

Neuste Entwicklungen von thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustählen – Erfahrungen aus Offshore-Industrie und Stahlwasserbau

Der vorliegende Artikel berichtet über die neusten Entwicklungen im Bereich der thermomechanisch gewalzten Grobbleche. Stähle mit einer Mindeststreckgrenze bis 500 MPa können heute in Dicken bis 100 mm über thermomechanische Walzung hergestellt werden. Diese Stähle zeichnen sich besonders durch sehr gute Verarbeitungseigenschaften, insbesondere Schweißbarkeit, aus. Erste Erfahrungen mit solchen Stählen aus dem Bereich der Offshore-Konstruktionen und des Stahlwasserbaus liegen vor. Über diese wird im Rahmen dieses Artikels berichtet.

Newest development for thermomechanically rolled steels plates – experiences with offshore constructions and hydropower plants.

This article reports about the newest development for thermomechanically rolled steels plates. Steel products with a minimum yield strength of 500 MPa can today be produced by thermomechanical rolling in a thickness range up to 100 mm. The first-mentioned steel plates are especially characterized by very good fabrication properties, in particular an excellent weldability. The article will also describe the first experiences gained with these steel grades in the fields of offshore construction and hydro power plants.

1 Einleitung

Das Anforderungsprofil an moderne Produkte im Stahlbau legt für die Stahlerzeuger klare Richtlinien an das entsprechende Eigenschaftsprofil von Produktneuentwicklungen fest. Neben dem Ziel möglichst guter mechanischer Eigenschaftswerte, die sich insbesondere in einer optimalen Lösung des Spannungsverhältnisses zwischen Festigkeit und Zähigkeit des Werkstoffs äußern, spielen die Verarbeitungseigenschaften eine wesentliche Rolle, die dem Stahlbauer eine möglichst leichte und somit kostengünstige Bearbeitung des Werkstoffs ermöglichen sollen.

Insbesondere den thermomechanisch gewalzten Stählen kommt dabei eine erhöhte Bedeutung zu, da mit ihnen eine Optimierung so unterschiedlicher Zielgrößen wie guter mechanischer Eigenschaftswerte und exzellenter Verarbeitungseigenschaften ermöglicht wird [1] bis [4]. Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle mit einer Nennstreckgrenze von 460 MPa sind heute im bauaufsichtlich überwachten Bereich Standard und werden in immer größerem Umfang insbesondere für Großkonstruktionen eingesetzt [5]. Solche Stähle sind heute als S 460 M/ML in der DIN EN 10025-4 genormt. Fast alle neueren Offshore-

Plattformen in der Nordsee sind aus solchen Stählen gefertigt. Ihre Eigenschaften sind in der EN 10225, der API 2W, der BS 7191 und der norwegischen Norm Norsok festgelegt. Aufbauend auf den Erfahrungen mit diesem Werkstoff wurde in den letzten Jahren versucht, Feinkornbaustähle mit noch höheren Streckgrenzen und trotzdem sehr guter Schweißbarkeit über das thermomechanische Walzen zu entwickeln – und dies auch für schwere Schweißkonstruktionen, die Blechdicken bis 100 mm einsetzen.

So liegen inzwischen erste Erfahrungen mit der Produktion und der Verwendung von thermomechanisch gewalzten Grobblechen mit einer Mindeststreckgrenze bis zu 500 MPa vor. Solche Werkstoffe sind zwar heute – außer in der Norsok – noch nicht genormt, werden aber schon für Konstruktionen mit hohen Anforderungen an Festigkeit und Sprödbruchsicherheit wie Offshore-Plattformen [6] und Wasserkraftwerke eingesetzt. Da die Verwendung solcher Werkstoffe auch in anderen Stahlbauprojekten vorteilhaft erscheint, soll an dieser Stelle über die bisherigen Erfahrungen berichtet werden.

2 Besonderheiten der Herstellung höherfester Bleche

Metallurgisch wird vor allem auf zwei Mittel zurückgegriffen, um höherfeste Stahlsorten zu erzeugen [1]. Durch Legieren – ob mit Mischkristallbildnern (wie Mangan, Nickel, Chrom) oder interstitiell gelösten Atomen (Kohlenstoff, Stickstoff) – kann die Festigkeit leicht erhöht werden. Dies kann aber wie z. B. beim aus Kostengründen gängigsten Legierungselement Kohlenstoff zu einer Beeinträchtigung der Schweißbarkeit führen.

Einen günstigeren Mechanismus stellt deshalb die Kornfeinung dar. Ein feines Korn resultiert nicht nur in einer höheren Streckgrenze durch die Versetzungsbehinderung an den Korngrenzen. Gleichzeitig wird damit auch die Zähigkeit erhöht (Beziehung von *Hall-Petch*). Diese Kornfeinung wird in der Regel durch eine Mikrolegierung mit Niob, Titan und/oder Vanadin sowie eine geeignete Wärmebehandlung erreicht. Die Art der Wärmebehandlung steht dabei aber auch im engen Zusammenhang mit der chemischen Zusammensetzung des Stahles und somit den Verarbeitungseigenschaften. Folgende Prozesse und damit Stahlgruppen lassen sich grob unterscheiden (Bild 1): – Normalisierte Stähle: Aus dem Normalglühen, dem durchgreifenden Erwärmen auf Temperaturen über der Ferrit-Austenit-Umwandlungstemperatur mit folgender

langsamer Abkühlung, entsteht eine feine, regelmäßige ferritisch/bainitische Gefügestruktur, die in Verbindung mit Legierungselementen zu entsprechend hohen Streckgrenzen führt (Prozeß B in Bild 1). Heute kann diese Art der Wärmebehandlung je nach Blechdicke und Stahlqualität durch ein normalisierendes Walzen, das in seinem Ergebnis dem zweistufigen Prozeß des Warmwalzens mit anschließendem Normalglühen entspricht, dargestellt werden. Höherfeste Stähle bis zu einer Streckgrenze von 460 MPa werden dabei in der Regel durch eine Legierung von Vanadin und Stickstoff zur Nutzung der festigkeitssteigernden Wirkung der entstehenden Vanadiumkarbonitride hergestellt. Mit dem Stahl StE51 wurde in der Vergangenheit auch mit diesem Konzept versucht, einen Stahl der 500-MPa-Streckgrenzenklasse herzustellen. Seine Verarbeitungsnachteile haben ihn aber im Markt nicht Fuß fassen lassen.

– Vergütete Stähle: Diese klassische Verfahrensrouten zur Herstellung höherfester Stähle besteht aus einem Härten (d. h. einer relativ schroffen Abkühlung von Austenitierungstemperatur in der Regel auf Raumtemperatur) des Werkstoffes mit einem folgenden Anlassen (Prozeß C in Bild 1). Durch diese Sequenz bildet sich im Stahl im ersten Schritt eine Gefügestruktur mit sehr guten Festigkeitseigenschaften (Bainit und Martensit) aus, die im zweiten Schritt, dem Anlassen, durch Entspannung und Umbildungen von Gefügebestandteilen in ihren Zähigkeitseigenschaften verbessert werden kann. So werden im kleineren Wanddickenbereich Stähle bis zu einer Streckgrenze von sogar 1100 MPa hergestellt. Die zähigkeitsverbessernde Wirkung des Anlassens ist an einem Beispiel in Bild 2 gezeigt. Darin stehen die Bezeichnungen A1 bis A4 für unterschiedliche Anlaßbedingungen [7]. Bei größeren Erzeugnisdicken unterscheiden sich die Abkühlgeschwindigkeiten beim Härten an der Oberfläche wesentlich von denen im Blechkern, so daß zur Darstellung einer ausreichenden Durchhärtung in den Kern härtende Legierungselemente (Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu, B) zugesetzt werden müssen, die die kritische Martensitbildungsgeschwindigkeit herabsetzen (Bild 3), aber bekanntermaßen auch alle in den Definitionen für die Kohlenstoffäquivalente (CE) vorkommen, die die Schweißseignung in Abhängigkeit von der Analyse charakterisieren. Daraus folgt, daß vergütete Stähle in größeren Erzeugnisdicken zwangsläufig höhere CE-Werte aufweisen, so daß mit wachsenden Erzeugnisdicken der vergüteten Stähle die Schweißseignung entsprechend abnimmt.

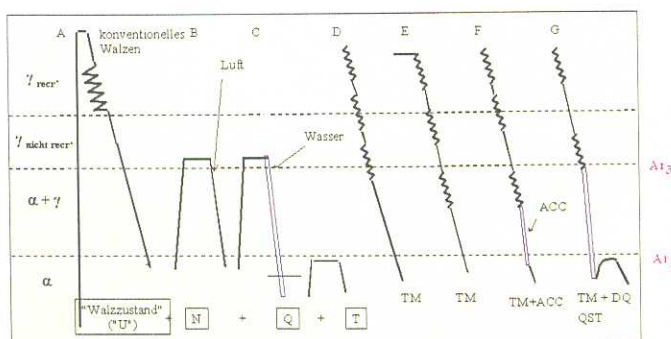


Bild 1. Herstellungsverfahren von hochfesten Stählen
Fig. 1. Production methods for high-strength steel plates

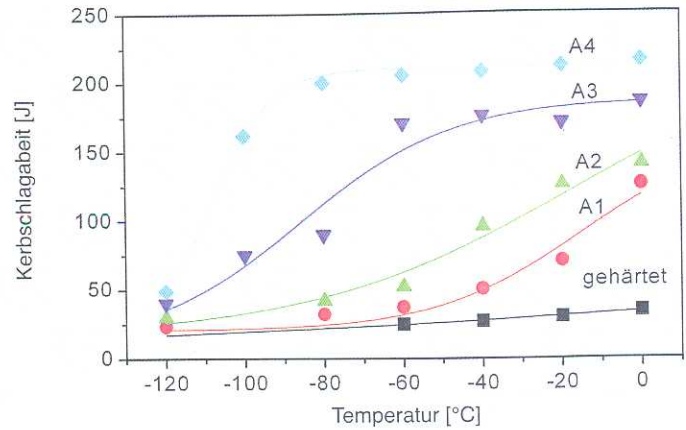


Bild 2. Einfluß des Anlassens auf die Kerbschlagarbeitswerte eines gehärteten Stahles
Fig. 2. Influence of tempering on the Charpy-V impact values of a hardened steel

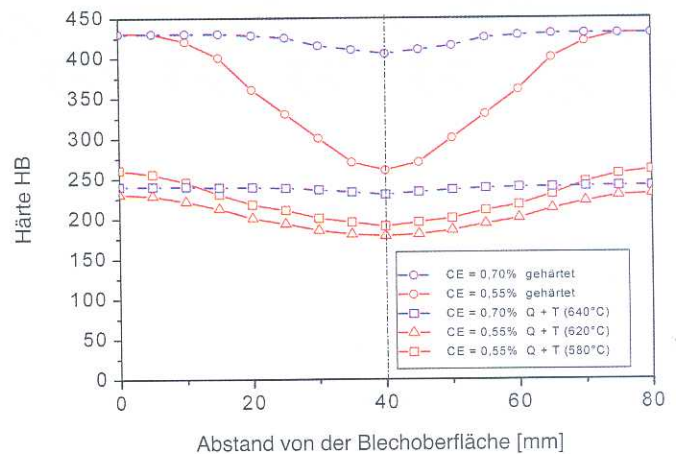


Bild 3. Einfluß des Legierungsgehalts auf die Durchhärtung vergüteter Stähle. Kohlenstoffäquivalent:
 $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$
Fig. 3. Influence of the alloying content on the through-hardening of quenched steel plates. Carbon equivalent:
 $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$

– Thermomechanisch gewalzte Stähle: Unter dem thermomechanischen Walzen versteht man eine Kombination von thermischer und mechanischer Behandlung mit wohldefinierten Walzverformungsschritten bei vorherbestimmten Temperaturen, die in einer Gefügestruktur resultiert, die durch eine thermische Behandlung allein nicht herstellbar ist. So wird hier u. U. auch auf Walzschnitte unterhalb der Rekristallisationstemperatur zurückgegriffen, die in Zusammenarbeit mit der durch Mikrolegierungselemente bedingten Teilchenbildung in einer höchst feinen Gefügestruktur resultieren. Somit sind hohe Zähigkeiten und Festigkeiten möglich, ohne auf höhere Legierungsanteile zurückgreifen zu müssen.

Wie Bild 1 andeutet, kennt das thermomechanische Walzen eine Vielfalt von Ausprägungen. Insbesondere für hochfeste Stahlgüten findet dabei meist noch ein folgendes beschleunigtes Abkühlen (ACC: Accelerated cooling) zur präzisen Einstellung der Eigenschaften Anwendung, das im Gegensatz zum klassischen Härten aber oberhalb der Martensitbildungstemperatur abgebrochen wird. Je

nach Stahlsorte und Abmessung kann diese Abkühlung noch von einem Anlassen gefolgt sein. Thermomechanisch gewalzte Stähle sind in Streckgrenzen bis 460 MPa und Dicken bis 120 mm für den Stahlbau verfügbar und sind nach EN 10 025-4 genormt. Neueste Entwicklung stellen hier Stähle mit einer Streckgrenze bis 500 MPa dar, die im folgenden ausführlich behandelt werden.

3 Anforderungsprofil an Stähle in Stahlwasserbau und Offshore-Industrie

Wie oben beschrieben, können heute vergütete Stahlbleche bis 1100 MPa Streckgrenze hergestellt werden. Stähle der Festigkeitsklasse S 960 werden heute in vielen Anwendungsbereichen wie z. B. dem Baumaschinenbau oder der S 690 im Grubenausbau bereits als Standard angesehen. Diese Konstruktionen zeichnen sich durch eine ausschließliche Werkstattfertigung aus, bei der die relativ aufwendigen qualitätssichernden Maßnahmen beim Schweißen solcher hochfesten Stähle sicher eingehalten werden können. Sie sind vor allem durch zur Erzielung der notwendigen Festigkeit und Durchhärtung notwendigen höheren Legierungsgehalte und damit verbundenen Gefahr des zu starken Abfalls der Zähigkeit in der Wärmeeinflußzone aber auch der wasserstoffinduzierten Rißbildung begründet. Deshalb legen andere Konstruktionstypen, die ein Schweißen unter schwer kontrollierbaren Baustellbedingungen erfordern, ein größeres Gewicht darauf, Stähle mit höherer Duktilität zu verwenden, ohne daß zu starke Beschränkungen bei den Festigkeitswerten in Kauf genommen werden. Dazu zählen z. B. Konstruktionen des Wasserkraftanlagenbaus und der Offshore-Industrie. Dabei kommen aber auch noch andere Aspekte zum tragen, die die Verwendung von hochzäh thermomechanisch gewalzten Stählen bevorzugen:

- Offshore-Konstruktionen in Regionen mit sehr tiefen Einsatztemperaturen (Design-Temperaturen bis -40 °C) erfordern die Verwendung von Stahlsorten mit einem ausreichenden Zähigkeitsprofil auch bei diesen tiefen Temperaturen, um Sprödbrechereffekten in geschweißten Konstruktionen entgegenzuwirken. Sie werden häufig auch bruchmechanischen Bewertungen z. B. über CTOD (Crack Tip Opening Displacement) hinsichtlich ihrer Neigung zu spontaner Rißausbreitung unterzogen.
- Sowohl in Wasserkraftanlagen als auch in Offshore-Konstruktionen kommen Rohre zum Einsatz, die durch

Kalteinformung von Blechen mit anschließendem Verschweißen der Längsnaht hergestellt werden. Wegen der negativen Auswirkung dieser Verarbeitungsschritte auf die Zähigkeit (Schweißen im kaltverformten Bereich) müssen Stahlsorten mit entsprechend höheren Zähigkeitsreserven eingesetzt werden.

– Bei der Massenfertigung der oben angesprochenen Rohre werden Schweißverfahren mit relativ hohen Abschmelzleistungen eingesetzt. Auch hier muß die zähigkeitsmindernde Wirkung solcher hohen Wärmeeinbringungen beim Schweißen durch Stahlsorten mit hohen Grundzähigkeiten ausgeglichen werden.

Dieses Anforderungsprofil in den genannten Industriezweigen veranlaßte die Stahlhersteller zu der Entwicklung von thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustählen mit bis zu 500 MPa Streckgrenze. Solche Stähle stellen dort zur Zeit einen optimalen Kompromiß zwischen dem Wunsch der Konstrukteure nach hohen Festigkeitswerten (= geringeren Wanddicken = geringerem Gewicht) bei sehr guten Zähigkeits- und Verarbeitungseigenschaften dar.

4 Herstellung und Eigenschaftsprofil hochfester thermomechanisch gewalzter Feinkornbaustähle

Durch das thermomechanische Walzen können heute Stahlbleche mit Streckgrenzen bis zu 500 MPa in Dicken bis zu 100 mm hergestellt werden [8]. Das genaue Anforderungsprofil an mechanisch-technologische aber auch chemische Eigenschaften kann dabei je nach Anwendungsbereich sehr unterschiedlich sein. Gängig ist dabei die Anforderung von Mindeststreckgrenzenwerten von 490 bis 500 MPa und von Mindestzugfestigkeitswerten von 600 bis 610 MPa bei nachgewiesenen Kerbschlagarbeitswerten bis zu einer Prüftemperatur von -50 °C . Auf der anderen Seite werden Maximalwerte der Kohlenstoffäquivalente

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \frac{Ni}{60} + 5B$$

gefordert, die z. B. im Offshore-Bereich Werte in der Größenordnung bis zu $CE \leq 0,43\%$ und $P_{cm} \leq 0,21\%$ erreichen. Tabelle 1 gibt als Beispiel ein Anforderungsprofil wieder, wie es vom norwegischen NORSOK-Standard gefordert wird.

Tabelle 1. Abnahmewerte einiger Stahlgüten nach Norsok-Standard sowie typische chemische Zusammensetzung für 50 mm Erzeugnisdicke

Table 1. Minimum mechanical properties of some steel grades acc. to Norsok as well as typical chemical composition

Stahl	Zugversuch, quer			Kerbschlagversuch, quer CVN in J bei -40 °C	Test in Dickenrichtung		
	R_m in MPa	R_{eh} in MPa	A_5 in %		Z in %	R_m in MPa	
S 420 M3Z	500–660	≥ 420	≥ 19	surface + mid-thickness: ≥ 60 (42)	35 (25)	≥ 400	
S 500 M3Z	600–750	≥ 500	≥ 17	surface + mid-thickness: ≥ 60 (42)	35 (25)	≥ 480	
	C	Mn	Ni	Cu	Mo	Nb + V + Ti	P_{cm}
S 420 M3Z	0,09	1,44	0,22	0,15	0,05	0,02	0,19
S 500 M3Z	0,06	1,58	0,54	0,28	0,15	0,02	0,18

Solche Stähle werden, so zeigt es Bild 4, durch eine thermomechanische Walzung mit einer abschließenden Abkühlung mit stark vergrößerter Abkühlgeschwindigkeit, dem sogenannten Heavy Accelerated Cooling (HACC), hergestellt. Dabei bildet sich ein höchst feines Stahlgefüge bainitisch-ferritischer Struktur aus, das sich positiv auf Festigkeit und Zähigkeit des Stahles auswirkt. Um zur Gewährleistung einer besten Schweißseignung niedrige Kohlenstoffgehalte einstellen zu können, wird ferner eine mäßige Zulegierung von Kupfer, Nickel, Chrom und/oder Molybdän genutzt. Die genaue Zusammensetzung hängt dabei auch von dem gesetzten Anforderungsprofil ab, so daß durchaus unterschiedliche Varianten möglich sind. Bild 5 stellt die Kornstruktur eines solchen Stahles dar. Das feine Korn, das in den guten Zähigkeitseigenschaften resultiert, wird klar deutlich.

Bild 6 faßt Ergebnisse der Festigkeitswerte an 20 bis 50 mm dicken Blechen S 500 M, wie sie typischerweise im Stahlwasserbau zur Anwendung kommen, in Histogrammform zusammen. Bild 7 gibt dieselbe Darstellung für 50 bis 80 mm dicke Bleche wieder. Bild 8 zeigt typische Produktionsergebnisse der Charpy-V-Kerbschlagarbeitswerte solcher Stahlbleche, gemessen bei -40°C . Das hohe Niveau der Werte ist ein Maß für die hohe Duktilität dieses Materials, die sich vorteilhaft auf die Vermeidung von Sprödbruchphänomenen auswirkt. Hinzu kommt, daß in der Wärmeinflußzone (WEZ) einer Schweißung die Zähigkeitswerte zusätzlich negativ beeinflusst werden, so daß die hohen Zähigkeitswerte des Grundmaterials auch auf sichere Bedingungen nach dem Schweißen schließen lassen. Dies wird durch Bild 9 demonstriert. Dort sind in der WEZ nach einer Unterpulverschweißung mit einem Wär-

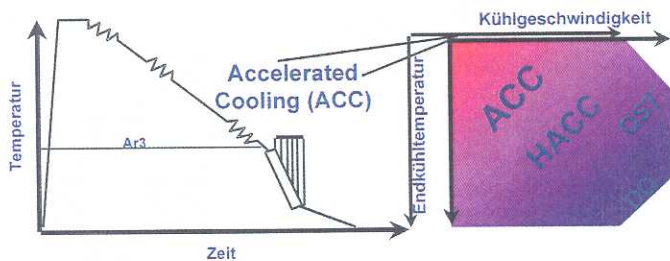


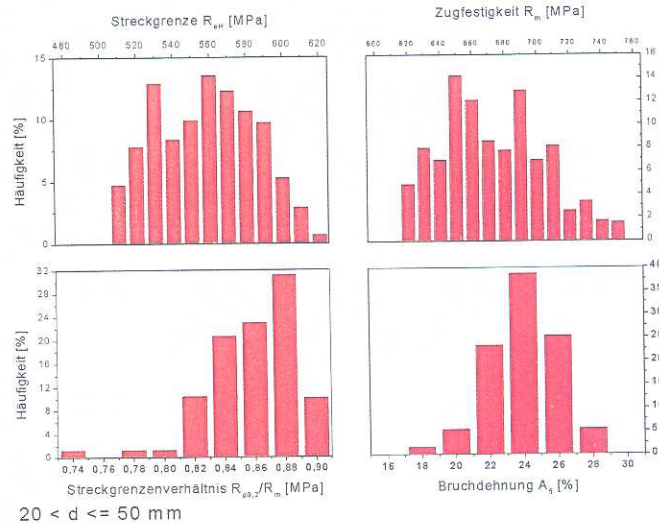
Bild 4. Herstellung von thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustählen mit bis zu 500 MPa Streckgrenze
Fig. 4. Production of TMCP rolled fine grain steel plates with up to 500 MPa yield strength



Blechoberfläche

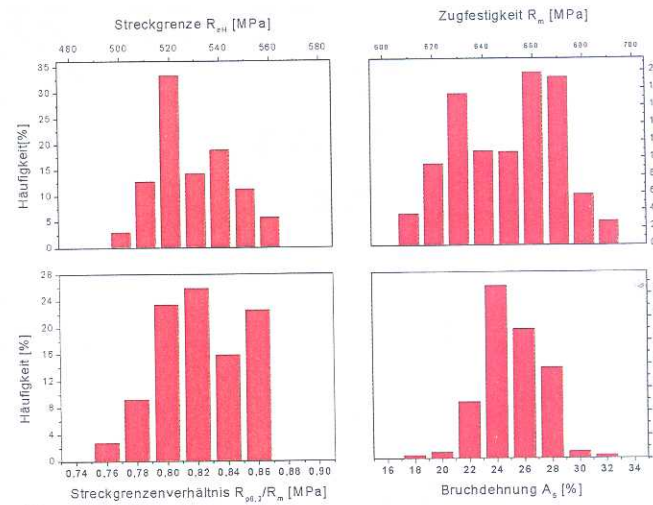
Blechviertel

Bild 5. Gefügestruktur eines thermomechanisch gewalzten Stahls mit 500 MPa Streckgrenze
Fig. 5. Grain structure of a TMCP steel with 500 MPa yield strength



20 < d ≤ 50 mm

Bild 6. Verteilung mechanischer Eigenschaftswerte eines S 500 M in Dicken 20 bis 50 mm
Fig. 6. Mechanical properties of S 500 M steel plates (thickness range 20 mm–50 mm)



50 < d ≤ 80 mm

Bild 7. Verteilung mechanischer Eigenschaftswerte eines S 500 M in Dicken 50 bis 80 mm
Fig. 7. Mechanical properties of S 500 M steel plates (thickness range 50 mm–80 mm)

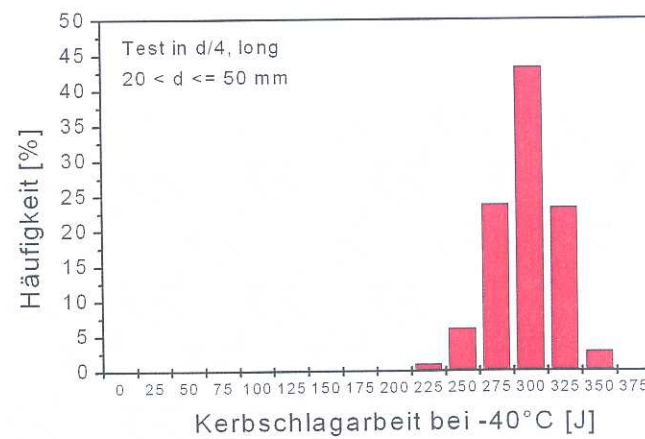


Bild 8. Verteilung der Kerbschlagarbeitswerte eines S 500 M gemessen bei -40°C in Dicken 20 bis 50 mm
Fig. 8. Charpy-V impact values of S 500 M steel plates (thickness range 20 mm–50 mm) at -40°C

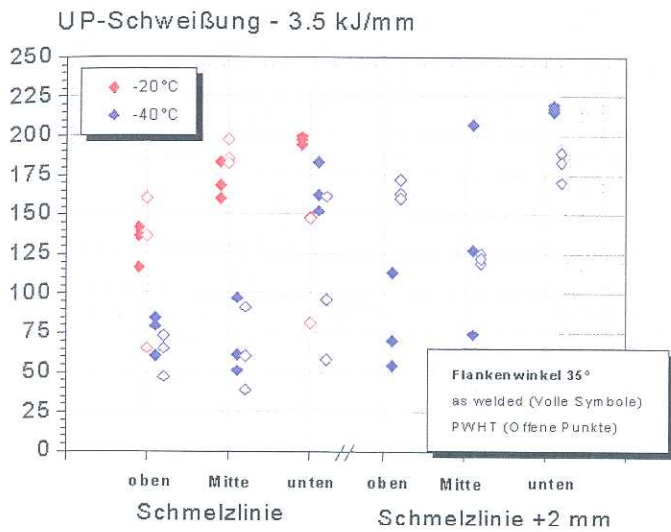


Bild 9. Kerbschlagarbeitswerte in der Wärmeeinflusszone einer UP-Schweißung aus S 500 M, 30 mm dick, ohne und mit anschließendem Spannungsarmglühen (580 °C/4 h)
 Fig. 9. Charpy-V impact values of S 500 M steel plates in the heat affected zone after SAW-welding with 3.5 kJ/mm without and with following PWHT (30 mm)

meeinbringen von 3,5 kJ/mm bestimmte Kerbschlagarbeitswerte (Kav) dargestellt, wobei auf ein Vorwärmen verzichtet wurde.

Es wird klar, daß auch bei Prüftemperaturen von -40 °C mit hoher Sicherheit Kav-Werte über 50 J erreicht werden. Das gilt auch für eine nachfolgend durchgeführte Spannungsarmglühbehandlung bei 580 °C und vier Stunden Haltedauer. Bild 10 stellt die Aufhärtung in der WEZ eines S 500 M zur Verwendung im Stahlwasserbau dar. Es ist nicht erstaunlich, daß auf Grund der niedrigen Legierungsgehalte auch bei kurzen Abkühlzeiten nur Härtwerte bis 320 HV10 auftreten, so daß die Gefahr von Härtungsrisen sehr gering ist.

Bei der Festlegung der Schweißparameter sind jedoch auch die Auswirkungen auf das eigentliche Schweißgut zu berücksichtigen. Insbesondere bei Stählen der Streckgren-

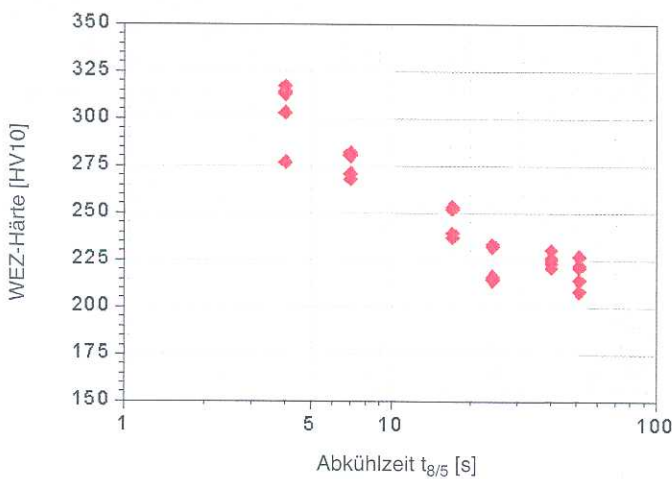


Bild 10. Härtewerte HV 10 in der Wärmeeinflusszone nach Schweißen mit verschiedenen Wärmeeinbringungen
 Fig. 10. Hardness values HV 10 in the heat affected zone of S 500 M after welding with various heat inputs

zenklassen ab S 690 kann das Schweißgut die zu wählenden Schweißparameter zusätzlich einschränken, um hohe Festigkeitswerte mit guten Zähigkeiten zu verbinden. Schweißgüter der Streckgrenzenklasse S 500 erlauben hier aber noch eine wesentlich erweiterte Parameterwahl beim Schweißen. Dies veranschaulicht Bild 11.

Für einen S 500 M lassen sich somit Vorwärmtemperatur und Wärmeeintrag [7] wesentlich flexibler wählen. Dies kann zum einen in Richtung einer höheren Wirtschaftlichkeit interpretiert werden, da Schweißverfahren mit hohen Abschmelzleistungen ermöglicht werden. Auf der anderen Seite kann aber auch gefolgert werden, daß eine größere Toleranz gegenüber Abweichungen von den festgelegten Schweißparametern zu erwarten ist, was insbesondere unter den schwer kontrollierbaren Fertigungsbedingungen auf der Baustelle wichtig erscheint.

Eine wesentliche Einflußgröße guter Verarbeitungseigenschaften für die in der Offshore- und Stahlwasserbauindustrie üblichen Prozesse stellt eine ausreichende Zähigkeit im wärmebeeinflussten Bereich nach Schweißen und Kaltumformung dar. Das wird in Versuchen durch künstlich gealterte Kerbschlagarbeitsproben bestimmt, d. h. durch Proben, die vor dem Test einer Kaltumformung und ggf. einer Erwärmung auf den kritischen Temperaturbereich der Blausprödigkeit um 250 °C unterworfen wurden. Bild 12 zeigt Kerbschlagarbeits-Temperatur-Übergangskurven für einen S 500 M im ungealterten Zustand und nach verschiedenen Bedingungen der künstlichen Alterung. Eine Verschiebung der Kerbschlagarbeits-Temperatur-Übergangskurve zu höheren Temperaturen ist naturgemäß nicht ganz zu vermeiden, jedoch werden auch nach diesen relativ harten Bedingungen noch relativ hohe Zähigkeitswerte erreicht, was auf eine hohe Sicherheit der jeweiligen Rohrerstellungsprozesse schließen läßt.

Abschließend sei erneut darauf hingewiesen, daß sich obige Resultate auf einen konkreten Stahltyp beziehen, wie er typischerweise im Stahlwasserbau Verwendung findet. Andere Konstruktionsformen, wie z. B. der Offshore-Bereich, können noch weitergehende Anforderungen stellen, deren Erfüllung – unter Umständen unter Inkaufnahme höherer Produktionskosten – auch möglich ist.

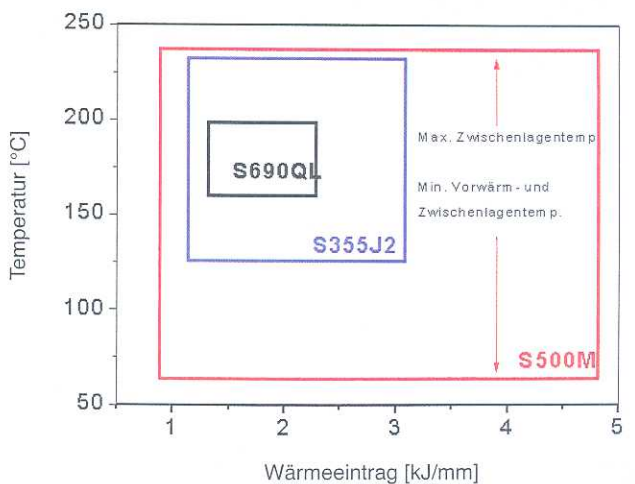


Bild 11. Fenster der möglichen Schweißparameterwahl für verschiedene Grobblechwerkstoffe
 Fig. 11. Window of acceptable welding parameters of various steel grades

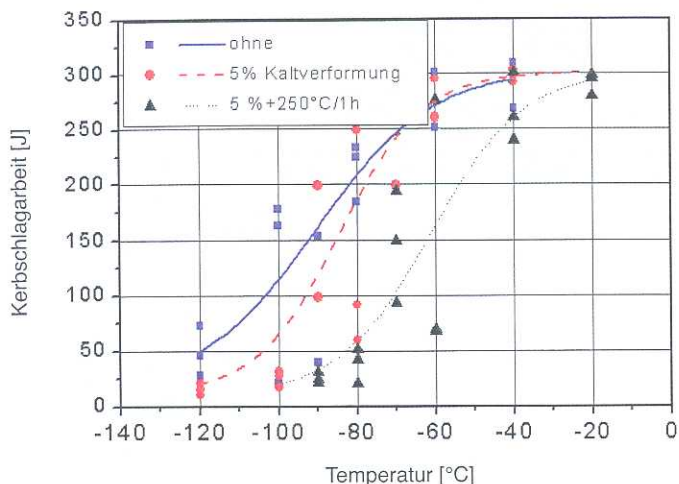


Bild 12. Alterungskurven von S 500 M (Offshore) unter verschiedenen Bedingungen
 Fig. 12. Ageing behaviour of S 500 M (offshore) steel

5 Anwendungen im Stahlwasserbau und in Offshore-Konstruktionen

Wasserkraftwerke werden als ein effizientes Mittel verstanden, den Anteil an regenerativen, von fossilen Trägern unabhängigen Brennstoffen im Energiemix zu erhöhen – und das bei niedrigen laufenden Kosten und hoher Flexibilität. Deshalb investieren aufsteigende Volkswirtschaften wie China oder Indien stark in solche Kraftwerke. Aber auch in Europa ist ein Ausbau von Wasserkraftwerken zur Deckung von Spitzenlastbedarf geplant.

Bild 13 skizziert im Schnitt den typischen Aufbau eines solchen Speicherkraftwerks. In einem Oberbecken wird das Wasser gespeichert und dann in steil abfallenden Fallrohrleitungen, sogenannten Penstocks, beschleunigt. Nur bei kleineren Kraftwerken werden diese Leitungen aus offen verlegten Stahlrohren gebildet. Bei größeren Kraftwerken setzen sich diese Fallrohrleitungen aus einer innenliegenden Stahlpanzerung mit außenliegender Betonhülle zusammen. Bei Pumpspeicherkraftwerken mit oft hohen Fallhöhen werden diese Rohre auch in Schächten im Gebirgsstein verlegt.

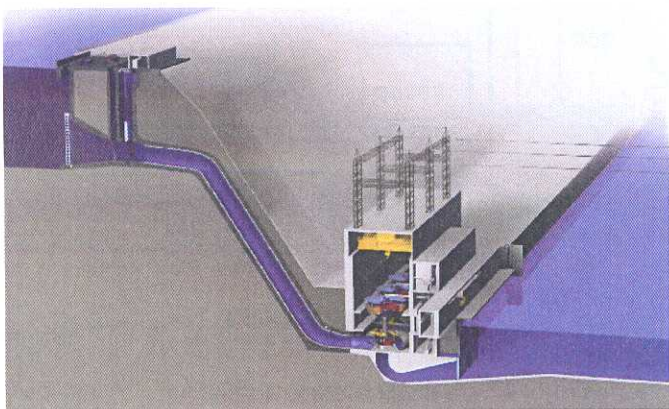


Bild 13. Schema eines Wasserkraftwerks (Voith-Siemens Hydro)
 Fig. 13. Scheme of a hydro electrical power plant (Voith Siemens Hydro)

Die Stahlrohre können dabei Durchmesser bis zu 10 m aufweisen und werden aus einzelnen bis zu 4,5 m langen Rohrschüssen über Umfangsschweißungen zusammengesetzt. Die Rohrschüsse wiederum werden aus Blech durch Biegung über die Querachse sowie anschließendes Verschweißen der entstehenden Längsnaht hergestellt. Die Wanddicken für diese Rohre können 60 mm und in Einzelfällen auch mehr betragen. Hier werden thermomechanisch gewalzte Stähle des Typs S 500 M als optimaler Kompromiß zwischen einer hohen Streckgrenze und guten Verarbeitungseigenschaften eingesetzt, wobei vor allem der unter harten Bedingungen ablaufenden Fertigung vor Ort Rechnung zu tragen ist.

Von den Fallrohrleitungen verteilt sich der Wasserstrom in sogenannten Hosenrohren (Bifurcations) auf die Zuleitung für die Turbinen. Bild 14 stellt ein Beispiel eines solchen Hosenrohrs dar. Diese Konstruktion besteht aus 60 mm dicken S 500 M-Blechen mit einem Sichelblech in 100 mm.

Eine besondere Anwendung aus dem Offshore-Bereich zeigt Bild 15 [9]. Die Mayflower TIV dient als Spezialschiff zur optimierten Montage von Offshore-Windkraftanlagen. Kernstück des 130,5 m langen und 38 m breiten Schiffes

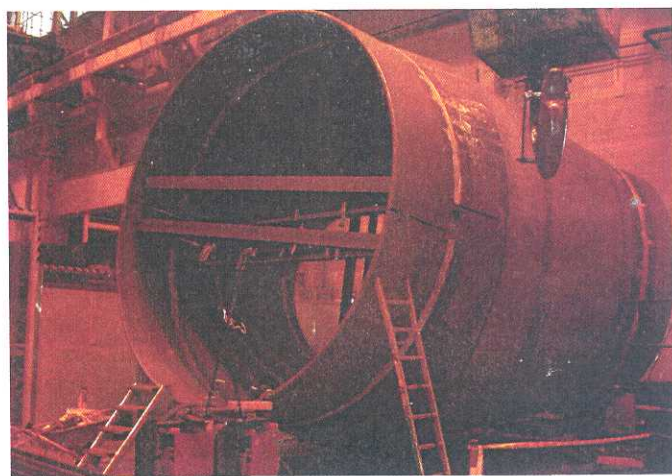


Bild 14. Hosenrohr des chinesischen Kraftwerks Yixing
 Fig. 14. Bifurcation in the Chinese hydro electrical power plant Yixing



Bild 15. Offshore-Installationsschiff Mayflower TIV I
 Fig. 15. Offshore Installation vessel Mayflower TIV I

sind die 6 Hubbeine, die ein Arbeiten unter Vollast in Wasserhöhen von 3,25 bis 35 m bei härtesten Wind- und Wellenbedingungen ermöglichen. Die Konstruktion bietet Platz für die Anschaffung von bis zu 10 Anlagen à 2 MW. Diese Konstruktion ist höchsten Lasten ausgesetzt. Das gilt insbesondere für die Hubbeine sowie die angrenzenden Fundamente im Schiffsrumpf. Eine Ausführung in „normalen“ Schiffbaustählen hätte so große Konstruktionsdicken ergeben, daß das Zuladegewicht und damit die Effizienz des Montageschiffes deutlich reduziert worden wäre. Um gleichzeitig eine hohe Sprödbruchsicherheit beim Einsatz im kalten Gewässer zu erreichen, wurden hier zum großen Teil Stahlgüten des Typs S 500 M mit bei bis zu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ nachgewiesenen Kerbschlagarbeiten eingesetzt.

Bis diese regenerativen Methoden aber einen wesentlichen Anteil an der Energieversorgung übernehmen können, müssen die klassischen Energieträger Öl und Gas sicher und kostengünstig auch aus immer unwirtlicheren Regionen gefördert werden. Gewichtsreduzierungen bei sicherer Auslegung der Konstruktion sind daher wesentliche Prinzipien beim Entwurf dieser Anlagen. Allerdings sind Fragen der Ermüdung, zumal in korrosiver Umgebung, noch nicht ausreichend untersucht, so daß der Vorteil der höheren statischen Festigkeit bisher fast ausschließlich für die Deckkonstruktionen (geschweißte Kastenträger) der Plattformen genutzt wurde. Beispiele sind u. a. die Plattformen Valhall mit Blechdicken bis 65 mm (Bild 16) und Kvitebjörn mit Blechdicken bis 80 mm in der norwegi-



Bild 16. Offshore-Plattform Valhall (Aker Kvaerner Norwegen)
Fig. 16. Offshore platform Valhall (Aker Kvaerner, Norway)

schen Nordsee. Die Anwender mußten in diesen Fällen auch das für Offshore-Bauwerke angestrebte Overmatching des Schweißgutes (höhere Festigkeit des Schweißgutes mit dem Ziel der Ablenkung eventueller Risse der WEZ in den Grundwerkstoff) sicherstellen, was zu umfangreichen, aber letztlich erfolgreichen Untersuchungen verschiedenster Schweißgüter führte.

6 Zusammenfassung

Der Prozeß des thermomechanischen Walzens wurde in den letzten Jahren so weiterentwickelt, daß heute auch Streckgrenzen bis 500 MPa bis 100 mm Dicke angeboten werden können. Solche Produkte sind außer in einzelnen Anwendungsfällen heute noch nicht der Normung zugeführt und gehen im Anforderungsprofil über das hinaus, was heute im klassischen bauaufsichtlich geregelten Stahlbau verwendet wird. Aber auch heute schon finden solche Produkte in Wasserkraftanlagen und Offshore-Konstruktionen Verwendung. Die Erfahrungen mit solchen Stählen in diesen Bereichen sind sehr gut, so daß zu hoffen bleibt, daß auch die Ingenieure im klassischen Stahlbaubereich bald davon profitieren können.

Literatur

- [1] Schröter, F.: Höherfeste Stähle für den Stahlbau – Auswahl und Anwendung. Bauingenieur 9 (2003), S. 426–432.
- [2] Hubo, R., Schröter, F.: Thermomechanisch gewalzte Stähle – Hochleistungsprodukte für einen effizienten Stahlbau. Bauingenieur 76 (2001), S. 459–463.
- [3] Hubo, R., Hanus, F. E.: Verarbeitungseigenschaften thermomechanisch gewalzter Grobbleche. Hansa 129 (1992), Heft 8, S. 776–778.
- [4] Hever, M., Schröter, F.: Modern steel – High performance material for high performance bridges. 5th International Symposium on Steel Bridges, März 2003, Barcelona, pp. 80–91.
- [5] Buonomo, M., Roos, F., Schröter, F.: Das große Viadukt von Millau – Stahlbau und Montage mit hochfesten Feinkornbaustählen. Stahlbau 74 (2005), H. 5, S. 313–318.
- [6] Hanus, F.: S 500 M – Structural steel with 500 MPa yield strength for offshore applications. Dillinger Offshore Letter 2 (2000).
- [7] Hanus, F., Schröter, F., Schütz, W.: State of the art in the production and use of high-strength heavy plates for hydropower applications, High Strength Steel for Hydropower Plants. Juli 2005, Graz, pp. 13/01–13/12.
- [8] Martin, F., Schröter, F.: Stahllösungen für Offshore-Windkraftanlagen. Stahlbau 74 (2005), H. 6, S. 435–442.
- [9] Schütz, W., Schröter, F.: Innovative Grobblechentwicklungen. Hansa 141 Nr. 2 (2004), S. 35–39.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Phys. Francis Martin und Dr.-Ing. Falko Schröter, AG der Dillinger Hüttenwerke, Postfach 1580, D – 66748 Dillingen