe Strukturen in kondensierter Materie von atomarer bis mesoskopischer Skala

(red.) Die Miniaturisierung bei elektronischen Datenspeichern wie beispielsweise Memory Sticks und Chips, CDs und DVDs schreitet voran. Das Vordringen zu noch kleineren Abmessungen erfordert theoretische und experimentelle Grundlagenforschung. Dabei stehen die Wechselwirkung einzelner Atome und die daraus gebildeten komplexen Strukturen im Mittelpunkt. In den letzten Jahrzehnten ist es Festkörperphysikern und Materialwissenschaftlern zunehmend gelungen, Materie im Nanometerbereich zu analysieren und zu strukturieren. Diese Arbeit steht auch im Mittelpunkt des Sonderforschungsbereichs 602 »Komplexe Strukturen in kondensierter Materie von atomarer bis mesoskopischer Skala« an der Universität Göttingen. 13 Teilprojekte aus den Bereichen Materialwissenschaften, Festkörperphysik, Halbleiterphysik, Experimentalphysik, Theoretische Physik und Anorganische Chemie arbeiten hier zusammen. Der SFB wurde in einer ersten Förderperiode von 2001 bis 2004 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit rund vier Millionen Euro finanziert. Nach einer positiven Begutachtung begann im Januar 2005 eine zweite, vierjährige Förderperiode mit einer Fördersumme von fünf Millionen Euro. Sprecher des SFB ist der Materialwissenschaftler Prof. Dr. Reiner Kirchheim.

Die wissenschaftlichen Ziele des SFB 602 liegen im Bereich der

Nanotechnologie neuer Materialien. Die Abmessungen der räumlichen Strukturen erstrecken sich dabei auf den atomaren Bereich bei einem Milliardstel Meter – Nanometer – und reichen bis zum mesoskopischen Bereich von einem Millionstel Meter. Dabei weisen die zu untersuchenden Materialien komplexe Strukturen auf und sind entweder aus vielen Komponenten zusammengesetzt mit einem hohen Anteil an Grenz- und Oberflächen bei dünnen Schichten oder sie befinden sich nicht in einem stabilen Gleichgewicht. Neben strukturellen Eigenschaften untersuchen die Göttinger Wissenschaftler vor allem die magnetischen Eigenschaften dieser Stoffe. Obwohl das Interesse an strukturellen und chemischen Charakterisierungen von Materialien im Nanometer-Bereich schon immer sehr groß war, sind geeignete Untersuchungstechniken erst in den letzten Jahren soweit vorangetrieben worden, dass zuverlässige Aussagen möglich sind.

An der Universität Göttingen können die Forscher des SFB dabei eine hervorragende Ausstattung einsetzen: Rastersondentechniken, Elektronenmikroskopie, Ionenstrahlanalytik und Feldionenmikroskopie sowie Methoden der Spektroskopie stehen in den modernsten Versionen zur Verfügung. Als eines von zehn Laboren weltweit kann auch eine tomographische Atomsonde genutzt werden.



der Korngrenzen erleichtert haben dürften.

Für die genannte Nickellegierung ist diese Versprödung von geringer Bedeutung, da sie als abriebfeste und korrosionsbeständige Schicht eingesetzt wird. Bei guter Haftung auf der Unterlage spielt somit die Sprödigkeit wie bei einer Emaillenschicht nur eine untergeordnete Rolle. In der chemischen Industrie und der Mikroelektronik, wo Nickel-Phosphor Schichten verwendet werden, ist dagegen die Beständigkeit des na-

als 15 Prozent Phosphor »amorph« sind, also keine kristallinen Anteile, das heißt Körner, enthalten.

Das Phänomen der Vergrößerung einer Grenzfläche durch Erhöhung der Konzentration eines Zusatzstoffes ist uns aus dem täglichen Leben bekannt: Beim Wasser reichern sich die Moleküle von Seifen, Waschpulvern und anderen Waschmitteln an der Oberfläche an, indem sie ihren Wasser abstoßenden Teil des Moleküls aus dem Wasser herausstrecken. Die dabei gewonnene Energie

bei 150 Grad Celsius Kornwachstum zeigen.

In einer anderen Legierung aus Kupfer mit geringen Gehalten an Kobalt liegen die Kobaltatome nach raschem Erstarren der Schmelze statistisch verteilt zwischen den Kupferatomen vor. Eine Glühbehandlung bei zirka 500 Grad Celsius führt dazu, dass die Kobaltatome wegen einer gegenseitigen attraktiven Wechselwirkung sich zu kleinen Ausscheidungen zusammenballen. Dabei wird eine Grenzfläche zwischen Kobaltcluster und Kupfermatrix aufgebaut, was zunächst Energie kostet und die Keimbildung und das Wachstum der Ausscheidungen behindert. Da das Atomgitter des Kobalts mehr Raum beansprucht als das des Kupfers, wird das Gitter in der Nähe der Ausscheidungen elastisch verspannt. Auch hier versucht die Natur wieder die Energie zu minimieren, indem sie die Ausscheidungen entlang elastisch »weicher« Richtungen im Kupfergitter aneinander reiht und so zigarrenförmige Gebilde entstehen. Die Kupfer-Kobalt-Legierungen sind ein ideales Modellsystem, um die subtile Wechselwirkung verschiedener Energiebeiträge und ihren Einfluss auf die Ausscheidungsmorphologie zu studieren. Letztere wiederum bestimmt ganz gravierend die mechanischen Eigenschaften unserer gängigen Gebrauchslegierungen, insbesondere die der Aluminiumlegierungen.

Ebenfalls exemplarisch wurde die Wechselwirkung von Wasserstoff mit Ausscheidungen an dem Modellsystem Silber/Magnesiumoxid untersucht. Solche Materialien aus Edelmetallen und Oxidteilchen werden in der Elektrotechnik als Kontakte in Relais verwendet, wo sie bei den vielen Schaltvorgängen mechanisch und thermisch stark beansprucht werden. Deren Herstellung beginnt mit einer Silberlegierung mit statistisch verteilten Magnesiumatomen. Der Zustand des Glühens bei einer

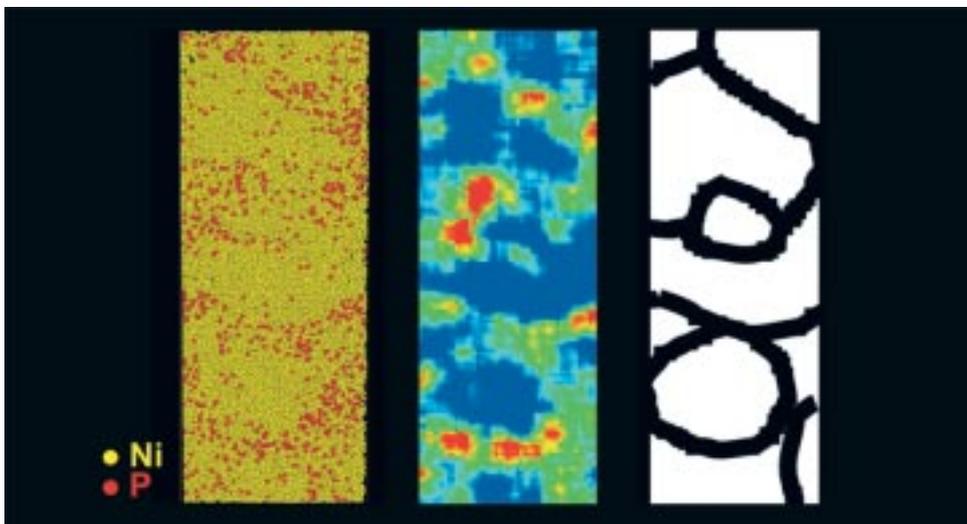


Abbildung 6: Links: Verteilung der rot markierten Phosphoratome unter den Nickelatomen (gelb). Mitte: Die Legierung enthielt nur vier Prozent Phosphor, die sich unterschiedlich verteilen (rot = 15 Prozent, blau = 0 Prozent). Rechts: Linien erhöhter Phosphorkonzentration (entsprechen den Korngrenzen!)

nostrukturellen Gefüges der Körner von größerer Bedeutung, weil dadurch die große Härte gewährleistet wird. Die Größe der Körner wird dabei in einfacher Weise über den Phosphorgehalt reguliert. Bei geringen Konzentrationen braucht man weniger Grenzfläche, um dort den Phosphor zu deponieren. Bei hohen Phosphormengen muss entsprechend viel Korngrenzfläche generiert werden, was kleinen Korndurchmessern entspricht. Eine quantitative Analyse dieses Zusammenhanges ergibt, dass bei 15 Prozent Phosphor der Korndurchmesser auf Null zurückgegangen ist, die Legierung also nur noch aus »Korngrenzenmaterial« besteht. Im Experiment beobachtet man dann, dass Nickellegierungen mit mehr

wird als Reduktion der Oberflächenspannung gewertet, so dass es nun leichter wird, die Wasseroberfläche durch Schaumbildung oder durch ein Eindringen zwischen Schmutzpartikeln und Textilfaser zu vergrößern. In analoger Weise wird die Energie der Phosphoratome reduziert, wenn sie an die Korngrenze gehen. Würde man umgekehrt die Korngrenzfläche erniedrigen, also den Korndurchmesser vergrößern wollen, so müssten Phosphoratome wieder zurück ins Korn. Da dieser Vorgang Energie kostet, vermeidet das System eine Kornvergrößerung und die Nickellegierungen können ihre nanokristalline Struktur bis zu zirka 400 Grad Celsius beibehalten, während reine nanokristalline Nickelproben schon

Temperatur von 800 Grad Celsius in Luft führt nun dazu, dass Sauerstoffatome eindringen und mit den Magnesiumatomen ein kleines Oxidteilchen bilden. Dadurch wird – wie zuvor erklärt – die Härte des Edelmetalls stark erhöht. Mit der tomographischen Atomsonde konnte zudem gezeigt werden, dass an der Grenzfläche des Oxidteilchens zur Silbermatrix nur Sauerstoffatome und keine Magnesiumatome vorliegen. Dieser Sauerstoff vermag Wasserstoff sehr stark zu binden, so dass man trotz fehlender Wasserstofflöslichkeit sowohl im Silber als auch im Magnesiumoxid bis zu einem Prozent davon in der Grenzfläche deponieren kann. Leider war die tomographische Atomsonde nicht in der Lage, den Wasserstoff direkt nachzuweisen, so dass im Institut für Materialphysik die Streuung von Neutronen, wie man sie aus einem Forschungsreaktor erhält, zum

Nachweis des Wasserstoffs und seiner Verteilung benutzt wurde.

Die hier durchgeführte Verwendung unterschiedlicher Messmethoden ist in der Materialphysik ein gängiges Vorgehen, um so die Nachteile einzelner Methoden eliminieren zu können. Die zusätzliche Einlagerung der Wasserstoffatome an der Oxid/Metall-Grenzfläche führt zu einer starken mechanischen Verspannung der Grenzfläche und in einigen Fällen zu einer Rissbildung. Diese Vorgänge laufen in ähnlicher Weise an Karbid/Metall-Grenzflächen in hochfesten Stählen ab. Sie sind eine Ursache für das Versagen des Stahls, wenn Wasserstoff im Spiel ist.

Zusammenfassung

Der vielfältige Einsatz metallischer Materialien ist eine Folge ihrer maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften. Je nach Ein-

satz kann ein Optimum an Verformbarkeit, Härte und Zähigkeit eingestellt werden. Wie in diesem Beitrag gezeigt wird, sind dafür Kristallbaufehler wie die Versetzungen, Korngrenzen und Ausscheidungen und deren Wechselwirkung mit gewollten und ungewollten Legierungsbestandteilen auf der atomaren Skala verantwortlich. Mit der tomographischen Atomsonde ist im Institut für Materialphysik der Universität Göttingen ein Instrument vorhanden, das es erlaubt, im Mikrokosmos der Materie Atome nach ihrer Art und bezüglich ihrer Position zu detektieren. Die Untersuchungen in diesem Bereich dienen einerseits dem wissenschaftlichen Verständnis der uns umgebenden komplexen Materie und bilden andererseits in der Anwendung die Grundlage für eine zielführende Entwicklung neuer Legierungssysteme. ◀

■ Metallic materials are widely used as a consequence of their tailored mechanical properties. Depending on their application, an optimum of deformability, hardness and toughness can be reached. As shown in this contribution, crystalline defects like dislocations, grain boundaries and precipitates and their mutual interaction on the atomic scale with intentional or unintentional alloying additions are responsible for these properties. In the tomographic atom probe, the Institute for Materials Physics of the University of Göttingen has at its disposal an instrument which allows the detection of atoms in the micro cosmos of matter according to their position and chemical nature. These studies serve on the one hand to enhance the scientific understanding of the complex materials surrounding us, whilst also providing the basis for the guided de-

■



Prof. Dr. Reiner Kirchheim, Jahrgang 1943, studierte Physik an der Universität Stuttgart, an der er 1973 promoviert wurde. Forschungsaufenthalte führten ihn anschließend in die USA an die Rice University in Houston und die University of Illinois. An der Universität Stuttgart habilitierte er sich im Jahr 1988. Nach weiteren USA-Aufenthalten nahm Prof. Kirchheim 1993 einen Ruf an das Institut für Materialphysik der Universität Göttingen an.

Prof. Kirchheim war von 1996 bis 2002 Sprecher des Sonderforschungsbereiches (SFB) 345 und ist seit 2002 Sprecher des SFB 602 »Komplexe Strukturen in kondensierter Materie von atomarer bis mesoskopischer Skala«. Für seine Forschungsarbeiten wurde er mit dem Carl Wagner Preis der Deutschen Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie, dem Honda-Kôtarô-Memorial Award der Tohoku University (Japan) und 2004 mit der Heyn-Gedenkmünze, der höchsten Auszeichnung der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde, ausgezeichnet. Außerdem wurde der Wissenschaftler in die Liste der Highly Cited Authors in Material Science aufgenommen.

Prof. Kirchheim ist Mitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde. Er gehört der Akademie für Technikwissenschaften und der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen an. Seine Arbeitsgebiete sind unter anderem Wasserstoff in Metallen, Thermodynamik von Legierungen sowie silikatische und polymere Gläser.