

medizinische Fakultät der Universität Erlangen; die Societas physico-medica Erlangensis ernannte ihn zu ihrem Ehrenmitglied.

Obwohl Paal keineswegs zu den leicht zugänglichen Naturen gehört, so hat er sich doch bei Kollegen, Assistenten und Studierenden stets einer besonderen Beliebtheit erfreut. Das ist jedem verständlich, der ihn in

seiner Herzensgüte, seiner steten Hilfsbereitschaft, seiner Toleranz und seiner humorvollen Art näher kennen lernte. Möchte dem erfolgreichen Forscher, der auch nach seiner Entpflichtung keineswegs die Hände in den Schoß legen, sondern seiner chemischen Arbeit treu bleiben will, ein langer, glücklicher Lebensabend beschieden sein!

M. Busch. [A. 77.]

## Neuere Fortschritte in der Metallurgie des Stahles.

Von Dr.-Ing. E. H. SCHULZ, Dortmund.

Direktor des Forschungsinstituts der Vereinigte Stahlwerke A.-G., Dortmund.

(Eingeg. 7. Mai 1930.)

Die technische Entwicklung in der Nachkriegszeit brachte auf den verschiedensten Verwendungsgebieten des Stahles Forderungen nach Steigerung insbesondere der zulässigen mechanischen Beanspruchungen, um auf diese Weise ein leichteres und damit wirtschaftliches Bauen zu ermöglichen. Dazu traten weiterhin aber auch teilweise ganz neue Anforderungen an den Werkstoff. An die Lösung der so entstehenden Aufgaben ging die Stah 技术 auf zwei verschiedenen Wegen heran: einmal versuchte man durch neue Arten von Legierungen den neuen Beanspruchungen gerecht zu werden, zum andern bemühten sich die Hüttenleute, die normale Stahlherstellung in ihrer Gesamtheit auf einen höheren Stand zu entwickeln, also an sich bekannte Stahlsorten in ihren Eigenschaften zu verbessern.

Eine grundsätzliche Schwäche der normalen Stähle ist die Rostneigung. Schon einige Zeit vor dem Weltkriege wurde in Amerika Baustahl hergestellt, der einen geringen Gehalt — etwa 0,2 bis 0,25% — Kupfer hatte und von dem angegeben wurde, daß er gegen die Einwirkung der Atmosphäre einen gesteigerten Korrosionswiderstand aufweise. Die Verwendung dieses gekupferten Stahles brach sich in Deutschland nur langsam Bahn, umfangreiche Versuche in der Nachkriegszeit, die insbesondere von Daevens<sup>1)</sup> eingehend besprochen sind, ließen aber den großen Vorteil des gekupferten Stahles immer deutlicher erkennen.

Es steht heute ganz außer Zweifel, daß unter dem Einfluß der Atmosphärlinen gekupferter Stahl ganz erheblich weniger rostet als gewöhnlicher Stahl, man kann im „nackten“ Zustand, also ohne Anstrich, mit wenigstens der 1½fachen Lebensdauer des gekupferten Stahles gegenüber dem gewöhnlichen Stahl rechnen. Sehr bedeutsam ist dabei aber, daß die höhere Lebensdauer des gekupferten Stahles sich auch auswirkt unter Anstrichen oder Verzinkung. Auch in säurehaltigem

Wasser geht — außer bei Vorliegen von Salpetersäure — der Angriff auf den gekupferten Stahl erheblich langsamer vor sich als der auf gewöhnlichen Stahl. Zahlen-tafel 1 gibt die Gewichtsverluste wieder, die an gewöhnlichem und gekupfertem Stahl in mit verschiedenen Säuren verschieden stark angesäuerten Wässern erhalten wurden. Die Überlegenheit des Kupferstahles ist in allen Fällen festzustellen, wobei der Unterschied im Verhalten der beiden Stähle um so geringer zu werden scheint, je schwächer unter den vorliegenden Verhältnissen der saure Charakter des Wassers ist (schwächere Säuren bzw. schwächere Konzentration). In Leitung- und Seewasser fanden in gewisser Fortsetzung dieses Gedankens amerikanische Forscher nur eine geringe Überlegenheit des gekupferten Stahles.

Nach neueren Untersuchungen von C. Carius und E. H. Schulz<sup>2)</sup> ergeben sich aber durch Zulegieren verhältnismäßig kleiner Mengen noch anderer Metalle zum gekupferten Stahl auch Baustoffe, die in Fluss- und Seewasser einen ganz erheblich höheren Korrosionswiderstand aufweisen als die ungekupferten Stähle. Zugleich brachten diese Untersuchungen den Nachweis, daß die Wirkung des geringen Kupfergehaltes auf der Bildung besonders gearteter Rostschichten beruht, die als Deckschichten die Korrosion, das Rosten, stark verlangsamen: gekupferter Stahl rostet also grundsätzlich zunächst wie gewöhnlicher Stahl, jedoch wird das Fortschreiten der Korrosion sehr stark verzögert.

Diese Ausnutzung einer günstigen Wirkung des Kupferzusatzes zum Stahl war um so bemerkenswerter, als bis vor nicht allzu langer Zeit Kupfer als Schädling im Stahl betrachtet wurde. Diese Einstellung änderte sich noch durchgreifender durch die Entwicklung der sogenannten hochwertigen Baustähle, in denen der Kupfergehalt noch erheblich über das Maß hinaus gesteigert wurde, in dem er im gekupferten Stahl vorliegt. Insbesondere im Brücken- und Eisen-Hochbau trat nämlich in der Nachkriegszeit sehr entschieden das Bestreben hervor nach Erhöhung der mechanischen Beanspruchung, d. h. nach Erhöhung der zulässigen statischen Spannungen. Der Stahl St 37 mit seiner Zugfestigkeit von 37 bis 45 kg/mm<sup>2</sup> (ein gewöhnlicher Kohlenstoffstahl mit einem Kohlenstoffgehalt von etwa 0,10%) sollte vielfach ersetzt werden durch Stahl höherer Festigkeit. Dies geschah zunächst dadurch, daß der Kohlenstoffgehalt, von dem die Zugfestigkeit des Stahles in erster Linie abhängt, erhöht wurde; an sich kann ja durch Abstufung des Kohlenstoffgehaltes jede beliebige Zugfestigkeit von etwa 32 bis über 90 kg/mm<sup>2</sup> im Kohlenstoffstahl erhalten werden. In dem Maße, wie die Zugfestigkeit durch den Kohlenstoffgehalt erhöht wird, sinken aber Dehnung und Zähigkeit. Auch die Schwierigkeit der Bearbeitung mit schneidendem Werkzeugen nimmt mit steigendem Kohlenstoffgehalt erheblich zu. Weiterhin tritt bei

<sup>1)</sup> Mitt. a. d. Forschungs-Institut d. Verein. Stahlwerke A.-G., Bd. 1, Lieferung 7, 1929.

Zahlen-tafel 1.  
Gewichtsverluste gekupferten und gewöhnlichen Stahles in stark verdünnten Säuren.

Säure	Ein-wirkungs-dauer in Tagen	% Gewichts-abnahme von Stahl gewöhnl.	% Gewichts-abnahme von Stahl gekupf.	Abnahme v. gekupferten Stahl gew. Stahl = 100
5,0% Ameisen-säure . . .	100	56	13	23,2
5,0% Citronen-säure . . .	100	43	11	25,6
0,5% Schwefel-säure . . .	50	55	20	36,4
5,0% Essigsäure . . .	100	14,5	5,5	38,0
0,5% Salzsäure . . .	50	55	22	40,0
0,5% Citronen-säure . . .	100	10	4,5	45,0
5,0% Oxalsäure . . .	100	10,7	5,8	54,2
0,5% Ameisen-säure . . .	100	12	8,5	70,1

<sup>1)</sup> Stahl u. Eisen 46, 609/11, 644 [1926]; 48, 1170/71 [1928].

Kohlenstoffgehalten oberhalb etwa 0,25% die Härtbarkeit des Stahles praktisch merklich hervor, z. B. können daher Niete aus hochkohlenstoffhaltigem Stahl unter besonderen Umständen Abschreckwirkungen und damit Härtungserscheinungen zeigen, die zur Sprödigkeit führen. Auch die Ungleichmäßigkeiten im Stahl, die als Seigerungen bezeichnet werden und die unvermeidbar sind, wirken um so gefährlicher, je höher gekohlt der Stahl ist. Aus diesen Gründen setzten daher in Deutschland Bestrebungen ein, Stähle zu schaffen, mit einem Kohlenstoffgehalt möglichst wenig oberhalb desjenigen von St 37, bei denen dann die Erhöhung der Zugfestigkeit bzw. der Streckgrenze vielmehr durch besondere Zusätze erreicht wurde, wobei aber aus Preisrücksichten hohe Zusätze von Chrom und Nickel, wie sie von den Spezialstählen bekannt sind, nicht in Frage kamen. Gleichzeitig aber waren die Konstrukteure bestrebt, bei Festsetzung der zulässigen Beanspruchung an Stelle der Zugfestigkeit die ziffernmäßig bestimmte Streckgrenze der Berechnung zugrunde zu legen. Damit ergab sich für den Metallurgen die Aufgabe, bei der Entwicklung gerade auf eine Erhöhung der Streckgrenze zu achten. Einen besonderen Anstoß erhielt diese Entwicklung dadurch, daß die Reichsbahn im Jahre 1926 einen Stahl mit etwa 0,12% Kohlenstoff und einem Zusatz von 1% Silicium für den Brückenbau einführte, den sogenannten „Siliciumbaustahl“, der bei einer Streckgrenze von 36 kg/mm<sup>2</sup> eine Zugfestigkeit von etwa 50–60 kg/mm<sup>2</sup> und eine Dehnung von 20% aufweisen sollte. In den Hüttenwerken trat aber bei der Verarbeitung des Siliciumbaustahles eine ganze Reihe von erheblichen Schwierigkeiten auf, insbesondere erwies sich der Stahl als recht empfindlich im Walzwerk, wo er starken Ausschuß durch äußere Fehler ergab. Die grundsätzlich in jedem gewalzten oder geschmiedeten Stahl vorhandene Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von den Abmessungen oder, richtiger ausgedrückt, von dem Streckmaß, d. h. dem Verhältnis des Blockquerschnitts zu dem des fertigen Profils, erwies sich bei Siliciumbaustahl als sehr viel stärker als bei anderen Stählen. Gleichzeitig neigte er in erhöhtem Maße zum Rosten.

Die deutschen Hüttenwerke bemühten sich daher stark um die Entwicklung von Stählen, die die gleichen günstigen Festigkeitseigenschaften besaßen wie der Siliciumstahl, ohne aber dessen Schwächen zu haben. Es wurden verschiedene derartige Stähle entwickelt: bei den meisten ist ein hoher Kupfergehalt festzustellen, der — zusammen mit anderen Zusätzen — auch eine Erhöhung der Streckgrenze bringt. Bekanntgeworden sind in erster Linie der Chrom-Kupfer-Stahl, der Kupfer-Mangan- und Kupfer-Mangan-Silicium-Stahl sowie Molybdän-Silicium-Stahl<sup>3)</sup>. Abb. 1 gibt in Form von Häufigkeitskurven die Ergebnisse der Untersuchung zahlreicher Schmelzen des Chrom-Kupfer-Stahles (Union-Baustahl) wieder, sie läßt erkennen, daß die oben angegebenen Festigkeitseigenschaften für den hochwertigen Baustahl der Reichsbahn sehr gut eingehalten werden und daß der Stahl außerdem eine sehr hohe Kerbzähigkeit besitzt.

Da die entwickelten hochwertigen Baustähle einen erhöhten Kupfergehalt aufweisen, ist bei ihnen natur-

gemäß auch der höhere Korrosionswiderstand mindestens des gekupferten Stahles gegeben.

Mit sehr gutem Erfolge hat sich der Chrom-Kupfer-Stahl auch für die Herstellung von Schmiedestücken eingeführt, dabei ist beachtenswert, daß das dem Stahl zugesetzte Kupfer bei der Wärmebehandlung, falls der Gehalt an Kupfer 0,5% überschreitet, ein eigenartiges Verhalten zeigt. Bei normaler Abkühlung bleibt ein größerer Teil des Kupfers im Stahl gelöst als eigentlich dem Gleichgewichtszustand entspricht. Erhitzt man den langsam abgekühlten kupferlegierten Stahl dann auf Temperaturen von 450° bis 550°, so scheidet sich das überschüssig gelöste Kupfer in hochdisperser Form aus und bewirkt dadurch ein starkes Ansteigen der Streckgrenze und der Zugfestigkeit, wobei der Rückgang an Dehnung verhältnismäßig gering ist<sup>4)</sup>. Es ist also möglich, diesen mit Kupfer legierten Stahl — und das gilt naturgemäß auch für den mit Kupfer und Chrom legierten Stahl — durch eine einfach durchzuführende und billige Wärmebehandlung in seinen Eigenschaften ganz erheblich zu verbessern, Zahlentafel 2 gibt ein Beispiel dafür.

#### Zahlentafel 2.

Mittlere Festigkeitseigenschaften einer geschmiedeten Welle aus Chrom-Kupfer-Stahl vor und nach Anlaßhärting.

Behandlung	Streckgrenze kg mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit kg/mm <sup>2</sup>	Dehnung %	Einschnitt %	spez. Schlagarbeit mkj/cm <sup>2</sup>
Geglüht . . .	37	55	24	68	11
Auf 500° angelassen .	51	66	20	64	9

Im Zusammenhang mit der Korrosionsfrage muß noch eingegangen werden auf einen Sonderbaustoff, das

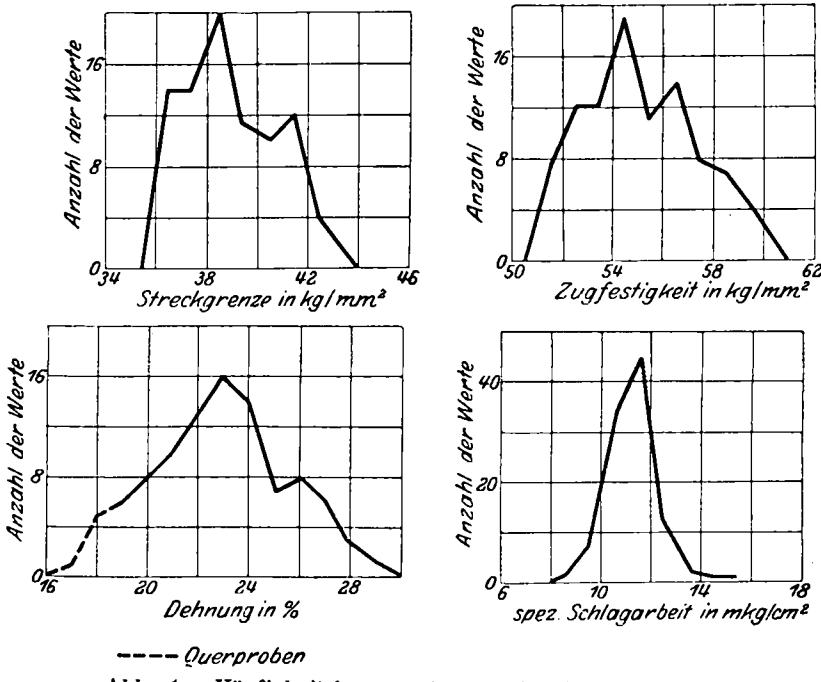


Abb. 1. Häufigkeitskurven der Festigkeitswerte von Union-Baustahl.

Armcoeisen. Dieser in Amerika entwickelte Werkstoff besitzt nach amerikanischen Untersuchungen unter sehr vielfachen Bedingungen einen erhöhten Korrosionswiderstand durch seine besonders hohe „Reinheit“, wo-

<sup>4)</sup> F. Nehl, Stahl u. Eisen 50, 678/86 [1930]; H. Buchholz u. W. Köster, ebenda 50, 687/95 [1930].

<sup>3)</sup> Stahl u. Eisen 48, 849/53 [1928].

bei unter Reinheit ein äußerst geringer Gehalt an den üblichen Eisenbegleitern — Kohlenstoff, Mangan usw. — verstanden wird. Hingewiesen muß dabei jedoch darauf werden, daß das Armcoisen infolge seines geringen Gehaltes an Kohlenstoff sehr weich ist, seine Zugfestigkeit bewegt sich zwischen 30 und 34 kg/mm<sup>2</sup>, seine Dehnung liegt bei etwa 34%, die Streckgrenze bei 15—20 kg/mm<sup>2</sup>. Für mechanisch hoch beanspruchte Konstruktionen kommt der Werkstoff demnach nicht in Frage. Besonders geeignet ist er für zu verzinkende Gegenstände.

Wird ein weicher Stahl bei seiner Verarbeitung kalt gereckt — z. B. durch Biegen, Bördeln usw. —, so tritt anschließend bei einfacher Lagerung, also im Laufe der Zeit, meist ein ganz erheblicher Abfall der Kerbzähigkeit, ein Sprödewerden ein — das „Altern“ des Stahles. Beschleunigt wird dieser Vorgang durch ein schwaches Erhitzen — etwa auf 250° — wie es im Kesselbetrieb ja praktisch vorkommt. Nach neueren Untersuchungen von Fry ist es nun aber gelungen, durch besondere Schnellbehandlung im Siemens-Martin-Ofen Stähle zu erzielen, bei denen diese Alterungserscheinungen auf ein ganz geringes Maß herabgesetzt werden.

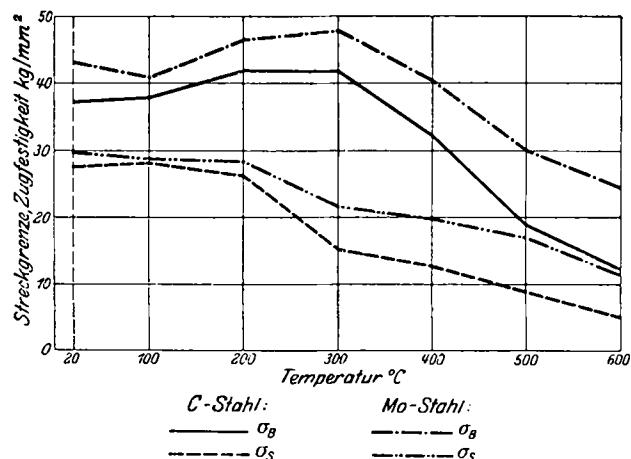


Abb. 2. Einfluß der Temperatur auf Zugfestigkeit und Streckgrenze bei gewöhnlichem und schwach mit Molybdän legiertem Kesselbaustahl (nach Nehl).

Werden nicht gerade die ungünstigsten Verhältnisse (Anlassen nach dem Recken auf 250°) zugrunde gelegt, so beträgt die spezifische Schlagarbeit im Mittel nach der Alterung immerhin etwa das 3—4fache von der des gewöhnlichen Flußstahls. Es muß aber andererseits festgestellt werden, daß die Befürchtungen hinsichtlich des Sprödewerdens durch Altern auch vielfach übertrieben sind. So konnte Nehl in umfassenden Untersuchungen nachweisen, daß in sehr stark verarbeitetem gewöhnlichen Flußstahl, wie er beispielsweise in Rohren vorliegt, die Alterungsneigung infolge der Verarbeitung bereits auf ein Minimum herabgesetzt ist. Im übrigen kann naturgemäß in Kesseln, Trömmeln usw. dieser Gefährdung auch dadurch begegnet werden, daß die fertigen Stücke zum Abschluß der gesamten Verarbeitung einer Glühbehandlung unterzogen werden. Bei Verwendung der hochwertigen neuen Baustähle, von denen zuvor die Rede war, ist infolge der Legierung die Alterungsneigung auch sehr viel geringer.

Die gesteigerten Betriebsdrücke und Temperaturen im Dampfkessel- und Apparatebau gaben Veranlassung,

Baustoffe zu schaffen, die der normalerweise bei höheren Temperaturen einsetzenden weitgehenden Minderung der Festigkeitseigenschaften weniger stark unterworfen sind. Es ist insbesondere die Streckgrenze, die bei Temperatursteigerungen — vor allem oberhalb 300° — sehr stark abnimmt. Nehl konnte feststellen, daß ein geringer Zusatz von Molybdän — etwa 0,3% — zum weichen Flußstahl diesen Abfall der Streckgrenze und auch der Zugfestigkeit stark hemmt, wie dies aus Abb. 2 ersichtlich ist. Bestätigt wurden diese Ergebnisse durch Untersuchungen von Prömper und Pohl, die außerdem fanden, daß Vanadin einen ähnlichen wohltätigen Einfluß ausübt<sup>5)</sup>. Nun ist aber die im Zerreißversuch bestimmte Streckgrenze, insbesondere bei höheren Temperaturen, sehr stark abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit: je langsamer die Belastung gesteigert wird, bei desto geringerer Belastung fängt der Stahl bereits an zu fließen. Es sind daher vielfach Versuche durchgeführt worden, die niedrigste Belastung festzustellen, bei der ein Stahl bei bestimmter Temperatur auch nach sehr langer Zeit — mehrere 100 Stunden — keine Dehnungen mehr aufweist. Bei derartigen Versuchen tritt die Überlegenheit der eben gekennzeichneten schwachlegierten Stähle noch deutlicher hervor. Abb. 3 gibt einen Teil der Untersuchungsergebnisse

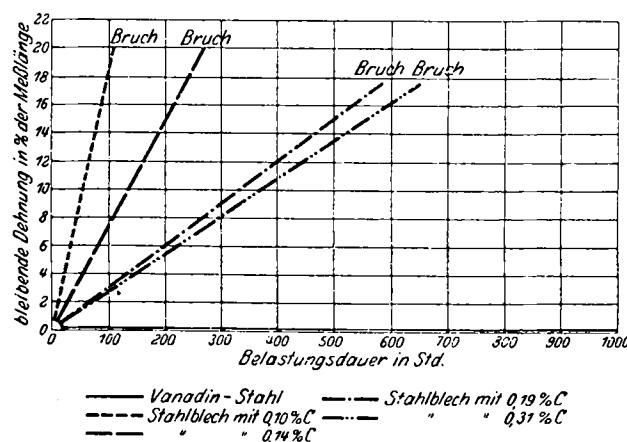


Abb. 3. Dauerstandfestigkeit von Kohlenstoffstählen und Vanadinstahl bei 500° unter 10 kg/mm² Belastung.

wieder, die Prömper und Pohl bei einer derartigen Versuchsanordnung erhielten. Die betreffenden Stähle — es handelt sich um vier Kohlenstoffstähle und einen Vanadinstahl — wurden bei verschiedenen Temperaturen verschiedenen Belastungen ausgesetzt. Diese Belastung wurde viele 100 Stunden wirken lassen und die allmählich sich einstellende Dehnung ziffernmäßig bestimmt. In der Abb. 3 ist als Abszisse die Belastungsdauer in Stunden und als Ordinate die gemessene Dehnung aufgetragen. Die Belastung betrug im Falle der Abbildung 10 kg/mm<sup>2</sup>, die Versuchstemperatur 500°. Es zeigt sich, daß die Kohlenstoffstähle um so schneller der Belastung nachgeben, je geringer der Kohlenstoffgehalt ist, aber auch bei einem Kohlenstoffgehalt von rund 0,3% ist nach 600 Stunden bereits eine bleibende Dehnung von 16% eingetreten, und bald darauf erfolgt der Bruch. Im Gegensatz dazu war bei Vanadinstahl selbst nach 1000 Stunden unter den gleichen Verhältnissen eine bleibende Dehnung noch nicht zu erkennen.

[A. 59.]

<sup>5)</sup> Arch. Eisenhüttenw. 1, 785/94 [1928].