

**Vorlesung – Lecture Notes**

# Was ist ein Werkstoff ?

**Professor Dr. Dierk Raabe**

**Max-Planck-Institut, Max-Planck-Str.1**

**40237 Düsseldorf, Germany, raabe@mpie.de**

*<http://www.mpg.de> <http://www.mpie.de> <http://edoc.mpg.de>*



# Was ist ein Werkstoff ?

Die meisten Metalle des täglichen Lebens bestehen in fester Form aus vielen winzigen Kristallen, die oft nur mit aufwendigen Licht- und elektronenoptischen Methoden erkennbar werden. Auf verzinkten Geländern oder Straßenlaternen kann man die unterschiedlich schimmernden Kristalle auch ohne Mikroskop gut erkennen. Kristalle sind Gebilde, in denen die Atome auf regelmäßigen gedachten Gittern angeordnet sind. Im Fall der Metalle besitzen diese Kristalle zumeist hohe Symmetrie, ähnlich der eines Würfels (kubische Symmetrie) oder einer Bienenwabe (hexagonale Symmetrie), bei denen die entsprechenden Eckpunkte mit Atomen belegt sind.

Was im üblichen Sprachgebrauch als Kristall bezeichnet wird, etwa der Bergkristall oder ein Schmuckdiamant, ist häufig eine besondere Art von Kristall, nämlich ein sogenannter Einkristall. Metalle liegen jedoch meist als Vielkristallansammlung (Polykristall) vor, so daß man ihnen ihre kristalline Natur oft nicht ansieht.

An diesem Beispiel wird bereits ein wichtiges Prinzip metallischer Werkstoffe angesprochen, nämlich ihre Abweichung von der Perfektion. Metalle sind ein wenig wie Menschen - sie werden technologisch gesehen erst durch ihre Fehler interessant. Beispielsweise stellen die Grenzflächen zwischen benachbarten Kristallen (Korngrenzen) einen wichtigen Defektyp dar, der mechanische Eigenschaften wie Härte und Sprödigkeit des Metalls maßgeblich beeinflussen kann. Teilweise fehlende atomare Ebenen im ansonsten regelmäßigen Kristallaufbau führen zu sogenannten Versetzungen. Die Bewegung einer Versetzung im Kristall erleichtert die Verformung eines Kristalls etwa so, wie die Verschiebung eines Teppichs mittels einer weiterwandernden Teppichfalte bewerkstelligt werden kann. Versuchen Sie beispielsweise, einen großen Perserteppich ohne eine durchwandernde Falte über einen Teppichboden zu ziehen. Es wird Ihnen nur unter beträchtlichem Krafteinsatz gelingen. Die Bewegung und Vervielfältigung solcher Versetzungen im Kristall bewirken erst die Verformbarkeit und Verfestigung der Metalle. Wenn man sich klarmachen möchte, was mit Verfestigung gemeint ist, nehme man einen dicken Stahldraht, biege ihn zunächst in eine Richtung und versuche dann, ihn in seine ursprüngliche Form zurückzubiegen. Man stellt fest, daß der erste Verformungsschritt einfacher war als der zweite. Dieses Phänomen wird als Verfestigung bezeichnet.



**Turbinenschaufeln aus einer Nickellegierung. Die Teile bestehen aus einem Polykristall mit vielen kleinen Kristallen ähnlicher Größe (links), einem Polykristall mit einer kleinen Anzahl von Stengelkristallen (Mitte) und einem Einkristall (rechts).**

Bereits bei der ersten Verformung hat sich der Widerstand des Materials gegen eine weitere Formänderung aufgrund der Wechselwirkung der inneren Spannungsfelder um die Versetzungen und deren zahlreiche wechselseitige Karambolagen im Metall stark erhöht. Dies äußert sich auf atomarer Ebene darin, daß die weitere Bewegung der Versetzungen, durch die Plastizität erst ermöglicht wird, nun gegen die Spannungsfelder dieser zahlreichen bereits vorhandenen Baufehler erfolgen muß.

Wiederholen Sie das gleiche Experiment mit einem dünnen Stahldraht und biegen diesen einige Male hin und her, so ergibt sich ein noch verzwickteres Bild: Der Draht wird an der Biegestelle warm, und nach einer Weile zerreißt er. Sie haben einen sogenannten Ermüdungsbruch herbeigeführt, der schon so manche Stahlkonstruktion frühzeitig das

Leben gekostet hat. Die Erwärmung des Drahtes erfolgt natürlich nur bei rascher Wechselbeanspruchung. Bei langsamem Biegen kann das Metall die Wärme aufgrund seiner guten Leitfähigkeit schneller abführen, als sie erzeugt wird. Die Wärmeentwicklung ist auf die Reibung der Versetzungen im Kristall zurückzuführen. Das Auftreten des Bruchs ist durch die Anhäufung solcher Versetzungen zu erklären, die sich gegenseitig behindern, verhaken und schließlich in Knäueln so hohe innere Spannungen verursachen, daß der Kristall versagt. Falls Sie demnächst im Flugzeug auf die heftig schwankende Tragfläche hinausschauen und dabei an diesen Versuch denken, sollten Sie jedoch Ruhe bewahren. Sie können davon ausgehen, daß die Kunstgriffe der Werkstoffwissenschaftler zur Vermeidung solcher Brüche in die Konstruktion eingeflossen sind.

Metalle, die aus nur einem Kristall bestehen (Einkristalle), sind für technische Anwendungen meist unerwünscht, da sie sehr weich sind. Beispielsweise hat ein Einkristall aus reinem Kupfer eine Zugfestigkeit von nur etwa einem Newton pro Quadratmillimeter - dieser Wert kommt verdächtig in die Nähe der Festigkeit eines Kaugummis (Zugfestigkeit ist diejenige Kraft pro Fläche, bei der eine Probe zerreißt.). Wer möchte daraus schon ein Bauteil fertigen?

Verändert man jedoch die mikroskopische Struktur des Kupfers, also die Dichte und Verteilung der Kristallbaufehler, in geschickter Weise, so läßt sich die Festigkeit um ein Tausendfaches steigern. Solche Werkstoffe kommen beispielsweise bei Mars Expeditionen oder bei der Erzeugung hoher Magnetfelder zum Einsatz. Die gesamte Metallindustrie lebt letztendlich von der gezielten Erzeugung und Manipulation von Defekten in den Metallkristallen.

Es gibt aber auch eine spezielle Art solcher Einkristalle, die sogenannten Whisker, die ganz besonders hohe Festigkeiten aufweisen. Whisker heißt übersetzt Barthaar, womit die Form sehr gut beschrieben ist. Die besagten Kristalle sind nämlich in der Regel nur in den Abmessungen einer Stoppelbehaarung herstellbar. Der Grund für ihre ganz besonders hohe Härte liegt darin, daß sie keine oder nur eine einzige unbewegliche Versetzung enthalten. Auch im Fall von Turbinenschaufeln sind Einkristalle erwünscht, da man bei hohen Betriebstemperaturen Korngrenzen als potentielle Schwachstellen im Bauteil vermeiden möchte.



**Angeätzte Mikrostruktur in einem Schmiedestück aus Damaststahl.**

Schaut man einmal einem Damaszenerschmied über die Schulter, leuchtet die Bedeutung der Mikrostruktur, also der Gesamtheit all dieser Kristallbaufehler, für die mechanischen Eigenschaften eines metallischen Produktes sofort ein. Der Fachmann mischt zunächst eine Schmelze aus Eisen und einigen Begleitelementen und vergießt dann den Rohling zu einer Schwertform.

Wir können das Eisen dabei auch gegen Bronze austauschen - das Prinzip bleibt gleich. Nach dem Abkühlen der Schmelze (Erstarren) könnte das Schwert eigentlich bereits fertig sein. Allerdings würde es bei sofortiger Benutzung im Zweikampf dem Feind keineswegs üble Wunden zufügen, sondern vermutlich beim ersten Hieb abbrechen. Selbst ein sehr gewissenhafter Chemiker würde bei einer Analyse des Schwertes keinen Grund für das Fehlverhalten der Waffe entdecken können, da er alle erforderlichen Bestandteile wie Eisen, Kohlenstoff, Mangan und noch ein paar andere Elemente sicherlich zweifelsfrei nachweisen könnte.



**Japanische Waffen aus sehr feinem Damast.**

Der eigentliche Mangel jedoch, die fehlende Härte und Zähigkeit, kommt eben nicht nur durch die Elementzusammensetzung, sondern durch die Dichte und Anordnung der atomaren Bauelemente, also die zunächst unvollkommene Mikrostruktur, zustande. Genau diese beeinflusst und optimiert der Schmied nun, wenn er den glühenden Schwertrohling mit dem Hammer bearbeitet, das verbreiterte Material faltet, es erneut verformt und das Werkstück ab und zu in Wasser taucht.

Ein Damaszenerschmied ganz alter Schule würde diesen Vorgang nicht nur sehr häufig wiederholen, sondern statt Wasser auch frisches Ochsenblut mit Hühnerdung verwenden, dabei allerlei magische Dinge murmeln und überhaupt enorm finster dreinblicken. Würde besagter Chemiker nun nach diesem Prozedere erneut eine chemische Elementanalyse durchführen, würde er kaum einen Unterschied zur ursprünglichen Gußprobe wahrnehmen, obwohl sich die Eigenschaften des Schwertes beträchtlich verbessert hätten. Der Werkstoffwissenschaftler ahnt natürlich, daß die durch das häufige Hämmern und Falten entstandenen Grenzflächen und Versetzungen sowie die durch das Abkühlen und Wiederaufheizen entstandenen Phasenumwandlungen zum Ansteigen der Härte und Zähigkeit geführt haben. Insofern ist das beharrliche Bearbeiten des Gußrohlings durch den Schmied keineswegs ein überflüssiges Ritual, sondern gezielte Ingenieursarbeit auf der Basis der wissenschaftlichen Kenntnis vom atomaren Aufbau der Metalle. übrigens ist auch der Einsatz des Ochsenblutes zur Abschreckung eines glühenden Metalls eine

vernünftige Maßnahme, da der hohe Salzgehalt des Blutes den Siedepunkt erhöht und somit die Dampfisolation um das eintauchende Schwert und damit die Verzögerung der Abkühlung verhindert oder zumindest vermindert (Die Bildung einer Isolationsschicht aus Wasserdampf um ein ins Wasser getauchtes glühendes Metall wird nach Johann Gottlob Leidenfrost (1715-1794) als Leidenfrost-Effekt bezeichnet.).

Auch der Hühnerkot hat seine Bedeutung. Der darin enthaltene gebundene Stickstoff kann bei ausreichender Temperatur und Zeitdauer in das Eisenschwert atomar hineinwandern (diffundieren) und im Oberflächenbereich der Waffe zu einer außerordentlichen Erhöhung der Härte der Klinge beitragen, ohne dessen Zähigkeit im Inneren herabzusetzen. Der Grund dafür liegt in der Ausbildung harter stickstoffhaltiger Bereiche und hoher Eigenspannungen, die ohne Stickstoff nicht entstehen würden.

Eine ähnliche Methode wird z.B. in der Sage von Wieland dem Schmied beschrieben, als er sein Schwert Mimung herstellte. Er verwendete dazu eine für seine Ansprüche nicht ausreichend scharfe Klinge und feilte sie zu Eisenspänen. Diese Späne verknetete er zu einem Teig, den er an Hühner verfütterte. Deren Kot sammelte er, schmolz das Eisen aus und schmiedete aus dem so gewonnenen Rohstoff sein Meisterwerk. Daß diese so abwegig erscheinende Prozedur in Wirklichkeit ein wirksames Mittel zur Entschlackung und Stickstoffanreicherung durch die Magensäfte der Hühner war, ist in Versuchen tatsächlich nachgewiesen worden.

Man sollte allerdings eine grausame Tatsache in diesem Zusammenhang nicht unterschlagen: Es ist überliefert, daß es im Römischen Reich sowie in der japanischen Feudalzeit bisweilen vorkam, daß ein Schwert dadurch abgekühlt und gehärtet wurde, daß es einem Verurteilten glühend in den Leib gerammt wurde. Hintergrund dieser grausamen Methode könnte dabei nicht nur der Effekt der raschen Abkühlung, sondern auch der in biologischen Geweben vorhandene Stickstoff und dessen Eindringen in das Metall sein. Allerdings ist der Erfolg dieser grauenhaften Methode äußerst zweifelhaft, da die Temperaturen und Zeiten für eine Diffusion des Stickstoffs kaum ausreichen.

Das einzige, was also letztendlich an der Tätigkeit unseres Schmiedes mystisch bleibt, sind die Zaubersprüche und die finstere Miene. Natürlich waren den alten Metallurgen die naturwissenschaftlichen Grundlagen ihres Tuns völlig unklar. Die Schmiedekunst wurde über Jahrtausende

hinweg daher als rein empirische, also durch Erfahrungen getragene, bisweilen auch alchimistisch geprägte Technik betrieben.



**Wilhelm Conrad Röntgen.**

Erst seit dem Beginn des 20sten Jahrhunderts gelang um 1914 die endgültige Aufklärung der kristallinen Struktur der Metalle durch von Laue, Friedrich und Knipping mittels Beugung der 1895 von Röntgen entdeckten X-Strahlen an Kristallproben. Erst mit dieser neuen Untersuchungsmethode konnte man die strukturellen Ursachen der technischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe systematisch erforschen. In den 1930er Jahren setzte sich der naturwissenschaftliche Ansatz bei der Untersuchung der Metalle mit der Entwicklung des ersten Elektronenmikroskops und dessen Anwendung auf Metalle durch die Ingenieure Ernst Ruska und Max Knoll in Berlin weiter fort.

In der modernen Werkstoffwissenschaft wird heute meist zwischen Strukturmaterialien und Funktionsmaterialien unterschieden. Strukturmaterialien sind in erster Linie durch ihre besonderen mechanischen Eigenschaften gekennzeichnet. Hierzu zählen Festigkeit, elastische Steifigkeit, Verschleißbeständigkeit, Dichte, Härte sowie Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen. Aufgrund dieser Eigenschaften finden Strukturwerkstoffe ihre Anwendung vornehmlich in Konstruktionen, Maschinen und im Anlagenbau.

Zur Gruppe der Funktionswerkstoffe gehören Materialien, die sich vornehmlich durch ihre elektrischen, magnetischen, akustischen, optischen oder biologischen Eigenschaften auszeichnen. Wichtige Charakteristika von Funktionswerkstoffen sind z.B. elektrische Leitfähigkeit, Supraleitung, Isolationseigenschaften, Gewebeverträglichkeit sowie Übertragungs- und Absorptionsfähigkeit. Vor allem die Anforderungen der Informations- und Kommunikationstechnologie, aber auch der Energie-, Verkehrs- und Medizintechnik erfordern die Entwicklung von neuen Hochleistungs-



Funktionswerkstoffen. Bei Funktionswerkstoffen ist der jeweilige Materialwert oft gering gegenüber dem Bauteilwert, da die größte Wertschöpfung erst im Endprodukt erfolgt, das den Funktionswerkstoff oft nur in minimalen Mengen enthält. Als Beispiel sei auf hochempfindliche Fotolacke verwiesen, die in kleinsten Mengen, nämlich in Bruchteilen von Milligramm, auf den Halbleiter aufgetragen werden, aber die Funktionsfähigkeit des daraus hergestellten teuren Endproduktes, z.B. eines Computerchips, entscheidend bestimmen.

Bis in die jüngere Vergangenheit hinein ist die Werkstoffwissenschaft der empirischen Herstellung neuer Produkte mittels Try and Error oft nur hinterhergeeilt. Erst mit den Methoden der modernen naturwissenschaftlich geprägten Werkstoffwissenschaften kommt die Theorie der Praxis manchmal zuvor, und das bisweilen sogar mit zutreffenden Voraussagen neuer Werkstoffe und Verfahren. Grundlage ist dabei die strenge Anwendung physikalisch, chemisch und mathematisch geprägter atomistischer oder kontinuumsmechanischer Theorien. Die Anstrengungen gehen dabei zunehmend in die Richtung, gänzlich neue Werkstoffe mit einem ganz bestimmten Anforderungsprofil am Computer maßzuschneidern. Eine solche Arbeitsweise wird heute zunehmend auch aus industrieller Sicht nötig. Komplexe Materialien, wie sie etwa in Düsentriebwerken, Karosserien, Unterseebooten, Transistoren, Solarzellen oder Raumfahrzeugen eingesetzt werden, müssen in immer kürzeren Zeiten möglichst kostengünstig zur Fertigungsreife gebracht und in der Qualität verbessert werden.

Vor diesem Hintergrund erscheint der Einsatz langwieriger Probiertechniken immer weniger finanzierbar. Ein wichtiges Ziel gegenwärtiger Forschungen besteht deshalb darin, Try-and-Error-Methoden zumindest teilweise durch Computersimulationen zu ersetzen.