

Tagung: Schweißen in der maritimen Technik und im Ingenieurbau

Titel: Stähle für effizientes Schweißen im Offshore-Windenergieanlagenbau

Autor: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tobias Graf

Kontakt: AG der Dillinger Hüttenwerke
Werkstraße 1
66763 Dillingen/Saar

tobias.graf@dillinger.biz
+49 6831 47 3451

1 Einleitung

Die Offshore-Windenergie stellt eine wichtige Säule der Energie-Wende dar und erlaubt im Vergleich zu Anlagen an Land aufgrund der konstanten und verlässlich hohen Windgeschwindigkeiten eine deutlich größere Stromproduktion. So sollen bis zum Jahr 2020 in Deutschland 6,5 GW Leistung auf hoher See installiert werden, für das Jahr 2030 werden 15 GW Windenergieleistung angestrebt. Stahl-Grobbleche sind dabei ein wichtiges Konstruktionselement für Offshore-Windkraftanlagen. Sie werden im Bereich der Maschinenkomponenten, der Türme und der Gründungsstrukturen eingesetzt. Insbesondere die Grobbleche für die Fundamente müssen dabei über besondere Eigenschaften bzw. Eigenschaftskombinationen verfügen. Die Notwendigkeit resultiert aus den Umgebungsbedingungen (z.B. Wind, Wellen, Meerestiefe, Kälte), ökonomischen Aspekten und nicht zuletzt einem Sicherheitsbedürfnis. Übertragen auf die Blecheigenschaften ergeben sich so Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften wie Streckgrenze und Zugfestigkeit oder eine hinreichende Sprödbruchsicherheit auch bei tiefen Temperaturen. Aus ökonomischer Sicht gilt es, die Fundamente in Form einer Serienfertigung möglichst effizient herzustellen. Dies betrifft den Produktionsablauf an sich und die Verarbeitung der Grobbleche in den einzelnen Produktionsstufen. Hier spielen die Blechabmessungen und Blechgewichte eine entscheidende Rolle ebenso wie die Schweißbeignung der Stähle.

Im Folgenden werden zunächst die Anforderungen an Grobbleche für Offshore-Windenergieanlagen aufgezeigt. Geeignete Herstellungsrouten zur Erreichung der geforderten Eigenschaftsprofile mit Fokus auf thermomechanisch gewalzten Blechen werden im nächsten Kapitel dargestellt. Ein Schwerpunkt liegt dann auf der schweißtechnischen Verarbeitung dieser Stähle. Da die Verwendung von Stählen nach EN 10225 für bestimmte Einsatzbereiche vorteilhaft erscheint, sind auch diese Gegenstand der Betrachtung. Den Abschluss bildet eine kurze Zusammenfassung.

2 Anforderungen an Offshore-Wind Stähle

Mit der zunehmenden Bedeutung der Offshore-Windenergie ging die Entwicklung verschiedener Gründungsstrukturen einher. Welcher Gründungstyp zum Einsatz kommt, hängt von Faktoren wie Turbinengröße, Wassertiefe und Bodenbeschaffenheit ab. Die Ansätze mit aufgelösten Stahl-Strukturen wie Jackets, Tripiles und Tripoden werden ergänzt durch schwimmende Lösungen oder Schwerkraftfundamente.^[1] Die Mehrzahl der bisherigen Gründungen macht der Monopile aus, der sich aus zylindrischen und konischen Bauteilen zusammensetzt. Durch die kontinuierliche Entwicklung hin zu größeren Durchmessern und Wanddicken konnte die Leistungsfähigkeit des Monopiles im Hinblick auf Turbinengröße und Wassertiefen bis 40 m gesteigert werden. Insofern gilt der Monopile auch für die Zukunft als der überlegene Gründungstyp.^[2] Substations sind ein zentrales Bauwerk in einem Offshore-Windpark und bilden die Schnittstelle zwischen den Turbinen der Windräder und dem Seekabel, über das der Strom an Land transportiert wird. Zielsetzung ist dabei der verlustarme Transfer des Stroms und möglichst geringe Kosten für die Kabel.^[3]

Haupt-Konstruktionselement der Gründungen sind Grobbleche, die zu Rohren mit unterschiedlichen Durchmessern und Wanddicken je nach Gründungskonzept eingeformt und anschließend mittels Längs- und Rundnähten verschweißt werden. Im Hinblick auf den späteren Schwerpunkt des Papers, der Schweißbeignung der Grobbleche, werden hier Anforderungen bzgl. Blechabmessungen und -gewichten für eine effiziente Fertigung nicht thematisiert.

Bislang werden in Gründungen vorrangig Stähle der Streckgrenzenklasse 355 MPa nach EN 10025-3/4 eingesetzt. Dominant ist die Stahlsorte S355ML in Blechdicken bis 90 mm. Bleche mit höherer Streckgrenze bieten Potentiale hinsichtlich Gewichtseinsparungen, allerdings sind hier Betrachtungen zur Materialermüdung aufgrund der dynamischen Belastungen der determinierende Faktor.^[4]

Für die Nord- und Ostsee gilt üblicherweise eine Designtemperatur zwischen -15 und 0 °C.^{[5],[6]} Über diese Designtemperatur werden Prüftemperaturen für den Kerbschlagbiegeversuch abgeleitet. Am Beispiel des

Regelwerkes des Germanischen Lloyd für Offshore Substations ergeben sich so in Abhängigkeit des Bauteils und der Blechdicke Prüfttemperaturen von -40 °C für eine Designtemperatur von -10 °C .^[6] Zu berücksichtigen ist, dass sich die Zähigkeitseigenschaften des Werkstoffs beim Kaltumformen und Schweißen verschlechtern. Der Stahl muss folglich über hinreichende Reserven verfügen, so dass auch am fertigen Bauwerk sprödes Materialverhalten ausgeschlossen werden kann. Stähle nach der Offshore-Norm EN 10225 werden bei Grobblechherstellern auch in hohen Blechdicken entsprechend qualifiziert und dabei im Kerbschlagbiegeversuch und im bruchmechanischen Rissaufweitungs (CTOD)-Versuch im Hinblick auf ihre Zähigkeit bewertet.^[7] Um die Längs- und Rundnähte effizient schweißen zu können, müssen die verwendeten Grobbleche möglichst geringe Legierungsgehalte und damit Kohlenstoffäquivalente aufweisen. Die Aufhärtungsneigung wird verringert und das Vorwärmen kann reduziert oder sogar ganz vermieden werden. Im Hinblick auf Schweißverfahren mit hohen Abschmelzleistungen wie Unterpulverschweißen muss der Stahl auch nach der Anwendung hoher Streckenenergien ein zähes Verhalten zeigen.^[2]

Für bestimmte Bauteile von Substations sehen Regelwerke nach dem Schweißen ein Spannungsarmglühen vor. Dies erscheint jedoch aufgrund der Größe der Bauteile technisch schwierig und zeitlich aufwendig. Das Spannungsarmglühen der Konstruktion kann durch bruchmechanische Erprobung des Stahls beim Stahlhersteller vermieden werden. Spielen diese Anforderungen beim Design eine Rolle, rücken auch aus dieser Perspektive Stähle nach EN 10225 in den Fokus.^[6]

3 Herstellung anwendungsgerechter Grobbleche

3.1 Stranggussbrammen als Vorprodukt

In integrierten Hüttenwerken wird bereits im Stahlwerk die Basis für die späteren Eigenschaften am Grobblech gelegt. Im Konverterprozess wird aus Roheisen flüssiger Stahl erzeugt, der im Vergleich zum Roheisen über deutlich niedrigere Kohlenstoff-Gehalte verfügt. Auch der Phosphor-Gehalt wird abgesenkt. Beim Abstich wird Aluminium zugesetzt, was neben der Desoxidation für eine Kornfeinung des Stahls sorgt. Die sekundärmetallurgische Behandlung des Stahles erfolgt in modernen Stahlwerken unter Vakuum. Neben der Legierungsfeineinstellung werden bei dieser Verfahrensvariante tiefste Gehalte an Schwefel, Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff erreicht. In Stranggussverfahren wird der flüssige Stahl anschließend zu Vorprodukten unterschiedlicher Abmessung vergossen. Bei Vertikalstranggießanlagen wird der Strang erst nach vollständiger Durcherstarrung in die Horizontale abgelenkt.

Das Prinzip von Vertikal- und Kreisbogenanlage zeigt Abbildung 1:

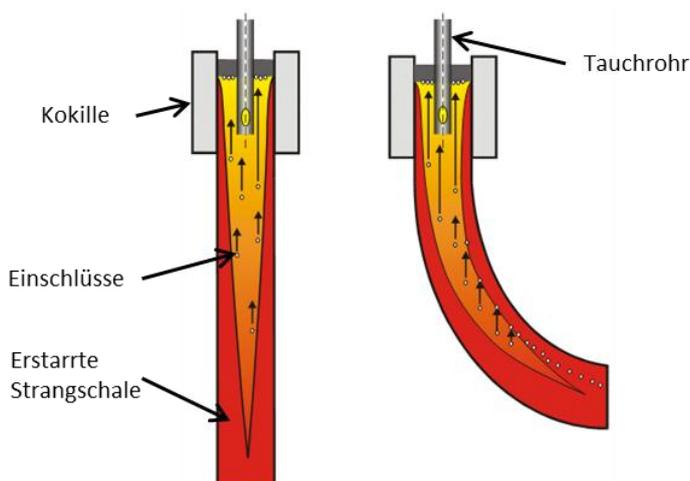


Abbildung 1: Vergleich von Vertikal- und Kreisbogenstranggießanlage

Im Vergleich zu Kreisbogenanlagen zeigt sich bei Vertikalstranggießanlagen ein verringerter Einschlussgehalt, da die Einschlüsse in der Schmelze aufsteigen können und sich nicht an der Strangoberseite anreichern. Eine Herausforderung beim Strangguss stellen Makroseigerungen in der

Brammenmitte dar. Erklärt werden können diese Seigerungen durch den Erstarrungsvorgang, bei dem die erkaltende Masse an Volumen verliert. Die sich bildenden Hohlräume saugen die geseigerte Schmelze auf. Die verfahrenstechnische Lösung liegt in einer kontrollierten Anstellung der Führungsrollen, bei der der Strang zusammengepresst und damit der Volumenverlust kompensiert wird. Zudem muss ein Ausbauchen des Stranges zwischen den Führungsrollen vermieden werden. Die Verfahrensschritte sorgen in ihrer Gesamtheit für eine hohe Reinheit des Stahles und eine homogene Bramme, die dem Walzprozess zugeführt wird.

3.2 Verfahrensvarianten bei der Grobblechherstellung

In der Grobblechherstellung werden normalisierte (abgekürzt mit N), thermomechanisch gewalzte (kurz TM oder TMCP) und vergütete Stähle (kurz Q+T) unterschieden.^{[8],[9]} Je nach Herstellungsprozess bzw. Lieferzustand können so anwendungsgerechte Eigenschaften erzielt werden. Den Walzprozessen vorgeschaltet wird eine definierte Erwärmung der Brammen im Brammenstoßofen. Eine Übersicht über die Verfahrensvarianten gibt Abbildung 2:

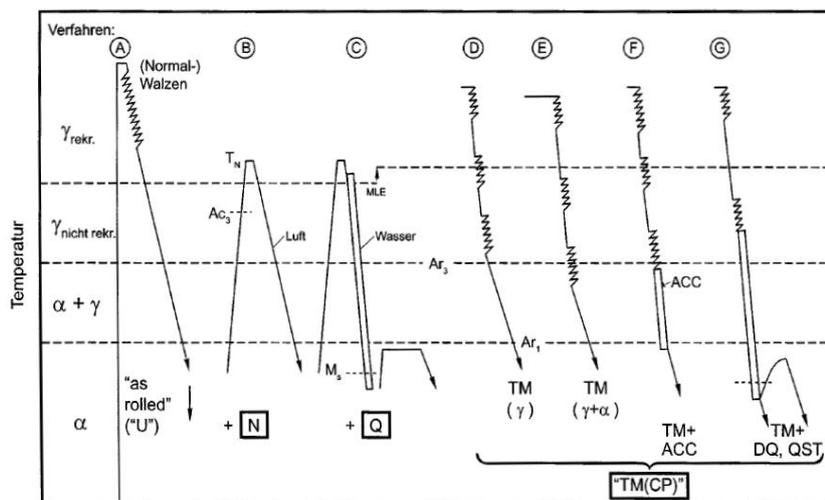


Abbildung 2: Verfahrensvarianten bei der Grobblechherstellung

Normalisierte Stähle werden in einem zweistufigen Prozess von Warmwalzen und Wärmebehandlung erzeugt. Das Warmwalzen erfolgt bei Temperaturen zwischen 1.000 – 1.200 °C und dient primär der Formgebung (Abb. 2, Prozess A). Im Anschluss erfolgt die normalisierende Wärmebehandlung, bei der der Werkstoff durchgreifend auf die Austenitisierungstemperatur (oberhalb A_{c3} , ca. 900 °C) erwärmt und anschließend langsam an Luft abgekühlt wird (Abb. 2, Prozess B). Es entsteht ein gleichmäßiges Ferrit-Perlit-Gefüge mit kleiner Korngröße. Normalisierte Stähle werden bis in Streckgrenzenklassen von 460 MPa hergestellt und verfügen über gute Zähigkeitseigenschaften.

Vergütete Grobbleche werden nach dem Warmwalzen (Abb. 2, Prozess A) einer Vergütung (Abb. 2, Prozess C) unterzogen. Das Vergüten besteht aus einem Austenitisieren gefolgt von einem Abschrecken mit Wasser. Bei der Umwandlung bildet sich ein überwiegend martensitisches Gefüge hoher Härte und Festigkeit. Um die Zähigkeit des Werkstoffs zu verbessern, wird ein Anlassen bei Temperaturen unterhalb A_{c1} nachgeschaltet. Vergütete Bleche werden in Streckgrenzenklassen bis 1100 MPa angeboten und überall dort eingesetzt, wo höchste Festigkeiten bei gleichzeitig guten Zähigkeiten gefordert sind, z.B. im Baumaschinenbereich oder für spezielle Bauteile im Offshore Segment. So werden bspw. in den Beinen von Winderrichterschiffen Stähle mit einer Mindeststreckgrenze von 690 MPa verbaut, die bei einer Blechdicke von 210 mm auch Zähigkeitsanforderungen in halber Blechdicke erfüllen.

3.3 Thermomechanisch gewalzte Grobbleche

Das thermomechanische Walzen als kombinierter Prozess von thermischer und mechanischer Behandlung erstreckt sich von der Brammenerwärmung über das Walzen bis zum Abkühlen und ggf. Anlassen. Das TM-Walzen führt zu einem Gefügestand, der durch eine Wärmebehandlung allein nicht erreichbar ist. Alle genutzten Mechanismen zielen auf ein möglichst feinkörniges Gefüge.

Unter den Begriff TM-Walzen können eine Vielzahl von Walzverfahrensvarianten gefasst werden. Einige Grundlegende werden in den Prozessen D – G der Abbildung 2 gezeigt. Gemeinsam ist den Varianten, dass nach einem „herkömmlichen“ Warmwalzen die Endumformung bei tieferen Temperaturen entweder im nicht-rekristallisierenden Austenit (Abb. 2, Prozess D) oder im Austenit-Ferrit Zweiphasengebiet (Abb. 2, Prozess E) erfolgt. Mit einem Fertigwalzen im Austenit-Ferrit Zweiphasengebiet geht eine Kaltverfestigung des Ferrits einher. Ein beschleunigtes Abkühlen mit Wasser begünstigt die Umwandlung in der Zwischenstufe (Abb. 2, Prozess F). Beim Prozess G der Abb. 2 wird durch Abschrecken aus der Walzhitze heraus ein martensitisches Gefüge erzeugt (Direct quenching, DQ), das ggf. durch die Restwärme im Kern der Walztafel angelassen wird (Quenching and Self Tempering, QST). Wesentlich für das TM-Walzen ist die Mikrolegierung des Stahls, z.B. mit Nb. Die Ausscheidungen der Mikrolegierungselemente in Form von Karbonitriden hemmen das Kornwachstum im Brammenerwärmungssofen und wirken als Keimbildungsstellen bei der Phasenumwandlung. Da Mikrolegierungselemente die Rekristallisation des Austenits verzögern bzw. unterdrücken, kann die Verformungswirkung mehrerer Umformschritte akkumuliert werden. Dies führt zu langgestreckten Austenitkörnern mit einer hohen Versetzungsdichte. Die Begrenzung des Austenitkornwachstums und die große Zahl potentieller Keimstellen für die Phasenumwandlung ergeben ein sehr feines Ferrit-Perlit und/oder bainitisches Gefüge. Daneben bewirken die Ausscheidungen der Mikrolegierungselemente eine Aushärtung.

Die Kornfeinung erlaubt es, sowohl Festigkeit als auch Zähigkeit zu erhöhen. So erreicht ein TM-Stahl in der Hochlage größere Kerbschlagarbeitswerte und die Übergangstemperatur vom zähen zum spröden Bruchverhalten ist zu deutlich tieferen Temperaturen verschoben. Diese Reserven sind für die spätere Verarbeitung der Grobbleche von Bedeutung, da sich die Zähigkeiten durch Kaltumformung und Schweißen verschlechtern.

Für die schweißtechnische Verarbeitung der Stähle ist ihre chemische Zusammensetzung ein wichtiges Beurteilungskriterium. Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Kohlenstoffäquivalent und Streckgrenze für normalisierte und thermomechanisch gewalzte Grobbleche:

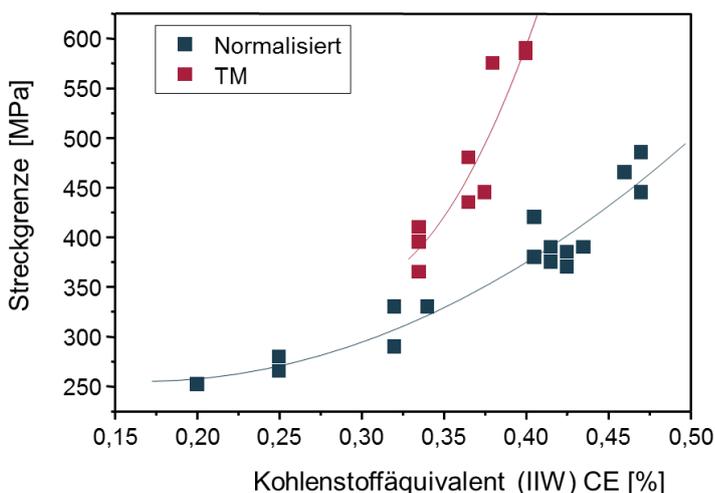


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Kohlenstoffäquivalent und Streckgrenze für normalisierte und thermomechanisch gewalzte Grobbleche

Bei TM-Stählen können folglich im Vergleich zu normalisierten Stählen die gleichen Streckgrenzenklassen mit deutlich niedrigeren Legierungsgehalten dargestellt werden bzw. mit gleichem Legierungsgehalt werden höhere Streckgrenzen erreicht.

4 Schweißen von TM-Blechen

Die schlanken Analysen der TM-Bleche mit niedrigen Kohlenstoffäquivalenten bewirken eine deutliche Verbesserung der Schweißbeignung des Stahles. Dies wird im folgenden anhand der Aufhärtingsneigung, der notwendigen Vorwärmtemperatur und der Anwendbarkeit von hohem Wärmeeinbringen konkretisiert.

4.1 Aufhärtingsneigung

Um den Abkühlverlauf in der Wärmeeinflusszone (WEZ) zu charakterisieren, wurde die Abkühlzeit $t_{8/5}$ eingeführt. Sie kennzeichnet die Dauer der Abkühlung einer Schweißraupe und ihrer WEZ von 800 auf 500 °C. Abbildung 4 illustriert den Härteverlauf in Abhängigkeit der $t_{8/5}$ -Zeit und die Wirkung von Legierungselementen:

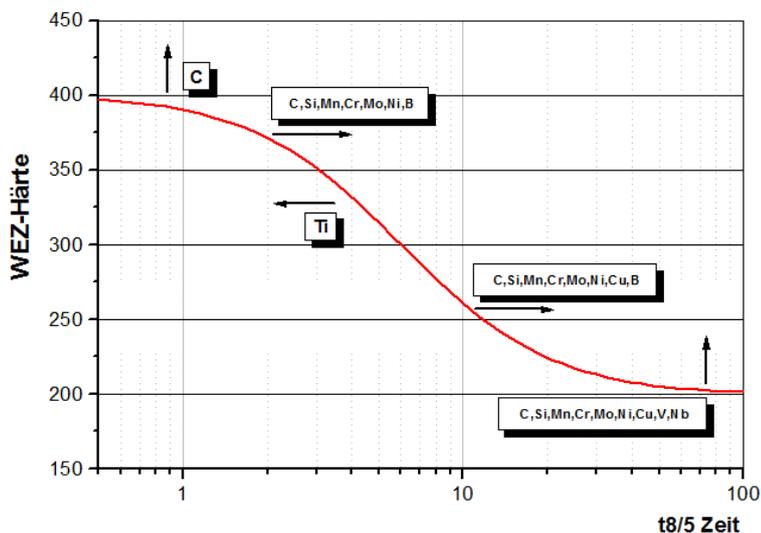


Abbildung 4: Einfluss von Legierungselementen und der Abkühlzeit auf die Härte in der WEZ

Längere Abkühlzeiten begünstigen eine diffusionsgesteuerte Umwandlung in ein ferritsch-perlitisches und/oder bainitisches Gefüge mit geringerer Härte. Sehr kurze Abkühlzeiten führen hingegen zu einem martensitischen Gefüge hoher Härte und schlechter Zähigkeit. Steigende Legierungsgehalte verzögern die Umwandlung, der Härteabfall wird also zu längeren Zeiten verschoben. TM-gewalzte Stähle zeigen folglich dank ihrer schlanken Analysen eine deutlich geringere Aufhärtingsneigung. Gekennzeichnet wird die Aufhärtingsneigung im Allgemeinen durch des Kohlenstoffäquivalent CEV (IIW).^[10]

4.2 Vorwärmen

Um wasserstoffinduzierter Kaltrissbildung vorzubeugen, muss dem durch das Schweißgut eingebrachten Wasserstoff ausreichend Zeit gegeben werden, um wieder aus dem Werkstoff zu effundieren. Ein Vorwärmen verlangsamt die Abkühlung der Schweißverbindung. Einfluss auf die anzuwendende Vorwärmtemperatur nimmt neben der Blechdicke, der Wärmeeinbringung und dem Wasserstoffgehalt des Schweißgutes der Legierungsgehalt des Stahles, ausgedrückt durch das Kohlenstoffäquivalent CET. In Abbildung 5 werden die Vorwärmtemperaturen, berechnet nach EN 1011-2, für einen normalisierten und einen TM-gewalzten Stahl der Streckgrenzenklasse 460 MPa gegenübergestellt^[11]:

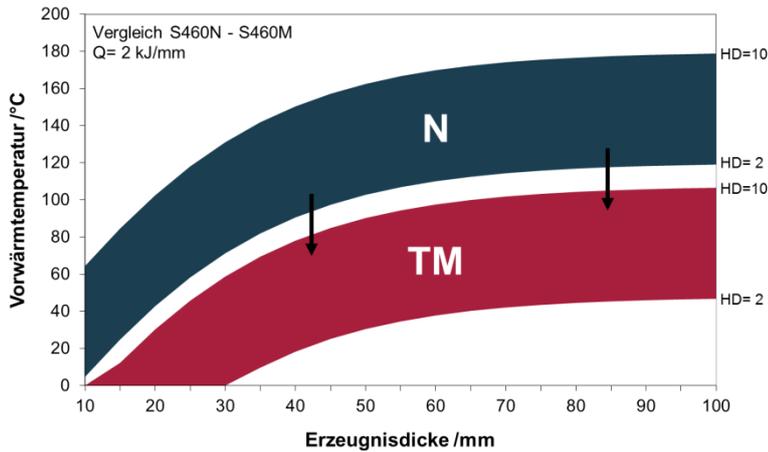


Abbildung 5: Vorwärmtemperaturen in Abhängigkeit des Lieferzustandes

Für kleine Blechdicken kann das Vorwärmen beim TM-gewalzten Blech ganz entfallen. Für größere Blechdicken ergibt sich eine stark verringerte Vorwärmtemperatur im Vergleich zum Grobblech im normalisierten Lieferzustand. Dies bringt Zeit- und Kostenersparnisse.

4.3 Wärmeeinbringen

Bei der Schweißung der Längs- und Rundnähte der Fundamente der Offshore-Windkraftanlagen sind aufgrund der hohen Blechdicken große Nahtvolumina zu füllen. Als Hochleistungsschweißprozess kommen daher verschiedene Varianten des Unterpulverschweißens zum Einsatz.^[1] Die Anwendung dieser Schweißprozesse setzt voraus, dass der Werkstoff hohe Wärmeeinbringungen toleriert.

Abbildung 6 zeigt die Kerbschlagarbeitswerte eines S460M für verschiedene Wärmeeinbringungen und Positionen in der WEZ in Abhängigkeit der Schmelzlinie:

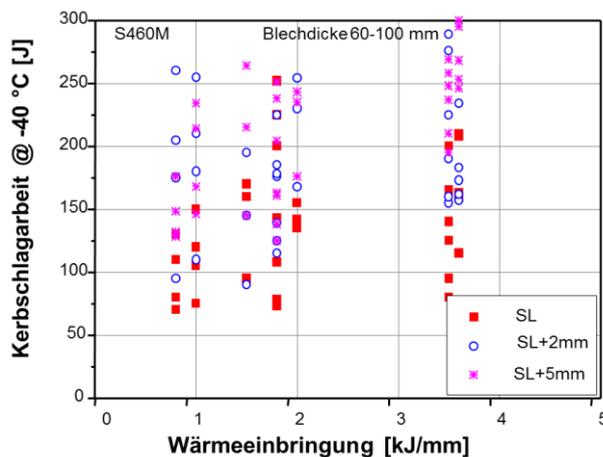


Abbildung 6: Kerbschlagarbeit in der WEZ für verschiedene Wärmeeinbringungen (SL = Schmelzlinie)

Da die TM-Stähle über sehr hohe Ausgangszähigkeiten verfügen, ergeben sich auch für große Wärmeeinbringungen hohe Kerbschlagarbeitswerte. Damit können also Verfahren wie das Unterpulverschweißen bei hinreichender Sprödbrechtsicherheit in der WEZ angewendet werden.

5 Stähle nach EN 10225

Beim Bau von Offshore-Windparks werden von Designern und Fertignern vermehrt Stähle nach EN 10225 spezifiziert, z.B. für Substations. Die Stähle nach EN 10225 bieten im Vergleich zu herkömmlichen Baustählen nochmals verbesserte Sprödbrechtsicherheit.

So werden für bestimmte Stahlsorten bzw. –gruppen gem. EN 10225 mit Dicken größer 40 mm zusätzliche Kerbschlagzähigkeits-Prüfungen im Kern verlangt.^[7] Um homogene Eigenschaften im Querschnitt des Bleches zu erreichen, muss der Stahl über einen hohen Reinheitsgrad verfügen. Die Basis wird im Stahlwerk bei der sekundärmetallurgischen Behandlung und beim Gießen des Stahles zu Brammen gelegt. Beim Walzen des Vormaterials ist neben einem hohen Gesamtumformgrad (Verhältnis von Brammen- zu Blechdicke) auch eine hohe Dickenabnahme je Umformschritt von Bedeutung. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass auch der Kern des Blechs bzw. der Walztafel hinreichend verformt wird. Voraussetzung dafür sind Walzgerüste, die ausreichend große Kräfte auf das Material aufbringen können.

In Option 18 der EN 10225 werden darüber hinaus drei Prüfserien zum Nachweis der Schweißbeugung definiert.^[7] Die Prüfserien beinhalten Erprobungen von Stumpfnähten, Härteprüfungen an Auftragsschweißungen sowie CTS-Versuche zur Bestimmung der Empfindlichkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Kaltrissbildung. Für den Schweißbeugungsnachweis werden die Stumpfnähte mit unterschiedlichem Wärmeeinbringen von 0,7 – 5 kJ/mm geschweißt. Die Erprobung der Schweißverbindungen beinhaltet Härteprüfungen, Kerbschlagbiegeversuche bei einer Prüftemperatur von -40 °C, Zugversuche quer zur Schweißnaht sowie bruchmechanische CTOD-Versuche. Der CTOD-Versuch erlaubt eine Aussage über das lokale Verformungsvermögen des Stahls an einer Riss Spitze und damit über die Fähigkeit, Spannungsspitzen an der Riss Spitze durch Fließen abzubauen.^[12] Wie beim Kerbschlagbiegeversuch ist das Ergebnis des Versuchs temperaturabhängig. In der EN 10225 wird eine Prüftemperatur von -10 °C vorgesehen. Die Proben sind zum Nachweis der Schweißbeugung unterschiedlichen Bereichen der WEZ zu entnehmen, wobei die Proben aus dem grobkörnigen Bereich der WEZ tendenziell am kritischsten sind.

Die Ergebnisse der Erprobung werden vom Grobblechhersteller in einem Bericht dokumentiert. Die Schweißbeugung gilt dann für eine bestimmte Stahlsorte und eine bestimmte Blechdicke als nachgewiesen, sofern der Hersteller den gleichen Herstellungsprozess wie beim Qualifikationsblech wählt und die chemische Analyse innerhalb definierter Grenzen liegt.

6 Zusammenfassung

Ausgehend von den Anforderungen an Grobbleche für Offshore-Windenergieanlagen wurde aufgezeigt, wie die geforderten Eigenschaftsprofile durch geeignete Herstellungsrouten erfüllt werden können. Die Basis für Grobbleche mit hinreichender Zähigkeit, auch nach der Verarbeitung durch Kaltumformen und Schweißen, wird bereits im Stahlwerk gelegt. Hier müssen als Vorprodukt für den Walzprozess Brammen in großen Dicken mit einem hohen Reinheitsgrad hergestellt werden. Verschiedene Varianten in der Grobblechproduktion wurden beschrieben, wobei das thermomechanische Walzen als für diese Anforderungen bevorzugte Verfahrensvariante im Mittelpunkt steht. Die besondere Feinkörnigkeit des TM-Gefüges bietet Vorteile hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften am Grundwerkstoff, aber insbesondere auch bei der schweißtechnischen Verarbeitung der Grobbleche. So kann bei einer geringen Aufhärtingsneigung das Vorwärmen reduziert werden oder sogar ganz entfallen, was Effizienzgewinne für die Fertigung bringt. Auch Schweißverfahren mit großem Wärmeeinbringen wie das Unterpulverschweißen können bei TM-Stählen sicher angewendet werden. Auf diese Weise werden auch große Nahtvolumina schnell und wirtschaftlich gefüllt. Die nochmals verbesserten Eigenschaften der Stähle nach EN 10225, speziell im Hinblick auf die Zähigkeitseigenschaften, wurden im letzten Kapitel erläutert. Auch dank der dokumentierten Schweißbeugung erscheinen diese Stähle für bestimmte Bauwerke bzw. Bauteile im Offshore-Wind Bereich als vorteilhaft.

Literaturverzeichnis

- [1] Hoops, K., Paschold, R.: „Unterpulverschweißen schwerer Offshore-Konstruktionen“, in: DVS Berichte 283, Schweißen im Anlagen- und Behälterbau, S. 69 – 78.
- [2] Schröter, F., Lehnert, T.: „Anwendung von TM-Stählen in Bauwerken des Brückenbaus und der Energietechnik“, in: Tagungsband Schweißtechnische Fachtagung 2014 SLV Halle, S. 59 – 65.
- [3] Ramboll: „Offshore Substation Design“.

- [4] Martin, F., Schröter, F.: „Stahllösungen für Offshore-Windkraftanlagen“, in: Stahlbau 74 (2005), Heft 6, S. 435 – 442.
- [5] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: „Standard Konstruktion. Mindestanforderungen an die konstruktive Ausführung von Offshore-Bauwerken in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ)“, Edition 2015.
- [6] Germanischer Lloyd: Rules for the certification and construction, IV Industrial Services, 7 Offshore Substations, 2 Structural Design, Edition 2013.
- [7] EN 10225: „Schweißgeeignete Baustähle für feststehende Offshore-Konstruktionen“, Edition 2009.
- [8] Thieme, A., Graf, T., Schröter, F.: „Moderne Stähle für den Bau von Offshore-Konstruktionen – Herstellungsverfahren und Eigenschaften“, in: Stahlbau Spezial. Erneuerbare Energien, 2014, S. 10 - 15.
- [9] Streibelberger, A., Schwinn, V.: „Die Grobblechherstellung aus verfahrenstechnischer Sicht“, in: Stahl-Informationen-Zentrum, Dokumentation 570, Grobblech – Herstellung und Anwendung, S. 7 - 16.
- [10] Hanus, F., Schütz, J., Grünewald, J.: „Härte in der WEZ – Wirkung der chemischen Zusammensetzung des Stahls, der Schweißbedingungen und des Spannungsarmglühens“, in: Sonderdruck aus DVS-Berichte Band 176.
- [11] EN 1011-2: „Empfehlung zum Schweißen metallischer Werkstoffe. Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen“, Edition 2001.
- [12] Bleck, W. (Hrsg.): „Werkstoffprüfung in Studium und Praxis“.