

Thermomechanisch gewalzte Stähle für den Stahl- und Behälterbau

Dr.-Ing. F. Hanus, Dillinger Hütte, Dillingen

1. Einleitung

[Thermomechanisch](#) gewalzte Stähle werden für die Herstellung geschweißter Großrohrleitungen seit fast 3 Jahrzehnten verwendet. Auch im Stahl- und Schiffbau fanden sie aufgrund ihrer besseren Schweißneigung in den letzten Jahren zunehmende Verbreitung. Der folgende Beitrag soll die Vorteile und die Einschränkungen darstellen, die sich beim Verarbeiten von TM-Stählen ergeben.

2. Herstellung

Auf die werkstoffkundlichen und verfahrenstechnischen Einzelheiten soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Der interessierte Leser sei auf einschlägige Veröffentlichungen z.B. [i] zu diesem Thema verwiesen. Grundsätzlich ist Ziel des TM-Walzens, durch die Kombination von Umformung und Temperaturführung ein wesentlich feineres Gefüge zu erzeugen, als dies durch [Normalglühen](#) erreicht werden kann. Da die Kornfeinung neben der Zähigkeit auch die Streckgrenze und Festigkeit erhöht, lassen sich die geforderten Festigkeitseigenschaften mit niedrigeren Kohlenstoff- und Legierungsgehalten erzielen.

Ursprünglich wurde das TM-Walzen für das Herstellen von Blechen für Längsnaht geschweißte Pipelines entwickelt. Kennzeichnend waren große Serien gleicher Abmessung und mäßige Wandstärken, meist unter 25 mm. Die Fortschritte in der Walztechnik, eine beschleunigte Abkühlung nach dem letzten Walzstich und verbesserte Prozesssteuerung [ii] erlauben es inzwischen, auch Bleche mit großen Wanddicken effektiv thermomechanisch zu walzen. Voraussetzungen hierfür sind eine optimierte chemische Zusammensetzung, hohe Walzkräfte, eine exakte Prozessführung, und eine abgestimmte Kombination von Walzschritten und Temperaturführung einschließlich einer beschleunigten Abkühlung nach dem letzten Walzstich.

Inzwischen werden TM-Bleche S355M in Dicken bis 120 mm, S460M bis 100 mm¹ und neuerdings S500M bis 70 mm [iii] angeboten. Streckgrenzen über 690 MPa sind ebenfalls durch TM-Walzen und beschleunigte Abkühlung herstellbar, allerdings in wesentlich geringerer Blechdicke. Die Anwendung von TM-Stählen als dickwandige Konstruktionsrohre für [Offshore](#)-Plattformen der Nordsee belegt, dass dieser Stahltyp auch höchsten Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen gerecht wird.

3. Stand der Normung

TM-Stähle sind als Baustähle z.B. nach SEW 084, DIN EN10113-3 sowie ASTM A841 genormt. Der VdTÜV erteilte der Dillinger Hütte bereits 1989 die Zulassung, TM-gewalzte Bleche bis 70 mm für überwachungsbedürftige Anlagen zu liefern² [iv]. Die aktuelle Liefernorm für Druckbehälterstähle DIN EN

¹ Metallurgische Fortschritte ermöglichen zurzeit Blechdicken bis 130 mm (S355M) bzw. 120 mm (S460M)

² Im bauaufsichtlich überwachten Bereich ist der Einsatz der TM-Stähle nach DIN EN 10 113-3 nach der Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung Z-30.2-2 für Flachprodukte in Erzeugnisdicken bis 100 mm (S355M) bzw. 80 mm (S460M)

10028 [°] sieht im Teil 5 den Lieferzustand "thermomechanisch gewalzt" bis zu einer Mindeststreckgrenze von 550 MPa vor. **Tabelle 1** zeigt die hierin definierten Grenzwerte für die chemische Zusammensetzung der Stähle P355M und P460M.

Diese Grenzen sind sehr weit gefasst. Die an der Normung beteiligten europäischen Stahlhersteller verwenden unterschiedliche Analysenkonzepte, oder wollten sich alle Möglichkeiten offenhalten, so dass man sich nicht auf tiefere, für den Verarbeiter attraktivere Gehalte einigen konnte. Ein Stahl, der in allen Elementen an der Obergrenze läge, würde allerdings auch nach einem Normalglühen die geforderten Festigkeitseigenschaften erfüllen, entspräche aber hinsichtlich der Schweißbeignung nicht dem, was man von einem TM-Stahl erwartet.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung in %, Grenzwerte nach DIN EN 10113 und DIN EN 10028, sowie mit der Bezeichnung DI-MC Werte von 50 mm dicken TM-Blechen aus aktuellen Lieferungen

	C	Si	Mn	Ni	Mo	Nb	V	Cu+Cr+Mo
S355 N	0,20	0,50	1,65	0,50	0,10	0,05	0,12	0,75
S355 M	0,13	0,50	1,60	0,30	0,10	0,05	0,02	0,60
P355 M	0,14	0,50	1,60	0,50		0,05	0,10	0,60
DI-MC355	0,08	0,3	1,4	-	-	<0,04	-	<0,2
S460 N	0,20	0,60	1,70	0,80	0,10	0,05	0,20	1,10
S460 M	0,16	0,60	1,70	0,45	0,20	0,05	0,12	0,60
P460 M	0,16	0,60	1,70	0,50	0,20	0,05	0,10	0,60
DI-MC460	0,09	0,3	1,5	0,25	-	<0,04	<0,05	<0,3
			CE	CET		Pcm		
DI-MC355			0,35	0,25		0,18		
DI-MC460			0,40	0,28		0,20		

$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$
 $CET = C + (Cr + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$
 $Pcm = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$

Um die Vorteile von TM-Stählen nutzen zu können, muss der Verarbeiter oder Anwender mit seinem Stahlhersteller Einschränkungen gegenüber der Norm vereinbaren. Anhaltswerte über die chemische Zusammensetzung "echter" TM-Bleche in einer Blechdicke von 50 mm, gibt ebenfalls **Tabelle 1**. Die Erfahrungen und Untersuchungsergebnisse, über die im weiteren berichtet werden, beziehen sich auf derartige Stähle.

4. Verarbeitungseigenschaften der TM-Stähle

Für den Anwender dürfte es im allgemeinen von untergeordneter Bedeutung sein, auf welche Weise der Grobblechhersteller die gewünschten Werkstoffeigenschaften erzielt. Der Verarbeiter muss den Stahltyp kennen und wissen, wie er zu "behandeln" ist. Schließlich muss gewährleistet sein, dass die Eigenschaften des Grundwerkstoffes nicht durch ungeeignete Verarbeitungsprozesse oder -parameter beeinträchtigt werden.

möglich. Darüber hinausgehende Erzeugnisdicken können unter Umständen durch Ausnutzung einer Zustimmung im Einzelfall eingesetzt werden.

Wegen der möglichen unterschiedlichen Analysenkonzepte für TM-Stähle sollte sich der Verarbeiter vorab beim Stahlhersteller informieren. Dies gilt besonders beim erstmaligen Anwenden dieser Stähle. Darüber hinaus können Verfahrensprüfungen empfohlen werden, um die Eignung der gewählten Verarbeitungsbedingungen zu überprüfen. Diese können das Schweißen, die Umformung sowie die Wärmebehandlung umfassen.

4.1 Temperaturführung und Umformung

Gegenüber den normalgeglühten und normalisierend gewalzten Stählen, die ihre Eigenschaften nach einem Normalglühen wiedergewinnen, lassen sich die Sollwerte der TM-gewalzten Bleche nicht durch eine reine Wärmebehandlung erzielen. Eine Warmumformung im Austenitgebiet führt daher zu einer bleibenden Beeinträchtigung des Gefügezustandes und der Eigenschaften TM-gewalzter Bleche.

Für Anwendungen des Anlagen- und Behälterbaus, für die eine Warmformgebung erforderlich ist, scheiden die TM-Stähle damit aus. Gleiches gilt für Formteile, die örtlich eine so starke Kaltumformung erfahren, dass das Regelwerk ein Normalglühen oder Vergüten vorschreibt.

Je nach der chemischen Zusammensetzung und den Herstellbedingungen der Bleche kann es aber bereits unterhalb der Austenitisierungstemperatur zu Anlass-, Ausscheidungsvorgängen und Versetzungsreaktionen kommen, die mit einer Abnahme der Festigkeitseigenschaften verbunden sind. Es ergeben sich daraus Grenzen für die Temperatur, die bei der Verarbeitung nicht überschritten werden dürfen. Für die meisten TM-Stähle sind Temperaturen bis 580°C mit beschränkten Haltezeiten akzeptabel.

Für die Formgebung von Bauteilen mit größeren Wanddicken, kleinen Biegeradien und großen Blechbreiten kann bei begrenzter Biegekraft der Anlage ein "Halbwarmumformen" bei 530 bis 580 °C zweckmäßig sein. Da die Warmstreckgrenze bei 550 °C nur noch etwa 50 % der Streckgrenze bei Raumtemperatur beträgt, werden die erforderlichen Umformkräfte auf diese Weise etwa halbiert. Im Zweifelsfall sollte der Verarbeiter vorab die Empfehlungen des Stahlherstellers einholen.

4.2 Spannungsarmglühen

TM-Stähle lassen sich problemlos spannungsarm glühen. Der durch die TM-Walzung eingestellte Gefügezustand, insbesondere die Feinkörnigkeit des Ferrit werden durch diese Wärmebehandlung kaum verändert. Üblicherweise wird das Spannungsarmglühen zwischen 530 und 580°C durchgeführt. SEW 088 empfiehlt, die Haltedauer von 150 Minuten auch bei Mehrfachglühungen nicht zu überschreiten und bei einer Haltedauer über 90 Minuten die untere Temperaturgrenze anzustreben. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass selbst nach 8 stündigem Glühen auf 600°C die Eigenschaften praktisch unverändert blieben. Der S460M reagierte lediglich mit einer Erniedrigung der Zugfestigkeit um 15 bis 20 MPa auf die sehr lange Haltezeit. Ein ähnlicher Effekt ist auch bei normalgeglühten Stählen zu verzeichnen.

Gegebenenfalls kann auch bei großen Wandstärken auf ein Spannungsarmglühen verzichtet werden, da in der WEZ bereits im Schweißzustand eine ausreichende Sprödbrechtsicherheit und tiefe Härte vorliegt; näheres hierzu im Kapitel Zähigkeit.

4.3 Kaltumformung

Eine Kaltumformung führt wie bei normalgeglühten und vergüteten Stählen mit steigendem Kaltumformgrad zu erhöhten Festigkeitskennwerten, die Dehnung im Zugversuch nimmt dagegen ab und die Kerbschlagarbeit-Temperaturkurve wird erfahrungsgemäß um 5 °C je % Kaltumformung zu höherer Temperatur verschoben. Wegen der günstigen Ausgangszähigkeit erfordern die TM-Bleche vielfach nach dem Kaltumformen keine Wärmebehandlung. Sollte die Zähigkeit durch zu hohe Kaltumformung beeinträchtigt worden sein, so hilft ein Glühen im Temperaturbereich des

Spannungsarmglühens, die schädliche Wirkung der Kaltverfestigung zu reduzieren. Die gültigen Regelwerke sind aber in jedem Fall zu berücksichtigen.

4.4 Schweißen TM-gewalzter Stähle

Der entscheidende Vorteil der TM-gewalzten Stähle aus Sicht des Verarbeiters liegt im Schweißen. Durch die Anwendung der beschleunigten Abkühlung nach dem Walzen lassen sich auch bei größeren Blechdicken die Festigkeitseigenschaften der normalgeglühten Stähle mit erheblich verminderten Kohlenstoff-, Legierungs- und Mikrolegierungsgehalten erzielen (Tabelle 1). Die [Kohlenstoffäquivalente](#) CE, Pcm und CET werden verwendet, um die Schweißbarkeit von Stählen zu kennzeichnen.

4.4.1 Härte in der Wärmeeinflusszone

Die [Schweißbarkeit](#), wie sie in DIN 8528 definiert, ist eine komplexe Größe, die sich schwerlich durch einen Kennwert oder eine Formel beschreiben lässt. Die Härtebarkeit in der WEZ ist ein Aspekt der Schweißbarkeit, der sich gut mit der chemischen Zusammensetzung des Stahles korrelieren lässt [7]. Dies gilt erfahrungsgemäß in gleichem Maße für normalgeglühte wie für TM-Stähle, denn für die Härte der Grobkornzone spielt das Ausgangsgefüge eine untergeordnete Rolle.

Bild 1 zeigt die Härte in der WEZ eines S460M und eines S460N in Abhängigkeit von der Abkühlzeit beim Schweißen. Die Härtewerte wurden an Auftragsschweißungen in der WEZ jeweils unmittelbar neben der Schmelzlinie bestimmt (SEP 1203). Die unterschiedlichen Abkühlzeiten wurden durch Variation der Streckenenergie beim Schweißen realisiert. Die Vorwärmtemperatur betrug generell 20°C.

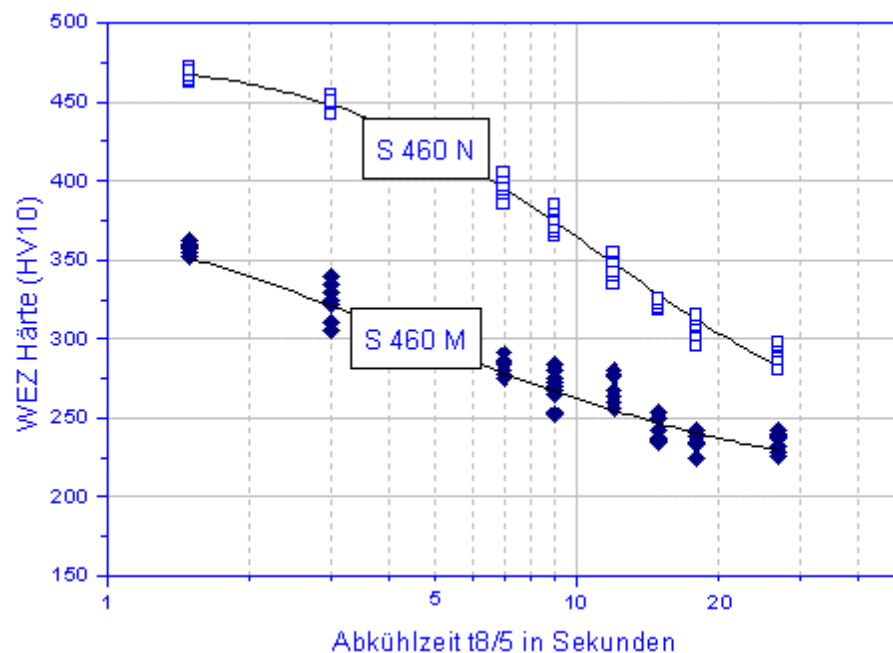


Bild 1 : Härte in der WEZ in Abhängigkeit von der Abkühlzeit $t_{8/5}$ für einen normalgeglühten und einen TM-gewalzten S460

Im Bereich üblicher $t_{8/5}$ -Zeiten ergab sich für den TM-Stahl eine 50-100HV₁₀ niedrigere Härte. Der geringere Kohlenstoffgehalt der TM-Stähle führte zu einer niedrigeren Martensithärte. Diese bestimmt bei kurzen Abkühlzeiten, wie sie für das Schweißen mit niedrigem Wärmeeinbringen kennzeichnend sind, die Härte der WEZ. Bei höherem Wärmeeinbringen kommt der Einfluss der Legierungselemente, die die Durchhärtung erhöhen, zunehmend zum Tragen. Hierbei sind neben dem Kohlenstoff, soweit vorhanden, vornehmlich Molybdän, Chrom, Mangan, Vanadin und Bor zu nennen. Im Falle des S460N trat für höhere $t_{8/5}$ -Zeiten die für den Stahltyp übliche Ausscheidungshärtung durch Vanadin auf.

In mehrlagig ausgeführten Schweißverbindungen ergeben sich durch die Wärmewirkung der Folgelagen Umkörn- und Anlasseffekte, die die WEZ-Härte gegenüber den hier wiedergegebenen einlagigen Auftragschweißungen erniedrigen können. Üblicherweise liegt bei den optimierten TM-Stählen dadurch die Härte bereits im Schweißzustand unter 248HV₁₀.

4.4.2 Kaltrissbildung und erforderliche Vorwärmtemperatur beim Schweißen

Ein weiterer Aspekt der Schweißbeignung, der mit der Härbarkeit in Verbindung steht, ist die verzögerte wasserstoffinduzierte Kaltrissbildung in der WEZ. Zusätzlich zur vergleichsweise niedrigen WEZ-Härte ist für die Stähle mit tiefem Kohlenstoffgehalt eine erhöhte Zähigkeit in der WEZ festzustellen, die einer Anrissbildung entgegenwirkt. Die CET-Formel [vii], die in **Tabelle 1** angegeben ist, beschreibt den Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung von Baustählen und ihrer Neigung zur wasserstoffinduzierten Rissbildung beim Schweißen. Aus dieser Formel wird in noch stärkerem Maße als für die WEZ-Härte eine dominierende Rolle des Kohlenstoffgehaltes deutlich.

Es sind eine Reihe von Versuchsbedingungen genormt worden ^{viii}, um die Neigung eines Stahles zur Kaltrissbildung zu ermitteln. Der Y-Groove- oder Tekken-Test simuliert die Wurzelraupe einer stark dehnbehinderten Stumpfnah. Es wurden die Rissanteile in Abhängigkeit von der [Vorwärmtemperatur](#) in diesem Test ermittelt. Vergleichende Untersuchungen an Stählen gleicher Streckgrenze verdeutlichten, wie sich die geringere Rissanfälligkeit der Stähle mit abnehmendem Kohlenstoffgehalt und speziell der Analysen von TM-Stählen auf die erforderliche Mindestvorwärm- und Zwischenlagentemperatur auswirken. Die jeweiligen Rissanteile sind in **Bild 2** zusammengefasst. Während ein konventioneller St 52-3 unter den gegebenen Bedingungen ein Vorwärmen auf 150 °C erforderte, ließ sich der TM-Stahl auch ohne Vorwärmung fehlerfrei schweißen.

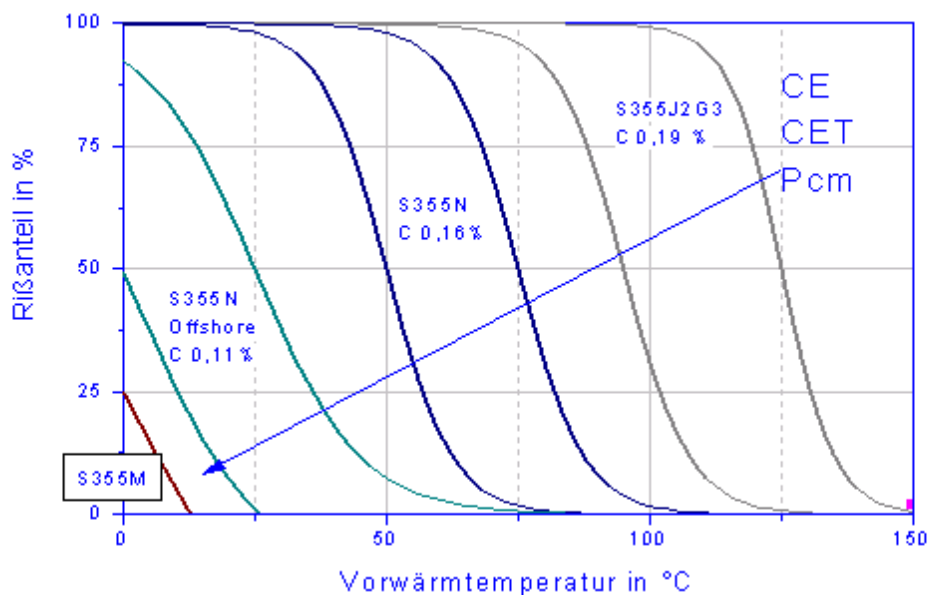


Bild 2 : Rissanteil im Y-Groove-Test für S355 Stähle mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur. Blechdicke 40-60 mm, E-Hand-Schweißung mit Wärmeerbringen 12 kJ/cm, 4-6 ml H_{DM} je 100 g

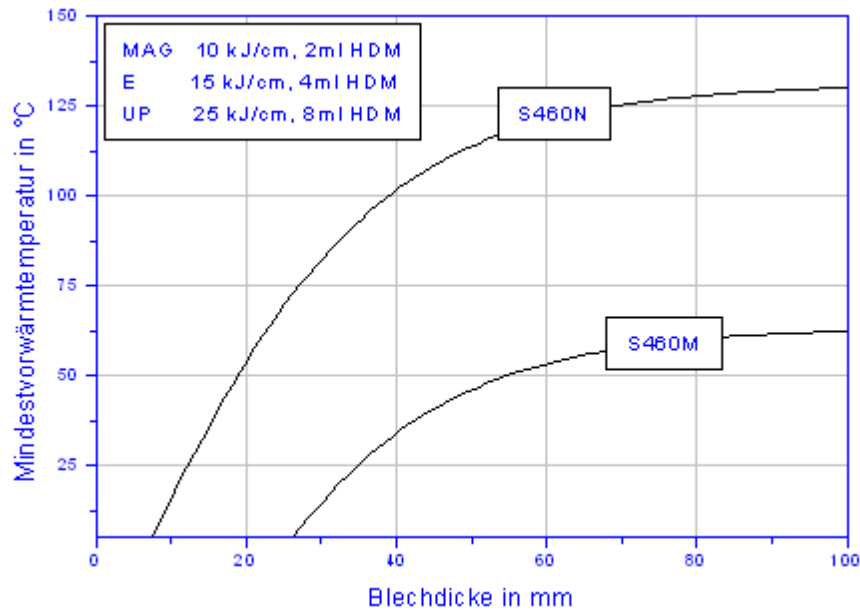


Bild 3 : Mindestvorwärmtemperaturen für S460M und S460N in Abhängigkeit von der Blechdicke, mittlerer Spannungszustand

Aus einer Vielzahl von Kaltrisstests mit unterschiedlichen Bedingungen wurden Formeln hergeleitet, die den Einfluss der wichtigsten Parameter beschreiben und angemessene Vorwärm- und Mindestzwischenlagentemperaturen zum Vermeiden von Rissen berechnen lassen (siehe SEW 088 Beiblatt 1). Wie **Bild 3** zeigt, bieten TM-Stähle beträchtliche Vorteile.

Die praktischen Erfahrungen haben diese Empfehlungen bestätigt. Ein eindrucksvolles Anwendungsbeispiel bietet das riesige Sturmflutwehr der Maas bei Rotterdam. Hierfür wurden 24000 t thermomechanisch gewalzte Bleche bis 120 mm Blechdicke verarbeitet. In der Werkstatt und auf der Baustelle wurden alle Blechdicken ohne Vorwärmung geschweißt. Nach den guten Erfahrungen mit diesem Projekt entschloss sich der Auftraggeber auch die Erasmusbrücke in Rotterdam aus TM-Stählen zu bauen. Aus Gewichtsgründen wurden 2000 t Bleche des S460 verwendet. Beim Schweißen dieses Stahles wurde das Vorwärmen bis 50 mm Wandstärke eingespart.

Für den Verarbeiter lassen sich demnach bei Verwendung von TM-Stählen speziell bei größeren Wanddicken die Vorwärmtemperaturen erheblich reduzieren, vielfach kann auf ein Vorwärmen gänzlich verzichtet werden. Dies kann einen entscheidenden Einfluss auf die Fertigungskosten und die erforderliche Zeit zur Realisierung einer Schweißkonstruktion haben [ix]. Es ist selbstverständlich, dass dieser Vorteil erst voll auszuschöpfen ist, wenn unter kontrollierten Arbeitsbedingungen und mit Zusatzwerkstoffen geschweißt wird, die einen sehr niedrigen Wasserstoffeintrag sicherstellen.

4.4.3 Zähigkeit in Wärmeeinflusszone

Ein hoher metallurgischer Reinheitsgrad des Stahles, tiefe Gehalte an Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor, Stickstoff und Vanadin wirken sich sowohl bei den optimierten normalgeglühten Stählen als auch bei den TM-Stählen positiv auf die Sprödbrechtsicherheit von Grundwerkstoff und Schweißverbindung aus. Es hat sich gezeigt, dass TM-Stähle auch beim Schweißen mit hohem Wärmeeinbringen hohe Anforderungen an die Zähigkeit in der WEZ erfüllen. Das beste Beispiel hierfür sind die in Lage-Gegenlage geschweißten Längsnähte für Pipelines. Obwohl sich $t_{8/5}$ -Zeiten zwischen 30 und 50 Sekunden ergaben, wurde in der WEZ hohe Zähigkeit erreicht [x].

Die **Bilder 4.a)** und **4.b)** geben die Kerbschlagarbeit für die WEZ von S355M bei unterschiedliche Prüftemperaturen wieder. Eine große Zahl von Kerbschlagprüfungen aus Zulassungen und

Schweißverfahrensprüfungen wurde entsprechend den Anforderungen der Offshore-Spezifikationen bei -40 °C durchgeführt. Das die Kerbschlagarbeit in der WEZ dieser Stähle unempfindlich auf unterschiedliches Wärmeeinbringen reagiert, zeigt **Bild 5**. Aus diesen Erfahrungen geht hervor, dass TM-Stähle die Sicherheit eines geschweißten Bauteils erhöhen können und den Einsatz gesteigerter Abschmelzleistungen erlauben.

Unter Umständen können aus TM-Stählen geschweißte Bauteile wegen der hohen WEZ-Zähigkeit und niedrigen WEZ-Härte im Schweißzustand belassen werden. Beim Verzicht auf ein Spannungsarmglühen nach dem Schweißen sind natürlich die Vorgaben der jeweils gültigen Regelwerke zu berücksichtigen. Ein Spannungsarmglühen nach dem Schweißen, das üblicherweise bei 530 bis 580 °C durchgeführt wird, verändert die Kerbschlagzähigkeit der WEZ kaum.

Bei normalgeglühten Stählen, speziell des Typs StE 460 wurden nach dem Spannungsarmglühen zum Teil erhebliche Zähigkeitseinbußen in der WEZ beobachtet [xi]. Diese wurden im wesentlichen auf eine Ausscheidung von Vanadinkarbonitriden zurückgeführt. Eine derartige Versprödung kann beim S/P460M mit weniger als 0,07% Vanadin ausgeschlossen werden.

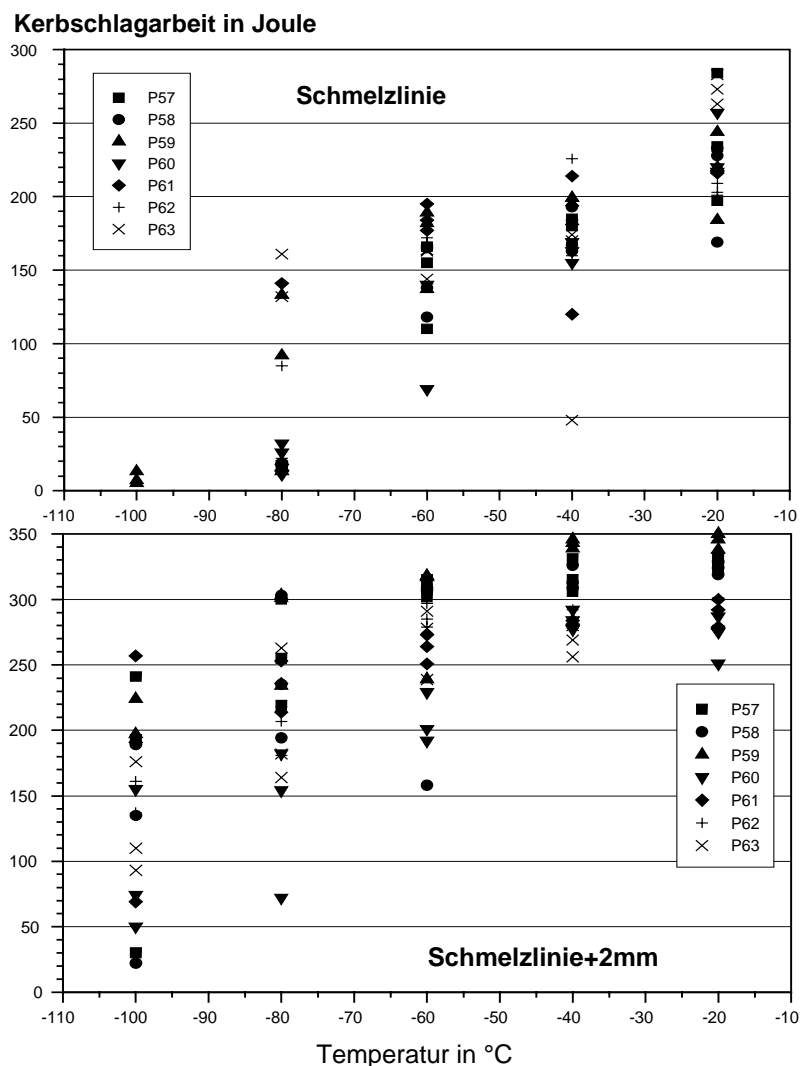


Bild 4 : Einzelwerte der Kerbschlagarbeit in der WEZ eines TM-Stahles S355M, Wärmeeinbringen 30 kJ/cm, Schweißzustand
Teilbilder: a) Kerblage Schmelzlinie, b) Schmelzlinie+2 mm

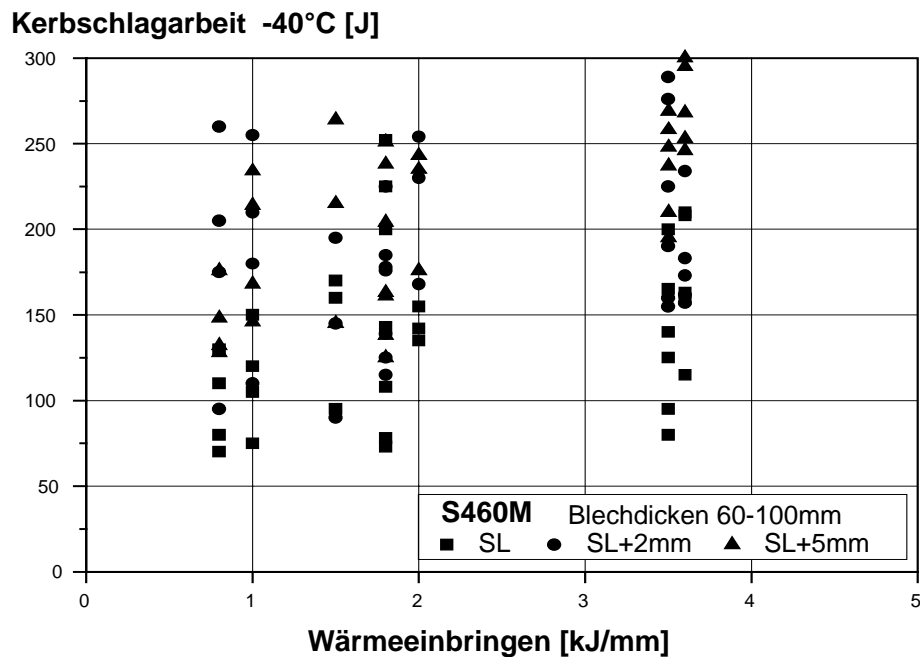


Bild 5 : Kerbschlagarbeit (Mittelwerte -40°C) in der WEZ des S460M in Abhängigkeit vom Wärmeeinbringen beim Schweißen

Falls ein Spannungsarmglühen vorgesehen ist, sollten die Glühbedingungen bei der Stahlbestellung mit dem Hersteller vereinbart werden, um unzulässig hohe Einbußen in Streckgrenze und Festigkeit auszuschließen. Gegebenenfalls kann auch der Nachweis der geforderten Eigenschaften an simulierend geprüften Proben bestellt werden.

4.4.4 Schweißguteigenschaften

Durch die Aufmischung mit geschmolzenem Grundwerkstoff kommt es in mehrlagig ausgeführten Schweißnähten in den einzelnen Raupen zu unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung. Je stärker sich Grundwerkstoff und reines Schweißgut voneinander unterscheiden, desto stärker unterscheiden sich Wurzel- und Decklagen. In der Wurzel eines St 52-3 kann der Kohlenstoffgehalt 0,13 % durchaus überschreiten. Hierdurch kann die Zähigkeit des Schweißgutes erniedrigt werden. Die chemische Zusammensetzung der TM-Stähle entspricht weitgehend der eines mit SD3-Draht geschweißten Schweißgutes. Die Aufmischung spielt daher eine weit geringere Rolle und die Schweißnaht ist chemisch und in den Eigenschaften wesentlich homogener.

4.5 Flammrichten

Das Flammrichten ist ein häufig angewandtes Verfahren zur Formgebung und Formkorrektur von Bauteilen. Viele praktische Hinweise gibt das neu erschienene Handbuch der Flammrichttechnik ^[xii]. TM-Stähle können problemlos flammgerichtet werden ^[xiii, xiv, xv]. Wie bei konventionellen Stählen müssen jedoch auch hier bestimmte Randbedingungen eingehalten werden. Zu unterscheiden sind das Flammrichten mit Wärmebahnen und das Flammrichten mit Wärmepunkten und Wärmekeilen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Zugversuche an Flachzugproben quer zur Wärmebahn (Probendicke = Blechdicke) (aus Hubo u.a.)

		R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)
15mm Blech				
Lieferzustand		449	517	19
Flammrichten	T _{max}			
	650°C	444	505	20
	750°C	454	516	19
	850°C	458	517	17
	950°C	431	502	20
50mm Blech				
Lieferzustand		413	504	32
Flammrichten	T _{max}			
	650°C	402	503	30
	750°C	402	504	32
	850°C	409	505	32
	950°C	395	503	28

Beim Flammrichten mit Wärmebahnen wird das Blech rasch und lediglich oberflächennah erhitzt. Die unmittelbar darunter gelegenen kalten Werkstoffbereiche führen beim Entfernen der Flamme zu einer raschen Abkühlung. Die austenitisierte Randschicht wandelt dabei wieder in ein feinkörniges Gefüge mit guten mechanischen Eigenschaften um (**Tabelle 2**). Um ein Kornwachstum zu vermeiden, sollte ein Überhitzen der Oberfläche vermieden werden. Eine Spitzentemperatur von maximal 950°C (hellrot) ist dabei akzeptabel.

Zum Flammrichten mit Wärmepunkten und Wärmekeilen wird der gesamte Blechquerschnitt durchgreifend erwärmt. Dadurch entstehen längere Haltezeiten auf Spitzentemperatur und langsamere Abkühlung. Bei Spitzentemperaturen über 700°C reagieren TM-Stähle mit einer Verminderung der Streckgrenze **Tabelle 3**, die Zugfestigkeit bleibt weitgehend erhalten. Da der beste Richterfolg für Temperaturen unterhalb der Umwandlungstemperatur erzielt werden, sind Obergrenzen von 650°C oder kurzfristig 700°C sowohl verfahrenstechnisch als auch werkstoffbedingt zu empfehlen.

Tabelle 3: Einfluss der Glüh­temperatur auf die Streckgrenze in MPa von S355M (Ofenglü­hung Abkühlen an ruhender Luft)

Blechdicke	15 mm	50 mm	75 mm
Haltezeit	15 Min.	50 Min.	75 Min.
Lieferzustand	406	422	389
Glüh­temperaturen			
620°C	410	417	399
750°C	364	348	327
850°C	382	365	334
925°C	370	372	344

TM-Bleche mit sehr hohen Streckgrenzen neigen beim Flammrichten eher zum Erweichen, falls ihre Festigkeitseigenschaften durch Kaltverformungsbeträge gesteigert wurden. Diese erfordern möglicherweise mehr Vorsicht beim Flammrichten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Nichteignung zur Warmumformung schließt die TM-Stähle von einigen Anwendungen im Anlagen und Behälterbau aus.

Die gute Schweißbarkeit ist als hervorstechendes Merkmal der thermomechanisch gewalzten Stähle zu nennen. Mögliche wirtschaftliche Vorteile liegen im Verzicht auf Vorwärmen, Leistungssteigerung beim Schweißen und Verzicht auf Spannungsarmglühen. Der Einsatz von TM-Stählen ist aber nur sinnvoll, wenn die Vorteile der verbesserten Schweißbarkeit kostenmäßig voll und signifikant genutzt werden können. Dies wird in vielen Fällen nicht möglich sein.

Das Herstellen von TM-Stählen mit homogenen und reproduzierbaren Eigenschaften erfordert viel Erfahrung und Sorgfalt. Nicht jeder Anbieter hat hierfür Fertigungsanlagen und Know-how. Bei vielen Stahlherstellern fehlen diese Voraussetzungen - trotzdem werden sie TM-Stähle laut Norm anbieten. Der Anwender ist daher gut beraten, wenn er sich vorher von der Qualifikation des Anbieters überzeugt und auch prüft, ob er in der Verarbeitung echte Kostenvorteile durch den Einsatz von TM-Stählen erreicht.

Literaturübersicht:

- [1] Streißelberger A. u.a.: 'Verfahren der thermomechanischen Behandlung mit beschleunigter Kühlung zur Herstellung von Grobblech aus Baustählen'. Stahl und Eisen 111 (1991), H.5, S. 65-73.
- [2] Streißelberger A. u.a.: 'Erweiterte Nutzungsmöglichkeiten der thermomechanischen Behandlung von Grobblechen', Stahl und Eisen 117 (1997) Nr. 4
- [3] Hanus, F.: 'S500M - Structural steel with 500MPa yield strength for offshore applications', Dillinger Offshore Letter 2/2000 (2000), S. 2-6
- [4] VdTÜV-Werkstoffblatt 448 (09.88), 'Schweißgeeignete thermomechanisch umgeformte Feinkornbaustähle', Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine (1988), Verlag TÜV-Rheinland, Köln
- [5] prDIN EN 10028:1994 : Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen Teil 5 Schweißgeeignete Feinkornbaustähle thermomechanisch gewalzt (1994)
- [6] Hanus, F., J. Schütz u. J.Grünwald: 'Härte in der WEZ - Wirkung der chemischen Zusammensetzung des Stahls, der Schweißbedingungen und des Spannungsarmglühens', Schweißen und Schneiden 1996, DVS-Berichte Bd 176, S. 150-153.
- [7] STAHL-EISEN-Werkstoffblatt (SEW) 088, Beiblatt 1 'Kaltrissicherheit beim Schweißen; Ermittlung angemessener Mindestvorwärmtemperaturen' , (1993) Verlag Stahleisen, Düsseldorf
- [8] prDIN EN 50120-111 Kaltrissprüfungen an Schweißverbindungen - Teil 111: Selbstbeanspruchende Prüfungen, Mai 1999
- [9] Berghout, C.F., und H. Crucq: 'Kaltrissicheres Schweißen an einer Brücke ohne Vorwärmung', DVS-Berichte Bd. 131, S. 154/58. Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag, Düsseldorf 1990.
- [10] Scholz, E., G. Schuster und J. Sordi: 'Unterpulver-Mehrdrahtschweißen von Großrohren für den Transport von Sauer gas'. DVS-Berichte Bd. 123, S.92/96. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf 1989.
- [11] Brenner U., G. Gnirß: 'Schweißtechnische Verarbeitung von Feinkornbaustählen im Druckbehälterbau', Technische Überwachung, Bd.27 (1986), Nr.3, S 131ff.
- [12] Pfeiffer R.: 'Handbuch der Flammrichttechnik', DVS-Verlag 1996, ISBN 3-87155-532-0
- [13] Hanus, F.: 'Flammrichten thermomechanisch gewalzter Baustähle', Schweißen und Schneiden 46 (1994),Heft 4, S.163-166.
- [14] Ormig H. u.a.: 'Flammrichten von TM-Stählen', Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 138 (1993), H.7, S.248-257
- [15] Hubo R. u.a.: 'Einfluß des Flammrichtens auf die Eigenschaften thermomechanisch gewalzter Schiffbaustähle', Stahl und Eisen 114 (1994) Nr.9, S.97-102.