



Einsatz dicker Grobbleche im Brückenbau

Tobias Lehnert
Bertram Kühn
Tim Kriegelstein

Einsatz dicker Grobbleche im Brückenbau

Moderne Stahl- bzw. Stahlverbundbrücken benötigen moderne Stahllösungen: Häufig spielen Dickbleche hier eine tragende Rolle, sei es im Einsatz als Gurtblech von schweren Brückenträgern oder als dickes Fahrblech in einer Dickblechtrögbücke. Je nach Einsatz erlauben Dickbleche eine effizientere Fertigung bzw. erhöhen die Nachhaltigkeit von Brückenbauwerken. Da heutzutage gerade Fertigungseffizienz und Dauerhaftigkeit zunehmend an Bedeutung gewinnen, führt dies bei Brücken zu einem Anstieg im Einsatz von Grobblechen mit größeren Blechdicken. Häufig jedoch stößt der Designer in der Planungsphase mit dicken Grobblechen an technische bzw. regulatorische Grenzen. Der vorliegende Aufsatz wird einige Lösungen für bestehende Hemmnisse im Einsatz dicker Grobbleche für den Brückenbau darstellen, z. B. verbesserte Machbarkeit dicker thermomechanisch gewalzter Stähle oder Erweiterung des vereinfachten Spröbruchnachweises nach Tabelle 2.1 der DIN EN 1993-1-10. Die konsequente Ausnutzung dieser Möglichkeiten eröffnet eine Vielfalt neuer vorteilhafter Optionen in der Konstruktion von Straßen- und Eisenbahnbrücken.

Keywords Dickbleche; thermomechanisch gewalzte Stähle; Dickblechtrögbücken; Spröbruchnachweis; DIN EN 1993-1-10

1 Einleitung

Für die anstehenden Infrastrukturprogramme in ganz Europa [1–3] bieten Stahl- bzw. Stahlverbundbrücken eine ideale Lösung, um den wachsenden Ansprüchen an Nachhaltigkeit, Dauerhaftigkeit und Rohstoffeffizienz gerecht zu werden. Aufgrund seiner unbegrenzten Recyclefähigkeit ist Stahl im Allgemeinen der ideale Werkstoff für solche nachhaltigen Bauwerke. Insbesondere modern konstruierte Brückenbauwerke, die die technologisch verfügbaren Möglichkeiten ausnutzen, bieten – sowohl was Fertigungseffizienz als auch Nachhaltigkeit angeht – deutliche Vorteile (Bild 1).

Es zahlt sich daher aus, dass sich die gesamte Lieferkette unter Einbeziehung der Ingenieurbüros ständig weiterentwickelt und weiterbildet, um diese neuen Möglichkeiten innovativ einzusetzen. Ein interessanter Punkt in der Konstruktion von Stahl- oder Stahlverbundbrücken ist hierbei der zunehmende Einsatz von dicken Grobblechen für verschiedenste Anwendungsfälle. So erfolgt z. B. bei schweren Brückenträgern mit konstanter Trägerhöhe

Use of thick, heavy plates for bridge construction

Modern steel or steel composite bridges need modern solutions in steel: often, thick heavy plates play a crucial role in bridge building, possibly used as flange plate in heavy bridge beams or as thick deck plate in a trough bridge. Depending on the application thick heavy plates allow efficient fabrication or potentially increase the sustainability of a bridge construction. As today especially fabrication efficiency and durability gain importance, it leads to an increase in the application of thick heavy plates. However, the designer often reaches technical or regulatory limits when designing with thick heavy plates. This report will show some solutions to overcome these existing restraints, e.g. improved possibilities in the production of thick thermomechanically rolled steels or extension of the simplified brittle fracture analysis acc. to Table 2.1 of EN 1993-1-10. The consistent exploitation of these possibilities opens a variety of new advantageous options in constructing road or railway bridges.

Keywords thermomechanically rolled plates; higher strength steel plates; DIN EN 1993-1-10 ; brittle fracture analysis

die Anpassung der Gurte meist durch eine Erhöhung der Gurtstärke, da eine Vergrößerung der Gurtbreite häufig konstruktiv ausgeschlossen ist. Der Einsatz von dicken Grobblechen mit Blechdicken > 100 mm ermöglicht somit die Vermeidung von in der Fertigung aufwendigen und ermüdungskritischen Lamellenstößen. Dies erleichtert vor allem auch die Fertigung von Baustellennähten [4, 5] und bietet damit Potenzial für eine effizientere Brückenmontage. Generell führen höhere Blechdicken, insbesondere bei höherfesten Stählen (> 355 MPa) zu Einschränkungen beim Schweißen, z. B. durch erhöhte An-



Bild 1 Höherfester thermomechanisch gewalzter Stahl (S460ML) im Brückenbau, Raymond Barre Brücke in Lyon, Frankreich
Higher strength thermomechanically rolled steel (S460ML) in bridge construction, Raymond Barre Bridge in Lyon, France

*) Corresponding author: tobias.lehnert@dillinger.biz
Submitted for review: 11 December 2018
Accepted for publication: 22 January 2019



© Schachtbau Nordhausen Stahlbau GmbH

Bild 2 Dickblechtrugbrücken bereit für die Installation
Trough bridges with thick deck plates ready for installation

forderungen an die Wärmeführung. Hier leistet die exzellente Schweißeignung thermomechanisch gewalzter Baustähle Abhilfe, sodass vor allem bei dicken höherfesten Stählen, z. B. S460 > 80 mm, aus schweißtechnischer Sicht kein Weg an dem vorteilhaften, thermomechanisch gewalzten S460ML vorbeiführt. In Abschn. 2 werden daher Neuerungen für dicke TM-Bleche bezüglich Machbarkeit und Regelwerke aufgeführt.

Ein weiterer interessanter Anwendungsfall dicker Grobbleche mit Blechdicken von 90 mm und mehr sind die Dickblechtrugbrücken (Bild 2). Dickblechtrugbrücken haben sich in den letzten Jahren als ideale Brückenvariante für Eisenbahnüberführungen von kurzen Spannweiten erwiesen, da sie z. B. aufgrund ihres hohen Vorfertigungsgrads und der einfachen Montage einen schnelleren Einbau der Brücke im Bestand, also „unter rollendem Rad“ ermöglichen.

Die Besonderheit dieses Typs ist hierbei, dass das Fahrblech aus einem dicken schweren Grobblech, meist Blechdicke ≥ 90 mm, besteht, sodass auf Querträger unterhalb des Fahrblechs verzichtet werden kann. Zur Verstärkung der Trogwände werden häufig Steifen an die Trogwände angeschweißt.

Vorteile von Dickblechtrugbrücken:

- hohe Durchfahrtshöhen bzw. lichte Höhen unter der Brücke sind möglich, weil im Gegensatz zu gewöhnlichen Trogbrücken auf Querträger unter dem Bodenblech verzichtet werden kann (für gewöhnlich beträgt die Querträgerhöhe 360–500 mm)
- geringe Sperrzeiten, einfache Montage und schneller Einbau durch hohen Vorfertigungsgrad
- geringere Schallemissionen und damit geringere Lärmbelastung aufgrund des geringeren Körperschalls des schweren Bodenblechs

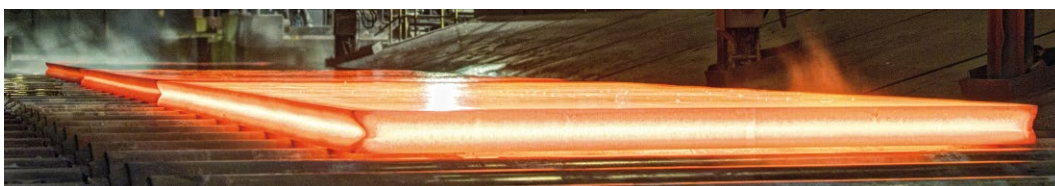


Bild 3 Thermomechanische Walzung
Thermomechanical rolling

- günstige Instandhaltungsbedingungen infolge der ebenen und homogenen Brückenuntersichten
- Vorteile bei Lebenszyklusanalyse (Life-Cycle-Assessment) und Nachhaltigkeit [6, 7]

Dies sind nur zwei Beispiele, die zeigen, wie durch den Einsatz dicker Grobbleche kosteneffiziente und nachhaltige Brückenbauwerke realisiert werden können. Die Vorteilhaftigkeit dicker Bleche hat dazu geführt, dass mehr und mehr dicke Grobbleche im Design eingesetzt und die Grenzen des Machbaren ausgereizt werden. So wird häufig der gewünschte Einsatz dicker Bleche durch verschiedene Hemmnisse, wie technische Verfügbarkeit, Regelwerke oder den vereinfachten Sprödnachweis mit Tabelle 2.1 nach DIN EN 1993-1-10, eingeschränkt.

Da sich aber gerade in der Dickblechproduktion in den letzten Jahren einiges bewegt hat, zeigt dieser Aufsatz einige der neuen Entwicklungen in der Stahl- bzw. Stahlbauindustrie auf, um den Einsatz dicker Grobbleche im Brückenbau zu erleichtern.

2 Extradicke TM-Bleche im Brückenbau

2.1 Vorteile von TM-Blechen

Aufgrund ihrer vielfältigen Verarbeitungsvorteile werden thermomechanisch gewalzte Stähle (sogenannte TM-Stähle nach Bild 3), wie S460ML, heutzutage mehr und mehr auch im modernen Stahlbau eingesetzt. Ihr entscheidender Vorteil hierbei ist die exzellente Schweißeignung, auch bei großen Blechdicken. Sie macht thermomechanisch gewalzte Stähle zum idealen Einsatzmaterial für anspruchsvolle, schweißintensive Anwendungen, wie z. B. dem Brückenbau.

Da generell eine höhere Blechdicke zu einer aufwendigeren Schweißung bzw. Schweißvorbereitung führt, erlauben thermomechanisch gewalzte Bleche aufgrund ihrer überlegenen Schweißeignung auch für große Blechdicken eine wirtschaftliche und sichere Blechverarbeitung.

Zur Bewertung der Schweißeignung von Stählen werden häufig die sogenannten Kohlenstoffäquivalente herangezogen. Das am häufigsten verwendete Kohlenstoffäquivalent, welches auch Einzug in die europäische Baustahlnormung (DIN EN 10025) gefunden hat, ist das CE (IIW):

$$CE (IIW) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (1)$$

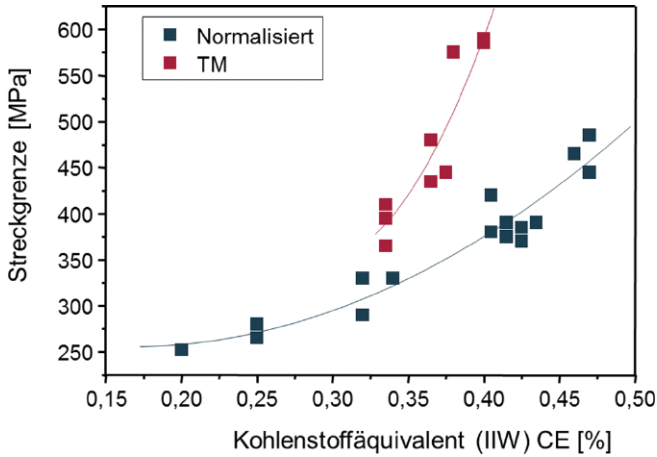


Bild 4 Zusammenhang zwischen Kohlenstoffäquivalent und Streckgrenze für normalisierte und thermomechanisch gewalzte Bleche
Relation between Carbon equivalent CEV and yield strength for normalized and thermomechanically rolled plates

Hierbei gilt, je niedriger das Kohlenstoffäquivalent, desto besser die Schweißignung eines Stahls.

Das Geheimnis thermomechanisch gewalzter Stähle liegt nun in ihrer sehr feinen Kornstruktur, die durch verschiedene Maßnahmen in der Grobblechherstellung, z. B. Mikrolegierungen, eingestellt werden kann. Diese sehr feine Mikrostruktur führt nach der Hall-Petch-Relation [8] zu einer Steigerung der Festigkeit und Zähigkeit des Stahls.

Da bei thermomechanisch gewalzten Stählen somit der Festigkeitsgewinn zum größten Teil durch diese Kornverfeinerung erzielt wird, können die Gehalte an Kohlenstoff und teilweise anderen festigkeitssteigernden Legierungsmitteln deutlich reduziert werden. Dies bildet die Basis für die im Vergleich zu einem normalisierten Stahl der gleichen Festigkeitsklasse niedrigeren Kohlenstoffäquivalente von TM-Stählen.

Bild 4 zeigt anschaulich die Verbindung zwischen dem Kohlenstoffäquivalent CE (IIW) und der Streckgrenze für die beiden Produktionsrouten thermomechanische Walzung (TM), wie S460ML, und Normalisieren, wie S460NL.

Die aus dieser schlankeren chemischen Stahlzusammensetzung resultierende bessere Schweißignung ist der Hauptvorteil thermomechanisch gewalzter Stähle. Er schlägt sich vor allem in einer deutlichen Reduzierung des nötigen Vorwärmens nieder. So kann nach DIN EN 1011-2 [9] die Vorwärmtemperatur über das Kohlenstoffäquivalent CET [10] berechnet werden:

$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40 \quad (2)$$

Normale Baustähle, wie S355J2+N, müssen in der Regel ab einer Blechdicke von ca. 30 mm zum Schweißen vorgewärmt werden. Aufgrund der deutlich niedrigeren CET-Werte von TM-Stählen und deren maßgeblichen Einfluss auf die empfohlene Vorwärmtemperatur kann bei entsprechend günstigen Schweißparametern ein S355ML selbst in großen Blechdicken von 80 mm und mehr ohne

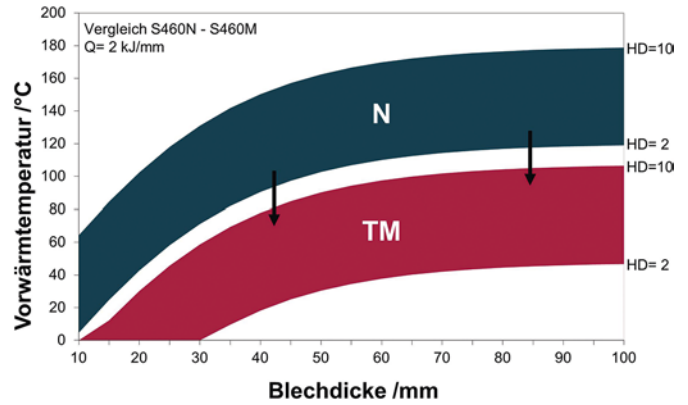


Bild 5 Vorwärmtemperaturen nach Lieferzustand zum Vergleich
Comparison of preheating temperatures depending on delivery state

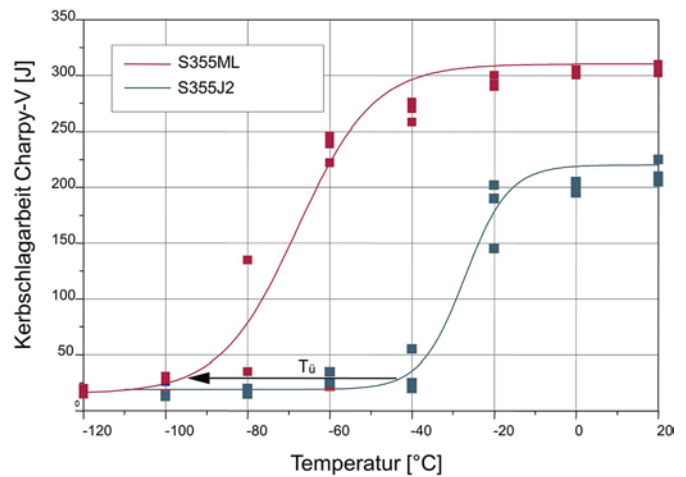


Bild 6 Vergleich der Übergangskurven der Kerbschlagarbeit für normalisierte und thermomechanisch gewalzte Stähle
Comparison of transition curves of toughness properties for normalized and thermomechanically rolled steels

Vorwärmen sicher geschweißt werden (Bild 5). Dieser Verzicht aufs Vorwärmen hat einen signifikanten Einfluss auf die Zeit- und Kostenbilanz in der Stahlbaufertigung.

Da generell höherfeste Stähle (> 355 MPa) aufgrund ihrer Legierung über eine schlechtere Schweißignung verfügen, ist dieser Vorteil für Stähle der Festigkeitsklasse S460 noch signifikanter.

Darüber hinaus verfügen thermomechanisch gewalzte Stähle über sehr gute Zähigkeitseigenschaften (Bild 6). 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 immer ein ausreichendes Zähigkeitsdargebot. Dieses garantiert eine hohe Bauteilsicherheit in der Fertigung sowie im späteren Betrieb [11].

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

- Feines Korn
 - hohe Festigkeit
 - hohe Zähigkeit



Bild 7 Zandhazenbrug in den Niederlanden mit rund 7 000 t S460M/ML bis zu einer Blechdicke von 120 mm
Zandhazenbrug in the Netherlands with around 7 000 t of S460M/ML up to a plate thickness of 120 mm

- Niedrige Kohlenstoffgehalte bzw. -äquivalente
 - hervorragende Schweißseignung
 - kein oder weniger Vorwärmen
 - schnelle, sichere Fertigung
 - Einsatz von Hochleistungsschweißverfahren möglich

2.2 Verfügbarkeit extradicker TM-Bleche

Bisher waren die Vorteile, die thermomechanisch gewalzte Bleche vor allem bei höherfesten Stahlgüten wie S460ML bieten, nur bis zu einer Blechdicke von 120 mm nutzbar (Bild 7). Wenn diese Blechdicke überschritten wurde, musste entweder auf einen normalisierten Stahl, wie S460NL, der ein deutlich höheres Kohlenstoffäquivalent CET hat und damit besondere Vorkehrungen beim Schweißen benötigt, oder einen vergüteten Stahl, wie S460QL, der aufgrund der energieintensiveren Herstellroute höhere Kosten aufweist, ausgewichen werden. Durch neue Verfügbarkeiten in den Vormaterialien (z. B. Brammen) können mittlerweile aber thermomechanisch gewalzte Grobbleche bis zu einer Blechdicke von 150 mm hergestellt werden. Diese neuen technischen Möglichkeiten betreffen sowohl die Stahlgüte S355M/ML als auch die höherfeste Variante S460M/ML. Um eine maximale Einsetzbarkeit dieser extradicken TM-Bleche zu erlauben, erfüllen diese Bleche dieselben mechanisch-technologischen Anforderungen wie 120 mm dicke Bleche der entsprechenden Güten nach DIN EN 10025-4. Optional können diese thermomechanisch gewalzten Bleche aber sogar bis zu einer Blechdicke von 150 mm mit einer von der Blechdicke unabhängigen Streckgrenze (z. B. S355M/ML mit Streckgrenze 355 MPa auch in Blechdicke 150 mm) hergestellt werden.

Tab. 2 Mechanisch-technologische Werkstoffeigenschaften für S355ML bis 140 mm nach Z-30.2-64 [12]
Mechanical-technological material properties of S355ML up to 140 mm acc. to Z-30.2-64 [12]

Stahlsorte nach DIN EN 10025-4	Mechanisch-technologische Werkstoffeigenschaften im Lieferzustand		
	Obere Streckgrenze R_{eH} für Erzeugnisdicken t (Mindestwerte) [MPa] $120 < t \leq 140$	Zugfestigkeit R_m für Erzeugnisdicken t [MPa] $120 < t \leq 140$	Bruchdehnung $L_o = 5,65 \cdot \sqrt{S_o}$ Mind. [%]
S355M	320	430 bis 590	22
S355ML	320	430 bis 590	22

Tab. 1 Typische CET- und CEV-Werte für S460-Stähle in 140 mm
Typical CET and CEV values for S460 steels in 140 mm

Stahlgüte	typische CET/%	typische CEV/%	max. CEV/% nach DIN EN 10025
S460NL	0,34	0,50	0,55
S460QL	0,31	0,42	0,50
S460ML	0,26	0,41	-

Durch diese neuen Entwicklungen stellt S460M/ML für die Streckgrenzenklasse S460 eine hervorragende Alternative auch für dickere Brückenbleche dar. Aufgrund seiner exzellenten Verarbeitungseigenschaften ist er selbst bei diesen Blechdicken überaus wirtschaftlich einsetzbar, wie der Vergleich der Kohlenstoffäquivalente für verschiedene Stahlbleche in 140 mm zeigt (Tab. 1).

2.3 Bauaufsichtliche Zulassung extradicker TM-Bleche > 120 mm

Wie oben beschrieben, bieten thermomechanische Stähle, wie S355ML oder S460ML, dem Fertigungsbetrieb aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und niedrigen Kohlenstoffgehalte vielfältige Verarbeitungsvorteile. Obwohl die technische Darstellbarkeit auch für größere Dicken mittlerweile gegeben ist, definiert die aktuelle DIN EN 10025-4:2004 als Norm für im Stahlbau angewendete TM-Stähle diese derzeit nur bis zu einer Dicke von 120 mm. Um den Einsatz der vorteilhaften TM-Bleche über diese Grenze hinaus zu erleichtern, hat das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) den Grobblechen der Güten S355M und S355ML die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Z-30.2-64) bis 140 mm ausgesprochen. In der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung wurden dieselben mechanischen Anforderungswerte wie für Bleche mit 120 mm nach DIN EN 10025-4 zugrunde gelegt (Tab. 2) [12].

Somit können diese TM-Stahlgüten S355M/ML bis zu einer Blechdicke von 140 mm unter den einschlägigen Regelungen auch im bauaufsichtlich geregelten Bereich in Deutschland eingesetzt werden. Die Kennzeichnung der Übereinstimmung mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-30.2-64 erfolgt über das sogenannte Ü-Zeichen (Übereinstimmungszeichen). Für nicht gere-

gelte Bauprodukte ersetzt dieses Ü-Zeichen in Deutschland die Notwendigkeit einer CE-Kennzeichnung im bauaufsichtlich geregelten Stahlbau. Weitere Regelungen im Infrastrukturbau (z. B. im Eisenbahnbrücken- bzw. Straßenbrückenbau) müssen gegebenenfalls berücksichtigt werden.

Darüber hinaus befindet sich die für die Stahlgüten im Stahlbau wichtige Werkstoffnormenreihe DIN EN 10025 derzeit in Überarbeitung und soll 2019 veröffentlicht werden. Neben einigen stahlgütenübergreifenden Änderungen wird die neue DIN EN 10025 auch einige andere Stahlsorten enthalten, womit die Normung an die neuen Möglichkeiten moderner Stahlwerke angepasst wird.

So wird z. B. die maximal definierte Erzeugnisdicke für thermomechanisch gewalzte Stähle in DIN EN 10025-4 auf 150 mm erweitert. Damit können mit Veröffentlichung der neuen DIN EN 10025-4 sowohl Ingenieure als auch Verarbeiter künftig in noch größerem Umfang von dem Einsatz dieser bereits auf dem Markt technisch verfügbaren Möglichkeiten profitieren.

3 Schwere Bleche für Dickblechtragbrücken

3.1 Neuheiten für breite Dickbleche

Dicke schwere Grobbleche finden häufig als Fahrbahnblech in den vorteilhaften Dickblechtragbrücken für kurz- und mittelspannige Eisenbahnüberführungen Anwendung. Hierzu werden meist die Stahlsorten/-güten S275NL/ML oder S355NL/ML nach DIN EN 10025-3 und -4 eingesetzt (Blechdicke ~ 100 mm). Um die gesamte Fahrbahnbreite bzw. Spannweite möglichst mit einem einzelnen Blech darzustellen, sind besonders breite, lange Bleche gefragt. Muss das Fahrbahnblech in Fahrtrichtung verlängert werden, so ist die Schweißnaht in die Drittelpunkte, bezogen auf die Brückenlänge, zu legen und auf Ermüdungsfestigkeit nachzuweisen.

Häufig lassen sich durch neue produktionsseitige Möglichkeiten in der Herstellung von sehr großen Blechabmessungen Quer- sowie Längsstöße in Dickblechtragbrücken vermeiden oder bis auf ein Minimum reduzieren, einhergehend mit einer Verbesserung des Ermüdungsverhaltens. Hierzu hat die Stahlindustrie in der letzten Zeit Investitionen getätigt, sodass neuerdings z. B. für diesen Anwendungszweck Bleche der Güten S275NL/S355NL mit maximalen Blechgewichten von ca. 42 t und Blechbreiten bis 5 200 mm bzw. die Güten S275ML/S355ML bis ca. 42 t und 4 600 mm geliefert werden können, und dies auch mit Ebenheitsanforderung „normaleben“ nach DIN EN 10029 [13] (Bild 8). Noch größere Stückgewichte sind auf Nachfrage möglich. Standardmäßig werden die Grobbleche mit Abmessungstoleranzen nach DIN EN 10029 bezgl. Breite (z. B. -0, +25 mm), Länge, Rechtwinkligkeit etc. geliefert. Hierbei ist zu beachten, dass für den Fall, dass dennoch ein weiterer Zuschnitt beim Fertigungsbetrieb oder eine zusätzliche besondere Schweiß-

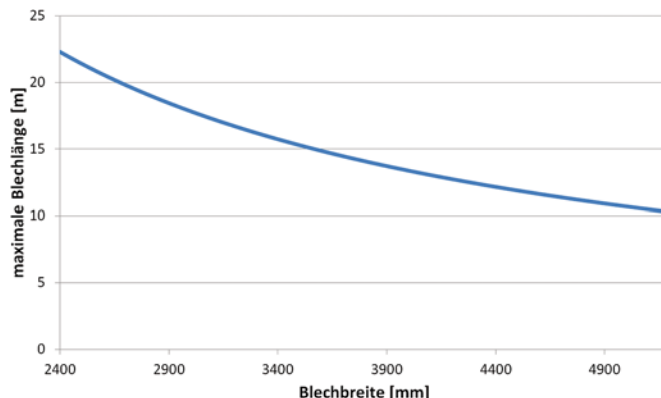


Bild 8 Mit einem maximalen Blechgewicht von ~ 42 t ergeben sich folgende maximal möglichen Blechlängen für ein 100 mm dickes Blech der Güte S355NL

The following maximum plate lengths are available for a 100 mm thick plate in Grade S355NL, assuming a maximum plate weight of ~ 42 t

nahtvorbereitung vorgesehen ist, ein Verarbeitungszuschlag in der Breite und Länge notwendig sein kann.

3.2 Dickbleche in DBS 918002-02

Für Baustähle, die in Eisenbahnbrücken Verwendung finden, stellen die Technischen Lieferbedingungen der Deutschen Bahn DBS 918 002-02 [14] bei der Bestellung zu beachtende, weitergehende Anforderungen. Es ist deshalb unbedingt erforderlich, bei Bestellungen von Grobblechen für die Verwendungsbereiche Brücken und konstruktiver Ingenieurbau unter Eisenbahnlasten, die der DB AG unterliegen, explizit auf die DBS 918 002-02 hinzuweisen.

Seit der Ausgabe Januar 2013 werden auch Grobbleche mit Erzeugnisdicken > 100 mm für den Eisenbahnbrückenbau beschrieben.

Für diese Dickbleche > 100 mm gelten unter anderem folgende zusätzliche Anforderungen:

- z. B. Maximaldicke: 120 mm für S275ML, S355ML
250 mm für S275NL, S355J2+N, S355NL
100 mm für restliche Güten
- chemische Einschränkungen
- Z-Güte: immer DIN EN 10164-Z35 [15]
- Mindestdickenverformungsgrad: $\geq 1,95$
- Ultraschallprüfung: S3/E3 nach DIN EN 10160 [16]
- Zugprobe an Längs- und Querproben nach DIN EN ISO 6892
- erhöhte Anforderungen an die Zähigkeit (z. B. an Mindestkerbschlagarbeit (z. B. 50 J bei -50°C) oder an Probenlage des Kerbschlagbiegeversuchs)

4 Spröbruchnachweis extradicker Grobbleche

Häufig wird der Einsatz vorteilhafter dicker Grobbleche im Brückenbau dadurch erschwert, dass die einzusetzen-

Tab. 3 Zähigkeitsniveaus typischer Stahlgüten der Normenreihe EN 10025
Toughness classes of typical steel grades in standard EN 10025

Stahlgüte	Testtemperatur	min. Kerbschlagarbeit
S275N/M	-20 °C	40 J
S275NL/ML	-50 °C	27 J
S355N/M	-20 °C	40 J
S355NL/ML	-50 °C	27 J
S460N/M	-20 °C	40 J
S460NL/ML	-50 °C	27 J
S460QL1	-60 °C	30 J

de Blechdicke oberhalb der zulässigen Erzeugnisdicke nach dem vereinfachten Spröbruchnachweis (Tabelle 2.1 der DIN EN 1993-1-10) liegt. Aus Tabelle 2.1 der DIN EN 1993-1-10:2010-12 [17] können die Größtwerte der zulässigen Erzeugnisdicken in Abhängigkeit von Stahlsorte und -güte entnommen werden. Überschreitet die statisch notwendige Blechdicke die zulässigen Werte in Tabelle 2.1 (DIN EN 1993-1-10), sind häufig aufwendige Nachrechnungen oder Gutachten nötig. Tabelle 2.1 wurde vor dem Hintergrund einer bedarfsgerechten Werkstoffwahl zur Vermeidung von Spröbrüchen im Anwendungsbereich des Hochbaus und insbesondere des Brückenbaus abgeleitet. Hierbei spielten vor allem die Zähigkeitsniveaus der einzelnen Stahlgüten aus der Werkstoffnormenreihe DIN EN 10025 eine wichtige Rolle. Für die Streckgrenzenklassen S275, S355 und S460 sind für größere Blechdicken meist die in Tab. 3

aufgezeigten Stahlgüten mit den jeweils zugehörigen Zähigkeitsniveaus maßgeblich gewesen.

Mittlerweile lassen sich die oben beschriebenen Stahlgüten teilweise jedoch bis zu großen Blechdicken auch mit höheren Anforderungen an die Zähigkeit, z. B. min. 50 J bei -60 °C, herstellen. Um daher die Stahlsortenauswahl für extradicke Grobbleche zu erleichtern, wurden zur Ergänzung der in DIN EN 1993-1-10 [17] enthaltenen Stahlgüten auch Stähle mit Zähigkeitsanforderungen untersucht, die die Zähigkeitsniveaus der Norm DIN EN 10025 übersteigen. Dabei wurden das gleiche Berechnungsverfahren und das gleiche Bemessungsszenario angewendet wie in DIN EN 1993-1-10 [17]. Hierzu weiterführende Informationen können [18–21] entnommen werden. Das Ergebnis dieser Berechnungen kann Tab. 4 entnommen werden.

Der erste Teil der Tabelle stellt die neu erzeugten, ergänzenden Zeilen zur Tabelle 2.1 aus DIN EN 1993-1-10 und damit die durch eine Anhebung des Zähigkeitsniveaus möglichen maximal zulässigen Erzeugnisdicken dar. In der zweiten Tabelle wird anschaulich der mögliche Gewinn an einsetzbarer Blechdicke gegenüber den Stahlgüten aus Tab. 3 durch eine Spezifizierung der aufgezeigten Zusatzanforderungen verdeutlicht. Hierbei ist zu beachten, dass die Zusatzanforderung idealerweise mit dem Stahlhersteller im Vorfeld des Projektdesigns diskutiert wird, um sicherzustellen, dass das gewünschte Zähigkeitsniveau auch in der benötigten Blechdicke lieferbar ist. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Zusatzanforderung später in der Stahlbestellung explizit angegeben wird, z. B.

Tab. 4 Ergänzung zu Tabelle 2.1 DIN EN 1993-1-10
Addition to Table 2.1 DIN EN 1993-1-10

Größte zulässige Erzeugnisdicken t in mm																								
Stahlsorte	KV bei T °C	KV J min.	Bezugstemperatur T _{Ed} in °C																					
			σ _{Ed} =0,75·f _y (t)							σ _{Ed} =0,50·f _y (t)							σ _{Ed} =0,25·f _y (t)							
			10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	
S275 ML,NL ¹⁾	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200	190	165	145	aus EN 1993-1-10
+Zusatz:	-50	40	200	185	160	135	110	95	75	200	200	200	180	155	130	115	250	230	200	200	200	190	165	
S355 ML,NL ¹⁾	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130	aus EN 1993-1-10
+Zusatz:	-50	40	180	155	130	110	90	75	60	200	200	180	155	135	110	95	240	210	200	200	200	175	150	
	-60	50	200	180	155	130	110	90	75	200	200	200	180	155	135	110	250	240	210	200	200	200	175	
S460 ML,NL ¹⁾	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115	aus EN 1993-1-10
+Zusatz:	-50	40	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130	
	-60	50	175	150	125	105	90	70	60	200	200	180	155	130	110	95	245	215	200	200	200	175	155	

1) Zulässige Erzeugnisdicken gemäß EN 1993-1-10, Tabelle 2.1

Erhöhung der zulässigen Erzeugnisdicken gegenüber EN 1993-1-10 in mm																							
Stahlsorte	KV bei T °C	KV J min.	Bezugstemperatur T _{Ed} in °C																				
			σ _{Ed} =0,75·f _y (t)							σ _{Ed} =0,50·f _y (t)							σ _{Ed} =0,25·f _y (t)						
			10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50
S275 ML,NL	-50	27	EN 1993-1-10																				
+Zusatz:	-50	40	15	25	25	25	15	20	10	0	0	20	25	25	15	20	20	30	0	0	10	25	20
S355 ML,NL	-50	27	EN 1993-1-10																				
+Zusatz:	-50	40	25	25	20	20	15	15	10	0	20	25	20	25	15	15	30	10	0	0	25	25	20
	-60	50	45	50	45	40	35	30	25	0	20	45	45	45	40	30	40	40	10	0	25	50	45
S460 ML,NL	-50	27	EN 1993-1-10																				
+Zusatz:	-50	40	25	20	15	20	10	10	10	20	25	25	20	15	20	10	15	0	0	25	20	25	15
	-60	50	50	45	35	35	30	20	20	20	45	50	45	35	35	30	45	15	0	25	45	45	40

Tab. 5 Ergänzung zu NA.1 – Dickenbegrenzung von Stahlteilen für Straßenbrücken – a) Für Flachbleche und Langprodukte nach DIN EN 10025-2, DIN EN 10025-3, DIN EN 10025-4, DIN EN 10025-5, DIN EN 10025-6
Addition to National Annex of DIN EN 1993-2: Table NA.1 a)

Stahlgüte nach DIN EN			Druckbereich	Zugbereich ^b	
10025-2	10025-3 und -4 ^a	10025-5	10025-6	mm	
				mm	
S235JR				75	45 (30)
S235J0		S235J0W		100	65 (30)
S235J0+N				100	65 (65)
S235J2		S235J0W		135	90 (30)
S235J2+N				135	90 (90)
S275J0				95	55 (30)
S275J2				125	80 (30)
	S275N/M			145	95 (80)
	S275NL/ML			190	130 (130)
	S275NL/ML + Zusatz 40 J bei -50°C			200	155 (155)
S355J0		S355J0W		80	45 (30)
S355J2		S355J2W		110	65 (30)
S355K2		S355K2W		130	80 (30)
	S355N/M			130	80 (80)
	S355NL/ML			175	110 (110)
	S355NL/ML + Zusatz 40 J bei -50°C			200	135 (135)
	S355NL/ML + Zusatz 50 J bei -60°C			200	155 (155)
	S420N/M			120	70
	S420NL/ML			160	100
	S460N/M			115	65
	S460NL/ML			155	95
	S460NL/ML + Zusatz 40 J bei -50°C			175	110
	S460NL/ML + Zusatz 50 J bei -60°C			200	130
		S460Q		95	55
		S460QL		130	75
		S460QL1		175	110

^a Die in DIN EN 10025 angegebenen Grenzdicken für Stahlbauteile sind in Teil 3 (Gütegruppe N) und für Langprodukte in Teil 4 (Gütegruppe M) geregelt.

^b Für die Stahlsorten S235, S275 und S355 ist bei Dicken ≥ 30 mm ein Aufschweißbiegeversuch erforderlich. Bei Anwendung der Klammerwerte kann der Aufschweißbiegeversuch entfallen.

Tab. 6 Ergänzung zu NA.2 – Dickenbegrenzung von Stahlteilen bei Eisenbahnbrücken – a) Für Flachbleche und Langprodukte nach DIN EN 10025-2, DIN EN 10025-3, DIN EN 10025-4
Addition to National Annex of DIN EN 1993-2: Table NA.2 a)

Norm	Sorte/Güte	Zulässige Werkstoffdicke in mm	
		Druckbereich ^a	Zugbereich ^{a,b}
DIN EN 10025-2	keine Ergänzung zu NA.2		
DIN EN 10025-3	S275N oder M	145	85 (80)
	S275NL oder ML	190	115 (115)
	S275NL oder ML + Zusatz 40 J bei -50°C	200	135 (135)
10025-4	S355N oder M	130	70 (70)
	S355NL oder ML	175	95 (95)
	S355NL oder ML + Zusatz 40 J bei -50°C	200	115 (115)
	S355NL oder ML + Zusatz 50 J bei -60°C	200	135 (135)
	S420N oder M	120	60
	S420ML oder NL	160	85
	S460N oder M	115	55
	S460NL oder ML	155	80
	S460NL oder ML + Zusatz 40 J bei -50°C	175	90
	S460NL oder ML + Zusatz 50 J bei -60°C	200	110

^a Dicken > 100 mm sind nur mit Zustimmung im Einzelfall erlaubt.

^b Für die Stahlsorten S235, S275 und S355 ist bei Dicken ≥ 30 mm ein Aufschweißbiegeversuch erforderlich. Bei Anwendung der Klammerwerte kann der Aufschweißbiegeversuch entfallen.

S355ML nach EN 10025-4

+ min. Kerbschlagarbeit 50 J bei -60°C (Mittelwert)

Die obige beispielhafte Zusatzanforderung erlaubt nach Tab. 4 Teil 2 im Vergleich zu einem S355ML nach Norm DIN EN 10025-4 je nach Auslastungssituation und Bezugstemperatur den Einsatz von bis zu 50 mm dickeren Grobblechen.

Diese neuen Ergebnisse lassen sich auch auf die vereinfachten Nachweistabellen aus dem Nationalen Anhang der DIN EN 1993-2 [22] übertragen. Somit können die dort enthaltenen Tabellen NA.1 a) bzw. NA.2 a) um zusätzliche Zeilen (Tab. 5, 6 – fett markiert) ergänzt werden.

5 Zusammenfassung

Dieser Aufsatz stellt Neuerungen für den Einsatz dicker Grobbleche im Stahlbrückenbau vor. Ein besonderer Blick wurde hierbei auf die neuen Möglichkeiten in der

Machbarkeit dicker thermomechanisch gewalzter Stähle mit Blechdicken > 120 mm gelegt, da diese aufgrund ihrer exzellenten Schweißseignung auch in großen Blechdicken hervorragend schweißgeeignet sind. Neuerungen in für den Stahlbau relevanten Regelwerken bzw. Normen werden den Einsatz dieser Stähle künftig weiter erleichtern. Darüber hinaus wurden die neuen Möglichkeiten in der technischen Darstellbarkeit von schweren dicken Blechen für Dickblechtragbrücken aufgezeigt. So können mittlerweile Bleche mit Breiten bis 5 200 mm für diesen Anwendungszweck hergestellt werden. Da häufig die Sprödbbruchnachweistabelle aus DIN EN 1993-1-10 die zugelassene Blechdicke in Brückenbauten beschränkt, wurde in Abschn. 4 eine Erweiterung dieser Tabelle vorgestellt. Sie zeigt, dass durch die Anhebung der Zähigkeitsanforderungen deutliche Verbesserungen in der größten zulässigen Erzeugnisdicke erzielt werden können. Somit kann der Aufsatz bestehende Hemmnisse für den Einsatz dicker Grobbleche abbauen und damit den künftigen Einsatz im Sinne von effizienten Stahl- bzw. Stahlverbundbrücken deutlich erleichtern.

Literatur

- [1] Zinke, T., Ummenhofer, T., Pfaffinger, M., Mensinger, M. (2014) The Role of Traffic in Sustainability Assessment of Road Bridges. In: Petzek, E., Băncilă, R. [eds.] The Eight International Conference "Bridges in Danube Basin". pp. 255–263.
- [2] Kuhlmann, U., Maier, P., Pfaffinger, M. et al. (2014) Sustainability Assessment of Bridges – Recent German Research Result. München: JGBS.
- [3] Deutsche Bahn (2015) Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung: Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht.
- [4] Kuhlmann, U., Kudla, K. (2015) Ermüdungsfestigkeit von Lamellenstößen bei Vollwandträgern mit dicken Gurten – Experimentelle und numerische Untersuchungen. In: Stahlbau 84, H. 3, S. 203–213.
- [5] Kuhlmann, U., Kudla, K. (2013) Der Lamellenstoß im Stahl- und Verbundbrückenbau – Stand der Forschung und Normung. In: Stahlbau 82, H. 2, S. 69–77.
- [6] Breunig, S., Kuhlmann, U. (2015) Improvement of Fatigue Resistance of Transversally Bended Longitudinal Fillet Welds by High Frequency Mechanical Impact Treatment Steel bridges. In: Yardimci, N., Aydoğan, A. B., Gür'es, H. Y. [eds.] Innovation & New Challenges 2015, pp. 615–624.
- [7] Kuhlmann, U., Breunig, S., Zinke, T. (2018) Moderne Eisenbahnbrücken als Dickblechtragbrücken – Optimierung der Auslegung für Ermüdung und Lebenszyklusbetrachtung. In: Stahlbau 87, H. 6, S. 571–582.
- [8] Smith W. F., Hashemi, J. (2006) Foundations of Materials Science and Engineering, 4th ed., New York City: McGraw-Hill.
- [9] DIN EN 1011-2:2001-05 (2001) Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen. Berlin: Beuth Verlag.
- [10] Uwer, D., Höhne, H. (1991) Charakterisierung des Kaltrißverhaltens von Stählen beim Schweißen. In: Schweißen und Schneiden 43, H. 4, S. 195–199.
- [11] Willms, R. (2008) High strength steels in steel construction: Application and processing. In: Ofner, R., Beg, D., et al. [eds.] Proceedings of the 5th European Conference on Steel and Composite Structures, EUROSTEEL, Graz, Austria.
- [12] Z-30.2-64 (2014) Flacherzeugnisse aus den warmgewalzten schweißgeeigneten Feinkornstählen im thermomechanischen (M) gewalzten Zustand S355M und S355ML.
- [13] DIN EN 10029 (2011) Warmgewalztes Stahlblech von 3 mm Dicke an – Grenzabmaße und Formtoleranzen. Berlin: Beuth.
- [14] DBS 918 002-02 (2013) Technische Lieferbedingungen Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen. Deutsche Bahn AG. Jan. 2013.
- [15] DIN EN 10164:2005-03 (2005) Stahlerzeugnisse mit verbesserten Verformungseigenschaften senkrecht zur Erzeugnisoberfläche. Berlin: Beuth.
- [16] DIN EN 10160:1999-09 (1999) Ultraschallprüfung von Flacherzeugnissen aus Stahl mit einer Dicke größer oder gleich 6 mm (Reflexionsverfahren). Berlin: Beuth.
- [17] DIN EN 1993-1-10:2012-12 (1993) Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung. Berlin: Beuth.
- [18] Kühn, B. (2005) Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbrüchen [Dissertation]. RWTH Aachen, Herzogenrath: Shaker Verlag.
- [19] Stranghöner, N., Kühn, B. (2012) Auswahl der Stahlsorte auf Basis der DIN EN 1993-1-10. In: Stahlbau 81, H. 4, S. 315 ff.
- [20] Feldmann, M., Kühn, B., Eichler, B., Schaffrath, S., Citarelli, S. (2017) Zähigkeitsbasierte Stahlsortenauswahl nach DIN EN 1993 – Stand der Normung und neue Entwicklungen. In: Kuhlmann, U. [Hrsg.] Stahlbaukalender 2017. 19. Jg., Berlin: Ernst & Sohn Verlag. ISBN: 978-3-433-03164-3
- [21] Kühn, B., Stranghöner, N., Sedlacek, G., Höhler, S. (2012) Stahlbaunormen: Kommentar zu DIN EN 1993-1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigen-

schaften in Dickenrichtung. In: *Kuhlmann, U.* [Hrsg.] Stahlbaukalender 2012. 14. Jg., Berlin: Ernst & Sohn Verlag, S. 353–380. ISBN: 978-3-433-02988-6

[22] DIN EN 1993-2/NA:2014-10 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3 (2014) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken. Berlin: Beuth.

Autoren

Dr. Tobias Lehnert
DILLINGER
Werkstr. 1
66763 Dillingen
tobias.lehnert@dillinger.biz

Prof. Dr.-Ing. Bertram Kühn
Technische Hochschule Mittelhessen
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
bertram.kuehn@bau.thm.de

Tim Krieglstein M.Eng.
Technische Hochschule Mittelhessen
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
tim.krieglstein@bau.thm.de



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

THM

**CAMPUS
GIESSEN**

BAU

Bauwesen

IKT - INSTITUT FÜR KONSTRUKTION UND TRAGWERK



IKT

Institut für Konstruktion
und Tragwerk

go.thm.de/ikt

Das Institut für Konstruktion und Tragwerk forscht auf dem Gebiet des konstruktiven Ingenieurbaus. Der Tätigkeitsschwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung innovativer Tragstrukturen, Optimierung der Knotendetails von Betonkonstruktionen sowie Spezialfragen der Ermüdung und Werkstoffwahl. Dies erfolgt mit Hilfe experimenteller und numerischer Untersuchungen und dem Einsatz modernster Prüfmaschinen, Software und Messsystemen.

Fachgebiet
Stahl-, Verbund-
und Brückenbau



Prof. Dr.-Ing. Bertram Kühn
+49 641 309 1866
bertram.kuehn@bau.thm.de
www.thm.de/bau



Fachgebiet
Stahlbeton- und
Spannbetonbau

Prof. Dr.-Ing. Jens Minnert
+49 641 309 1815
jens.minnert@bau.thm.de
www.thm.de/bau