

**Beispielhaftes Vortragsmanuskript
eines Vortrages der
Großen Schweißtechnischen Tagung 2000
in Nürnberg**

Titel:

*„MAG-Schweißen hochfester Feinkornstähle im
Fahrzeugkranbau“*

Autor:

Dipl.-Ing. P. Gerster
FAUN GmbH, Lauf

MAG-Schweißen hochfester Feinkornstähle im Fahrzeugkranbau

P. Gerster, Ehingen

Der Einsatz von hochfesten Feinkornstählen ermöglicht durch Leichtbauweise eine wesentliche Verringerung der Herstell- und Betriebskosten von Mobilkränen. In diesem Bericht werden die schweißtechnische Verarbeitung, Schweißzusätze und Anwendung dieser Stähle im Mobilkranbau bis zu einer Streckgrenze von 1100 MPa behandelt. Dadurch können enorme Traglasten bei geringstem Eigengewicht verwirklicht werden.

1 Entwicklung hochfester Feinkornstähle

Stetig steigende Anforderungen wie Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Zähigkeit, bis hin zu höchsten Festigkeitswerten bei guter Schweißbeignung, trieben die Forschung immer weiter voran, **Bild 1**.

Durch den Einsatz optimierter Sekundärmetallurgie, sowie der Vakuumentgasungstechnik, konnten die Gehalte unerwünschter Begleitelemente wie z. B. Schwefel, Phosphor, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff soweit reduziert werden, daß sich immer optimalere Werkstoffwerte einstellen ließen.

Beispielsweise können heute Stähle mit definierten Schwefel- und Stickstoffgehalten von nur wenigen ppm hergestellt werden.

Heute wird bereits der wasservergütete Feinkornstahl mit einer Streckgrenze von 1100 MPa (S1100QL) im Autokran verwendet.

Durch die Weiterentwicklung der thermomechanischen Walztechnik in Verbindung mit einer nachfolgenden Intensivkühlung und anschließender Anlaßbehandlung bewegen sich neueste Entwicklungen bei

TM-Stählen bis hin zu Streckgrenzen von 960 MPa. Alle diese Stähle sind hochzäh und unter Beachtung von einschlägigen Verarbeitungsregeln gut schweißbar.

1.1 Methoden der Festigkeitssteigerung

Bei den ersten Stählen mit höherer Festigkeit wurde dies primär über chemische Zusammensetzung durch festigkeitssteigernde Elemente, vor allem Kohlenstoff und Mangan erreicht. Durch Zulegieren von Aluminium zusätzlich zu Silizium wurde der erste höherfeste und gut schweißbare Stahl St52-3 entwickelt.

Aluminium bindet den gelösten Stickstoff und trägt so zur Verbesserung der Alterungsbeständigkeit bei. Durch die dabei entstehenden Al-Nitride wird das Kornwachstum behindert, so dass das Gefüge feinkörniger wird. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass aus diesem Grund auch das Schweißen in kaltumgeformten Bereichen ohne Beeinträchtigung der Zähigkeit möglich ist (entgegen DIN 18800).

Bei steigenden Festigkeiten ist die Mischkristallbil-

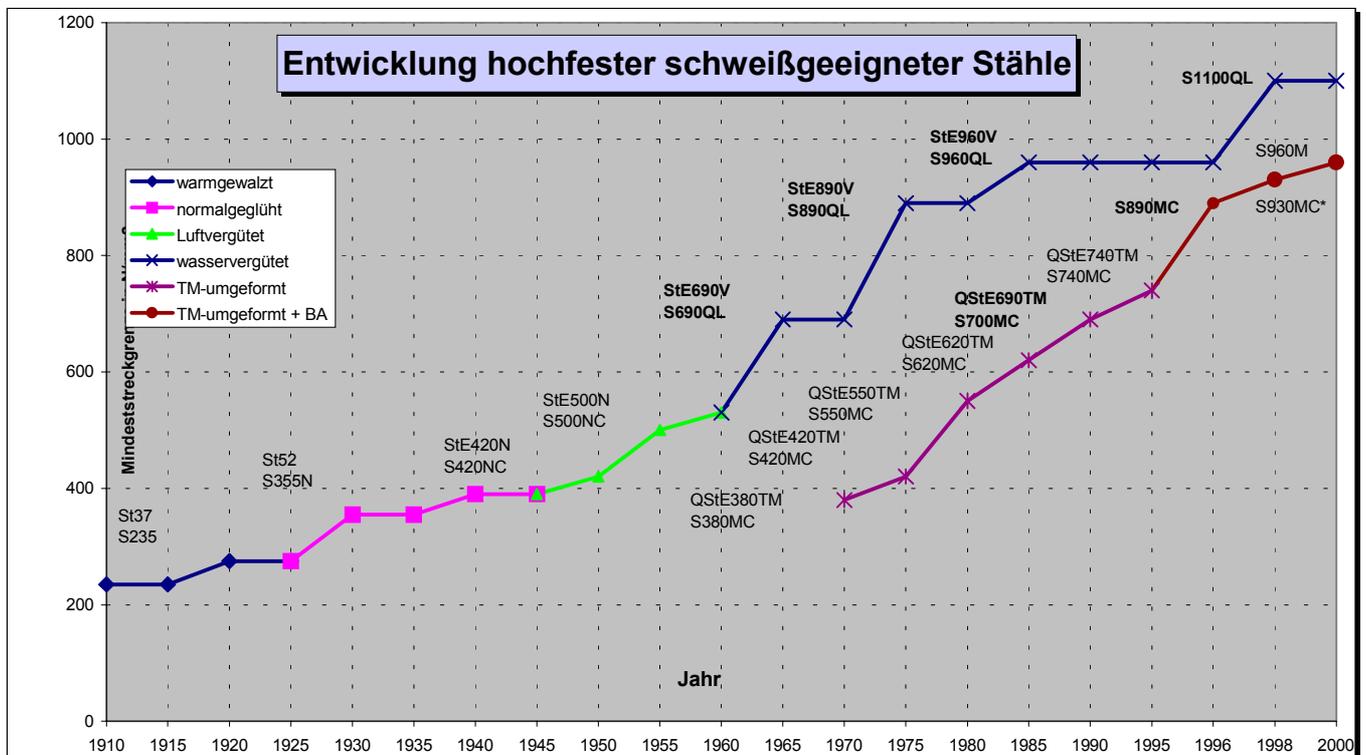


Bild 1. Entwicklung hochfester Feinkornstähle

dung bei C/Mn-Stählen nicht mehr einsetzbar, da die Grenzen der Schweißbarkeit schnell erreicht werden. In der weiteren Entwicklung wurden also andere festigkeitssteigernde Maßnahmen wie Kornfeinung, Teilchenausscheidung oder Versetzungsanhäufung einzeln oder in Kombination eingesetzt.

1.2 Eigenschaften von thermomechanisch gewalzten Feinkornstählen

Im Bereich niedriger und mittlerer Streckgrenzen geht die Tendenz zunehmend in Richtung der thermomechanisch gewalzten Stähle. „Als thermomechanisches Walzen bezeichnet man Walzverfahren mit einer Endumformung in einem bestimmten Temperaturbereich. Das führt zu einem Werkstoffzustand mit bestimmten mechanischen Eigenschaften, der durch eine Wärmebehandlung alleine nicht erreicht wird und nicht wiederholbar ist. Die Kurzbezeichnung für diesen Lieferzustand ist M“ [3]

Anmerkung: Das thermomechanische Walzen kann Verfahren mit erhöhter Abkühlgeschwindigkeit (Intensivkühlung) ohne oder mit Anlassen einschließen.

Die Intensivkühlung mit Anlaßbehandlung wird bei TM-Stählen bei höheren Festigkeiten ab $R_{p0,2} > 700 \text{ N/mm}^2$ angewandt.

Die Vor und Nachteile von TM-Stählen werden gegenübergestellt, **Tabelle 1**. Aufgrund der Vorteile des TM-gewalzten Stahles wird sich dieser Werkstoff zukünftig vermehrt im Bereich der Stähle von 355 bis 690 MPa durchsetzen.

Tabelle 1. Vor und Nachteile von TM-Stählen im Vergleich zu wasservergüteten Stählen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Je nach Blechdicke und Herstellungsverfahren deutlich geringerer Preis • Bessere Ebenheit • Bessere Schweißbarkeit aufgrund geringerem CET (Kohlenstoffäquivalent) und damit keine oder geringere Vorwärmung erforderlich • Geringere Abkantradien möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Blechdicken eingeschränkt* • Höhere Eigenspannungen • Wärmebehandlung mit höheren Temperaturen oder Warmumformung nicht möglich • etwas geringere Zähigkeit <p>* TM-gewalzte Stähle z.Zt bis 10mm, intensivgekühlte und angelassene TM-Stähle bis 25mm Dicke</p>

2 Wirtschaftliche Kriterien für den Einsatz höherfester Stähle in Stahlkonstruktionen

Aufgrund des hohen Kosten- und Wettbewerbsdruckes sind besonders die Hersteller schweißintensiver Produkte gezwungen, ständig ihre Fertigungsprozesse zu optimieren und die Produktion leistungsfähiger zu gestalten. Der Schlüssel dazu ist die Umsetzung neuer Technologien und damit die Erhöhung der Produktivität, beispielsweise durch den Einsatz neuer Werkstoffe. Dabei sind bei Stahlbaukonstruktionen hochfeste Stähle unverzichtbar und werden sich auch in Zukunft vermehrt durchsetzen. Dies gilt auch für

den bauaufsichtlichen Bereich [2], wo bisher nur normalisierend gewalzte Stähle mit 460 MPa Streckgrenze und vergütete Stähle mit 690 MPa Streckgrenze zugelassen sind. Im wesentlichen sind folgende Kriterien für den Einsatz hochfester Werkstoffe ausschlaggebend:

2.1 Erhöhung des Leistungsgewichtes Nutzlast / Eigengewicht

Durch den Einsatz höherer Streckgrenzen können insbesondere im Fahrzeugbau Energiekosten (Treibstoff) durch geringeres Eigengewicht eingespart werden. Im Mobilkransektor kann durch den Einsatz sogenannter Taxikrane, welche die Ausrüstung und das benötigte Gegengewicht am Fahrzeug integriert transportieren, auf ein weiteres Begleitfahrzeug verzichtet werden. Außerdem werden Transportwege reduziert, da höhere Nutzlasten/Fahrzeug bewegt werden. Andererseits können höhere Nutzlasten bei gleichem Eigengewicht realisiert werden, was sich positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirkt.

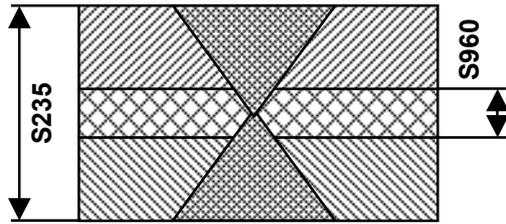
2.2 Verringerung der Material- und Fertigungskosten

Bei der konstruktiven Auslegung wird die Blechdicke über die vorhandene Spannung ermittelt. Die Verwendung höherfester Werkstoffe führt zu einer der Streckgrenze proportionalen Verringerung der Blechdicke. Obwohl z.B. ein Stahl mit 890 MPa Streckgrenze im Einkauf ca. das Doppelte/t im Vergleich mit S235J0 kostet, fallen aufgrund des wesentlich geringeren Gewichtes geringere Materialkosten an. Aufgrund der höheren Streckgrenzen reduzieren sich die Blechdicken sowie das einzubringende Schweißgut. Somit können die anfallenden Lohnkosten deutlich reduziert werden. Dies wird auch dadurch deutlich, daß bei Kehlnähten das einzubringende Schweißgut quadratisch zum a-Maß zunimmt.

Bei solchen Betrachtungen darf jedoch der höhere Fertigungsaufwand z.B. durch Vorwärmen und der Konstruktionsaufwand, welcher zwangsläufig aufgrund des konstanten E-Moduls auftritt, nicht außer acht gelassen werden. Da die elastische Durchbiegung der Konstruktion oft aus Funktions- und/oder psychologischen Gründen (Kranausleger, Fahrwerke) begrenzt ist, sind die Konstrukteure gefordert die nötige Steifigkeit über die Bauteilgestaltung zu realisieren. Die dabei erhöhten Kosten, z.B. durch mehr Versteifungsrippen müssen bei einer Wirtschaftlichkeitsrechnung gegengerechnet werden.

Trotzdem sind aufgrund der höheren Leistungs- und Kostenvorteile höchstfeste Feinkornbaustähle nicht mehr wegzudenken. Die Herstellung moderner Mobil- und Raupenkrane mit Nutzlasten bis zu 1000 t und mehr ist ohne diese Werkstoffe nicht möglich. Das Einsparungspotential beim Einsatz hochfester Stähle wird verdeutlicht, **Tabelle 2**.

Tabelle 2. Einsparung durch Verwendung hochfester Feinkornstähle [9]



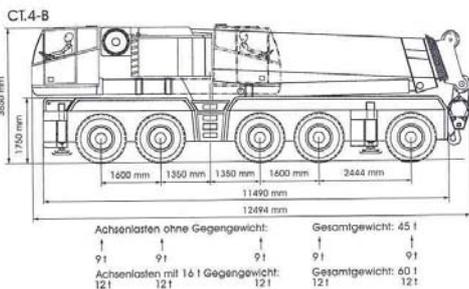
Schweißverbindung

Verhältnis	S235J2	S960QL	Verhältnis
1	Streckgrenze	5	5
5	Blechdicke t	1	1
17	Schweißnahtvolumen	1	1
1	Schweißdrahtkosten	3,3	3,3
5,3	Schweißgutkosten	1	1
12	Spez. Schweißnahtkosten	1	1
5	Gesamtkosten inkl. Grundwerkstoff	1	1

Randbedingungen: Abschmelzleistung 3 kg/h
 Lohn- und Masch.-kosten 60 DM/h
 Spez. Schweißnahtkosten =
 Schweißzusatzwerkstoffe +
 Schweißen
 Berechnungsgrundlagen Re / 1,5

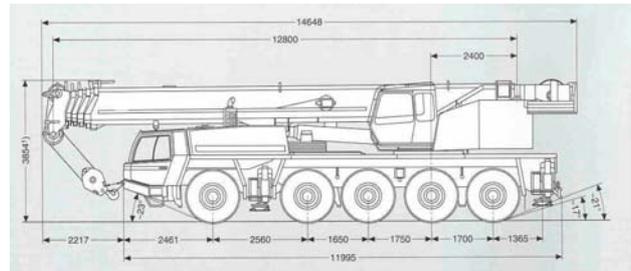
3 Konstruktive Gestaltung

Die höchstfesten FK-Stähle ermöglichen große Traglasten bei geringem Eigengewicht. Das neue Mobilkrankonzept der Compact Truck-Reihe der Firma CC (Compact Cranes) ermöglicht bei gleicher Ausnutzung der Stähle bis 1100 MPa Streckgrenze ein noch geringeres Eigengewicht, d.h. es kann bei Ausnutzung der gesetzlichen Achslasten (12 t) wesentlich mehr Ballast bzw. der komplette Ballast (Taxikrane) mitgeführt werden. Das Beispiel des neu entwickelten CT4 mit 110 t maximaler Traglast im Vergleich zu einem konventionell gebauten Autokran der gleichen Traglastklasse zeigt deutlich der Vorteil dieses neuen Konzeptes, **Bild 2** und **Bild 3**.



Gesamtlänge 12500 mm
 Hauptauslegerlänge (9-tlg.) min. 8,75 m
 max. 59 m
 max. Gegengewicht am Kran bei 12 t Achslast 16 t
 dabei Tragfähigkeit max. 110 t bei 3 m
 max. 0,7 t bei 44 m
 bei 25 t Gegengewicht max 0,8 t bei 54 m

Bild 2. Kompakter Mobilkran CT4-B



Gesamtlänge 14650 mm
 Hauptauslegerlänge (5-tlg.) min. 12,8 m
 max. 51 m

max. Gegengewicht am Kran bei 12 t Achslast 7,3 t
 dabei Tragfähigkeit max. 100 t bei 3 m
 max. 0,9 t bei 30 m
 bei 25 t Gegengewicht max 0,5 t bei 46 m

Bild 3. Konventioneller Autokran

Die ALL-Terrain-Krane der Compact Truck-Reihe unterscheiden sich in wesentlichen von „herkömmlichen“ Mobilkränen. Sie werden angetrieben vom weltweit ersten schnelllaufenden Hydrostaten, was zu einer Vielzahl an konstruktiven und anwendungstechnischen Vorteilen führt. So konnten sowohl die Fahrzeugabmessungen wie auch die Gesamtgewichte und Achslasten gegenüber Modellen vergleichbarer Traglastklassen entscheidend und zum Vorteil des Betreibers optimiert werden.

Die revolutionäre Auslegertechnologie erlaubt einerseits ein stufenloses Ein- und Austeleskopieren unter Last bis zur vollen Auslegerlänge und bis unter Horizontalniveau, während andererseits die Ausleger im eingefahrenen Zustand überhaupt nicht oder aber nur geringfügig die Konturen des Fahrzeugchassis überschreiten.

Des Weiteren bieten die Compact Trucks zusätzlich zur kranüblichen Auslegerverlängerung weitere Zusatzausrüstungen an, die bislang im Kranbereich eher provisorisch eingesetzt wurden. Hubarbeitsbühnen, Hubarbeitsgerüst sowie Hubgabelfunktion ermöglichen eine bedeutende Erweiterung des herkömmlichen Arbeitsspektrums im Kranbereich.

Compact Trucks sind mittlerweile weltweit unter allen klimatischen Bedingungen im Einsatz, von Asien über Europa bis nach Amerika.

4 Schweißzusätze nach DIN EN - Normen

Da von den Schweißzusätzen bzw. der Schweißverbindung in der Regel die gleichen mechanisch-technologischen Eigenschaften erwartet werden, wie beim Grundwerkstoff, müssen diese entsprechend der Festigkeitsklasse legiert sein. Bei Wurzellagen und einlagigen Kehlnähten findet eine Auflegierung des Schweißgutes durch den Grundwerkstoff statt. Streckgrenze und Zugfestigkeit werden dadurch im Vergleich zum „reinen“ Schweißgut erhöht. Man verwendet deshalb, vor allem bei hochfesten Stählen, für Wurzellagen und einlagige Kehlnähte üblicherweise

niedriger legierte Schweißzusätze als für Füll- und Decklagen.

In letzter Zeit wurden die Normen für diese Schweißzusätze europaweit überarbeitet. Ein Überblick über die neuen EN – Normen für Feinkornstähle ist nachfolgend dargestellt, **Tabelle 3**.

Tabelle 3. EN-Normen für Kombinationen von Schweißzusätzen und Schweißverfahren

	GAS	LBH	UP	WIG	MAG / MIG	MSG / FD
unleg. und FK-Stähle	prEN 12536	EN 499	EN 756	EN 1668	EN 440	EN 758
hochfeste Re > 500 N/mm²		EN 757		EN 12534		prEN 12535
Schutzgase / Pulver			EN 760	EN 439		
Lieferbedingungen	EN 759 und prEN 12074					

5 Schutzgase

Grundsätzlich sind alle Schutzgase nach DIN EN 439 für die MAG – Schweißung geeignet, wobei die Gase der Gruppe M 1 nur in Ausnahmefällen zur Anwendung gelangen. Wir setzen ein argonreiches Mischgas mit 18% CO₂ ein. Der Einfluß der Schutzgase auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften ist zu berücksichtigen. Dies gilt umso mehr, je höher die Festigkeit und je tiefer die Einsatztemperatur ist.

6 Schweißtechnische Voraussetzungen

Beim Schweißen von Feinkornstählen sind unbedingt an jedem Arbeitsplatz Möglichkeiten für das Vorwärmen zu schaffen. Die Kontrolle der Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur kann mit Temperaturmessstiften, Magnet-Haftthermometer, digitalen Temperaturmessgeräten oder Pyrometer erfolgen.

Vor Beginn der Schweißarbeiten ist der Nahtbereich zu säubern. Schneidschlacke, Zunder und Rost sind dabei durch Bürsten, Schleifen oder am besten durch Strahlen zu entfernen. Durch Trocknen oder Vorwärmen ist außerdem sicherzustellen, dass der Nahtbereich feuchtigkeitsfrei ist.

6.1 Vermeidung von Kaltrissen

Ein wirksames Mittel ist das Vorwärmen. Es verzögert die Abkühlung des Nahtbereiches und begünstigt die Wasserstoffeffusion. Das Kaltrißverhalten von Stählen hat wesentlichen Einfluß auf die Schweißkosten. Es besteht deshalb großes Interesse, Stähle hinsichtlich ihres Kaltrißverhaltens einzustufen. Dies wird ermöglicht durch das in [4] aus umfangreichen Kaltrißuntersuchungen abgeleitete Kohlenstoffäquivalent CET. Es lautet:

$$\text{CET} [\%] = \text{C} + (\text{Mn} + \text{Mo}) / 10 + (\text{Cr} + \text{Cu}) / 20 + \text{Ni} / 40$$

Das Kaltrißverhalten von Schweißverbindungen wird außer von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes CET auch von der Blechdicke d, dem Wasserstoffgehalt des Schweißgutes HD und dem Wärmeeinbringen Q beim Schweißen sowie dem Eigenspannungszustand der Verbindung maßgebend bestimmt. Durch die Auswertung einer Vielzahl entsprechender Untersuchungen wurde die Wirkung dieser Einflußgrößen auf die Vorwärmtemperatur deutlich [5]. Sie läßt sich mittels nachfolgender Summenformel beschreiben:

$$T_p [C] = 700 \text{ CET} + 160 \tanh(d/35) + 62 \text{ HD}^{0,35} + (53 \text{ CET} - 32)Q - 330$$

In dieser Gleichung bedeuten CET das Kohlenstoffäquivalent in %, d die Blechdicke in mm, HD den Wasserstoffgehalt in cm³ / 100 g deponiertes Schweißgut nach DIN 8572 und Q das Wärmeeinbringen in kJ/mm. Bei der Ableitung dieser Beziehung wurden Eigenspannungen in Höhe der Streckgrenze des Grundwerkstoffes bzw. des Schweißgutes unterstellt. Bei Schweißverbindungen mit günstigerem Eigenspannungsniveau sind niedrigere Vorwärmtemperaturen vertretbar. Im Falle von Schweißverbindungen mit extrem hohem Verspannungsgrad (z.B. bei Nähten an Stützen oder Rohrknöten) können jedoch höhere Vorwärmtemperaturen erforderlich sein.

Beim Auftreten von Kaltrissen stellt man immer wieder fest, dass zwar die richtige Vorwärmtemperatur gewählt, jedoch die tatsächliche Wärmeableitung am Bauteil nicht richtig eingeschätzt wurde. Zum einen muß die Vorwärmtemperatur in ausreichendem Abstand von der Schweißnaht gemessen werden, zum anderen muß natürlich an Stellen, wo mehrere Schweißnähte zusammentreffen und damit neben der höheren Wärmeableitung noch dreidimensionale Spannungszustände auftreten können, welche die Kaltrissbildung zusätzlich begünstigen, auch sorgfältiger vorgewärmt werden.

6.2 Mechanische Eigenschaften von Schweißverbindungen

Die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen werden in erster Linie bestimmt durch die chemische Zusammensetzung von Stahl und Schweißgut sowie die beim Schweißen auftretenden Temperaturzyklen. Die wichtigsten Einflußgrößen bezüglich der Temperaturzyklen sind das Schweißverfahren, die Vorwärmtemperatur, die Streckenenergie sowie die Werkstückdicke und die Nahtgeometrie. Diese verfahrenstechnischen Einflußgrößen fasst man zu einer für den Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen charakteristischen Kenngröße, die Abkühlzeit $t_{8/5}$ zusammen.

Eine zu schnelle Abkühlung der Schweißraupen aus dem Austenitgebiet wirkt sich ungünstig auf das Verformungsverhalten der Verbindung aus. Es besteht außerdem die Gefahr von Kaltrissen. Infolge des niedrigeren Wasserstoffgehaltes (HD ca. 2-3) beim MAG-

Schweißen liegt die Mindestabkühlzeit $t_{8/5}$ zur Vermeidung von Kaltrissengefahr hier bei 5 s. Eine zu langsame Abkühlung der Schweißraupen aus dem Austenitgebiet hat dagegen zur Folge, daß die Festigkeitseigenschaften des Schweißgutes nicht mehr denen des Grundwerkstoffes entsprechen. Es besteht dabei außerdem die Gefahr, daß die WEZ eine zu niedrige Zähigkeit aufweist. Bei hochbeanspruchten Konstruktionen empfiehlt sich deshalb, die Abkühlzeit $t_{8/5}$ entsprechend nach oben zu begrenzen, **Bild 4**.

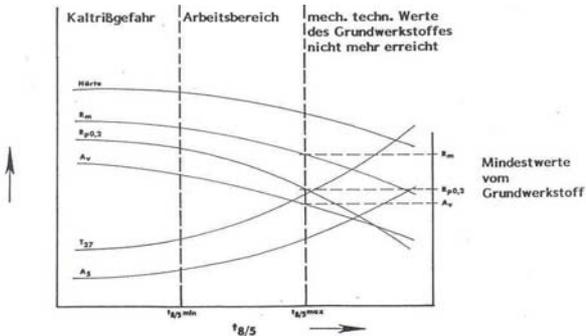


Bild 4. Einfluss von $t_{8/5}$ auf die mech.-techn. Werte

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften werden also hauptsächlich von $t_{8/5}$ beeinflusst. Die Abkühlzeit wird dabei hauptsächlich von folgenden Einflussgrößen bestimmt, **Bild 5**.

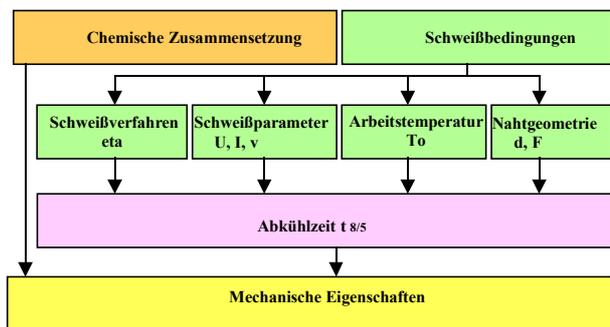


Bild 5. Einfluss der Schweißbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften

7 Einführung eines hochfesten Werkstoffes im Mobilkranbau am Beispiel des Stahles S1100QL

Bei der Einführung neuer Werkstoffe in der Fertigung sind umfangreiche Untersuchungen bezüglich der mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften nötig. Daneben müssen zunächst die Voraussetzungen in bezug auf Gesetzeslage, Regelwerk und Normung geprüft werden. Im Mobilkranbau haben sich heute genormte Vergütungsstähle mit Streckgrenzen von 690 MPa bis 960 MPa als Standard etabliert. Die Einführung eines neuen, nicht genormten Feinkornbaustahles im Fahrzeugkranbau soll nachfolgend am Beispiel eines Stahles mit 1100 MPa Streckgrenze beschrieben werden.

Die Anzahl von Stahlherstellern, die das Know-how besitzen hochfeste Stähle herzustellen verringert sich, wenn Anforderungen an Streckgrenze und Reinheit steigen. Nur drei Hersteller bieten zur Zeit einen hochfesten, zähen Feinkornbaustahl mit 1100 MPa Streckgrenze an:

- SSAB Schweden Weldox 1100
- Thyssen Deutschland Xabo 1100
- Dillinger Hütte Dillimax 1100

7.1 Schweißen

Die Aufgabenstellung für die Verfahrensprüfung war eine Mindeststreckgrenze von 1100 MPa bei belassener Nahtüberhöhung. Für die Kerbschlagzähigkeit wurden 27J bei -40°C als Mindestanforderung zugrundegelegt. Als Schweißzusatz wurde für das Heften ein weicher Schweißzusatz EN 440-G 50 3 M G4Si1, die Wurzelschweißung ein Zusatzwerkstoff mit $R_{p0,2}=700$ MPa (G 69 4 M Mn3Ni1CrMo) und für die Füll- und Decklagen ein hochfester Zusatzwerkstoff mit 900 MPa Streckgrenze (G 89 4 M Mn4Ni2,5CrMo) nach [6] verwendet. Sämtliche Schweißdaten wurden zunächst nach SEW 088 [7] ermittelt. Das CET lag bei beiden Sorten bei 0,39 und unter Beachtung der Schweißgutanalyse bei 0,42. Daraus wurden die Mindestvorwärmtemperaturen bestimmt, **Tabelle 4**.

Tabelle 4. Errechnete Mindestvorwärmtemperatur

Hersteller/Werkstoff	Blechdicke	Mindestvorwärmtemperatur
SSAB/Weldox 1100	8	97
Thyssen/Xabo 1100	10	105

Es war von vornherein klar, dass die geforderten Werkstoffwerte der Schweißverbindung nur mit extrem kurzen Abkühlzeiten erreicht werden können. Für die Versuchsreihe wurde ein Abkühlzeitfenster ($t_{8/5}$) von 5-8 s über die Schweißparameter eingestellt und daraus Zugversuche mit abgearbeiteter Nahtüberhöhung durchgeführt. Die Streckgrenze des Schweißgutes lag erwartungsgemäß unter den Werten des Grundwerkstoffes, waren aber durch die kurze Abkühlzeit und durch Aufmischungsvorgänge höher als die beim reinen Schweißgut. Die Mittelwerte der Streckgrenze lagen bei allen Proben zwischen 960 und 1070 MPa und die der Zugfestigkeit bei 1100 bis 1190 MPa.

Nachdem die Schweißparameter mit den vorangegangenen Versuchsreihen festgelegt waren, wurde anhand dieser Werte eine Schweißanweisung (WPS) erstellt, die als Arbeitsgrundlage für die nachfolgende Verfahrensprüfung mit nicht abgearbeiteter Nahtüberhöhung diente. Diese Vorgehensweise konnte festgelegt werden, da in der Praxis die Schweißnähte ebenfalls nicht abgeschliffen werden. Die Ergebnisse waren entsprechend der Forderung, **Tabelle 5**.

Tabelle 5. Ergebnisse der Verfahrensprüfung

Nr.	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Kerbschlagzähigkeit -40°C (Mittelwerte aus allen Versuchsreihen)
1	1180	1200	45 J
2	1315	1330	75 J

Zusätzlich wurden verschiedene Schiffe angefertigt. Trotz der hohen Härteverläufe ist der Einsatz dieses Stahles aufgrund der guten Zähigkeitseigenschaften gegeben. Den typischen Härteverlauf einer Fülllagenschweißung zeigt, **Bild 6**.

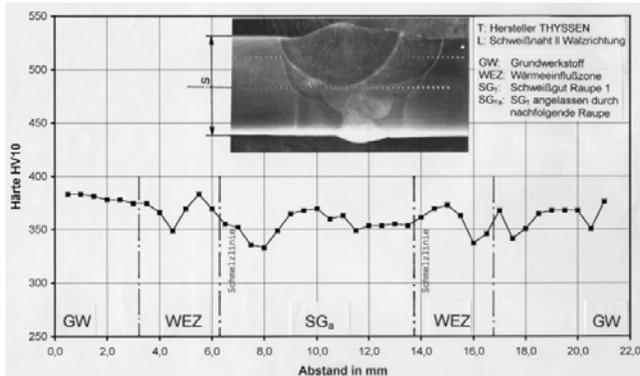


Bild 6. Makroschliff und Härteverlauf einer Schweißprobe

7.2 Überwachung der Schweißdaten

Die Überwachung der wichtigsten Schweißdaten beschränkt sich in der Praxis auf die Kontrolle der Vorwärmtemperatur und ggf. der Zwischenlagentemperatur sowie die Messung der Abkühlzeit $t_{8/5}$. Für den Praktiker ist es hilfreich, unter Verwendung der Diagramme im DVS-Merkblatt 0916 [8], die minimal und maximal zulässige Streckenenergie in Abhängigkeit der Blechdicke aufgrund der Vorgabe der Abkühlzeit zu bestimmen. Mit diesen Werten kann man in einem weiteren Diagramm abhängig vom Drahtelektroden-durchmesser die zugeordneten minimalen und maximalen Schweißgeschwindigkeiten ermitteln. Diese sind dann in der Praxis sehr einfach zu kontrollieren.

7.3 Qualifikation der Schweißer

Die Schweißer müssen eine Qualifikation nach DIN EN 287-1 für die Werkstoffgruppe W03 nachweisen. Interne Schulungen und Unterweisungen der Schweißer über Vorwärmen und ggf. Nachwärmen sowie die Einhaltung der geforderten Streckenenergie (Viellagentechnik) in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe müssen laufend durchgeführt werden. Dabei ist es sinnvoll, dass der Schweißer die Schweißgeschwindigkeit über den Nahtaufbau und Nahtquerschnitt einstellt, da dies jederzeit einfach kontrolliert werden kann.

8 Zusammenfassung

Hochfeste Feinkornstähle sind heute bei der Fertigung von Nutzfahrzeugen, insbesondere im Schwerlastbereich und im Mobilkranbau unverzichtbar und werden sich auch im Stahlbau vermehrt durchsetzen. Aus wirtschaftlichen Gründen, sowie aufgrund der guten Verarbeitungseigenschaften in bezug auf Schweißen und Biegen werden thermomechanisch gewalzte Stähle im Streckgrenzenbereich bis 690 MPa vermehrt eingesetzt.

Höchstfeste Feinkornstähle wie der S1100QL müssen ausgiebig auf Ihre Verwendung untersucht werden. Diese Stähle eignen sich nicht für die breite Masse der Anwendungen, können aber in Einzelfällen zur optimierten Gestaltung leistungsfähiger Konstruktionen eingesetzt werden.

9 Schrifttum

[1] Dr. Geyer, Ing.Mag. Rauch, Dipl.-Ing. Schütz, VOEST-ALPINE Stahl Linz GmbH Hochfeste Feinkornstähle mit optimierten Verarbeitungseigenschaften in Tagungsband zum Fortbildungsseminar für Schweißfachleute an der Schweißtechnischen Zentralanstalt in Wien, 18.05.1995, Bild 2

[2] DIN EN 10149-1, Warmgewalzte Flachzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen, Teil 1: allgemeine Lieferbedingungen September 1995, 3.5

[3] Deutsches Institut für Bautechnik Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Bauprodukte aus hochfesten schweißgeeigneten Feinkornstählen...10.12.1997

[4] Uwer, D. und Höhne, H.: Charakterisierung des Kaltrissverhaltens beim Schweißen in Schweißen und Schneiden 43 (1991) Heft 4, Seite 195-199.

[5] Uwer, D. und Höhne, H.: Ermittlung angemessener Vorwärmtemperaturen in Schweißen und Schneiden 43 (1991) Heft 5, Seite 282-287.

[6] DIN EN 12534 Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen, Nov. 1999

[7] SEW 088, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinien für das Verhalten, besonders für das Schmelzschweißen, Oktober 1996, Stahl-Eisen-Werkstoffblatt (SEW) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute.

[8] DVS-Merkblatt 0916: Metall-Schutzgasschweißen von Feinkornbaustählen.

[9] Gerster, P.: Kostengünstiges Konstruieren und Fertigen im Autokranbau in DVS-Berichte Band 101, (1986), Seite 36-40