

**Professor Dierk Raabe**  
**[d.raabe@mpie.de](mailto:d.raabe@mpie.de)**

**Class Notes / Vorlesungsscript**

**„Geschichte der Metalle“**

**RWTH Aachen**  
**Max-Planck Institut Düsseldorf**

**[www.mpie.de](http://www.mpie.de)**

# Kapitel 1

## Was ist eigentlich ein Metall?

### 1.1 Von Autowracks und Omas Porzellan

Im täglichen Gebrauch erkennen wir Metalle zumeist an ihrem Glanz, ihrer guten Leitfähigkeit für Strom, Schall und Wärme, an der hohen Festigkeit sowie ihrer beträchtlichen Verformbarkeit. Bei Raumtemperatur sind darüber hinaus alle Metalle außer Quecksilber fest. Ihre Schmelzpunkte liegen zwischen  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Quecksilber) und  $3410\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Wolfram).

Zugegeben, bei verrosteten Autowracks ist der metallische Glanz nicht gerade eine hervorstechende Eigenschaft. Dies liegt allerdings daran, daß Eisen an Luft auf der Oberfläche rostrote nichtmetallische Oxide bildet. Der Edelstahltopf in der Küche jedoch ist ein gutes Beispiel für unsere Eingangsbehauptung. Er glänzt, und man kann sich wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit auch prima die Finger an ihm verbrennen.

Der typische Metallglanz wird durch die hohe Lichtreflexion an der Metalloberfläche verursacht. Die gute Strom- und Wärmeleitfähigkeit der Metalle ist auf die hohe Beweglichkeit ihrer Leitungselektronen zurückzuführen. Metalle sind fast immer farblos. Nur Kupfer und Gold absorbieren Strahlung aus dem sichtbaren Bereich des Spektrums und erscheinen farbig. Unter der Festigkeit eines Metalls versteht man die zum Versagen einer Probe benötigte Kraft pro Querschnittsfläche (Spannung). Mit Verformbarkeit ist die überaus wichtige

Eigenschaft der Metalle gemeint, bei einem Stoß nicht spröde zu zerspringen, sondern eine bleibende Formänderung anzunehmen. Die Besonderheit der Metalle ist dabei, daß ihre Festigkeit bei einer solchen *plastischen*, d.h. bleibenden Verformung in der Regel sogar zunimmt. Das bedeutet, bei einer Formänderung ist in jedem Schritt eine höhere Kraft für die weitere Verformung erforderlich, als für den vorausgegangenen Schritt. Ausnahmen stellen die sogenannten superplastischen Legierungen dar, die bei fast gleichbleibender Festigkeit sehr hohe Dehnungen erreichen können, ähnlich wie Honig.



Bild 1.1: Berliner Schmiedebetrieb zur Gründerzeit. Die Möglichkeit zur plastischen, d.h. zur bleibenden Umformung gehört zu den wichtigsten Eigenschaften der Metalle.

Die Fähigkeit zur bleibenden Verformung und dem damit einhergehenden Anstieg ihrer Festigkeit ist eine der wichtigsten technischen Eigenschaften der Metalle. Sie ist maßgebend für so wesentliche Bearbeitungsschritte wie Walzen, Schmieden, Pressen oder Drahtziehen. Gold beispielsweise läßt sich so gut verformen, daß durch Walzen Folien von unter einem zehntausendstel Millimeter Dicke hergestellt werden können. Die gute Duktilität der Metalle weiß jeder zu schätzen, der schon einmal das Bruchverhalten von Metallbechern mit dem von Omas Sonntagsporzellan verglichen hat. Dieser Vergleich ist übrigens gar

nicht so abwegig, denn es waren die sächsischen Alchimisten und vermeintlichen Goldmacher von Tschirnhaus und Böttger, die auf ihrer vergeblichen Suche nach synthetischem Gold für ihren Auftraggeber, den sächsischen Kurfürsten August der Starke, als Nebenprodukt ihrer Untersuchungen das Meissner Porzellan erfanden. Seit 1687 gelang es zunächst Ehrenfried Walter von Tschirnhaus, mit Hilfe von Brennsiegeln und Linsen feingemahlene Aluminium- und Magnesiumsilikate bei hoher Hitze in eine porzellanartige Masse zu verwandeln. Er schlug August vor, die Herstellung dieser dem Porzellan vermutlich bereits sehr ähnlichen Masse zu versuchen und konstruierte auch die ersten Brennöfen dazu. Nach Tschirnhaus' Tod erfand der von ihm als Gehilfe angenommene



Bild 1.2: Die Erfinder des Meissner Porzellans. Links der Physiker Ehrenfried Walter von Tschirnhaus, rechts der Apotheker und Alchimist Johann Friedrich Böttger.

Apothekerlehrling und Alchimist Johann Friedrich Böttger das erste Porzellan Europas<sup>1</sup>. Er entwickelte zunächst rötliches Steinzeug, später gelbliches und erst um 1717 herum auch weißes Porzellan.

Viele Metalle lassen sich auch hervorragend miteinander mischen. Man erhält dabei entweder eine Legierung (z.B. die Kupfer-Zink-Legierung Messing oder die Kupfer-Zinn-Legierung Bronze), in der die verschiedenen Atomsorten statistisch über das Gitter verteilt sind, oder man gelangt zu intermetallischen Phasen mit einer geordneten Struktur und definierten Zusammensetzung (z.B. den Phasen CuAu oder Cu<sub>3</sub>Au). Die physikalischen Eigenschaften der Legie-

---

<sup>1</sup>Im Gegensatz zu seinem Gehilfen Böttger war Tschirnhaus (1651–1708) ein Naturwissenschaftler und Philosoph von hohem Rang, der mit Spinoza, Boyle, Leibniz und Huygens verkehrte.

rungen unterscheiden sich meist beträchtlich von denen der reinen Elemente. So ist die Leitfähigkeit in der Regel herabgesetzt, die Härte meist höher (z.B. wird Gold durch das Zusetzen von Silber härter) und die Korrosionsbeständigkeit in einigen Legierungen besser (z.B. im nichtrostenden Stahl, der hauptsächlich aus Eisen, Kohlenstoff, Nickel und Chrom besteht). Durch geeignete Zusammensetzung läßt sich daher eine unüberschaubare Menge neuer metallischer Werkstoffe mit unterschiedlichsten Eigenschaften herstellen.

Derzeit sind über 100 Elemente bekannt, wovon etwa 80 zu den Metallen gehören. Die meisten Metalle begegnen uns allerdings kaum im täglichen Gebrauch, zumindest nicht in einer Form, in der man sie als solche wahrnimmt. Vertrauter sind da schon die metallischen Rohstoffe, die in größeren Mengen industriell erzeugt und verbraucht werden, für die also ein gewisser Markt besteht. Dazu zählen etwa 50 Metalle. Einige der wichtigsten dieser Industriemetalle, etwa nach der jährlichen Produktion oder der wirtschaftlichen–strategischen Bedeutung betrachtet, sind das Eisen, die konstruktiven Leichtmetalle Aluminium, Magnesium, Beryllium und Titan, die Stahl– bzw. Aluminiumveredler Chrom, Kobalt, Mangan, Niob, Vanadium, Molybdän, Lithium, Zirconium, Wolfram und Nickel, die Schwermetalle Blei, Kupfer, Zink, Zinn, Cadmium, Quecksilber und Tantal, die Edelmetalle Gold, Silber, Platin und Iridium sowie die radioaktiven Metalle Thorium, Uran und Plutonium. Die technisch relevanten Metalle sind mit stark unterschiedlicher Häufigkeit zu finden. Den Aufbau der äußeren Erdkruste bestreiten hauptsächlich weniger als 10 Elemente, und zwar Sauerstoff mit 46%, Silicium mit 28%, Aluminium mit 8%, Eisen mit 5%, Calcium mit 4%, Natrium mit 3%, Kalium mit 3%, Magnesium mit 2% und Titan mit 0,4%.

Abgesehen von wenigen Beispielen wie Gold, Silber und Quecksilber kommen die Metalle in der Natur meist nicht in reiner (gediegener) Form vor, sondern als chemische Verbindungen beispielsweise mit Sauerstoff oder Schwefel. Zur technischen Nutzung müssen die mit diesen Verbindungen angereicherten Gesteine (Erze) zunächst abgebaut und aus ihnen dann das reine Metall gewonnen werden. Diesen Zweig der Metallherstellung bezeichnet man als Verhüttung. Positiv geladene Ionen der Metalle sind in geringen Mengen aber auch in unserer sonstigen Umgebung enthalten, so in den Gewässern, im Boden, in Pflanzen und im tierischen und menschlichen Organismus. Dort werden sie als Spurenmetalle bezeichnet. Mit der Zeit zeigen viele Metalle die Tendenz, sich wieder in Oxide oder Sulfide umzuwandeln. Kupfermünzen bekommen zum Beispiel durch den Schweiß einen schwarzbraunen Überzug aus Kupferoxid. Auf Kupferdächern entsteht eine grünliche Rostschicht, die man als Patina kennt.



Bild 1.3: Gold gehört zu den wenigen Metallen, die gediegen vorkommen.

Trotz ihrer überaus großen Vielfalt an Eigenschaften sind die *reinen* Metalle für die meisten Anwendungen vollkommen nutzlos. Beispielsweise würde kein Ehering lange halten, wenn er aus hochreinem Gold wäre. Das ist nämlich kaum härter als Schokolade. Schon geringste Berührungen mit einem anderem Material würden die Oberfläche zerkratzen. Außerdem wäre der Ring dauernd verbogen. Erst durch geeignete Behandlungen wie das Umformen oder das Mischen mit anderen Elementen (Legieren) entstehen Werkstoffe, also *brauchbare* Materialien. Eheringe enthalten deshalb stets zumindest geringe Beimengungen anderer Elemente, die die Härte erhöhen. Stahl beispielsweise ist in seiner einfachsten Form eine Legierung aus Eisen und Kohlenstoff.

Metalle spielen aber auch eine wichtige Rolle in unserem Organismus. So sind Natrium und Kalium an der Erregungsleitung im Nerv beteiligt. Calcium übernimmt wichtige Funktionen bei der Muskelbewegung, im Stoffwechsel und im Knochenaufbau. Viele Enzyme enthalten Metall-Ionen wie Magnesium, Eisen, Zink und Kupfer. Das Häm-Molekül beispielsweise bindet als Zentralmolekül des Hämoglobins den Sauerstoff an Eisen.

Die beste elektrische Leitfähigkeit aller Metalle bei Raumtemperatur besitzen Silber, Kupfer, Gold und Aluminium in dieser Reihenfolge. Einige Metalle weisen bei sehr geringen Temperaturen auch die erstaunliche Eigenschaft des vollkommen widerstandslosen Stromtransportes auf. Dieser als Supraleitung bezeichnete Effekt erfordert für Metalle allerdings mindestens eine Kühlung mit flüssigem Helium<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Helium verflüssigt unter Normaldruck bei einer Temperatur von  $-269^{\circ}\text{C}$  (4 Kelvin).

Taucht man zwei Elektroden (Drähte), die aus unterschiedlichen Metallen bestehen, in ein Gefäß mit einem Elektrolyt (wäßrige saure oder basische Lösung), so entsteht durch eine chemische Reaktion der Elektrodenmaterialien eine elektrische Spannung. Das edlere Metall (z.B. Platin) wird dabei zum Pluspol und das unedlere Metall (z.B. Magnesium) zum Minuspol.

Nach der elektrochemischen Spannungsreihe kann man zwischen unedlen, halbedlen und edlen Metallen unterscheiden. Unedle Metalle sind sehr leicht oxidierbar und wirken als starke Reduktionsmittel (z.B. Lithium, Magnesium, Mangan, Zink und Eisen). Edle Metalle stehen am unteren Ende der Spannungsreihe und sind nur schwer zu oxidieren (z.B. Silber, Palladium, Platin und Gold). Edelmetall-Kationen wirken daher als starke Oxidationsmittel. Halbedle Metalle sind z.B. Nickel, Zinn und Kupfer. Unedles Magnesium verbrennt in einer Flamme spontan zu Magnesiumoxid, während edles Platin in der Flamme nur zum Glühen gebracht, aber nicht oxidiert werden kann. Desweiteren lassen sich Metalle nach ihrer Dichte einteilen. Dabei gelten Metalle mit Dichten unter  $5 \text{ g/cm}^3$  als Leichtmetalle (z.B. Magnesium, Aluminium, Beryllium) und solche mit Dichten über  $5 \text{ g/cm}^3$  als Schwermetalle (z.B. Osmium, Blei, Tantal).

## 1.2 Vom Metall zum Werkstoff — Die Wissenschaft vom Fehler

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 Defekttyp 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.

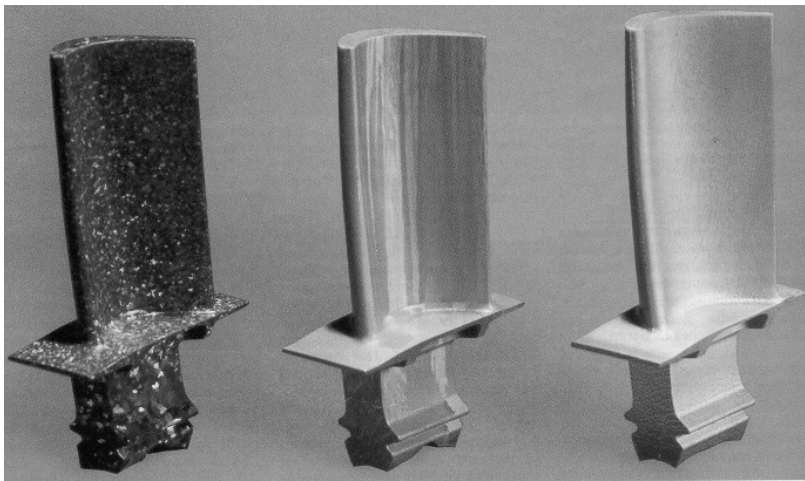


Bild 1.4: Turbinenschaufeln aus einer Nickellegierung. Die Teile bestehen aus einem Polykristall mit vielen kleinen Kristallen ähnlicher Größe (links), einem Polykristall mit einer kleinen Anzahl von Stengelkristallen (Mitte) und einem Einkristall (rechts).



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<sup>3</sup> von nur etwa einem Newton pro Quadratmillimeter – dieser Wert kommt verdächtig in die Nähe der Festigkeit eines Kaugummi. 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

---

<sup>3</sup>Zugfestigkeit ist diejenige Kraft pro Fläche, bei der eine Probe zerreißt.

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.

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 (siehe auch Seite 228). 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.



Bild 1.5: Angeätzte Mikrostruktur in einem Schmiedestück aus Damaststahl.

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 Damaszenschmied 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<sup>4</sup>.

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 die-

---

<sup>4</sup>Die Bildung einer Isolationsschicht aus Wasserdampf um ein ins Wasser getauchtes glühendes Metall wird nach Johann Gottlob Leidenfrost (1715–1794) als *Leidenfrost-Effekt* bezeichnet.

se 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 alchemistisch geprägte Technik betrieben. 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 Ernst Ruska 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

allein 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.