Zeitschrift: Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG

Herausgeber: Eisenbibliothek

Band: 81 (2009)

Artikel: 150 Jahre Werkzeugstahl : ein Werkstoff mit Zukunft. Prozess- und legierungstechnische Entwicklung bei der (Werkzeug-)Stahlerzeugung

Autor: Ernst, Claudia

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-378458

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

150 Jahre Werkzeugstahl – Ein Werkstoff mit Zukunft. Prozess- und legierungstechnische Entwicklung bei der (Werkzeug-)Stahlerzeugung

Dr.-Ing. Claudia Ernst
Geboren 1963 in Gelsenkirchen. Studium des Allgemeinen Maschinenbaus mit Abschluss zum Dipl.-Ing. an der Ruhr-Universität Bochum. 1990 bis 1994 Qualitätsstellenmitarbeiterin bei der Thyssen Edelstahlwerke GmbH. Ab 1995 Sachgebietsleiterin in der Forschung Werkzeugstahl, Edelstahl Witten-Krefeld GmbH, und nebenberufliche Promotion im Fach Werkstofftechnik. Seit 2003 Leiterin der Entwicklung, Deutsche Edelstahlwerke GmbH, mit Arbeitsschwerpunkten in der Legierungsentwicklung, Simulationstechnik und im Patentwesen. Nebenberufliche Lehraufträge an der Technischen Fachhochschule Bochum, Fachbereich Maschinen- und Verfahrenstechnik. Publikationen zu legierten Edelstählen, insbesondere Werkzeugstählen, Wärmebehandlung, Oberflächentechnik.

Cand. Ing. Patrick Fayek
Geboren 1984 in Essen. Seit 2003 Studium der Metallurgie und Werkstofftechnik an der RWTH Aachen.

Bild 1: Luftbild des Gussstahlwerkes Witten um 1928. (Foto: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

Die Verarbeitung von Eisen und die Herstellung von Werkzeugen für den Gebrauch im Haushalt, in der Landwirtschaft, im Kampf sowie im Handwerk waren bereits in den vorchristlichen Jahrhunderten bekannt. Die sich bis zur Neuzeit entwickelnden ersten Werkzeugstähle, welche zur Herstellung von Handwerkzeugen mit ausreichend hoher Härte geeignet waren, bestanden im Wesentlichen aus Eisen mit variierendem Kohlenstoffgehalt. Ausgelöst durch die zunehmende Industrialisierung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, wurden nachfolgend massgebliche Entwicklungen in der Prozess- und Legierungstechnik betrieben, um Stähle mit verbesserten Werkstoffeigenschaften zur Benutzung in Werkzeugmaschinen herstellen zu können. Heute zählen die Werkzeugstähle zur Gruppe der Edelstähle, deren besonderer Reinheitsgrad und hohe Gleichmässigkeit der Werkstoffeigenschaften durch spezielle Verfahren in der Erschmelzung, Formgebung und Wärmebehandlung eingestellt werden, um höchste Anforderungen im modernen Werkzeugbau zu erfüllen. Der Weg dorthin wird im Folgenden aus allgemeiner Sicht, aber auch aus spezieller Sicht eines industriellen Werkzeugstahlherstellers mit über 150-jähriger Firmengeschichte, der Deutschen Edelstahlwerke GmbH, beschrieben.

Ironworking and the manufacture of tools for household use, farming, war and artisan trade were widespread already in pre-Christian centuries. The first tool steels developed prior to the modern era, which were hard enough for the manufacture of hand tools, consisted mainly of iron with varying carbon content. Triggered by the increasing industrialisation in the second half of the 19th century, there followed significant developments in process and alloy technology in order to produce steels with improved material properties for use in machine tools. Today, tool steels belong to the group of special steels whose particular purity grade and highly consistent material properties are adapted in special melting, shaping and heat treatment processes so as to satisfy the highest standards of modern toolmaking. This journey is described in the following, both from a general point of view and from the unique perspective of Deutsche Edelstahlwerke GmbH, an industrial tool steel manufacturer with a 150-year history.

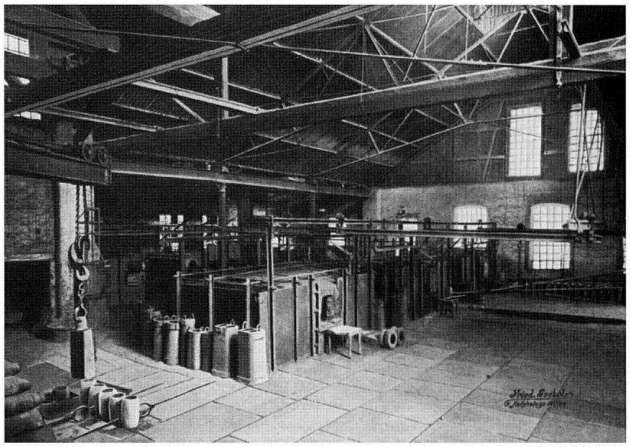


Bild 2: Tiegelstahlwerk der Firma Berger & Co in Witten um 1880. (Foto: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

Vom Blasen- zum Tiegel- und Puddelstahl, Prozesstechnik ab 1740

Viele der bereits früh in der Menschheitsgeschichte hergestellten Handwerkzeuge waren schneidende Werkzeuge wie Messer, Äxte, Meissel, Pflüge und Schwerter. Es liegt daher nahe, die Zeitreise durch die Geschichte des Werkzeugstahles in der im 18. Jahrhundert europaweit als Messerstadt bekannten Stadt Sheffield in England zu beginnen. Stahl war vor 1740 sogenannter Zement- bzw. Blasenstahl. Zu seiner Erzeugung wurde Stabeisen in einen Tonkasten oder eine Grube gegeben, wobei es allseitig mit Zementiermittel, grob gepulverter Kohle und Asche, umgeben und nachfolgend gebrannt wurde. Je nach Grösse der Kästen und der Stabeisenmenge dauerte der Vorgang vier bis zwölf Tage. Sowohl die geringe Menge pro Zementierung als auch der hohe Zeitaufwand führte dazu, dass die Jahresproduktion in Sheffield um 1740 lediglich bei etwa 200 t lag. Dies entspricht heute der Schmelzleistung, die ein moderner Elektrostahlofen in etwa 2,5 h erbringt. Der aufwendige, teure Vorgang brachte keineswegs immer zufriedenstellendes Material, denn der Erfolg des Unterfangens war hauptsächlich von der Erfahrung der Brennmeister abhängig. Da darüber hinaus nur einige Kontrollstäbe zur Prozessführung zur Verfügung standen, war die Qualität des Stahls starken Schwankungen unterworfen.

Auch der «erste Pionier» des Werkzeugstahles, Benjamin Huntsman (*1704, †1776), war mit der Qualität des Zementstahls unzufrieden. Huntsman stammte aus Lincolnshire und betätigte sich als Uhrmacher, Wund- und Augenarzt. Zur Herstellung von Uhrenpendeln, Federn sowie medizinischen Werkzeugen benötigte er Stähle höherer Qualität, Reinheit und Härte als die Zementstähle es boten. Dieses drängende Bedürfnis hatte bei ihm als Stahlanwender den Erfindergeist geweckt und ihn dazu bewegt, sich intensiv mit der Stahlerzeugung auseinanderzusetzen. Aus seiner Idee heraus, den Stahl einer Umschmelzung zu unterziehen, entwickelte er das Tiegelstahlverfahren. Genauer gesagt entdeckte Huntsman das Verfahren nur wieder, da es bereits im alten China und angeblich auch in Indien schon früh verwendet wurde, aber wieder in Vergessenheit geriet.

Huntsman begann seine Versuche in den 40er Jahren des 18. Jahrhunderts, wobei er sich einfacher Mittel wie Tiegeln aus feuerfestem Material und koksbeheizter Windöfen bediente. Zudem benutzte er gemahlenes grünes Glas, welches zur Schlackenbildung auf die Schmelze gegeben wurde, um Verunreinigungen abzutrennen. Bereits um 1740 musste Huntsman mit seinem Verfahren Erfolge erzielt haben, da er nach Handsworth bei Sheffield umsiedelte. Am Hauptsitz der englischen Stahlindustrie waren die zur Tiegelstahlerzeugung notwendigen Rohstoffe einfach zu bekommen, zudem waren die Absatzmöglichkeiten durch die dort heimische Messerfabrikation besser. Seine Entwicklung lockte, obwohl er um Geheimhaltung bemüht war, immer wieder Konkurrenten an, die hinter das Geheimnis des Tiegelstahls blicken wollten. So wird von einem Vorfall berichtet, bei dem der Hüttenbesitzer und Konkurrent Samuel Walker Huntsmans Werk ausspäht:

«Dieser soll sich als Bettler verkleidet in einer kalten Winternacht in Huntsmans Fabrik eingeschlichen und die bei der Nacht durchgeführten Schmelzungen beobachtet haben.»

Es wird weiter berichtet, dass Walker drei Monate nach diesem Vorfall in seinem Werk in Grenoside selber Tiegelstahl herstellte. Solche und andere Vorfälle, die als frühe Formen der Werksspionage betrachtet werden können, führten nach und nach zur Verbreitung des Tiegelstahlverfahrens in England. Trotzdem waren die Bemühungen um Geheimhaltung nicht ohne Erfolg und werden als ein Grund für die Schwierigkeiten sowie die Verzögerung bei der Einführung des Verfahrens auf dem Festland angesehen. Bereits vor 1740 galt Sheffield als Hauptsitz der englischen Stahlindustrie; diese Position wurde nach der Einführung des Tiegelstahlverfahrens bis etwa 1880 gestärkt.

Eine sich zeitlich anschliessende Neuerung war das von Henry Cort (*1740, †1800) entwickelte Puddelverfahren, für welches er 1783/84 Patente beantragte. Ein Vorteil bestand in der Verwendung von Steinkohle zur Umwandlung des Roheisens in schmiedbaren Stahl, da die Schmelze im Flammofen nicht in direktem Kontakt mit dem schwefelhaltigen Brennstoff stand. Nachteilig war, dass das flüssige Roheisen zum Frischen ständig gerührt und warmgehalten werden musste, was es zu einem kraft- und energieaufwendigen Verfahren machte. Nach dem Puddeln wurden einzelne Luppen abgezogen und gegebenenfalls noch einmal in einem Schweissofen erhitzt. Anschliessend konnten diese dann umgeformt werden. Trotz seines hohen Aufwandes erlangte das Puddelverfahren grosse technische Bedeutung in England. So wurden dort 1860 etwa 2700 Puddelöfen mit einer Jahresproduktion

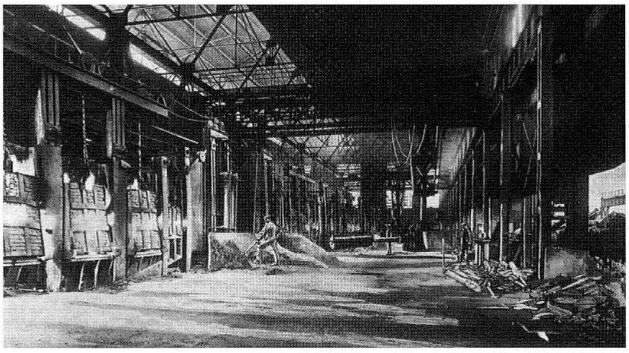


Bild 3: Siemens-Martin-Stahlwerk im Gussstahlwerk Witten um 1913. (Foto: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

von 3,3 Mio. t umformfähigem Eisen betrieben. Wie auch das Tiegelstahlverfahren konnte das Puddelverfahren lange geheim gehalten werden und wurde erst mit etwa 40-jähriger Verspätung auf dem Festland eingeführt.

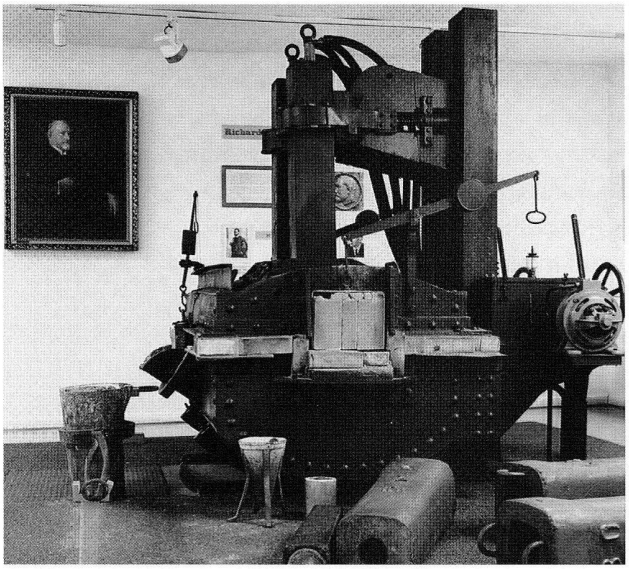


Bild 4: Elektrostahlofen aus dem Stahlwerk Lindenberg 1906. (Foto: Uebbing, H., Wege und Wegmarken, Berlin 1991)

Vom Bessemerverfahren zum Elektrostahl, Fortschritte seit 1850

Die nächste prozesstechnische Weiterentwicklung hinsichtlich der herstellbaren Stahlmengen stellt das 1855 von Henry Bessemer entwickelte Verfahren gleichen Namens dar. Triebfeder für die Erfindung war der Krimkrieg, welcher seine Aufmerksamkeit auf die Militärtechnik lenkte, die nach festeren Werkstoffen für leistungsfähige Geschütze verlangte. Bessemer beobachtete, wie im Frischwind eines Flammofens Roheisenteile in Stahl verwandelt wurden. Daraufhin machte er Versuche, bei denen er Luft durch die Schmelze blies und feststellte, dass das Eisen nicht nur entkohlt wurde, sondern sich darüber hinaus auch die Temperatur der Schmelze erhöhte. Der Vollständigkeit halber muss erwähnt werden, dass es nicht völlig neu war, Medien in die Schmelze einzublasen. Bereits einige Jahre zuvor wurden von Charles Louis Gustave Eck Versuche durchgeführt, Wasserdampf durch die Schmelze zu blasen. Ihm gelang es zwar, aus grauem Eisen weisses zu erblasen und gutes Stabeisen zu erzeugen, jedoch nicht die Entkohlung bis in den Bereich der Stähle hinein.

Bessemers Erfindung erhielt grosse Aufmerksamkeit, da sie ermöglichte, innerhalb kürzester Zeit aus Roheisen schmiedbares Eisen oder Gusseisen herzustellen. Erste Rückschläge durch Verwendung von in Puddelöfen erschmolzenem Roheisen, welches noch einen hohen Anteil an Schlacke und 1,9 % Phosphor enthielt, wodurch das erblasene Eisen zwar entkohlt, jedoch grobkristallin, blasig, rot- und kaltbrüchig wurde, wurden mit Hilfe des Schwedens Göransson überwunden, worauf ab 1859 Bessemer-Stahlwerke in Sheffield sowie in Sandviken (Schweden) gegründet wurden. Bereits 1860 arbeiteten 40 Unternehmen weltweit mit dem Verfahren. In Deutschland wurde es 1862 durch Friedrich Krupp eingeführt, der das erste Bessemerstahlwerk an der Ruhr baute. Aufgrund basischer Auskleidung der Bessemerbirnen durch Sidney Gilchrist Thomas konnten ab 1878 auch Erze mit hohem Phosphorgehalt verarbeitet werden, sodass das Verfahren bald mit dem Begriff «grosstechnische Massenstahlherstellung» verbunden war.

Aus geschichtlicher Sicht nahezu zeitgleich mit dem Bessemer- wurde das Siemens-Martin-Verfahren (SM) entwickelt. Emile und Pierre Martin bauten zusammen mit den deutschen Brüdern Friedrich und Wilhelm Siemens 1864 einen Schmelzofen, in dem unterschiedliche Anteile an Schrott neben Roheisen chargiert werden konnten. Sie verwandten zum Beheizen die sogenannte Regenerativfeuerung, bei der die Wärme der Abgase zum Vorheizen der zulaufenden Gasströme genutzt wurde, wodurch die zum Erschmelzen notwendigen hohen Temperaturen einfach und kontinuierlich gehalten werden konnten. Auch das SM-Verfahren fand schnell grosstechnische Anwendung. Bereits 1869 erwarb Friedrich Krupp eine Lizenz zum Bau eines SM-Ofens. Wie auch zuvor bei der Einführung des Bessemerverfahrens war dieser kruppsche Ofen der erste seiner Art in Deutschland. Ziel des Verfahrens war es, qualitativ hochwertige Stähle zu erzeugen.

Das SM-Verfahren wurde zunächst hauptsächlich in Europa, in den USA und in Japan angewandt und blieb lange das beherrschende Verfahren zum Erschmelzen von Stahl. Tiegelstahl und Puddelstahl wurden bis 1900 weitgehend ver-

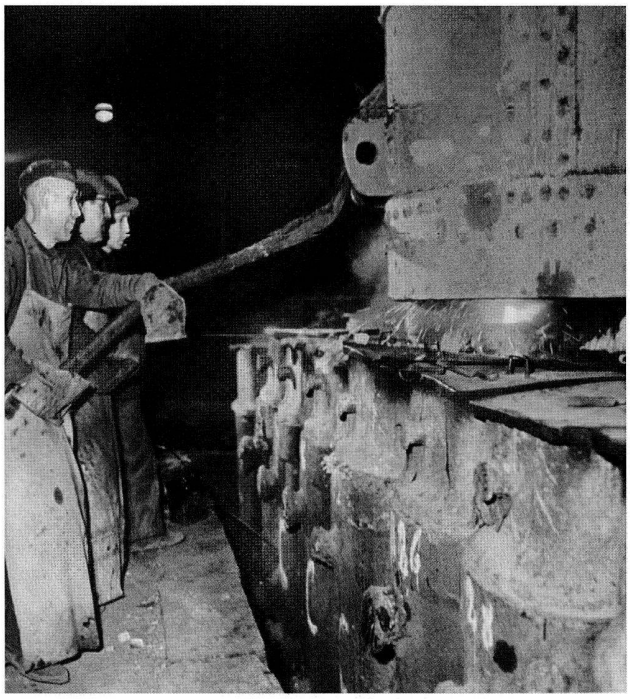


Bild 5: Blockguss im Elektrostahlwerk Witten um 1940. (Foto: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

Bild 6: Zeitstrahl der produktionstechnischen Entwicklung, allgemein und speziell.

drängt. Die Siemens-Martin-Werke wiederum bekamen Anfang des 20. Jahrhunderts Konkurrenz durch das von Paul-Louis Heróult entwickelte Elektrostahlverfahren, bei dem Elektroden aus Graphit, durch die Strom geleitet wurde, in ein Ofengefäss eintauchten. Der Strom sprang von den Elektroden auf die chargierten Rohstoffe über und erzeugte so einen Lichtbogen, der durch hohe Temperaturen die Rohstoffe zum Schmelzen brachte. Der erste brauchbare Elektrolichtbogenofen mit einem Fassungsvermögen von 1500 kg wurde 1906 von Richard Lindenberg im Edelstahlwerk Lindenberg in Remscheid in Betrieb genommen, jedoch setzte sich das Verfahren aufgrund des hohen Energieverbrauches langsam und vorwiegend zur Herstellung von hochwertigen Qualitätsstählen durch. Mit dem Elektrostahlverfahren war aber schlussendlich die prozesstechnische Grundlage zur Werkzeugstahlherstellung geschaffen worden, auf der auch die heutige Fertigung noch basiert. Moderne heutige Elektrostahlöfen, die zur Werkzeugstahlproduktion eingesetzt werden, haben ein Fassungsvermögen von mehr als 100 t und eine Schmelzleistung von ca. 80 t/h. Zu den weiteren grundlegenden Verfahrensergänzungen, die massgeblich zur Verbesserung der Qualität der im Elektroofen produzierten Stähle beitrugen und eng mit der Herstellung von Werkzeugstahl verbunden waren, zählten nachfolgend das Elektroschlackeumschmelzen (ESU) um 1960 und das Vakuumumschmelzen (VU) um 1970. Beide dienten dazu, im Rahmen eines Umschmelzvorganges beim Durchlaufen eines Schlackenbades bzw. beim Umtropfen im Vakuum unerwünschte Begleitelemente aus dem Stahl zu entfernen sowie für eine hohe Homogenität in der Verteilung von Legierungselementen und eine hohe Isotropie der Werkstoffeigenschaften zu sorgen.

Prozesstechnik aus Sicht eines Werkzeugstahlherstellers

Die Verbreitung der bisher beschriebenen Verfahren ist aus allgemeiner Sicht sowie speziell am Beispiel eines Werkzeugstahlherstellers mit über 150-jähriger Tradition, der Deutschen Edelstahlwerke GmbH, in einem Zeitstrahl übersichtlich anhand ausgewählter Meilensteine zusammengefasst. Die Geschichte der Firma erstreckt sich über mehrere Epochen der technikgeschichtlichen Entwicklung und basiert auf vier Wurzeln: der Firma Berger & Co. in Witten (gegr. 1854), der Krefelder Stahlwerk AG (gegr. 1900), der Firma Dresler oHG in Siegen-Geisweid (gegr. 1846) und der Firma Asbeck, Osthaus & Co in Hagen (gegr. 1853). An allen Standorten gleichermassen reagierte man schnell und mit grossem Elan auf prozesstechnische Weiterentwicklungen und versuchte diese schon bald in die eigene Produktion zu integrieren. Da man sowohl Werkzeugstähle als auch Konstruktionsstähle (Baustähle) herstellen wollte, hatte man dabei sowohl ein Auge auf die Herstellungsverfahren für Qualitätsstähle als auch für Massenstähle.

Der «Urvater» der Deutschen Edelstahlwerke GmbH, Carl Berger, setzte mit dem Tiegelstahlverfahren bereits frühzeitig auf die richtige Technik. Nach Versuchen mit einem Schachtofen im Keller seines Wohnhauses stellte er den Antrag zur Errichtung des «Etablissement Berger & Co für die Herstel-

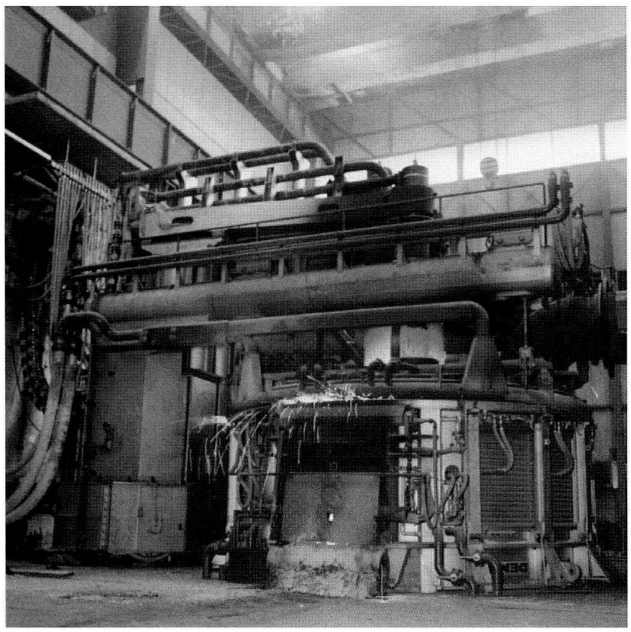


Bild 7: Einschmelzprozess im Elektrolichtbogenofen mit wassergekühlten Rohrwandelementen. (Foto: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

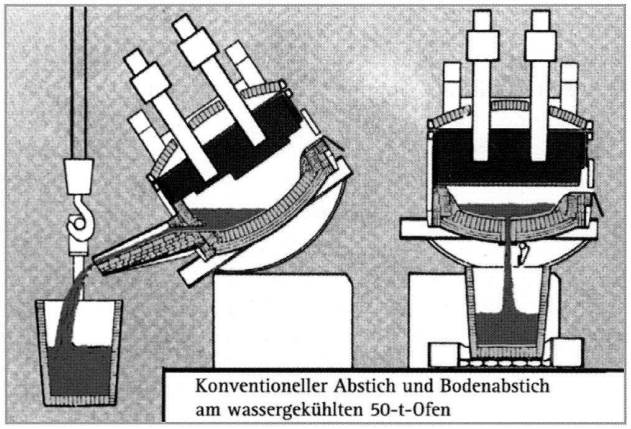


Bild 8a: Schema eines Elektrostahlofens mit konventionellem bzw. mit Bodenabstich. (Grafik: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

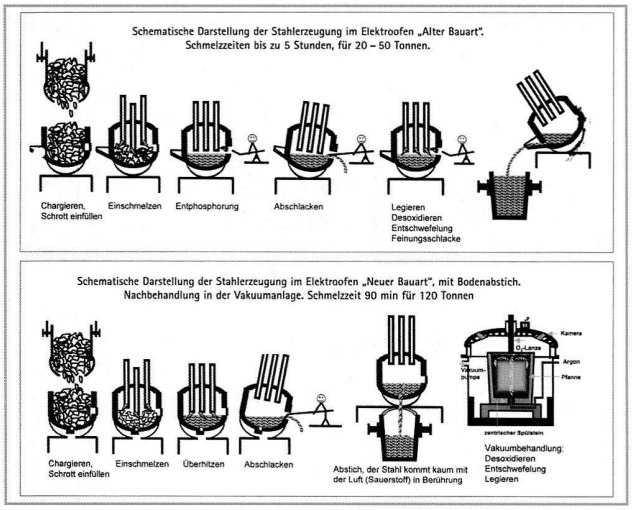


Bild 8b: Schema eines Elektrostahlofens mit konventionellem bzw. mit Bodenabstich. (Grafik: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

lung von Stählen für Werkzeuge und Gewehrläufe», wobei er zunächst die Errichtung von vier Zementöfen plante. Den Antrag änderte er jedoch schnell mit nachstehender Begründung aus qualitativen Gründen ab und setzte auf 10 kleine Tiegelöfen zur Versorgung des Hammer- und Walzwerkes:

«Als ich jene Konzession nachsuchte, hatte ich noch die Absicht, den Gussstahl in gewöhnlicher Weise, d.h. aus vorher zementiertem Stabeisen, herzustellen. Jetzt aber habe ich eine andere Verfahrensweise entdeckt und bedarf nunmehr kein zementiertes Eisen mehr. Es werden dadurch die drei Zementöfen (...) überflüssig, auf deren Herstellung ich nunmehr verzichte.»

Auch die vier Gründer des Krefelder Stahlwerkes (Burgers, Klöckner, Spaeter, Thyssen) hatten nach ersten Ideen für ein integriertes Hüttenwerk ihre Pläne geändert, um ein Werk zur «Herstellung von Stahl jeder Art, speziell zur Herstellung erstklassiger Werkzeugstähle und Constructionsbauteile» zu gründen. 1901 lief das Werk mit einem Tiegelstahl- und einem SM-Stahlwerk an, um schon bald (1916) kapazitiv im Bereich der SM-Öfen sowie durch Errichtung zweier Elektroöfen mit je 8 t Fassungsvermögen erweitert zu werden. Dieses Stahlwerk diente in erster Linie zur Erzeugung von hochlegierten Stählen wie Schnelldreh-, Nickel-, Einsatz- und Kugellagerstählen.

Im Laufe der Geschichte der einzelnen Werke und nach diversen Zusammenschlüssen, Namens- und Eigentümeränderungen, die 2007 in der Fusion zu der Deutschen Edelstahlwerke GmbH mündeten, wurde die Entwicklung der Prozesstechnik zur Herstellung hochqualitativer Stähle auch vor Ort massgeblich weitergetrieben und durch eigene Patente dokumentiert. Dazu zählte u.a. 1967 die Einführung des Wittener LD-Vac-Verfahrens, bei dem man Stahl unter Vakuum Sauerstoff aufblies, um den Kohlenstoff zu reduzieren. 1973 wurde ebenfalls in Witten der zentrische Bodenabstich für den 110-t-Elektroofen entwickelt, wodurch der Stahl beim Abstich Schutz vor dem Luftsauerstoff erfuhr, die aufschwimmende Schlacke gezielt zurückgehalten werden konnte und zudem die Verwendung von wassergekühlten Rohrwandelementen

am Ofengefäss möglich wurde, was die Leistung des Aggregates steigerte. Es gelang somit aus qualitativer Sicht, Makro- und Mikroreinheitsgrad der erzeugten Stähle zu verbessern und die Effektivität des Aggregates aus quantitativer Sicht zu steigern. Um das bis dahin praktizierte kostenintensive Abgiessen der produzierten Stähle im Blockgussverfahren teilweise zu ersetzen, wurde bis zum Jahr 1993 zunächst in einer Pilotanlage in Witten das vertikale Stranggiessen für legierte Edelstähle aus prozesstechnischer Sicht erforscht, was schlussendlich in der Inbetriebnahme einer Produktionsanlage mit zwei Strängen (Querschnitt 475 x 340 mm²) führte. Auf dieser Anlage werden bis heute hochlegierte Werkzeugstähle effizient und mit guter Qualität vergossen.

Legierungsentwicklung –
Stand der Technik bei der Legierungsentwicklung bis 1800

Neben der Prozesstechnik war die Legierungsentwicklung ein weiterer Aspekt von grosser Bedeutung in der Geschichte der Eisen- und Stahlerzeugung. Zwar verlief sie weitestgehend parallel zur prozesstechnischen Entwicklung, allerdings wurde die legierungstechnische Forschung erst ab der Herstellung der Massenstähle und dem Aufschwung des Maschinenbaus in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bedeutsam. In dieser Zeit kehrten sich auch die Rollen dieser beiden Entwicklungen um.

Legiertes Eisen wurde zunächst zufällig und ungezielt verwendet. Erste «legierte» Stähle lassen sich anhand einiger Funde jedoch schon frühzeitig nachweisen. Einer der wohl ältesten Funde ist das Bruchstück eines eisernen Werkzeuges, welches 1837 in einer Spalte der Cheopspyramide gefunden wurde und einige Prozent Nickel aufwies. Ein weiteres Beispiel stellt der Damaszenerstahl von Toledo dar, in welchem gewisse Gehalte an Wolfram, Nickel und Mangan nachgewiesen werden konnten. Zwar dürfte es sich im ersten Fall um ein Material meteorischen Ursprungs gehandelt haben und im zweiten um eine zufällige Legierung, die aus der Zusammensetzung der Erze resultierte, aber es zeigt, dass die herausragenden Eigenschaften solcher Werkstoffe früh erkannt und für die Nutzung zugänglich gemacht wurden. Die Unkenntnis über die Zusammensetzung verhinderte also offensichtlich nicht die Herstellung solcher Werkzeuge. Zudem unterstreicht es, dass leistungsfähige Werkzeuge für den Menschen schon früh von grosser Bedeutung waren. Legierungsentwicklung bedeutete also zunächst Auswahl von Materialien, die aufgrund ihrer Eigenschaften geeignet erscheinen.

In der Entwicklung der Stahlerzeugung vor 1800 war die Legierungstechnik zunächst unbedeutend und durch spärliche Kenntnis der theoretischen Grundlagen, was sowohl die Erzeugung als auch das Metall als solches betrifft, geprägt. Viele der für das Eisen bedeutenden Legierungselemente waren nicht bekannt, und auch die Möglichkeit der chemischen Analyse bestand noch nicht. Die Erfindung des Tiegelstahls um 1740 durch Huntsman kann in gewisser Weise nicht nur als Meilenstein in der Metallurgie, sondern auch als Markstein unter dem Gesichtspunkt der Legierungsentwicklung betrachtet werden. Die Verbesserung der Eigenschaften wurde hierbei unter anderem durch das Entfernen von Begleitelementen, die den Eigenschaften des Eisens abträglich waren, sowie ein teilweises Entkohlen erreicht. Zufriedenstellende Erklärungen für die Eigenschaftsverbesserung aus wissenschaftlicher Sicht waren jedoch noch nicht möglich.

Im Folgenden nahmen die Forschungsarbeiten in der anorganischen Chemie zu und führten zunächst zu falschen Deutungen. 1777 entdeckte Lavoisier den Sauerstoff und beschrieb den Vorgang der Verbrennung richtig, wobei der Irrtum auftrat, dass der Sauerstoff das für die Eigenschaften des Eisens massgebliche Element sei. Dieser Irrtum wurde durch die Entdeckung von Karl Johann Karsten 1816 ausgeräumt, welcher dem Kohlenstoff diese Rolle zusprach. Ebenso führte er die Eigenschaften von Eisen, Roheisen und Stahl auf den unterschiedlich hohen Kohlenstoffgehalt zurück und stellte auch den Unterschied zwischen gebundenem und ungebundenem Kohlenstoff heraus. Die erste korrekte Beschreibung der Reduktion des Eisens mit Kohle erfolgte im Jahr 1800 durch den Chemiker Erich Gustaf Lidbeck. Damit schienen alle Grundlagen für eine beginnende Legierungsforschung gelegt. Bemerkenswert war auch, dass vor 1800 nahezu alle wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Hüttenkunde auf dem europäischen Festland gemacht wurden, wogegen die praktischen metallurgischen Prozessentwicklungen sich vorwiegend durch Empirie in England vollzogen hatten.

Entdeckung von Legierungs- und Begleitelementen um 1850

Die ersten Versuche, die Eigenschaften des Eisens durch Legieren mit anderen Elementen bzw. Entfernen von schädlichen Elementen zu verbessern, fallen in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts bis zur Jahrhundertwende. Die meisten Metalle waren bis zu diesem Zeitpunkt auch bereits bekannt. Zu Anfang des 19. Jahrhunderts waren sich die Hüttenleute durchaus über den schädlichen Einfluss der Elemente Schwefel, Phosphor, Wismut, Arsen und Antimon bewusst. Ebenso hütete man sich beim Frischen vor der Zugabe zinnhaltiger Blechschnitzel. Interessant ist, dass in einem von Jean Henri Hassenfratz 1812 verfassten Werk über die Hüttenkunde bereits der positive Einfluss des Kobalts auf die Schmiede- und Schweisseigenschaften genannt wurde. Auch die vorteilhafte Wirkung der Elemente Titan, Chrom und Wolfram waren bekannt, wenn auch wahrscheinlich ist, dass die Mechanismen dahinter noch nicht vollständig verstanden wurden.

Umfangreichere Untersuchungen zum Einfluss der jeweiligen Elemente auf die Eigenschaften des Stahles erfolgten zwischen 1800 und 1850. Dabei sind James Stoddart und Mi-

Härte-grad	Anwendung	Sheffielder Bezeichnung	C-Gehalt [Mass.-%]
1	Rasiermesserstahl	razor temper	1,500
2	Sägefeilenstahl	saw-file temper	1,375
3	Drehstahl	tool temper	1,250
4	Spindelstahl	spindle temper	1,125
5	Meisselstahl	chisel temper	1,000
6	Setzmeisselstahl	set temper	0,875
7	Matrizenstahl	die temper	0,750

Bild 9: Einteilung der unlegierten Werkzeugstähle nach dem Kohlenstoffgehalt. (Tabelle: Taylor, W., Über Dreharbeit und Werkzeugstähle, Berlin 1908)

chael Faraday zu nennen, die Legierungsversuche mit Nickel, Platin, Rhodium, Gold, Silber und Zinn durchführten und angeblich einen ausgezeichneten Stahl mit 2 % Silber herstellten. Von Pierre Berthier wurden 1821 die vorzüglichen Eigenschaften der Chromstähle herausgestellt. Die Versuche waren grundsätzlicher Natur, was sich auch darin zeigt, dass sie teilweise etwas planlos erscheinen, wie das nachfolgende Beispiel zeigt. Jöns Jakob Berzelius legierte 1829 einen «Meteorstahl» mit Zink, Nickel, Zinn und Chrom, also mit Elementen, die teilweise stark gegensätzliche Wirkung haben. Obwohl einige Ansätze gute Ergebnisse brachten, lässt sich keinerlei Bestrebung erkennen, vielversprechende Stähle in einem industriellen Rahmen zu erzeugen, was wohl auch an der noch fehlenden Prozesstechnik lag. Sämtliche Legierungen verschwanden zu jener Zeit, um ein halbes Jahrhundert später, als neue Untersuchungsmethoden zur Verfügung standen, wieder aufgegriffen zu werden. Diese neuen Methoden waren chemische und metallographische Untersuchungsverfahren, die gegen Mitte des 19. Jahrhunderts eingeführt wurden. Bei der Metallographie sind insbesondere die Namenspatrone des Martensits und des Sorbits, Adolf Martens und Henry Clifton Sorby, zu nennen, und im Bereich der chemischen Analyse tat sich Justus von Liebig durch die Erfindung seines sogenannten Verbrennungsapparates hervor. Dieser erwies sich als ausgezeichneter Apparat für die wissenschaftliche Metallurgie.

Stand der Technik bei den Stahllegierungen war somit bis zum Jahr 1850, dass zwar schädliche und nützliche Elemente bekannt waren, Letztere jedoch grosstechnisch noch nicht eingesetzt wurden. Werkzeugstähle waren bis zu diesem Zeitpunkt unlegierte Stähle aus Eisen und Kohlenstoff, die wie im Beispiel der Sheffielder Erzeugung nach ihrem Kohlenstoffgehalt eingeteilt wurden. Da noch keine chemischen Analyseverfahren zur Verfügung standen, erfolgte eine grobe Zuordnung anhand der Bruchflächen von gehärteten Proben. Hierbei wurde lediglich der Anteil an glänzenden Gefügeanteilen in der Bruchfläche abgeschätzt und einem entsprechenden Kohlenstoffgehalt zugeordnet.

Bezeichnung	Zusammensetzung in Mass.%						Schnittgeschwindigkeit bei mittelweichem Stahl [m/min]
	C	Mn	Si	Cr	W	V	
Jessop unlegierter Stahl	1,05	0,19	0,21	0,21	ohne	ohne	4,88
Mushet naturharter Stahl	2,15	0,58	1,04	0,40	5,44	ohne	7,92
Taylor-White, Schnelldrehstahl original	1,85	0,30	0,15	7,80	8,00	ohne	18,00
Taylor-White, Schnelldrehstahl 1906	0,67	0,11	0,04	5,47	18,91	0,29	30,20

Bild 10: Vier Zeitabschnitte bei den Werkzeugstählen. (Tabelle: Taylor, W., Über Dreharbeit und Werkzeugstähle, Berlin 1908)

Erste grosstechnische Nutzung von Legierungselementen: selbsthärtende Wolframstähle und Schnelldrehstähle mit Wolfram, Chrom und Vanadium

Mit der Erfindung des Bessemerverfahrens 1856 wurde es möglich, auf einem relativ hohen Niveau Massenstähle zu erzeugen. Die neuen Stähle waren ein grosser Impuls für den Maschinenbau, der in der Folge eine bemerkenswerte Entwicklung nahm. Zwar reichte die im Bessemerverfahren hergestellte Qualität aus, diese Entwicklung auszulösen, jedoch verlangten die grossen Stahlmengen nach leistungsfähigeren Werkzeugstählen, als die Eisen-Kohlenstoff-Stähle es waren, um diese mechanisch bearbeiten zu können.

Erste Erfolge in der Legierungstechnik wurden von Robert Mushet mit einem 5-%-Wolframstahl erzielt, auf den er 1861 ein Patent anmeldete. Dieser Stahl stellte in zweierlei Hinsicht einen Meilenstein bei den Werkzeugstählen dar. Einerseits wurde die mögliche Schnittgeschwindigkeit beträchtlich erhöht, andererseits wurde der Stahl zum Härten nicht mehr mit Wasser abgelöscht, sondern nach Rotglut nur an Luft abgekühlt. Trotz dieser Vorteile und dem bestehenden Bedarf nach leistungsfähigeren Werkzeugen setzte sich der «Selbsthärter» nicht durch. Die schlechte Schmiedbarkeit und auch der hohe Preis dürften eine weitreichende Einführung dieser Stähle verhindert haben. Zudem blieb der Stahl aufgrund der nicht angepassten Wärmebehandlung hinter seinen Möglichkeiten zurück.

Durch die Einführung des Bessemerverfahrens in den USA hatte die Stahlindustrie auch dort einen ungeheuren Aufschwung genommen. Um die riesigen Mengen an erzeugten

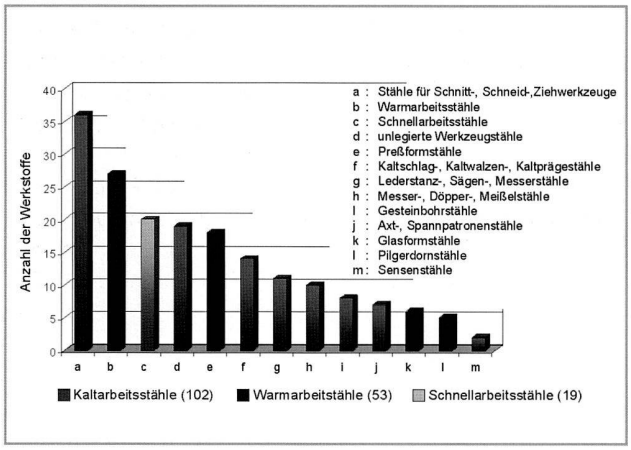


Bild 11: Sortenvielfalt bei den Werkzeugstählen im Gussstahlwerk Witten 1963.

Stahl- und Eisenprodukten wirtschaftlicher bearbeiten zu können, wurde der Druck auf die Entwickler, leitungsfähigere Werkzeuge bereitzustellen, immer grösser. Der bei den Bethlehem-Stahlwerken angestellte Wissenschaftler Frederick Winslow Taylor beobachtete, dass die Eigenschaften von Werkzeugstählen eine starke Abhängigkeit von der Härtetemperatur aufwiesen, woraufhin Versuche mit schrittweiser Variation der Härtetemperatur durchgeführt wurden. Die Ergebnisse waren bahnbrechend. Taylor stellte 1898 fest, dass die Werkzeugeigenschaften beim Härten von bestimmten, sehr hohen Temperaturen ein Maximum aufwiesen. Verloren die früheren Werkzeugstähle während des Betriebs bei zu hohen Erwärmungen (>200 °C) jegliche Schneideigenschaften, so behielten die nach Taylor gehärteten Werkzeuge ihre Schneideigenschaften bis zur Rotglut. Die Ergebnisse wurden mit grossem Erfolg der Öffentlichkeit auf der Weltausstellung 1900 in Paris vorgestellt. Durch die neuen Werkzeuge wurden erhöhte Schnittgeschwindigkeiten bei gesteigertem Spanquerschnitt möglich und führten somit zu einer enormen Entwicklung in der Werkzeugmaschinenindustrie. Die Arbeiten von Taylor stellten den Anfangspunkt der zu Beginn des 20. Jahrhunderts einsetzenden planmässigen und zielgerichteten Erforschung der Wirkung der Legierungselemente und der Wärmebehandlung dar. Zuvor war man auf die Erfahrungen des Härters angewiesen, und Legierungen wurden mehr zufällig denn planmässig gefunden. Insbesondere der Kunst des Härtens haftete lange Zeit etwas Mystisches an, und weil man lange nur in der Lage war, Temperaturen im Bereich des Quecksilberthermometers zu messen, wurde auf diesem Gebiet auch wenig untersucht. Hätte Mushet sich dem Studium der Härtung so intensiv gewidmet wie dem Finden einer geeigneten Legierung, wäre der Schnelldrehstahl wohl schon früher entdeckt worden, aber man dachte nicht daran, einen Stahl veränderter Zusammensetzung auch einer anderen Behandlung zu unterziehen. In Folge an die 1898 gemachte Entdeckung entwickelte Taylor in Zusammenarbeit mit Maunsel White bis 1906 den «Schnelldrehstahl». Das Legierungskonzept beruhte im Wesentlichen auf dem selbsthärtenden Stahl von Mushet und der Verwendung der Legierungselemente Kohlenstoff, Chrom, Wolfram und Vanadium. Der Stahl nach Taylor-White blieb nahezu bis 1930 aktuell, wobei er im Leistungsvergleich mit neueren Entwicklungen zurückfiel.

Legierungsentwicklung nach 1900 und Einführung einer Ordnungssystematik

Die wichtigsten Entwicklungen zu Anfang des 20. Jahrhunderts, nach erster Einführung des Schnelldrehstahls im Jahre 1906 durch Taylor und White, waren die Verwendung von Kobalt in Schnelldrehstählen ab 1912 und die Anwendung höherer Vanadingehalte bei gesteigertem Kohlenstoffgehalt 1927. Da sich im Zuge des Ersten Weltkrieges der Hauptbestandteil der Schnellarbeitsstähle, das Wolfram, extrem verteuert und verknappt hatte, wurden umfangreiche Versuche unternommen, dieses durch andere Elemente wie beispielsweise Molybdän zu substituieren. Gleichfalls wurden molybdänhaltige Stähle mit variierten Nickel-, Chrom- und Kohlenstoffgehalten untersucht und führten schlussendlich zur Entwicklung einer eigenständigen Gruppe innerhalb der Werkzeugstähle, den Warmarbeitsstählen. Diese neue Stahlgruppe wies neben ausreichender Warmhärte und Anlassbeständigkeit auch eine gute Zähigkeit auf, sodass sie zunehmend Einsatz zur Herstellung von Werkzeugen für die Urformung (z.B. im Druckguss) und Warmumformung (z.B. im Strangpressen) von Metallen fand.

Auch während des Zweiten Weltkrieges wurden in Deutschland ab 1938 aufgrund der Rohstoffknappheit Untersuchungen mit Molybdän in Schnelldrehstählen gemacht. Ebenfalls wurden sogenannte «Sparschnellarbeitsstähle» populär, bei denen versucht wurde, teuere Legierungselemente durch preiswerte und besser erhältliche Elemente wie Silizium, Aluminium und Stickstoff zu ersetzen.

Bereits zu Kriegszeiten war die Werkstoffkunde so weit fortgeschritten und die Werkstoffpalette so gross, dass Werkzeugstähle nach der chemischen Zusammensetzung, der Härtung und dem Verwendungszweck eingeteilt werden mussten, um den Überblick zu behalten. Allerdings gab es noch keine einheitliche Bezeichnung oder Normung der Eisen- und Stahlwerkstoffe. Dies geschah erst 1948 durch die Veröffentlichung der ersten Stahl-Eisen-Liste. Ziel war es, in die Eisenwerkstoffe eine Ordnung zu bringen, die Qualität durch Angabe von Analysenspannen zu verbessern, einheitliche Lieferbedingungen zu schaffen und nach Anwendungsbereichen zu gruppieren. Bereits 1963 existierte eine Vielzahl an Werkzeugstahllegierungen für diverse Anwendungen. Dies

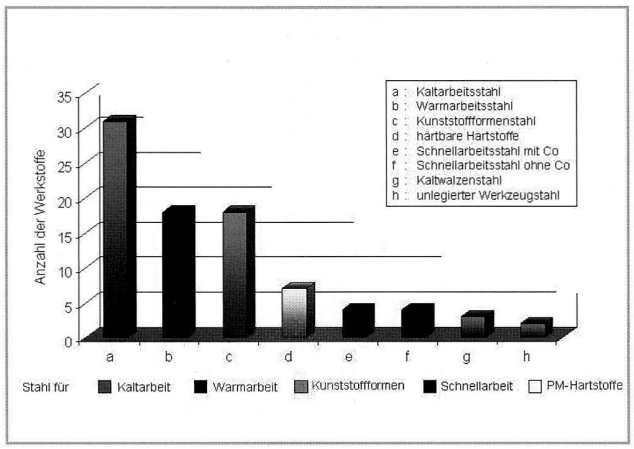
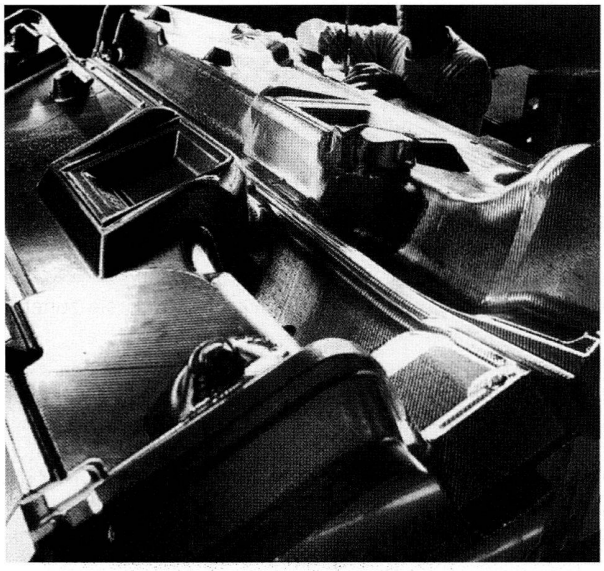


Bild 12: Werkstoffe für Werkzeuge bei den Deutschen Edelstahlwerken im Jahr 2006, Sortenbereinigung und Spezialisierung.

stähle bekannten Werkstoffen rückten neben den üblicherweise betrachteten mechanischen Werkstoffeigenschaften erstmals Gebrauchseigenschaften wie die Zerspanbarkeit, die Hochglanzpolierbarkeit, die Photoätzbarkeit und die Reparaturschweissbarkeit in das Zentrum des Anforderungsprofils. Wie man auch anhand des aktuelleren Produktionsprogrammes der Deutschen Edelstahlwerke von 2007 sieht, hat seit ihrer Erfindung die Gruppe der Kunststoffformenstähle einen rasanten Aufstieg genommen und ist auch in Zukunft ein interessantes Betätigungsgebiet für den Werkzeugstahlentwickler.

Werkzeugstahl heute und in Zukunft

Entgegen der Annahme von Willi Haufe von 1972, die legierungstechnische Entwicklung der metallurgisch hergestell-



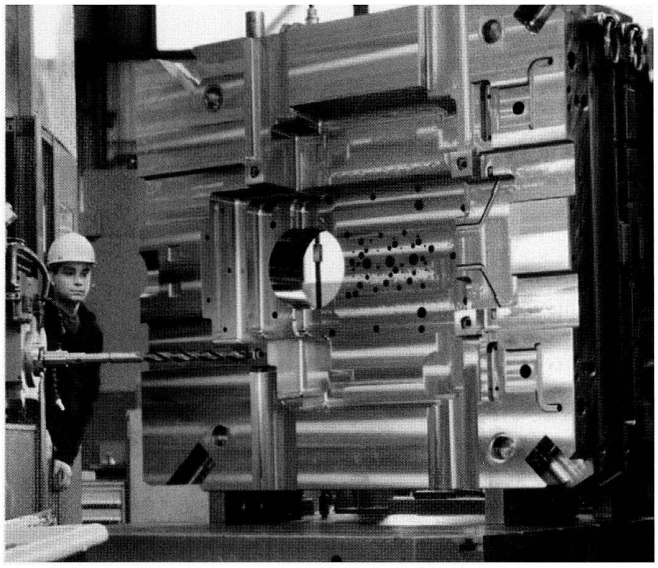


Bild 13 und 14: Herstellung von grossformatigen Werkzeugen aus Kunststoffformenstahl für den Kunststoff-Spritzguss. (Fotos: Slanina, N., 150 Jahre Stahl in Witten, Unna 2004)

ist beispielhaft anhand des Produktionsprogramms des Gussstahlwerkes Witten von1963 gezeigt.

Mit dem Eintritt in das «Plastikzeitalter» mussten ab Mitte des 20. Jahrhunderts neue Verarbeitungsverfahren für viele neue, synthetisch hergestellte Werkstoffe gefunden werden. Dies war der nächste Zeitpunkt, an dem die Werkzeugstahlentwickler massgeblich tätig wurden, um angepasste Stähle für den Einsatz als Werkzeug im Kunststoffspritzguss, in der Kunststoffextrusion und in der Kunststoffblastechnik herzustellen. Bei diesen unter dem Begriff der Kunststoffformen-

ten Schnellarbeitsstähle sei abgeschlossen, wird heute wie damals geforscht. Zu Anfang des Jahrhunderts betrieb man aufgrund knapper Rohstoffe die Entwicklung optimierter Werkzeugstähle und versuchte, teure Elemente durch billigere zu substituieren. Auch heute ist dieser Entwicklungstrend aus ähnlichen Gründen aktuell.

Speziell ist hierbei auch die Wirkung einzelner Elemente im Legierungsverbund ein wichtiger Aspekt. Entgegen obiger Aussage könnte man sogar sagen, dass die legierungstechnische Entwicklung vielfältiger geworden ist. So sind neben

den vorhandenen experimentellen Untersuchungsmöglichkeiten zur Legierungsentwicklung ab dem Ende des 20. Jahrhunderts thermodynamisch basierte Simulationsprogramme entstanden, die den heutigen Werkstoffingenieur darin unterstützen, theoretische Aussagen zu den sich einstellenden Gefügebestandteilen in Abhängigkeit von Temperaturen und Konzentrationen im Stahl zu machen. Somit sind Einflüsse von potentiellen Legierungselementen schneller, einfacher und exakter zu beziffern, als es vor Jahren noch der Fall war. Ergänzend bietet Software auf der Basis finiter Elemente Möglichkeiten der Betrachtung giesstechnischer und umformtechnischer Belange bei der Werkzeugstahlherstellung losgelöst von experimentellen Aufbauten. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Methoden sollte es den Werkzeugstahlentwicklern gelingen, auf die Anforderungen der Stahlanwender auch in Zukunft kompetent zu reagieren und beispielsweise Kunststoffformenstähle mit verbesserter Durchvergütbarkeit bis in den Kern sehr grosser Blöcke, Warmarbeitsstähle mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit zur Optimierung von Taktzeiten sowie legierungsoptimierte Kaltarbeits- und Schnellarbeitsstähle zu erforschen, die beispielsweise gute Härte und verbesserte Zähigkeitseigenschaften miteinander kombinieren.

Zugegebenermassen hat sich die Forschung auch auf Bereiche jenseits der Metallurgie erweitert. Für die Werkzeugstähle haben hier beispielsweise Plasmanitrierbehandlungen und das Aufbringen von Oberflächenschichten mittels physikalischer oder chemischer Aufdampftechnik (PVD, CVD) Eingang in die Technik eines Werkzeugherstellers gehalten. Sie erlauben, Werkzeuge mit multifunktionalen Beschichtungen zu versehen und so unter anderem Standzeitverlängerungen zu erreichen. Die Werkzeugstahleigenschaften müssen daher auch an diese neuen Techniken angepasst werden.

Was die pulvermetallurgische Herstellung angeht, wird von Haufe 1972 nicht ausgeschlossen, dass völlig neuartige Schnellarbeitsstähle mit verbesserter Standzeit entwickelt werden. Diese Einschätzung hat sich heute im Wesentlichen bestätigt. Die Pulvermetallurgie bietet Vorteile wie ein feines und homogenes Gefüge, verbesserte Warmumformbarkeit, Masshaltigkeit, Isotropie und Zähigkeit. Nachteilig sind jedoch die aufwendige und kostenintensive Verfahrenstechnik, weswegen sich die heutige Anwendung der Pulvermetallurgie auf die Herstellung höherlegierter Stähle beschränkt, die im herkömmlichen Prozessweg nur schwierig oder gar nicht herstellbar sind. Auch hier sind in Zukunft prozesstechnische Weiterentwicklungen und Alternativlösungen zur Pulvermetallurgie denkbar, wie es beispielsweise das Sprühkompaktierverfahren sein könnte, um die Kosten bei der Herstellung hochlegierter Werkzeugstähle weiter zu optimieren.

Literaturverzeichnis

- Norbert Slanina; Klaus D. Wupper; Karl-Heinz Ortmann: 150 Jahre Stahl aus Witten. Hrsg. Edelstahl Witten-Krefeld Gmbh, Unna 2004.
- Otto Johannsen: Geschichte des Eisens. Im Auftrag des Vereins deutscher Eisenhüttenleute gemeinverständlich dargestellt, 3. Auflage, Düsseldorf 1953.
- Carl Friedrich Rammelsberg: Lehrbuch der chemischen Metallurgie, Berlin 1850.
- Helmut Uebbing: Wege und Wegmarken. 100 Jahre Thyssen 1891–1991, Berlin 1991.
- Ludwig Beck: Geschichte des Eisens in technischer und kulturgeschichtlicher Beziehung, Düsseldorf 1916.
- J. M. Gledhill: The Development and Use of the High Speed Tool Steel. In: Journal of the Iron and Steel Institute, S. 127–167, 1904.
- Georg Mars: Die Spezialstähle, Stuttgart 1922.
- Willi Haufe: Schnellarbeitsstähle, München 1972.
- Frederik Winslow Taylor: Über Dreharbeit und Werkzeugstähle, Berlin 1908.
- Rudolf Scherer: Der Einfluss von Co, V und Mn auf einige Eigenschaften von Werkzeugstahl. Archiv für das Eisenhüttenwesen 1, Heft 4, 1927.
- Petersen, Otto: Versuche mit W-armem Mo-Schnellarbeitsstahl. Stahl und Eisen 55 Heft 38 1935.
- Eduard Houdremont: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet sparstoffarmer Schnellarbeitsstähle. Stahl und Eisen 57, Heft 47, 1937.
- Hans Schrader: Die Weiterentwicklung der sparstoffarmen Schnelldrehstähle, HTM 3, 1944.
- Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hg.): Stahl-Eisen-Liste, 1. Ausgabe, Düsseldorf 1948.
- Winfried Dahl: Eigenschaften und Anwendungen von Stählen, Band 2, Stahlkunde, Aachen 1993.