

Hochfeste Stähle erheben sich im Stahlbau zunehmender Beliebtheit, da damit neue ästhetische Gestaltungsmöglichkeiten erschlossen werden. Aber auch wegen der mit ihrem Einsatz verbundenen Effizienzsteigerung in der Fertigung nimmt ihre Anwendung kontinuierlich zu. Dieser Artikel stellt die Gebrauchseigenschaften der verschiedenen hochfesten Grobblechwerkstoffe vor. Die Vorteile der Anwendung von hochfesten Stählen wird abschließend an zahlreichen Beispielen erläutert.

## 1 Einleitung

Inner war es einer der wichtigen Vorzüge des Stahlbaus gewesen, besonders bewährte Lösungen anzubieten, die sich durch ihre schlanke Ästhetik einmal fügten in die sie umgebende Umwelt einblenden und das andere Mal durch ihre besondere filigrane Ausführung bestachen. Ein solcher Leichtbau erfordert jedoch Materialien, die in der Lage sind, durch eine entsprechend hohe Festigkeit eine gegenüber dem geometrischen Einflussfaktor entsprechend größeren Beitrag zur Beanspruchbarkeit anzubieten. Vor diesem Hintergrund entwickelten die Stahlhersteller Werkstoffe, die diese Belastungen ertragen - aber auch durch akzeptable Verarbeitungseigenschaften gekennzeichnet sind.

Dabei ist der Begriff "hochfester" Stahl sicher relativ zu sehen. Während einige Bereiche des Maschinenbaus, insbesondere die Mobilantriebsaggregate, Stähle mit einer Mindestbruchgrenze von 650 MPa schon als gängige Werkstoffe ansehen und dabei sind, den Bereich bis 1100 MPa Bruchgrenze zu erschließen, ist in dem Bereich des Stahlbaus, der im Rahmen der bauaufsichtlichen Überwachung DIN 18 500 unterliegt, ein Stahl mit einer Mindestbruchgrenze größer als 350 MPa als höherfester Stahl anzusehen. Der vorliegende Beitrag geht dabei auf die letztere Abgrenzung ein.

## 2 Arten von hochfesten Stahlorten

Stähle mit hohen Bruchgrenzen können durch verschiedene Herstellungsprozesse hergestellt werden. Die Herstellungsroute stellt natürlich in enger Abhängigkeit zu der chemischen Zusammensetzung des Stahles. Daraus resultieren auch unterschiedliche Verarbeitung- und Anwendungseigenschaften insbesondere in Hinblick auf die im Stahlbau dominierende Größe der Schweißnaht. Somit unterscheidet man:

- Normalbleche (oder normalisiert gewalzte Stähle): Streckgrenzenklassen bis S460N genannt nach DIN EN 10 113-2.
- Vergütete Stähle: Streckgrenzenklassen bis S690Q genannt nach DIN EN 10 137-2.
- Thermomechanisch gewalzte Stähle: Streckgrenzenklassen bis S460M genannt nach DIN EN 10 113-3.

Weitere Informationen zu den Herstellungsprozessen können [1] entnommen werden.

## 3 Verwendung im bauaufsichtlich überwachten Bereich

### 3.1 Einsatzbarkeit

Sicherlich sind hochfeste Stähle in dem Bereich des deutschen Stahlbaus, der Bauaufsicht unterliegt, heute noch eine Ausnahme. Vor allem bei größeren Stahlbauprojekten zeigt sich aber deutlich die Tendenz zur immer stärkeren Verwendung dieser Werkstoffe.

Durch die Anpassungsrichtlinie vom Dezember 2001 [2] zur DIN 18 500 können sowohl die normalisierten Feinkornbaustähle S460N und S460NL sowie die thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustähle S460M und S460ML verwendet werden (Ebenort (401)). Dabei sind charakteristische Bemessungswerte bis zu einer Erzeugnickdicke von jeweils 60 mm angegeben.

In [2] ist ferner geregelt, bis zu welcher Erzeugnickdicke eine bestimmte Güte eingesetzt werden kann. Dazu wird aus den Kriterien Spannungszustand, Bedeutung des Bauteils, Beanspruchungsort und Einsatztemperatur entsprechend DABT-Richtlinie 030 [3] eine Klassifizierungstafe ermittelt, in Abhängigkeit deren die standardmäßige maximale Erzeugnickdicke einer Stahlgüte ermittelt wird.

Im Bereich der vergüteten Stähle ist der Stahl S690QL1 als Flachprodukt im Allgemeinen bis zu einer Erzeugnickdicke von 50 mm durch die Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-30-1-1 [4] 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 Erzeugnickdicken können bei Vorliegen einer Zustimmung im Einzelfall im geneigten Bereich eingesetzt werden.

Zusammenfassend sind die im bauaufsichtlich überwachten Bereich verwendbaren Stahlgüten sowie ihre charakteristischen Bemessungswerte in Tabelle 1 zusammengestellt. Ein Ausblick auf das kommende europäische Konstruktionsregelwerk Eurocode soll nicht fehlen. In dem den Stahlbau betreffenden Teil EC 3 sind alle Stahlgüten, d.h. die normalblech, thermomechanisch gewalzt oder vergütet, in der Streckgrenzenklassen bis S460 erfasst. Ferner überprüft zuerst ein Arbeitsgruppe innerhalb des CEN, ob und unter welchen Bedingungen eine Aufnahme von Stählen bis zur Streckgrenzenklasse S690 möglich ist.

**Tabelle 1.** Übersicht der charakteristischen Bemessungswerte der im bautechnisch überwachten Bereich einsetzbaren höchsten Stähle

Stahlgüte	Erreignishöhe $h$ (mm)	Stoßgrenze $t_{st}$ (MPa)	Zugfestigkeit $f_{yk}$ (MPa)	E-Modul $E$ (MPa)	G-Modul $G$ (MPa)	Temperaturdehnkoeffizient $\alpha_t$ (K <sup>-1</sup> )	Bemerk.
S460NH	1 ≤ 40	460	550	210000	81000	12 · 10 <sup>-6</sup>	Anpassungsrichtlinie Stahlbau-Dez. 2001
	40 < 1 ≤ 80	430					
	80 < 1 ≤ 100	400					
	1 > 100	festzulegen					Zustimmung im Einzelfall
S460NL	1 ≤ 40	460	520	210000	81000	12 · 10 <sup>-6</sup>	Anpassungsrichtlinie Stahlbau-Dez. 2001
	40 < 1 ≤ 80	430					
	80 < 1 ≤ 120	festzulegen				Zustimmung im Einzelfall	
S690GL1	3 < 1 ≤ 50	590	760	210000	81000	12 · 10 <sup>-6</sup>	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-38.1-1
	1 > 50	festzulegen				Zustimmung im Einzelfall	

### 3.2 Schweißnahtberechnung

Nach [2] und [4] gelten für die Schweißnahtberechnung von nicht durchgeschweißten Kehlnähten und von nicht gepulsten Stumpfstoßen sowie durchgeschweißten Kehlnähten einschneidende Sicherheitsfaktoren, die in Tabelle 2 den Anweisungen des kommenden Eurocode gegenüber gestellt sind. Ferner ist in Laschenanschlüssen die maximale Nahtlänge auf 50t zu begrenzen. Diese einschneidende konstruktiven Regeln sind zuzett in Überprüfung.

**Tabelle 2.** Grenzschnelldruckspannungen nach DIN 18800 und Eurocode

	DIN 18800 mit Anpassungsrichtlinie und Zulassungen		EC 3, Teil 1-1	
	$\sigma_{s,d,1} = \sigma_{s,k} \cdot f_{s,d} \cdot \gamma_M$		$f_{s,d,1} = f_{s,k} (\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2})$	
	$\sigma_{s,d,1}$ (MPa)	$\sigma_{s,k}$	$f_{s,d,1}$ (MPa)	$\beta_w$
S235	203	0,85	209	0,8
S355	258	0,85	261	0,9
S460	291	0,60	263	1,0
S690	376	0,60	-	-

### 3.3 Ermüdungsnachweis

Der Ermüdungsnachweis für hochfeste Stähle wird nach [4,5] geführt. Es gilt zu beachten, dass sich der Einfluss von Schweißarbeiten dem prinzipiellen Ansatz der Ermüdungsfestigkeit mit der Stoßgrenze des Grundwerkstoffs so überlagert, dass die Bemessungswerte in der Regel denselben Ermüdungskategorie für hochfeste und normalfeste Stähle ansetzen. Da letztendlich erhaltene Ermüdungsfestigkeit hängt aber stark von der Ausführungsqualität des Schweißdetails ab, so dass die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Verbindungen aus hochfesten Stählen durch Nachbehandlungsmethoden wie Schließen, Här-

nern oder WIG-Umschmelzen teilweise signifikant verbessert werden kann.

### 4 Eigenschaften und Verarbeitung

Die für eine Stahlgüte gewählte Herstellungsroute bei einem geforderten Eigenschaftsprofil des Stahls steht im engen Zusammenhang zu der chemischen Zusammensetzung des Stahls. Diese beiden Kenngrößen aber üben einen entscheidenden Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften des Stahls aus, die wiederum die Wirtschaftlichkeit einer Stahlkonstruktion stark beeinflussen.

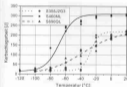
So lässt Tabelle 3 typische chemische Zusammen-

setzungen von höchsten Stählen zusammen und vergleicht sie mit einem konventionellen S355J2G3.

Bei dem Vergleich von Werkstoff S460 im normalisierten (N), thermomechanisch gewaltem (M) oder vergüteten (Q) Lieferzustand zeigen sich starke Unterschiede im Legierungsgehalt. So ist das resultierende Kohlenstoffäquivalent, ob als CE (RW) oder als CET-Äquivalent, für die TM-Stähle wesentlich niedriger als für vergütete oder gar normalisierte Stähle der gleichen Streckgrenzenklasse S671, welche Ketschlegierbet Temperatur Übergangskurven für einige hochfeste Stähle und den konventionellen S355J2G3 darstellt, demonstriert zugleich, dass die TM-Stähle auch über ein gewisses Zähigkeitsniveau verfügen.

**Tabelle 1.** Chemische Zusammensetzung hochfester FX-Bauschläge nach Norm und in typischer Analyse bei 50 mm Erzeugnisdicke

	S355J2G3		S460ML		S460ML		S 460 QL1		S 460 QL1	
	Norm	typ. Ana.	Norm	typ. Ana.	Norm	typ. Ana.	Norm	typ. Ana.	Norm	typ. Ana.
C	≤ 0,22	0,17	≤ 0,20	0,17	≤ 0,16	0,08	≤ 0,20	0,15	≤ 0,20	0,16
Si	≤ 0,55	0,45	≤ 0,60	0,45	≤ 0,60	0,46	≤ 0,60	0,45	≤ 0,60	0,30
Mn	≤ 1,60	1,50	≤ 1,70	1,65	≤ 1,70	1,65	≤ 1,70	1,50	≤ 1,70	1,45
P	≤ 0,035	0,018	≤ 0,030	0,012	≤ 0,030	0,011	≤ 0,02	0,012	≤ 0,02	0,012
S	≤ 0,035	0,015	≤ 0,025	0,005	≤ 0,025	0,002	≤ 0,01	0,005	≤ 0,01	0,005
Nb	-	-	≤ 0,05	-	≤ 0,05	≤ 0,04	≤ 0,06	0,017	≤ 0,06	-
V	-	-	≤ 0,20	0,17	≤ 0,12	-	≤ 0,12	-	≤ 0,12	0,04
Mo	-	-	≤ 0,19	-	≤ 0,20	-	≤ 0,07	0,115	≤ 0,07	0,37
Ni	-	-	≤ 0,80	0,23	≤ 0,45	0,19	≤ 2,00	-	≤ 2,00	0,15
Cr	-	-	≤ 0,30	-	≤ 0,60	-	≤ 1,50	-	≤ 1,50	0,55
Cu	≤ 0,035	-	≤ 0,70	-	≤ 0,60	0,17	≤ 1,50	-	≤ 0,50	-
B	-	-	-	-	-	-	≤ 0,005	-	≤ 0,005	0,032
CE		0,42		0,50		0,39		0,42		0,60
Pcm		0,26		0,28		0,19		0,25		0,31
CET		0,32		0,34		0,28		0,31		0,38

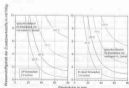


**Bild 1.** Karbschlagarbeit-Temperatur-Übergangskurven

Diese Unterschiede wirken sich selbstverständlich auf die Verarbeitungseigenschaften aus, wie kurz am Punkt Schweißen beschrieben wird. Allgemeine Informationen zum Verarbeiten der Feinkornbauschläge gibt SCIvH 686 [8]. Bei Stählen in einer Streckgrenzenklasse bis S460 sind in der Regel die thermomechanisch gewählten Güte auf Grund ihres sehr niedrigen Legierungsgehalts in der Schweißnaht der normalisierten Stähle bei weitem überlegen sind. Dies äußert sich in niedrigen Vorwärmtemperaturen, hohen möglichen Streckenerfolgen und damit einer großen Wirtschaftlichkeit, sowie hohen Zähigkeiten und damit auch Bruchrisikofaktoren nach dem Schweißen, siehe Bild 2 [7]. Mit höher werdender Streckgrenze ist bei der schweißtechnischen Verarbeitung, d.h. der Wahl solcher Parameter wie Wärmebringung oder Vorwärmtemperatur, eine wach-

sende Aufmerksamkeit notwendig, insbesondere sollte ein Wasserstoffeintrag durch Zusatzwerkstoff oder Umgebungsbedingungen auf Grund der Gefahr der Kaltbrüchigkeit so weit wie möglich verhindert werden bzw. eine Wasserstoffdiffusion durch eine ausreichende Vorwärmtemperatur ermöglicht werden. Die gewählte Vorwärmtemperatur hängt neben der Wärmebringung auch von der Wärmebringung, der Blechdicke 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 Wärmebeeinfluszone garantiert.



**Bild 2.** Empfohlene Vorwärmtemperaturen eines S460ML

Dabei wird als Abschicht in der Regel die Abschicht im Temperaturbereich zwischen 800°C und 900°C verwendet. Es ist klar, dass so mit wachsender Streckgrenze das Arbeitsfeld des Schweißens immer enger wird. Dies ist exemplarisch an einem S960GL in Bild 3 verdeutlicht. Danach folgt auch das Schweißbedingungen mit extrem kurzen Abschitzzeiten (z.B. Hafterschweißungen oder Montagehilfeschweißungen) unter entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen wie Verdünnen durchzuführen sind. Feuchtigkeit sollte so gut wie möglich von der Schweißstelle ferngehalten werden, was auch für indirekte Feuchtigkeit wie z.B. Kondensat auf kalten Oberflächen gilt.

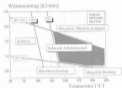


Bild 3. Arbeitsbereich beim Schweißen eines S960GL

Flammrichten der hochfesten Stähle ist möglich, siehe [4]. Ein Wärmehärten der TM-gewalzten Stähle ist nicht möglich, da sich in diesem Fall die feine Gefügestruktur dieses Stahles irreversibel auflöst und nicht durch eine folgende Wärmebehandlung wieder eingestellt werden kann. Bei den normalisierten und vergüteten Stählen ist dies jedoch möglich.

### 5. Anwendungsbeispiele

Durch die höhere Belastbarkeit können statische Querschnitte bei Verwendung hochfester Stähle reduziert werden. 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 - im klassischen Stahlbau kann dadurch aber auch eine Reduzierung der Fertigungs- und Montagekosten erreicht werden, was insbesondere bei Stumpfströßen zum Tragen kommt.

Im Folgenden seien einige prominente Beispiele zur Verwendung von hochfesten Stählen im Stahlbau gegeben. Beim Sony-Center in Berlin setzt sich die Dachkonstruktion mit Ringtrajekt und Luftstütze aus insgesamt 700t Stahl, 3500 m<sup>2</sup> Glasfläche, 100t Seilen und Gewebebahnen zusammen, Bild 4. 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 die sogenannten "Augeblöcke", das heißt die Laichen für den Ringbalken,

aus dem hochfesten Feinkornbaustahl S960GL1 in Dicken von 80 mm und 100 mm gefertigt. Auch für weitere Laichen, wie für die Seilspannvorrichtungen und Seilverankerungsknoten, kam dieser Werkstoff zum Einsatz, hier sogar in Dicken bis 180 mm.

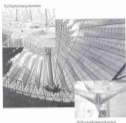


Bild 4. Fourn-Dachkonstruktion des Sony-Centers Berlin

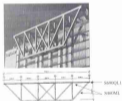


Bild 5. Explorado-Residence des Sony-Centers

Das Weiteren wurde hochfester Stahl auch für eine andere architektonische Meisterleistung eingesetzt: Die **Explorado-Residence** mit 104 Luxuswohnungen auf sieben Geschossen hängt an einer Brückenkonstruktion von 80 m Spannweite über der Fassade des ehemaligen, im zweiten Weltkrieg fast vollständig zerstörten Grandhotels Explorado, dessen erhalten gebliebene Reste in dem neuen Komplex integriert wurden, Bild 5.

Dazu wurden in 40 m Höhe zwei 272 t bzw. 170 t schwere Stahlfachwerke nebeneinander auf vier seitliche Stützpfiler (zwei Stahlstützen und eine Verbundstütze) gehoben. Bei der Konstruktion der Hauptstützenbinder sowie der sechs jeweils 5,00 m hohen Querfachwerke der imposanten Brückenkonstruktion wurden Obergurte und Diagonale in

S460ML, bis 110 mm Dicke ausgeführt. Die oberen und unteren Randkanten wurden als Lasteinleitzpunkte aus S460QL1 in Dicken von 100 mm gefertigt.

Auch im Brückenbau haben hochfeste Großblechwerkstoffe inzwischen eine wichtige Rolle eingenommen. Ein aktuelles Beispiel stellt die neue Autobahnbrücke im Norden Düsseldorf dar. Die Pylone dieser Schrägseilbrücke mussten wegen der Lage in den An- und Abflugschneise des nahen Flughafens Düsseldorf auf 34 m Höhe begrenzt werden, weshalb sie in Form eines auf den Kopf gestellten A's ausgeführt wurden. Dies war nur durch die Anwendung des thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustahls S460WML möglich, der in den Mittelschotten der Pylonköpfe sogar in Dicken von 100 mm eingesetzt wurde.

Genade der Großbrückenbau kommt heute gar nicht mehr ohne die Verwendung von hochfesten Werkstoffen aus. So wird für die Talbrücke Mittel, eine über 2400 m lange Mehrfach-Schrägseilbrücke, die bis zum Jahr 2005 im Süden des französischen Massif Central errichtet wird, ein Großteil in hochfesten Stahlqualitäten ausgeführt werden. Von insgesamt für diese Brücke benötigten 43.000 t Stahl werden rund 50 % als S460WML und S460QL in Dicken bis 200 mm verwendet werden, insbesondere große Teile des Decks sowie die Pylonköpfe, Bild 6.



Bild 6. Vaux de Cé, Südfrankreich

## 7 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 ein Konstruktionskonzept 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.

## 8 Schrifttum

- [1] Schröter, F.: Höherste Stahle für den Stahlbau - Auswahl und Anwendung, Bauingenieur 76 (2000) S. 426-432.
- [2] Änderung und Ergänzung der Anpreisungsrichtlinie Stahlbau - Ausgabe Dezember 2001, DIBt-Mitteilungen 33 (2002) Nr. 1.
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DASt-Richtlinie 603, Empfehlungen zur Wahl der Stahlgüte für geschweißte Stahlbauten, April 1973.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1-1, Juni 1999.
- [5] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DASt-Richtlinie 611, Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindestbruchgrenzwerten von 460 und 690 N/mm<sup>2</sup>, Anwendung für Stahlbauten, Februar 1999.
- [6] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Stahl-Eisen-Werkstoffatlas SEW 683, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinien für die Verarbeitung besonders für das Schmelzschweißen, Düsseldorf Verlag Stahlbau, Oktober 1993.
- [7] Hubo, R. u. F. Schröter: Thermomechanisch gewalzte Stähle - Hochleistungsprodukte für einen effizienten Stahlbau, Bauingenieur 76, (2001) S. 459-463.