

Damit er nicht so schnell kaputtgeht

Der Werkstoff Stahl ist seit dreitausend Jahren in Gebrauch und noch immer für Innovationen gut. Man muss nur das Eisen bis in seine Atome zerlegen und neu schmieden.

Von Philipp Hummel

Thyssen-Krupp, der größte deutsche Stahlhersteller, steckt in der tiefsten Krise seiner Geschichte. Das Management reagiert mit Sparprogrammen und Entlassungen – und mit der Abkehr von der klassischen Schwerindustrie. „Wir werden von uns aus nie mehr zuerst den Hochöfen zeigen, wenn wir von Thyssen-Krupp reden“, sagte der Vorstandsvorsitzende Heinrich Hiesinger im Dezember 2012 in einem Interview mit der „Zeit“.

Trotzdem hat Stahl eine Zukunft. Daran lässt Dierk Raabe in seinem von freiliegenden Stahlträgern gestützten Büro keinen Zweifel. Raabe ist Direktor am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf. Hier arbeiten Materialforscher, Physiker und Chemiker an den Grundlagen für die Hightech-Stähle der Zukunft.

Stahl ist vor allem Eisen. Genauer versteht man darunter Legierungen, deren Hauptbestandteil Eisen ist und deren Kohlenstoffgehalt zwischen 0,01 und 2,06 Massenprozent liegt. Das mit Hilfe von Koks und hohen Temperaturen aus Erz gewonnene Roheisen enthält mehr Kohlenstoff und ist als Feststoff daher spröde. Durch Zuführung von Sauerstoff wird der Kohlenstoffgehalt verringert, um Eisen zu erhalten, das sich schmieden und schweißen lässt. Nun gehört Eisen zwar zu den Elementen, die in der Erdkruste besonders häufig vorkommen, ist unter diesen aber das schwerste. Magnesium, Aluminium und kohlefaserverstärkte Kunststoffe mögen leichter sein, sagt Raabe. In Sachen Belastbarkeit jedoch sowie beim Preis komme man an Stahl bis heute nicht vorbei.

Doch ist der Werkstoff durchaus verbesserungsfähig. So hat auch Stahl das Problem vieler Materialien: Entweder sind sie hart, aber spröde, oder sie sind gut verformbar und dafür weniger fest. Im modernen Fahrzeugbau etwa sind Stoffe gefragt, die sich im Falle eines

Das ewige Dilemma der Stahlkocher: Was sich formen lässt, ist oft nicht sehr fest.

Crashes den auftretenden Drücken widersetzen, aber andererseits leicht in Form zu bringen sind. Um das zu erreichen, müssen Bauteile aus klassischem Stahl entweder zusammengefügt werden. Oder man verwendet formbare, aber sehr dicke Stahlteile, die dann auch deutlich mehr wiegen.

Um bei Problemen wie diesen weiterzukommen, bedienen sich die Forscher in Raabes Institut des ganzen Repertoires der modernen Materialwissenschaft, von quantenmechanischen Computersimulationen bis zu Instrumenten, die Stahlproben bis auf einzelne Atome zerlegen können. So wollen sie verstehen, was bestimmte Stähle fest macht, und auf diese Weise bessere Werkstoffe entwickeln.

Zum Beispiel Perlit. Die Probe, die Raabe dem Besucher präsentiert, sieht aus wie ein Haar, ist aber viel dünner. Zugleich besitzt sie eine Zugfestigkeit von mehr als sechs Gigapascal. Das heißt, sie hält dreißigmal so viel aus wie ein menschliches Haar. Damit gilt Perlit als das widerstandsfähigste Material, das sich massenhaft herstellen lässt. „Dagegen sind die anderen Stähle Kaugummi“, sagt Dierk Raabe. Zum Einsatz kommt der Wunderstoff in Brückenseilen, in den Stahlkordeln, die Autoreifen stabilisieren, oder in Klaviersaiten.

Dabei ist noch gar nicht abschließend geklärt, was der Grund für die hohe Festigkeit des Perlits ist. Sicher scheint nur, dass die Nano-



Das stählerne Herz eines Autos ist das Getriebe. Die Karosserie ist, werkstoffkundlich gesehen, mindestens so anspruchsvoll.

Foto Dieter Rüchel

struktur eine entscheidende Rolle spielt. Perlit besteht aus feinen Lamellen abwechselnd kohlenstoffarmer und -reicher Zonen. Unter Zug verlassen Kohlenstoffatome das kohlenstoffreiche sogenannte Zementit und gelangen in die kohlenstoffarme Ferrit-Matrix. Das stärkt die Struktur. Je mehr sich Zementit und Ferrit vermischen, desto intensiver widersetzt sich der Draht der Zugbelastung, bis irgendwann eine Sättigung erreicht ist und auch er reißt. So jedenfalls die Theorie.

„Die Strukturen zwischen den Lamellen sind sehr, sehr klein, wenn der Draht sich unter Zug verformt, sie liegen im Nanometer-Bereich“, sagt Dierk Raabe. „Außerdem gibt es dann chemische Veränderungen, die vermutlich zur hohen Festigkeit beitragen. Mit einem Elektronenmikroskop sieht man da nicht mehr viel.“ Deshalb hat Raabe mit Hilfe der Prämie aus seinem 2004 gewonnenen Leibniz-Preis, einer der höchstdotierten wissenschaftlichen Auszeichnungen in Deutschland, eine sogenannte Atomsonde angeschafft.

Dieses Gerät kann Materialproben einer chemischen Analyse in drei Raumdimensionen unterziehen – und das mit atomarer Genauigkeit. Dazu verdampft ein starkes elektrisches Feld oder ein Laser die Atome von der Oberfläche der zu einer feinen Spitze geformten Probe. Die Atome verlieren dabei Elek-

tronen, sie werden ionisiert. Damit besitzen sie eine elektrische Ladung und werden von einem elektrischen Feld beschleunigt, das im Ultrahochvakuum zwischen Proben- und Detektor herrscht. Ein leichtes Atom fliegt dabei schneller zum Detektor als ein schweres. Aus der gemessenen Flugzeit und der Masse und Ladung der ionisierten Atome kann deren Identität bestimmt werden. Da der Auftreffort am Detektor ebenfalls bekannt ist, entsteht so scheinbar, Atom für Atom, eine dreidimensionale Rekonstruktion der sukzessive verdampften Probe.

Auf die atomare Struktur kommt es an, auf die räumliche Anordnung der Atome des Eisens, des Kohlenstoffs und je nach Stahlsorte (siehe „Im Kosmos der Stähle“) weiterer hinzulegender Elemente. Auch diese beeinflussen die Materialeigenschaften, denn schon beim Erstarren der Schmelze entstehen kleine Kristalle mit unterschiedlichen Gitterstrukturen, deren Aufbau sich durch die Beimengung von Legierungselementen steuern lässt. Daneben werden die Kristallgitterstruktur und damit die Eigenschaften des Stahls auch durch unterschiedlich lange Wärmebehandlung beeinflusst sowie nach dem Abkühlen durch Kaltumformung.

Ein Legierungselement, das die Forscher des Max-Planck-Instituts in Düsseldorf bei ihrer Suche nach

hochfesten und trotzdem gut formbaren Stählen besonders interessiert, ist das Mangan. Theoretische Überlegungen und Computersimulationen haben sie hier auf die Fährte zweier Effekte geführt, welche die in der Automobilindustrie gewünschten Eigenschaften erzeugen können.

Für den sogenannten Trip-Effekt wird 15 Prozent Mangan zugesetzt. In einem Trip-Stahl treten drei verschiedene Phasen auf – so nennen Physiker Raumbereiche eines Materials, in denen seine Eigenschaften jeweils gleichförmig sind. Besonders interessant ist die austenitische Phase, benannt nach dem britischen Metallurgen Sir William Chandler Roberts-Austen (1843 bis 1902). In Austenit befinden sich die Atome in einer kubisch-flächenzentrierten Ordnung: Stellt man sich das Kristallgitter als aus vielen identischen Würfeln zusammengesetzt vor, so sitzt bei dieser Struktur ein Eisenatom auf jeder Würfecke. Zusätzlich befindet sich je ein Atom in der Mitte jeder der Würfelflächen.

Der Name „Trip“ ist nun ein Akronym für „transformation-induced plasticity“ (verformungsinduzierte Plastizität), denn ab einer bestimmten Verformung setzt ein Phasenübergang ein: Die Atome im Austenit verschieben sich etwas, so dass eine hexagonale Struktur entsteht, in der die Atome keine Würfel mehr bilden, sondern sechs-

eckige Säulen. Bei weiterer Verformung kippt das Gitter in eine kubisch-raumzentrierte Ordnung, bei der sich die Eisenatome wieder auf Würfecken und zusätzlich im Zentrum der Würfel befinden.

Während dieses zweistufigen Umwandlungsprozesses verfestigt sich das Material. Bei einem Crash nimmt ein Trip-Stahl also Energie

Stahl kann Dinge, die anderen Metallen wie dem Aluminium unmöglich sind.

auf und wird dabei härter und härter, bis er irgendwann seine Belastungsgrenze erreicht. Er reißt aber erst bei Zugkräften, die mehr als fünfzig Prozent über denen liegen, die gebräuchliche hochfeste Karosseriestähle aushalten. Für den Fahrzeugbau eröffnet sich so die Möglichkeit dünnerer und dennoch crashsicherer Bleche.

Der zweite Effekt heißt „Twip“ für „twinning-induced plasticity“ (durch Zwillingsbildung verursachte Plastizität). Twip-Stähle enthalten noch mehr Mangan, etwa 25 Prozent. Werden diese Stähle verformt, bilden sich im Kristallgitter spiegelsymmetrische Strukturen, die namensgebenden Zwillinge, die das Atomgefüge festigen. Gegenüber Trip-Legierungen weist Twip-Stahl eine noch größere Verformbarkeit von bis zu neunzig Prozent auf, allerdings lässt er sich nicht ganz so stark belasten. „Stahl hat den großen Vorteil, dass er diese Phasenumwandlungen macht“, sagt Dierk Raabe. „Das kann Aluminium nicht, es ist immer kubisch-flächenzentriert. Durch die Phaseneinstellung lässt sich noch einiges an Festigkeit herauskitzeln. Da ist noch etwa ein Faktor zehn nach oben drin.“

Ob bei einem Stahl der Trip- oder Twip-Effekt zu erwarten ist, lässt sich durch Berechnungen abschätzen. Die Eigenschaften der Materialien wie Energieverteilungen und Elektronenstruktur bestimmen die Forscher am Max-Planck-Institut in Düsseldorf aus einer Näherung der Schrödinger-Gleichung, der Grundformel der Quantenmechanik. Dazu haben sie ein

Computerprogramm entwickelt und einen Rechencluster im Keller installiert, der zu den schnellsten in Deutschland gehört.

Dass dergleichen aber keine reine Grundlagenforschung ist, bezeugt ein knapp ein Meter langes und vier Kilo schweres Formstahlblech auf dem Fensterbrett eines Büros in Duisburg. Es handelt sich um einen Querträger, der in einem Pkw dazu dient, einen Sitz zu montieren. Es ist zum Teil aus Trip-Stahl. „Diese komplexe Form hätten wir mit einem anderen Material dieser Festigkeitsklasse niemals hinbekommen“, sagt Oliver Hoffmann, Leiter der Anwendungstechnik bei Thyssen-Krupp Steel Europe. Der Sitzquerträger in Hoffmanns Büro ist aus dem Projekt „InCar“ hervorgegangen, ebenso wie eine B-Säule mit Trip-Effekt. Dieses Seitenteil zwischen den Türen eines Fahrzeugs verbindet das Dach mit dem Boden. Es schützt die Insassen bei einem seitlichen Aufprall und stabilisiert das Dach bei einem Überschlag. Die „InCar“-Ergebnisse sind strukturell mechanisch und fertigungstechnisch abgesichert – nicht nur per Simulation, sondern durch umfangreiche Versuche bis hin zu Crash-Tests im Fallturm. Dreieinhalb Jahre Laufzeit, 35 Innovationen, 35 Millionen Euro Kosten. „Ein knackiger Wert“, findet Hoffmann.

Ein Fahrzeugmodell, in das vieles davon eingebaut wurde, steht in einer großen Halle gleich neben dem Büro. Es sieht aus wie eine Mischung der bekannten deutlichen Mittelklassewagen. „Wir haben bewusst einen schlichten Entwurf gewählt, denn wir wollten über B-Säulen, Stirnwände und Sitzquerträger reden und nicht über extravagantes Design“, erklärt Hoffmann.

Ansonsten steht die Halle voller großer Maschinen, die Bleche formen, fügen, schweißen und pressen, alles in der aufgeräumten Sauberkeit eines Labors. Nur der Lärmpegel hat etwas von Schwerindustrie. Hier landen auch Stähle aus der Pilotfertigung in Dortmund, die Thomas Heller, Leiter der Entwicklung und Optimierung, betreut. Dort steht ein komplettes Hüttenwerk im Kleinformat, auf dem sich neue Stahlsorten versuchsweise in der Menge von hundert Kilogramm produzieren

Im Kosmos der Stähle

Mehr als 2400 Stahlsorten sind im Register europäischer Stähle aufgelistet. Sie unterscheiden sich in Eigenschaften wie der Verformbarkeit, Belastbarkeit auf Zug, Zähigkeit oder Oberflächenhärte, aber auch im elektrischen oder magnetischen Verhalten. Diese Unterschiede ergeben sich einerseits aus Variationen in der Legierung, also dem Spektrum der dem Eisen zugesetzten Elemente, andererseits aus der Verarbeitung mittels Wärmebehandlung wie Glühen oder Kaltumformung wie Walzen oder Ziehen. Grob kann man Stähle anhand ihrer Bestandteile in unlegierte, legierte und nichtrostende Stähle unterscheiden.

Unlegierte Stähle enthalten außer Eisen noch etwas Kohlenstoff und nur geringe Mengen anderer Legiermittel wie Mangan, Nickel, Chrom, Vanadium oder Molybdän. Ist wenigstens eines solcher Elemente mit einem bestimmten Massenanteil vertreten, spricht man von einem legierten Stahl.

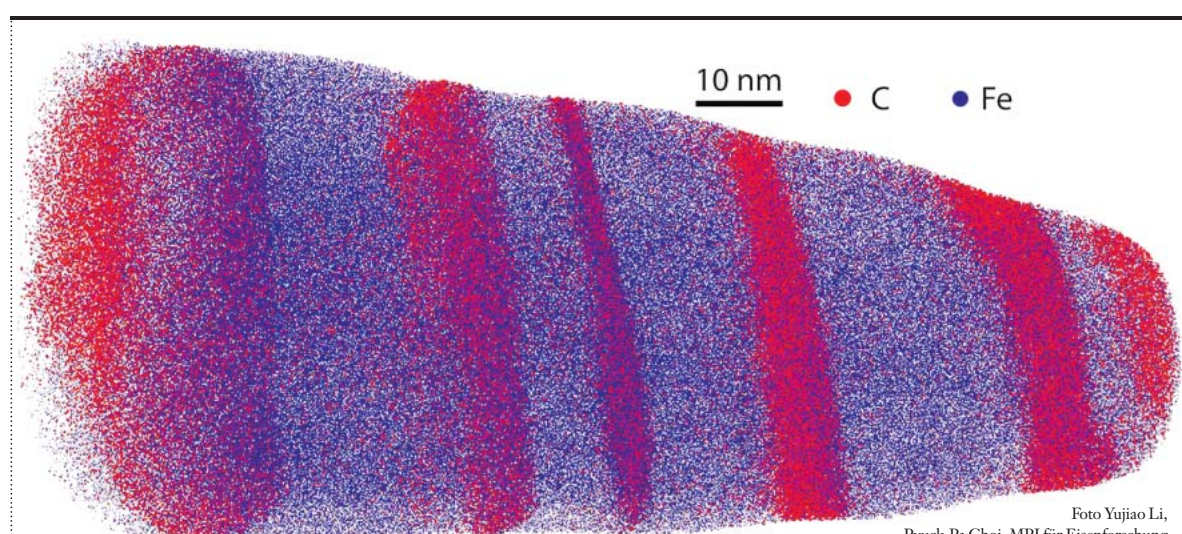
Nichtrostende Stähle enthalten mindestens 10,5 Prozent Chrom und höchstens 1,2 Prozent Kohlenstoff. Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit bietet sich durch den Einsatzzweck des Stahls und die damit verbundenen Anforderungen. Säurebeständiger Stahl zum Beispiel enthält mindestens 17 Prozent Chrom.

Edelstähle sind nicht notwendig rostfrei, sondern in ihrer Zusammensetzung besonders gut definiert. Sie enthalten insbesondere nur noch Spuren unerwünschter Begleitelemente wie Schwefel oder Phosphor.

Phum

lassen. Auch an Twip-Stählen arbeitet man seit etwa zwei Jahren, sagt Heller, der Serienstatus sei jedoch noch nicht erreicht.

Trip-Stähle dagegen kamen bereits im VW Touareg und im Porsche Cayenne zum Einsatz. Auch Audi baut im A8 wieder eine B-Säule aus hochfestem Stahl ein. Früher war das ganze Auto aus Aluminium. „Die Forderungen der Kunden, was die Festigkeit von Materialien bei gleichzeitig guter Verarbeitung anbelangt, sind teilweise illusorisch hoch“, sagt Heller. „Wie sie mit den Naturgesetzen in Einklang zu bringen sind, überlässt man dann lieber uns.“



Elementverteilung in Perlit, einem hochfesten Stahl, aufgenommen mit einer Atomsonde: Blaue Punkte stellen die Position der Eisen-Atome,

rote Punkte die Position der Kohlenstoff-Atome dar. Die mit Eisen angereicherten Bereiche gehören zur sogenannten Ferrit-Phase, die mit Koh-

lenstoff angereicherten zur Zementit-Phase. Unter Belastung vermischen sich beide Phasen und erhöhen damit die Festigkeit.

Foto Yujiao Li, Pyuck-Pa Choi, MPI für Eisenforschung