

Wege der Metallforschung: Quellen wissenschaftlicher Erkenntnis und technischen Fortschritts

Autor(en): **Speidel, Markus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 24

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75159>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Wege der Metallforschung

Quellen wissenschaftlicher Erkenntnis und technischen Fortschritts

Von Markus Speidel, Zürich

An der Promotionsfeier der ETH Zürich hat Prof. M. Speidel die Festansprache über «Wege der Metallforschung. Quellen wissenschaftlicher Erkenntnis und technischen Fortschritts» gehalten. Speidel ist Professor für physikalische Metallurgie. Er gehört der noch jungen, vor gut anderthalb Jahren gegründeten Abteilung für Werkstoffe (IID) an.

Sie alle wissen, dass der wesentliche Schritt zur Erlangung der Doktorwürde nicht das Bestehen der Doktorprüfung ist. Weitaus wesentlicher, ja entscheidend ist, dass der Doktorand zuvor einen *eigenen Beitrag zur wissenschaftlichen Erkenntnis*, eben seine *Doktorarbeit*, vorlegen kann. An einer technischen Hochschule wie der unsrigen wird man dabei meist nach wissenschaftlicher Erkenntnis suchen, die nach Möglichkeit auch zu einem *Fortschritt der Technik* führt. Es scheint mir deshalb passend, dass wir uns heute nach den Quellen wissenschaftlicher Erkenntnis und technischen Fortschritts fragen.

Erlauben Sie mir, dieses sehr weitgefassete Thema sogleich wieder einzuschränken auf die Quellen wissenschaftlicher Erkenntnis und technischen Fortschritts in meinem engeren Fachgebiet der *Metallforschung* und der *Metallurgie*. Den Anlass dazu bildet der noch junge Entscheid, an der ETH Zürich eine eigene Abteilung für die Ausbildung von *Werkstoffingenieuren* einzuführen. Werkstoffe kann man in vier grosse Gruppen einteilen:

- Die *metallischen* Werkstoffe, unter Einschluss der Legierungen,
- die *nichtmetallisch-anorganischen* Werkstoffe wie Keramik, Glas, Beton,
- die *organischen* Werkstoffe wie Kunststoffe, Gummi und Holz,
- die *Verbundwerkstoffe* wie glasfaserverstärkte oder kohlefaserverstärkte Kunststoffe, Eisenbeton usw.

Alleine die metallischen Werkstoffe möchte ich heute behandeln, weil sie seit jeher in der kulturgeschichtlichen Entwicklung der Menschen eine ganz besondere Rolle gespielt haben und weil sie auch heute noch für unsere

Technik und Volkswirtschaft mit Abstand die bedeutendste Gruppe von Werkstoffen sind. Zudem sind auch mein eigenes Vorurteil, mein beschränkter Fachverstand, meine Forschungsarbeit, meine Lehrtätigkeit, ja meine Begeisterung ganz auf Metalle und Legierungen ausgerichtet. Wie vielen Menschen vor uns, mit uns und nach uns gibt mir die Beschäftigung mit metallischen Werkstoffen ausser Lebensfreude auch Arbeit und Brot. Denken Sie kurz an die Bedeutung der Metallindustrie und Maschinenindustrie in der Schweiz. Auch sie ist auf wissenschaftliche Erkenntnis und technischen Fortschritt auf dem Gebiete der metallischen Werkstoffe angewiesen.

Metallurgie, die Kunst und Technik der Herstellung der Metalle, gehört zu den *frühesten kulturellen Errungenschaften der Menschheit*. Metallurgie ist vielleicht der älteste Zweig der Technik überhaupt, selbst wenn der Beruf des Metallurgen nicht der älteste aller Berufe ist. Die Gewinnung der sieben wichtigen Metalle des *Altertums*, Gold, Silber, Kupfer, Blei, Quecksilber, Zinn und Eisen, ist schon in früher prähistorischer Zeit nicht nur vereinzelt durchgeführt, sondern zu blühendem Handwerk und fortgeschrittener Technik entwickelt worden. Sowohl im *Nahen Osten* wie auch in *Europa* finden sich *Bergwerke, Schmelzöfen* und *metallische Gegenstände aus prähistorischer Zeit*.

Natürlich werden die ersten von Menschen technisch, künstlerisch und wirtschaftlich genutzten Metalle die gewesen sein, die auf der Erde *gediegen* gefunden werden können, das heisst in *metallischer Form* und *nicht an Sauerstoff oder Schwefel gebunden*. Die Archäologie prähistorischer Stätten hat

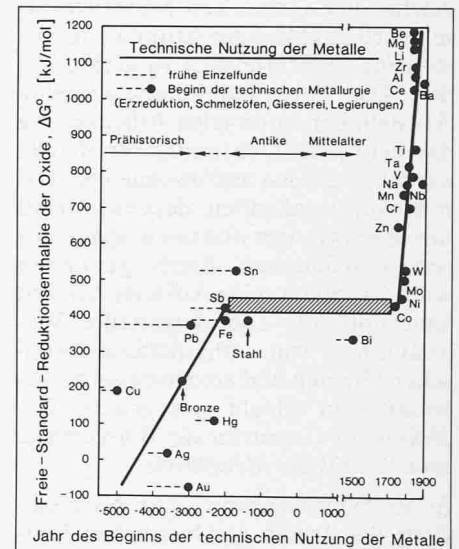


Bild 1. Geschichte der Metallurgie im Lichte der Thermodynamik. Metalle wurden um so eher vom Menschen genutzt, je niedriger die Freie-Standard-Reduktionsenthalpie ihrer Oxide ist. Die Metallurgie der sieben wichtigen Metalle sowie Bronze und Stahl waren schon zu Beginn der Antike bekannt. Es wäre interessant zu erforschen, weshalb in der Antike, im Mittelalter und in der ersten Hälfte der Neuzeit kaum neue metallurgische Erkenntnisse und Techniken entwickelt wurden

neben Kupfer, Silber und Gold auch *Meteoreisen* zutage gefördert. Schon im sechsten vorchristlichen Jahrtausend jedoch haben Menschen begonnen, Metalle aus ihren Erzen, das heisst aus ihren Sauerstoffverbindungen, zu befreien. Die *Metallurgie des Kupfers und des Bleis* ist mehr als *siebentausend Jahre alt!* Dies folgt aus der dendrochronologisch korrigierten Radiokohlenstoff-Bestimmung des Alters frühester archäologischer Funde.

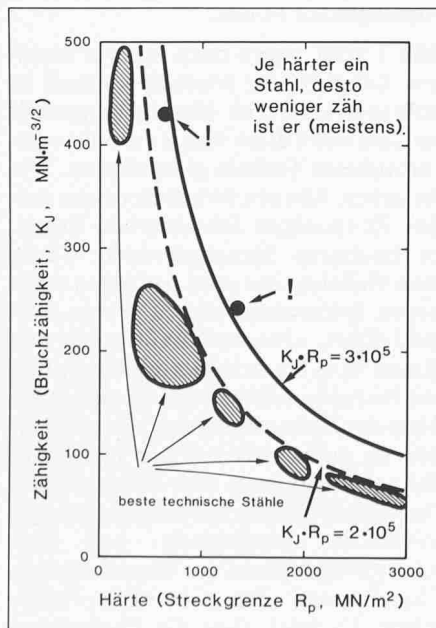
Bild 1 zeigt, wann nach unserer heutigen Kenntnis der Mensch erstmals in prähistorischer Zeit Metalle hergestellt hat und wann diese Kunst zu einer weitverbreiteten Technik geworden ist. Wie Sie sehen, können zwischen diesen beiden Zeitpunkten Jahrtausende liegen. In heutigem Sprachgebrauch würde man vielleicht das erste Auftreten einer neuen Erkenntnis, die zu einem Produkt führt, «*Innovation*» nennen; den langen Weg bis zu seiner weitverbreiteten Nutzung würde man als das «*Problem des Technologietransfers*» bezeichnen. In prähistorischer Zeit hatte man dafür Jahrhunderte oder Jahrtausende. Das Bild enthält weiter eine etwas ungewöhnliche Vereinigung von Forschungsergebnissen der Physikalischen Chemie und der Geschichtswissenschaft. Es zeigt, dass die Entdeckung

und Nutzung der Metalle im allgemeinen um so später erfolgt, je höher diese

Freie-Standard-Reduktions-Enthalpie ΔG ihrer Oxide liegt. Freiwillig verlaufen chemische Reaktionen nur in Richtung der Verminderung der freien Enthalpie, wenn also ΔG negativ ist. Vorzeichen und Grösse von ΔG stellen damit auch das Mass der Affinität, des Bestrebens der Stoffe, sich zu verbinden, dar. Die freie Reduktionsenthalpie ΔG stellt den minimalen Arbeitsbetrag dar, der bei der Gewinnung der Metalle aus ihren Oxiden aufzuwenden ist. Damit wird verständlich, dass ein Metall um so schwieriger und um so später aus seinen oxidischen Erzen gewonnen wurde, je höher seine Affinität ΔG zum Sauerstoff ist. Die dargestellte Verknüpfung von physikalisch-chemischen Grössen und archäologischen Erkenntnissen erlaubt eine gewisse Einsicht in die Geschichte der Wissenschaft und Technik der Metallurgie.

Es ist bemerkenswert, dass bis gegen Ende des dritten vorchristlichen Jahrtausends sowohl in Europa wie auch im Nahen Osten sich eine weitverbreitete metallurgische Industrie entwickelt hatte, der die gesamte Antike und das gesamte Mittelalter keine wesentlichen wissenschaftlichen oder technischen Neuerungen beizufügen wussten. Das flache mittlere Teilstück der Kurve in Bild 1 bezeichnet diese lange Zeit, man könnte sie die Eisenzeit nennen. An ihrem Beginn wurde noch die Eisenmetallurgie vervollkommen und Stahl entwickelt, danach erkennen wir kaum technische Fortschritte mehr bis weit in die Neuzeit hinein. Erst in den letzten

Bild 2. Zähre Stähle sind weich, harte Stähle sind spröde. Am Institut für Metallurgie der ETH Zürich ist es gelungen (zusammen mit Stahlherstellern), Stähle zu entwickeln und zu prüfen, die zugleich hart und zäh sind



zwei Jahrhunderten werden dann im neuerwachten Geist der wissenschaftlichen Forschung die übrigen, zum Teil sehr schwer reduzierbaren Metalle gezielt gesucht, entdeckt und genutzt. In diesem Sinne befänden wir uns nun im Zeitalter der Nichteisenmetalle, was gar nicht so unvernünftig klingt, wenn Sie bedenken, was um Sie herum alles aus Aluminium, Zink, Magnesium, Nickel und künftig aus Titan besteht.

Wenn auch die Antike auf dem Gebiet der Metallurgie keinen technischen Durchbruch errungen hat, so hat sie uns doch herrliche Kunstwerke aus Bronze, Silber und Gold hinterlassen, die den hohen damals erreichten Stand der Technik beweisen. Darüber hinaus sind literarische Zeugnisse der hohen Wertschätzung des Berufes des Metallurgen erhalten geblieben, die mit den Namen Hephaistos und Vulkanus beweisen, dass damals die Berufsaussichten des Metallurgen bis hinauf zum Halbgott reichten. (In unserer heutigen Zeit ist die Obergrenze der Berufsaussichten des Metallurgen die Stellung des Staats- und Parteichefs der Sowjetunion.) Die hohe Wertschätzung des Berufes der Metallurgen in ältester Zeit ist verständlich daraus, dass dieser Beruf stets der eines ausgebildeten Fachmannes gewesen sein muss. Man kann schlecht im Nebenberuf neben Jagen, Sammeln, Viehhüten und Ackerbau auch noch Metalle schmelzen, giessen, schmieden und härten. Wir haben deshalb Grund anzunehmen, dass auf dem Gebiet der heutigen Schweiz die ersten Ingenieure die vorgeschichtlichen Metallurgen waren. In ihrer fachlichen Ausbildung sehen wir deshalb auch die prähistorischen Vorläufer der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die besonderen Fachkenntnisse und Techniken vom Vater auf den Sohn übertragen wurden, und hierin sehen wir die prähistorischen Vorläufer der «Doktorväter».

Beachten Sie noch einmal in Bild 1 den waagrechten Teil der Kurve, die lange Zeit der Antike und des Mittelalters, in der, wie es scheint, ein Fortschritt der metallurgischen Technik völlig ausblieb. Dies täuscht, wie wir daran erkennen können, dass die Verfahren zur Gewinnung von Eisen und Stahl bedeutend vervollkommen wurden. Die Rennfeuer aus prähistorischer Zeit waren in der Antike sehr zahlreich und sehr weit verbreitet, obwohl sie Eisen nicht richtig erschmelzen, sondern nur zum halbfesten Zustand der Luppe reduzieren konnten. Wegen ihres zu niedrigen Schachtes haben Rennfeuer eine schlechte Ausnützung thermischer und chemischer Energie der Abgase. Es ist gerade deswegen bewundernswert, was

die antike Metallurgie zu leisten imstande war: Eine einzige römische Legion mit 6000 Mann mag zwischen 3 und 5 kg Eisen je Mann nur für die Bewaffnung benötigt haben; rechnet man noch Werkzeug und Schanzgeräte hinzu, ergeben sich Eisenmengen zwischen 20 und 30 Tonnen für eine schwerbewaffnete Legion! Es ist deshalb verständlich, dass man nach Verfahren mit höherem Wirkungsgrad und höherer Ausbeute gesucht hat, genau wie heute. Schon im 11. Jahrhundert zeichnet sich die Entwicklung von Öfen mit immer höherem Schacht bis hin zum modernen Hochofen ab. Roheisen, das bei hoher Temperatur gewonnene Produkt des modernen Hochofens, hat jedoch gegenüber der antiken Luppe den Nachteil, dass es zuviel Kohlenstoff gelöst hat und somit nicht schmiedbar ist. Vielleicht erinnern sich einige, dass man früher umständliche Verfahren benötigt hat, um aus Roheisen schmiedbaren Stahl zu machen: Thomas-Konverter, Bessemer Birne und Siemens-Martin-Ofen.

Heute stellt man Stahl aus dem Roheisen über das Sauerstoffblasverfahren her. Das Institut für Metallurgie der ETH ist durch die Person von Prof. Robert Durrer auf das engste mit der Geschichte dieses epochalen Verfahrens verbunden, das man ohne weiteres in eine Reihe mit Namen wie Bessemer-, Thomas- und Siemens-Martin-Verfahren stellen kann. Im Jahre 1943 wurde Durrer zum ordentlichen Professor für Metallurgie an der ETH ernannt, gleichzeitig zum Leiter der von Roll'schen Eisenwerke. In dieser Doppelfunktion erforschte er die Möglichkeit, Roheisen mit Sauerstoff zu einem Stahl mit Siemens-Martin-Qualität zu verwandeln. Der Sauerstoff sollte die Verbrennung, das heisst Oxidation der schädlichen Beimengungen, einschliesslich des Kohlenstoffs bewirken. Der Sauerstoff wurde durch eine Lanze auf den Stahl geblasen. Nachdem in Gerlafingen gezeigt worden war, dass der Frischprozess mit Sauerstoff wirtschaftlich durchzuführen ist, ging es darum, Versuche in grösseren Einheiten durchzuführen. Im Juni 1948 kam es dann zu einem Abkommen zwischen Vöest, den Mannesmannwerken und der Österreichischen Alpen Montangesellschaft in Donawitz sowie von Roll über die Wiederholung der Gerlafinger Versuche und den Aufbau eines 15-Tonnen-Konverters in Österreich. Übrigens wurde anlässlich einer Vöest-Sitzung im Dezember 1949 beschlossen, dem Verfahren den Namen LD zu geben, wobei L Linz und D Durrer entsprechen soll. Später verstand man das D als Ortsbezeichnung Donawitz. Diese Entwicklung hat sich nicht zufällig in

Österreich zur Blüte entwickelt, denn bei Ausgang des 2. Weltkrieges war Österreich ein armes Land, jedoch mit dem Anspruch eines *Qualitätsstahlproduzenten*. Qualitätsstahl war aber damals nicht durch die klassischen Blasstahlverfahren, sondern nur über den Siemens-Martin-Ofen herzustellen, wofür die Investitionsmittel fehlten. Durch das *Wagnis, ein neues Verfahren einzuführen*, konnten die Investitionen um etwa die Hälfte gesenkt werden, bei Erzeugung einer erstklassigen Stahlqualität.

Seit diesem Zeitpunkt hat sich viel ereignet! Heute ist der Siegeszug des LD-Verfahrens vollendet, d.h. weit mehr als die Hälfte der Weltstahlproduktion von 700 Mio. Tonnen wird über dieses Verfahren erzeugt.

Aus Bild 1 ist ferner ersichtlich, dass die vorgeschichtlichen Metallurgen nicht nur Kupfer und Eisen, sondern auch schon *Bronze* und *Stahl* herstellen konnten. Dies heisst, dass sie empirisch gelernt hatten, ihren Metallen durch *gezielte Einstellung der chemischen Zusammensetzung und Wärmebehandlung* höchst vorteilhafte Eigenschaften zu verleihen. Vor allem wollte man die *Festigkeit* (die Härte, den Widerstand gegen Verformung) *steigern*. Ich bitte die anwesenden Eltern der neuen Doktoren, doch einmal kurz ihren Ehering etwas zu drücken (ein Wunsch, den ich bei der gegenwärtigen Entwicklung der Heiratsgewohnheiten den neuen Doktoren gegenüber auch in zwanzig Jahren kaum mehr äussern könnte). Ihr Ehering ist nicht aus reinem Gold, er hat vielleicht nur 18 oder 14 statt 24 Karat. Dies liegt nicht daran, dass Sie schon immer sparsam waren. Es ist wichtig, ihrem Ehering Legierungselemente zuzusetzen, um seine Härte (seine Festigkeit, seinen Widerstand gegen Verformung) zu steigern, sonst hätte er sich jetzt, da Sie gerade gedrückt haben, verformt. Die moderne Metallforschung hat *etwa sechs verschiedene Mechanismen der Härtesteigerung* entdeckt und erklären können. Das Erstaunliche an diesen neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen ist, dass sie nur erklären, was meist schon in prähistorischen Zeiten technisch genutzt wurde – die Anwendung war zuerst da, die Erklärung dafür kam später (vgl. Tabelle 1). Es wäre sehr reizvoll, die geschichtlichen und psychologischen Quellen der in der Tabelle aufgeführten Entdeckungen und Erkenntnisse zu erforschen. Die Zeit erlaubt uns nicht, dies vollständig zu tun; greifen wir deshalb zwei Beispiele heraus.

Das *Kaltverformen* ist mit Sicherheit der älteste vom Menschen benutzte Mechanismus zur Härtesteigerung der Me-

Mechanismus	Anwendung	Aufklärung
Kaltverformen	≈ 5000 v. (Kalthämmern)	≈ 1934 (Versetzungen) – 1960
Mischkristallbildung	≈ 3200 v. (Arsenbronze)	≈ 1960 (Fremdatome)
Ausscheidungshärtung (Aushärtung)	≈ 1500 v.? (Au-Legierungen?)	≈ 1906 (kleine Teilchen) – 1960 (einer zweiten Phase)
Feinkornhärtung	≈ 1400 v. (Stahl)	≈ 1960 (Korngrenzen)
Ordnungseinstellung	≈ 1500 v. (Au-Ag-Cu)	≈ 1930 (Antiphasengrenzen) – 1960
Strahlenschädigung	≈ 1960 n. (Kernreaktor)	≈ 1970 (Leerstellen, Zwischengitteratome, He-Blasen)

Tabelle 1. Die Festigkeit (Härte, Widerstand gegen bleibende Verformung) eines Metalls kommt dadurch zustande, dass man den Kristallbaufehlern («Versetzungen»), die sich beim Verformen durch den Kristall bewegen, Hindernisse in den Weg stellt. Diese Hindernisse können sein: Andere Versetzungen, gelöste Atome eines anderen Metalls («Fremdatome»), kleinste ausgeschiedene Teilchen, Kristallitgrenzen («Korngrenzen») oder Grenzen der Ordnungsbereiche («Antiphasengrenzen»). Die wesentlichen Mechanismen der Festigkeitssteigerung, die auch heute noch Grundlage unserer Technik sind, wurden schon in prähistorischer Zeit und in der frühen Antike genutzt. Aufgeklärt, verstanden und zielbewusst weiterentwickelt wurden sie jedoch erst in der Mitte unseres Jahrhunderts

talle. Biegen Sie einen weichen *Kupferdraht*, so fällt dies sehr leicht. Biegen Sie ihn wieder zurück, so geht dies schon schwerer: Der Draht hat sich *verfestigt*. Archäologische Funde stützen die einfache Überlegung, dass der prähistorische Mensch gediegen gefundenes Metall schon vor etwa 7000 Jahren durch *Hämmern* kaltverformt und damit verfestigt hat. Die eigentlichen Ursachen für diese oft sehr nützliche Härtesteigerung durch Kaltverformen blieben jedoch bis mindestens 1934 im dunkeln. Damals erkannten *M. Polanyi* und *E. Orowan* in *Berlin-Dahlem*, dass eine noniusartige Kristallgitterstörung, die man «*Versetzung*» nennt, geeignet sei, den Vorgang der plastischen Verformung zu verstehen. Bewegt sich die Versetzung im Kristall, gleitet der Kristall ab. Der Titel jener Arbeit lautete entsprechend «Über eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte». Im gleichen Jahr 1934 veröffentlichte *G.I. Taylor* in *England* seine *Versetzungstheorie*; seitdem kann man die makroskopische Mechanik deformierbarer Körper aus den atomistischen Vorstellungen der Metallforscher verstehen: Soll ein Kristall sich verformen durch Abgleiten, so müssen Versetzungen (linienförmige Kristallbaufehler) sich durch den Kristall bewegen! So wurde das Jahr 1934 zu einer Sternstunde der Metallforschung und der Festkörperphysik. Von dort ab dauerte es wenige Jahrzehnte, bis man alle wesentlichen Mechanismen der Festigkeitssteigerung verstehen und ganz gezielt und erfolgreich ausnutzen konnte: Man brauchte den Versetzungen nur Hindernisse in den Weg zu legen, seien es *andere Versetzungen* (die beim Kaltverformen entstehen), seien es *Fremdatome* (die beim Zulegieren ins Metall kommen), seien es *kleine Teilchen* (die

durch *Ausscheidungsvorgänge in Legierungen* entstehen), seien es Grenzen zwischen den einzelnen Kristallen («*Korngrenzen*») oder Grenzen zwischen Bereichen besonders geordneter Atomlagen («*Antiphasengrenzen*»).

Machen wir uns klar, dass die Quelle all dieser Einsichten die *Idee* der Versetzung war, die unabhängig voneinander Metallforscher in verschiedenen Ländern zur gleichen Zeit hatten. Kein Forschungsantrag und keine Kommission mit ihren Bewertungskriterien hätte diese Idee herbeiführen können. Der Geist weht, wo er will. Schaffen wir ihm Freiräume, auch an unserer Hochschule! Noch jahrzehntelang blieb die Idee der Versetzung in Wissenschaft und Technik fruchtbar, bis man die Gitterstörungen schliesslich sogar im Elektronenmikroskop sichtbar machen konnte und damit ihr wirkliches Vorhandensein beweisen konnte.

Die *Entdeckung der Aushärtung* ist ein zweites lehrreiches Beispiel dafür, wie wesentlicher Fortschritt in Wissenschaft und Technik zustande kommen kann. Wenden wir uns jener Erfindung zu, die zu den *ausgehärteten hochfesten Aluminiumlegierungen* geführt hat, mit denen *moderne Flugzeuge* und die *Leichtbauweise* überhaupt erst möglich geworden sind. Mein eigener Doktorvater schrieb dazu:

«An einem Sonnabend im September des Jahres 1906 liess *Alfred Wilm* kurz vor Arbeitsschluss die Härte einer Aluminiumlegierung mit Zusätzen von Kupfer, Mangan und Magnesium prüfen, unmittelbar nachdem sie von 520° in Wasser abgeschreckt worden war. Als am folgenden Montag eine Kontrollmessung durchgeführt wurde, wurde ein wesentlich höherer Härtewert ermittelt als am Sonnabend. Von diesem Ergebnis überrascht,

verfolgte *Wilm* sorgfältig die Änderung der mechanischen Eigenschaften der abgeschreckten Legierung in Abhängigkeit von der Dauer des Lagerns bei Raumtemperatur und fand so die in der Metallkunde zu grösster Bedeutung gelangte Erscheinung der Aushärtung. Die Legende hat diesem nüchternen Tatbestand eine etwas lebendigere Färbung gegeben. Sie behauptet, Dr. *Wilm* sei ein begeisterter Segler gewesen und habe ein ausgedehntes Wochenende einschliesslich blauem Montag auf dem Wannsee verbracht. Dieser klugen Einstellung dem Leben gegenüber hätte er dann also seinen Erfolg zu verdanken. Es hat hernach noch 14 Jahre gedauert, bis die Konstitutionsbedingung für die Aushärtung von Legierungen erkannt und die erste Deutung der seinerzeit als anomal bewerteten Eigenschaftsänderungen gegeben worden ist. Die Erfindung der aushärtbaren Legierungen ist also an eine ganz zufällige Beobachtung geknüpft, die ohne Kenntnis der inneren Zusammenhänge zur richtigen Angabe der Wärmebehandlungsmaßnahmen geführt hat.»

Dies ist die Art Erkenntnis, die auch unsere prähistorischen Vorfahren genutzt haben und die offensichtlich auch heute noch fruchtbar ist: *Nicht* die Lösung einer gestellten Aufgabe, sondern eine während der Forschung mit anderer Zielrichtung nebenbei bemerkte Erscheinung, die dann aber zielbewusst verfolgt wird. Aber gerade dass sie überhaupt beobachtet und in ihrer Tragweite erkannt wird, macht ihren Pioniercharakter aus. Auch die neuzeitliche Entdeckung der Aushärtung wäre durch Forschungsanträge und Forschungskommissionen nicht herbeiplanbar gewesen, obwohl sie inzwischen nicht nur eine Grundvoraussetzung für den Flugzeugbau und Leichtbau, sondern auch für *thermische Turbomaschinen* wie *Gasturbinen* und weitere *Hochtemperatur-Energieumwandlungsanlagen* geworden ist. Die Lehre, die man daraus ziehen kann, ist, dass es zwar der Forschung auf dem richtigen Fachgebiet und mit sorgfältig ausgebildeten Forschern bedarf, aber diese Forscher brauchen *geistige Freiheit*, und nicht der *einengenden Zielvorgabe*.

Kehren wir noch einmal zu Tabelle 1 zurück. Bei der Anwendung fast aller

Methoden zur Festigkeitssteigerung zeigt sich, dass eine *Zunahme der Festigkeit ein Absinken der Zähigkeit* zur Folge hat; beides zusammen, höchste Festigkeit und höchste Zähigkeit, scheint unerreichbar zu sein. Wir erkennen dies leicht an zwei Extremen:

Diamant und *Glas* oder *Stein* gelten als sehr harte Werkstoffe – aber schlagen Sie mit dem Hammer darauf, so zerbrechen diese; *höchste Härte bringt eben geringste Zähigkeit*. Umgekehrt sind reinste Metalle wie Kupfer, Silber, Gold und Eisen ganz besonders zäh, aber leider eben auch sehr weich. Schlagen Sie mit dem Hammer auf die weichen Metalle, so verformen sie sich, aber Risse bilden sich nicht. Kalthämmern zur bildsamen Formgebung von Metallen ist eine Technik, die der Mensch nach Ausweis der Archäologie seit etwa sieben Jahrtausenden beherrscht.

Überlegen wir uns noch einmal das Problem, dass der Mensch seit Jahrtausenden metallische Werkstoffe zu härten versteht (nach den Verfahren, die in der beigelegten Tafel aufgeführt sind), dass aber leider bei fast jeder dieser Härtungsmassnahmen die Zähigkeit verringert wird. Wir aber wollen beides, Härte und Zähigkeit zugleich: Den «*rocher de bronze*», wo *rocher* für «hart» und *bronze* für «zäh» steht. Stellen Sie sich den Druckbehälter eines Kernkraftwerkes vor. Sie als Öffentlichkeit und wir als Ingenieure sind uns einig in der Forderung, dass der dafür verwendete Stahl sowohl hart und fest als auch zäh sein soll, damit er allen vorhergesehenen und unvorhergesehenen Belastungen formstabil standhalten kann und dennoch keinerlei Risse entwickelt. Dieser Forderung entsprechen die besten technischen Stähle, die heute für solche Druckbehälter verwendet werden. In Bild 2 erkennt man, wie sich die besten der heute technisch verfügbaren Stähle anordnen in bezug auf ihre Festigkeit und Zähigkeit. Wieder erkennen Sie das der Menschheit seit prähistorischen Zeiten bekannte Problem, dass die Zähigkeit sinkt, wenn die Härte steigt. Das Produkt $R_p \cdot K_j$ aus

Widerstand gegen Verformung, R_p und Widerstand gegen Rissbildung, K_j , bleibt etwa konstant. Die Gesamtten-
denz zu ändern haben wir wenig Hoffnung seit alters her, aber den *Gesamtwert* des Produktes, Festigkeit mal Zähigkeit ($R_p \cdot K_j$), des eigentlichen Qualitätsmassstabes wesentlich zu erhöhen, dies haben wir uns im Institut für Metallurgie der ETH Zürich vorgenommen. Hierzu können wir aufbauen auf den Erklärungen der *Verfestigungsmechanismen*, welche die Metallforschung in den ersten zwei Dritteln unseres Jahrhunderts erarbeitet hat, auf der *Elektronenmikroskopie*, die uns zeigt, woher die Keime für Risse kommen, auf den *modernen Stahlherstellungsverfahren*, die einen Teil dieser Risse keime auszuschliessen erlauben, und auf der Bruchmechanik, die die Zähigkeit überhaupt erst quantitativ zu messen erlaubt.

Der *Schweizerische Nationalfonds* unterstützt diese Forschungsarbeiten, und sicher ist Ihnen, verehrte Anwesende, klar, dass ein wesentlicher Teil dieser Unterstützung unseren Doktoranden zufließt. Sehen Sie auf Bild 2, was diese Anstrengungen (in Zusammenarbeit mit Stahlherstellern) in kurzer Zeit schon gebracht haben: Wir haben das Produkt Festigkeit mal Zähigkeit ($K_j \cdot R_p$) gegenüber den besten technischen Stählen schon um die Hälfte von 2×10^5 auf $3 \times 10^5 \text{ MN}^2 \cdot \text{m}^{-7/2}$ verbessern können. Die Quellen dieses jüngsten Fortschrittes sind nicht mehr reine Empirie, wie in prähistorischen Zeiten, sondern konsequente Nutzung aller bisher gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse und der modernsten Methoden der Metallurgie, der Metallkunde und der *Bruchmechanik*. Zurzeit befassen wir uns mit der Frage, wo die obersten theoretischen Grenzen für diese Entwicklung liegen. Bis wir dies wissen und erreichen, wird noch manchem jungen Forscher, der auf diesem Gebiet arbeitet, zu seinem Dokortitel zu gratulieren sein.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *M. Speidel*, Institut für Metallurgie, Maschinenlabor, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.