

# HÖHERFESTE STÄHLE FÜR DEN STAHLBAU – AUSWAHL UND ANWENDUNG

DILLINGER HÜTTE GTS

# Höherfeste Stähle für den Stahlbau – Auswahl und Anwendung

F. Schröter

**Zusammenfassung** Hochfeste Stähle ermöglichen dem Stahlbau neue ästhetische Gestaltungsmöglichkeiten, die sich durch filigrane und leichte Konstruktionen auszeichnen. Eher aber wegen der mit ihrem Einsatz verbundenen Effizienzsteigerung in der Fertigung nimmt ihre Anwendung kontinuierlich zu. Dieser Artikel stellt die verschiedenen hochfesten Werkstoffe vor, die sich durch unterschiedliche Herstellungsrouten und damit auch Gebrauchseigenschaften auszeichnen. Die Vorteile der Anwendung von hochfesten Stählen werden abschließend an zahlreichen Beispielen erläutert.

## High-strength steels for steel construction – selection and application

**Abstract** By high-strength steels the constructional steelwork industry is enabled to new esthetical structures. Moreover, the application of high-strength steels is linked to a possible increase of efficiency during fabrication. Therefore, the application of high-strength steel increases continuously. This article presents the variety of high-strength materials which are characterised by different production processes and, therefore, also different fabrication properties. The advantages of using these materials will be discussed in detail and explained on various examples.

## 1 Einleitung

Immer war es einer der wichtigsten Vorzüge des Stahlbaus gewesen, besondere bauliche Lösungen anzubieten, die es durch ihre schlanke und filigrane Ästhetik verstehen, sich fugenlos in die sie umgebende Umwelt einzubetten. Ein Leichtbau erfordert jedoch Materialien, die in der Lage sind, durch entsprechend hohe Festigkeit eine gegenüber dem geometrischen Einflussfaktor entsprechend größeren Beitrag zur Beanspruchbarkeit anzubieten. Vor diesem Hintergrund war es den Stahlerzeugern immer ein Anliegen, neue Stahlsorten zu entwickeln, die dem Anwender eine hö-

here Festigkeit bieten – und das unter im Stahlbau akzeptablen Verarbeitungsbedingungen.

Es muss aber berücksichtigt werden, dass der Begriff „Hochfester Stahl“ nicht klar definiert ist und offensichtlich von den technischen Entwicklungen, wie sie sowohl in der stahlerzeugenden als auch stahlverarbeitenden Industrie gemacht wurden, abhängt. So wurde z.B. die Stahlgüte St 52 mit einer Berechnungstreckgrenze von  $360 \text{ N/mm}^2$  bei der kleinsten Erzeugnisdicke, was den heutigen Stählen S355 entspricht, in den 1920er Jahren im deutschen Stahlbrückenbau eingeführt und lange Zeit als hochfester Baustahl angesehen [1]. Inzwischen sind die modernen und optimierten Nachfolger dieser Stahlsorten ein Standardmaterial im Stahlbrückenbau. Deshalb ist dieser Beitrag der näheren Beschreibung der Verwendbarkeit von Stahlsorten mit einer Mindeststreckgrenze von größer als  $355 \text{ MPa}$  gewidmet. Diese werden im Folgenden als höherfeste Stähle bezeichnet.

## 2 Unterscheidung von hochfesten Stahlsorten

Stähle mit hohen Streckgrenzen können durch verschiedene Herstellungsprozesse hergestellt werden, die schematisch in Bild 1 dargestellt sind. Die Herstellungsrouten stehen natürlich in enger Abhängigkeit zu der chemischen Zusammen-

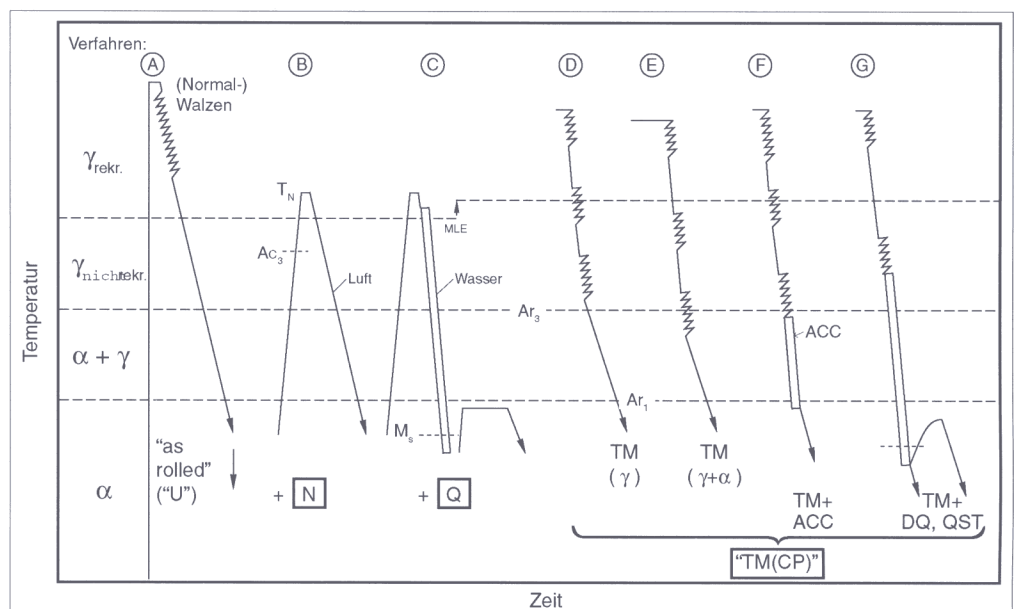


Bild 1. Herstellungsrouten für hochfeste Stähle  
Fig. 1. Production processes for high-strength steel

Dr.-Ing. Falko Schröter

Leiter Marketingsparte Stahlbau AG  
der Dillinger Hüttenwerke, D-66748 Dillingen  
Tel.: (06831) 47 3194, Fax: (06831) 47 3089  
falko.schroeter@dillinger.biz

setzung des Stahles. Daraus resultieren auch unterschiedliche Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften insbesondere in Hinblick auf die im Stahlbau dominierende Größe der Schweißseignung. Somit unterscheidet man:

- **Normalisierte Stähle:** Diese werden durch eine konventionelle Warmwalzung, d.h. ein Walzen überhalb der so

# ACC TM + QST DQ

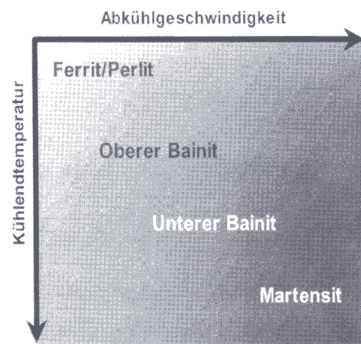


Bild 2. Zusammenhang verschiedener Wärmebehandlungen um das TM-Walzen  
Fig. 2. Influence of various heat treatments following to TM-rolling

genannten Rekristallisationstemperatur mit anschließendem Normglühen im Ofen hergestellt. Aus dem Normalglühen, dem durchgreifenden Erwärmen auf Temperaturen überhalb der Ferrit-Austenit-Umwandlungstemperatur mit folgender langsamer Abkühlung, entsteht eine feine, regelmäßige Gefügestruktur, die in Verbindung mit Legierungselementen zu entsprechend hohen Streckgrenzen führt. Heute kann diese Art der Wärmebehandlung je nach Blechdicke und Stahlqualität durch ein normalisierendes Walzen, das in seinem Ergebnis dem zweistufigen Prozess des Warmwalzens mit anschließendem Normalglühen entspricht, dargestellt werden.

Die Standardstahlgüte S355J2G3 wird als Blech nach diesen Prozessen hergestellt. Höhere Festigkeiten erreicht man durch Erhöhung des Legierungsanteils und die Zugabe von sogenannten Mikrolegierungselementen wie Titan, Niob und Vanadin, die eine weitere Feinkornbildung durch im Gefüge ausgeschiedene verfestigende Teilchen zur Folge haben.

Solche Stähle sind in DIN EN 10 113-2 [2] bis zur Streckgrenzenklasse 460 MPa genormt und werden mit dem Kennbuchstaben N (normalzähe Güte mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei -20°C) und NL (tieftemperaturzähe Güte mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei -50°C) bezeichnet. Solche Stähle können als Flachprodukt in Dicken bis über 200 mm angeboten werden.

- **Thermomechanisch gewalzte Stähle:** Unter dem thermomechanischen Walzen versteht man eine Kombination von thermischer und mechanischer Behandlung, die in einer Gefügestruktur resultiert, die durch eine thermische Behandlung allein nicht herstellbar ist. So wird hier u.U. auch auf Walzschritte unterhalb der Rekristallisationstemperatur zurückgegriffen, die in Zusammenarbeit mit der durch Mikrolegierungselemente bedingten Teilchenbildung in einer höchst feinen Gefügestruktur resultierten. Somit sind hohe Zähigkeiten und Festigkeiten möglich, ohne auf größere Legierungsanteile zurückgreifen zu müssen.

Wie Bild 1 andeutet, kennt das thermomechanische Walzen eine Vielfalt von Ausprägungen. Insbesondere für hochfeste Stahlgüten wird dabei auf ein folgendes beschleunigtes Abkühlen (ACC: Accelerated cooling) zur präzisen Einstellung der Eigenschaften zurückgegriffen. Je nach Stahlart und Abmessung kann diese Abkühlung noch von einem Anlassen gefolgt sein. Nach der Wahl der abschließenden Abkühlbedingungen besteht eine Vielzahl von unterschiedlichen Prozessvarianten, so dass es unmöglich ist, von dem TM-Walzen zu sprechen. Stellvertre-

tend sei hier das TM+QST-Verfahren genannt (Quenching and self tempering), das vor allem für gewalzte Träger angewendet wird. Dabei wird die Oberfläche schroff abgekühlt und in der Folge diese oberflächennahe Schicht durch die Resthitze im Trägerinneren „von selbst“ angelassen.

Thermomechanisch gewalzte Stähle für den Stahlbau sind in DIN EN 10 113-5 [3] bis Streckgrenzen von 460 MPa genormt und zur Zeit bis zu einer Dicke von 120 mm verfügbar. Sie werden mit den Kennbuchstaben M (normalzähe Güte mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei -20°C) und ML (tieftemperaturzähe Güte mit nachgewiesener Kerbschlagarbeit bei -50°C) bezeichnet.

Ferner soll nicht unerwähnt bleiben, dass im Offshore-Bereich schon Stähle bis zur einer Streckgrenze von 500 MPa in Dicken bis zu 80 mm eingesetzt werden.

- **Vergütete Stähle:** Nach dem konventionellen Warmwalzen findet ein Härten - d.h. eine relativ schroffe Abkühlung von Austenitisierungstemperatur - des Werkstoffes statt, welches von einem Anlassen gefolgt wird. Durch diese Sequenz bildet sich im Stahl im ersten Schritt eine Gefügestruktur mit sehr guten Festigkeitseigenschaften (Bainit und Martensit), die im zweiten Schritt, dem Anlassen, durch Entspannung und Umbildungen von Gefügebestandteilen in ihren Zähigkeitseigenschaften verbessert werden kann. Solche Stähle sind nach DIN EN 10137-2 [4] in Streckgrenzenklassen bis 960 MPa bei der dünnsten Erzeugnisdicke lieferbar, wobei drei Zähigkeitstypengruppen unterschieden werden: Q für eine nachgewiesene Kerbschlagarbeit von 50 J bei -20°C, QL für 50 J bei -40°C und QL1 für 50 J bei -60°C. Es sollte erwähnt werden, dass Stähle mit einer Streckgrenze von 890 MPa und höher heute hauptsächlich im Mobilkranbau eingesetzt werden und ihren Weg in den klassischen Stahlbau noch nicht gefunden haben. Im Kranbau werden aber schon Stähle mit einer Streckgrenze bis 1100 MPa eingesetzt.

Diese Ausführungen über die verwendeten Herstellungsrouten legen den Schluss nahe, dass es sich hier um drei strikt voneinander getrennte Prozessrouten handelt. Bild 1 aber deutet schon an, dass diese Verfahren quasi kontinuierlich ineinander übergehen - auf der einen Seite das Normalisierende Walzen in das Thermomechanische Walzen, auf der anderen Seite das Thermomechanische Walzen mit beschleunigter Endkühlung, das schrankenlos in ein Vergüten aus der Walzhitze, dem Direct Quenching (DC) übergeht. Der Zusammenhang zwischen Abkühlungsprozess eines TM-Stahles und den gebildeten Gefügebestandteilen eines Kohlenstoff-Mangan-Stahls ist in Bild 2 zusammengefasst. Abschließend sind die nach EN 10 113-2/3 und 10137-2 genormten Stahlgüten sowie die in diesen Normen festgelegten mechanischen Mindesteigenschaftswerte in Tabelle 1 aufgeführt. Neben anderen befinden sich diese Werkstoffnormen zurzeit in Überarbeitung und werden in Kürze als Teile 3, 4 und 6 einer neuen EN 10 025 herauskommen.

### 3 Verwendung im bauaufsichtlichen Bereich

Aus vielen stahlverarbeitenden Branchen sind heute die hochfesten vergüteten Stähle nicht mehr wegzudenken, so z.B. aus dem Kranbau. Sicherlich sind aber hochfeste Stähle in dem Bereich des deutschen Stahlbaus, der der Bauaufsicht unterliegt, heute noch eine Ausnahme. Vor allem bei größeren Stahlbauprojekten zeigt sich deutlich die Tendenz



**Tabelle 1. Hochfeste Stähle und ihre Eigenschaften (Flachprodukte)**

Tab. 1. High-strength steels and their properties (flat products)

Kurzname	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> [MPa] für Nenndicken in [mm]			Obere Streckgrenze R <sub>eH</sub> [MPa] für Nenndicken in [mm]						Mindestwert Kerbschlagarbeit [J] an Längsproben		
	≤ 50	> 50; ≤ 100	> 100; ≤ 150	≤ 16	> 16; ≤ 40	> 40; ≤ 50	> 50; ≤ 63	> 63; ≤ 80	> 80; ≤ 100	> 100; ≤ 150	Prüftemperatur [°C]	Kerbschlagarbeit [J]
<b>DIN EN 10 113-2: Normalisierte Feinkornbaustähle</b>												
S420N	520 - 680		500 - 650	420	400	390	370	360	340		-20	40
S420NL	520 - 680		500 - 650	420	400	390	370	360	340		-50	27
S460N	550 - 720		520 - 690 <sup>1</sup>	460	440	430	410	400	380 <sup>1</sup>		-20	40
S460NL	550 - 720		520 - 690 <sup>1</sup>	460	440	430	410	400	380 <sup>1</sup>		-50	27
<b>DIN EN 10113-3: Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle<sup>2</sup></b>												
S420M	500 - 660		460-620 <sup>2</sup>	420	400	390	380 <sup>2</sup>	370 <sup>2</sup>	365 <sup>2</sup>		-20	40
S420ML	>63 ≤ 80; 480-640; >80 ≤ 100; 470-630		460-620 <sup>2</sup>	420	400	390	380 <sup>2</sup>	370 <sup>2</sup>	365 <sup>2</sup>		-50	27
S460M	530 - 720		490-660 <sup>2</sup>	460	440	430	410 <sup>2</sup>	400 <sup>2</sup>	385 <sup>2</sup>		-20	40
S460ML	>63 ≤ 80; 510-690; >80 ≤ 100; 500-680		490-660 <sup>2</sup>	460	440	430	410 <sup>2</sup>	400 <sup>2</sup>	385 <sup>2</sup>		-50	27
<b>DIN EN 10 137-2: Vergütete Feinkornbaustähle</b>												
S460Q	550 - 720		500 - 670	460		440		400			-20	30
S460QL	550 - 720		500 - 670	460		440		400			-40	30
S460QL1	550 - 720		500 - 670	460		440		400			-60	30
S500Q	590 - 770		540 - 720	500		480		440			-20	30
S500QL	590 - 770		540 - 720	500		480		440			-40	30
S500QL1	590 - 770		540 - 720	500		480		440			-60	30
S550Q	640 - 820		590 - 770	550		530		490			-20	30
S550QL	640 - 820		590 - 770	550		530		490			-40	30
S550QL1	640 - 820		590 - 770	550		530		490			-60	30
S620Q	700 - 890		650 - 830	620		580		560			-20	30
S620QL	700 - 890		650 - 830	620		580		560			-40	30
S620QL1	700 - 890		650 - 830	620		580		560			-60	30
S690Q	770 - 940		760 - 930	690		650		630			-20	30
S690QL	770 - 940		760 - 930	690		650		630			-40	30
S690QL1	770 - 940		760 - 930	690		650		630			-60	30
S890Q	940 - 1100		880 - 1100	890		830		-			-20	30
S890QL	940 - 1100		880 - 1100	890		830		-			-40	30
S890QL1	940 - 1100		880 - 1100	890		830		-			-60	30
S960Q	980 - 1150		-	960		-		-			-20	30
S960QL	980 - 1150		-	960		-		-			-40	30

1 nach Stahl-Eisenwerkstoffblatt SEW 081  
 2 TM-Stähle als Flachprodukt zurzeit nur bis 63 mm definiert. Darüber hinausgehende Werte bis 120 mm nach Normentwurf pr EN 10 025-4 bzw. Werksstandards

zur immer stärkeren Verwendung dieser Werkstoffe. Deshalb wird hier kurz erläutert, unter welchen Bedingungen diese Stähle eingesetzt werden können.

Durch die Anpassungsrichtlinie vom Dezember 2001 [5] zur DIN 18 800 können sowohl die normalisierten Feinkornbaustähle S460N und S460NL sowie die thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustähle S460M und S460ML verwendet werden (Element (401)). Dabei sind charakteristische Bemessungswerte bis zu einer Erzeugnisdicke von jeweils 80 mm angegeben. Nach Element (405) sind prinzipiell für alle aufgeführten Stahlsorten größere Erzeugnisdicken einsetzbar, wenn diese Dicken noch in den jeweiligen Technischen Lieferbedingungen erfasst sind. Somit ist die Verwendung von S460NL in Dicken bis 100 mm prinzipiell noch durch die Anpassungsrichtlinie abgedeckt und als charakteristische Bemessungswerte die entsprechenden Werte der Liefernorm DIN EN 10 113-2 zu verwenden.

Dagegen sind TM-Stähle in der Liefernorm als Flachprodukt zurzeit nur bis 63 mm Erzeugnisdicke beschrieben, so dass im produktionstechnisch ebenso möglichen Bereich von 80 bis 120 mm eine Verwendung nur mit einer Zustimmung im Einzelfall möglich ist. Ausgeführte Beispiele belegen aber die guten Erfahrungen

mit diesem Material auch in diesen Dicken. Ferner wird die Überarbeitung dieser Liefernorm, die dann Blechdicken bis 120 mm beschreibt, erwartet.

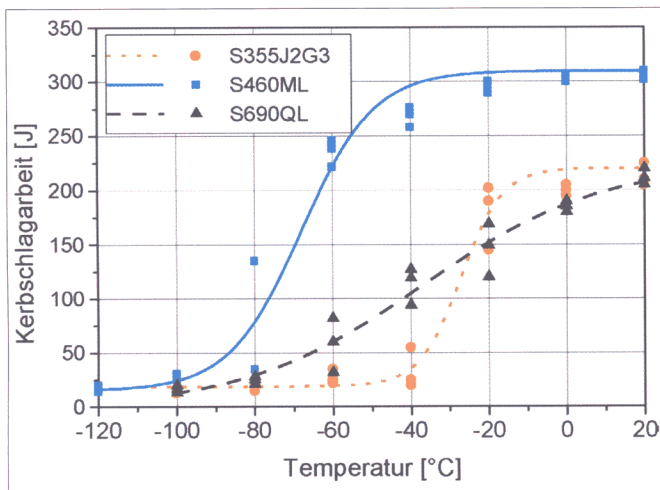
In [5] ist ferner geregelt, bis zu welcher Erzeugnisdicke eine bestimmte Güte eingesetzt werden kann. Dazu wird aus den Kriterien Spannungszustand, Bedeutung des Bauteils, Beanspruchungsart und Einsatztemperatur entsprechend DAST-Richtlinie 009 [6] eine Klassifizierungsstufe ermittelt, in Abhängigkeit derer die standardmäßige maximale Einsatzdicke einer Stahlgüte ermittelt wird.

Im Bereich der vergüteten Stähle ist der Stahl S690QL1 als Flachprodukt im Allgemeinen bis zu einer Erzeugnisdicke von 50 mm durch die Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-30-1-1 [7] zugelassen. Diese Zulassung regelt neben Aspekten, die bei der Verarbeitung zu berücksichtigen sind, auch die charakteristischen Bemessungswerte unter statischer und dynamischer Last dieses Stahles. Über 50 mm hinausgehende Erzeugnisdicken können bei Vorliegen einer

**Tabelle 2. Bemessungswerte und Verwendungsvoraussetzung hochfester Stähle im Stahlbau**

Tab. 2. Calculation values and application conditions of high-strength steel in German constructional steelwork

Stahlgüte	Erzeugnisdicke t [mm]	Streckgrenze f <sub>yk</sub> [MPa]	Zugfestigkeit f <sub>tk</sub> [MPa]	E-Modul E [MPa]	G-Modul G [MPa]	Temperaturdehnzahl α <sub>t</sub> [K <sup>-1</sup> ]	Basis
S460N/NL	t ≤ 40	460	550	210000	81000	12·10 <sup>-6</sup>	Anpassungsrichtlinie Stahlbau Dez. 2001
	40 < t ≤ 80	430					
	80 < t ≤ 100	400					
	t > 100	festzulegen					Zustimmung im Einzelfall
S460M/ML	t ≤ 40	460	530	210000	81000	12·10 <sup>-6</sup>	Anpassungsrichtlinie Stahlbau Dez. 2001
	40 < t ≤ 80	430					
	80 < t ≤ 120						
		festzulegen					Zustimmung im Einzelfall
S690QL1	3 < t ≤ 50	690	790	210000	81000	12·10 <sup>-6</sup>	Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1.1
	t > 50			festzulegen			Zustimmung im Einzelfall



**Bild 3.** Kerbschlagarbeit-Temperatur-Übergangskurven für verschiedene hochfeste Stähle  
 Fig. 3. Charpy-V Impact-Temperature Transition curves for various high-strength steels

schaftsprofil des Stahls im engen Zusammenhang zu der chemischen Zusammensetzung des Stahls. Diese beiden Kenngrößen üben aber einen entscheidenden Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften des Stahls aus, die wiederum die Wirtschaftlichkeit einer Stahlkonstruktion stark beeinflussen.

So fassen die Tabellen 1 in [10] und 3 typische chemische Zusammensetzungen von hochfesten Stählen zusammen und vergleichen sie mit einem konventionellen S355J2G3.

Bei dem Vergleich von Werkstoff S460 in normalisierten (N), thermomechanisch gewalzten (M) oder vergüteten (Q) Lieferzustand zeigen sich starke Unterschiede im Legierungsgehalt. So ist das resultierende Kohlenstoffäquivalent, ob als CE (IIW) oder als CET-Äquivalent, für die TM-Stähle wesentlich niedriger als für vergütete oder gar normalisierte Stähle der gleichen Streckgrenzenklasse.

**Bild 3**, welches Kerbschlagarbeit-Temperatur-Übergangskurven für einige hochfeste Stähle und den konventionellen S355J2G3 darstellt, demonstriert zugleich, dass die TM-Stähle auch über ein gewaltiges Zähigkeitsniveau verfügen.

Mit diesen grundlegenden Betrachtungen lassen sich die folgenden kurzen Charakteristika bezüglich der wichtigsten Verarbeitungseigenschaften angeben. Diese Ausführungen können natürlich nicht allumfassend sein. Deshalb sollte auf jeden Fall Stahl-Eisen-Werkstoffblatt SEW 088 [8], welches umfassende Handreichungen zum Verarbeiten von Feinkornbaustählen gibt oder die entsprechenden Materialdatenblätter der Lieferwerke berücksichtigt werden.

**Schweißen:**  
 Betrachtet man Stähle in einer Streckgrenzenklasse bis S460, so wird aus **Tabelle 3** klar, dass in der

**Tabelle 3.** Vergleich der chemischen Zusammensetzung einiger vergüteten hochfesten Stähle mit dem konventionellen S355J2G3  
 Tab. 3. Comparison of the chemical composition of various quenched and tempered high-strength steels compared to a conventional S355J2G3

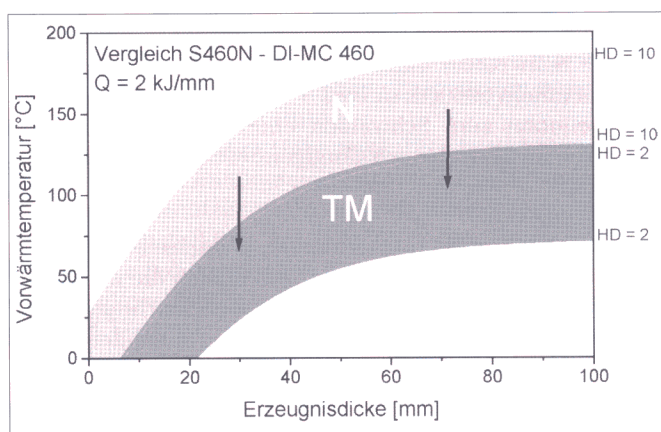
	S355J2G3		S 460 QL1		S 690 QL1	
	nach DIN EN 10025	typ. Analyse	nach DIN EN 10 137-2	typ. Analyse	nach DIN EN 10 137-2	typ. Analyse
C	≤ 0,22	0,17	≤ 0,20	0,15	≤ 0,20	0,16
Si	≤ 0,55	0,45	≤ 0,80	0,45	≤ 0,80	0,30
Mn	≤ 1,60	1,50	≤ 1,70	1,50	≤ 1,70	1,45
P	≤ 0,035	0,018	≤ 0,02	0,012	≤ 0,02	0,012
S	≤ 0,035	0,015	≤ 0,01	0,005	≤ 0,01	0,005
Nb	-	-	≤ 0,6	0,017	≤ 0,6	-
V	-	-	≤ 0,12	-	≤ 0,12	0,04
Mo	-	-	≤ 0,07	0,115	≤ 0,07	0,37
Ni	-	-	≤ 2,00	-	≤ 2,00	0,15
Cr	-	-	≤ 1,50	-	≤ 1,50	0,55
B	-	-	≤ 0,005	-	≤ 0,005	0,002
CE		0,42		0,42		0,60
Pcm		0,26		0,25		0,31
CET		0,32		0,31		0,38
T						

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

Zustimmung im Einzelfall im geregelten Bereich eingesetzt werden.  
 Zusammenfassend sind die im bauaufsichtlich überwachten Bereich verwendbaren Stahlgüten sowie ihre charakteristischen Bemessungswerte in **Tabelle 2** zusammengefasst.  
 Zum Abschluss darf ein Ausblick auf das kommende europäische Konstruktionsregelwerk Eurocode nicht fehlen. Im den Stahlbau betreffenden Teil EC 3 sind alle Stahlgüten, d.h. ob normalisiert, thermomechanisch gewalzt oder vergütet, in der Streckgrenzenklassen bis S460 erfasst. Ferner überprüft zurzeit eine Arbeitsgruppe innerhalb des CEN, ob und unter welchen Bedingungen eine Aufnahme von Stählen bis zur Streckgrenzenklasse S690 möglich ist.

**4 Eigenschaften und Verarbeitung**

Wie oben ausführlich erläutert, steht die für eine Stahlgüte gewählte Herstellungsrouten bei einem geforderten Eigen-



**Bild 4.** Vergleich der Vorwärmtemperatur eines S460N und eines S460M (DI-MC 460) für verschiedene Wasserstoffeinbringungen HD  
 Fig. 4. Comparison of the preheating temperature for an S460N and an S460M (DI-MC 460) for different hydrogen contents in the consumables HD

Regel die thermomechanisch gewalzten Güte M auf Grund ihres sehr niedrigen Legierungsgehalts in der Schweißbeignung den normalisierten Stählen bei weitem überlegen sind. Dies äußert sich in niedrigen Vorwärmtemperaturen, wie in Bild 4 gezeigt, (oft kann bei einem Stahl S460M sogar ganz auf das Vorwärmen verzichtet werden), hohen möglichen Streckenergien und damit einer großen Wirtschaftlichkeit, sowie hohen Zähigkeiten und damit auch Bauteilsicherheiten nach dem Schweißen. Ausführlich beschäftigten sich [9, 10] mit diesen Vorteilen thermomechanisch gewalzter Stähle.

Bei der Streckgrenzenstufe S460 liegen die vergüteten Stähle hinsichtlich Kohlenstoffäquivalent zwischen den TM-gewalzten und den normalisierten Stählen und nehmen auch eine entsprechende Mittelposition hinsichtlich der schweißtechnischen Verarbeitbarkeit ein.

Mit höher werdender Streckgrenze ist bei der schweißtechnischen Verarbeitung, d.h. der Wahl solcher Parameter wie Wärmeeinbringung oder Vorwärmtemperatur, eine wachsende Aufmerksamkeit notwendig. Insbesondere sollte ein Wasserstoffeintrag durch Zusatzwerkstoff oder Umgebungsbedingungen auf Grund der Gefahr der Kaltrissbildung so weit wie möglich verhindert werden bzw. eine Wasserstoffeffusion durch eine ausreichende Vorwärmtemperatur ermöglicht werden. Die gewählte Vorwärmtemperatur hängt nach [8] neben der Wasserstoffeinbringung auch von der Wärmeeinbringung und dem Kohlenstoffäquivalent ab. Neben dieser Vorwärmung wird das optimale Arbeitsfeld für diese hochfesten Güten von den folgenden Größen beeinflusst:

- Einer maximaler Abkühlzeit, die minimal geforderte Zähigkeiten und Festigkeiten sicherstellt
- Einer minimalen Abkühlzeit, die eine maximal zulässige Aufhärtung der Wärmeeinflusszone garantiert.

Dabei wird als Abkühlzeit in der Regel die Abkühlzeit im Temperaturbereich zwischen 800°C und 500°C verstanden. Es ist klar, dass so mit wachsender Streckgrenze das Arbeitsfeld des Schweißers immer enger wird. Dies ist exemplarisch an einem S960QL in Bild 5 verdeutlicht. Umfassende Informationen zum Schweißen eines im bauaufsichtlich überwachten Bereich noch gängigen S690Q findet man in [7] oder [11].

#### Umformen:

Bei einer Kaltumformung nehmen mit wachsender Streckgrenze der hochfesten Stähle natürlich auch die notwendigen Umformkräfte zu. Ferner ist zu berücksichtigen, dass auf Grund des sich mit der Streckgrenze erhöhenden elastischen Dehnungsanteils auch die Rückfederung nach erfolgter Umformung zunimmt.

Die notwendigen Umformkräfte können durch eine höhere Umformtemperatur verringert werden. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass durch ein klassisches Warmumformen die bei der Herstellung eingebrachte Gefügestruktur zerstört wird. Für thermomechanisch gewalzte Stähle ist des-

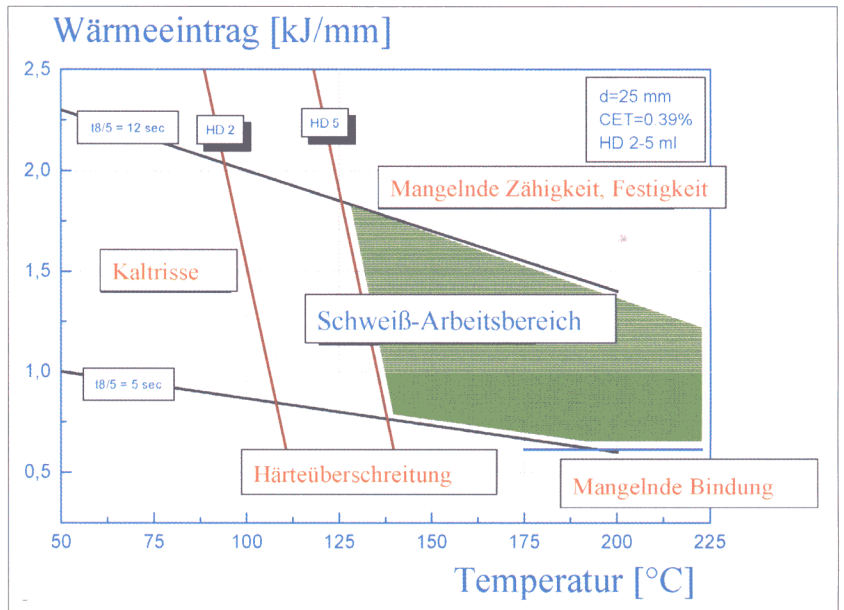


Bild 5. Schweiß-Arbeitsfeld für einen S960Q  
Fig. 5. Welding working range for an S960Q

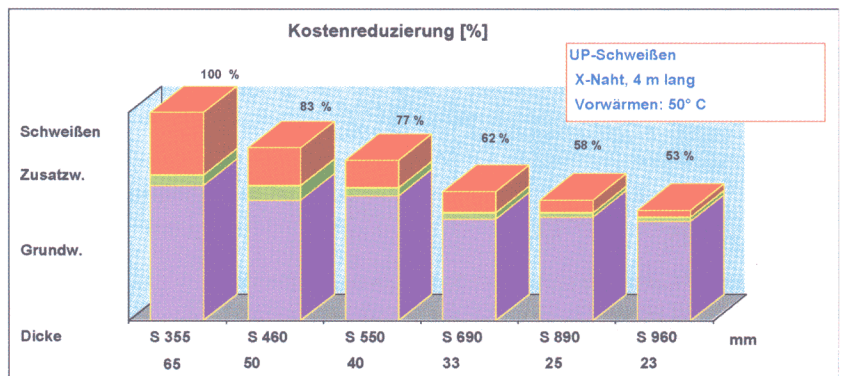


Bild 6. Reduzierte Schweißkosten durch hochfeste Stähle  
Fig. 6. Reduced welding costs induced by high-strength steel

halb maximal ein Halbwarmumformen bis etwa 580 °C zulässig. Die normalisierten und vergüteten Feinkornbaustähle können dagegen prinzipiell bei höheren Temperaturen umgeformt werden; jedoch ist in diesem Fall eine erneute Wärmebehandlung nach der Warmumformung notwendig.

#### Flammrichten:

Die mit der Markteinführung der hochfesten Feinkornbaustähle durchgeführten systematischen Untersuchungen zum Flammrichtverhalten dieser Stähle haben gezeigt, dass ein Flammrichten mit durchgreifender Erwärmung bis zu einer Temperatur von 700°C möglich ist. Beschränkt sich dagegen die Wärmeeinbringung auf den oberflächennahen Bereich wie beim Flammrichten mit Wärmebahnen, so sind sogar Temperaturen bis 900°C zulässig [12].

## 5 Anwendungsbeispiele

Der Weg zur Verwendung von hochfesten Stählen ist klar durch den Zwang zum effizienten und ressourcenschonenden Einsatz von Konstruktionsmaterialien vorgegeben. Durch die höhere Belastbarkeit können statische Querschnitte reduziert werden (Bild 4 in [10]). Dadurch muss mengenmäßig weniger Material eingesetzt werden. Dass dadurch vorhandene Ressourcen der Natur effizienter ein-



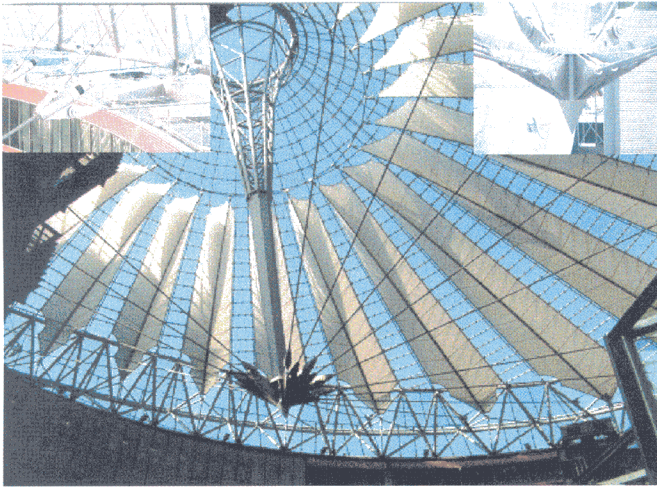


Bild 7. Forumüberdachung des Sony-Center  
Fig. 7. Forum roof of the Sony-Center, Berlin



Bild 9. Pylone der neuen Autobahnbrücke Düsseldorf  
Fig. 9. Pylons of the new highway bridge Düsseldorf-airport

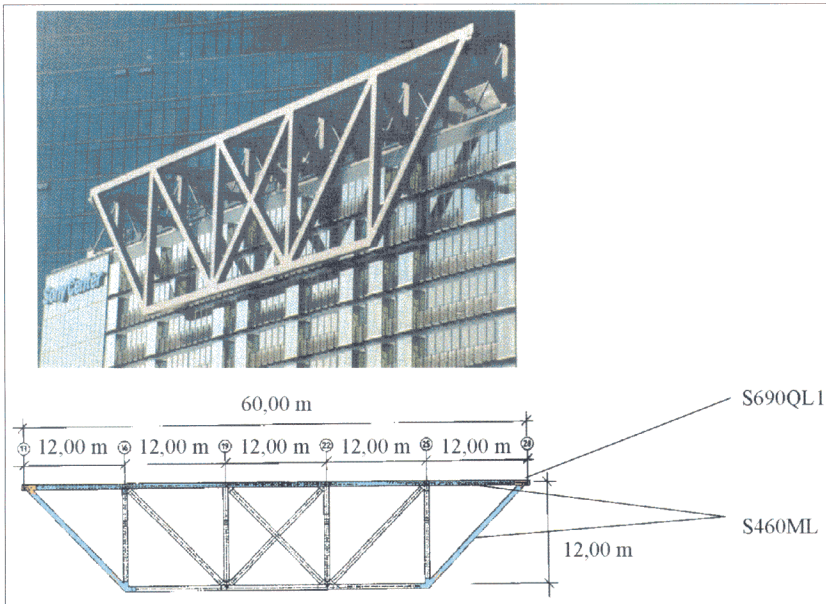


Bild 8. Esplanade-Résidence des Sony-Center  
Fig. 8. Esplanade-Résidence of the Sony-Center

gesetzt wird, ist sicherlich von großer makroökonomischer Bedeutung. Für den stahlverarbeitenden Betrieb ist es eher wichtig, dass sich dadurch auch die zu verarbeitenden Massen und bei Schweißkonstruktionen insbesondere der Aufwand für die Schweißungen wesentlich verringern. Bild 6 gibt einen Hinweis auf Einsparungspotenziale bei der Schweißung eines Stumpfstoßes aus verschiedenen hochfesten Stählen.

Es ist evident, dass die Massenreduzierungen, die durch hochfeste Stähle ermöglicht werden, natürlich bei bewegten Konstruktionen eine ganz besondere Bedeutung einnehmen, da diese dort mit verringerten Antriebskosten einher gehen.

Die Möglichkeit der Massereduzierung ist aber nicht nur rein wirtschaftlicher Natur. Im Stahlbau werden so besonders grazile und ästhetische Konstruktionen möglich, die sich behutsam in die Landschaft oder die vorhandene Architektur einbetten und höchste architektonische Anforderungen erfüllen.

Diese Ansprüche an hohe Anforderungen an die architektonische Gestaltung demonstriert in vortrefflicher Weise das

Sony-Center am Postdamer Platz in Berlins neuer Mitte. In diesem Gebäudekomplex wurde an zwei Stellen hochfester Konstruktionsstahl eingesetzt.

So setzt sich die Dachkonstruktion (Bild 7) des Forums mit Ringbalken und Luftstütze aus insgesamt 700 t Stahl, 3 500 m<sup>2</sup> Glasfläche, 100 t Seilen und Gewebekonstruktion zusammen. Das Dach ist wie ein Regenschirm zwischen der in der Mitte befindlichen Luftstütze und dem außen liegenden Ringbalken, der auf Auflagern auf den umstehenden Gebäuden ruht, gespannt. Auf Grund der hohen Pressung in den Lochquerschnitten wurden alle sogenannten „Augstäbe“, das heißt die Laschen für den Ringbalken, aus dem hochfesten Feinkornbaustahl S690QL1 in Dicken von 90 mm und 100 mm gefertigt.

Auch für weitere Laschen, wie für die Seilspreizungsknoten und Seilverankerungsknoten, kam dieser Werkstoff zum Einsatz, hier sogar in Dicken bis 180 mm.

Des Weiteren wurde hochfester Stahl auch für eine andere architektonische Meisterleistung eingesetzt: Die *Esplanade-Résidence* mit 134 Luxuswohnungen auf sieben Geschossen hängt an einer Brückenkonstruktion von 60 m Spannweite über der Fassade des ehemaligen, im zweiten Weltkrieg fast vollständig zerstörten Grandhotels Esplanade, dessen erhalten gebliebene Reste in den neuen Komplex integriert wurden (Bild 8).

Dazu wurden in 40 m Höhe zwei 272 t bzw. 179 t schwere Stahlfachwerke millimetergenau auf vier seitliche Stützpfiler (drei Stahlstützen und eine Verbundstütze) gehoben.

Bei der Konstruktion der Hauptfachwerkträger sowie der sechs jeweils 5,00 m hohen Querfachwerke der imposanten Brückenkonstruktion wurden Obergurt und Diagonalen in S460ML bis 110 mm Dicke ausgeführt. Die oberen und unteren Randknoten wurden als Lamellenpakete aus S690QL1 in Dicken von 100 mm gefertigt.

Auch im Brückenbau haben hochfeste Grobblechwerkstoffe inzwischen eine wichtige Rolle eingenommen. Ein aktuelles Beispiel stellt die neue Autobahnbrücke im Norden Düsseldorfs dar [15]. Die Pylone dieser Schrägseilbrücke mussten wegen der Lage in der An- und Abflugschneise des nahen



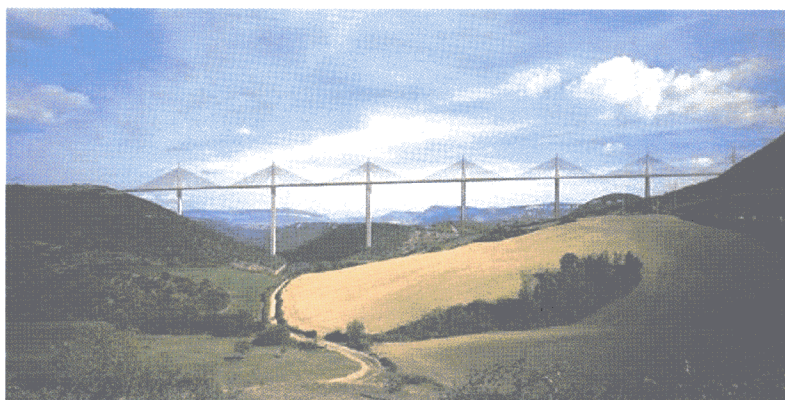


Bild 10. Animation der großen Talbrücke Millau (Quelle: OTUA)  
Fig. 10. Viaduct of Millau, France

Flughafens Düsseldorfs auf 34 m Höhe begrenzt werden (Bild 9), weshalb sie in Form eines auf den Kopf gestellten A's ausgeführt wurden. Dies war nur durch die Anwendung des thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustahles S460M/ML möglich, der in den Mittelschotten der Pylonköpfe sogar in Dicken von 100 mm eingesetzt wurde.

Gerade der Großbrückenbau kommt heute nicht mehr ohne die Verwendung von hochfesten Werkstoffen aus. So wird die Talbrücke Millau (Bild 10), eine über 2400 m lange Mehrfach-Schrägseilbrücke, die bis zum Jahr 2005 im Süden des französischen Massif Centrale errichtet wird, zu einem Großteil in hochfesten Stahlqualitäten ausgeführt werden. Von insgesamt für diese Brücke benötigten 42000 t Stahl werden rund 50 % als S460M/ML und S460QL in Dicken bis 200 mm verwendet werden, insbesondere große Teile des Decks sowie die Pylonköpfe.

Aber nicht nur der Großbrückenbau kann von hochfesten Werkstoffen profitieren. Auch in kurz- und mittelspannigen Verbundbrücken können diese Materialien profitabel eingesetzt werden. So zeigt Bild 11 die Stützenkonstruktion einer

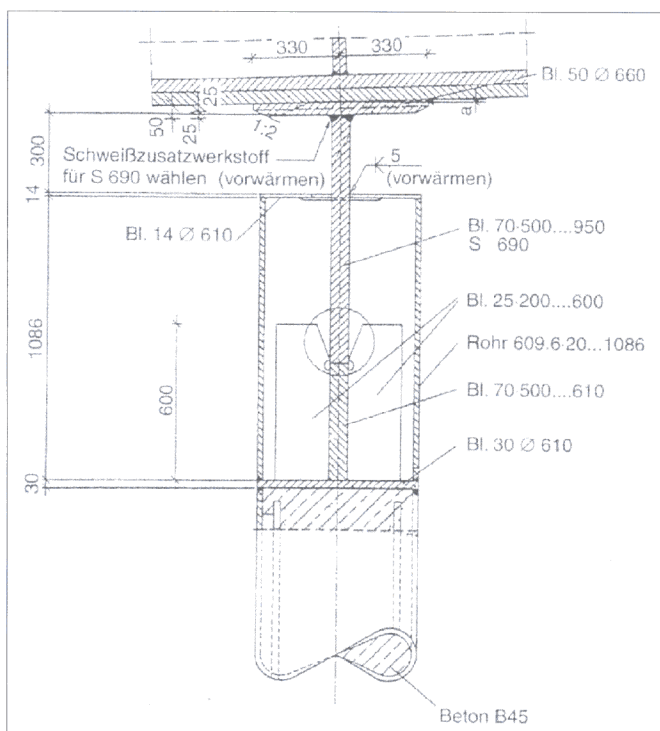


Bild 11. Stützen mit Übergang der Brücke GVZ Ingolstadt  
Fig. 11. Piles with transition to superstructure of the bridge GVZ Ingolstadt

Verbundbrücke über das Güterverladezentrum Ingolstadt. Der Übergang von den eigentlichen Stützen, betongefüllten Stahlrohren, zu den Stahlträgern des Überbaus werden durch 70 mm dicke Lamellen aus S690QL1 verwirklicht, die biegesteif mit den Trägern verschweißt sind. Diese stellt eine kostengünstige und wartungsarme Möglichkeit zur technischen Realisierung des Übergangs Überbau – Unterbau dar - zumal durch die transparente Konstruktion auch Belange der Architektur sowie der Einbindung in die Landschaft erfüllt werden.

## 6 Zusammenfassung

Die obigen Beispiele haben gezeigt, dass sich mit hochfesten Feinkornbaustählen nicht nur Stahlbaulösungen mit besonders hohen Anforderungen an die architektonische Gestaltung realisieren lassen. Diese Werkstoffe bieten vielmehr auch an, Konstruktionen so zu planen, dass Fertigungskosten eingespart werden - insbesondere in Ländern mit hohen Lohnkosten ein unverzichtbarer Ansatz zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit. Deshalb verwundert es nicht, dass sich die hochfesten Feinkornbaustähle immer weiter im Stahlbau durchsetzen.

### Literatur

- [1] Berg, P.: Kurt Klöppel – Sein Bild von der Brücke, Stahlbau 70 (2001) S. 591 – 611.
- [2] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 10 113-2. Warmgewalzte Erzeugnisse aus schweißgeeigneten Feinkornbaustählen, Teil 2: Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte Stähle. April 1993.
- [3] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 10 113-3. Warmgewalzte Erzeugnisse aus schweißgeeigneten Feinkornbaustählen, Teil 3: Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle. April 1993.
- [4] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 10 137-2. Blech und Breitflachstahl aus Baustählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten oder im ausscheidungsgehärteten Zustand, Teil 2: Lieferbedingungen für vergütete Stähle. September 1995.
- [5] Änderung und Ergänzung der Anpassungsrichtlinie Stahlbau – Ausgabe Dezember 2001, DIBt-Mitteilungen 33 (2002) Nr. 1
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DAST-Richtlinie 009, Empfehlungen zur Wahl der Stahlgüte für geschweißte Stahlbauten, April 1973
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1-1, Juni 1999.
- [8] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Stahl-Eisen-Werkstoffblatt SEW 088, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinien für die Verarbeitung besonders für das Schmelzschweißen. Düsseldorf: Verlag Stahl Eisen, Oktober 1993.
- [9] Hubo, R.; Hanus, F. E.: Verarbeitungseigenschaften thermomechanisch gewalzter Grobbleche, Hansa 129 (1992) S. 776–778.
- [10] Hubo, R.; Schröter, F.: Thermomechanisch gewalzte Stähle – Hochleistungsprodukte für einen effizienten Stahlbau, Bauingenieur 76, (2001) S. 459–463.
- [11] Hubo, R.; Schröter, F.: Stahlbau-Kalender 2001, Ernst & Sohn, Berlin, S. 545 – 590.
- [12] Hanus, F.: Flammrichten thermomechanisch gewalzter Baustähle, Schweißen und Schneiden 46 (1994) S. 163– 166.
- [13] Sedlacek, G.; Eisel, H.; Paschen, M.; Feldmann, M.: Untersuchungen zur Baubarkeit der Rheinbrücke A 44, Ilverich und zur Anwendung hochfester Stähle, Stahlbau 71 (2002) S. 423–428.