HIGH-TECH AUS METALLEN

MAX-PLANCK BERICHT
VERSTÄNDLICHE WISSENSCHAFT

Dierk Raabe

Max-Planck-Institut für Eisenforschung
Max-Planck-Str. 1
40237 Düsseldorf
Germany

Mai, Max-Planck-Society
http://www.mpg.de http://www.mpie.de http://edoc.mpg.de/

Kapitel 7

Schaum–Metall und Keuschheitsgürtel

High–Tech aus Metall damals und heute

7.1 Edelstahl aus dem All

Einige Erzbrocken vom Mond sind von Astronauten sozusagen im Weltraumtagebauverfahren auf die Erde gebracht worden. Darüber hinaus erhalten wir ständig weitere Proben aus dem All zugeschickt, die als Meteoriten auf die Erde fallen. Allgemein werden im himmlischen Flugverkehr Kometen, Asteoriden, Meteoriden, Meteore und Meteoriten unterschieden.

Kometen ziehen meist eigene Bahnen im All und weisen einen mehrere Millionen Kilometer langen Schweif auf. Sie bestehen aus gefrorenem Wasser und Kohlendioxid sowie aus Eisen und Gestein. Sie verlieren ständig Substanz, aus der sich Meteoritenmaterial bildet. Meteoriden sind kleinere, höchstens einige Kubikmeter große Fragmente kosmischer Urmasse oder Asteoriden. Sie haben keinen Leuchtschweif und treten einzeln oder in Schwärmen auf. Asteoriden sind Meteoride mit einem Durchmesser von bis zu mehreren hundert Metern, die meist exakte Umlaufbahnen um Planeten ziehen. Erst wenn Meteoride in die Erdatmosphäre eintreten, beginnen sie in einer Höhe von etwa 100 km zu leuchten und werden so zu der Lichterscheinung, die wir als Meteor bezeichnen.

Der größte Teil der Meteroiden ist so klein, daß er durch die Reibungswärme, die beim Eintritt in die Erdatmosphäre entsteht, zu mikroskopisch feinem Staub verglüht, der sachte auf uns niederfällt. Etwa 10.000 Tonnen dieses jährlichen Meteoridenaufkommens ziehen beim Eintauchen in die Atmosphäre Leuchtspuren. Erst, wenn solches Meteormaterial die Erdoberfläche erreicht, was aber nur in etwa 10% der Atmosphäreneintritte der Fall ist, wird von Meteoriten gesprochen. Bisher wurden auf der Erde insgesamt nicht mehr als etwa 10.000 Meteoriten entdeckt.

Was haben nun diese Geschichten über Meteoriten mit Metallen und deren Nutzung zu tun? Um diese Frage zu beantworten, ist ihre Zusammensetzung genauer zu betrachten. Es wird im allgemeinen nach vier Hauptgruppen unterschieden: Stein–Meteoriten (Aerolithe), Eisen–Meteoriten (Siderithe), Eisenstein–Meteoriten (Siderolithe) und Glas–Meteoriten (Tektite). Im Hinblick auf das Thema dieses Buches sind die Eisen–Meteoriten von besonderem Interesse: Bei diesen chemisch hochdifferenzierten Gebilden, deren Anteil auf etwa 6% aller Meteoriten geschätzt wird, handelt es sich um vielkristalline, oftmals sehr reine Legierungen von Eisen und Nickel. Fachleute unterscheiden Eisen–Meteoriten weiter in Oktaedrite, Hexaedrite und Ataxite.

Die Oktaedrite sind durch das sogenannte Widmanstätten–Gefüge charakterisiert, welches überwiegend aus sich gegenseitig kreuzenden oktaederförmig angeordneten metallischen Lamellen und gröberen Zwischenbereichen besteht[1]. Diese ungewöhnliche Mikrostruktur entsteht aus dem Wechselspiel zweier unterschiedlicher Eisen–Nickel–Legierungen (Phasen) im Verlauf der Erstarrung[2] von metallischen Himmelskörpern, aus denen Meteoriten entstehen können. Die nickelarme Phase wird als Kamazit oder Balkeneisen bezeichnet. Sie bildet meist längliche Lamellen aus. Die nickelreichere Phase wird als Taenit oder Bandeisen bezeichnet. Sie bildet meist gröbere Strukturen aus. Forscher vermuten, daß metallische Meteoriten nach der Erstarrung zunächst nur aus Taenit bestehen, aus dem sich nach und nach Kamazit bildet. Die Zwischenräume der Lamellen werden in Oktaedriten meist von Plessit gebildet. Diese Phase besteht aus einer sehr feinen Mischung von Kamazit und Taenit.

[1] Im Jahr 1808 ging in der Nähe des Ortes Iglau in Mähren ein großer Meteoritenschauer nieder. Das Ereignis wurde von Karl von Schreibers, dem damaligen Direktor des Wiener Hof–Mineralien–Kabinetts und dem mit ihm befreundeten Leiter der Kaiserlichen Porzellanfabrik, Alois von Widmannstätten, untersucht. Die Wissenschaftler fanden über 100 Steine von bis zu 12 Pfund Gewicht und ansonsten ähnlicher Beschaffenheit. In einer zerschnittenen und polierten Probe entdeckte Widmannstätten jenes nach ihm benannte Gefüge.

[2] Unter Erstarrung versteht man den Übergang vom Flüssigen ins Feste.

Oktaedrite sind die häufigsten Eisenmeteoriten. Ihr Nickelgehalt schwankt zwischen 4,5% und 20%. Je mehr Nickel die Meteoriten enthalten, desto feiner geraten ihre Lamellen, da Nickel die Bildung des Kamazits verzögert. Die als Hexaedrite bezeichneten, besonders nickelarmen Meteorite bestehen fast ausschließlich aus Kamazit. Die nickelreichen Ataxite, mit einem Nickelgehalt von bis zu 40%, weisen hingegen hauptsächlich Taenit auf.

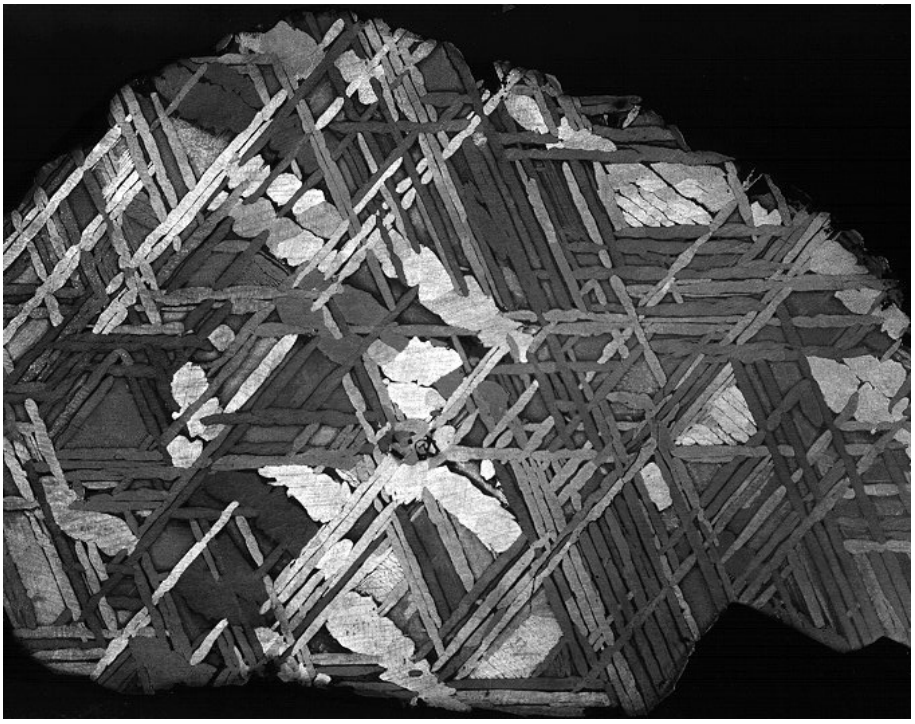


Bild 7.1: Schliffbild eines Eisen–Nickel–Meteoriten der Oktaedritsorte. Die Probe ist durch das Widmanstätten–Gefüge charakterisiert.

Dank ihrer charakteristischen Zusammensetzung gehören Eisen–Meteoriten zu den am häufigsten vom Menschen gefundenen Himmelskörpern. In der Erdrinde kommen solche reinen Eisen–Nickel–Ansammlungen nämlich nicht vor. Insbesondere der hohe Nickelanteil macht diese Meteoriten säure– und korrosions-

beständig, so daß sie auf der Erde lange überdauern können ohne zu verrosten. In ihrer Zusammensetzung sind sie einigen Münzlegierungen und Edelstählen nah verwandt. Die Eskimos haben aus Eisen–Nickel–Meteoriten bereits vor langer Zeit Waffen, Werkzeuge und Angelgeräte hergestellt.

Neuere Studien zeigen, daß Meteoriten nicht nur Eisen und Nickel, sondern mitunter auch erhebliche Mengen an Gold, Platin und anderen Edelmetallen auf die Erde mitbringen können. Zahlreiche Edelmetalle verbinden sich nämlich leicht mit eisenhaltigen Schmelzen. Bei der Entstehung unserer Erde, die ja einen sehr eisenreichen Kern aufweist, reicherten sich, so vermuten Geologen, große Edelmetallvorräte im flüssigen Kern an. Im Mantel unseres Planeten sollten nach dieser Theorie Gold und Platin hingegen kaum vorkommen. Wie ist das zu verstehen?

Bisher erklärten Forscher das Vorhandensein von Edelmetallen im Erdmantel damit, daß sich die Metalle bei sehr hohen Drücken in einem tiefen Magma–Ozean mit Silikaten aus dem Mantel verbunden hätten. Neuere Arbeiten hingegen zeigen, daß auch unter Bedingungen, wie sie 500 Kilometer unter der Erdoberfläche herrschen, weder Platin noch Palladium mit silikatischen Schmelzen reagieren, sondern im Eisen gelöst bleiben. Die neue These der Forscher ist daher, daß Gold, Platin und andere Edelmetalle, die heute in der Erdkruste gefunden und geschürft werden, als Bestandteil von Meteoriten sozusagen von außen anstatt von innen auf die Erdoberfläche gelangten, lange nachdem der Planetenkern gebildet war.

Aus kommerzieller Sicht haben Meteoriten auch noch einen weiteren Reiz, und zwar als Handels– und Sammlerobjekte. Sie haben in den letzten 20 Jahren immerhin einen mittleren Wertzuwachs von über 500% erfahren, weit mehr, als die meisten Aktienfonds, Edelweine, Edelmetalle oder Immobilien. Diese Wertsteigerung nimmt wenig wunder, wenn man bedenkt, daß kompakte Meteoriten weit seltener auf der Erde vorkommen als Gold oder Platin.

7.2 Hochtechnologie in grauer Vorzeit

Im Jahr 1936 wurde in der Nähe von Bagdad ein mysteriöser Gegenstand entdeckt. Er befand sich in einem Terrakotta–Topf, war röhrenförmig und zweieinhalb Zentimeter breit. Er war außen mit einer Kupferschicht verkleidet, mit einer Legierung aus Zinn und Blei zusammengelötet und etwa zwölf Zentimeter hoch. Das eine Ende wurde von einer enganliegenden Kupferkappe, die mit Pech isoliert war, bedeckt. Das andere Ende wurde durch einen Pechstopfen

verschlossen. Aus diesem Pfropfen ragte ein eisernes, mit Kupfer isoliertes Stäbchen. Wenn man das Rohr mit einer Säurelösung wie Essig, Wein oder Zitronensaft oder auch einer alkalischen Flüssigkeit (Lauge) füllte, dann könnte man, so vermuteten die Forscher, Elektrizität erzeugen. Diese erste uns heute bekannte *Batterie* wurde auf 250–220 v. Chr. datiert.

Der Fund blieb nicht der einzige seiner Art. Es wurden noch Überreste von mindestens vier weiteren Batterien gefunden sowie mehrere Einzelteile, aus denen man bis zu zehn neue Batterien hätte bauen können. Vielleicht wurden diese Batterien sogar in Reihe geschaltet, um eine höhere Spannung abzugeben. Vor ein paar Jahren wurde von Forschern eine Kopie dieses antiken Gegenstandes erstellt und mit einer Kupfersulfatlösung gefüllt. Die Spannung betrug immerhin 5 Volt.

Es gibt inzwischen vage Vermutungen, daß auch die alten Ägypter bereits über die Technologie verfügten, elektrischen Strom zu erzeugen. In den Pyramiden und sonstigen Grabstätten gibt es an keiner Stelle Rußspuren an den Wänden. Diese wären typische Hinweise auf die Verwendung von Fackeln in den völlig dunklen Gängen. Außerdem gibt es keine Wandhalterungen oder sonstigen Anzeichen für den Gebrauch von offenem Feuer zur Beleuchtung. Im Tempel von Dendera, am Ufer des Nils gegenüber der Stadt Kena, fand man Relieffiguren, die neben großen Objekten stehen, die aussehen wie riesige Glühbirnen. Von diesen Birnen geht am unteren Ende eine Art Schlauch weg, der in einem rechteckigen Kasten mündet. Innerhalb der Birnen formte dieser Schlauch, der als Schlange dargestellt wurde, eine Art Glühwendel, der wellenförmig verläuft, ähnlich wie die Glühfäden in unseren heutigen Glühbirnen. Belastbare wissenschaftliche Beweise für solche Spekulationen liegen allerdings bis heute nicht vor.

Überraschende technische Leistungen wurden in der Antike auch von Medizinern vollbracht. Schon vor knapp 2000 Jahren waren Zahnärzte beispielsweise in der Lage, künstliche Eisenzähne zu implantieren. Dank der gut organisierten medizinischen Versorgung im römischen Reich erhielten offenbar selbst einfache Einwohner im ländlichen Gallien brauchbaren Zahnersatz. In der bei Paris gelegenen Nekropole von Chantambre stießen Archäologen und Anthropologen auf ein Skelett mit einem künstlichen Eisenzahn, der an heutige Medizintechnik erinnert. Der Mann mit dem Stiftzahn, der an der Wende vom ersten zum zweiten Jahrhundert n. Chr. im Alter von mindestens 30 Jahren verstarb, war auf eine funktionsfähige Beißhilfe auf seiner rechten Kieferseite angewiesen, da ihm schon die Backenzähne des linken Kiefers fehlten. Die Kunst der Zahnbehandlung hatten die Römer früh von den Etruskern erlernt, der Eisenzahn

aus Chantambre aber ist der älteste Fund einer mit dem Kiefer fest verwachsenen Prothese. Die feste Verbindung mit dem Knochen ist ein Indiz dafür, daß der ländliche Dentist seine Prothese exakt nach dem Vorbild des herausgefallenen Originals geschmiedet hatte, bevor er sie wie einen Nagel in die Höhlung von Zahnfleisch und Kiefer einkeilte. Mindestens ein Jahr vor dem Tod des Patienten muß die sicherlich schmerzhafte Behandlung erfolgt sein. Das reaktionsfreudige Material Eisen ist zwar nicht ideal für ein Implantat, bietet dafür aber mit seiner rauhen Oberfläche genug Angriffsfläche zum Verwachsen. Da auch Zahn und Sockel perfekt zusammenpassen, hatte die Prothese genügend Halt, so daß der Behandelte vermutlich kraftvoll zubeißen konnte.

7.3 Das Lied von der Glocke

„Fest gemauert in der Erden, steht die Form, aus Lehm gebrannt. Heute muß die Glocke werden! Frisch, Gesellen, seid zur Hand!“

Wer kennt diese Zeilen Schillers nicht? In seiner berühmten Ballade begleitet die Glocke den Lebensweg des Menschen und markiert sein Schicksal von der Wiege bis zum Grab. Das Besondere an diesem Gedicht ist nicht nur seine tiefe Wirkung auf den Leser, sondern auch die überaus genaue Beschreibung der Glockenherstellung. Kaum ein Metallurge kann das heute besser erläutern als dieser große Dichter.

Die Anregung zu dem Gedicht stammte von der Aufschrift auf einer Glocke. Im Jahre 1486 wurde eine fünf Tonnen schwere Glocke für das Münster zu Schaffhausen gegossen. Sie wird heute auch als *Schillerglocke* bezeichnet. Sie trägt die Aufschrift *Vivos voco, mortuos plango, fulgura frango* (die Lebenden rufe ich, die Toten beklage ich, die Blitze breche ich), mit der Schillers Ballade überschrieben ist. Die Kirchenglocken begleiteten die Menschen mit ihrem Geläut nicht nur von der Geburt bis zum Grab, sondern sie dienten gleichzeitig auch als Blitzableiter. Die Aufschrift hatte Schiller in der *Oekonomisch–technologischen Encyklopädie* von Krünitz gelesen, als er die technischen Einzelheiten des Glockengusses studierte, und sie als Motto für sein Gedicht übernommen. So schrieb er es Goethe in einem Brief 1797. Die schwere Münsterglocke wurde 1895 zum letzten Male geläutet und 1904 als Denkmal aufgestellt.

Die Glocke ist ein faszinierendes Instrument. Sie hat 4000 Jahre fast unbeschadet überstanden. Ihre Bedeutung, vor allem für das Christentum, ließ sie aus Kriegen und Revolutionen immer wieder gestärkt hervorgehen. Beispielsweise läßt der Dichter Christian Morgenstern die Glocke zur Kanone sprechen:

Bild 7.2: Stationen auf dem beschwerlichen Weg zum Glockendasein.

„Wird mich erst der Rechte läuten, wird es deinen Tod bedeuten.“ Oft ging es aber bekanntermaßen zunächst in die umgekehrte Richtung. Allein im Zweiten Weltkrieg wurden weltweit mehr als 80.000 Glocken durch Umschmelzen und Bombenabwurf zerstört.

Manchmal ging es aber tatsächlich auch nach dem Wunsch von Morgenstern. So geschehen bei der großen Glocke des Kölner Doms. In den Jahren 1870 und 1871 gab es durch den deutsch–französischen Krieg eine empfindliche Störung des Baubetriebes. Wegen der Einberufung zahlreicher Handwerker, der Konfiszierung von Baumaterial sowie des Ausfalls der Eisenbahntransporte konnten die Türme des ehrwürdigen Doms innerhalb eines ganzen Jahres nur um drei Meter erhöht werden. Der Zentral–Dombauverein zu Köln erbat zur Kompensation für diese Rückschläge vom König die Überlassung einer Anzahl von den Franzosen erbeuteter Kanonen zum Gießen einer Glocke für den Dom. Um das vorhandene Geläut wirkungsvoll zu ergänzen, bedurfte es einer großen Glocke mit dem Ton C. Ihr Gewicht war auf 25 bis 27 Tonnen errechnet worden. In der Tat wurde der Stadt vom neugekrönten Kaiser höchstselbst nach dem Sieg über Frankreich das französische Kanonenmetall zugestanden. Die Glocke wurde im Jahre 1874 mit einem Gewicht von 27,15 Tonnen gegossen und auf den Namen *Kaiserglocke* getauft.

Die ältesten gegossenen Glocken stammen wahrscheinlich aus China. Manche Forscher vermuten hier sogar ihren Ursprung und datieren ihr Erscheinen als Musikinstrument und militärischer Signalgeber auf das vierte vorchristliche Jahrtausend. Die Glocken im chinesischen Kulturkreis waren zumeist klöppellose, von außen angeschlagene Instrumente. Ihre Bedeutung kann man auch daran erkennen, daß der Glockenhohlraum lange als Maßeinheit für Getreide und der Durchmesser des Glockeninnenraumes als Längenmaß diente. Die Glocke war das dominierende Instrument bei politischen wie kultischen Handlungen. Eine gestimmte Glocke gab den Ton im gesamten Kaiserreich an, es sollte eine einheitliche *Stimmung* im Lande herrschen. Ihre Klänge galten als Bindeglied zwischen Himmel und Erde.

In China gab es häufig nicht nur Glocken mit rundem Querschnitt, sondern auch mit mandelförmiger Geometrie. Letztere schwingen in zwei Grundtönen. An den spitzen Enden der Mandelform und in der Mitte der bauchigen Rundungen war der Rand nur halb so dick wie dazwischen. Der Schlaghammer versetzte entweder die dünnen oder die dicken Stellen der Bronze in Schwingungen, erzeugte also einen höheren oder tieferen Ton. Diese Grundtöne lagen eine kleine oder große Terz auseinander. Bei einigen Fundstücken waren die Verdickungen des Randes darüber hinaus für ein Glockenspiel optimiert. Sie dämpften Vibrationen so schnell, daß die Melodien deutlich hörbar waren. In einem jüngst ausgegrabenen chinesischen Glockenspiel reichen die Töne über mehr als fünf Oktaven, bis hinunter zum großen C einer 204 Kilogramm schweren Glocke. Bei Untersuchungen mit Röntgenstrahlen, Lasern und Ultraschall staunten die Archäologen über die Reinheit des Gußmaterials. Die damaligen Techniker der Zhou–Dynastie erschmolzen dafür Bronze aus sechs Teilen Kupfer, einem Teil Zinn sowie kleinen Beimengungen an Blei, um den gewünschten Klang zu erzielen.

Das Zweistromland Mesopotamien kannte die Glocke vor allem am Hals der Leitpferde, Elefanten und Kamele von Königen und Heerführern. Ihr Klang sollte die Götter besänftigen und böse Geister vertreiben. In Vorderasien dienten Glöckchen ebenfalls als Behang der Tiere. Bei den alten Griechen trug der Wachhund des Cerberus eine Glocke um den Hals. In Ägypten verwendete man sie darüber hinaus als Amulett und Grabbeigabe verstorbener Kinder. Von ihrer Verwendung im Totenkult zeugt auch eine Beschreibung des mit Glöckchen behangenen Wagens mit der Leiche von Alexander dem Großen im Jahre 323 v. Chr. bei der Überführung nach Ägypten. Auch bei den Römern gibt es zahlreiche Hinweise, etwa als Stunden– oder Warnglocke. Plutarch erwähnt um das Jahr 100 kleine Glocken, durch die auf den Fischmärkten die Käufer zusammen-

gerufen wurden. Der römische Dichter Avienus beschrieb um 350 Glocken an Hundehalsbändern. Desweiteren kündigte der Glockenschlag bei den Römern das Öffnen der Bäder an und markierte den Tagesablauf der Legionäre in den Kasernen und der Sklaven.

Ein früher Beleg für die Verwendung der Glocke im Judentum ist das Jaspissiegel aus dem 8. Jahrhundert v. Chr. mit der Inschrift *Amos der Schreiber*. Amos gilt als erster klassischer Schriftprophet und Verfasser des Buches der Propheten. Auf dem Siegel sind zwei Männer, vermutlich Priester, beim Gebet zu erkennen. Zwischen ihren Köpfen und über den gefalteten Händen schwebt eine Glocke. Man denke an die Beispiele aus China und Indien: Der Klang der Glocke verbindet Himmel und Erde. Vielleicht sollten die Gebete auch von ihren Klängen gen Himmel getragen werden.

Der Ursprung der europäischen Glocke findet sich zunächst in den Ländern der Bibel. So ist im 2. Buch Mose an zwei fast gleichlautenden Stellen zu lesen: *„Und sie machten an seinem Saum Granatäpfel aus blauem und rotem Purpur, Scharlach und gezwirnter feiner Leinwand und machten Glöckchen aus feinem Gold; die taten sie zwischen die Granatäpfel ringsherum am Saum des Obergewandes, je ein Granatapfel und ein Glöckchen ringsherum am Saum, für den Dienst, wie der Herr es Mose geboten hatte.“*

Nach der Geburt Christi wird zuerst beim Apostel Paulus von Glöckchen gesprochen: *„Wenn ich mit Menschen- und mit Engelszungen redete und hätte die Liebe nicht, so wäre ich ein tönend Erz, ein klingendes Glöckchen.“* Für die ersten christlichen Schriftsteller wie Justinus (100–165 n. Chr.) und Origines (185–254 n. Chr.) galten die zwölf Glöckchen am Rocksaum des Hohepriesters als akustisches Symbol der Verkündigung der christlichen Botschaft. Nach dem Mailänder Toleranzedikt des römischen Kaisers Konstantin 313 n. Chr. führten koptische Mönche in Ägypten vermutlich als erste in ihren Gemeinden die Glocke ein. Ein bis heute verehrter koptischer Mönch war der heilige Antonius. Sein Attribut ist die Glocke.

Zunächst dürfte die Glocke zum Beginn des 5. Jahrhunderts n. Chr. in Klöstern Einzug gehalten haben. Unter ihnen war das berühmte Kloster Lerinum, auf einer kleinen Insel südlich von Cannes. Es war im Jahre 395 vom heiligen Honoratius gegründet worden und durch Beziehungen zu den koptischen Mönchsgemeinschaften Ägyptens und Galliens bekannt geworden. Das Kloster war daher ein wichtiger Übergangspunkt der Glocke von den Regionen der Bibel nach Europa. Der Nachfolger von Papst Gregor dem Großen, Papst Sabinian (604–606), ordnete das Läuten einer Glocke auch außerhalb der Klostermauern zu den Gebetszeiten an. Von ihrem Klang sollte die da-

mals noch verstreute christliche Gemeinde zu gemeinsamem Gebet aufgerufen werden. Karl der Große sorgte später durch verschiedene Edikte für die Verbreitung der Glocke in seinem Herrschaftsbereich. Erhalten haben sich aus dieser frühen Zeit wohl deshalb keine gegossenen Glocken, weil das wertvolle Metall besonders in Kriegszeiten immer wieder eingeschmolzen wurde.

Um das Jahr 1100 machte der Mönch Theophilus die damals ausgeübte Technik des Glockengießens bekannt. Man bezeichnet die von ihm beschriebenen und durch ihre steile Form auffallenden Glocken heute noch als Theophilus–Glocken. Theophilus war aber keineswegs der Schöpfer einer neuen Technik, sondern nur Aufzeichner eines Verfahrens, das im Orient bereits seit vorgeschichtlicher Zeit bekannt war.

Meistens wurde danach die Wachstechnik zur Herstellung gegossener Gegenstände eingesetzt. Dieses prinzipiell auch heute noch angewandte Verfahren besteht darin, daß man zunächst aus Lehm einen Körper formt, der dem inneren Hohlraum des anzufertigenden Gußstückes entspricht. Dann modelliert man aus einer geeigneten Wachsmischung über dem sogenannten Kern das später aus Bronze zu gießende Stück. Will man also eine Glocke anfertigen, so wird zunächst ein Kern geformt, der dem inneren Hohlraum der Glocke gleicht. Darüber wird eine Glocke aus Fett und Talg modelliert und mit allen Inschriften und Verzierungen versehen. Über diese wird ein dicker Mantel aus Lehm gelegt und mit Eisenbändern zusammengehalten. Wenn man dann den Kern und den Mantel zum Zweck des Trocknens über ein Feuer bringt, fließt die aus Fett modellierte Glocke aus, so daß man in den auf diese Weise entstandenen Hohlraum das Metall gießen kann. Die beschriebene Technik hat allerdings den Nachteil, daß sich beim Austrocknen der Lehmform kleine Stückchen ablösen können und infolgedessen später im Gußstück rauhe Stellen entstehen. An solchermaßen aufgerauten Oberflächen erkennt man heute noch die Anwendung der beschriebenen Gußtechnik. Die älteste datierte, genau nach den Vorschriften des Theophilus gefertigte Glocke stammt aus dem Jahre 1144 und hängt in der Kirche zu Iggensbach in Bayern.

Die heute angewandte Herstellungstechnik kam bereits hundert Jahre nach Theophilus auf. Dabei wird folgendermaßen verfahren: Zunächst wird aus einem Brett die Schablone der inneren Form der Glocke herausgeschnitten. Dann wird aus Ziegeln das Gerippe des Glockenkernes hohl aufgemauert. Über die Steine wird schichtenweise Lehm aufgetragen und währenddessen im Inneren des Mauerwerkes ein Holzkohlenfeuer unterhalten, damit das Material langsam trocknet. Der sorgfältig vorbereitete Lehm wird in immer feiner gemahlenen Schichten aufgetragen und mit der Schablone genau nach der Form, die die

Bild 7.3: Frisch gegossene Glocken aus heutiger Produktion.

Glocke innen bekommen soll, geglättet. Darauf wird von der Schablone soviel herausgetrennt, daß die äußere Form zustande kommt. Nun wird der fertige Kern mit Talg bestrichen, damit die aus Lehm aufgetragene *Dickung* nicht anklebt. Diese Dickung entspricht der später zu gießenden Glocke. Die Dickung wird mit der Schablone gedreht und durch Holzkohlenfeuer getrocknet. Danach kühlt sie etwa zwei Tage ab. Auf dieser nun in Lehm modellierten Glocke werden mit Talg und Wachs Verzierung aufgebracht.

Zuletzt wird die ganze Dickung mit Fett bestrichen, damit der nun anzusetzende Mantel nicht anhaftet. Der Glockenmantel wird zunächst aus feinem Lehm und Tierhaaren mit einem Pinsel auf alle Verzierungen aufgetragen. Mit gröberem Lehm wird der Mantel nun zunehmend verdickt. Um ihm Halt zu geben, wird in die Lehmschichten Eisen eingelegt. Alsdann wird wiederum durch Feuer getrocknet. Um den Mantel später abzuheben, werden in den Lehm eiserne Haken eingelassen. Schließlich wird er mit Eisenreifen umgeben und getrocknet. Die zum Aufhängen der Glocke dienenden Henkel werden aus einem Gemisch von Pech und Wachs in Gips gegossen, zusammengesetzt, und in Lehm eingebettet. Wenn dieser Lehmklotz am Feuer getrocknet wird, schmelzen Wachs und Pech aus, so daß die Hohlräume für den Guß entstehen. Dieser

Teil der Form wird dann auf den Mantel aufgepaßt. Inzwischen ist vor dem Gießofen eine so tiefe Grube ausgehoben worden, daß die größte zu gießende Glocke darin aufrecht stehen kann. Mit einem Kran werden Mantel, Dickung und Kern in die Gießgrube hinabgelassen. Der Mantel wird abgehoben und die nun freiliegende Dickung zerschlagen. Der Mantel wird wieder über den Kern gestülpt, so daß nun der Hohlraum, in den das Metall fließen soll, zwischen Mantel und Kern entstanden ist.

Ihren Höhepunkt erreichte die Glockengießerei im europäischen Raum Anfang des 16. Jahrhunderts. Sie war zum Kunsthandwerk geworden, dessen Geheimnisse streng gehütet und nur innerhalb einer Familie weitergegeben wurden. Die größten und wohlklingendsten Geläute stammen aus dieser Zeit. Neben ihrer Funktion als christliches Symbol und Signal des religiösen Lebens behielten die Glocken ihre Bedeutung im Alltag als Kommunikationsinstrument. Riesige Glockenspiele in den Kirchtürmen oder auf Rathäusern, angetrieben von Uhrenmechanismen mit Walzen, teilen den Tag bis heute in viertel, halbe und ganze Stunden.

Wie steht es mit den Tönen einer Glocke? Zunächst fand man heraus, daß bei einer europäischen Glocke das für den Klang ideale Verhältnis von Höhe zu unterem Durchmesser etwa 4 zu 5 sein sollte. Im 17. Jahrhundert wuchs das Verständnis über das Wesen der Harmonie eines Klangs. Man erkannte, daß das Obertonspektrum einer Glocke zu ihrem Grundton einer harmonischen Reihe entsprach. Diese ist durch einfache Frequenzverhältnisse bestimmt, etwa 1 zu 2 für die Oktave, 2 zu 3 für die Quinte und so weiter.

Im Glockenklang gibt es zwei Hauptkomponenten, den Schlagton, einen harten, kurz klingenden Ton mit wenig vernehmbaren harmonischen Teiltönen und die Summtöne, die als Nachhalltöne langsam nach dem Anschlag aufklingen und bei guten Glocken ziemlich lange mit sich gleichmäßig verringernder Tonstärke summen. Bei guten Glocken beträgt die Ausklingzeit des Grundtons in Sekunden etwa das 70fache ihres Durchmessers in Metern. Außerdem ist der Klang abhängig von der Wandstärke. Bei geringerer Stärke klingen Grundton und tiefe Obertöne kräftiger und länger nach als bei dickwandigeren Glocken. Auch die Kontaktzeit des Klöppels spielt eine Rolle. Die Glocke vibriert am meisten am Rand, dem sogenannten Klangbogen, und ist im Mittelpunkt, dem sogenannten Scheitel, ruhend.

Neben dem oben erwähnten Geläut des Kölner Doms gibt es weitere berühmte Glocken, so etwa das Glockenspiel von Big Ben, dem Londoner Glockenturm von Westminster, der mit 106 Metern Höhe die Houses of Parliament überragt. In Wirklichkeit bezeichnet der Name *Big Ben* ursprünglich nicht den Turm,

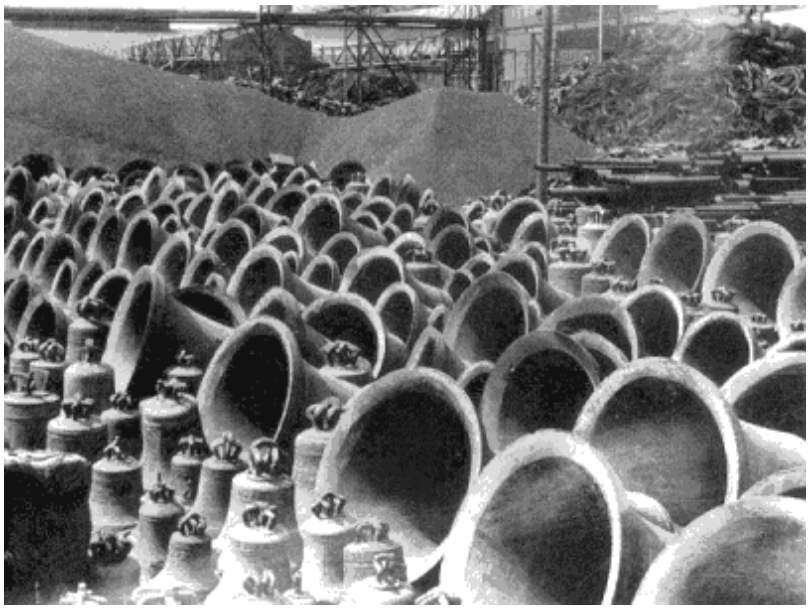


Bild 7.4: Deutscher Glockenfriedhof im zweiten Weltkrieg.

sondern die 13,5 Tonnen schwere Glocke der historischen Turmuhr. Dabei verweist *Big* auf ihre beträchtliche Größe, während *Ben* die Verkleinerungsform von Sir Benjamin Hall ist. Dies war der städtische Baubeamte, der die stolze Glocke 1858 in Whitechapel gießen ließ und die Arbeiten daran beaufsichtigte. Heute schlägt Big Ben jede volle Stunde. Vier kleinere Glocken im Gewicht von einer bis vier Tonnen läuten die Viertelstunden.

Die größte und schwerste Glocke der Welt ist *Zar Kokol*, zu deutsch *Glockenkaiser* in Moskau. Sie wurde 1533 gegossen und wiegt etwa 198 Tonnen. Sie stürzte 1737 bei einem Brand ab und wurde 1836 auf einem Unterbau als Denkmal aufgestellt.

Eine bewegte metallurgische und politische Geschichte hat auch die amerikanische Freiheitsglocke, die heute in Philadelphia ausgestellt ist. 1751 wurde sie zur Verwendung bei offiziellen Anlässen, unter anderem auch zur Proklamation der Unabhängigkeitserklärung geläutet. Nachdem sie 1751 in England gegossen worden war, bekam sie einen Sprung. Die Metallurgen John Pass und

John Stow schmolzen daraufhin die Glocke wieder ein und gossen aus diesem Material 1753 eine Neue. 1846 bekam sie erneut einen Riß und man reparierte sie noch im selben Jahr, da sie zu George Washingtons Geburtstagsfeier läuten sollte. An diesem Tag bekam sie während des Läutens abermals einen Sprung, der bis heute erhalten ist. Seitdem wurde die Glocke nicht mehr geläutet.

Eine der größten asiatischen Tempelglocken ist die *Himmlische Glocke von König Songdok* aus Korea, ein künstlerisches Meisterwerk aus der Shilla–Zeit (57 v. Chr. – 935 n. Chr.). Sie besteht aus 72 Tonnen Bronze und wurde vor 1200 Jahren gegossen. Ihr Durchmesser am Boden beträgt 2,28 Meter. Eine so große Glocke muß auch für die damals in ganz Asien hochgerühmten koreanischen Glockengießer eine große Herausforderung gewesen sein, ist doch der Mantel allein 24 cm dick. Die Außenseite ist kunstreich mit langen Inschriften, Arabesken, Lotosblüten und vier paarweise angeordneten himmlischen Jungfrauen verziert. Wie alle großen Glocken Asiens wurde auch diese von außen angeschlagen.

7.4 Eine kleine Geschichte des Magneten

Der Universalgelehrte Thales von Milet beschrieb bereits 585 v. Chr. die Eigenschaft gewisser Eisenerze, Eisenspäne und dünne Eisenstücke anzuziehen. Die magnetische Kraft nannte er die *Seele* des Stoffes. Thales interpretierte die Erscheinung als eine von der Materie untrennbare Energie, die jedem Stoff innewohnte. Ungünstigerweise wurde diese Ansicht von Aristoteles später auf alle Materialien ausgedehnt.

Plato legte 387 v. Chr. in einer seiner Schriften seinem Lehrer Sokrates die Äußerung in den Mund, daß der Magnetstein nicht nur einen eisernen Ring anziehen könne, sondern seine Kraft auch durch diesen Ring hindurch auf andere Ringe zu wirken vermöge, so daß man eine lange Reihe von Ringen und Eisenstücken aneinanderhängen könne. Titus Carus Lucretius beobachtete um das Jahr 60, daß der Magnetismus sogar bronzene Schalen durchdringt. Er sagte weiter, der Stein habe seinen Namen, weil er aus dem Lande der Magneter komme. Alexander aus Aphrodisias, der zu Athen um das Jahr 200 lehrte, beschrieb die Anziehungskraft des Magneten durch Wasser hindurch. Der heilige Augustinus kannte um 420 bereits die Wirkung des Magneten durch eine Schicht aus Silber. Alexander Neckam gab 1195 in seinen Schriften *De naturis rerum* und *De utensilibus* die erste bekannte empirische Anweisung zur magnetischen Polarisierung von Stahl, ohne daß diese allerdings explizit erläutert wird. Im

Jahr 1269 schließlich unterschied Pierre aus Maricourt namentlich die beiden Pole des Magneten und entdeckte die Anziehung der ungleichnamigen Pole. Nicolaus aus Cues beschrieb 1439 in seinem Werk *De staticis experimentis*, daß man die Stärke des Magneten durch Gewichtsbelastung feststellen könne. Das Wort *Magnetismus* brauchte Agrippa von Nettesheim 1531 zuerst in seiner Schrift *De occulta philosophia*. Daß auch die Erde selbst ein Magnet sei, schrieb William Gilbert in seinem Werk *De magnete* um 1600.

Seit etwa 1580 versah man die natürlichen Magnetsteine an den beiden Polen mit kleinen Eisenkappen. Stabmagnete gingen aus den Nadeln der Magnetkompasse hervor. Den hufeisenförmigen Stahlmagneten erwähnte bereits Daniel Bernoulli 1743.

Eine Theorie, der zufolge um 1108 auch die isländischen Wikinger schon den Gebrauch des Magneten auf ihren Schiffen gekannt haben, geht auf eine Bemerkung des Mathematikers Hauk Erlendssön in seiner Abschrift des *Landnamabok* aus dem Jahre 1330 zurück. Alexander Neckam beschrieb in seinem Werk *De naturis rerum* auch zum ersten Mal in Europa den Seekompaß. Der Minnesänger Guiot besang um 1205 in seinem Gedicht *La bible* den Seekompaß als Hilfsmittel der Schiffer *in dunkler Nacht*.

Der möglicherweise älteste erhaltene Kompaß befindet sich im Ferdinandeum in Innsbruck. Er stammt aus dem Jahr 1451 und trägt eine östliche Deklinationslinie. Den Kompaß im Ringgehänge schwebend zeichnete zuerst Leonardo da Vinci um das Jahr 1500.

Eine andere bereits aus der Antike bekannte Anwendung des Magneten war die Magnetoperation. Im Buch *Ayur Veda* des indischen Arztes Susruta wird um das Jahr 500 n. Chr. der Magnet als ein Mittel vorgeschlagen, um eine eiserne Pfeilspitze herauszuziehen. Besonders wirksam sei die Behandlung, wenn der Pfeil gerade und nicht zu fest im Fleisch eingebettet sei. Susruta schrieb: *„Eine eiserne Pfeilspitze, die in der Richtung der Fasern der Gewebe liegt, nicht fest eingebettet ist, keine Ohren [Widerhaken] hat, und mit einer weiten Öffnung in der Haut [liegt], kann ausgezogen werden mit dem Magneteisenstein.“*

Auch der Araber Halifa aus Aleppo gab 1256 den Magneten als Mittel an, um beim Abbrechen der Spitze einer Aderlaßlanzette diese aus der Wunde zu entfernen. In der *Chirurgie* des Mondeville werden 1314 magnetische Pflaster zum Ausziehen von Eisensplittern erwähnt. Später wurde die Methode auch für Augenoperationen herangezogen.

7.5 Keuschheitsgürtel

Keuschheitsgürtel, auch *Florentiner Gürtel*, *Venusgurt* oder *Italienisches Schloß* genannt, waren *Kleidungsstücke* aus Metall, die aus zwei sich kreuzenden Spangen aus leichtem Metall bestanden. Der eine der beiden Reifen schloß sich um die Taille, der andere hingegen wurde zwischen den Schenkeln hindurchgeführt und durch ein Schloß versperrt. Der Keuschheitsgürtel wurde von Ehefrauen und Töchtern während der Abwesenheit des Ehemannes bzw. Vaters getragen, um ihre Keuschheit zu bewahren, während sich der Hausherr in den Krieg, auf eine Pilgerreise oder zu seiner Geliebten begab. Besonders wenn die Ritter für mehrere Jahre in fremde Länder zogen, beispielsweise auf Kreuzzüge, um sich mit Osmanen und Arabern zu raufen, wollten sie sich der Treue ihrer Ehefrauen sicher sein. Den Schlüssel nahmen sie üblicherweise mit. Vermutlich wurde der Keuschheitsgürtel auch zur Zeit der Kreuzzüge erfunden.

Auf mechanische Weise sollte der Keuschheitsgürtel also den Geschlechtsverkehr verhindern. Für die Alltagstauglichkeit gab es eine Öffnung mit messerscharfen Zacken für die menschlichen Bedürfnisse. Diese funktionierten vermutlich nur in der Theorie so wie vorgesehen. In der Praxis wird es den betroffenen Frauen kaum möglich gewesen sein, sauber zu bleiben. Infektionen, Hautausschlag und Geschwüre werden sicherlich oft die Folge gewesen sein. 1889 wurde auf einem österreichischen Friedhof aus dem 15. Jahrhundert das Skelett einer Frau ausgegraben, das noch immer den Keuschheitsgürtel trug. Dieser hatte womöglich ihren Tod verursacht.

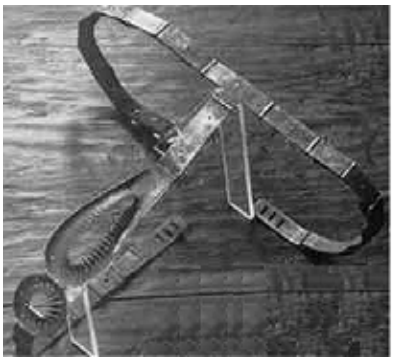


Bild 7.5: Darstellungen mittelalterlicher Keuschheitsgürtel.

Die früheste Darstellung eines Keuschheitsgürtels stammt aus dem Jahr 1405. In einem Dokument aus diesem Jahr heißt es: *„Dies ist ein harteiserner Gürtel florentinischer Frauen, der vorne so geschlossen wird.“* Einige Quellen sagen, ein Italiener in Padua habe 1395 den ersten Gürtel gefertigt. Um 1520 zeichnete der Künstler Hans Baidung eine nackte Frau zwischen einem alten und einem jungen Mann. In der Abbildung nimmt sie dem Alten das Geld aus dem Beutel, um es dem Jungen zu geben. Der junge Mann hat einen Schlüssel in der Hand, der zu dem Schloß an dem Gurt der Frau paßt. Auf drei Bändern stehen Sprüche, die die Situation kommentieren. Die Frau sagt: *„Es hilft kain sloss für frauwen list“*, und der junge Mann fügt hinzu: *„Ich drag ain Slüssel zu sollichen slossen.“*

7.6 Gutes aus der Konservendose

Ein typisches Beispiel aus der Geschichte der Metallverarbeitung ist die Entwicklung der Konservendose, angefangen von der Zeit, in der Dosen noch einzeln von Hand gefertigt wurden, bis zum heutigen Tag, wo bis über 2500 Konserven pro Minute vom Band der Serienfertigung laufen. Damals wie heute diente sie zur Sterilisierung des Inhaltes mittels Erwärmung und luftdichtem Verschluß. Sie hat den Menschen seit ihrer Erfindung durch den Pariser Konditor und Likörmeister Nicolas Appert im Jahr 1795 auf rauhsten Wegen durch Kriege und Entdeckungsreisen, aber auch durch den normalen Alltag begleitet.

Betrachten wir zunächst die Anfänge der Lebensmittelkonservierung: Bereits seit der Antike gab es eine Reihe unterschiedlicher Methoden. Im Altertum waren *salgamae* (gesalzene Gemüse– und Obstkonserven) und *salsamenta* (gesalzene Fleisch– und Fischkonserven) bekannt. Um 1430 wurden erstmals *panes biscocti* (Brotkonserven) erwähnt. Diese sollten sich angeblich dreißig Jahre lang zur Verpflegung von Truppen im Felde eignen. Über Geschmack ließ sich vermutlich auch damals nicht streiten.

Das Konservieren in Zucker läßt sich auf die aus dem alten Orient bekannte Methode mit Honig zurückführen. Zucker wurde sowohl zum Einmachen von Fleisch als auch von pflanzlicher Nahrung verwendet. Auch die Räucherung oder die Schnellräucherung durch Eintauchen in Holzessig waren typische Konservierungsverfahren.

Die Notwendigkeit des luftdichten Verschlusses von Nahrungsbehältnissen betonte Papin bereits 1685 in einem Brief an Leibniz. Das erste Patent auf konservierende Nahrungsbehältnisse wurde, allerdings ohne Hinweise auf das

Bild 7.6: Widersacher im Dosenwettlauf: Napoleon Bonaparte und George III.

Verfahren, Porter und White im Jahre 1691 unter der Nummer 278 in England zuerkannt. In seinen Utrechter Denkschriften erwähnte Leibniz 1714 zur Verpflegung der Truppen im Feld Konserven. Eine nähere Erläuterung der Konservierungsmethode oder gar des Geschmacks des Inhaltes liegt allerdings nicht vor. Johann Heinrich Pott erfand 1756 ein *Pulver wider den Hunger* für die preußische Armee. Dabei handelte es sich vermutlich schlicht um einen Vorläufer der späteren Tütensuppe. All diese Methoden waren jedoch nicht für einen längeren Krieg oder die Seefahrt geeignet.

Die Erfindung der Konserve heutiger Machart wurde schließlich durch das Revolutionsdirektorium von Paris angestoßen. Dieses hatte im Jahre 1795 einen Preis von immerhin 12.000 Francs für jeden ausgeschrieben, der Nahrung mit einer neuen technischen Methode haltbar machen konnte. Appert, der bereits mit der Verpackung und Verkorkung von Nahrung in leeren Weinflaschen experimentiert hatte, fühlte sich sogleich berufen. Während der folgenden zehn Jahre bastelte er an der Lösung des Problems, insbesondere an der Sterilisation. Erfolg hatte er schließlich damit, die Vorräte in luftdichte Gläser zu geben, die-

se zu verschließen und anschließend stundenlang zu erhitzen. Nachdem Appert zunächst nur Behälter aus Glas und Keramik verwendet hatte, versuchte er sich später auch an Blechbüchsen. Im letzteren Fall wurde der Konserveninhalt, roh oder kurz abgekocht, in die Behältnisse gegeben, der Deckel aufgelötet und die Dose dann ebenfalls für mehrere Stunden im Wasserbad erhitzt. Gegenüber den zerbrechlichen Glas– und Keramikgefäßen hatte die Dose für die Soldaten den Vorteil der größeren Stabilität.

Seine Methode demonstrierte Appert schließlich Napoleon persönlich. Dieser war seit 1799 erster Konsul und seit 1804 französischer Kaiser und hatte den ausgelobten Preis der Revolutionäre aufrecht erhalten. Zur Demonstration übergab Appert ihm eine Reihe von verkorkten sterilisierten Proben in Flaschen. Diese enthielten Geflügel, Gemüse und Soße. Nach einer Seereise von vier Monaten und zehn Tagen an Bord eines Schiffes wurden die Proben geöffnet. Angaben des stolzen Erfinders zufolge wurden aus dem Inhalt immerhin noch achtzehn verschiedene Speisen zubereitet, die angeblich alle ihre Frische behalten hatten. Appert erhielt die ausgeschriebene Belohnung von 12.000 Francs, und zwar aus der Hand des Napoleon Bonaparte höchstpersönlich.

Diese Herausforderung konnte der Erzrivale des Korsen, der englische König George III., natürlich nicht auf sich sitzen lassen. Immerhin fiel der Truppenverpflegung eine herausragende Bedeutung für den Krieg zu. Die Wichtigkeit der Konservierung von Nahrung zu dieser Zeit kann man daran erkennen, daß nach Schätzungen von Militärhistorikern Napoleon beispielsweise auf seinem Rußlandfeldzug mehr Soldaten durch Verhungern als bei Kampfhandlungen verloren haben soll.

Der Engländer Peter Durand übernahm Apperts Sterilisationsmethode, benutzte dabei allerdings von Anfang an Behältnisse aus Blech anstatt aus Glas. Rasch ließ er sich die Idee des französischen Erfinderkollegen in England patentieren. Seine Landsleute Bryan Donkin und John Jall setzten sie mit ihrer 1811 gegründeten Fabrik in die Tat um – die heutige Konservendose war geboren. Um Korrosion zu vermeiden, verwendeten sie dabei bereits Stahlbleche mit Zinnbeschichtung.

Im Jahre 1812 tauchten überall in Europa die ersten, meist kiloschweren Konservendosen aus Metall auf. Im Jahre 1813 wurden Konservendosen bereits für Versuchszwecke an die britische Armee und Marine geliefert. Ab dem Jahr 1814 wurden die Dosen nach und nach zum Bestandteil der Standardverpflegung britischer Militärbasen. Auf der Verteilerliste der königlich–britischen Armee stand ironischerweise auch die Insel St. Helena, auf die Napoleon im Juni 1815 in Verbannung geschickt worden war.

Einige Jahre später begannen auch die Amerikaner mit der Dosenherstellung. 1825 wurde ein entsprechendes Patent an die Tüftler Thomas Kensett und Ezra Daggett erteilt, die bereits einige Jahre lang versucht hatten, Austern und Gemüse zu sterilisieren und zu verpacken. Die amerikanische Konservenindustrie erlebte einen starken Aufschwung durch den Goldrausch von 1849 und durch den Ausbruch des Bürgerkrieges (1861–1864). In dieser Zeit stieg die Zahl dort jährlich hergestellter Dosen auf über 30 Millionen Stück an. Heute verbrauchen allein die US–Amerikaner *täglich* mehr als 200 Millionen Blechbüchsen mit mehr als 2500 unterschiedlichen Produkten.

Ein makaberes Datum in der Laufbahn der Dose ist das Jahr 1955, in dem Konserven erstmals bei amerikanischen Atombombenversuchen in Nevada ausprobiert und hinterher von Versuchspersonen verzehrt wurden. Manch einem Stahlfreund stößt besonders das Datum 1957 bitter auf, da in diesem Jahr erstmals Aluminium zur Herstellung von Dosen verwendet wurde.

Bild 7.7: Alte und neue Büchsen; in der Mitte eine der ersten Dosen.

Das Erstaunlichste in der Geschichte der Dose ist die Tatsache, daß bereits 1811 die ersten Konservendosen den Markt eroberten, die ersten brauchbaren Dosenöffner aber nicht vor 1860 erhältlich waren. Vorher ließen sich die Büchsen nur mit roher Gewalt oder großem Geschick. Beispielsweise hatte die

britische Royal Navy als einer der ersten Großabnehmer der Dose im Krieg gegen Napoleon noch keinerlei Werkzeug zum Öffnen. Die englischen Soldaten benutzten zumeist ihre Bajonette, Taschenmesser oder, wenn nichts mehr half, sogar ihr Gewehr. Es gibt Historiker, die behaupten, daß das Bajonett, das etwa um diese Zeit in Gebrauch kam, ursprünglich gar nicht als Waffe, sondern als Büchsenöffner gedacht war. Solche *Forschungsergebnisse* sollte man aber vermutlich eher dem britischen Humor zuschreiben.

Der Polarforscher William Parry führte auf einer Arktisexpedition 1824 Kalbfleischdosen mit sich, deren Leergewicht nicht weniger als ein Pfund betrug. Die Dosen trugen die Aufschrift: *„Mit Hammer und Meißel öffnen!“*

Auch der erste Großunternehmer in Sachen Dosenkonservierung, William Underwood, der schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts in New Orleans die erste Konservenfabrik in den USA errichtete, riet seinen Kunden, zum Öffnen seiner Dosen das nächstbeste Werkzeug zu nehmen.

Erst die Patentierung des Büchsenöffners im Jahr 1858 durch den Amerikaner Ezra J. Warner aus Waterbury in Connecticut bedeutete den endgültigen Durchbruch für die Dose. Warners Öffner bestand aus einer großen gekrümmten Klinge, mit der man den Dosendeckel durchbohren mußte, um ihn dann mit kräftigen Druckbewegungen den Rand entlang aufzuschneiden. Ein Ausrutscher dabei konnte blutig enden.

7.7 Der Stahl der Titanic

Das Geheimnis und die unheimliche Faszination des Titanic–Unglücks sind vermutlich in dem unfaßbaren Ausmaß der Katastrophe begründet, bei der das mit 269 Metern Länge und 46329 Bruttoregistertonnen seinerzeit größte Schiff der Welt auf seiner Jungfernfahrt sank und die meisten Passagiere mit sich in die Tiefe riß. Der Untergang der Titanic war das schwerste Unglück der zivilen Schiffahrt bis zum heutigen Zeitpunkt.

Die makabere Faszination wurde aufgefrischt, als eine Expedition am 1. September 1985 unter Leitung von Robert D. Ballard das Wrack in 3658 Meter Tiefe vor der neufundländischen Küste entdeckte. In den folgenden Jahren wurde die Titanic in ihrem nassen Grab von Tiefsee–U–Booten detailliert untersucht. Dabei stellte man fest, daß das Schiff unter der Wasseroberfläche auseinandergebrochen war und daß das Hinterschiff etwa 600 Meter weit vom Vorschiff entfernt liegt.

Am 10. April 1912 hatte die Titanic im britischen Hafen Southampton die Anker gelichtet. Ziel der Jungfernfahrt war New York, wo das Schiff am 16. April eintreffen sollte. Am 14. April fuhr die Titanic ihrem Zielhafen entgegen. Kapitän John Edward Smith hatte die Geschwindigkeit trotz Eiswarnung nicht gedrosselt. Die White Star Line, der die Titanic gehörte, wollte unbedingt das Blaue Band für die schnellste Überquerung des Atlantiks erringen.

Um 23.40 Uhr bemerkte der Ausguck einen Eisberg. Trotz eines Ausweichmanövers kam es unterhalb der Wasserlinie zur Kollision. Durch einen 100 Meter langen Riß auf der Steuerbordseite lief Wasser ins Schiff und drang rasch in den Bug ein, so daß sich die Titanic stark senkte. Da das Wasser völlig ruhig war, weigerten sich zunächst viele Passagiere, in die Rettungsboote zu steigen. Unterdessen empfing die Carpathia der Cunard–Line den Notruf der Titanic und nahm Kurs auf den Unglücksort. Auf dem Schiff brach gegen 2 Uhr die erste Panik aus, nachdem fast alle Rettungsboote davongefahren waren. Mehr als 1500 Passagiere blieben an Bord zurück, als sich das Schiff um 2.20 Uhr fast senkrecht aufstellte und in der Tiefe verschwand. Die Bilanz der Tragödie war erschreckend. Bis zum Morgengrauen konnte die Carpathia nur 705 Überlebende aufnehmen.

Soweit zu den traurigen Fakten der Katastrophe. Wie aber steht es mit dem Stahl der Titanic? Was hat er mit dem Unglück dieses nach damaligen Maßstäben absolut modernen Schiffes zu tun? In den Untersuchungen nach der Katastrophe wurden allerhand seemännische und technische Ursachen ermittelt, die kritisch zum Untergang beigetragen haben sollen. Die zum Bau des Schiffes eingesetzten Werkstoffe blieben allerdings unerwähnt.

Im Jahr 1991 wurde durch eine Expedition dem Rumpf der Titanic eine Stahlprobe entnommen. Damit konnte man erstmals prüfen, ob möglicherweise minderwertiger Stahl zum Untergang des Schiffes beigetragen hat. Die Probe wurde im Hinblick auf ihre Zähigkeit (Duktilität) und ihre chemische Zusammensetzung untersucht. Bei der Zähigkeitsprüfung wurde die *Übergangstemperatur* bestimmt. Oberhalb dieser kritischen Temperatur zerreißen Schiffbaustähle zäh und unterhalb brechen sie spröde wie Glas. Die Tests ergaben, daß die Übergangstemperatur bei etwa +30 °C lag. Dieser Wert war weit höher, als es die heutigen Vorgaben zulassen würden. Mit anderen Worten hatte der Rumpf der Titanic bei den eisigen Temperaturen des Nordatlantik eher die Zähigkeitseigenschaften von Glas als von duktilem Stahl.

Zum Vergleich: Ein heutiger Schiffbaustahl hoher Qualität müßte auf immerhin unter −60 °C abgekühlt werden, um ein vergleichbar ungünstiges Verhalten wie der Stahl der Titanic aufzuweisen. Die chemische Analyse der Stahl-

Bild 7.8: Unterwasseraufnahme vom Bug der Titanic in 3658 Meter Tiefe.

probe aus dem Rumpf einschließlich der Prüfung eines seinerzeit auf der Werft in England übriggebliebenen Niets ergaben abgesehen vom Eisen einen Gehalt von 0,2% Kohlenstoff, 0,025% Silicium, 0,52% Mangan, 0,065% Schwefel, 0,01% Phosphor, 0,0043% Chrom, 0,004% Stickstoff sowie geringfügige Anteile weiterer Elemente. Dies weist auf einen sogenannten halbberuhigten Stahl hin, der seinen hohen Schwefelanteil vermutlich dem damals üblichen Siemens–Martin–Schmelzprozeß verdankt (siehe dazu auch die Erläuterung auf Seite 205). Zudem war dieser Stahl durch einen hohen Sauerstoffgehalt gekennzeichnet, womöglich aufgrund geringer Siliciumkonzentration im Hochofen, wodurch sich die stark erhöhte Übergangstemperatur erklärt. Das Material war sehr grobkristallin und der hohe Schwefelanteil lag in Form von langgestreckten

Mangansulfidfasern vor. Diese können die Ausbreitung von Rissen entlang ihrer Grenzflächen mit dem sie umgebenden Eisen stark unterstützen. Moderne Schiffbaustähle weisen eine deutlich feinere Kristallgröße und einen wesentlich geringeren Schwefelgehalt auf.

Auch die Methode der Bauausführung könnte maßgeblich zu der Havarie beigetragen haben. Die Nietlöcher wurden kalt gestanzt, wobei sich in ihrer Umgebung aufgrund der Sprödigkeit des Stahls feine Risse im Blech bildeten. Beim Zusammenstoß mit dem Eisberg konnten sich diese bereits existierenden Haarrisse unter der Kraft des Aufpralls zu großen Rissen aufweiten, wachsen und sich mit entsprechenden Rissen anderer Nietlöcher verbinden. Der etwa 100 Meter lange Riß im Schiff kann daher so verstanden werden, daß das direkt vom Eisberg geschlagene Leck vermutlich nur wenige Meter lang war, der harte Schlag auf das glasartig spröde Baumaterial aber mindestens ein Drittel des Schiffskörpers entlang der Nieten hat aufplatzen lassen.

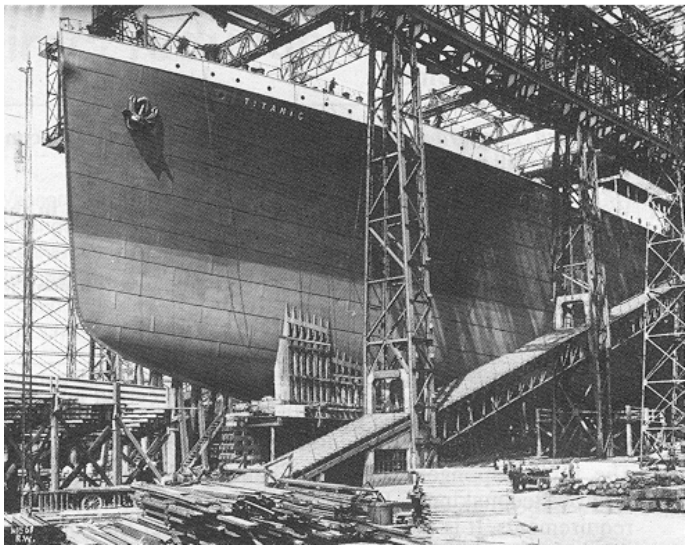
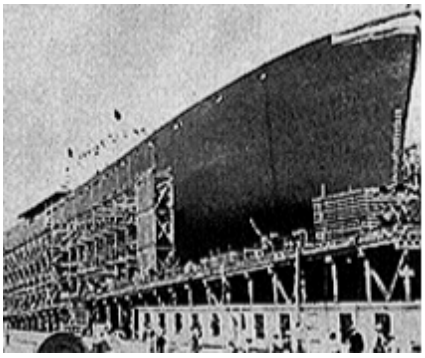


Bild 7.9: Beim Bau der Titanic auf der Werft.

Nachdem sich das Schiff zu senken begann und immer mehr Eiswasser eindrang, erfolgte eine Abkühlung weiterer Rumpfbereiche, wodurch der Stahl noch weiter versprödete. Dabei traten mit zunehmender Hebelwirkung beim

Neigen des Schiffes vermutlich immer mehr Risse auf, über die wiederum mehr Wasser eindringen und das Schiff noch weiter in Schräglage bringen konnte. Unmittelbar vor dem Untergang ragte das Heck der Titanic schließlich steil aus dem Wasser auf, wodurch aufgrund der schweren Maschinen im Heck enorme Spannungen in der Rumpfbeplankung und der darunterliegenden Stahlkonstruktion entstanden sein müssen.

Überlebende bezeugten, sie hätten in dieser letzten Phase des Untergangs ein berstendes Geräusch ähnlich zerbrechendem Porzellan gehört. Dies wurde ursprünglich auf das an Bord befindliche Geschirr sowie herabfallende Schiffsteile zurückgeführt. Im Anschluß an dieses Geräusch hatten die Zeugen jedoch den Eindruck, das Heck des Schiffes habe sich im Wasser gesetzt, so daß der Schluß naheliegt, daß der Lärm durch das Auseinanderbrechen des versprödeten Stahls bei der Trennung von Bug und Heck der Titanic verursacht wurde.



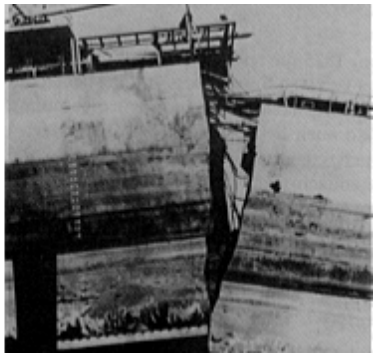


Bild 7.10: Die aus Platten zusammengeschweißten Liberty–Schiffe brachen bei geringen Wassertemperaturen spröde entlang der Schweißnähte auseinander.

Ähnliche Probleme mit sprödem Material traten und treten in der Seefahrt immer wieder auf. Ein Beispiel dafür ist der Totalverlust von 19 jeweils plötzlich auseinanderbrechenden 10.000–Tonnen–Schiffen der amerikanischen Liberty–Klasse in den 1940er Jahren. Viele dieser Unglücke waren seinerzeit nicht sorgfältig untersucht worden, da man den Verlust der meisten dieser Schiffe schlichtweg deutschen U–Boot–Angriffen zuschrieb. Alle diese Brüche erfolgten unerwartet und explosionsartig bei statischer Belastung auf See und

tiefen Temperaturen. Unglücke dieser Art in wärmeren Seegebieten traten praktisch nicht auf. Als Ursache dieses katastrophalen Materialversagens hat man heute die mangelhafte Qualität und das resultierende spröde Verhalten der Schweißnähte erkannt.

Dabei hat Eisen als Schiffsbaumaterial durchaus eine lange Tradition. Bereits im Jahre 1787 baute Wilkinson in England das erste eiserne Schiff, ein Frachtschiff, das auf dem Severn fuhr. Im Jahre 1810 versuchte man zuerst, in hölzerne Schiffe Eisenkonstruktionen einzubauen, um die Länge der Boote zu erhöhen. Eiserne Masten und Bugsprite beispielsweise ließ sich Robert Bill im Jahre 1820 in England patentieren. Drei Jahre später rüstete man in Plymouth erstmals ein Schiff damit aus. Vollständige Schiffsrümpfe aus Eisen wurden in England aber erst ab 1835 eingeführt.

7.8 Die Schöne und das Biest — Filigranes aus Eisen

Anfang des 19. Jahrhunderts erlebte Eisen, das klassische Material von Werkzeugen und Waffen, eine kurze Renaissance als Werkstoff für Schmuck und dekorative Elemente. Die Mode ging von Preußen aus, griff aber bald auf ganz Europa und Amerika über. Die Redensart *Gold gab ich für Eisen*, die zur Zeit der Befreiungskriege in Preußen aufkam, belegt, daß patriotische Gefühle den Aufstieg des Eisens zum Schmuckmaterial begünstigten.

Die Geschichte des Eisenkunstgusses begann in Preußen bereits im 17. Jahrhundert. Zu dieser Zeit wurde Eisen in Holzkohle–Hochöfen erschmolzen und zur Fertigung von kunstreich verzierten Ofenplatten und Reliefs verwendet. Diese Produkte waren verhältnismäßig grob, denn das mit Holzkohle geschmolzene Eisen verfügte noch nicht über die für Feinguß erforderliche hohe Gießtemperatur. Ab 1787 experimentierten Hütten in Schlesien, die auf Geschütz– und Munitionsherstellung spezialisiert waren, erstmals mit dem Umschmelzen von Roheisen in Feineisen. Insbesondere die Einführung des Kupolofens mit Koks als Brennmaterial ergab gute Ergebnisse. Nach und nach entdeckten Architekten und Künstler das Gußeisen. Neben Brücken, Geländern und Laternen produzierten die preußischen Eisengießereien eine Reihe von Denkmälern zur Erinnerung an die Befreiungskriege. Das bekannteste dieser Monumente ist das Mahnmal auf dem Berliner Kreuzberg, das nach Entwürfen von Schinkel gefertigt wurde. Von hier aus hatten die Berliner am 23. August 1813 die Kämpfe bei Großbeeren zwischen preußischen und napoleonischen Truppen beobachtet.

Die Nutzung von Eisen für die Schmuckherstellung geht auf Marianne von Preußen zurück. Am 16. März 1813 hatte Preußen Frankreich den Krieg erklärt. Nachdem Friedrich Wilhelm III. am 17. März seinen berühmten *„Aufruf an mein Volk“* erlassen hatte, folgte ihm Prinzessin Marianne mit einem ebenso patriotischen *„Aufruf an die Frauen im Preußischen Staate“*. Darin bat sie als Vorsitzende des *Frauen–Vereins zum Wohle des Vaterlandes* nicht nur um Geldspenden, sondern auch um *„...jede entbehrliche werthvolle Kleinigkeit, das Symbol der Treue, den Trauring und die glänzende Verzierung des Ohrs, den kostbaren Schmuck des Halses.“*

Im Austausch gegen die goldenen Pretiosen schlugen geschäftstüchtige Berliner Gießereimeister eiserne Ringe vor, in die der Spruch *„Gold gab ich für Eisen“* eingraviert war. Obwohl dies der Prinzessin mißfiel und sie den Eisenschmuck mit dem Wort *garstig* belegte, hatten die Eisenringe bei den Berlinerinnen Erfolg. Die preußisch–patriotische Gesinnung, die ihre Trägerinnen damit zum Ausdruck brachten, hat möglicherweise auch die Beliebtheit des Eisenschmucks im allgemeinen gefördert.

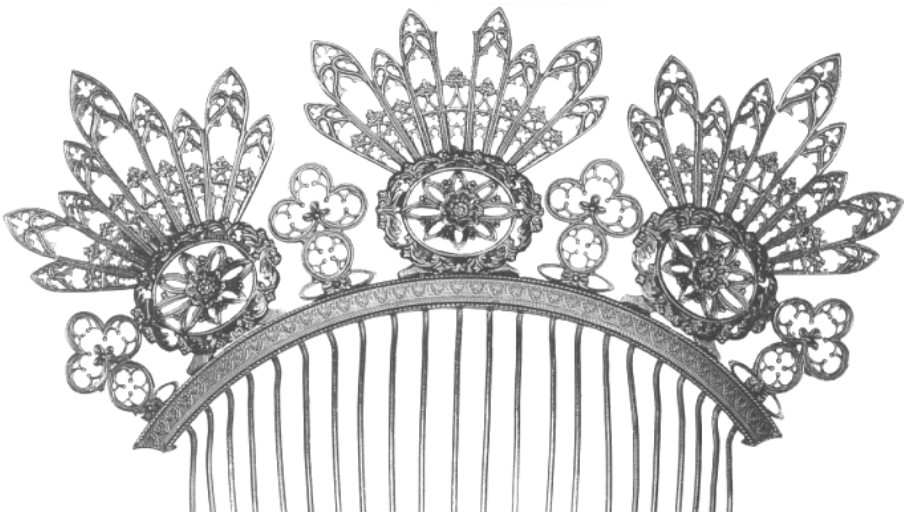


Bild 7.11: Preußisches Diadem in Form eines Zierkamms aus Eisenguß, um 1820 von Johan Conrad Geiss aus Berlin.

War das Eisen zunächst nur Ersatz für hochwertigere Werkstoffe, so stellte sich dieses spröde und nüchterne Metall in Verbindung mit der stilisierenden und strengen Gestaltung im Klassizismus mit seiner herben Anmut als ideales Material dar. Die Formensprache des Eisenschmucks war zunächst an den Gold– und Silberschmuck der Zeit angelehnt. Bald fanden die Feingießer und Ziseleure allerdings zu einer eigenen künstlerischen Ausdrucksweise, die dem dunklen Eisen besser gerecht wurde. Anders als Schmuckstücke aus Edelmetall, die allein schon durch ihren Glanz wirken, reflektiert der Eisenschmuck das Licht kaum. Dem Zeitgeschmack entsprechend verwendeten die Schmuckkünstler gotische und antike Motive, wie zum Beispiel Kreuzblumen, Gitterornamente oder Rosetten. Später kamen auch Biedermeier–Motive hinzu. Ringe, Armbänder, Broschen und Zierkämme wurden aus Eisen hergestellt, viele davon so filigran, daß man sich kaum vorstellen kann, wie solche Stücke aus dem sonst eher geringgeschätzten Metall entstanden. Diese Schmuckstücke, die nur in Berlin hergestellt wurden, waren unter dem Namen *fer de Berlin* (Eisen aus Berlin) bald weltberühmt.

7.9 Rost im Mund — Dentallegierungen

Seit einigen Jahren sind Zahnfüllungen aus Amalgam Gegenstand kontroverser Diskussionen. Die Suche nach geeigneten Ersatzlegierungen kommt allerdings nur mäßig voran. Amalgame bestehen in der Regel zu etwa einer Hälfte aus Quecksilber und zur anderen aus Silber, Zinn, Kupfer und Zink. Oft wird nach hoch– und niedrigsilberhaltigen sowie nach kupferreichen Amalgamen unterschieden. Mehr als 50 Materialien werden derzeit als Ersatz für das bei vielen Patienten unbeliebte Amalgam angepriesen. Die Industrie hat in den letzen fünf Jahren mehr neue Füllungsmaterialen auf den Markt gebracht, als zuvor in der gesamten Geschichte der Zahnmedizin.

Amalgame werden seit über 150 Jahren eingesetzt. 1826 in Paris durch Jacques Taveau entwickelt, haben sie eine recht wechselvolle Geschichte der Nutzung und Ächtung hinter sich. 1840 beispielsweise wurde ein Amalgamverbot wegen der dabei auftretenden Quecksilberdampfvergiftung erlassen. Dieses Verbot wurde nach Fortschritten bei der Verarbeitung im Jahre 1855 wieder aufgehoben. 1926 jedoch warnte der Chemiker Alfred Stock aus dem Kaiser–Wilhelm–Institut erneut vor Quecksilberamalgam und beschrieb 1939 chronische Vergiftungen infolge der Instabilität des Materials.

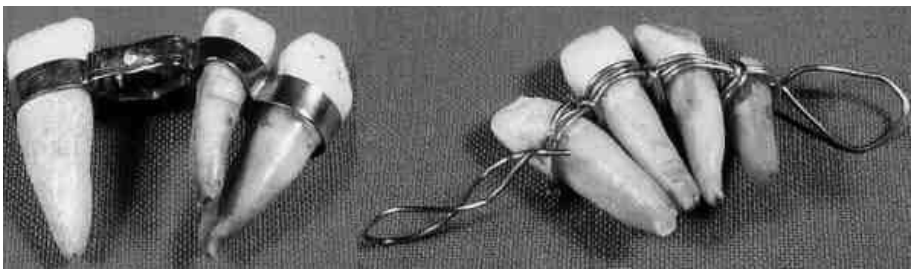


Bild 7.12: Gold wurde ab etwa 700 v. Chr. bei den Etruskern in der Zahnmedizin verwendet. Das Bild zeigt einen Brückenapparat zum Stützen eines eingesetzten oberen Mittelschneidezahns (links) sowie eine antike griechische Zahnbrücke aus reinem Golddraht zum Befestigen von wackeligen Schneidezähnen am Unterkiefer (rechts).

Damals wie heute war der Auslöser der Diskussionen um das allgegenwärtige Material die Vermutung, daß sich aus den Plomben ständig Spuren von Quecksilber lösen und vom Körper aufgenommen werden könnten. Manche Fachleute und Patienten möchten die quecksilberhaltigen Legierungen daher aus dem Mund verbannen. Andere Experten hingegen loben die hohe Belastbarkeit und Abriebfestigkeit der Amalgame. In der Tat müßte ein geeignetes Ersatzmaterial schon eine Reihe beträchtlicher Vorteile in sich vereinen, denn Amalgame sind für den Zahnarzt denkbar praktisch. Als frisch angerührte Pasten lassen sie sich leicht und schnell in jedes Zahnloch verfüllen. Einmal zur festen Legierung erstarrt, sind sie abriebfest und hart.

Bezüglich der Festigkeit des Materials ist die entscheidende Hürde für Amalgam–Nachfolger der Einsatz in größeren Löchern auf der Kaufläche der Backenzähne. Hier muß die Füllung bei einem Anpreßdruck von bis zu 70 Kilogramm pro Quadratzentimeter enorme Kräfte aushalten, darf dabei nicht brechen und muß jahrelang dicht und abriebfest bleiben.

Darüber hinaus hat die ungeliebte Legierung auch noch eine lokal schützende Wirkung. Wenn der Zahnarzt versehentlich einen Spalt zwischen Füllung und Zahn freiläßt, hemmen die aus der Plombe freigesetzten Metallspuren das Bakterienwachstum und damit den erneuten Ausbruch von Karies an dieser Stelle. Zu guter Letzt ist Amalgam auch ein billiger Werkstoff. Dies hat eine beträchtliche Bedeutung bei immerhin fast 60 Millionen Füllungen, die den Patienten allein in Deutschland von den Krankenkassen pro Jahr bezahlt werden. Der hohe Preis ist es auch, der viele Patienten vor den schon heute zur

Verfügung stehenden Alternativen zurückschrecken läßt. Goldinlays halten mit 10 bis 15 Jahren doppelt so lange wie Amalgam–Füllungen, allerdings sind sie auch zehn– bis zwanzigmal so teuer. Als vergleichbar kostspielige Alternativen zu Gold kommen metallfreie Inlays aus Keramik und Kunststoff in Frage. Sie sind vor allem nützlich, um elektrische Wechselwirkungen verschiedener Metalle im Mund zu vermeiden.

7.10 Wenn Metalle vor Begeisterung schäumen

Leichtbaumethoden sind heute aus Energiespargründen in aller Munde. Eine der neuesten Ideen, mit innovativen Materialien Gewicht einzusparen, sind Schäume aus Metallen, eine völlig neue Werkstoffgruppe.

Vorbilder zur Verwendung hochporöser Materialien für Strukturbauteile, also Bauteile, die in einer Konstruktion große Lasten aushalten müssen, sind in der Natur vielfach vorhanden, zum Beispiel in Form von Knochen, Holz, Korallen und Bienenwaben. Dabei machen offene oder geschlossene Poren einen großen Teil des Volumens aus. Dieses grundlegende physikalische Bauprinzip wird nun auch für neue Werkstoffe wie etwa Schaumaluminium umgesetzt.

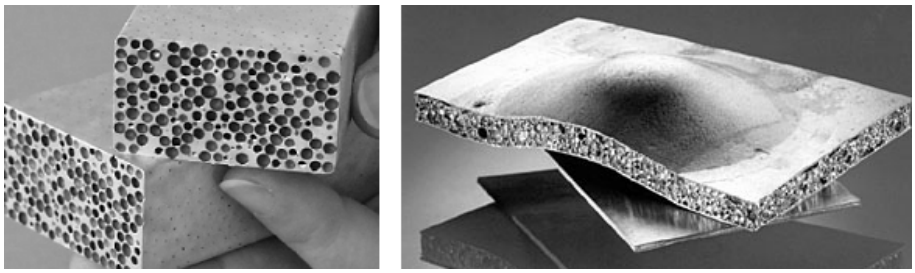


Bild 7.13: Metallischer Schaum aus Aluminium (links), ein Sandwich aus Stahlblechen und Aluminiumschaum hat gute Crash–Eigenschaften, da es sich gut verformen läßt und dabei viel Energie aufnimmt (rechts).

Schäume aus Metall sind extrem leicht. Durch die Poren läßt sich die Dichte beispielsweise von Aluminiumschäumen auf bis zu 10% der Dichte von massivem Aluminium bei nur geringen Einbußen hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit reduzieren. Bestimmte Sorten haben sogar eine Dichte unterhalb eines

Kilogramms pro Liter und können somit schwimmen. Bei solchen Aluminiumlegierungen sind mehr als zwei Drittel des Volumens Poren unterschiedlicher Größe. Desweiteren können Metallschäume insbesondere bei Druckbeanspruchung durch plastische Verformung viel Energie aufnehmen. Aber sie sind nicht nur leicht, sondern verfügen auch über eine deutlich geringere Strom– und Wärmeleitfähigkeit als die Ausgangsmetalle.

Zur Produktion von metallischen Aluminiumschäumen sind derzeit zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahren in der Erprobung. Bei pulvermetallurgischen Methoden wird beispielsweise handelsübliches Aluminiumpulver in einem ersten Schritt mit einem ebenfalls pulverförmigen Treibmittel vermischt. Anschließend wird die Pulvermischung zunächst zu einem festen, wenig porösen Vormaterial verdichtet. Dieses Halbzeug kann durch konventionelle Verfahren wie Schmieden oder Walzen zu Blechen oder Stäben weiterverarbeitet werden. Erst beim abschließenden Erwärmen auf Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes spaltet das Treibmittel Gasbläschen ab. Diese durchsetzen das aufschmelzende Metall, so daß nach der Abkühlung dieser Blasenschmelze die gewünschte Porenstruktur auftritt. Ein alternatives schmelzmetallurgisches Verfahren beruht auf dem Einleiten von Gas in eine erstarrende Schmelze.

Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften bietet sich geschäumtes Aluminium für diverse Einsatzgebiete an. Auf der Detroit Auto Show war 1997 ein Prototyp eines Geländewagens ausgestellt, der unter seiner Kohlefaserhaut aus geschäumtem Aluminium aufgebaut war. Durch die so erzielte Gewichtsreduzierung wies das Fahrzeug einen deutlich abgesenkten Treibstoffbedarf auf. Desweiteren erscheint der Einsatz von geschäumten Metallen als Energieabsorber sinnvoll. Hier geht es darum, Elemente aus Aluminiumschaum so in die Autokarosserie einzubauen, daß sie im Fall eines Zusammenstoßes möglichst viel Verformungsenergie aufnehmen können.

7.11 Es ist nicht alles Schrott, was rostet — High–Tech aus Rost

Jeder Autofahrer weiß, daß Rost schadet. Dies wird immer wieder schmerzlich klar, wenn der TÜV Fahrer und Fahrzeug unsanft trennen möchte. Ursache dafür ist bekanntlich die Korrosion, die allmähliche Oxidation von Materialien durch elektrochemische Vorgänge, bei denen das Metall wieder seinem stabilen Zustand zustrebt. Doch Korrosion kann auch sehr nützlich sein. Materialfor-

scher fanden heraus, daß sich der Prozeß des Korrodierens zur Herstellung neuer Materialien nutzen läßt, beispielsweise zur Fertigung extrem feinporiger Metallmembranen, die als hochwirksame Filter verwendbar sind.

An einer Legierung aus Gold und Silber, welche in ein Säurebad getaucht wurde, löste man mit einer elektrischen Spannung das chemisch weniger edle Silber heraus, bis eine Art Skelett aus Gold übrigblieb. Diese selektive Korrosion führte also zu einer extrem feinporigen Membran. Die Porengröße hängt von der Temperatur des Säurebades ab und läßt sich so hervorragend steuern. Der kleinste erreichbare Porendurchmesser liegt mit nur 70 Millionstel Millimetern mehr als zehnmal unter dem herkömmlicher Metallmembranen, die als Filter weniger wirksam sind, weil sie viele inaktive, allseitig dichte Poren enthalten. Für ultrafeine Membranen, die bislang vorwiegend aus Kunststoff gefertigt wurden, haben Chemiker, Biotechniker und Pharmazeuten vielfältige und zunehmende Verwendung, beispielsweise, um Öl oder Nahrungsmittel aufzubereiten, Medikamente herzustellen oder Gase zu reinigen. Besonders Goldmembranen sind chemisch und thermisch widerstandsfähiger als bisher verwendete Feinstfilter und lassen sich zudem wiederum mit Hilfe elektrischer Ströme leichter reinigen. Ganz ähnlich läuft der Korrosionsprozeß auch in Stahl ab, der ebenfalls mehrere Komponenten enthält: Eisen sowie Nickel, Chrom und Kohlenstoff. Im Verlauf des Prozesses lösen sich Eisenatome aus der Verbindung, der Stahl wird porös und brüchig. Bei ihren Experimenten mit der Gold–Silber–Legierung interessierten sich die Forscher insbesondere dafür, was mit den Löchern passiert, die herausgelöste Silberatome in der Probe hinterlassen. Zu ihrer Überraschung wandern die Löcher, solange das Metall im Säurebad liegt, und neigen dazu, sich zu immer größer werdenden Lochverbänden zusammenzuschließen. Löcher in korrodierendem Stahl wandern ganz ähnlich. Bei anderen Legierungen wiederum hingegen bleiben sie an Ort und Stelle und wachsen deshalb auch kaum. Solche Metallverbindungen zerbrechen bei Belastung zwar durchweg weniger rasch, dafür aber zerbröselt ihre Oberfläche und blättert Schicht um Schicht ab. Dank dieser Erkenntnisse lassen sich womöglich neue Verfahren zur Vermeidung von Rost und Materialermüdung entwickeln.