

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 85 (1967)
Heft: 16

Artikel: Ein neuer Stahlgusswerkstoff für hydraulische Maschinen
Autor: Küpfer, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-69433>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.03.2025

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

Ein neuer Stahlgusswerkstoff für hydraulische Maschinen

DK 621.22.011:669.141.25

Mitteilung aus der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Giessereien von Gebrüder Sulzer AG, Winterthur, von **R. Küpfer**, dipl. Ing. ¹⁾

Es wird über einen neuen Stahlgusswerkstoff mit rund 13 % Chrom berichtet sowie über dessen mechanische Eigenschaften, dessen Verhalten gegen Korrosion, Erosion, Kavitation und dessen Schweissbarkeit. Durch geeignete metallurgische und legierungstechnische Massnahmen gelingt die Erzeugung eines Materials, das gegenüber normalem 13prozentigem Chromstahlguss bei gleichbleibendem Korrosionswiderstand gegen Chloridlösungen folgende Vorteile aufweist: Günstigere Kombination von Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften, geringerer Abfall der Kerbschlagzähigkeit mit sinkender Prüftemperatur, erhöhter Widerstand gegen einen Angriff durch Sanderosion und Kavitation sowie bessere Schweissbarkeit. Dank seiner spezifischen Eigenschaften leistet der neue Stahlgusswerkstoff einen wertvollen Beitrag zur Senkung der Unterhaltskosten hydraulischer Maschinen.

Beim Bau hydraulischer Maschinen werden Teile benötigt, die vielfach eine sehr verwickelte Gestalt aufweisen und höchsten Qualitätsanforderungen genügen müssen. In deren Herstellung steht das Giessen gegenüber anderen Formgebungsverfahren stark im Vordergrund.

Als Werkstoff für Gussstücke von Wasserkraftmaschinen verwendet man heute vielfach 13prozentigen Chromstahl. Gegenüber Kohlenstoffstahl oder leicht legiertem Stahl besitzt dieses Material bessere Korrosionsbeständigkeit sowie erhöhten Widerstand gegen Kavitation und Sanderosion. Leider ist es nicht einfach zu schweißen, was sich bei Instandsetzungsarbeiten im Kraftwerk als Nachteil erweist. Im Bestreben, die Unterhaltskosten zu senken, entwickelten die Giessereilaboratorien von Gebrüder Sulzer einen Werkstoff, der sich gegenüber dem heute verwendeten 13prozentigen Chromstahl bei sehr guten mechanischen Eigenschaften und gleichbleibender Korrosionsbeständigkeit durch höheren Widerstand gegen Kavitations- und Erosionsangriff und bessere Schweissbarkeit auszeichnet. Die Entwicklungsarbeiten für die neue Stahlgussorte stützen sich auf einen von *E. Zingg* [1] im Jahre 1957 veröffentlichten Vorschlag.

Metallurgische und legierungstechnische Gesichtspunkte

Den Entwicklungsarbeiten lagen folgende Überlegungen zugrunde:

¹⁾ Als Vortrag gehalten am Internationalen Giessereikongress 1966 in New Delhi, Indien.

a. Die bei normalem 13prozentigem Chromstahlguss auftretenden schweisstechnischen Probleme sind vor allem dadurch bedingt, dass im Schweissgut und in der thermisch beeinflussten Zone des Grundmaterials ein Martensit von hoher Härte und relativ geringer Zähigkeit entsteht. Zur Vermeidung von Schweissrissen ist somit ein Material anzustreben, das ein ausreichendes Verformungsvermögen besitzt, um Schweissspannungen wenigstens teilweise abzubauen. Mit Rücksicht auf den Korrosionswiderstand soll beim neuen Werkstoff auf einen Legierungsgehalt von rund 13 % Chrom nicht verzichtet werden.

Durch eine entsprechende metallurgische Arbeitsweise lässt sich der Gehalt an zähigkeitsvermindernden Elementen, wie Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor und Stickstoff im 13prozentigen Chromstahlguss tiefer halten, als dies üblicherweise der Fall ist. In einem solchen Material entsteht in der Übergangzone von Schweissungen ein Martensit von geringerer Härte und besserem Verformungsvermögen. Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, dass der geringere Gehalt an Kohlenstoff und Stickstoff das Auftreten von Delta-Ferrit im Gefüge begünstigt. Je nach Menge und Ausbildungsform des Ferrits in der martensitischen Grundmasse kann die Zähigkeit des 13prozentigen Chromstahlgusses mehr oder weniger stark herabgesetzt werden. Dieser Gefahr hat man durch Zusatz eines Austenitbildners zu begegnen. In Versuchen erwies sich die Zugabe von etwa 4 % Nickel als das hierzu bestgeeignete Mittel. Die auf das Grundmaterial zutreffenden Belange gelten ebenfalls für das Schweissgut. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, für das Schweißen des neuen Stahlgusswerkstoffs auch entsprechende Elektroden zu entwickeln.

b. Ein 13prozentiger Chromstahlguss mit grösserer Zähigkeit ermöglicht, die Gussstücke auf eine höhere Härte zu vergüten. Dadurch kann der Verschleisswiderstand des Materials verbessert werden.

Das neue Material trägt die Bezeichnung «Stahlguss 185 V», während «Stahlguss 181 V» normalen 13prozentigen Chromstahlguss kennzeichnet.

Bild 1. Gefüge von Stahlguss 181 V, Vergrösserung 250fach

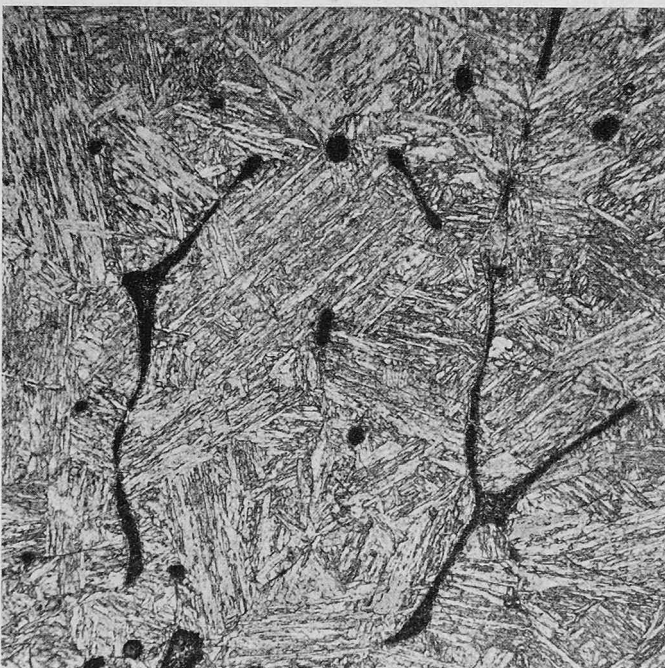


Bild 2. Gefüge von Stahlguss 185 V, Vergrösserung 250fach



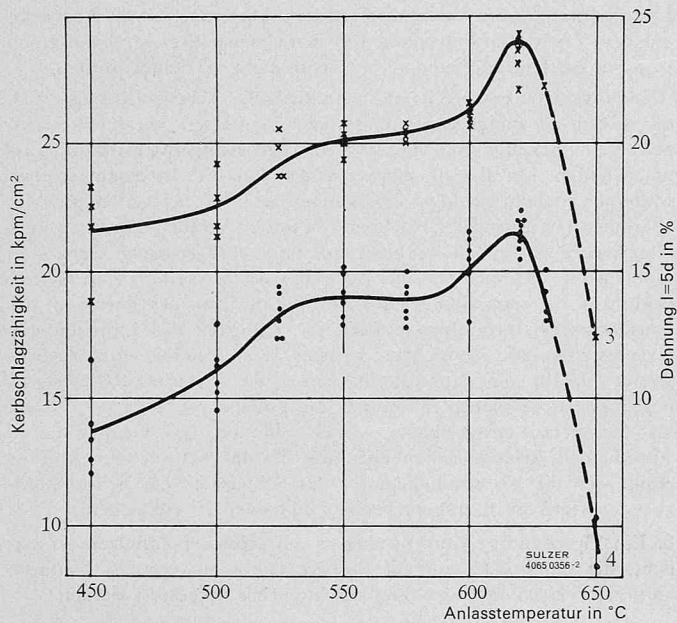
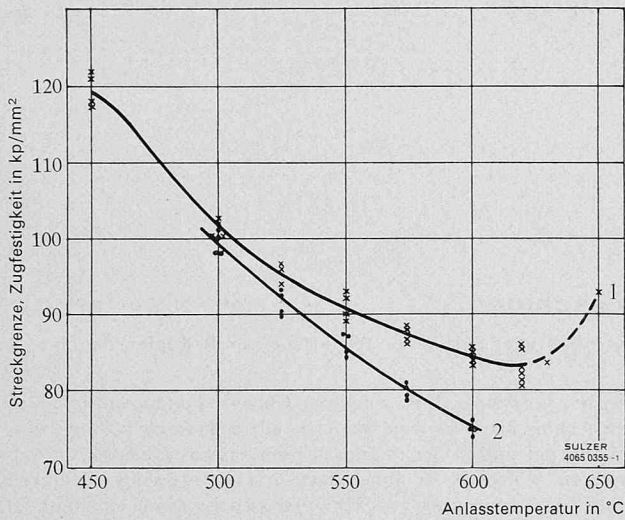


Bild 3. Mechanische Eigenschaften von Stahlguss 185 V in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur
1 Zugfestigkeit, 2 Streckgrenze, 3 Dehnung, 4 Kerbschlagzähigkeit (VSM)

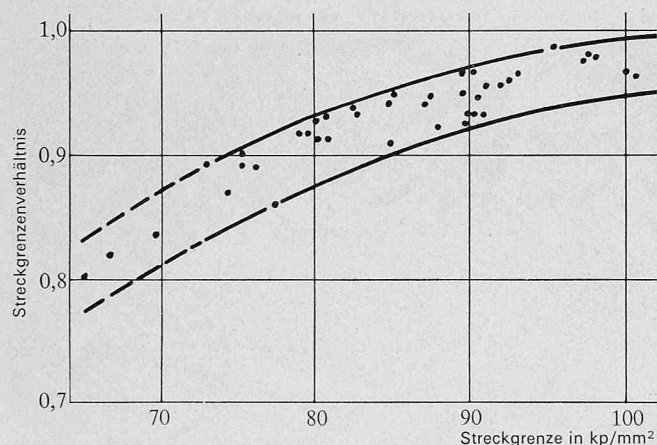


Bild 4. Streckgrenzenverhältnis in Abhängigkeit von der Streckgrenze von Stahlguss 185 V

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der Schmelzen, die den Bildern 1 und 2 zugrunde liegen

Werkstoff	C (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N (ppm)
181 V	0,08	0,021	0,016	0,48	0,72	13,0	1,4	0,39	440
185 V	0,04	0,013	0,010	0,30	0,80	12,7	3,9	0,38	310

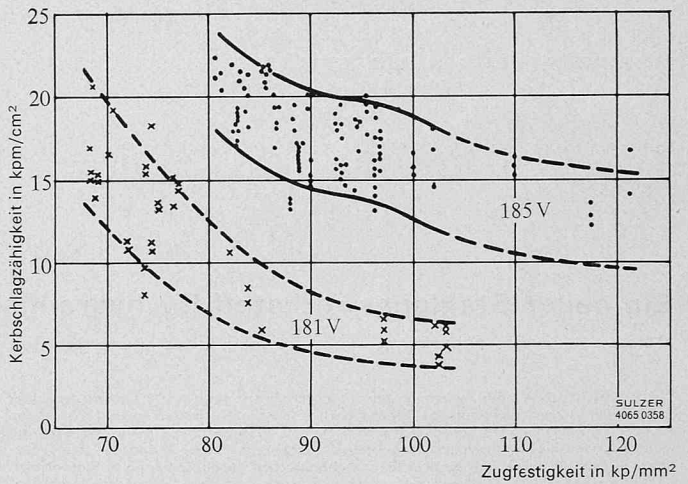


Bild 5. Kerbschlagzähigkeit (VSM-Probe) in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit von Stahlguss 181 V und 185 V

Gefüge

Bilder 1 und 2 veranschaulichen Mikroaufnahmen des Gefüges von normalem und verbessertem 13prozentigem Chromstahlguss im vergüteten Zustand. Über die chemische Zusammensetzung der zugehörigen Schmelzen orientiert Tabelle 1. Bei allen Gegenüberstellungen ist zu berücksichtigen, dass der als Vergleichsbasis dienende Stahlguss 181 V gegenüber den üblichen, für normalen 13prozentigen Chromstahlguss geltenden Normvorschriften verhältnismässig niedrige Gehalte an Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel und einen etwas erhöhten Nickelgehalt aufweist. Dieser Stahlguss enthält in der martensitischen Grundmasse in der Regel einen gewissen Gehalt an Delta-Ferrit. Vor allem bei einer langgezogenen oder netzförmigen Ausbildungsform (Bild 1) kann sich der Delta-Ferrit ungünstig auf die Zähigkeit des Werkstoffs auswirken. Im Gegensatz dazu wird durch eine entsprechende Abstimmung der chemischen Zusammensetzung beim Stahlgusswerkstoff 185 V ein praktisch ferritfreies Gefüge erzielt.

Mechanische Eigenschaften

Untersuchungen an Probestäben von 40 mm Dicke

Einen ersten Überblick über die mit dem Stahlguss 185 V erzielbaren mechanischen Eigenschaften vermittelt Bild 3. Dem Anlassdiagramm liegen zwei verschiedene betriebliche Induktionsofenschmelzen zugrunde. Die Haltezeit der Proben auf der jeweiligen Anlasstemperatur betrug 6 h, die anschliessende Abkühlung erfolgte im Ofen. Im Gegensatz zum Bereich zwischen 500 und 600 °C war bei tieferen oder höheren Anlasstemperaturen keine ausgeprägte Streckgrenze zu beobachten. Deshalb fehlen in Bild 3 für diese Gebiete entsprechende Angaben.

Die A_{c1} -Temperatur (Beginn der α - γ -Umwandlung) des Materials 185 V liegt im Bereich von etwa 620 °C, also tiefer als bei normalem 13prozentigem Chromstahlguss. Trotzdem lässt sich die Zugfestigkeit des neuen Werkstoffs innerhalb ziemlich weiten Grenzen verändern, wobei auch bei hohen Festigkeiten noch sehr gute Werte für Dehnung und Kerbschlagzähigkeit gemessen werden.

Den Zusammenhang zwischen Streckgrenzenverhältnis (Verhältnis der Streckgrenze zur Zugfestigkeit) und Streckgrenze zeigt Bild 4. Neben den Ergebnissen des Bildes 3 sind noch Messwerte weiterer Schmelzen eingetragen. Der Kurvenverlauf unterscheidet sich nur unwesentlich von demjenigen für normalen 13prozentigen Chromstahlguss.

Bild 5 zeigt, dass die Kerbschlagzähigkeit des Werkstoffs 185 V wesentlich über derjenigen des Materials 181 V liegt. Dieses weist beispielsweise bei einer Zugfestigkeit von 95 kp/mm² ungefähr die gleiche Kerbschlagzähigkeit auf wie normaler 13prozentiger Chromstahlguss bei der mit diesem Werkstoff üblicherweise angestrebten Zugfestigkeit von 70 kp/mm². Die mittlere chemische Zusammen-

Tabelle 2. Mittlere chemische Zusammensetzung der Schmelzen, auf die sich Bild 5 bezieht

Werkstoff	C (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	N (ppm)
181 V	0,065	0,022	0,015	12,9	1,5	0,35	350
185 V	0,035	0,016	0,011	12,5	3,9	0,38	203

setzung der in diesem Diagramm ausgewerteten Schmelzen gibt Tabelle 2 wieder.

Bild 6 veranschaulicht den Verlauf der Kerbschlagzähigkeit der Werkstoffe 181 V und 185 V in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Dem Streuband für Stahlguss 185 V liegen sechs, demjenigen für das Material 181 V zwei verschiedene Schmelzen zugrunde. Die Zugfestigkeit des Materials 185 V lag zwischen 88 und 93 kp/mm², diejenige des normalen 13prozentigen Chromstahlgusses bei 65 bzw. 73 kp/mm². Die Kerbschlagzähigkeit des neuen Werkstoffs fällt bei merklich tieferen Temperaturen ab als diejenige des Materials 181 V. Während beispielsweise bei diesem die untere Grenze des Streubandes bei rund 0 °C im ungünstigsten Fall den Wert von 5 kpm/cm² unterschreitet, fällt die untere Begrenzung des Streubandes von Stahlguss 185 V erst bei etwa -50 °C unter diesen Wert. Demnach besitzt der neue Werkstoff gegenüber normalem 13prozentigem Chromstahlguss eine erhöhte Sicherheit gegen Spröbruch.

Untersuchungen an Stahlgussplatten von 100 mm Dicke

Um ein Bild über die mechanischen Eigenschaften zu erhalten, die ein aus dem Material 185 V hergestelltes Stahlgussstück im Vergleich zu einem solchen aus 181 V aufweist, wurden aus unter Betriebsbedingungen hergestellten Schmelzen Platten von 100 × 200 × 400 mm gegossen. Unter der Gushaut und in der Mitte entnahm man aus den vollständig wärmebehandelten Platten Zug- und Kerbschlagproben (Tabelle 3). Der Stahlguss 185 V wurde gegenüber dem Werkstoff 181 V auf eine verhältnismässig hohe Zugfestigkeit vergütet. Auch in diesem Falle ist das neue Material durch ausgezeichnete Werte der Bruchdehnung, Brucheinschnürung und Kerbschlagzähigkeit charakterisiert. Ferner zeigt Tabelle 3, dass sich bei beiden Werkstoffen die mechanischen Eigenschaften über den untersuchten Querschnitt von 100 mm Dicke praktisch nicht ändern. Im Hinblick auf die später noch erwähnten Korrosionsversuche sei bereits darauf hingewiesen, dass der Werkstoff 185 V seine günstigen Eigenschaften im Zug- und Kerbschlagversuch in vollem Umfang beibehält, wenn der Molybdängehalt auf rund 1,5 % erhöht wird (Stahlguss 187 V).

Für die Prüfung der Biegewechselfestigkeit in künstlichem Meerwasser wurden aus 100 mm dicken Platten der Werkstoffe 185 V und 181 V 15 mm unter der Gushaut Stäbe nach Bild 7 herausgeschnitten und auf einer Schenk-Simplex-Maschine bei 3000 U/min. untersucht. Die Proben tauchten vollständig in künstliches Meerwasser nach DIN 50900 ein. Der Wasserbehälter war nach oben offen. Neben den Biegewechselfstäben wurden den Stahlgussplatten auch VSM-Kerbschlagproben und normale Zugproben entnommen. Während für den Werkstoff 181 V die Messwerte der Tabelle 3 gelten, stammte die Platte aus Stahlguss 185 V aus einer anderen Schmelze. Für dieses Probematerial betragen die gemessenen Eigenschaften

Streckgrenze (kp/mm ²)	82,6 / 82,6
Zugfestigkeit (kp/mm ²)	88,0 / 88,0
Dehnung, $l = 5d$ (%)	19,2 / 20,2
Brucheinschnürung (%)	60 / 64
Kerbschlagzähigkeit (kpm/cm ²)	13,1 / 13,2 / 13,6

Die Ergebnisse der Biegewechselfversuche sind in Bild 8 festgehalten. Obschon erst verhältnismässig wenig Messwerte vorliegen, kann man erkennen, dass sich der neue Werkstoff etwas günstiger verhält als Stahlguss 181 V.

Schweisbarkeit

Bekanntlich lässt sich normaler 13prozentiger Chromstahl mit artgleichen Elektroden nicht einfach schweissen. Zur Vermeidung von Schweisssrissen erweist es sich beispielsweise als notwendig, das

Tabelle 3. Mechanische Eigenschaften (Mittelwerte) von Stahlguss 185 V und 181 V in Platten von 100 mm Dicke

Messgrösse	Stahlguss 185 V		Stahlguss 181 V	
	Proben aus Rand	Proben aus Mitte	Proben aus Rand	Proben aus Mitte
Streckgrenze kp/mm ²	92,2	92,0	57,2	57,0
Zugfestigkeit kp/mm ²	96,3	96,1	74,0	73,5
Bruchdehnung, $l = 5d$ %	19,0	18,8	25,2	25,6
Brucheinschnürung %	63	61	63	60
Kerbschlagzähigkeit:				
Charpy-V-Kerb-Probe				
kpm/cm ²	12,5	12,0	7,4	8,0
VSM-Probe kpm/cm ²	14,4	14,1	10,2	12,2

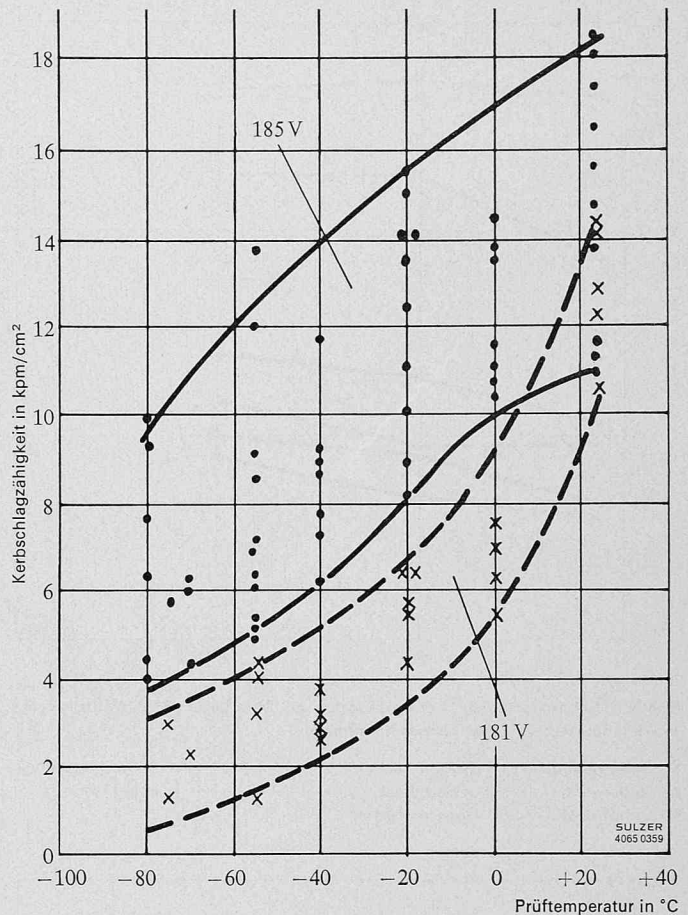


Bild 6. Kerbschlagzähigkeit (Charpy-V-Kerb-Probe) von Stahlguss 181 V und 185 V in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

Werkstück auf eine Temperatur von etwa 200 bis 400 °C vorzuwärmen und während den Schweißarbeiten auf dieser zu halten. Diese Massnahme ist besonders bei der Ausführung von Reparaturarbeiten in Kraftwerken umständlich.

Da der neue Werkstoff 185 V einen sehr tiefen Gehalt an Kohlenstoff und unerwünschten Stahlbegleitern aufweist, besitzt der im Schweißgut und in der thermisch beeinflussten Zone gebildete Martensit eine relativ niedrige Härte und gute Zähigkeit. Damit vermindert sich die Gefahr der Bildung von Schweisssrissen sehr stark. Sowohl eingehende Laborversuche wie auch die bisherigen Betriebserfahrungen haben den Beweis erbracht, dass die neue Stahlgussorte je nach Lage und Ausmass der Schweißung ohne oder nur mit sehr

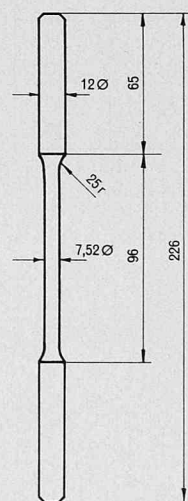


Bild 7. Probestab für Biegewechselfversuche

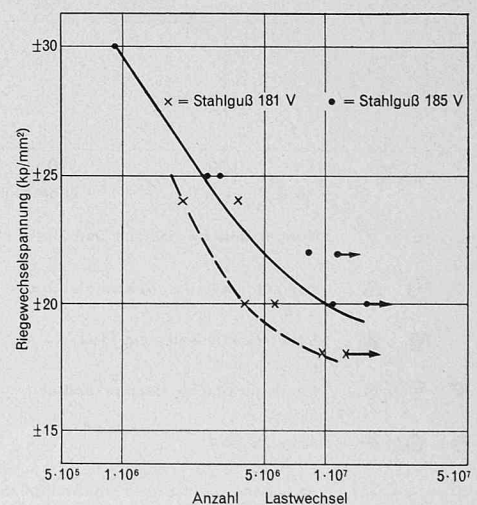


Bild 8. Verhalten von Stahlguss 181 V und 185 V im Biegewechselfversuch in künstlichem Meerwasser

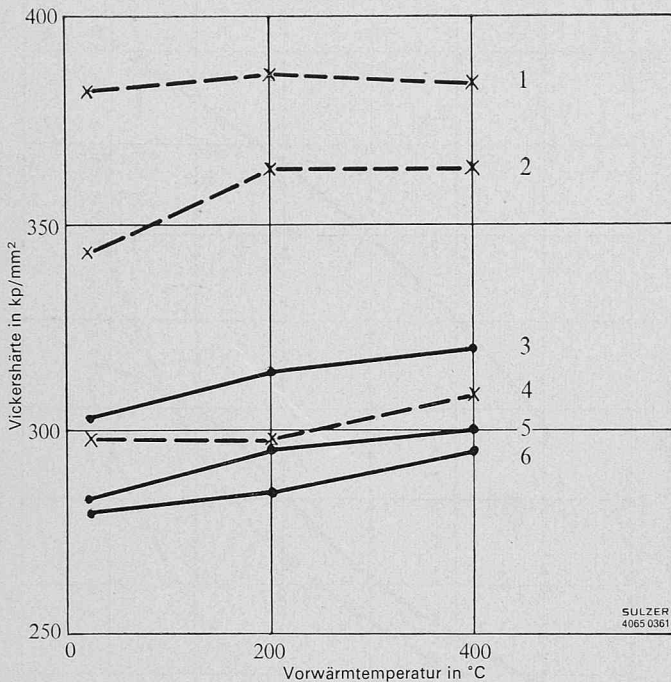
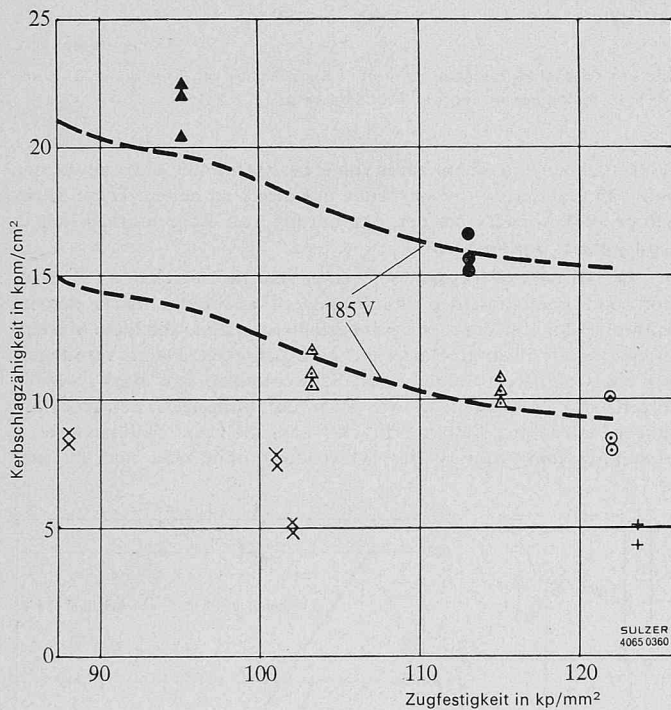


Bild 9. Vickershärte von Schweißungen an Stahlguss 185 V (Mittelwerte) in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur

- | | | | |
|--------------|-----------------|-------------|----------------|
| 1 Schweißgut | 4 Grundmaterial | x - - - - x | Schweißzustand |
| 2 Uebergang | 5 Uebergang | • - - - - • | angelassen |
| 3 Schweißgut | 6 Grundmaterial | | |



- | | | |
|-----------|---|--|
| + | x | Handelsübliche basisch umhüllte Elektroden |
| ⊙ | △ | Basisch umhüllte Spezialelektroden |
| ● | ▲ | Schutzgasschweißung (TIG) |
| ▼ | ▽ | Keine thermische Nachbehandlung |
| ● | ⊙ | Angelassen |
| - - - - - | | Streuband nach Bild 5 für Stahlguss 185 V |

Bild 10. Kerbschlagzähigkeit (VSM-Probe) in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit des Schweißgutes von Stahl 185 V bei Anwendung verschiedener Schweißverfahren und Elektroden

geringer Vorwärmung (80 bis 100 °C) rissfrei geschweisst werden kann.

Versuche mit basisch umhüllten Elektroden

Im Hinblick auf Konstruktions- und Reparaturschweißungen sind neben einer möglichst geringen Anfälligkeit des Werkstoffes gegen Schweißrisse Eigenschaften des Schweißgutes anzustreben, die denjenigen des gegossenen Grundmaterials möglichst nahe kommen. Von vorneherein dürfte verständlich sein, dass sich dieses Ziel bei Stahlguss 185 V nicht mit normalen 13prozentigen Chromstahlelektroden erreichen lässt. Daher liefern verschiedene Elektrodenhersteller basisch umhüllte artgleiche Elektroden.

Für unsere Versuche wurden in aus dem Werkstoff 185 V gegossene Platten V-förmige Nuten von rund 35 mm Tiefe und 20 mm mittlerer Breite gefräst. Um hinsichtlich der Wärmeabfuhr und der entstehenden Spannungen möglichst ungünstige Schweißbedingungen zu schaffen, spannte man die Platten vor dem Versuch mit Schraubzwingen auf einen Kupferklotz und schweisste mit handelsüblichen, artgleichen, basisch umhüllten Elektroden die Nuten zu. Während bei der ersten Platte die Schweißung ohne Vorwärmung erfolgte, wurde jede weitere Platte auf 200 bzw. 400 °C vorgewärmt.

Sowohl bei der Prüfung mit Hilfe des Magnetpulververfahrens als auch bei der Untersuchung mittels metallographischer Schläffe quer zur Schweißnaht erwiesen sich die geschweißten Proben als rissfrei. Bild 9 zeigt den Einfluss der Vorwärmtemperatur auf die Härteverteilung von Proben im Schweißzustand und solchen, die nach dem Schweißen einer Anlassbehandlung unterworfen wurden. Daraus ergeben sich die folgenden wichtigen Feststellungen:

a. In der thermisch beeinflussten Zone des Grundmaterials treten keine gefährlichen Härtespitzen auf. Vielmehr fällt die Härte vom Schweißgut zum unbeeinflussten Grundmaterial hin kontinuierlich ab.

b. Die Härteunterschiede zwischen Schweißgut und Grundmaterial sind im Schweißzustand verhältnismässig gering. Durch geeignete Anlassbehandlung können in allen drei interessierenden Zonen gut übereinstimmende Härtewerte erzielt werden.

c. Eine steigende Vorwärmtemperatur verursacht eine gewisse Härtesteigerung der Schweißung. An Kerbschlagproben aus dem Schweißgut wurde parallel dazu ein leichter Abfall der Kerbschlagzähigkeit beobachtet.

Quer zur Schweißnaht entnommene Zugproben brachen ausnahmslos im unbeeinflussten Grundmaterial. Bild 10 veranschaulicht die Ergebnisse von Zug- und Kerbschlagproben (VSM) aus dem Schweißgut von nicht vorgewärmten Schweißproben. Wenn auch die Eigenschaften des gegossenen Grundmaterials noch nicht erreicht werden, so kann man die erzielten Werte doch als brauchbar beurteilen. Die handelsüblichen Elektroden des Typs 185 V brachten gegenüber normalen 13prozentigen Chromstahlelektroden einen bemerkenswerten Fortschritt.

Gemeinsam mit einem Elektrodenhersteller wird an der Weiterentwicklung der basisch umhüllten Schweißelektroden des Typs 185 V gearbeitet. Mit einer artgleichen Spezialelektrode wurden Schweißversuche ohne Vorwärmung in der beschriebenen Weise durchgeführt. Diese Proben erwiesen sich ebenfalls als rissfrei, und die Härteverteilung entsprach praktisch den in Bild 9 dargestellten Werten. Über den Zusammenhang zwischen Kerbschlagzähigkeit und Zugfestigkeit des einen Kohlenstoffgehalt von 0,053 % aufweisenden Schweißgutes orientiert Bild 10. Gegenüber den handelsüblichen Elektroden des Typs 185 V ist ein grosser Fortschritt zu verzeichnen, liegen doch die Zähigkeitswerte am unteren Rand des Streubandes für vergüteten Stahlguss 185 V.

Schutzgasschweißungen

Für das Schweißen von Stahlguss 185 V erschliesst die Argon-Schutzgasschweißung ebenfalls interessante Möglichkeiten. In einer Versuchsreihe wurden Steiflankennähte von 10 × 15 mm² nach dem TIG-Verfahren geschweisst. Als Schweißdraht verwendete man Stäbe aus Stahlguss 185 V. Die Zusammensetzung des Schweißgutes entsprach den für das gegossene Grundmaterial geltenden Vorschriften. Der Kohlenstoffgehalt lag beispielsweise bei 0,022 %. Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften des Schweißgutes erfolgte sowohl an Proben im Schweißzustand als auch an solchen, die man nach dem Schweißen einer Anlassbehandlung unterzogen hatte (Bild 10). Die im Schweißzustand und in der angelassenen Probe erzielten Zähigkeitswerte liegen am oberen Rand des für Stahlguss 185 V gefundenen Streubandes.

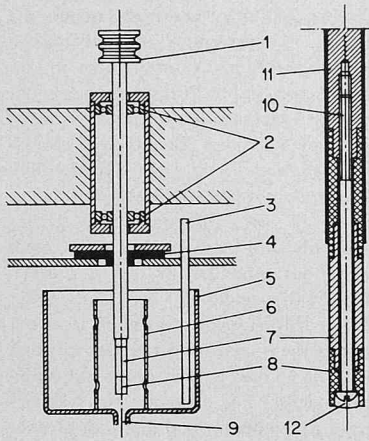


Bild 11. Probenanordnung für die Korrosionsversuche mit rotierenden Zylindern

- 1 Antrieb
- 2 Lagerung
- 3 Einlass
- 4 Dichtung
- 5 Gefäß
- 6 Plexiglaszylinder
- 7 Probe
- 8 Isolation
- 9 Auslass
- 10 Schraube mit PA-Schrumpfschlauch
- 11 Stahlwelle mit PA-Schrumpfschlauch und Innengewinde
- 12 Schraubenkopf mit Epoxydharz abgedeckt

Korrosion²⁾

Bekanntlich beruht die Korrosionsbeständigkeit der sogenannten rostfreien Stähle auf ihrer mehr oder weniger ausgeprägten Eigenschaft, sich mit einer werkstoffgebundenen Schutzschicht aus Chromoxyd zu überziehen, d.h. diese Werkstoffe sind passivierbar. Der Widerstand solcher Stähle gegen chemische Einflüsse hängt deshalb in erster Linie von ihrem Chromgehalt ab. Wie R. Olivier [2] nachwies, genügt ein Chromgehalt von 12,5 %, um die Passivschicht an Luft aufzubauen; man spricht von selbstpassivierenden Stählen.

Eisenlegierungen mit hohen Chromgehalten erliegen in wässrigen, luftgesättigten Korrosionsmitteln weniger der Flächenkorrosion als vielmehr dem Lochfrass und der Spannungsrisskorrosion. Die inter- und transkristalline Rissanfälligkeit interessiert in diesem Zusammenhang nicht, da sie vorwiegend an passivierbaren Stählen mit austenitischem Gefüge oder an unlegierten Stählen beobachtet wird.

Unsere Untersuchungen sollten Anhaltspunkte über die Korrosionsbeständigkeit des Stahlgusswerkstoffes 185 V und der modifizierten Legierung 187 V in stark korrosivem, depassivierendem Medium, nämlich in 3prozentiger Kochsalzlösung, vermitteln. Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte als Vergleichsversuche mit dem Chromstahlguss 181 V. Dabei interessierte nicht nur der Einfluss der an der Oberfläche des Materials herrschenden Strömung auf Flächenabtrag und Lochfrassanfälligkeit, sondern auch die Möglichkeiten der Korrosionsmessung mit Hilfe der Stromdichte-Potentialkurven. Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe geht aus Tabelle 4 hervor. Das gesamte Probenmaterial wurde aus Stahlgussplatten von 100 mm Dicke herausgearbeitet.

Messung des Korrosionsabtrags und Untersuchung der Lochfrassanfälligkeit

Im allgemeinen ist es wenig sinnvoll, Korrosionsversuche in der Weise durchzuführen, dass man an in eine angreifende Lösung eingetauchten Plättchen die Gewichtsverluste periodisch ermittelt. Kanteneffekte, unkontrollierte, durch Konvektion entstandene Strömungen, variierender Gehalt an gelöstem Sauerstoff und Kohlendioxyd usw. lassen höchstens eine qualitative Beurteilung des untersuchten Materials zu, die im Zusammenhang mit unseren Problemen keineswegs den Anforderungen genügen konnte. Vielmehr wurde angestrebt, das Korrosionsverhalten in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit unter genau definierten und reproduzierbaren Bedingungen zu erfassen. Als Probenform diente der Zylinder, dessen Kreisflächen mit Kunststoff abgedeckt wurden, um Kanteneffekte während des Korrosionsvorganges zu vermeiden. Die Proben drehten in einem sie umschliessenden Plexiglaszylinder um ihre Längsachse (Bild 11).

²⁾ Im chemischen Laboratorium von Gebr. Sulzer unter der Leitung von Dr. E. Fot durchgeführte Arbeit.

Tabelle 4. Chemische Zusammensetzung der für die Korrosionsversuche benutzten Materialien (in %)

Werkstoff	C	P	S	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
181 V	0,08	0,021	0,016	0,48	0,72	13,0	1,4	0,39
185 V	0,04	0,013	0,010	0,30	0,80	12,7	3,9	0,38
187 V	0,03	0,012	0,014	0,54	0,88	12,0	4,7	1,46

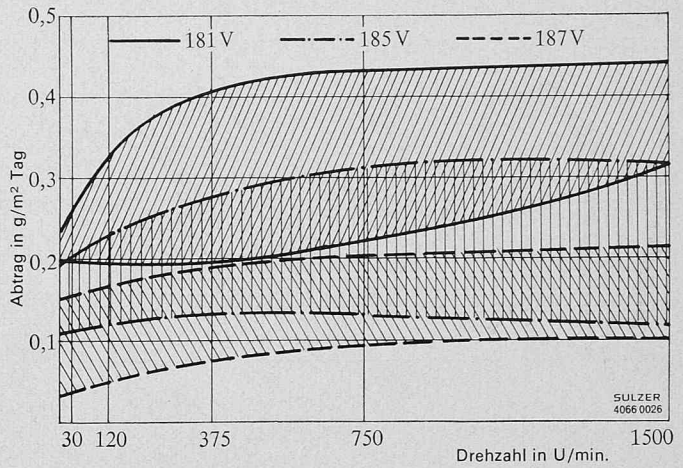


Bild 12. Bereiche der Korrosion der Stähle 181 V, 185 V und 187 V in Abhängigkeit von der Drehzahl der Proben

Bei bekannten Drehzahlen und Abmessungen der beiden Zylinder war die entstehende Strömung nach der Formel

$$Ta = \sqrt{\frac{d}{R}} Re$$

zu berechnen. Darin bedeuten:

- Re Reynoldszahl d Spaltbreite [mm]
 Ta Taylorzahl R Radius der Probe [mm]

Die Versuche wurden an den drei Qualitäten 181 V (Versuchsdauer 4000 h), 185 V (2500 h) und 187 V (1000 h) durchgeführt. Bild 12 gibt den Korrosionsabtrag in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl der Proben wieder. Wie daraus ersichtlich, wurde ein Abtrag von 0,45 g/m²Tag nicht überschritten. Damit erklärt sich indirekt das relativ breite Streuband der für jedes Material gefundenen Werte.

Chloride besitzen die Eigenschaft, einen rostfreien Stahl örtlich zu aktivieren. Diese Bereiche sind nur kurze Zeit aktiv, so dass in jedem Oberflächenbereich ständig Passivierungs- und Depassivierungserscheinungen auftreten. Bei stark chloridempfindlichem Material entsteht Lochfrass; nur schwer aktivierbare Stähle erleiden dagegen eine Korrosion, die praktisch vom normalen Flächenabtrag nicht zu unterscheiden ist, welche aber – lokal betrachtet – unregelmässig vor sich geht und sich deshalb in Schwankungen zwischen einzelnen Proben (gleich wie zwischen verschiedenen Oberflächenbezirken) bemerkbar macht.

Bei näherer Betrachtung der gefundenen Werte lassen sich einige recht interessante Schlussfolgerungen ziehen:

Der stärkste Abtrag wurde am Stahl 181 V gemessen, obwohl dieses Material den höchsten Chromgehalt aufwies (0,3 % mehr als 185 V und 1 % mehr als 187 V). Dieser höhere Abtrag und auch die grössere Streuung der Messergebnisse ist auf die stärkere Chloridempfindlichkeit zurückzuführen, herrührend von den Gefügeinhomogenitäten (Delta-Ferrit, Chromkarbid) und der damit verbundenen relativen Instabilität der Chromoxyd-Schutzschicht. Eine Verbesserung wird eindeutig durch Aussonderung des Delta-Ferrits und der Verkleinerung der Anteile an Chromkarbid erreicht. Der von 1 auf 4 % erhöhte Nickelgehalt spielt dabei eine nur unbedeutende Rolle. Er bildet nicht, wie irrümlicherweise häufig angenommen wird, einen «veredelnden Legierungsbestandteil». Noch besser als für 185 V liegen die Verhältnisse für den Werkstoff 187 V. Neben dem noch geringeren Kohlenstoffgehalt spielt in diesem Falle der Molybdänzusatz von 1,5 % eine entscheidende Rolle. Aus bis heute noch nicht abgeklärten Gründen erhöht nämlich Molybdän die Stabilität der Chromoxydschicht gegen aktivierende Stoffe. Diese Feststellung unterstreicht obige Aussage, wonach ebenmässige Korrosion an hochlegierten Chromstählen nicht als eigentlicher Flächenangriff aufzufassen ist. Entscheidend für den Einsatz der Materialien in stark korrosiven Medien ist schliesslich der praktisch vernachlässigbare Einfluss der Strömung auf die Korrosionsgeschwindigkeit bis zu einer Umfangsgeschwindigkeit von 1 m/s. Diese für die Beurteilung der Qualität der neuen Werkstoffe 185 V und 187 V recht wichtigen Feststellungen konnten mit Hilfe von Stromdichte-Potentialkurven teilweise bestätigt und gefestigt werden.

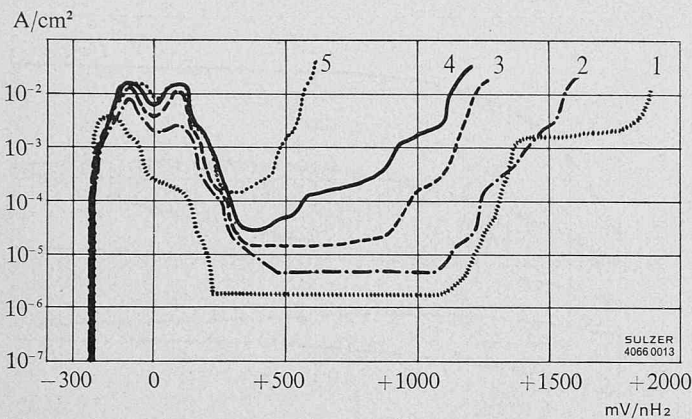


Bild 13. Potentialkurven von Stahlguss 181 V

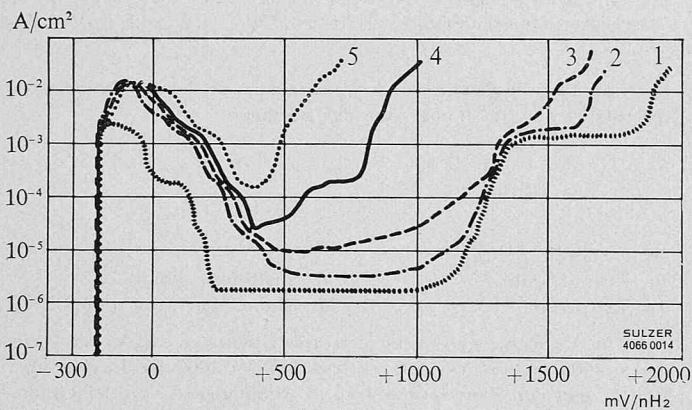


Bild 14. Potentialkurven von Stahlguss 185 V

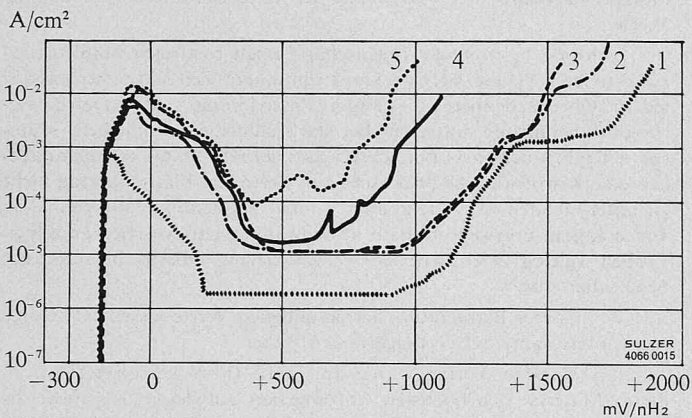


Bild 15. Potentialkurven von Stahlguss 187 V

Bilder 13 bis 15. Stromdichte-Potentialkurven der Stahlgussarten 181 V, 185 V, 187 V, in 2 n-Schwefelsäure mit verschiedenen Chloridgehalten. Das Potential wurde um 10 mV/2 min geändert

- | | |
|--|--|
| 1: 2 n H ₂ SO ₄ | |
| 2: 2 n H ₂ SO ₄ + 7 000 ppm Cl ⁻ | 4: 2 n H ₂ SO ₄ + 12 000 ppm Cl ⁻ |
| 3: 2 n H ₂ SO ₄ + 10 000 ppm Cl ⁻ | 5: 2 n H ₂ SO ₄ + 15 000 ppm Cl ⁻ |

Untersuchung der Korrosionsanfälligkeit mit Hilfe der Stromdichte-Potentialkurve

Zweck der elektrochemischen Untersuchungen war vor allem eine Bestätigung der mit den Langzeitversuchen erzielten Ergebnisse. Im weiteren dienten die Messungen ganz allgemein als Beispiel für die Verwendungsmöglichkeiten von Stromdichte-Potentialkurven in der Korrosionsforschung.

Die Durchführung sämtlicher Messungen erfolgte in 2n-Schwefelsäure mit 0 bis 15000 ppm in Form von Natriumchlorid zugesetztem Chlorid. Mit den so gewählten Versuchsbedingungen wurde angestrebt, zusätzlich Aussagen über die Stabilität der Passivschicht zu erhalten. Ein Vergleich der Kurvenbilder 13 bis 15 zeigt, dass Passivierung für

alle drei Stahlqualitäten bei 200 bis 240 mV, gemessen gegen die Normalwasserstoff-Elektrode, eintritt. Die geringen Unterschiede im Chromgehalt und die Gefügeinhomogenitäten kommen also in der in reiner Schwefelsäure gemessenen Stromdichte-Potentialkurve nicht zum Ausdruck. Mehr Anhaltspunkte vermittelten hingegen die in chloridhaltiger Schwefelsäure gemessenen Kurven. Bei einem Chloridgehalt von 7000 ppm traten die Unterschiede noch nicht sehr deutlich zutage. Die Messergebnisse wichen zudem nicht sehr stark von den in reiner Säure erhaltenen Ergebnissen ab, was auf eine relativ grosse Unempfindlichkeit gegen Chloride schliessen lässt. In den 10000 ppm Chloride enthaltenden Säuren begannen sich die in den Langzeitversuchen gemachten Feststellungen abzuzeichnen. Bei allen unter diesen Bedingungen durchgeführten Messungen durchlief der 181 V-Stahlguss nur einen kurzen Passivbereich, während sich der Einfluss der Chloridionen beim Werkstoff 185 V nur in der etwas erhöhten Korrosionsstromdichte bemerkbar machte. Die Tendenz zur Aktivierung war also schon bedeutend geringer, jedoch noch deutlich grösser als beim Stahlguss 187 V, der sich in der Lösung mit 10000 ppm genau so gut passivieren liess wie mit 7000 ppm. Bei 12000 und 15000 ppm schliesslich konnte der molybdänreiche Stahl allein seine Passivität über einen grösseren Potentialbereich aufrecht erhalten. Dies beweist eindeutig das überlegene Korrosionsverhalten des Stahls 187 V, während aufgrund der Stromdichte-Potentialkurven allein die Unterschiede zwischen den Qualitäten 181 V und 185 V nicht so ausgeprägt zum Ausdruck kommen.

Widerstand gegen Sanderosion

Das in Wasserkraftanlagen verarbeitete Wasser weist vielfach einen gewissen Gehalt an Sand auf, der zu einer mehr oder weniger starken Abnutzung der durchströmten Maschinenteile führt. Die dadurch veränderte Geometrie der Durchflusskanäle bewirkt eine Störung der Strömungsverhältnisse in der Maschine. Daraus können sich in zweifacher Hinsicht unangenehme Folgen ergeben; nämlich sowohl eine Verschlechterung des Wirkungsgrades der Maschine wie auch eine Begünstigung der Kavitation.

Die Prüfung von Werkstoffen auf ihren Widerstand gegen Verschleiss ist zweifellos ein schwieriges und noch keineswegs gelöstes Problem. Im allgemeinen erweist es sich als unmöglich, aus Laboratoriumsergebnissen quantitative Schlüsse auf das Betriebsverhalten eines bestimmten Werkstoffs zu ziehen. Für den Werkstoffachman, der beispielsweise das Material für ein Turbinenlaufrad zu wählen hat, ist es jedoch bereits sehr wertvoll, wenn er mit Hilfe eines Kurzzeitversuches im Laboratorium wenigstens einen Relativvergleich zwischen verschiedenen Werkstoffen anstellen kann. Unter diesem Gesichtspunkt hat sich für die Prüfung von Materialien auf ihren Widerstand gegen Sanderosion das von W. Stauffer [3] vorgeschlagene Schleiftopfverfahren als nützlich erwiesen (Bild 16). Am Umfang einer kreisförmigen Scheibe sind zwei bolzenförmige Prüfkörper aus dem zu untersuchenden Material befestigt. Ausserdem werden als Vergleichsmaterial am Umfang zwei gleiche Bolzen aus einem Kohlenstoffstahl mit etwa 45 kp/mm² Zugfestigkeit angebracht. Die gesamte Anordnung rotiert mit 600 U/min in einem Gemisch aus 2 Gewichtsteilen Quarzsand (Körnung 3-5 mm) und einem Gewichtsteil Wasser. Über eine Versuchsdauer von 7 h wird der mittlere Gewichtsverlust der Prüf- und Vergleichskörper ermittelt. Der durch die Widerstandsziffer *W* gekennzeichnete Widerstand des untersuchten Materials berechnet sich wie folgt:

$$W = \frac{\text{Gewichtsverlust der Vergleichsprobe}}{\text{Gewichtsverlust des Prüfkörpers}}$$

Bild 17 veranschaulicht die Messergebnisse von Chromstahlguss 181 V und 185 V. Dieser zeigt unter den gewählten Prüfbedingungen einen besseren Widerstand gegen Sanderosion als das Material 181 V. Die Verbesserung steht offenbar in erster Linie mit der erhöhten Zugfestigkeit bzw. Härte in Zusammenhang.

Widerstand gegen Kavitation

Trotz allen konstruktiven Bemühungen lässt sich das Auftreten von Kavitation in hydraulischen Maschinen nicht immer vollständig vermeiden. Dieser Gefahr sind vor allem Anlagen ausgesetzt, die mit stark wechselnder Leistung, die vielfach weit von den Optimalbedingungen entfernt ist, betrieben werden. Durch Sand erodierte Stellen können ebenfalls Anlass zu Kavitation geben. Deshalb ist es wichtig, dass dem Konstrukteur ein Werkstoff zur Verfügung steht, der dem Kavitationsangriff einen möglichst grossen Widerstand bietet.

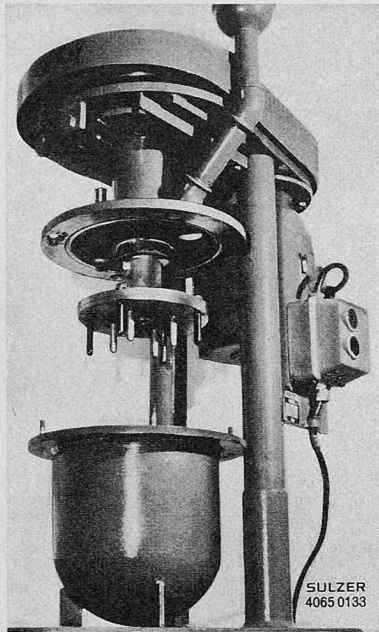


Bild 16 (links). Maschine nach Stauffer [3] zur Prüfung von Werkstoffen auf ihren Widerstand gegen Sanderosion

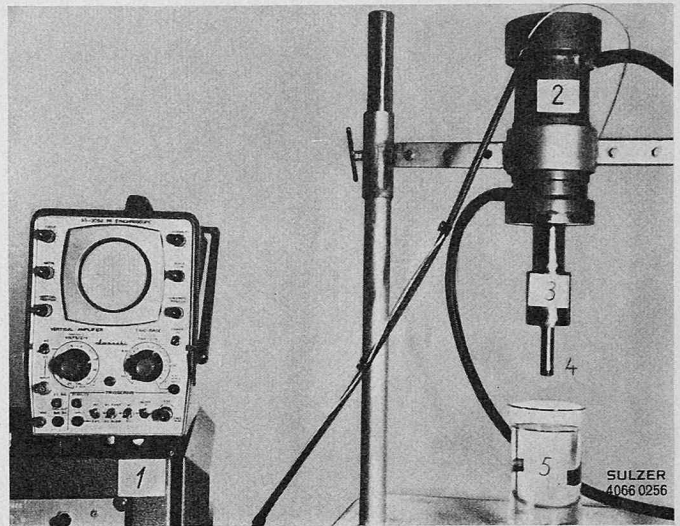


Bild 18 (rechts). Magnetostruktives Schwinggerät zur Prüfung von Werkstoffen auf ihren Widerstand gegen Kavitation

- 1 Röhrengenerator
- 2 Magnetostruktiver Schwinger
- 3 Amplitudenverstärker
- 4 Prüfkörper
- 5 Becherglas

Bei der Prüfung von Werkstoffen auf ihren Kavitationswiderstand im Labor-Kurzzeitversuch stellen sich bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das praktische Betriebsverhalten ähnliche Probleme wie beim Sanderosions-Versuch. Für einen Relativvergleich verschiedener Werkstoffe werden in neuerer Zeit vor allem magnetostruktive Schwinggeräte benutzt (Bild 18).

Ein Röhrengenerator 1 versorgt den magnetostruktiven Schwinger 2 mit hochfrequentem Wechselstrom. Am unteren Ende des Amplitudenverstärkers 3 wird der zylindrische Prüfkörper 4 von 15,9 mm Durchmesser und 6,4 mm Höhe angeschraubt. Beim Versuch taucht dieser bis zu seiner halben Höhe in die in einem Becherglas 5 befindliche Prüfflüssigkeit ein. An der unteren Stirnseite des schwingenden Prüfkörpers wird Kavitation erzeugt. Die Apparatur ist so gebaut, dass die Probe entweder einer kontinuierlichen Schwingbewegung ausgesetzt oder einer pulsierenden Kavitation unterworfen werden kann, bei der sich gemäss einem Vorschlag von M. S. Plesset [4] Schwing- und Ruhephasen in regelmässigen Abständen folgen.

Versuche bei kontinuierlicher Kavitation

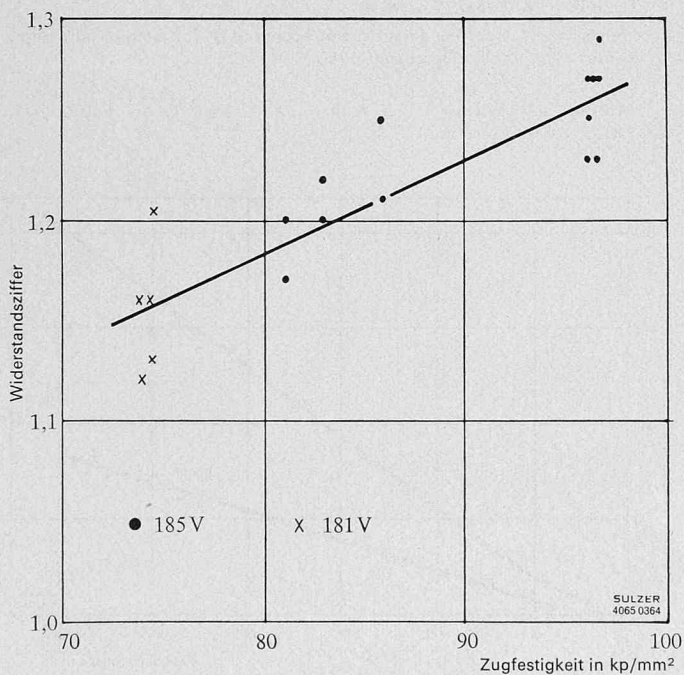
Für die kontinuierlichen Kavitationsversuche wurde eine Schwingfrequenz der Probe von 19600 Hz, eine Amplitude der Proben-

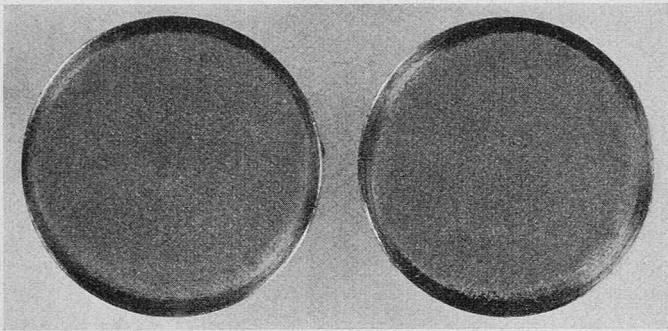
stirnfläche von $20 \mu\text{m}$ und als Prüfflüssigkeit destilliertes Wasser von 15°C gewählt.

Das Versuchsmaterial stammte aus 40 mm dicken Probestäben. Die Zugfestigkeit des Werkstoffs 181 V lag bei 65 kp/mm^2 , diejenige des Stahlgusses 185 V bei 93 kp/mm^2 . Als Mass für den Kavitationswiderstand diente der in Abhängigkeit von der Versuchsdauer ermittelte Gewichtsverlust der Probe. Ausserdem wurde das Aussehen der Probenoberfläche beobachtet. Die im Bild 19 wiedergegebenen Messpunkte stellen Mittelwerte von zwei verschiedenen Proben dar. Daraus geht hervor, dass der Stahlguss 185 V einen Gewichtsverlust aufweist, der im Vergleich zu demjenigen des Stahlgusses 181 V, bezogen auf gleiche Versuchsdauer, nur etwa halb so gross ist. Den besseren Kavitationswiderstand des neuen Materials dokumentieren auch die Bilder 20 und 21. Bei beiden Werkstoffen tritt unter den gewählten Versuchsbedingungen durch den Kavitationsangriff zunächst eine gleichmässige feine Aufrauung der Probenoberfläche ein, wobei der Materialabtrag beim Stahlguss 181 V grösser ist als beim Werkstoff 185 V. Das Material 181 V zeigt schon nach 4 h in der aufgerauhten Oberfläche tiefere Löcher, die an Grösse und Anzahl im weiteren Verlauf des Versuchs stark zunehmen. Auf der Probenoberfläche des Stahlguss 185 V treten demgegenüber erst nach 16 h, also nach der 4fachen Zeit, die ersten Löcher auf.

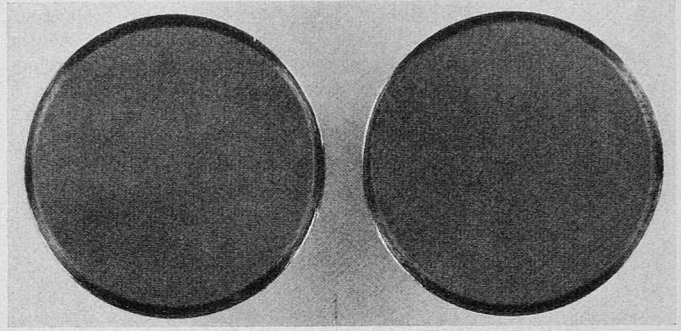
Versuche bei pulsierender Kavitation

In einer weiteren Untersuchung wurden die beiden interessierenden Werkstoffe einem kombinierten Kavitations- und Korrosions-

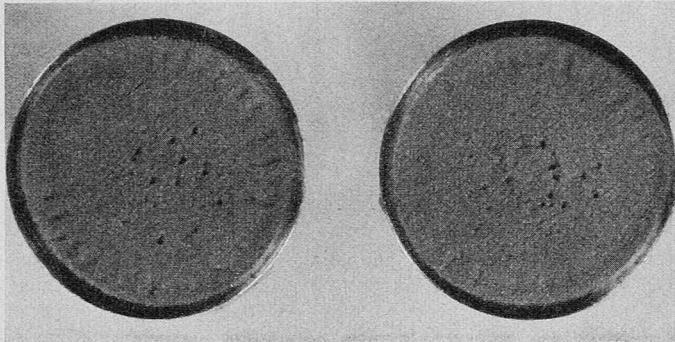




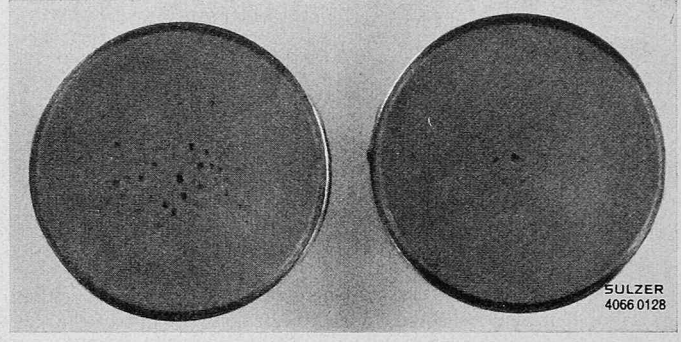
1,5 Stunden



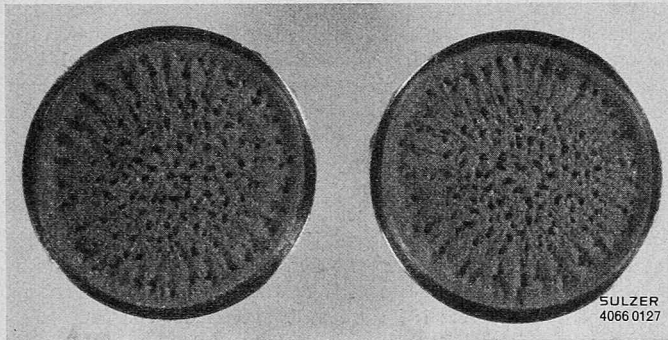
8 Stunden



4 Stunden



16 Stunden



10 Stunden

Bild 20. Einfluss der Versuchsdauer auf das Aussehen der kavitierten Oberfläche von Proben aus Stahlguss 181 V bei kontinuierlicher Kavitation in destilliertem Wasser

angriff ausgesetzt. Dies geschah in der Weise, dass man die Proben gemäss einem Vorschlag von *M. S. Plesset* [4] einer pulsierenden Kavitation in künstlichem Meerwasser nach DIN 50900 (Wassertemperatur 15 °C) aussetzte, bei der Schwing- und Ruhephasen in regelmässigen Abständen folgten. Bild 22 zeigt den für unsere Versuche gewählten Amplitudenverlauf. Die Schwingungsfrequenz betrug 19600 Hz. Das Probematerial stammte aus den gleichen Stahlgussstäben wie bei den kontinuierlichen Kavitationsversuchen.

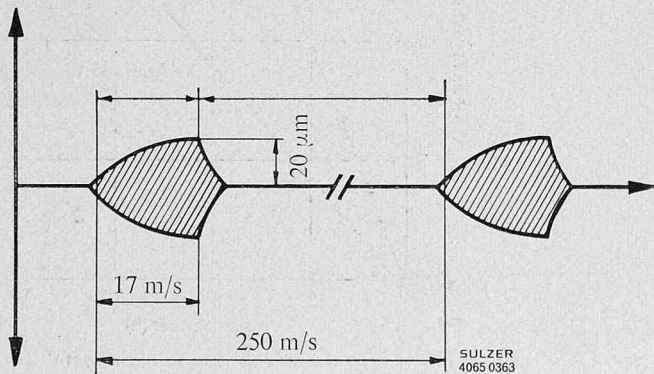


Bild 22. Amplitudenverlauf bei pulsierender Kavitation

Bild 21. Einfluss der Versuchsdauer auf das Aussehen der kavitierten Oberfläche von Proben aus Stahlguss 185 V bei kontinuierlicher Kavitation in destilliertem Wasser

Bild 23 zeigt die Versuchsergebnisse. Die eingetragenen Punkte stellen Einzelwerte dar. Das Diagramm enthält die Ergebnisse von zwei Proben pro Werkstoff. Auch unter den Bedingungen der pulsierenden Kavitation in künstlichem Meerwasser zeigt Stahlguss 185 V gegenüber dem Material 181 V, bezogen auf gleiche Versuchsdauer, nur einen etwa halb so grossen Gewichtsverlust.

Literaturverzeichnis

- [1] *Zingg, E. und Geiger, Th.*: «Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik», 23 (1957), Heft 3 und 4.
- [2] *Olivier, R.*: «Passivität von Eisen-Chromlegierungen», Diss. Leiden, 1955.
- [3] *Stauffer, W.*: «Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik», 24 (1958), S. 218/30.
- [4] *Plesset, M. S.*: California Institute of Technology, Pasadena, California, Report No. 85-22, December 1962.

Adresse des Verfassers: *R. Küpfer*, dipl. Ing., Gebr. Sulzer AG, Abt. 4022, 8400 Winterthur.

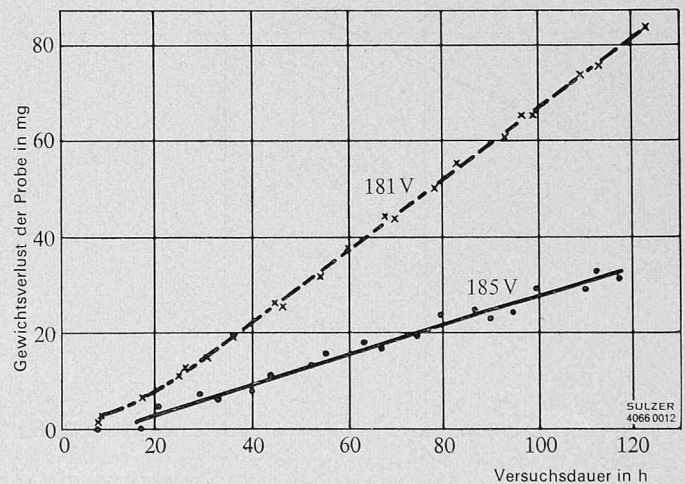


Bild 23. Gewichtsverlust von Stahlguss 181 V und 185 V bei pulsierender Kavitation in künstlichem Meerwasser