

Erweiterte Nutzungsmöglichkeiten der thermomechanischen Behandlung von Grobblechen

Alois Streißelberger, Frank Hanus, Wolfgang Schütz und Ralf Hubo

Zielsetzung. Die erste große Verbreitung erfuhren thermomechanisch gewalzte (TM-)Stähle als Großrohre für Erdöl- und Erdgas-Fernleitungen. Dank ihrer besseren Verarbeitungseigenschaften eröfnern sie zunehmend auch die Anwendungsbereiche Stahlbau und Schiffbau.

Dargestellt wird die heutige Nutzung der thermomechanischen Walzung von Grobblechen, durch die es gelingt, besondere Eigenschaftskombinationen einzustellen.

Zusammenfassung. Im Offshore-Bereich haben sich die TM-Stähle schon seit mehreren Jahren durchgesetzt, und im Tank- und Druckbehälterbau gibt es erste Einsatzfälle. Die verbesserte Schweißbeignung der TM-Stähle bringt dem Verarbeiter besonders bei großen Blechdicken Kostenvorteile. An den Grobblechhersteller werden allerdings mit zunehmender Blechdicke höhere Anforderungen gestellt, wenn er mit Hilfe des thermomechanischen Walzens die geforderten Festigkeitseigenschaften bei niedrigem Kohlenstoff- und Legierungsgehalt einstellen will. Blechdicken um die 100 mm und Breiten über 4000 mm verlangen dazu leistungsfähige Walzgerüste und Kühleinrichtungen, ausgefeilte Prozeßtechnologie und exakte Prozeßführung. Die eindrucksvollen Beispiele der TM-Stahlbrücken und aus dem Stahlhochbau belegen, daß durch systematisches Entwickeln und gezieltes Investieren der Hüttenwerke die Nutzungsmöglichkeiten der TM-Stähle weiter fortschreiten werden.

Vorteile TM-gewalzter Bleche

Durch eine Kombination der Walzvorgänge mit gesteuerten Glüh- und Abkühlverläufen im Sinne einer thermomechanischen (TM-)Behandlung können Gefüge und Eigenschaften von Stählen gezielt gezüchtet bzw. beeinflusst werden. Die zugrundeliegenden metallkundlichen Mechanismen sind Gegenstand intensiver Untersuchungen, und die Übertragung dieser werkstoffkundlichen Kenntnisse in die Praxis der Grobblechproduktion verlangt verfahrenstechnische Entwicklungs- und Optimierungsschritte. Als Ergebnis dieser Fortschritte und insbesondere der damit zusammenhängenden Verarbeitungsvorteile der TM-Stähle kann heute eine Reihe neuer Nutzungsmöglichkeiten für thermomechanisch gewalzte Grobbleche aufgezeigt werden [1].

Für die erweiterte Anwendung von TM-Stahlblechen im Stahlbau, im Schiffbau, in Offshore-Konstruktionen, im Großrohrbereich u. dgl. mehr kann aus werkstoffkundlicher Sicht anhand von **Bild 1** festgehalten werden, daß die **Ziele** „Spezifikationserfüllung und Optimierung des Verarbeiternutzens“ ein definiertes Einstellen von Gefügen mit feiner effektiver Korngröße und einer günstigen Kombination der Eigenschaften verlangen. Dazu muß abgestimmt auf die Stahlzusammensetzung der nach Zeit und Temperatur gesteuerte thermomechanische Behandlungsprozeß im Walzwerk erfolgen. Zur Verdeutlichung der Rolle der Stahlzusammensetzung soll betont werden,

daß die Vorteile der niedrigen Kohlenstoffäquivalente vor allem durch die dosierte Anwendung von Mikrolegierungselementen, durch die Einstellung eines hohen sulfidischen und oxidischen Reinheitsgrades sowie durch seigerungsarmes Gießen erst voll zum Tragen kommen. So ermöglicht die moderne Sekundärmetallurgie Schwefelgehalte von weniger als 0,003 % für extrem hohe Zähigkeiten oder von sogar weniger als 0,001 % für besondere Saugereignung [2, 3].

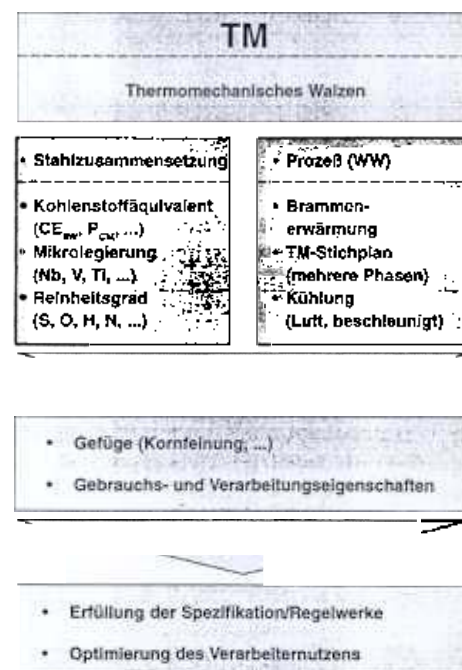


Bild 1. TM-gewalzte Grobbleche: Design-Basis und Ziele

Vorgetragen auf dem Eisenhüttag des VDEh am 14. November 1996 in Düsseldorf.

Dr.-Ing. Alois Streißelberger, Leiter, Forschung und Entwicklung/P; Dr.-Ing. Frank Hanus, Leiter des Schweißlabors; Dipl.-Ing. Wolfgang Schütz, Mitarbeiter, Forschung und Entwicklung/P; Dr.-Ing. Ralf Hubo, Leiter Marketing, Marketing und Verkauf, Aktiengesellschaft der Dillinger Hüttenwerke, Dillingen.

Tafel 1. Realisierte Vorteile durch TM-Walzen (mit beschleunigter Kühlung) [Eisenhüttentag 1990]

Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften - Schweißbeignung - Kaltumformbarkeit Legierungseinsparung Verbesserung der Kombination der Gebrauchseigenschaften Verbesserte Oberflächenqualität Mehr Freiheitsgrade der Prozeßgestaltung Gezielte Gefügezüchtung Prozeßverkürzung
--

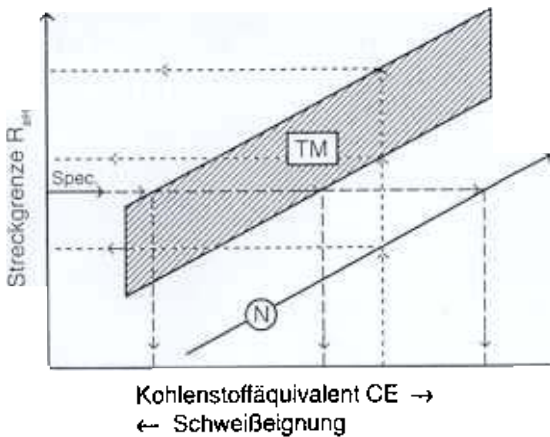


Bild 2. Beeinflussbarkeit der Eigenschaften über den Prozeß bei TM bzw. über Legierung bei N

Beim Eisenhüttentag 1990 [4] wurden aus damaliger Sicht die „Verfahren der TM-Behandlung mit beschleunigter Kühlung zur Herstellung von Grobblech aus Baustählen“ vorgestellt und die dabei *erzielbaren Vorteile* aufgelistet, **Tafel 1**. An dieser Tafel können vor allem die Vorteile im Vergleich zu den *klassisch normalgeglühten Varianten* abgelesen werden, die in **Bild 2** schematisch veranschaulicht werden. Eine Streckgrenzensteigerung für N-Stähle kann – bei gegebener Blechdicke – nur über höhere Legierung, sprich höhere C-Äquivalente, erreicht werden. Dies führt zu einer Beeinträchtigung der Schweißbeignung. Demgegenüber ermöglicht die prozeßbedingte Festigkeitssteigerung bei den TM-Stählen, die ohne Legieren und dadurch ohne Erhöhung des C-Äquivalentes auskommt, deutlich verbesserte Verarbeitungseigenschaften, insbesondere bezüglich Schweißbeignung.

Über die Prozeßgestaltung können bei TM die Gebrauchseigenschaften in unterschiedlichen Kombinationen eingestellt werden, wobei über die Kornfeinung Streckgrenze und Sprödbbruchübergangstemperaturen gleichzeitig verbessert werden. Zusätzlich wird durch TM die Bildung von Wärmebehandlungszunder umgangen und die Durchlaufzeit im Blechwalzwerk verkürzt.

Anforderungen im Hinblick auf neue Nutzungsmöglichkeiten

Die Entwicklung neuer Verfahren und Produkte wird durch die Abstimmung auf die Anforderungen von Kunden- bzw. Stahlanwenderseite wesentlich mitbestimmt. Deswegen müssen die Anforderungen, die heute an hoch-

festen Baustähle im Vergleich zum altbekannten Stahlytp St 52-3 gestellt werden, beschrieben werden. Mit Hilfe eines Pentagramms, **Bild 3**, wird das *Anforderungsprofil* nach den Kriterien Festigkeit, Resistenz gegen Medien, Produktform, Verarbeitbarkeit und Zähigkeit oder Sprödbuchtsicherheit eingeordnet. Im Bild erfolgt diese Einordnung beispielhaft für einen TM-gewalzten Baustahl der Mindeststreckgrenze 355 N/mm² (mit der Normbezeichnung S355M nach EN 10113) anhand des durchgezogenen Polygonzuges mit der Betonung der Elemente „besondere Blechabmessungen“ und „Schweißbeignung“, sowie für einen Linepipe-Stahl der Streckgrenzenklasse 450 N/mm² anhand der strich-punktiierten Linien mit „Resistenz gegen H₂S-haltiges Sauer gas“ und mit „besonderer Sprödbuchtsicherheit“ (L450M oder API-X65 sour).

Am Beispiel des Kriteriums Streckgrenze kann für *Großrohrstähle*, **Bild 4**, die rasante Entwicklung der letzten Dekaden verfolgt werden [5]. Die Erfüllung dieser gesteigerten Anforderungen wurde durch eine enge Abstimmung von neuen Stahlanalysen auf den Blechherstellungsprozeß ermöglicht, wobei die Entwicklungsstufen Normalglühung, TM-Walzung mit Luftabkühlung, TM-Walzung mit beschleunigter Abkühlung (hier mit ACC für „accelerated cooling“ abgekürzt) zu erwähnen sind.

In der Darstellung in **Bild 5** soll das Zustandekommen der *Anforderungen an den Werkstoff für das Produktsegment Stahlbau* näher erläutert werden:

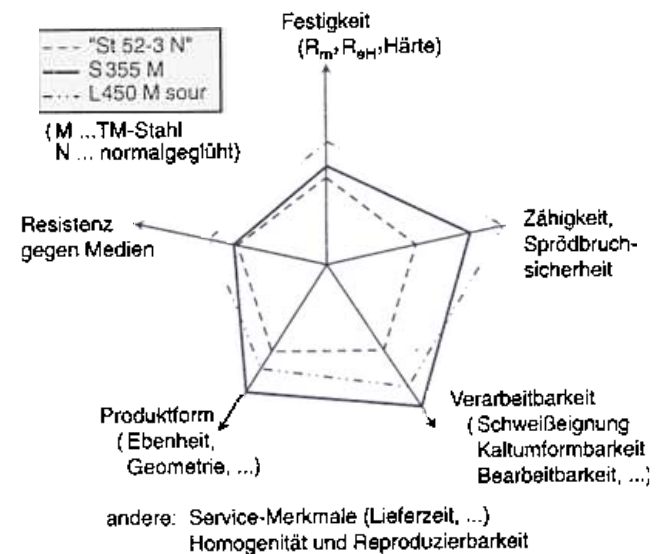


Bild 3. Anforderungsprofile für Grobblech/Stahl

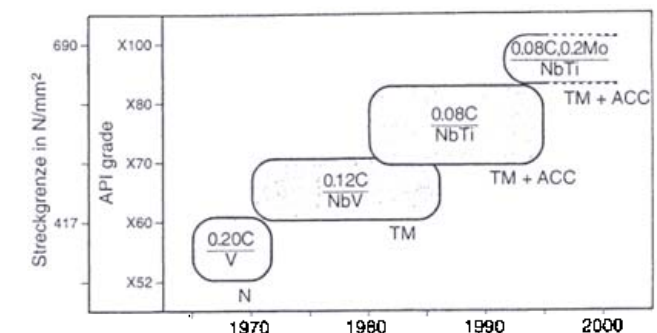


Bild 4. Beispiel der Streckgrenzenentwicklung der Grobbleche für Großrohre

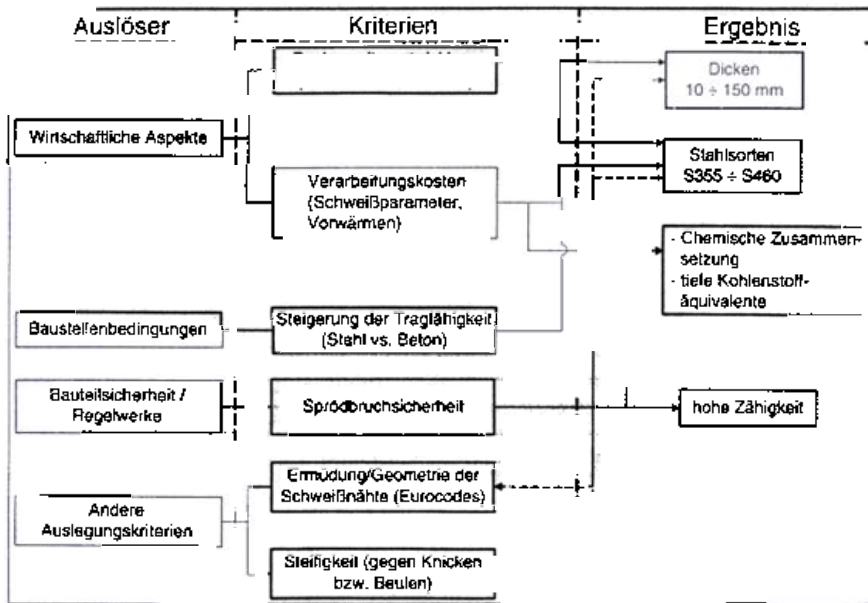


Bild 5. Entwicklung der Anforderungen im Stahlbau in Richtung TM

Die Auslöser und Kriterien für die Formulierung der resultierenden Spezifikation sind u.a. die wirtschaftlichen Aspekte der Konstruktion und Blechverarbeitung, die Baustellenbedingungen sowie die Kriterien des Designs bzw. der Auslegung und der Sicherheitsvorschriften. Daraus ergibt sich heute der Bedarf für Blechdicken von 10 bis deutlich über 100 mm, für Mindeststreckgrenzen von 355 bis 460 N/mm², für tiefe Kohlenstoffäquivalente und für hohe Zähigkeitswerte.

Der TM-Walzprozeß und seine Varianten

Zum Verständnis der alternativen Lieferzustände TM (nach EN mit „M“ abgekürzt) und normalgeglüht (mit „N“ abgekürzt) sei auf Bild 6 verwiesen.

Im oberen Teilbild ist vergleichend zur Normalwalzung mit anschließender normalisierender Glühung der *TM-Prozeß* dargestellt. Er ist gekennzeichnet durch Brammenerwärmung auf eine definierte Ziehtemperatur, Walzen nach einem festgelegten Stichplan mit einer Endwalzphase bei abgesenkten Temperaturen und eine anschließende Kühlung entweder an Luft (hier Variante A) oder – entsprechend Variante B – beschleunigt in der Kühlstrecke mit Wasser.

Für einen mikrolegierten Stahl mit niedrigem C-Äquivalent werden im Bild 6 vergleichend zum Zustand N die signifikante Kornfeinung durch TM bzw. der Übergang zu azikularen Gefügeanteilen durch TM + ACC sowie unten die dadurch bedingten Streckgrenzen- und Festigkeitsanstiege quantitativ dargestellt.

Als Antwort auf die zunehmende Vielfalt der Anforderungen an den Werkstoff haben sich die Blechhersteller eine Reihe neuer und modifizierter Verfahrensvarianten, Bild 7, einfallen lassen bzw. haben diese inzwischen zur Betriebsreife gebracht, wozu auch beträchtliche Investitionen in der Anlagentechnik inklusive zugehöriger Meß- und Regeltechnik gehören. Schematisch können im *Temperatur-Zeit-Schaubild* einige Grundvarianten des TM-Walzens vorgestellt werden, über die die richtige Mischung der Verfestigungsmechanismen ausgelöst werden soll, um dem spe-

zifizierten Eigenschaftsprofil am besten gerecht zu werden:

Im Fall der Varianten I und II werden die angesprochenen Mechanismen in mehreren voneinander in Temperaturlagen und Verformungsgraden sich unterscheidenden Walzphasen gesteuert. Hierbei kann die Endwalztemperatur im nichtrekristallisierenden Austenit-Gebiet liegen (I) oder bis hinunter in den $\gamma \rightarrow \alpha$ (Ferrit-)Umwandlungsbereich gezogen werden (II). Hierdurch erreicht man festigkeits- und streckgrenzensteigernde „Kaltverfestigung“ beim Warmwalzen. Die Abkühlung des Bleches erfolgt in beiden Fällen an Luft.

Im Fall der Varianten III bis VI erfolgt der Walzprozeß nach einem zu I vergleichbaren Schema. Zur gezielten Einstellung modifizierter Gefüge vor allem für zunehmende Blechdicken oder zur Erhöhung

von Streckgrenze, Festigkeit, Zähigkeit und Sauerergaseignung wird das Blech nach dem Walzen beschleunigt mit definierter Geschwindigkeit in der *ACC-Anlage* mit Wasser, Bild 8, abgekühlt. Nach der Art des Abkühlverlaufes können die Verfahren eingeordnet werden:

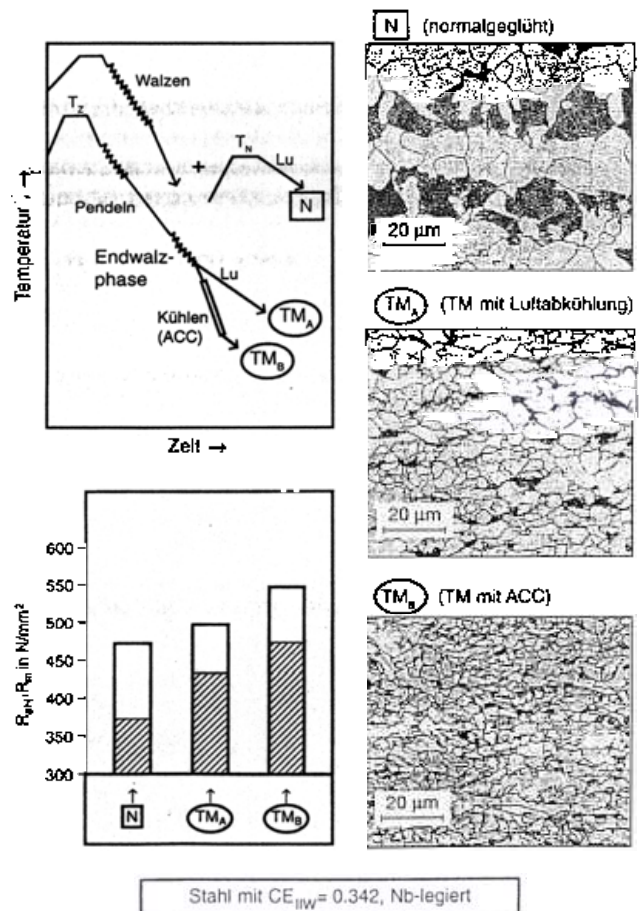


Bild 6. Verfahrensschema, Gefüge und Festigkeitseigenschaften für N- und TM-Prozeßvarianten

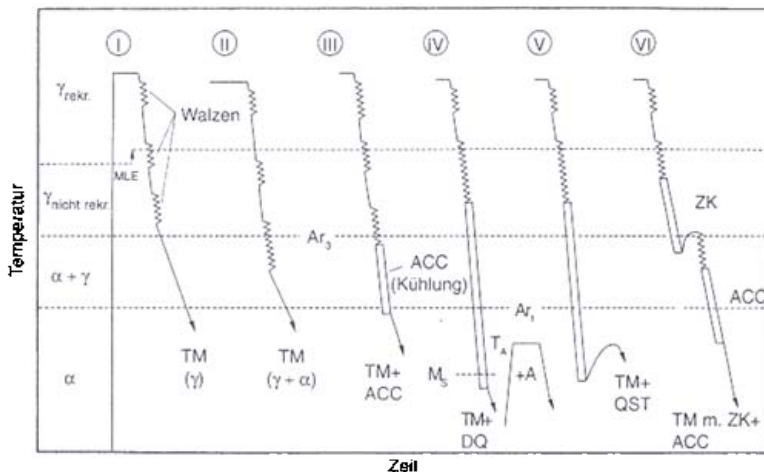


Bild 7. Temperatur-Zeit-Ablauf für unterschiedliche TM-Prozessvarianten

Im Fall von Variante III wird das Blech mit definierter Abkühlgeschwindigkeit auf eine vorgegebene Endkühltemperatur beschleunigt abgekühlt, diese Abkühlung wird mit ACC bezeichnet.

Im Fall der Varianten IV und V erfolgt eine schnellstmögliche Abkühlung der Oberfläche ähnlich der des konventionellen Abschreckens beim Härten unter die Martensit-Start-Temperatur, wobei im Fall DQ (= Direct Quenching) Oberfläche und Kern unter M_s gebracht werden und im Fall QST (= Quenching + Self Tempering) die noch gespeicherte Kernwärme zu einem Selbstanlassen der Oberfläche führt. In Sonderfällen kann Variante VI mit einem zweistufigen Kühlprozeß (Zwischenkühlen und Endkühlen) zur optimierten Ausnutzung des Kornfeinungspotentials angewendet werden [6].

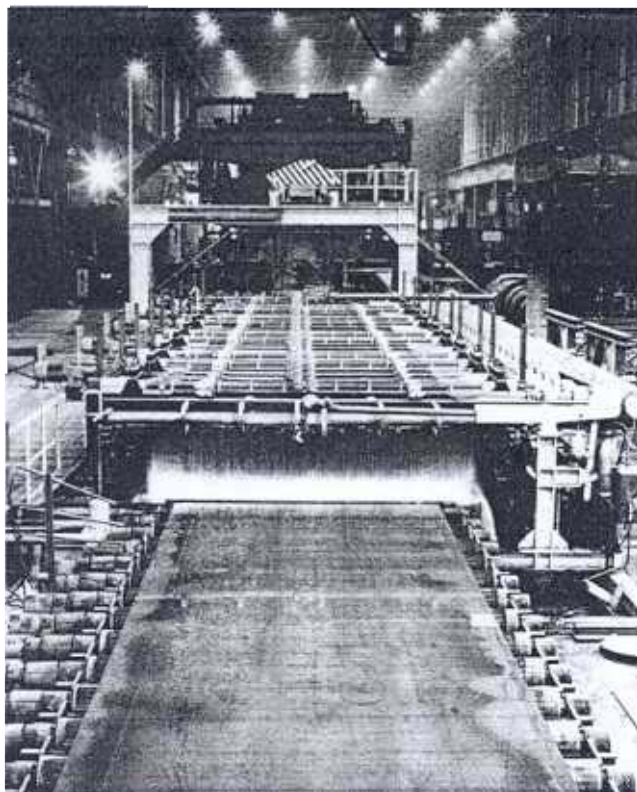


Bild 8. ACC-Anlage zur beschleunigten Kühlung von Blechen (aus der Walzhitze)

Weitere Entwicklung der Verfahrenstechnik

Die Grundlagen der Gefügebeeinflussung durch TM sind in der Literatur wiederholt beschrieben worden [7]. Auf der Kenntnis dieser metallkundlichen Zusammenhänge baut eine systematische Prozeßkonzeption für die Grobblechproduktion auf. Die Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten, insbesondere die Aufweitung des Blechdickenbereiches, stellt eine besondere Herausforderung für die verfahrenstechnische Entwicklung dar. Anhand von **Tafel 2** können wesentliche Aspekte der Prozeßgestaltung für dicke TM-Bleche nachvollzogen werden: Ausgangspunkt der Betrachtung ist die Walzung einer Tafel $80 \times 4000 \times 9000$ (in mm) aus einer 300 mm dicken Bramme. Sie wird zuerst im Quarto-Reversier-Gerüst gebreitet und dann mit dem noch verbleibenden Faktor 2 längsgewalzt. Um ein ausreichend homogenes Gefüge und Eigenschaftsprofil über die Walzgutdicke herbeizuführen, muß unter Ausnutzung der besonderen Kraft- und Moment-Reserven des Gerüstantriebes die Einzelstichabnahme bereits in der Vorphase auf möglichst großer 10 % gebracht werden, um sicherzustellen, daß der lokale Umformgrad im Kern nicht zu weit unter dem nominalen Umformgrad zurückbleibt. Für den *Beispielfall* aus Bild 9 mit Zwischendicke 146 mm aus Ausgangsdicke 250 mm werden selbst mit 8 % mittlerer Stichabnahme nur etwa 65 % der nominalen Umformung infolge des geringen Verhältnisses von gedrückter Länge im Walzspalt zu mittlerer Walzgutdicke bis in den Kern eingebracht [7]. Erst mit größeren Stichabnahmen bzw. Shape-Faktoren werden auch im Kern des Walzgutes Kornfeinungsmechanismen ausgelöst, die als Verfestigungsbeitrag und zur Sicherstellung der Tieftemperaturzähigkeit dicker Bleche dienen.

Der Problematik der Verformungsverteilung überlagern sich die bei freier Abkühlung auf dem Rollgang entstehenden Temperatur-Gradienten von Oberfläche zu Kern. Für eine ausgewogene Gefügezüchtung müssen diese lokalen Verhältnisse in den metallkundlichen Teilschritten Austeni-

erung, Abschrecken und Selbstanlassen optimiert werden. Die Optimierung der Prozeßgestaltung für dicke TM-Bleche ist Gegenstand von **Tafel 2**.

Tafel 2. Aspekte der Prozeßgestaltung für Dickbleche

- | | |
|--|--|
| a) Geometrie: begrenzte Umformgrade
Beispiel: Bramme: $300 \times 2150 \times 4500$ mm,
Walztafel: $80 \times 4000 \times 9000$ mm | |
| b) Homogenität der Umformung (über Dicke):
Einfluß von Stichabnahme bzw. Shape-Faktor
(Verhältnis der gedrückten Länge zu mittlerer Walzgutdicke) | |
| c) Temperaturgradient (über Dicke : Modell):
z. B. für $t = 150$ mm: Oberfläche: 850°C
Kern: 940°C | |
| d) Kornfeinungsmechanismen (lokal):
TM-Aufheizplan ($d_{\gamma, A}$)
TM-Stichplan ($d_{\gamma, \text{rekr.}}$)
$(d_{\gamma, \text{gestreckt}})$
TM-Kühlplan ($d_{\alpha, X_{2, Ph.}}$) | |
| e) Zusatz-Kriterien für Prüfung:
- ChV in $1/2$ oder $1/4$ t
- Z (Zugversuch in Di-Richtung)
- Ultraschall-Befund („Dichter“ Kern) | |
| f) Verarbeitung:
Dickeneinfluß beim Schweißen | |

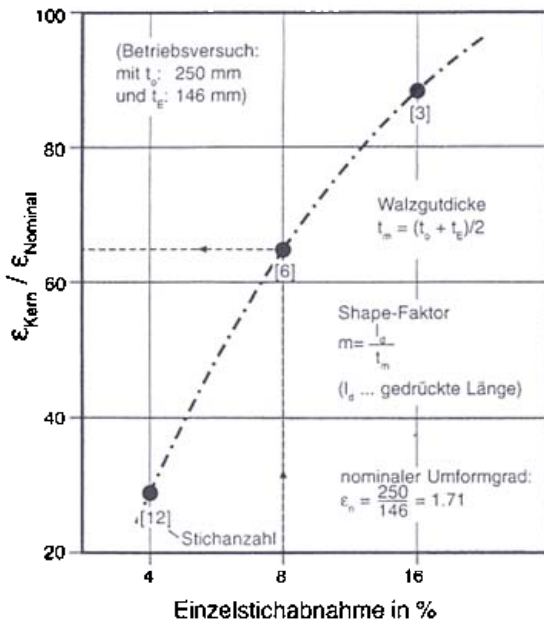


Bild 9. Einfluß der Stichabnahme bzw. des Shape-Faktors auf lokale Umformung im Kern dicker Bleche

tisierung, Rekristallisation, Austenitkornstreckung, verformungsinduzierte Umwandlung usw. Berücksichtigung finden. Aus betrieblicher Sicht der Prozeßsteuerung müssen diese Aspekte bei der Festlegung von Aufheizplan, Walz-Stichplan und Kühlplan systematisch aufgegriffen werden. Der Erfolg der Maßnahmen läßt sich durch eine Reihe von mechanisch-technologischen Prüfkriterien wie Kerbschlagzähigkeit in 1/2 oder 1/4 Blechdicke, Einschnürung beim Zugversuch in Blechdickenrichtung oder dem Ultraschall-Prüfergebnis nachweisen. Auf die mit zunehmender Dicke steigenden Anforderungen an die Verarbeitbarkeit wird weiter unten eingegangen.

Die Temperaturgradienten in Blechdickenrichtung und ihre zeitlichen Veränderungen müssen besonders bei der Gestaltung der Kühlprozesse im Anschluß an die Fertigwalzung Beachtung finden, was durch Nutzen thermischer Modelle systematisch erfolgen kann. Bestimmend für die Wahl der Prozeßparameter sind die angestrebten Eigenschaften, abgestimmt auf die Stahlzusammensetzung. Die reproduzierbare Einstellung dieser Parameter verlangt eine entsprechende Anlagentechnik [9]. Die Flexibilität der in Dillingen eingesetzten Kühlstrecke mit einer Wasserbeaufschlagung von 70 bis 2500 l/m² min, ihre Dimensionierung mit 30 m Länge und 4,7 m Breite sowie ihre im letzten Jahr erfolgte Erweiterung sollen hier nicht im Detail ausgeführt werden. Ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung des Kühlergebnisses ist die *Homogenität der eingestellten Eigenschaften in Längs- und Breitenrichtung* der Walztafel, wie im Bild 10 veranschaulicht wird. Festgehalten werden kann, daß inzwischen Erfahrungen über mehr als 1,4 Mio. t Produktion auf dieser Anlage vorliegen.

Die *Einstellung einer zufriedenstellenden Walztafelqualität*, **Tafel 3**, verlangt besondere Maßnahmen der Prozeßsteuerung in den Prozeßstufen

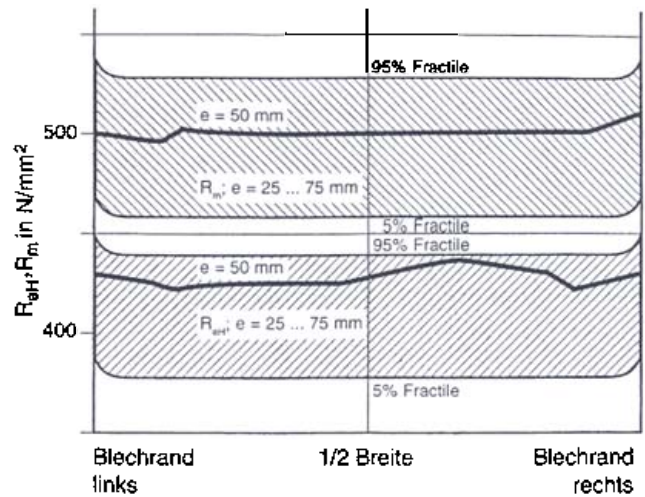


Bild 10. Homogenität der Festigkeitseigenschaften in Blechbreitenrichtung für 355M-Stähle

vom Walzgerüst über die Kühlung bis hin zur Adjustage des fertigen Bleches. Anlagentechnische Möglichkeiten wie Arbeitswalzenrückbiegung (= WORB), Kühlwasserkronenverteilung oder Masking-Einrichtungen bei der Wasserkühlung zum einen, gezielte Meß- und Regelvorgänge, z. B. der Walzspaltbombierung oder der Temperaturverteilung durch Scannen des gekühlten Bleches zum anderen, müssen systematisch ergänzt werden durch Modellierungsansätze, insbesondere der meßtechnisch schwer erfassbaren Verteilung der Eigenspannungen und deren Entwicklung im Prozeßablauf [10]. Auf diesem Wege können die gezielten Maßnahmen zum Abbau der Spannungen bzw. zu ihrer lokalen Begrenzung ausgelöst werden.

Als permanentes Entwicklungsfeld kann die Verfahrensoptimierung zur Einstellung besonderer Eigenschaftskombinationen gesehen werden. Dazu gehören methodisch die Simulation in Laborversuchen [11], in Modellen und großtechnische Versuche im betrieblichen Maßstab, u. a. mit Sondermaßnahmen wie Einbetten von Laborchargen in Trägerbrammen [12] oder Einstellen von definierten Kühltemperaturprofilen.

Optimierung der Verarbeitungseigenschaften

Für den Verarbeiter liegt der besondere Vorteil der thermomechanisch gewalzten Stähle in der verbesserten Schweißbeignung [13, 14].

Bedingt durch den niedrigen Gehalt an Kohlenstoff und Legierungselementen ist die Härtnungsneigung des TM-

Tafel 3. Methodik der Ebenheitseinstellung

Prozeßstufen und Methoden	Walzen – Stichplan – WORB – AGC	Kühlen – Wasser – Luft – Stapel Masking	Richten – warm – kalt Schneiden – Scheren – Brennen Spannungsarmglühen
Parameter der Messung und Modellierung	Temperatur Bombierung • • • Ebenheit	Kühl-Parameter Wasser- und Temperaturverteilung • Ebenheit	Fließspannung Eigenspannungen • • • Ebenheit

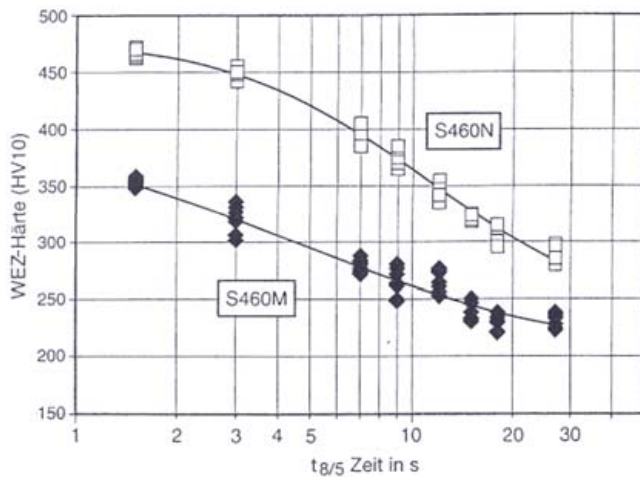


Bild 11. Vergleich der WEZ-Härte der Stähle S460N zu S460M für Einlagen-Auftragschweißung

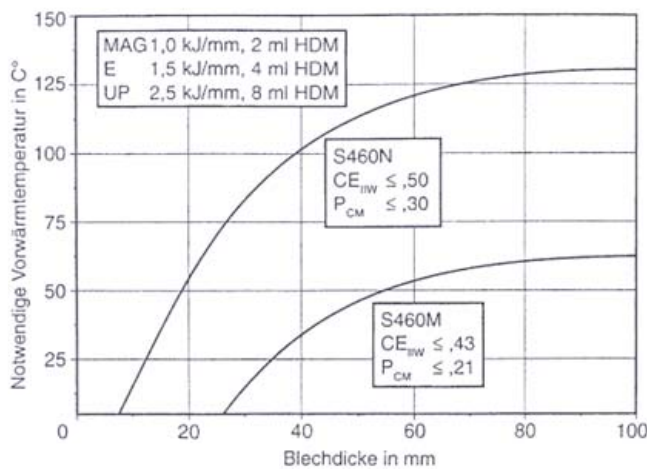


Bild 12. Mindest-Vorwärmtemperaturen beim Schweißen, Vergleich S460N zu S460M

Stahles wesentlich geringer als die des normalgeglühten gleicher Streckgrenzenklasse. Dies soll am Beispiel des Vergleichs von S460N zu S460M verdeutlicht werden.

In Bild 11 sind Härtemessungen in der Wärmeeinflußzone (WEZ) von Auftragsschweißungen an diesen beiden Stählen für unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten gegenübergestellt. Die Abkühlgeschwindigkeit wurde hierfür durch unterschiedliches Wärmeeinbringen beim Schweißen variiert. Für übliche $t_{8/5}$ -Zeiten zwischen 5 und 30 s lag die Härte des TM-Stahles analysenbedingt um 100 HV unter der des normalgeglühten Stahles.

Ein weiterer Aspekt der Schweißbeignung, der mit der Härtebarkeit in Verbindung steht, ist die verzögerte wasserstoffinduzierte Kaltrißbildung in der WEZ. Dieser Rißtyp bildet sich durch Zusammenwirken von Wasserstoff, Eigenspannungen und Härtungsgefüge. Stärker härtende Stähle müssen zum Schweißen vorgewärmt werden, damit der beim Schweißen eingebrachte Wasserstoff auf ein unkritisches Maß effundieren kann. Eine zunehmende Blechdicke verschärft die Situation, so daß hierfür auch zunehmende Vorwärmtemperaturen anzuwenden sind. Die einzelnen Schweißverfahren, die verwendeten Zusatzwerkstoffe und die Schweißbedingungen sind weitere Einflußgrößen [15]. Das Bild 12 stellt für einige typische und äquivalente Be-

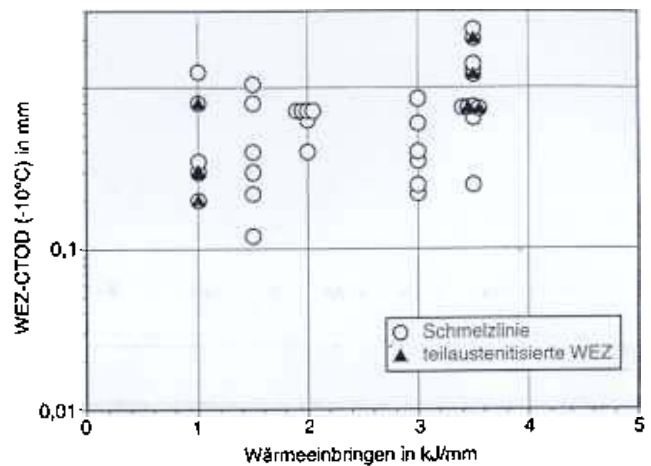


Bild 13. CTOD-Werte in der Wärmeeinflußzone (WEZ) von S460M-Stählen in Blechdicken von 60 bis 100 mm

dingungen der Hand-, Schutzgas- und Unterpulverschweißung die empfohlenen *Mindestvorwärmtemperaturen* dar. Der Einfluß der chemischen Zusammensetzung wird wiederum im Vergleich zwischen TM-Stahl und N-Stahl deutlich. S460M in Wandstärken bis 75 mm wurde bereits in großem Maße erfolgreich auch auf der Baustelle ohne Vorwärmung geschweißt.

Während bei der Härte und Kaltrißbildung geringes Wärmeeinbringen kritischer einzustufen ist, ergeben sich bezüglich der Zähigkeit und Sprödbrechtsicherheit eher Schwierigkeiten, wenn hohes Wärmeeinbringen, d. h. hohe Abschmelzleistung mit guter Wirtschaftlichkeit angewendet wird. Dies läßt sich erklären mit der zunehmenden Kornvergrößerung und mit dem Ausbilden von ungünstigen grobnadeligen WEZ-Gefügen.

Der TM-Stahl, Bild 13, zeigt in erster Linie wegen seines tiefen Gehaltes an Kohlenstoff eine verbesserte Zähigkeit in der WEZ. Bruchmechanische Untersuchungen, die im Rahmen von Schweißbeignungsprüfungen für Offshore-Plattformen durchgeführt wurden, belegen dies eindrucksvoll. Die Ergebnisse erlaubten, die Schweißkonstruktionen trotz der hohen Wandstärke und Streckgrenze ohne Spannungsarmglühen zu verwenden.

Aus dem Einsparen des Vorwärmens, dem breiten Spektrum zulässiger Schweißbedingungen und gegebenenfalls dem möglichen Verzicht auf das Spannungsarmglühen können sich für den Verarbeiter erhebliche Kostenvorteile bei Verwendung von TM-gewalzten Blechen bieten.

Anwendungsbeispiele für TM-Stähle

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten veranschaulicht wurde, was zum einen die Kunden verlangen und erwarten und wie zum anderen die Hersteller sich durch Entwicklungsarbeit, Investitionen und Prozeßoptimierung dieser Herausforderung stellen, wird im folgenden anhand von Beispielen gezeigt, was großtechnisch realisiert werden konnte.

Als erstes Beispiel wird der anspruchsvolle Bereich *Offshore-Konstruktionen* vorgestellt. Die Graphik, Bild 14, soll bezugnehmend auf die oben angesprochenen Entwicklungstendenzen zeigen, wie sich in den letzten Jahren im Bereich der Nordsee mit ihren strengen Regelwerken die



Bild 14. Typische Bereiche von Blechdicke und Streckgrenzenklasse ausgewählter Offshore-Projekte der letzten Jahre (mit TM-Stählen)



Bild 16. Commerzbank-Gebäude in Frankfurt/Main aus TM-Stahl-Blechen

TM-Stähle durchgesetzt haben, wobei maximale Blechdicken von 80 bis 100 mm keine Seltenheit darstellen. Zudem hat sich das Gütespektrum ausgehend von E355M zum E420M und E450M weiterentwickelt und das typischerweise kombiniert mit hohen Zähigkeitsanforderungen auch im Blechkern bei Prüftemperaturen von $\leq -40^\circ\text{C}$.

Eine besondere Entwicklung hat sich bezüglich TM-Stahlanwendung im europäischen Stahlbaubereich ergeben, wobei in der Einführungsphase umfangreiche Zulassungsprogramme durchgeführt wurden. Zuerst sollen als ein Beispiel für eine nicht alltägliche Konstruktion die

großen Schleusentore des niederländischen Maaslant-Kering-Sturmflutwehres vorgestellt werden. S355M/ML-Bleche im Dickenbereich von 8 bis 120 mm wurden in diesem Bauwerk verarbeitet. Die Histogramme, Bild 15, der Streckgrenzen-, Festigkeits- und Kerbschlagarbeitswerte, oben für relativ kleine und unten für relativ große Blechdicken, veranschaulichen die sichere und reproduzierbare Einstellung eines homogenen Eigenschaftsprofils über den großen Bereich von Dicken.

Ein Beispiel aus dem Stahlhochbau, Bild 16, das zur Zeit in Frankfurt seiner Fertigstellung entgegengeht und eu-

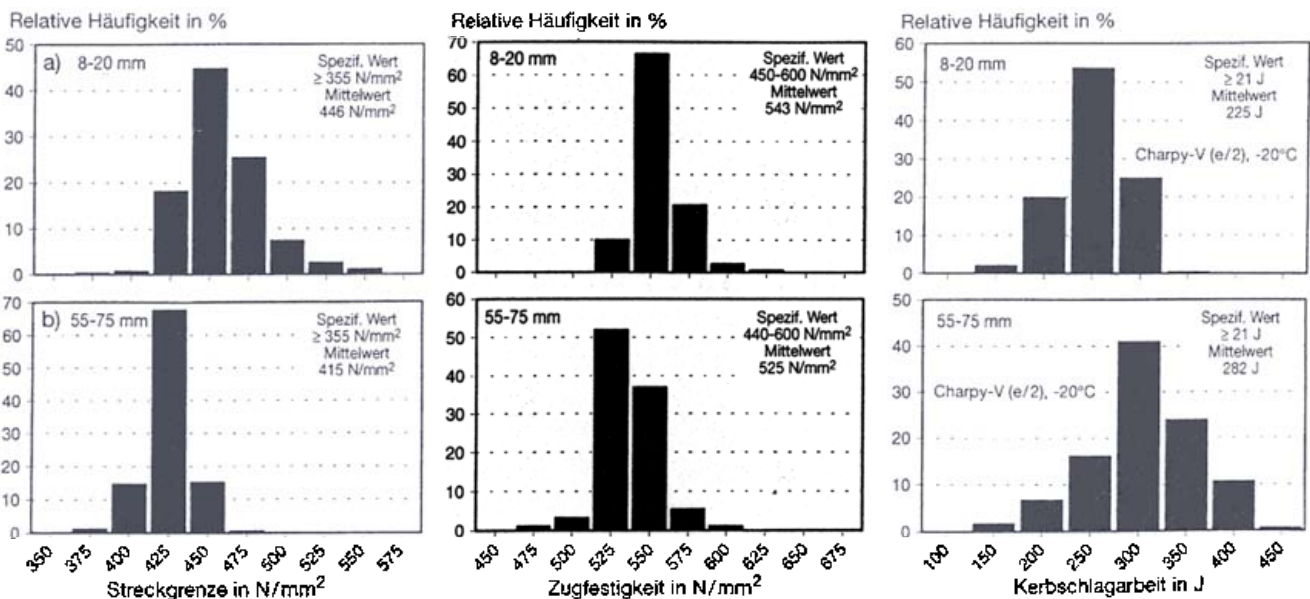


Bild 15. S355M für Maaslant-Kering-Sturmflutwehr. Mechanische Eigenschaften im Zug- und Kerbschlagbiegeversuch a) 8 bis 20 mm, b) 55 bis 75 mm

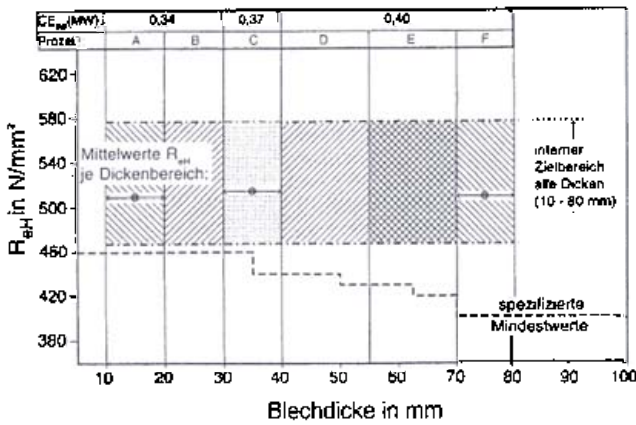


Bild 17. Streckgrenze am TM-Auftrag S460M (für Commerzbank-Hochhaus) beeinflusst durch Kohlenstoffäquivalent und Prozeß

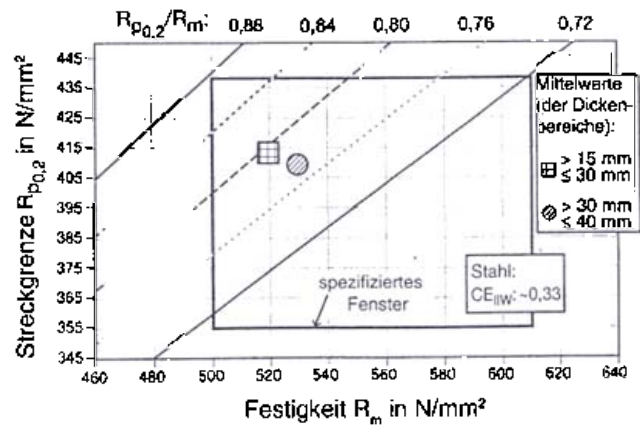


Bild 19. Eigenschaftsprofil eines TM-Stahls für LPG-Tanks

ropäische Rekord-Dimensionen aufweist, stellt das neue *Commerzbank-Hochhaus* dar. Durch gezieltes Abstimmen von Analyse und Prozeß konnte hier für Dicken von 10 bis 80 mm ein Streckgrenzeniveau von durchgehend über 460 N/mm² sicher eingestellt werden, **Bild 17**.

Das Foto einer TM-Stahlbrücke, **Bild 18**, zeigt, daß TM-Stähle aufgrund ihrer Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften neuartige, besonders ästhetische Konstruktionen erlauben, die Grobblech als ein zukunftsträchtiges Bauelement einstufen lassen [16]. Als Beispiel ist die *Erasmusbrücke in Rotterdam* dargestellt; andere Beispiele von TM-Stahlbrücken finden sich in Skandinavien (Bergsoysundet), Österreich (Melk) und Frankreich (Le Pont de Normandie).

Für den Anwendungsbereich Schiffbau kann insbesondere auf den Einsatz von TM-Stählen für große Container-Übersee-Schiffe verwiesen werden.

Als letztes Anwendungsbeispiel wird ein Blick in einen für TM-Stahl, **Bild 19**, noch recht neuen Bereich, den der Druckbehälter, Kessel und Tanks, gerichtet. Im folgenden werden die Ergebnisse der Entwicklung und Herstellung für ein *Flüssiggas-Tank-Projekt* dargestellt:

Im speziellen Fall kommen im Vergleich zu klassischen Behälterstählen einerseits und im Vergleich zu hochfesten TM-Großrohrstählen andererseits strenge Zusatzanfor-

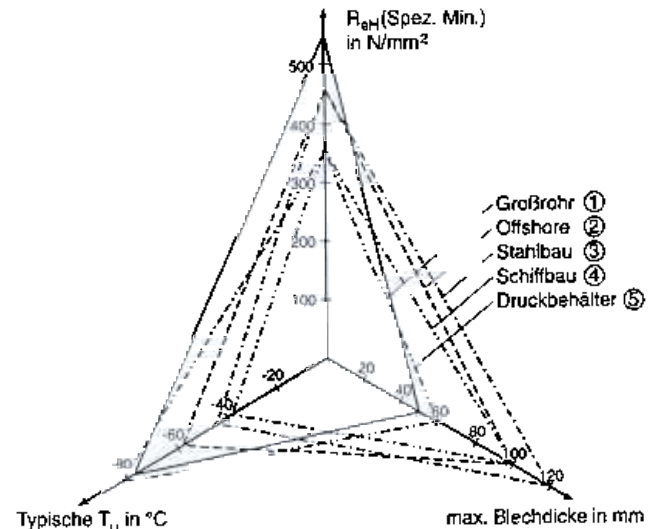


Bild 20. Aktuelle Grenzen des Lieferprofils TM-Stahl-Grobbleche

derungen u. a. wegen des Regelwerkes für Ammoniak-Lagerung und -Transport dazu, wie: – stark eingeeengte Streckgrenzen, die bei Festigkeiten > 500 N/mm² zu – für frühere TM-Stähle unüblich niedrigen – Streckgrenzenverhältnisswerten von weniger als 0,80 im Mittel führen; – wegen der beabsichtigten Verbesserung der Schweißseignung die Begrenzung des CE auf ≤ 0,36 und zur Gewährleistung der Sprödbrechtsicherheit die ChV-Prüfung bei ≤ -60°C. Durch Abstimmung einer mikrofeinerten Stahlanalyse auf einen korngrenzenoptimierten TM-Prozeß konnte selbst für Dicken von 40 mm auf kosten-trächtige Legierung mit z. B. Ni oder Mo verzichtet werden.

Erreichter Stand und Ausblick

Tafel 4 gibt eine überblicksartige Zusammenfassung der erweiterten *Nutzungsmöglichkeiten von TM-Stählen*.

Die ersten Spalten der Tafel 4 bzw. als Illustration das **Bild 20** mit den 3 Achsen zeigen für die Anwendungs-

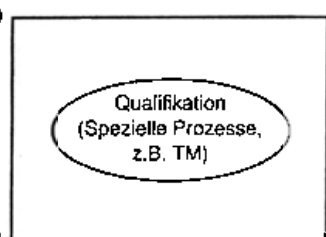


Bild 18. Erasmus-Brücke in Rotterdam aus TM-Stahl

Tafel 4. Überblick über erweiterte Nutzung von TM für Grobbleche

Anwendung	Dicke (Breite)	Streckgrenze (Entwicklung)	Zusatzforderungen	Verarbeitungsaspekte
1 Line Pipe Riser Pipe	bis 50 mm (bis 4,3 m Δ 56")	bis X80/E550 (bis X100/E690)		$\Delta R_{10,5}$ (Bauschinger, ...) Längs- u. Rundnaht-Schweißen
2 Offshore-Strukturen	bis 100 mm (bis 4,5 m)	bis E460 (bis E500)	BDWTT HIC-Test	Vorwärmen einschränken
3 Stahlbau (Brücken, Gebäude, ...)	bis 120 mm (Lamellen, ...)	bis E460 (bis E500)	Z-Güte $R_{p0,2}/R_m$	CTOD (WEZ) PWHT (Simulation)
4 Schiffbau (Containerschiffe, ...)	bis 100 mm (bis ca. 4 m)	bis E355 (bis E 420)	Kernzähigkeit gealterte Proben	Hochleistungsschweißen Ebenheit
5 Druckbehälter (LPG-Tanks, ...)	bis 60 mm (bis ca. 4 m)	bis E355 (bis E500)	Tieftemperatur (z. B. -80 °C)	Flammrichtmöglichkeit Halbwarmumformung

Anlagen-Ausstattung
(Stahlwerk, Walzwerk, Meßtechnik, Adjustage (Abmessungen), ...)



Qualitätssicherung
(TQM, Design, Standards, Schulung, ...)

Erfahrung/Know How
(Referenzen, andere Anwendungsbereiche, Modelle, Statistik, ...)

Permanente Entwicklung
(Prozesse, Werkstoffe, ..., durch Kooperation mit Instituten u. Verarbeitern, ...)

Bild 21. TM als qualifizierter Produktionsprozeß

bereiche Großrohr, Offshore, Stahlbau, Schiffbau, Behälter und Tanks vergleichend die wesentlichen Fortschritte in der Nutzung von TM-Stahl auf, und zwar bezüglich maximaler Blechdicke, maximalen Streckgrenzeniveaus der Liefergüten, des weiteren im Bild typische ChV-Übergangstemperaturen, und zusätzlich in der Tafel 4 die Blechbreiten (von schmalen Lamellen bis zu mehr als 4 m breiten Blechen).

Der rechte Block der Tafel 4 zeigt in der vorletzten Spalte, daß je nach Anwendungsbereich noch weitere Zusatz-

forderungen spezifiziert werden bzw. zu berücksichtigen sind, die besondere Maßnahmen im Stahlwerk oder bei der Blechherstellung verlangen. Beispielhaft seien erwähnt: Drop Weight Tear Test (DWTT), Prüfung der Sauer gasresistenz (HIC-Test) oder künstlich gealterte Proben. Eingangs wurde als ein wesentliches Ziel der TM-Stahlanwendung die Optimierung des Verarbeiternutzens angesprochen. In der letzten Spalte der Tafel erfolgt eine Auflistung der Aspekte, die diesbezüglich in der Entwicklung der letzten Jahre eine wesentliche Rolle spielten, wie z.B. das vorwärmfreie Schweißen.

Im Rahmen der Ausführungen wurden wiederholt Qualitätsmanagement-Elemente aus ISO 9001 angesprochen, wie Design-, Prozeßlenkung und Prozeßbeherrschung. Der *TM-Prozeß*, Bild 21, kann aus dieser Sicht als ein spezieller Prozeß betrachtet werden, mit Ansprüchen bezüglich Qualifikation von Anlagen, Personal und Verfahren [17]. Die Graphik versucht diese Qualifikationsidee auf 4 wesentlichen Elementen zu begründen, die als Basis für die erfolgreiche Erweiterung der TM-Stahl-Nutzung betrachtet werden können. Dem Bild folgend, geht es um das Zusammen-

spiel der Aspekte Anlagenausstattung, Qualitätssicherung, Erfahrung und permanente Entwicklung [18].

Trotz der heute erreichten Breite des Anwendungsspektrums für TM-gewalzte Grobbleche wird die Entwicklung der Nutzungsmöglichkeiten noch weiter fortschreiten. Dieser Weg wird wesentlich bestimmt dadurch, wie die Kundenanforderungen artikuliert werden und wie die Hüttenwerke durch systematisches Entwickeln und gezieltes Investieren die Werkstoff- und Prozeßtechnik voranbringen.

(S 29606

Schrifttum

[1] Streifelberger, A.; Schütz, W.; Bauer, J.; Hubo, R.; Hanus, F. E.: Proc. of 3rd Int. Conference „HSLA steels 95“, Beijing (1995).
 [2] Bergmann, B.; Bannenberg, N.: Stahl u. Eisen 112 (1992) Nr. 7, S. 83/89.
 [3] Streifelberger, A.; Bauer, J.; Schütz, W.; Schwinn, V.: Proc. of Int. Conf. „21st Century Steel Industry in CIS“, Moskau (1994).
 [4] Streifelberger, A.; Bauer, J.; Oswald, W.; Hanus, F.: Stahl u. Eisen 111 (1991) Nr. 5, S. 65/73.
 [5] Hillenbrand, H.-G.; Amoris, E.; Niederhoff, K. A.; Perdrix, C.; Streifelberger, A.; Zeilmair, U.: Proc. of 2nd Int. Conf. on Pipeline Technology, Oostende (1995).
 [6] Düg, Ch.; Kirsch, J.; Schütz, W.; Amoris, E.; Streifelberger, A.: La Revue de Metallurgie – CIT (1995), S. 883/892.
 [7] Bleck, W.; Kaspar, R.; Müschenborn, W.; Rakoski, F.: Stahl u. Eisen 117 (1997) Nr. 4.
 [8] Oswald, W.; Streifelberger, A.; Thul, R.; Nehrenberg, H.-J.; Kirsch, J.: Heavy plates with special process design to meet extreme customer; Proc. of METEC Congress 94, 6th Int. Rolling Conf., Düsseldorf (1994).
 [9] Düg, C.; Kirsch, H.-J.; Streifelberger, A.; Bauer, J.: Steel Techn. Int. (1992) S. 211/217.

[10] Irastorza, L.; Giusti, J.; Eberwein, K.; Kirsch, H.-J.: Modelization of flatness evolution during cooling and levelling of plates as a base for production design; Proc. of METEC Congress 94, 6th Int. Rolling Conf., Düsseldorf (1994).
 [11] Kaspar, R.; Streifelberger, A.; Peichl, L.; Pawelski, O.: Z. Werkstofftech. 14 (1983) Nr. 8, S. 272/277.
 [12] Hulka, K.; Bergmann, B.; Streifelberger, A.; Heisterkamp, F.: Development trends in high strength structural steels; Proc. of „Processing, Microstructure and Properties of Microalloyed and Other Modern HSLA steels“, Pittsburgh (1991).
 [13] Hubo, R.; Hanus, F. E.; Streifelberger, A.: Steel research 64 (1993) Nr. 8/9, S. 391/395.
 [14] Hanus, F. E.: Jahrbuch Schweißtechnik 92, DVS-Verlag Düsseldorf (1991), S. 52/59.
 [15] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt SEW 088, Beiblatt 1. Verlag Stahleisen, Düsseldorf (1993).
 [16] Vondran, R.: Stahl und Eisen 116 (1996) Nr. 7, S. 31/38.
 [17] Specification for Quality Programs, API Specification Q1; 5th edition, American Petroleum Institute, Washington (1994).
 [18] VDI-Richtlinien 5500 (Entwurf): „System zur Zukunftssicherung TQM“; VDI, Düsseldorf (1994).