

# Anwendung von TM-Stählen in Bauwerken des Brückenbaus und der Energietechnik

Dr. Falko Schröter, Dr. Tobias Lehnert, Dillingen (Saar)

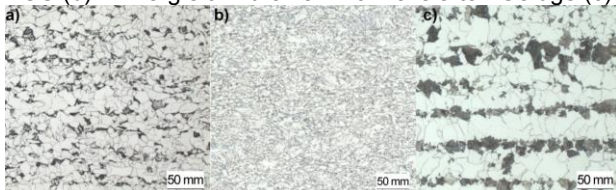
## 1 Einleitung

Thermomechanisch gewalzte Stähle (so genannte TM-Stähle) können als der letzte große Entwicklungssprung in der modernen Grobblechherstellung angesehen werden. Während sie ursprünglich für Anwendungen in geschweißten Großrohren für Öl- oder Gasleitungen entwickelt wurden, fassen sie heutzutage aufgrund ihrer vorteilhaften Verarbeitungseigenschaften mehr und mehr auch in anderen Anwendungsfeldern Fuß, wie z.B. dem modernen schweren Stahlbau. Der entscheidende Vorteil thermomechanisch gewalzter Stähle ist ihre exzellente Schweißseignung, vor allem in der Verbindung mit höherfesten Eigenschaften (Streckgrenzen  $> 355$  MPa). Diese Eigenschaftskombination prädestiniert solche Stähle für anspruchsvolle schweißintensive Anwendungen, wie zum Beispiel im Brückenbau oder der Energietechnik. Darüber hinaus haben die hohen Anforderungen an Fertigungseffizienz und -geschwindigkeit und der damit verbundene Einsatz hocheffizienter Schweißverfahren, wie z.B. UP-Mehrdrahtschweißen, im Fundamentbau für Offshore Windturbinen dazu geführt, dass auch in diesen Anwendungen thermomechanisch gewalzte Stähle mittlerweile bevorzugt eingesetzt werden [1].

## 2 Herstellung von TM-Stählen

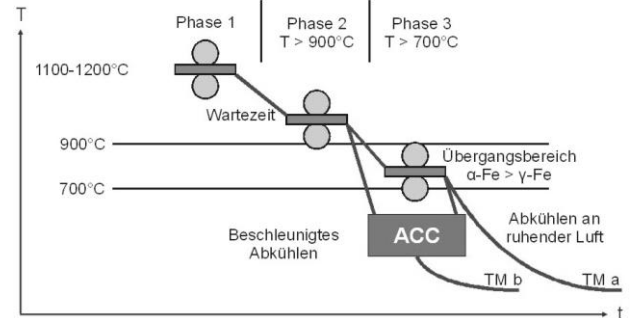
Obwohl der wichtigste und namensgebende Schritt in der Herstellung thermomechanisch gewalzter Stähle der besondere Walzprozess ist, beginnt die Herstellung moderner TM-Stähle bereits in der Erschmelzung im Stahlwerk. Ein hoher Reinheitsgrad, niedrigste Gehalte an Störelementen wie Phosphor, Schwefel, Stickstoff und Bor sowie eine schlanke, an den anschließenden Walzprozess angepasste chemische Analyse garantieren die hochwertigen Eigenschaften am fertigen Grobblech. Beim eigentlichen thermomechanischen Walzen werden dann in starkem Maße verschiedene Kornfeinungsmechanismen ausgenutzt: Durch eine präzise kontrollierte Abfolge von Walzschritten bei genau definierten und metallurgisch relevanten Temperaturen sowie ein mögliches beschleunigtes Abkühlen nach dem Walzprozess (ACC) wird eine extrem feine Kornstruktur erreicht, die Voraussetzung für die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften ist [2]. Dabei gilt nach dem Hall-Petch-Gesetz: Je kleiner die Korngröße, desto größer werden die Festigkeits- und Zähigkeitswerte. Bild 1 vergleicht beispielhaft die Gefügestruktur für konventionelle normalisierte Stähle mit der von thermomechanisch gewalzten Stählen (mit und ohne beschleunigte Abkühlung (ACC)).

Bild 1: Die Gefüge von TM-Stählen ohne ACC (a) und mit ACC (b) im Vergleich zu einem normalisierten Gefüge (c)



Der in der thermomechanischen Walzung angewendete Walzstichplan ist individuell an die chemische Zusammensetzung, die Blechdicke und die benötigten Festigkeits- und Zähigkeitswerte angepasst. Einige typische TM-Prozesse sind nachfolgend dargestellt, Bild 2.

Bild 2: Thermomechanisches Walzen (Temperaturwerte als grober Anhalt)

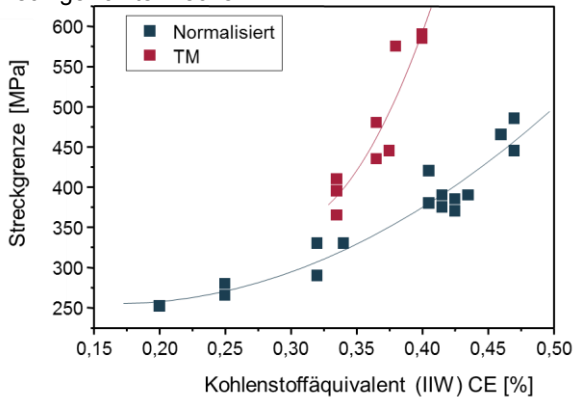


Besonders für dickere Bleche kann ein beschleunigtes Abkühlen (ACC) nach dem letzten Walzstich notwendig sein, da es die kristallographische Umwandlung der eingeförmten Austenitkörner erzwingt, bevor es zu einer Rekristallisation dieser kommen kann. Darüber hinaus kann sich für extrem dicke Bleche und hochfeste TM-Stähle ein Anlassprozess an das beschleunigte Abkühlen anschließen [3].

## 3 Chemische Zusammensetzung für exzellente Schweißseignung

Der durch die feine Kornstruktur (siehe Bild 1) erzielte Festigkeitserfolg bei thermomechanisch gewalzten Stählen erlaubt eine deutliche Reduzierung der Gehalte an Kohlenstoff und teilweise anderer festigkeitssteigernder Legierungsmittel. Dieser Zusammenhang bildet die Basis für die im Vergleich zu einem normalisierten Stahl der gleichen Festigkeitsklasse niedrigeren Kohlenstoff-äquivalente von TM-Stählen, welche wiederum als Maß für die Schweißseignung von Stählen dienen. Bild 3 zeigt anschaulich die Verbindung zwischen dem Kohlenstoff-äquivalent CE (IIW) und der Streckgrenze für die beiden Produktionsrouten thermomechanische Walzung (TM) und Normalisieren.

Bild 3: Zusammenhang zwischen Kohlenstoffäquivalent und Streckgrenze für normalisierte und thermomechanisch gewalzte Bleche



Die aus der schlankeren chemischen Stahlzusammensetzung resultierende bessere Schweißseignung ist der Hauptvorteil thermomechanisch gewalzter Stähle. Er spiegelt sich vor allem in einer Reduzierung des nötigen Vorwärmens (siehe Kapitel 5.2) wider, so dass bei entsprechenden günstigen Schweißparametern sogar für dickere höherfeste TM-Stähle teilweise auf ein Vorwärmen verzichtet werden kann. Darüber hinaus verfügen diese Stähle über sehr gute Zähigkeitseigenschaften. Die darin verborgenen Zähigkeitsreserven bieten dem Fertiger auch nach verschiedenen, sich tendenziell auf die Werkstoffzähigkeit negativ auswirkenden Fertigungsschritten, wie z.B. Kaltverformen oder Schweißen noch ausreichende Zähigkeitslevel. Diese garantieren eine hohe Bauteilsicherheit in der Fertigung sowie im späteren Betrieb [4].

Die technischen Vorteile thermomechanisch gewalzter Stähle lassen sich abschließend wie folgt zusammenfassen:

- Feines Korn
  - ⇒ Hohe Festigkeit
  - ⇒ Hohe Zähigkeit
- Niedrige Kohlenstoffgehalte bzw. -Äquivalente
  - ⇒ hervorragende Schweißseignung
    - ⇒ *kein oder weniger Vorwärmen (Kap. 5.2)*
    - ⇒ *schnelle sichere Fertigung (Kap. 5.1)*
    - ⇒ *Hochleistungsschweißverfahren (Kap. 5.3)*

Für andere Fertigungsverfahren, wie z.B. das Umformen oder das Flammrichten, sei auf einschlägige Literatur verwiesen [5].

#### 4 Neueste Entwicklungen

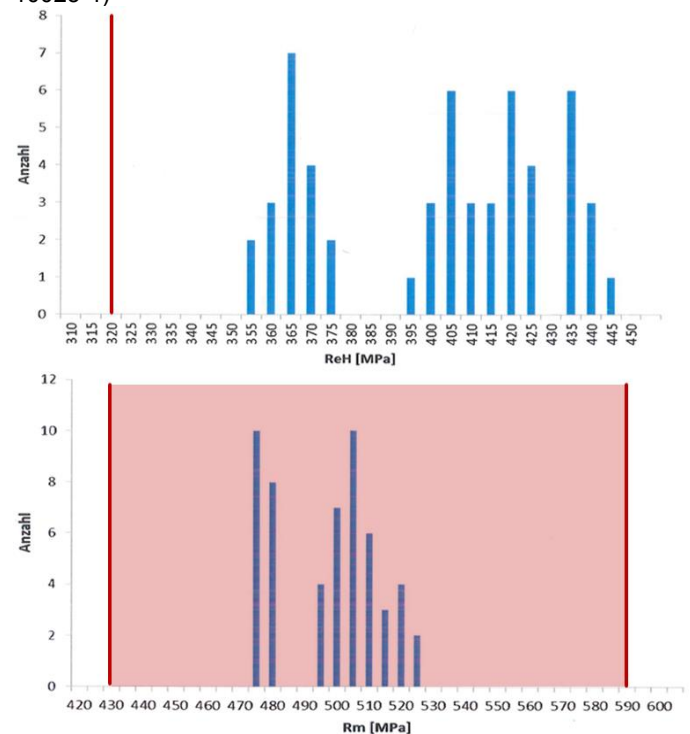
Obwohl thermomechanische gewalzte Stähle bereits auf eine lange Geschichte zurückblicken können, werden diese Güten stetig weiterentwickelt, um neue Anwendungsfelder zu erschließen. Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele solcher Entwicklungen vorgestellt:

##### 4.1 TM Bleche bis 140 mm

Bisher waren dem Fertiger die Vorteile thermomechanischer Walzung nur für Bleche mit Blechdicken  $\leq 120$  mm zugänglich. Diese Grenzdicke bestimmt sich vor allem aus den für das TM-Walzen notwendigen Walzkräften sowie, da der Höhe der Walzverformung eine wesentliche Bedeutung bei der Erzielung des Eigenschaftsniveaus zukommt, aus der Verfügbarkeit von Stahl-Halbzeugen in entsprechenden Erzeugnisdicken. EN 10025-4 als Norm für im Stahlbau angewendete TM-

Stähle definiert solche Stähle deshalb auch nur bis zu einer Dicke von 120 mm. Neueste Entwicklungen in der Stahlerzeugung konnten dieses fertigungstechnische Limit jetzt nochmal um 20 mm nach oben verschieben, so dass mittlerweile die Stahlgüte S355ML in Blechdicken bis zu 140 mm dargestellt werden kann. Hierbei wurden dieselben mechanischen Anforderungswerte wie für Bleche mit 120 mm nach EN 10025-4 zugrunde gelegt (siehe Bild 4). Eine Zertifizierung solcher Stähle nach Germanischem Lloyd liegt vor und eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beim DiBT ist beantragt.

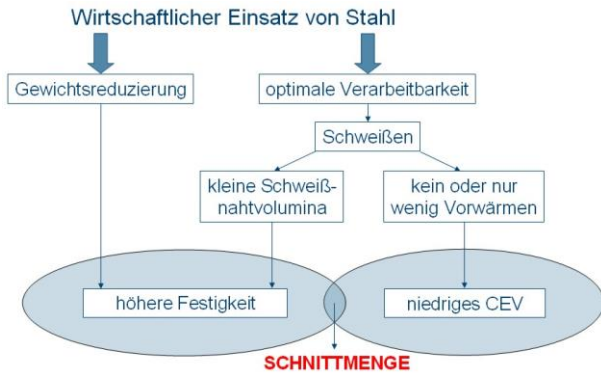
Bild 4: Erfüllung der mechanische Eigenschaften für S355ML in 140 mm (rot = Bereich für 120 mm aus EN 10025-4)



##### 4.2 Höherfeste TM-Stähle mit Streckgrenzen > 460 MPa

Für besonders hoch beanspruchte Stahlbauten, wie z.B. Offshore-Plattformen oder auch Fallrohre in Pumpspeicherkraftwerken werden zunehmend höherfeste Stähle gefordert, um den dort herrschenden hohen statischen Belastungen gerecht zu werden und gleichzeitig Gewicht bzw. Blechdicke einzusparen. Die an den oft schlecht zugänglichen Baustellen meist sehr begrenzten Transport- und Montagegewichte machen es häufig nötig, möglichst lange Montageeinheiten herstellen zu können und die Schweißvolumina bei der Montage möglichst gering zu halten. Daher greifen die Konstrukteure solcher Stahlbauten heutzutage auf immer höherfestere Stahlgüten, wie z.B. S500 oder S690 zurück. Neben der Festigkeit spielt jedoch auch die Wirtschaftlichkeit bei der Stahlauswahl eine entscheidende Rolle (siehe Bild 5). Dazu gehören neben der angesprochenen Gewichtsreduzierung auch Anforderungen wie optimale Verarbeitbarkeit, vor allem eine gute Schweißseignung auch unter widrigen Montagebedingungen, um zum einen den hohen Sicherheitsstandards gerecht zu werden und zum anderen ein effizientes schnelles Arbeiten zu ermöglichen.

Bild 5: Wirtschaftlicher Einsatz von Stahl



Letztgenannte Forderung nach optimaler Verarbeitbarkeit steht jedoch im prinzipiellen Gegensatz zu den Forderungen nach möglichst geringem Gewicht durch Verwendung höherfester vergüteter Stähle, wie S690QL, da solche klassischen höherfesten Güten meist deutlich höhere Kohlenstoffäquivalente aufweisen. Um diesen Gegensatz zu lösen, wurden in den letzten Jahren auch thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle mit einer Streckgrenze von über 500 MPa (z.B. S500ML) entwickelt, deren Einsatz im Vergleich zu Stählen S690 trotz höherer Dicken durch wesentlich vereinfachte Schweißprozeduren wirtschaftlich sein kann.

Solche Stähle werden 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 hohen Schweißignung niedrige Kohlenstoffäquivalente einstellen zu können, wird ferner eine Zulegierung von Kupfer, Nickel, Chrom und/oder Molybdän genutzt.

### 4.3 Vorteilhafte Eigenschaftskombinationen

Eine weitere Anforderungskombination im Stahlbau könnte in Zukunft ebenfalls von thermomechanischer Walzung profitieren. In vielen Ländern erfreuen sich sogenannte wetterfeste Stähle, d.h. Stähle mit einer leichten Legierung von Kupfer und Chrom, die unter bestimmten Bedingungen den Einsatz des Stahles im unbeschichteten Zustand erlaubt, steigender Beliebtheit. Für den amerikanischen Stahlbrückenbau wurde dabei versucht, auch höherfeste wetterfeste Stähle einzusetzen. Da sowohl die Steigerung der Festigkeit als auch die Einstellung eines ausreichenden I-Indexes nach ASTM G101, welche zur Erzielung der Wetterfesteigenschaften notwendig vorausgesetzt wird ( $I > 6,0$ ), zu erhöhten Legierungsgehalten im Stahl und damit zu einer schlechteren Schweißignung (siehe Bild 6) führt, bieten TM-Stähle auch hier eine Möglichkeit solche Stähle mit schlankeren chemischen Analysen herzustellen und damit einen hinsichtlich Schweißbarkeit wirtschaftlichen Einsatz zu ermöglichen.

Höherfest      ⇨      Schweißignung ↓ (CEV ↑)  
 Wetterfest     ⇨      Schweißignung ↓ (CEV ↑)  
 TM-Walzung    ⇨      Schweißignung ↑ (CEV ↓)

Bild 6: Eigenschaftskombination Höherfest + Wetterfest

In der europäischen Normung EN 10025-5 sind solche höherfesten Wetterfeststähle zwar noch nicht standardisiert, im ASTM Standard A709 sind sie jedoch bereits bis

zu einer Streckgrenze von 485 MPa beschrieben. Durch den Einsatz der TM-Walzung können hierbei Kohlenstoffäquivalente erzielt werden, die zwar über denen von nichtwetterfesten TM-Stählen, wie S460ML, aber noch unter denen von konventionellen normalisierten Stählen liegen (siehe Tabelle 1).

Stahlgüte	S460N	S460M	„S460W-TM“
CET	0,30	0,25	0,28
Blechdicke	50 mm	50 mm	50 mm

Tabelle 1: Vergleich der typischen Kohlenstoffäquivalente CET für verschiedene Stahlgüten S460

## 5 Anwendungsbeispiele im modernen Stahlbau

Im Folgenden wird an drei verschiedenartigen Beispielen aus dem aktuellen Stahlbau gezeigt, inwieweit moderne TM-Stähle zu den in Kapitel 3 erläuterten Fertigungsvorteilen führen können, z.B. einer schnelleren sicheren Fertigung bzw. weniger Vorwärmeenergie oder hohe schweißtechnischer Effizienz.

### 5.1 Brückenbau: Viadukt von Millau

Nahe dem südfranzösischen Städtchen Millau wurde 2004 ein gigantisches, von Norman Foster entworfenes Brückenbauwerk der Superlative fertig gestellt. Das Viadukt von Millau ist 2.460 Meter lang und 343 Meter hoch - und damit die zum Zeitpunkt der Eröffnung höchste Brücke der Welt, höher selbst als der Eiffelturm. Daneben ist es auch die derzeit längste Multi-Schrägseilbrücke der Welt. 18.000 t des insgesamt 43.000 t schweren Stahldecks bestehen aus TM-Stahl. Der Mittelkasten des Fahrbahnträgers und Teile der Pylone wurden in S460M/ML ausgeführt, einem thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustahl. Seine hohe Festigkeit verringerte das Gewicht der Deckkonstruktion und erleichterte damit das Bauen im Taktschiebeverfahren (Bild 7). So konnte im Mittelkasten des Fahrbahnträgers mit Dicken von maximal 80 mm gearbeitet werden, eine signifikante Reduzierung des gewichtsbestimmten Kragmoments beim Einschieben.

Bild 7: Einschieben mit Spitzenpylon



Als Schweißverfahren wurden in der Werkstatt vor allem UP-Schweißen (121) und MAG-Fülldraht (135) eingesetzt. Die Größe des Projekts rechtfertigte die Errichtung von eingehausten Vormontageplätzen an der Baustelle, in dem die Verbindung der vorgefertigten Paneele auch im UP-Verfahren ohne Probleme möglich ist. Ferner

wurde auf der Baustelle das in Frankreich bei Baustellenschweißungen weit verbreitete Innershield-Verfahren (136) angewandt. Aufgrund der exzellenten Schweißbeugung von S460M konnte auf das Vorwärmen beim Schweißen verzichtet werden. Das Viadukt von Millau kann somit als Wegbereiter für den wirtschaftlichen Einsatz moderner Stahlkonzepte im Brückenbau angesehen werden. Bild 8 zeigt dieses beeindruckende Brückenbauwerk nach der Fertigstellung.

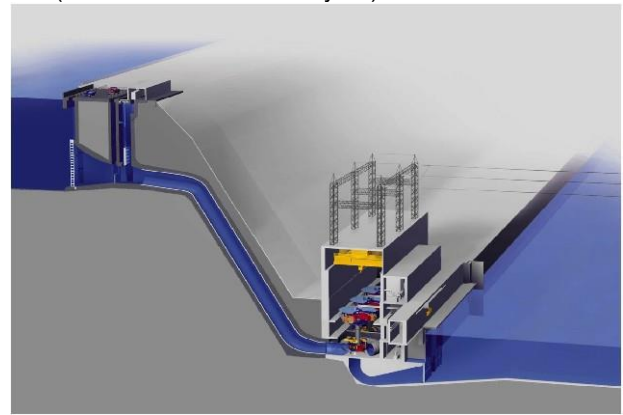
Bild 8: Viadukt von Millau nach Fertigstellung



## 5.2 Energietechnik: Pumpspeicherkraftwerk Vianden

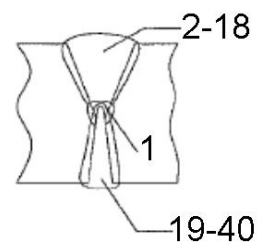
Das Beispiel des Pumpspeicherkraftwerks Vianden in Luxemburg eignet sich sehr gut zur Erläuterung der schweißtechnischen Vorteile thermomechanischer Stähle. Für die Erweiterung der Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes um 200 MW auf eine Gesamtleistung von 1,2 GW wurde der Bau einer neuen Turbine beschlossen, die durch eine Druckrohrleitung von 4,5 m Durchmesser bei Vollast mit einem Wasserstrom von 78 m<sup>3</sup>/s elektrische Energie erzeugt, indem die Fallenergie aus 280 m Höhendifferenz umgesetzt wird (Bild 9).

Bild 9: Prinzipieller Aufbau eines Pumpspeicherkraftwerkes (Quelle: Voith Siemens Hydro)



Für diese Fallrohrleitung sollte ein Stahl der Streckgrenzenklasse S460 eingesetzt werden, wobei alternativ eine normalisierte Variante (S460N) und eine thermomechanisch gewalzte (S460) untersucht wurden. Nachfolgend werden beispielhaft die Schweißbedingungen und Ergebnisse der mechanischen Prüfung an einer 40mm-Naht für je einen S460N und S460M vorgestellt. Dazu wird eine Schweißverbindung an einem Mantelschuss für eine Druckrohrleitung betrachtet, der in der Vormontage geschweißt wird. Es handelt sich um eine Längsnaht, die nach dem Kaltumformen des Bleches in den Mantelschuss eingeschweißt wurde. Typischerweise ist eine solche Naht eine Werkstattnaht. Da es sich bei einer Längsnaht um voll auf Umfangsspannungen belastete Naht handelt, ist ein sorgfältiges Arbeiten beim Schweißprozess dringend notwendig. Geschweißt wurde in einem kombinierten Prozess aus E-Hand (111) und Unterpulver (UP, 121). Die Wurzel wurde zunächst mit einer Schweißraupe E-Hand ausgeführt und danach die Innenseite der X-Naht unter Anwendung des UP-Schweißens zugeschweißt. Anschließend wurde die Wurzel ausgefräst und von der Gegenseite wieder mit dem UP Prozess die Schweißnaht ausgefertigt, Bild 10. Für alle Lagen wurden die gleichen Schweißgüter verwendet.

Bild 10: Prinzipieller Lagenaufbau



Bei der eingesetzten Festigkeitsklasse und einer Blechdicke von 40mm ist normalerweise ein Vorwärmen notwendig. Der entsprechende Algorithmus zur Berechnung der Mindestvorwärmtemperatur ist entweder dem SEW 088, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle [6] oder der EN1011-2, Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe [7] zu entnehmen.

Danach berechnet sich die Vorwärmtemperatur nach folgender Formel:

$$T_p = 697 \times CET + 160 \times \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \times HD^{0.35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 328$$

$T_p$  - Vorwärmtemperatur [°C]

CET - Kohlenstoffäquivalent [%]:

$$C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$$

- d - Blechdicke [mm]
- HD - Wasserstoffgehalt des Schweißzusatzwerkstoffes [cm<sup>3</sup>/100 g]
- Q - Wärmeeintrag [kJ/mm]

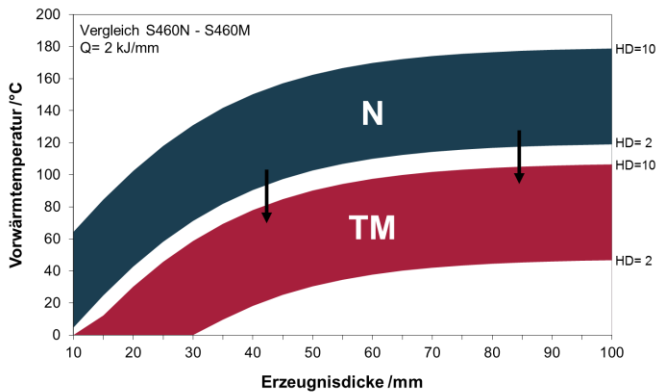
Im Beispielfall sind die entsprechenden Werte tabellarisch zusammengetragen, Tabelle 2.

	S460 ML	S460 NL
Ceq	0,42	0,51
CET	0,28	0,35
C-Gehalt	0,09	0,017
Blechdicke [mm]	40,0	40,0
Wasserstoffgehalt [ml/100g]	5	5
Wärmeeinbringen [kJ/mm]	2,0	2,0
Mindestvorwärmtemperatur [°C]	72	128

Tabelle 2: Ermittlung der Vorwärmtemperatur

Der Einfluss des Lieferzustandes auf die Mindestvorwärmtemperaturen bei verschiedenen Wasserstoffgehalten für einen Stahl mit 460 MPa Streckgrenze ergibt sich im Allgemeinen aus dem Unterschied der Kohlenstoffäquivalenten und ist in Bild 11 dargestellt.

Bild 11: Vorwärmtemperaturen nach Lieferzustand



Die Berechnung nach Vorgabe EN 1011-2 und diese Grafik zeigen, dass der S460ML einen deutlichen Vorteil hinsichtlich des Vorwärmens gegenüber dem normalisierten Stahl aufzeigt.

Damit ergab sich für den Schweißprozess aufgrund des verminderten Vorwärmens bereits durch den Einsatz eines TM-Stahls eine Verbesserung gegenüber einem normalisierten Stahl. Die mechanisch technologische Prüfung der Schweißnähte muss nun zeigen, ob der Werkstoff auch technisch gleichwertige Resultate liefern kann. Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung sind tabellarisch zusammengetragen, Tabelle 2.

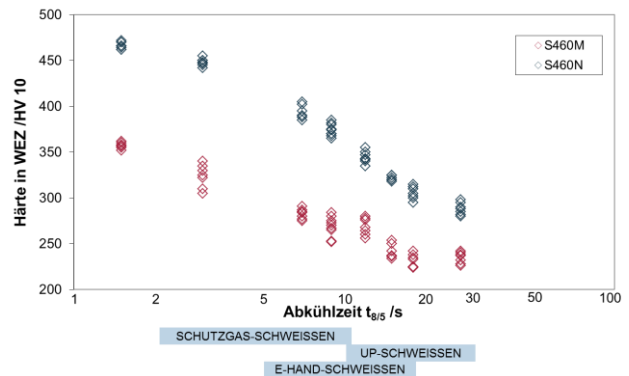
	S460 ML	S460 NL	Vorgabewerte
R <sub>p</sub> , GW [MPa]	505	496	min 440
R <sub>m</sub> , GW [MPa]	595	648	550 - 720
R <sub>p</sub> , SG [MPa]	574	466	min 440
R <sub>m</sub> , SG [MPa]	626	604	550 - 720
Ch-V-50°C, q, GW [J]	159	166	16/10 J
Ch-V-50°C, q, WEZ [J]	143	85	
Ch-V-50°C, q, SG [J]	77	76	
Biegeprobe	ok	ok	4t
HV10 <sub>max</sub> , GW	198	192	
HV10 <sub>max</sub> , WEZ	228	274	
HV10 <sub>max</sub> , SG	215	226	

Tabelle 2: Ergebnisse der zerstörenden Prüfung

Für beide Schweißnähte war die zerstörungsfreie Prüfung ohne Befund. Bei der zerstörenden Prüfung zeigt sich, dass sämtliche Werte und Ergebnisse den Anforderungen genügen. Was sich darüber hinaus zeigt ist, dass für den Einsatz beider Stähle durchaus auch Sicherheitsreserven bezüglich der Zähigkeit, Streckgrenze und Zugfestigkeit vorliegen.

Auffällig ist bei der Härteprüfung die extrem große Schwankungsbreite der gemessenen Härtewerte beim normalisierten Stahl mit Härtespitzen bis 274 HV 10 in der WEZ. Da die maximale Härte eines Stahls maßgeblich von seinem Kohlenstoffgehalt abhängig ist, können für den normalisierten Stahl lokal Härtespitzen in der Umschmelzzone eher auftreten als beim TM-Stahl, weil bei der Aufmischung nach dem Abschmelzen beim normalisierten Stahl mehr Kohlenstoff zur Verfügung steht. Bild 12 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

Bild 12: Vergleich der Härtewerte in den Wärmeeinflusszonen der Decklagen von Schweißverbindungen an S460M und konventionellen Baustahl S460N.



Auch kann festgehalten werden, dass das in der Wärmeeinflusszone zur Verfügung stehende Zähigkeitsniveau für einen S460M wesentlich höher ist als für den S460N. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass es sich hier um Werkstattschweißungen unter optimalen Bedingungen handelt, d.h. diese höheren Reserven durchaus bei nicht-optimalen Baustellenschweißungen von Vorteil sein können.

### 5.3 Energietechnik: Beispiel Offshore Wind Gründungen

Offshore-Wind ist eine neue Energieform, die ohne Stahl undenkbar wäre. Nicht nur aus Gründen der Kosten sondern auch wegen der Herausforderung, in einem engen Zeitfenster ganze Projekte mit bis zu 100 Anlagen zu errichten, wird ein effizienter Fertigungsfluss in der

Herstellung der Gründungsstrukturen notwendig. Dies betrifft vor allem auch die Wirtschaftlichkeit der Schweißprozesse. Die Entwicklung geht hier immer stärker in Richtung hocheffizienter Serienfertigung. Vor allem für den Gründungstyp Monopile, der einen Großteil der bisher gesetzten Gründungen ausmacht und weiterhin als aussichtsreichster Gründungstyp für Wassertiefen bis 40 m gilt, ist dieser Prozess der industriellen Serienfertigung bereits weit vorangeschritten.

Im Allgemeinen werden im ersten Schritt der Monopilefertigung die Bleche zu konischen oder zylindrischen Mantelschüssen gewalzt, und anschließend in einer Längsnahtstation innen und außen verschweißt. Einzelne Mantelschüsse oder bereits vormontierte Teilsegmente werden dann in einer sogenannten Growing Line (Bild 13) über Rundnähte zu fertigen Monopiles zusammengeschweißt.

Bild 13: Aufbau einer Growing Line (2 Growing Lines um Auslastung des Krans zu erhöhen) aus [8]

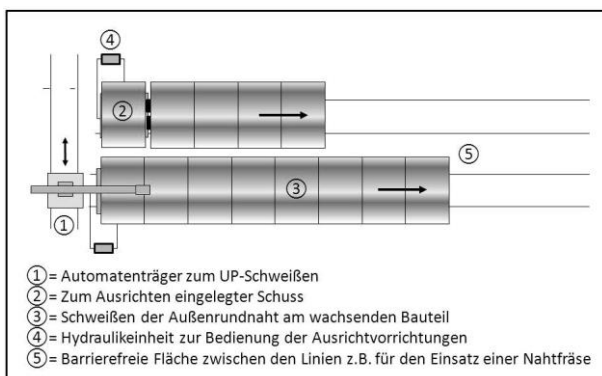


Bild 14 zeigt einen fertigen Monopile (Durchmesser 7,80 m).

Bild 14: Fertiger Monopile

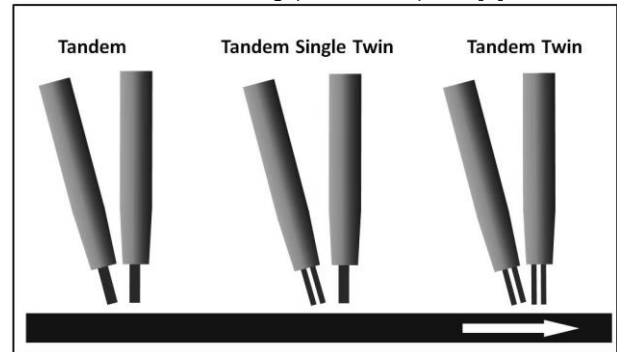


Bei dieser Produktionsroute ist größtes Augenmerk auf die Qualität der angewendeten Schweißprozesse zu richten, gleichzeitig darf natürlich die im Wettbewerb entscheidende Wirtschaftlichkeit und Effizienz nicht vernachlässigt werden [9]. Oft ist das Unterpulverschweißen (UP-Schweißen) daher die optimale Lösung.

Schweißprozesse wie das Lichtbogenhandschweißen und das MAG-Fülldrahtschweißen sind vor allem für kurze und schwer zugängliche Nähte von großer Bedeutung. An zylindrischen oder konischen Bauteilen, wie z.B. die Monopiles für OWEA sind jedoch lange gerade oder auch Rundnähte die Regel. Darüber hinaus werden für diese Anwendungen meist vergleichsweise große Wand-

dicken eingesetzt, so dass das UP-Schweißen der prädestinierte Schweißprozess ist. UP-Schweißen liefert die geforderte Qualität des Schweißgutes bei äußerst geringer Fehleranfälligkeit, gepaart mit hoher Abschmelzleistung. Ein hohes Maß sowohl an Qualitätssicherheit als auch Wirtschaftlichkeit ist mit diesem Schweißprozess möglich. UP-Schweißen steht in vielen verschiedenen Prozessvarianten zur Verfügung, Bild 15.

Bild 15: Prozessvarianten des UP-Tandemschweißens, schematische Darstellung (Bild: ESAB) aus [8].



Neben dem bekannten UP-Eindrahtschweißen mit einer nominellen Abschmelzleistung bis ca. 12 kg/h, sind vor allem UP-Mehrdrahtprozesse von großem Interesse für OWEA-Hersteller (z.B. UP-Tandemschweißen oder UP-TandemTwin), da sich die Abschmelzleistung damit nochmals steigern lässt und somit eine schnellere Fertigung möglich wird. Von Seiten der Schweißverfahren steht damit ein Prozess höchster Effizienz zur Verfügung, werkstoffseitig muss nun ein Werkstoff verwendet werden, der diese hohen Abschmelzbedingungen toleriert.

Hier können erneut die fertigungstechnischen Vorteile von thermomechanisch gewalzten Stählen den entscheidenden Vorteil bringen. Eine wichtige Verarbeitungseigenschaft von TM-Stählen ist neben den bereits erläuterten Kosten- und Fertigungszeitvorteilen durch reduziertes Vorwärmen bzw. kürzere Setupzeiten vor allem auch die Gutmütigkeit des TM-Stahles gegenüber Schweißparameteränderungen (z.B. begründet im hohen Zähigkeitslevel in der Wärmeeinflusszone). So erlauben TM-Stähle den Einsatz genau solcher Schweißverfahren mit hohen Abschmelzleistungen, wie z.B. UP-Mehrdrahtschweißen. Thermomechanisch gewalzte Stahlgüten haben sich deshalb als Standardgüten für Gründungen von Offshorewindanlagen durchgesetzt. Insbesondere den Offshore-Stählen nach EN 10225 (z.B. S355G10+M) kommt wegen der nochmals höheren Zähigkeitsanforderungen hier eine besondere Bedeutung zu.

## 6 Schlussbemerkung

Thermomechanisch gewalzte Grobbleche werden stetig weiterentwickelt. Dies geschieht zum einen im Hinblick auf darstellbare Blechabmessungen (z.B. TM-Bleche der Streckgrenzenklasse S355 in Blechdicken bis 140 mm) und zum anderen die mechanisch-technologischen Eigenschaften betreffend (z.B. TM-Bleche mit Streckgrenze > 460 MPa). Dank dieser Entwicklungen können immer mehr Anwendungsfelder von den vorteilhaften Verarbeitungseigenschaften thermomechanisch gewalzter Stähle profitieren. Insbesondere gilt dies für dickwandige Konstruktionen im Energieanlagenbau [10].

## 7 Schrifttum

- [1] F. Martin, F. Schröter; „Stahllösungen für Offshore-Windkraftanlagen“; Stahlbau 74 (2005) S.435-442
- [2] Hubo, R.; Hanus, F. E.: Verarbeitungseigenschaften thermomechanisch gewalzter Grobbleche, Hansa 129 (1992) Heft 8. S. 776-778.
- [3] R. Willms; „Stähle bis 500 MPa Streckgrenze: Anwendung für Sonderkonstruktionen des Stahlwasserbaus“; Große Schweißtechnische Tagung, Dresden; DVS Berichte 2008 S. 209-214
- [4] R. Willms; „Wirtschaftlicher Einsatz von Stählen im Stahlbau“; 2. Symposium Eisenbahnbrücken und konstruktiver Ingenieurbau; 2012, München
- [5] F. Hanus; „Flammrichten thermomechanisch gewalzter Baustähle“; Schweißen und Schneiden 46 (1994), Heft 4
- [6] SEW 088 Beiblatt 1, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle; 1993-10
- [7] EN1011-2, Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe; 2001
- [8] K. Hoops, R. Paschold; „Unterpulverschweißen schwerer Offshore-Konstruktionen“; DVS Berichte 283, Schweißen im Anlagen-und Behälterbau. S. 69-78
- [9] R. Paschold, K. Blome u. T. Finndin: Anforderungen an die Schweißverbindungen von Offshore-Windenergieanlagen im Spannungsfeld von Qualität und Wirtschaftlichkeit. DVS-Berichte Band 275, S. 69/74.
- [10] Hubo, R.; Schröter, F.: Thermomechanisch gewalzte Stähle - Hochleistungsprodukte für einen effizienten Stahlbau, Bauingenieur 76, (2001), S.459-463.