

## **1. Einleitung / Danksagung**

Von Oktober 2000 bis Dezember 2002 bearbeitete die Ingenieurgemeinschaft Meyer und Horn-Samodelkin GbR Rostock (kurz: IGMHS) als Projektleiter das Forschungsprojekt:

### ***Entwicklung neuer und Optimierung vorhandener MSG-Fülldrähte für das Schweißen hochfester Feinkornstähle***

Die IGMHS konnte sich während der gesamten Bearbeitungszeit auf die aktive Mitarbeit folgender Partner stützen:

Partner (P1): **Drahtzug Stein wire & welding GmbH & Co. KG Altleiningen,**  
Ansprechpartner: Herr Dr.-Ing. R. Rosert

Partner (P2): **Universität Rostock,**  
**Fachbereich Maschinenbau und Schiffstechnik,**  
Institut für Fertigungstechnik und Logistik  
Ansprechpartner: Herr Dr.-Ing. P. Nolde

Als Pilotunternehmen beteiligten sich:

1. **Ingenieurtechnik und Maschinenbau GMBH (IMG)**  
Industriestr. 8  
19069 Rostock  
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. K.-P. Behrendt
2. **Kvaerner Warnow Werft GmbH Warnemünde**  
Werftstr. 10  
18119 Rostock  
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Dietrich
3. **Kirow Rail & Port AG**  
Spinnereistr. 13  
04179 Leipzig  
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. R. Herrschuh

Als Projektleiter möchte sich die IGMHS bei allen Beteiligten für die jederzeit sehr gute und effektive Zusammenarbeit bedanken, insbesondere für das Interesse der Pilotunternehmen an der Problematik.

Möglich war die Durchführung des Projektes nur aufgrund der großzügigen Förderung durch die Stiftung Industrieforschung (Projektnr. S516). Auch dafür unseren Dank.

## **2. Projektziel**

Die Entwicklung geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe hat mit der Stahlentwicklung hochfester schweißbarer Feinkornbaustähle nicht Schritt gehalten. Die DIN EN 12534 (Schweißzusätze - Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung, Ausgabe:1999-11) und DIN EN 12535 (Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung, Ausgabe:2000-04) enthalten Mindestanforderungen an die Streckgrenze des Schweißgutes für die schweißtechnische Verarbeitung von Stählen bis zu einer Mindeststreckgrenze von 890 MPa, es werden jedoch kaum solche Schweißzusätze angeboten.

Für die schweißtechnische Verarbeitung der hochfesten Feinkornbaustähle für verschiedene Blechdicken ist deshalb die Entwicklung und Optimierung entsprechender Zusatzwerkstoffe dringend erforderlich. Dies gilt insbesondere für Fülldrähte, die unter Schutzgas (CO<sub>2</sub> oder Mischgas) abgeschmolzen werden können.

Im Rahmen des Projektes sollten Neuentwicklungen von Zusatzwerkstoffen (Partner 1) bezüglich ihrer Eignung zum Schweißen hochfester Stähle und der Eigenschaften der so hergestellten Schweißverbindungen (Partner 2 und Antragsteller) beurteilt und optimiert werden.

Folgende Untersuchungsschwerpunkte konnten realisiert werden:

- Zusatzwerkstoffentwicklung unter Berücksichtigung des Einflusses unterschiedlicher Legierungselemente auf die Schweißguteigenschaften und die Verschweißbarkeit der Zusatzwerkstoffe
- Erstellung von Schweiß-ZTU-Schaubildern und zugehörigen Diagrammen mechanisch-technologischer Eigenschaften der Stähle S 890, S 960 und S 1100
- Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften der reinen Schweißgüter nach DIN EN 1597 mittels Zug-, und Kerbschlagbiegeversuchen und Vergleich der Ergebnisse mit den Eigenschaften des unbeeinflussten Ausgangszustandes der Grundwerkstoffe
- Ermittlung technologischer Kennwerte für das Schweißen
- Herstellen von Schweißverbindungen unter Laborbedingungen
- metallographische Analyse der Gefüge der Schweißgüter und der WEZ zur Beurteilung des Einflusses des Schweißwärmezyklusses auf den Grundwerkstoff und das Schweißgut
- Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im abgeschmolzenen Schweißgut in Anlehnung an DIN 8572
- grundlegende Verfahrensprüfungen in Anlehnung an DIN EN 288-3 bzw. DVS Richtlinie 1702 unter praktischen Bedingungen in den Pilotunternehmen

Ergebnis der Untersuchungen sollten anwendungsbereite Fülldrähte für das Schweißen hochfester Stähle mit Streckgrenzen bis 1100 MPa sein. Es sollten optimierte Verarbeitungstechnologien für unterschiedliche Blechdicken erstellt werden. Hierbei sollten die technologischen Randbedingungen der Praxispartner (Pilotunternehmen) berücksichtigt werden.

### **Literaturauswertung / Stand der Kenntnisse**

In /3.1/ wurde der Stand der Kenntnisse zur Problematik zusammengefasst. Der Abschnitt 3 aus /3.1/ ist diesem Bericht als Anlage beigefügt.

Im Rahmen des fortlaufenden projektbegleitenden Literaturstudiums wurden keine wesentlichen neuen Aspekte / Erkenntnisse dazugewonnen. Es wird immer wieder bestätigt, dass der Einsatz hochfester Feinkornbaustähle neben dem Effekt der wesentlichen Gewichtsreduzierung auch zu enormen Kostenreduzierungen führen kann /3.2/, **Tab. 3.1**.

**Tab. 3.1:** Wirtschaftlichkeitsberechnung beim Einsatz hochfester Feinkornbaustähle nach /3.2/

Streckgrenze [MPa]	Blechdicke	Lohnkosten/ 1m Naht	Kosten für Zusatzwerkstoffe / 1m Schweißgut	Spezifische Schweißnahtkosten / 1m Naht	Blechpreis [DM/t]	Kosten Grundwerkstoff f(R <sub>e</sub> )
355	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
690	0,51	0,30	0,52	0,32	1,29	0,66
960	0,37	0,15	0,42	0,18	1,70	0,63
1100	0,32	0,12	0,31	0,14	1,90	0,61

**Berechnungsgrundlage:**

Re/1,5=f<sub>yk</sub>, Abschmelzleistung 6,5 kg/h t-MAG-M, Nahtform X60°, Fertigungskosten DM 75/h

Dies wird in /3.3/ bestätigt. Darüber hinaus wird in /3.3/ über Schweißversuche berichtet, die mit einem Massivdraht nach /4/ und dem MAG-M-Schweißen an einem S 1100 durchgeführt wurden. Auch in diesen Untersuchungen wurde bei den Verbindungsschweißungen kein Schweißgut erzeugt, dass die Festigkeitswerte des Grundwerkstoffes erreichte. Leider waren die Verfahrensparameter nicht eindeutig bzw. vollständig aufgeführt, so dass ein unmittelbarer Vergleich mit den im Rahmen des Projektes erreichten Ergebnissen nicht möglich war.

Zu bemerken ist weiterhin, dass die in /3.1/ noch als Entwurf zitierte DIN EN 12535 in eine gültige Norm übergegangen ist /3.5/.

- /3.1/ Ausführlicher Antrag zum Forschungsprojekt:  
 „Entwicklung neuer und Optimierung vorhandener MSG-Fülldrähte für das Schweißen hochfester Feinkornstähle“  
 (Abschnitt 3. Stand der bisherigen Forschung bzw. Technik (mit Literaturangaben als Anlage beigefügt))
- /3.2/ Halbritter J.: Einsatz hochfester Feinkornbaustähle im Nutzfahrzeugbau.  
 5. Aachener Schweißtechnik Kolloquium ASTK'99, Shaker Verlag, Aachen 1999  
 aus /4/
- /3.3/ Gerster, P.: MAG-Schweißen hochfester Feinkornstähle im Fahrzeugbau.  
 DVS Berichtsband DVS 209 (2000), S. 41ff
- /3.4/ de Payrebrune: Vermeidung von Kaltrissen beim Unterpulverschweißen von hochfesten Feinkornbaustählen der Qualität S 890 QL und S 960 QL.  
 Aachener Berichte Fügetechnik Band 1/2000
- /3.5/ DIN EN 12535:  
 Schweißzusätze. Fülldrahtelektroden zum Metallschutzgasschweißen von hochfesten Stählen. Einteilung , April 2000

#### **4. Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften der Stähle S890, S960 und S1100**

Die Problematik der schweißtechnischen Verarbeitung hochfester Baustähle für den Stahlbau ist hoch aktuell. Es sind Stähle mit hohen Streckgrenzen verfügbar, die sich gegenwärtig insbesondere für die Anwendung im Nutzfahrzeugbau anbieten. Es wurden Schweiß-ZTU-Schaubilder aufgestellt und der Versuch unternommen, daraus Abkühlzeitbereiche zu ermitteln, die für die Anwendung dieser Stähle in Schweißkonstruktionen empfohlen werden können. Verglichen werden diese Ergebnisse mit anderen Möglichkeiten der Beurteilung der Schweißeignung.

##### **4.1. Untersuchte Stahlchargen**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden drei hochfeste schweißbare Feinkornbaustähle untersucht:

S 890 QL; S960 QL und S1100 QL (hier zwei verschiedene Chargen).

Die chemische Zusammensetzung der Stahlchargen sind in **Tab. 4.1** zusammengefasst.

**Tab. 4.2** beinhaltet die mechanisch-technologischen Eigenschaften. Beide Tabellen stellen zu Vergleichszwecken auch die Werte aus der für diese Werkstoffe geltenden Werkstoffnorm /4.1/ bzw. Herstellerrichtwerte /4.2/ dar.

**Tab. 4.1:** Chemische Zusammensetzung der in die Untersuchungen einbezogenen Stahlchargen (in Gew.-%)

Stahl	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
<b>S890</b>	0,16	0,54	1,42	0,013	0,004	0,6	0,76	0,0073
<b>S960</b>	0,15	0,468	1,31	0,0135	0,00255	0,545	0,787	-
<b>DIN EN 10137-2 /4.1/</b>	0,20	0,8	1,7	0,025 0,020	0,015 0,010	1,5	2,0	0,015
<b>S1100/3</b>	0,153	0,29	0,998	0,007	0,004	0,626	1,99	-
<b>S1100/4</b>	0,16	0,29	0,99	0,010	0,002	0,66	1,98	-
<b>ThyssenKrupp /4.2/</b>	≤0,20	≤0,5	≤1,7	≤0,02	≤0,005	≤1,5	≤2,5	k.A.

Stahl	Mo	Cu	Al	V	Ti	Nb	CET	CE <sup>1)</sup>
<b>S890</b>	0,39	0,06	0,017	0,05	-	-	0,393	0,66
<b>S960</b>	0,318	0,042	0,0411	0,0385	-	0,0252	0,362	0,60
<b>DIN EN 10137-2 /4.1/</b>	0,7	0,5	<sup>2)</sup>	0,12	0,05	0,06	0,59	-
<b>S1100/3</b>	0,492	0,016	0,00449	0,0777	-	0,0011	0,384	0,69
<b>S1100/4</b>	0,52	0,05	0,030	0,075	0,002	-	0,396	0,71
<b>ThyssenKrupp /4.2/</b>	≤0,7	k.A.	k.A.	≤0,12	k.A.	k.A.	k.A.	-

- 1) CE nach EN 1011-2 (2001); Nach Methode A (vgl. Übersichten C.2k bis m) und B (vgl. Übersichten C.3 bis .6) zur Vermeidung... keine Vorwärmung notwendig
- 2) Mindestens eines der kornfeinenden Elemente, zu denen auch Al gehört, sollte mit einem Mindestanteil von 0,015% vorhanden sein. Im Falle von Al gilt der Mindestwert von 0,015% für das lösliche Al; dieser Wert gilt auch als erreicht, wenn der Al-Gesamtanteil mindestens 0,018% beträgt; in Schiedsfällen ist der Gehalt an löslichem Al zu bestimmen.

**Tab. 4.2:** Mechanisch-technologische Eigenschaften der in die Untersuchungen einbezogenen Stahlchargen

Stahl	R <sub>p0,2</sub> in MPa s<= 50 mm	R <sub>m</sub> in MPa s<= 50 mm	A <sub>5</sub> in %	Z in %	K in J bei -40°C / Längspr.	Härte HV10
S890 1)	982	1047	13	-	25	-
S890 2)	916	973	-	-	-	-
S890 3)	834	869	16	43	-	308
DIN EN 10137-2	890	940-1100	11	k.A.	30 (QL)	k.A.
S960 1)	997	1035	13	-	45	-
S960 3)	964	1034	15	48	-	393
DIN EN 10137-2	960	980-1150	10	k.A.	30 (QL)	k.A.
S1100/3 1)	1182	1367	15	64	30	422
S1100/4 1)	1151	1349	13	68	40	-
S1100/4 3)	1074	1250	13	57	-	455
ThyssenKrupp /4.2/	≥1100	1200- 1500	≥8	k.A.	≥27	k.A.

- 1) Herstellerangaben (bei S890 vor der Glühung entsprechend Abschn. 4.2, Tab. 4.3)
- 2) nach der Glühung (s. Abschn. 4.2, Tab. 4.3)
- 3) ermittelt an nicht standardisierten Proben zu Erstellung der Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften der Stähle (vgl. Bild 4.1)

#### 4.2. Probleme bei der Vorbereitung der Untersuchungen

Die Werkstoffe wurden im Rahmen des Forschungsthemas von verschiedenen Firmen zur Verfügung gestellt.

Als S 890 wurde eine Charge beige stellt, die als 0,2-Dehngrenze einen Wert von 982 MPa aufwies. Es wird deutlich, dass diese Charge rein formal auch einem S 890 entsprechen kann, exakt ist allerdings die Zuordnung zu einem S 960.

Da im Rahmen der Untersuchungen ein S890 untersucht werden sollte, wurden mit den beige stellten Blechen Anlassglühversuche durchgeführt, um die einem S890 entsprechende Festigkeit zu erreichen.

Es wurden verschiedene Glühtechnologien ausgeführt (vgl. **Tab. 4.3**). Variiert wurden die Glüh temperatur und die Glühzeit. Im Ergebnis der Glühversuche stellten sich bei einer Glüh temperatur von 630°C und einer Glühdauer von 38min folgende Festigkeitswerte ein:

$$R_{p0,2} = 916 \text{ MPa}$$

$$R_m = 973 \text{ MPa}$$

**Tab. 4.3:** Angewendete Glühtechnologien

Lfd. Nr. des Glühvers.	Glüh temp. in ° C	Glühzeit in min	R <sub>p0,2</sub> in MPa	R <sub>m</sub> in MPa	Streckgrenzenverhältnis R <sub>p0,2</sub> / R <sub>m</sub>
1	620	20	962	1029	0,94
2	630	60	795	855	0,93
3	630	40	997	1045	0,95
4	630	50	828	882	0,94
5	630	45	827	887	0,93
6	630	40	873	934	0,93
7	630	38	916	973	0,94
					<b>geeignete Glühtechnologie</b>

Nachfolgend wurden alle Bleche der Charge des „S890“, die in die Untersuchungen einbezogen werden sollten, dieser Glühung unterzogen und im folgenden als S 890 verarbeitet. Alle anderen Stahlchargen wurden im Anlieferungszustand verwendet.

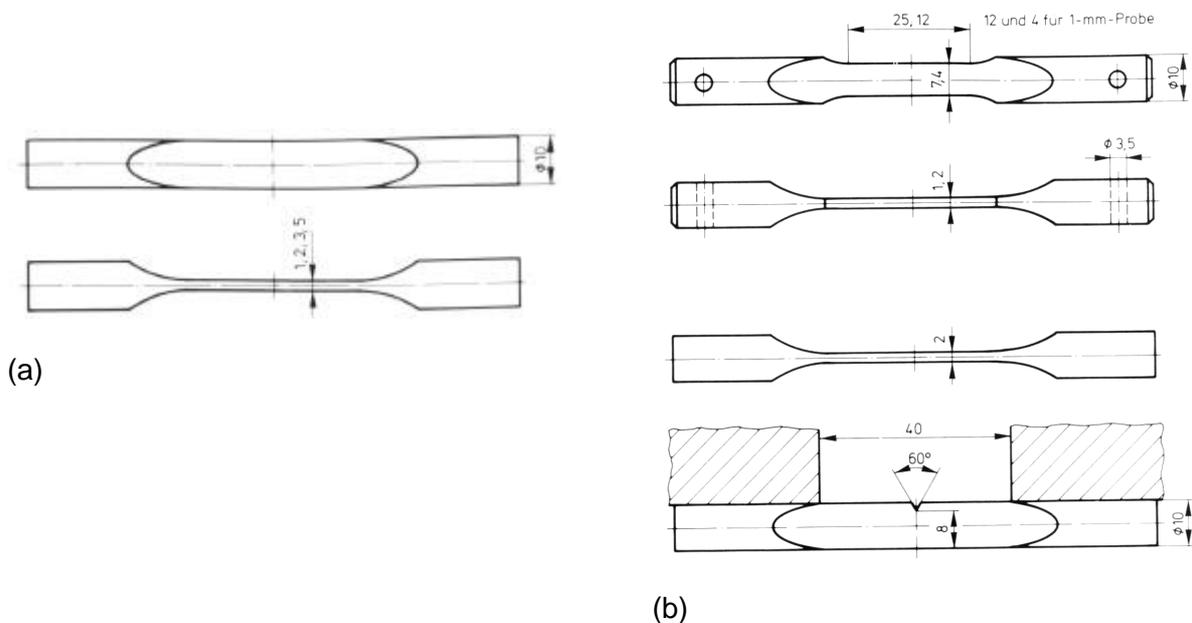
### 4.3. Aufstellen von Schweiß-ZTU-Schaubildern

Die Schweiß-ZTU-Schaubilder der Stahlchargen wurden entsprechend /4.3/ erarbeitet und ausgewertet. Dazu wurden der Versuchsanlage zur Simulation der thermischen Schweißzyklen angepasste Probenformen verwendet, **Bild 4.1a**. Nach der Simulation wurden diese Proben für die mechanisch-technologischen Untersuchungen bearbeitet, **Bild 4.1b**.

I.d.R. sind die mit diesen Proben ermittelten Werte gut mit denen aus Standardproben vergleichbar, vgl. **Tab. 4.2.** Der in **Tab. 4.2.** deutliche Festigkeitsunterschied beim Stahl S890 ist eher auf die vorangestellte Glühung, als auf die nicht standardisierten Proben zurückzuführen.

Zur Erstellung der Schweiß-ZTU-Schaubilder gehören auch die Aufstellung von Diagrammen mechanisch-technologischer Eigenschaften und die Anfertigung von metallographischen Schlifflinien zur Gefügebestimmung.

In den **Bildern 4.2 bis 4.5** sind die Ergebnisse in Form der Schweiß-ZTU-Schaubilder und Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften sowie ausgewählter Schlifflinien dargestellt. Die **Bilder 4.2 bis 4.5** sind diesem Bericht im Anlagenteil beigelegt.



**Bild 4.1:** Probenformen zur Simulation von thermischen Schweißzyklen (a) und zur Erstellung der Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften (b)

### 4.4. Umwandlungs- und Eigenschaftsverhalten der untersuchten Stahlchargen

#### 4.4.1. Auswertung der Dilatometerversuche- Grundsätzliche Bemerkung zur Gefügeauswertung

Die Bestimmung bzw. Trennung der Gefügebestandteile Martensit und Zwischenstufengefüge ist bei diesen Stählen ein prinzipielles Problem. Verstärkt wird dieses Problem noch dadurch, dass die untersuchten Stähle ein sehr feines Gefüge aufweisen. Eine eindeutige Abgrenzung ist weder in den Dilatometerkurven noch in den Schlifflinien mittels konventioneller Lichtmikroskopie möglich. Deshalb sind die sog. „Umwandlungsnasen“ der Zwischenstufenumwandlung in den meisten Schaubildern gestrichelt gezeichnet. Grundsätzlich kann man sagen, dass die hier untersuchten Stahlchargen vorrangig in der Zwischenstufe umwandeln.

#### **4.4.2. S890 - Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften**

Der Stahl S 890 zeigt bis zu einer Abkühlzeit zwischen 850°C und 500°C ( $t_{8,5/5}$ ) von ca. 4,2s eine vollständig martensitische Umwandlung. Ab  $t_{8,5/5} = 4,2s$  nimmt die martensitische Umwandlung zu Gunsten der Zwischenstufenumwandlung ab. Der Beginn der Zwischenstufenumwandlung liegt nur wenige K oberhalb der  $M_s$ -Temperatur. Der Anteil an Zwischenstufengefüge nimmt kontinuierlich zu und erreicht bei einer  $t_{8,5/5}$  von ca. 82s 100%. Hier startet die Zwischenstufenumwandlung bereits 150K oberhalb der  $M_s$ -Temperatur. Eine beginnende Ferritumwandlung in Form von Korngrenzenferrit konnte weder in den aufgenommenen Dilatometerkurven noch im Schliiff nachgewiesen werden.

Mit zunehmender Abkühlzeit nehmen die Härte (um ca. 150HV10) und die Festigkeitswerte (um ca. 300 bis 400MPa) ab, Zähigkeit und Formänderungsvermögen nehmen nur unwesentlich zu.

Der maximal gemessene Härtewert liegt bei 475 HV10.

Im Ausgangszustand weist der Stahl ein Streckgrenzenverhältnis von 0,96 auf. Im schweißsimulierten Zustand liegt das Streckgrenzenverhältnis zwischen 0,7 und 0,74, d.h., das Festigkeitsverhalten hat sich deutlich geändert. Die Verformungsreserven sind angewachsen.

Eine Bewertung der mechanisch-technologischen Eigenschaften nach den unter 4.5 benannten Kriterien geht aus **Tab. 4.5** hervor.

#### **4.4.3. S960 - Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften**

Der Stahl S 960 zeigt bis zu einer Abkühlzeit zwischen 850°C und 500°C ( $t_{8,5/5}$ ) von ca. 2,8s eine vollständig martensitische Umwandlung. Ab  $t_{8,5/5} = 2,8s$  Abkühlzeit nimmt die martensitische Umwandlung zu Gunsten der Zwischenstufenumwandlung ab. Der Anteil an Zwischenstufengefüge steigt am Anfang sprunghaft auf 35 %, nimmt anschließend allerdings kontinuierlich zu und erreicht bei einer  $t_{8,5/5}$  von ca. 77s 100%. Auch für diesen Stahl trifft das bereits für den S 890 beschriebene Verhalten hinsichtlich der Temperaturlage des Umwandlungsbeginns in der Zwischenstufe zu.

Eine beginnende Ferritumwandlung in Form von Korngrenzenferrit kann ab einer Abkühlzeit  $t_{8,5/5}$  von ca. 150s beobachtet werden. Der Nachweis ist sowohl in den Dilatometerkurven als auch in den Mikroschliffen möglich.

Mit zunehmender Abkühlzeit nehmen die Härte (um ca. 200 HV10) und die Festigkeitswerte (um ca. 200MPa) ab, Zähigkeit und Verformbarkeit nehmen nur unwesentlich zu.

Der maximal gemessene Härtewert liegt bei 490 HV10.

Im Ausgangszustand weist der Stahl ein Streckgrenzenverhältnis von 0,93 auf. Im schweißsimulierten Zustand liegt das Streckgrenzenverhältnis zwischen 0,73 und 0,74, d.h., das Festigkeitsverhalten hat sich auch bei diesem Stahl deutlich geändert. Auch bei diesem Stahl sind die Verformungsreserven angewachsen.

Eine Bewertung der mechanisch-technologischen Eigenschaften nach den unter 4.5 benannten Kriterien geht aus **Tab. 4.5** hervor.

#### **4.4.4. S1100 (Charge 3) - Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften**

Der Stahl S 1100 (3) zeigt bis zu einer Abkühlzeit zwischen 850°C und 500°C ( $t_{8,5/5}$ ) von ca. 5,5s eine vollständig martensitische Umwandlung. Mit zunehmender Abkühlzeit nimmt die martensitische Umwandlung zu Gunsten der Zwischenstufenumwandlung ab. Der Anteil an Zwischenstufengefüge nimmt kontinuierlich zu und erreicht bei einer  $t_{8,5/5}$  von ca. 130 bis ca. 160s 100%. Auch für diesen Stahl trifft das bereits für den S 890 beschriebene Verhalten hinsichtlich der Temperaturlage des Umwandlungsbeginns in der Zwischenstufe zu.

Eine beginnende Ferritumwandlung in Form von Korngrenzenferrit kann ab einer Abkühlzeit  $t_{8,5/5}$  von ca. 160s beobachtet werden.

Mit zunehmender Abkühlzeit nehmen die Härte (um ca. 200 HV10) und die Festigkeitswerte (um ca. 150 bis 200 MPa) ab. Zähigkeit und Verformbarkeit nehmen geringfügig zu.

Der maximal gemessene Härtewert liegt bei 468 HV10.

Im Ausgangszustand weist der Stahl ein Streckgrenzenverhältnis von 0,86 auf. Es ist geringer als das der Stähle S890 und S 960. Im schweißsimulierten Zustand liegt das Streckgrenzenverhältnis zwischen 0,72 und 0,81, d.h., das Festigkeitsverhalten hat sich geändert. Die Verformungsreserve nimmt geringfügig zu. Eine Bewertung der mechanisch-technologischen Eigenschaften nach den unter 4.5 benannten Kriterien geht aus **Tab. 4.5** hervor.

#### 4.4.5. S1100 (Charge 4) - Umwandlungsverhalten und mechanisch-technologische Eigenschaften

Der Stahl S 1100 (4) zeigt bis zu einer Abkühlzeit zwischen 850°C und 500°C ( $t_{A8,5/5}$ ) von ca. 5,5s eine vollständig martensitische Umwandlung. Ab 5,5s Abkühlzeit nimmt die martensitische Umwandlung zu Gunsten der Zwischenstufenumwandlung ab. Über den gesamten Abkühlzeitbereich bleibt der Beginn der Zwischenstufenumwandlung um nur ca. 30 bis 50K über der  $M_s$ -Temperatur. Der Anteil an Zwischenstufengefüge nimmt kontinuierlich zu und erreicht bei einer  $t_{8,5/5}$  von ca. 75s 100%.

Eine beginnende Ferritumwandlung in Form von Korngrenzenferrit konnte im Unterschied zur Charge 3 weder in den aufgenommenen Dilatometerkurven noch im Mikroschliff nachgewiesen werden.

Mit zunehmender Abkühlzeit nehmen die Härte (um ca. 200 HV10) und die Festigkeitswerte (um ca. 150 bis 200 MPa) ab, Zähigkeit und Verformbarkeit nehmen geringfügig zu. Der maximal gemessene Härtewert liegt bei 550 HV10.

Im Ausgangszustand weist der Stahl ein Streckgrenzenverhältnis von 0,86 auf. Es ist ebenfalls geringer als das der Stähle S890 und S 960. Im schweißsimulierten Zustand liegt das Streckgrenzenverhältnis zwischen 0,8 und 0,93, d.h., das Festigkeitsverhalten hat sich im Unterschied zu den drei anderen untersuchten Stahlchargen nicht wesentlich geändert. Eine Bewertung der mechanisch-technologischen Eigenschaften nach den unter 4.5 benannten Kriterien geht aus **Tab. 4.5** hervor.

#### 4.5. Bewertung der Schweiß-ZTU-Schaubilder und Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften

Um mit Hilfe der Schweiß-ZTU-Schaubilder und Diagramme mechanisch-technologischer Eigenschaften empfehlenswerte Abkühlzeiten  $t_{8,5/5}$  sinnvoll zu ermitteln, müssen für die zu beurteilenden Aufgaben geeignete Kriterien formuliert oder ausgewählt werden. Dies können sein:

- Vorgaben von Abnahmeorganen (TÜV, GL u.a.)
- 30% bzw. 50% Martensit
- Erreichen der Werte des Ausgangszustandes
- zulässige Härtehöchstwerte nach DIN EN 288-3 (**Tab. 4.4**)

**Tab. 4.4:** Zulässige höchste Härtewerte, HV10, für vergütete Feinkornbaustähle mit einer gewährleisteten Mindeststreckgrenze von  $R_e > 500\text{MPa}$  <sup>1)</sup> /4.4/

Einzelraupe Stumpf- und Kehlnaht		mehrlagige Stumpf- und Kehlnaht	
nicht wb	wb <sup>3)</sup>	nicht wb	wb
450	<sup>2)</sup>	420	<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Für Stähle mit min.  $R_e > 885\text{MPa}$  sind Sondervereinbarungen notwendig

<sup>2)</sup> Sondervereinbarungen sind notwendig

<sup>3)</sup> wb ... wärmebehandelt

In den Abschnitten "Mechanisch-technologische Eigenschaften" wird Bezug auf **Tab. 4.5** genommen.

**Tab. 4.5:** Auswahl der  $t_{A8,5/5}$  unter Berücksichtigung der o.g. Kriterien

Auswahlkriterium	Abkühlzeit $t_{8,5/5}$ in s in Abhängigkeit von den untersuchten Stählen und den Auswahlkriterien			
	S 890	S960	S 1100 (3)	S1100 (4)
$t_{8,5/5}$ für 30% M	60	20	45	50
$t_{8,5/5}$ für 50% M	22	8	22	13
<i>Erreichen der Werte des Ausgangszustandes:</i>				
HV 10	Werte immer höher	< 18 höhere Werte	Werte immer geringer	< 5 höhere Werte
$R_m$	> 130	>100	Werte immer geringer	>2 geringere Werte
$R_{p0,2}$	> 25	> 5,5	Werte immer geringer	Werte immer geringer
A	> 200	> 180	Werte immer geringer	Werte immer geringer
Z	> 60	> 18	Werte immer geringer	>90
K	> 50	Werte immer höher	> 10	Werte immer höher
<i>Zulässige höchste Härtewerte nach DIN EN 288-3:</i>				
450 HV10	12	2,5	1	6
420 HV10	28	10	6	18

Vergleicht man die Abkühlzeiten nach den unterschiedlichen Kriterien miteinander, so ist keine eindeutige Tendenz oder Spannbreite ablesbar. Eine eindeutige Festlegung einer  $t_{8,5/5}$  ist für die untersuchten Stähle nach den herkömmlichen Kriterien nicht möglich. Es kann auf die Empfehlungen der Hersteller bzw. die Vorgaben von Abnahmeorganen zurückgegriffen werden.

#### 4.6. Empfehlungen zum Vorwärmen der untersuchten Stähle

Zur Kalkulation einer notwendigen Vorwärmung dieser Stähle zur Vermeidung von Kaltrissen in den Schweißverbindungen lässt sich das Konzept anwenden, welches unter Berücksichtigung des Kohlenstoffäquivalentes CET die Mindestvorwärmtemperatur  $T_P$  mit

$$T_P = 700CET + 160 \tanh(d/35) + 62HD^{0,35} + (53CET-32)Q - 330 \quad \text{berechnet /4.6, 4.7/}.$$

Bei der Anwendung dieser Formel ermittelt man unter Berücksichtigung der Randbedingungen beim Schweißen der Stähle im Rahmen dieses Projektes für die untersuchten Stahlchargen folgende Mindestvorwärmtemperaturen  $T_P$  (**Tab. 4.6**):

**Tab. 4.6:** Berechnete Mindestvorwärmtemperaturen  $T_P$  in °C

Stahl	CET	Blechdicke d in mm	HD <sup>1)</sup>	$T_P$ in °C in Abh. von der eingebrachten Wärme Q in kJ/mm		
				Q = 1	Q = 1,5	Q = 2
S 890	0,393	12	2	66	60	55
S 960	0,362	15	2	54	48	41
S 1100 (3)	0,384	10	2	51	45	39
S 1100 (4)	0,396	10	2	60	54	49

<sup>1)</sup> Gehalt an diff. Wasserstoff HD in  $\text{cm}^3/100\text{g}$  deponiertes Schweißgut

Nach diesen Berechnungen müssen Mindestvorwärmtemperaturen in Höhe von 40 bis 70°C vorgesehen werden.

Diese Vorwärmung führt zu folgenden berechneten Abkühlzeiten, wobei es keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Stahlchargen gibt:

- für eine Streckenenergie von 10kJ/cm: ca. 5 s
- für eine Streckenenergie von 15kJ/cm: ca. 12 s
- für eine Streckenenergie von 20kJ/cm: ca. 22 s

#### 4.7. Zusammenfassende Bewertung

Aufgrund der ausgewählten Kriterien lässt sich für die einzelnen untersuchten Stahlchargen keine konkrete anzustrebende Abkühlzeit ableiten.

Es kann allerdings auf die Angaben der Hersteller zurückgegriffen werden. Diese sagen folgendes aus:

„Eine zu schnelle Abkühlung der Schweißraupe aus dem Austenitgebiet wirkt sich ungünstig auf das Verformungsverhalten der Verbindung aus. Es besteht außerdem die Gefahr von Kaltrissen. Die Schweißbedingungen sollten deshalb beim E-Schweißen so gewählt werden, dass die Abkühlzeit  $t_{A8/5}$  mindestens 8s beträgt. Voraussetzung für eine derart kurze Abkühlzeit ist jedoch, dass das Schweißgut der verwendeten Stabelektroden einen besonders niedrigen Wasserstoffgehalt aufweist. Infolge der günstigen Verhältnisse beim SG-Schweißen liegt die Mindestabkühlzeit  $t_{A8/5}$  zur Vermeidung von Kaltrissen bei 5s.“ /4.5/ Versucht man diese sehr allgemeine Angabe auf die konkret betrachteten Chargen zu übertragen, so kommt man zu dem Schluss, dass das nicht bedenkenlos möglich ist.

#### 4.8 Literatur

- /4.1/ DIN EN 10137-2:  
Blech und Breitflachstahl aus Baustählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten oder ausscheidungsgehärtete Zustand. Teil 2: Lieferbedingungen für vergütete Stähle.  
Ausgabe: November 1995
- /4.2/ ThyssenKrupp-Informationsmaterial XABO 1100
- /4.3/ Seyffarth P., B. Meyer, A. Scharff:  
Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder.  
DVS-Verlag, 1992
- /4.4/ DIN EN 288-3:  
Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe.  
Teil 3: Schweißverfahrensprüfungen für das Lichtbogenschweißen von Stählen.  
Ausgabe April 1992
- /4.5/ Empfehlung für das Schweißen von XABO 890 und XABO 960.  
ThyssenKrupp Stahl AG
- /4.6/ Uwer, D. und H. Wegmann:  
Anwendung des Kohlenstoffäquivalentes CET zur Berechnung von Mindestvorwärmtemperaturen für das kaltrissensichere Schweißen von Baustählen.  
Jahrbuch Schweißtechnik 1996, S. 46 bis 55. ,  
Deutsch. Verl. für Schweißtechnik  
DVS-Verlag GmbH, D`dorf 1993
- /4.7/ DIN EN 1011-2:  
Schweißen. Empfehlungen für das Schweißen metallischer Werkstoffe.  
Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen.  
Ausgabe Mai 2001

## 5. Zusatzwerkstoffentwicklung

### 5.1. Schweißzusatzwerkstoffe für hochfeste Stähle

Die Entwicklung geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe hat mit der Stahlientwicklung nicht Schritt gehalten. In den DIN EN 737 (Elektroden für hochfeste Stähle), DIN EN 12534 (MSG-Drähte für hochfeste Stähle) und DIN EN 12535 (Fülldrähte für hochfeste Stähle) sind Mindestanforderungen an die Streckgrenze des Schweißgutes von 550 bis zu 890 MPa angegeben (**Tab. 5.1-5.3**). Standardempfehlungen für Zusatzwerkstoffe zum Schweißen von Stählen mit einer höheren Streckgrenze als 890MPa gibt es nicht.

Die von den Herstellern angegebenen Richtwerte zeigen im allgemeinen „von – bis“ - Bereiche auf, die sich vor allem auch aus unterschiedlichen Kohlenstoffgehalten ergeben können. So hat der C-Gehalt einen großen Einfluss sowohl auf die Festigkeit als auch auf die Martensitbildung im Schweißgut. Das führt wiederum dazu, dass die Gefahr der Bildung von wasserstoffinduzierten Rissen zunimmt. Zur Verringerung der Rissanfälligkeit wird empfohlen, höher vorzuwärmen. Damit steigen aber die Verarbeitungskosten.

**Tab. 5.1:** Empfohlene MAG-Drahtelektroden für das Schweißen von Feinkornbaustählen (Normbezeichnung nach AWS 5.28) /5.1/

	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%							R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0,2</sub> MPa	A <sub>vRT</sub> J	A <sub>v-40°C</sub> J
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V				
ER110S-G	0,09	1,7	0,7	0,3	0,6	1,85	-	770	720	80	-
ER120S-G	0,1	1,8	0,8	0,35	0,6	2,3	-	950	890	90	50
ER120S-G	0,12	1,9	0,8	0,45	0,55	2,35	-	980	930	80	40

**Tab. 5.2:** Empfohlene Stabelektroden für das Schweißen hochfester Feinkornbaustähle nach EN 757 /5.2/

	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%							R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0,2</sub> MPa	A <sub>vRT</sub> J	A <sub>v-40°C</sub> J
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V				
E69 4Mn2 NiCrMoB42H5	0,06	1,75	0,4	0,45	0,45	2,25	-	790	>730	80	>47
E89 6ZB42H5	0,05	2,1	0,4	0,5	0,6	3,1	-	980	>885	80	>47

**Tab. 5.3:** Empfohlene Fülldrahtelektroden für das Schweißen von Feinkornbaustählen nach DIN EN 12535 /5.3/

	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%							R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0,2</sub> MPa	A <sub>vRT</sub> J	A <sub>v-40°C</sub> J
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V				
T6942NiMo	0,06	1,5	0,5	-	2,0	0,5	-	780	>690	>70	>47
T894Mn2NiCrMo B M3 H5	0,05	1,6	0,4	0,5	0,5	1,8	-	950	>890	-	>47

Beim Schweißen hochfester Stähle ist zu beachten, dass mit steigender Streckgrenze und zunehmender Wanddicke eine erhöhte Sorgfalt bei der Verarbeitung notwendig wird. Die Schweißnahtvorbereitung muss so gestaltet werden, dass die Nahtfugen trocken sowie frei von Brennschneidschlacke, Rost, Zunder und Verunreinigungen sind.

Die Gefahr der Heißrissbildung ist wegen geringer Schwefelgehalte bei diesen Stählen gering. Dagegen sollte der Bildung von Terrassenbrüchen durch konstruktive und/oder

schweißtechnische Maßnahmen entgegengewirkt werden, z.B. durch die Verringerung der Spannungen. Kaltrissen kann entgegengewirkt werden, indem die Aufhärtung und der Wasserstoffgehalt im Schweißgut gering gehalten werden. Eine zerstörungsfreie Prüfung sollte erst frühestens 24 h nach Beendigung der Schweißarbeiten erfolgen, da Kaltrisse bei diesen Stählen verzögert auftreten. Es sollte sogar bei erhöhter Kaltrissgefahr im Anschluss an das Schweißen eine Wasserstoffarmglühung bei (200 - 280 °C/>2h) /5.4/ durchgeführt werden, wenn dies möglich ist.

Die Vorwärmtemperatur für das Verbindungs- und Heftschweißen liegt zwischen 80 und 250°C /5.4/. Sie hängt von der Werkstückdicke, der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes, der Streckenenergie beim Schweißen sowie den zu erwartenden Eigenspannungen ab. Mit zunehmender Blechdicke ist der obere Vorwärmtemperaturbereich anzustreben. Die Schweißzusatzwerkstoffe sollten so ausgewählt werden, dass sie im Vergleich zum Grundwerkstoff eine ähnliche, nicht zu hohe Festigkeit aufweisen.

Von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften hochfester Schweißverbindungen ist der Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen. Dieser wird besonders von der Blechdicke, der Nahtform, der Streckenenergie, der Vorwärmtemperatur sowie vom Lagenaufbau beeinflusst. Zur Kennzeichnung des Temperatur-Zeit-Verlaufes beim Schweißen wählt man im allgemeinen die Abkühlzeit  $t_{8/5}$ , d.h. die Zeit, in der bei Abkühlung einer Schweißraupe der Temperaturbereich von 800 bis 500°C durchlaufen wird. Mit zunehmender Abkühlzeit  $t_{8/5}$  nimmt die Härte in der Wärmeeinflusszone ab. Wenn für einen bestimmten Stahl eine vorgegebene Höchst Härte nicht überschritten bzw. ein vorgegebener Mindestwert der Kerbschlagarbeit nicht unterschritten werden darf, müssen die Schweißbedingungen so gewählt werden, dass ein bestimmter Bereich der Abkühlzeit  $t_{8/5}$  weder über- noch unterschritten wird. Das heißt eine genau vorgeschriebene Schweißtechnologie ist im Sinne der Gewährleistung der Gesamtheit der Anforderungen an die Schweißverbindung einzuhalten.

Das Schweißgut von Heft- und Wurzelschweißungen wird häufig mit Schweißzusatzwerkstoffen niedriger Festigkeit als der Grundwerkstoff ausgeführt, um Risse zu vermeiden. Treten beim Ausschleifen der Wurzel Risse auf, sind diese unter Vorwärmung so auszufügen, dass der gesamte Riss sicher entfernt wird.

Bei Heftschweißungen, die Bestandteil der Schweißverbindung sind, sollten auf den Grundwerkstoff abgestimmte Schweißzusatzwerkstoffe verwendet werden. Vor dem Überschweißen müssen diese ebenfalls auf Risse überprüft werden.

Bei der Schweißzusatzwerkstoffauswahl ist zu beachten, dass das Schweißgut trotz Aufmischung mit dem Grundwerkstoff dessen mechanische Eigenschaften erreichen muss. Wegen der Gefahr der Entstehung von wasserstoffinduzierten Rissen werden im allgemeinen nur rückgetrocknete basische Stabelektroden empfohlen. Beim Schutzgasschweißen mit Massivdrahtelektroden sind wasserstoffinduzierte Risse nicht so problematisch. Hier besteht eher die Gefahr von Einbrandkerben sowie Bindefehlern in den Nahtflanken.

Der Nahtaufbau sollte an den Nahtflanken begonnen werden, durch die nachfolgende Raupe kann dann die Wärmeeinflusszone günstig beeinflusst werden.

Beim Schweißen in Zwangspositionen sind geringere Zusatzwerkstoffdurchmesser zu empfehlen /5.5/.

Liegt die Bauteiltemperatur unter +5 °C sollte immer auf mindestens Raumtemperatur vorgewärmt werden.

Der Temperatur-Zeit-Verlauf ist für die mechanischen Eigenschaften der Wärmeeinflusszone von großer Bedeutung. Die Empfehlungen des Grundwerkstoff-Herstellers auch hinsichtlich der Streckenenergie sind unbedingt zu berücksichtigen.

## **5.2. Entwicklung von Zusatzwerkstoffen für Stähle mit einer Mindestdehngrenze von 890MPa**

### **5.2.1. Entwicklungsschwerpunkte**

In diesem Punkt werden die Neuentwicklungen von Zusatzwerkstoffen bezüglich ihrer Eignung zum Schweißen hochfester Stähle sowie deren Eigenschaften beschrieben. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten beziehen sich die nachfolgend beschriebenen Entwicklungen nur auf die Herstellung von Fülldrahtelektroden (FD). Diese haben im Vergleich zu Massivdrähten unter anderem folgende Vorteile:

- Sichere Flankenerfassung und damit unempfindlicher gegen Bindefehler
- Gute Benetzung, kerbfreie Übergänge und glatte Oberfläche
- Herstellung kleiner Mengen schon ab 1t wirtschaftlich sinnvoll.

Weiterhin werden Fülldrahtelektroden nach dem Merkblatt DVS 0941, Teil 1 in nahtlose und formgeschlossene Fülldrahtelektroden eingeteilt. Die nahtlosen Fülldrahtelektroden zeichnen sich dadurch aus, dass sie unempfindlich sind gegenüber Feuchtigkeitsaufnahme und damit auch nach langer Lagerung kein Rücktrocknen notwendig ist. Das hat vor allem dann eine Bedeutung, wenn basische Komponenten verwendet werden, die stark reduzierend wirken bzw. hygroskopisch sind. Diese können dann bei formgeschlossenen Fülldrahtelektroden über den Falz aufgenommene Feuchtigkeit reduzieren, was wiederum ein Rücktrocknen notwendig macht.

In der weiteren Entwicklung wurden aufgrund ihrer Unempfindlichkeit gegen Wasserstoffaufnahme nur nahtlose Fülldrahtelektroden untersucht.

Folgende Vorgehensweise kam dabei zur Anwendung:

1. Festlegung der geforderten chemischen Zusammensetzung
2. Festlegung der geforderten mechanischen Gütewerte
3. Anforderungen zum Schweißverhalten (Positionsschweißung etc.)
4. Festlegung des Prüfumfanges
5. Rohstoffauswahl und Formelentwicklung
6. Herstellung eines Versuchsdrahtes
7. Schweißtechnische Beurteilung
8. Chemische Analyse und Gütewerte
9. Herstellung und Prüfung einer Kleincharge
10. Freigabe der Formel für die Produktion

Die Anforderungen an den zu entwickelnden Fülldraht sind im nachfolgenden dargestellt:

- Stabiler und ruhiger Lichtbogen
- Kurz- und Sprühlichtbogen
- Spritzerarmes Schweißen
- Sichere Flankenbenetzung und kerbfreie Übergänge
- geringe Schwefel- und Phosphorgehalte
- Sauerstoffgehalt kleiner 500 ppm
- Auswahl und Test von Legierungssystemen auf ihre Eignung
- Festigkeit entsprechend Grundwerkstoff
- Gewährleistung der Kerbschlagarbeit von 47J bei  $-20^{\circ}\text{C}$
- Geringer Wasserstoffgehalt im Schweißgut (max. 5ml/100g SG)

Die Unempfindlichkeit gegenüber Aufnahme von Feuchtigkeit ist damit zu erklären, dass bei nahtlosen Fülldrähten durch den an sich geschlossenen Mantel auch bei längerer Lagerung keine Feuchtigkeit ins Innere des Mantels eindringen kann (unter Einhaltung normaler

Lagerbedingungen. Die eventuell vorhandene Restfeuchte im Füllpulver wird durch eine Wärmebehandlung, die gleichzeitig auch zum Rekristallisationsglühen des Mantels für eine Weiterverarbeitung des gefüllten Rohres zum fertigen Fülldraht genutzt wird, reduziert. Die Produktionsbedingungen konnten inzwischen schon so optimiert werden, dass bei basischen Fülldrahttypen die Wasserstoffgehalte im Schweißgut (HD-Gehalt) für basische Fülldrähte kleiner 2ml/100g Schweißgut sowie für Metallpulverfülldrähte kleiner 4ml/ 100g Schweißgut betragen.

Bei formgeschlossenen Fülldrähten dagegen kann während der Lagerung über den Falz Feuchtigkeit in das Innere des Mantels eintreten. Aus diesem Grunde sind unbedingt die Empfehlungen der Hersteller zu Lagerung zu beachten, die zum Teil ein Rücktrocknen des Fülldrahtes empfehlen. Auf der anderen Seite ist die Verwendung von hygroskopischen Komponenten, wie zum Beispiel Fluoride im Füllpulver eingeschränkt. Das führt wiederum dazu, dass hochbasische formgeschlossene Fülldrähte mit einem hohen Schlackeanteil nur unter strengster Beachtung der vorgegebenen Verarbeitungshinweise anzuwenden sind. Die schematische Darstellung der Herstellung formgeschlossener (nahtloser) Fülldrähte veranschaulicht **Bild 5.1**.



**Bild 5.1:** Schematische Darstellung der Herstellung nahtloser Fülldrähte

### 5.2.2. Typen – und Legierungsauswahl

Die Typauswahl wurde dadurch bestimmt, dass durch Fülldraht im Vergleich zum Massivdraht aus zieh- und versuchstechnischen Gründen mit einem relativ geringen Material- und Mengenaufwand die verschiedensten Legierungsideen realisiert werden können. Weiterhin ist es auch möglich, ähnlich wie bei Stabelektroden, basische Schlackebestandteile dem Füllpulver zuzugeben, um zum Beispiel eine höhere Reinheit des Schweißgutes bezüglich solcher Verunreinigungen wie Schwefel, Phosphor, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff zu erreichen. Im Vergleich zur Stabelektrode ist der Einsatz von

Fülldraht automatisierbar. Außerdem können Mikrolegierungselemente zur Verfeinerung der Gefügestruktur zugegeben werden.

Die Kriterien: Verhinderung von Kaltrissen durch Wasserstoff bzw. der Bildung von martensitischem Gefüge sind die Hauptkriterien für die Zusatzwerkstoffentwicklung.

**Tab. 5.4.** fasst die aus der Literatur ausgewählten Legierungssysteme zusammen, die für die weiteren Untersuchungen geeignet waren:

**Tab. 5.4:** Ausgewählte Legierungssysteme für die Untersuchungen

Legierungstyp	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
I	0,18	0,5	1,2	0,5	2,5	0,5	-
II	0,12	0,3	3,0	3,0	-	0,4	0,1
III	0,14	0,4	1,0	1,0	4,0	0,4	-

Entsprechend der o.g. Reihenfolge wurden die einzelnen Legierungen als Fülldraht hergestellt. Anschließend wurden diese Fülldrähte auf ihre Eigenschaften getestet sowie eine chemische Analyse angefertigt. Die **Tab. 5.5 bis 5.10** zeigen dazu die chemische Zusammensetzung des reinen Schweißgutes des jeweiligen Fülldrahtes (FD), die entsprechende Analyse in der 8. Lage sowie ausgewählte Festigkeits- und Kerbschlagwerte.

**Tab. 5.5:** Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante I aus Tab. 5.4 (FD-Zusatzwerkstoffanalyse - theoretisch; B-basisch; M-Metallpulver)

Legierungstyp	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%					
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni
I.1	FD-B	0,19	1,2	0,54	0,53	0,52	2,53
I.1	8. Lage	0,16	1,08	0,45	0,51	0,55	2,77
I.2	FD-M	0,20	1,17	0,58	0,52	0,52	2,53
I.2	8. Lage	0,14	1,39	0,62	0,66	0,68	3,41

Zur Überprüfung der mechanischen Gütewerte wurde jeweils eine Verbindung mit dem Grundwerkstoff S960 hergestellt und die Kerbschlagwerte ermittelt. Die Ergebnisse fasst **Tab. 5.6** zusammen.

**Tab. 5.6:** Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante I aus Tab. 5.4, ermittelt an einer Stumpfnahthverbindung mit S960

Leg.-typ	Probe	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%						A <sub>V0°C</sub> in J	A <sub>V-20°C</sub> in J
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni		
I.1	Stumpfnahthverb.	0,21	1,24	0,56	0,58	0,62	2,82	11; 9; 7 <b>9</b>	11; 6; 8 <b>7</b>
I.2	Stumpfnahthverb.	0,12	1,24	0,53	0,55	0,63	2,71	9; 9; 9; <b>9</b>	11; 6; 8; <b>8</b>

Es zeigte sich, dass mit dem Legierungssystem I, mit einem Kohlenstoffgehalt größer 0,16 %, die geforderten Kerbschlagwerte nicht erzielt werden konnten. Der basische Fülldraht unterscheidet sich vom Metallpulverfülldraht vor allem im Schweißverhalten. Es ist nur ein relativ geringer Parameterbereich einstellbar, in dem ein basischer Fülldraht spritzerarm verschweißt werden kann. Im weiteren wurden aus diesem Grunde vorerst nur Metallpulverfülldrähte hergestellt und untersucht.

Die Ergebnisse zum entsprechend Legierungssystem II gefertigten Fülldraht fassen die **Tab. 5.7 und 5.8** zusammen. Dieses Legierungssystem unterscheidet sich von Legierungssystem I vor allem durch einen niedrigeren Kohlenstoffgehalt sowie durch erhöhte Anteile von Mangan und Chrom. Die chemischen Analysen sind **Tab. 5.7** zu entnehmen.

**Tab. 5.7:** Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante II aus **Tab. 5.4**

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%					
		C	Mn	Si	Mo	Cr	V
II.1	FD-M	0,077	3,0	0,31	0,42	2,97	0,12
II.1	8. Lage	0,073	2,77	0,27	0,44	3,33	0,12

**Tab. 5.8:** Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante II, ermittelt am reinen Schweißgut

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%						A <sub>V-20°C</sub> in J	A <sub>V-40°C</sub> in J
		C	Mn	Si	Mo	Cr	V		
II.1	SG	0,068	2,69	0,27	0,44	3,24	0,12	14; 19; 15 <b>16</b>	19; 7; 12 <b>13</b>

Anschließend wurden Fülldrähte auf der Basis der Legierungsvariante III hergestellt und untersucht. Die ermittelten Werte zeigen die **Tab. 5.9 bis 5.11**.

**Tab. 5.9:** Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante III aus **Tab. 5.4**

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%					
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni
III.1	FD-M	0,16	1,67	0,54	0,48	0,68	2,95
III.1	8. Lage	0,095	1,53	0,43	0,47	0,81	3,23

**Tab. 5.10:** Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III, ermittelt am reinen Schweißgut

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%						R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>V-20°C</sub> in J	A <sub>V-40°C</sub> in J
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni				
III.1	SG	0,07	1,58	0,45	0,44	0,73	3,13	964	925	49; 54; 53 <b>52</b>	38; 43; 50 <b>44</b>

**Tab. 5.11:** Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III aus **Tab. 5.4**, ermittelt an einer Stumpfnahthverbindung mit Weldox 1100

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%						R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>V-20°C</sub> in J	A <sub>V-40°C</sub> in J
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni				
III.1	Stumpfnahthverb.	0,087	1,55	0,45	0,49	0,73	3,02	1133	1066	53; 46; 41 <b>47</b>	46; 48; 48 <b>47</b>

Eine weitere Erhöhung der Streckgrenze sollte im folgenden dadurch erreicht werden, dass der Chromgehalt leicht erhöht wird. Die damit verbundene Verringerung der Zähigkeit könnte über Zugabe von Nickel und Mikrolegierungselementen ausgeglichen werden. Die Ergebnisse sind in den **Tab. 5.12 bis 5.14** zusammengefasst.

**Tab. 5.12:** Chemische Analyse in Gewichtsprozent der Legierungsvariante III aus **Tab. 5.4** mit erhöhtem Nickelgehalt

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%						
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni	Zr
III.2	FD-M	0,14	1,16	0,47	0,41	0,96	3,89	0,13
III.2	8. Lage	0,071	1,01	0,30	0,40	1,04	4,27	0,057

**Tab. 5.13:** Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III mit erhöhtem Nickelgehalt, ermittelt am reinen Schweißgut

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%							R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>v-20°C</sub> in J	A <sub>v-40°C</sub> in J
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni	Zr				
III.2	SG	0,083	1,0	0,33	0,35	0,91	3,75	0,073	999	971	39 37 44 <b>40</b>	38 41 36 <b>38</b>

**Tab. 5.14:** Chemische Analyse und Kerbschlagwerte der Legierungsvariante III aus **Tab. 5.4** mit erhöhtem Nickelgehalt, ermittelt an einer Stumpfnahthverbindung mit Weldox 1100

Leg.-typ	Bestimmungsort	Chem. Zusammensetzung in Gew.-%							R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	A <sub>v-20°C</sub> in J	A <sub>v-40°C</sub> in J
		C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni	Zr				
III.2	Stumpfnahthverb.	0,095	1,10	0,35	0,42	0,94	3,77	0,063	1138	1067	50 35 37 <b>41</b>	39 51 41 <b>44</b>

Die Streckgrenze 1100 N/mm<sup>2</sup> wurde annähernd erreicht. Die Kerbschlagzähigkeit liegt im Bereich des Grundwerkstoffes.

### 5.3 Auswahl der Versuchsdrähte für weiterführende Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen beim Drahthersteller stellte sich heraus, dass nur die Legierungstypen I und III für die zu untersuchenden Stähle geeignet sein können. Deshalb wurden auch nur Chargen dieser Legierungstypen an die Forschungspartner zur weiteren systematischen Untersuchung weitergegeben.

Im einzelnen handelte es sich um folgende Versuchsdrähte (**Tab. 5.15**):

**Tab. 5.15:** Zuordnung der entwickelten Versuchsdrähte, die zur Untersuchung an den Forschungspartner P2 weitergegeben wurden

Bezeichnung (P1)	Charge (P1)	Leg.-typ nach Tab. 5.4	Bezeichnung (P2)	Bemerkung: Im Vgl. zu Angaben in Tab. 5.4
Megafil 745B	080349	I	B1	C↓; Cr↑; Mn↑
Megafil 1100B	202035	I	B2	-
Megafil 742B	058106	(I)	B3	C↓; Ni↓(!); Mn↑
Megafil 250M	240058	keine Zuordnung möglich	M1	-
Megafil 742M	011012	I	M2	C↓; Mn↑
Megafil 1100M	201011	I	M3	C↓
Megafil 1100M	202034	I	M4	Ni↑ (!)
Megafil 1100M	051152	I	M5	C↓; Mn↓
Megafil 807M	110322	I	M6	C↓; Cr↑
Megafil 1200M	223021	III	M7	C↓
Megafil 1200M	223020	III	M8	C↓; Mn↑

#### 5.4 Literatur

- /5.1/ AWS Spezifikation A5.28:  
Specification for low alloy steel electrodes and rods for gas shielded welding.  
Ausgabe 1996
- /5.2/ DIN EN 757:  
Schweißzusätze - Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung.  
Ausgabe 05/1997
- /5.3/ DIN EN 12535:  
Schweißzusätze - Fülldrahtelektroden zum Metall-Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung.  
Ausgabe 04/2000
- /5.4/ V.N. Semsin; R.S. Schron:  
Wärmebehandlung und Eigenschaften von Schweißverbindungen.  
Leningrad, Verlag: Maschinenbau, 1978
- /5.5/ Schweißweiser der Drahtwaren Drahtzug GmbH

## 6. Versuchsschweißungen und Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften von reinem Schweißgut und von Verbindungsschweißungen

### 6.1 Untersuchte Zusatzwerkstoffe - Herstellerangaben

Durch Partner 1 wurden die in **Tab. 5.15** aufgeführten Drahtelektroden als Versuchsdrähte für weiterführende Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um 8 Metallpulver- und 3 basische Fülldrahtelektroden, von denen 3 schon im Handel befindlich waren.

Bei den restlichen handelt es sich um Versuchschargen (**Tab. 6.1**).

**Tab. 6.1:** Angaben zu gelieferten Zusatzwerkstoffen

Bezeichnung bei P2	Firmenbezeichnung	Elektrodencharakteristik
M1	MEGAFIL 250 M	Schlackelose Metallpulver-Hochleistungs-Fülldrahtelektrode zum MAG-Schweißen DIN EN 758 : T 69 6 ZM M1 H5, Schutzgas : DIN EN 439 : M21, Durchmesser 1,2 mm
M2	MEGAFIL 742	Schlackelose Metallpulver-Hochleistungs-Fülldrahtelektrode zum MAG-Schweißen DIN EN 12535 : T 69 6 Mn 2Ni Cr Mo M M 1 H5 Schutzgas : DIN EN 439 : M21, Durchmesser 1,2 mm
M3	MF 1100 M	Metallpulverfülldraht, Durchmesser 1,2 mm
M4	MF 1100 M	Metallpulverfülldraht, Durchmesser 1,2 mm
M5	MEGAFIL 1100 M	Metallpulverfülldraht, Durchmesser 1,2 mm
M6	MEGAFIL 807 M	Mittellegierte Metallpulverdrahtelektrode, Durchmesser 1,2 mm; Schutzgas : DIN EN 439 : M2 Schweißgut ist vergütbar
M7	MEGAFIL 1200 M	Metallpulverfülldrahtelektrode, Durchmesser 1,2 mm
M8	MEGAFIL 1200 M	Metallpulverfülldrahtelektrode, Durchmesser 1,2 mm
B1	MEGAFIL 745 B	Hochbasische Fülldrahtelektrode, hochfester Typ für Feinkornbaustahl DIN EN 12535 : T 89 4 Mn 2Ni 1Cr Mo B M 3 H5 Mindeststreckgrenze: 890 N/mm <sup>2</sup> Schutzgas : DIN EN 439 : M21, Durchmesser 1,2 mm
B2	MF 1100 B	Basischer Fülldraht, Durchmesser : 1,2 mm
B3	MEGAFIL 742 B	Hochlegierte basisch Fülldrahtelektrode DIN EN 12535 : T 69 6Mn 2Ni Cr Mo B M 3H5 Schutzgas : DIN EN 439 : M21, CO <sub>2</sub> Durchmesser 1,2 mm; geprüft : TÜV; Zulassung : DB

Das reine Schweißgut aller Fülldrahtelektroden besitzt nach Herstellerangaben eine 0,2 - Dehngrenze von 842 N/mm<sup>2</sup> bis 990 N/mm<sup>2</sup>, Bruchdehnungswerte von 11 bis 32 % und Kerbschlagarbeitswerte von 41 J bis 68 J bei einer Prüftemperatur von -40 °C (**Tab. 6.2**, s. Anlage).

Damit waren alle gelieferten Versuchschargen formal als Zusatzwerkstoffe für die Stähle S 890 und S 960 geeignet. Insbesondere war zu untersuchen, ob einige von diesen auch als Schweißzusatz für den Stahl S 1100 anwendbar sein würden.

Zur besseren Unterscheidung wurden die Fülldrahtelektroden mit einer Kurzbezeichnung versehen. Die Metallpulverdrahtelektroden erhielten die Bezeichnungen M1 bis M8 und die basischen B1 bis B3. Die entsprechende Zuordnung ist den **Tab. 5.15 und 6.1** zu entnehmen.

Ausgehend von der Annahme, dass die mechanischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes eine erste Bewertungsgrundlage für ihre Eignung als Schweißzusatz für die hochfesten Stähle ist, wurde dieses zunächst hergestellt und untersucht.

## 6.2 Herstellung des reinen Schweißgutes

### 6.2.1 Probenahme

Das reine Schweißgut wurde gem. DIN EN 1597- 1 /6.1/ hergestellt. Als Werkstoff des Prüfbleches wurde S 355 mit einer Blechdicke von 15 mm verwendet. Die Maße des Prüfstückes sind in **Bild 6.1** dargestellt.

Fugenflanken und Beilagen wurden mit jeweils 2 Lagen des Schweißgutes der zu untersuchenden Fülldrahtelektrode gepuffert und anschließend mechanisch bearbeitet, so dass sie eben waren.

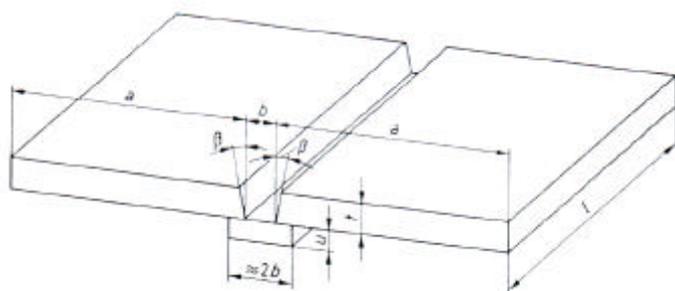
Das Prüfblech wurde zum Schweißen in einem Winkel vorgelegt, so dass nach dem Schweißen ein ebenes Blech vorlag. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Winkelschrumpfung bei basischem Schweißgut größer war als bei dem mit Metallpulverdraht erzeugten.

Die Proben zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes wurden für Kerbschlagbiegeproben gem. DIN EN 875 /6.2/ und für Zugproben gem.

DIN EN 876 /6.3/ entnommen (vgl. **Bild 6.1**).

Die Festlegung der Probenabmessungen erfolgten nach DIN EN 10002- 1 /6.4/ und betragen:

Anfangsdurchmesser	$d = 8 \text{ mm} \pm 0,06$
Anfangsmesslänge	$L_0 = 40 \text{ mm} \pm 0,4$
Versuchslänge gem. C.2.1	$L_c = 40 + 4 = 44 \text{ mm}$
Gesamtlänge	$L_t = L_c + 2d = 60 \text{ mm (76 mm)}$



Werkstoff des Prüfbleches:

S355

Maße:

$t = 15 \text{ mm}$

$a = 80 \text{ mm}$

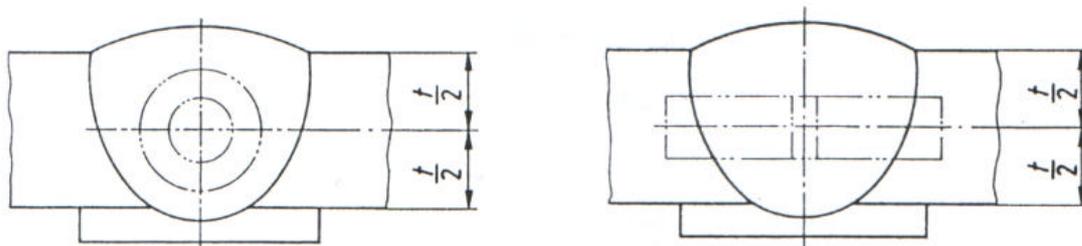
$b = 13 \text{ mm}$

$u > 6 \text{ mm}$

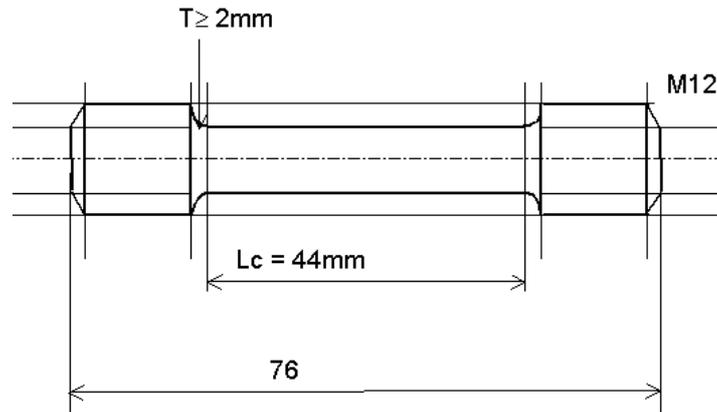
$\beta = 10^\circ$

$l > 150 \text{ mm}$

a) Maße des Prüfstückes



b) Lage der Zugprobe /6.4/ und der Kerbschlagprobe /6.3/ im Prüfstück



c) Verwendete Zugproben nach /6.4/

**Bild 6.1:** Herstellung und Prüfung des Schweißgutes gemäß DIN EN 1597-1 /6.2; 6.3; 6.4/

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißgutes erfolgte mit Hilfe eines Spectrolabs der Firma Spectro durch Abfunken der Oberfläche ebenfalls an den nach DIN EN 1597- 1 /6.1/ hergestellten Proben.

Ein Schweißgutblock wie nach DIN EN ISO 6847:2001 (D) /6.5/ vorgeschrieben, musste deshalb nicht angefertigt werden.

### 6.2.2 Schweißbedingungen - Datenübersicht zur Herstellung von reinem Schweißgut

Zum Verschweißen der Versuchschargen wurden in der Anfangsphase der Untersuchungen eine Schweißmaschine des Typs Kemppi Pro MIG 500 und im folgenden wegen aufgetretener Drahtförderprobleme eine ESAB LAG 400 verwendet.

Dabei entstand der Eindruck, dass das Schweißergebnis auch von der Wahl der Schweißstromquelle beeinflusst wird. Es war mit der ESAB LAG 400 besser möglich, die Versuchsdrähte mit geringer Streckenenergie relativ fehler- und spritzerfrei zu schweißen. Die für die Untersuchungen maßgeblichen Schweißungen wurden mit der ESAB LAG 400 durchgeführt, so dass ein unmittelbarer Schweißmaschineneinfluss auf die im Bericht dokumentierten Ergebnisse auszuschließen ist.

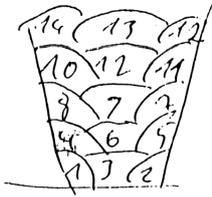
Alle Lagen der Verbindung zum Erzeugen reinen Schweißgutes wurden in der Position PA vollmechanisch ohne Vorwärmung und mit einer Arbeits- bzw. Zwischenlagentemperatur von max. 100 °C geschweißt. Dies wurde mittels Anlegethermometer überwacht.

Die Schweißparameter wurden in Anlehnung an die Angaben des Drahtherstellers unter Berücksichtigung der Tatsache gewählt, dass die Streckenenergie möglichst nicht mehr als 10 kJ/cm betragen sollte.

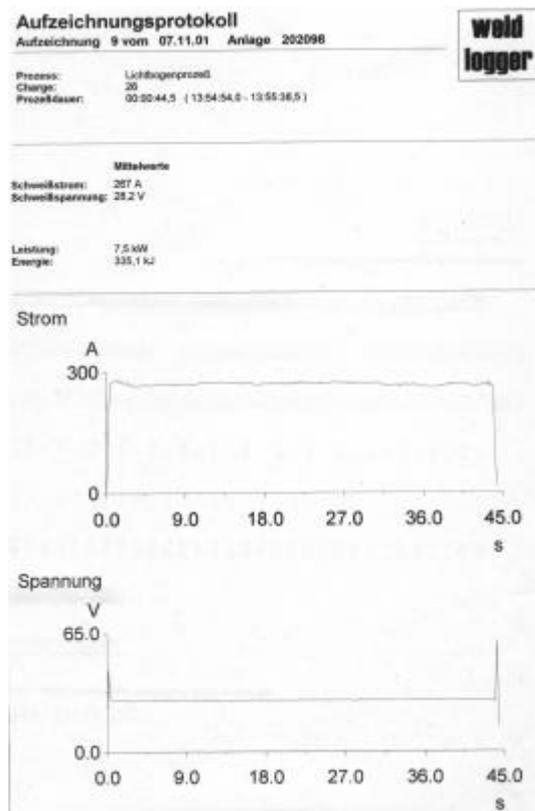
Mit Hilfe eines Weldloggers und der Memoryfunktion der Stromquelle wurden die Daten registriert (Beispiel siehe **Bild 6.2b**). Die Daten können **Tab. 6.3** entnommen werden.

Zusätzlich skizzierte der Schweißer den Lagenaufbau, der später durch die Mikroschliffe kontrolliert wurde (**Bild 6.2a**).

9,5 m/min Draht  
 255 A 28,1 V  
 255  
 232  
 259



- a) Skizze des Schweißers und zugehöriger Makroschliff (hier Bsp. reines Schweißgut B1)

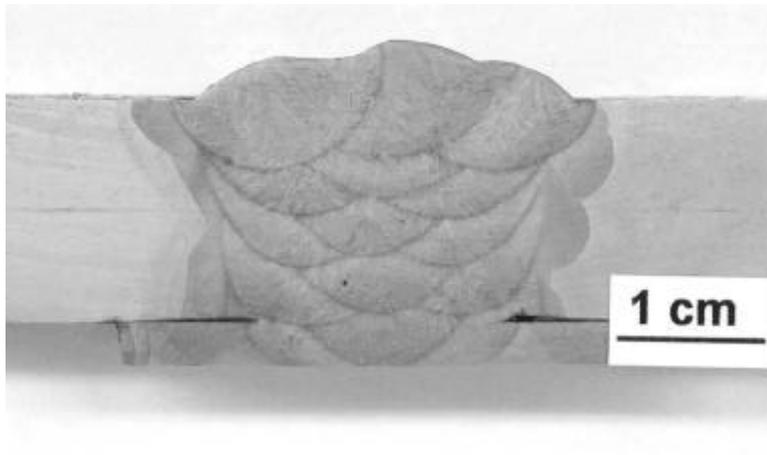


- b) Beispiel einer Aufzeichnung des Weldloggers

**Bild 6.2:** Beispiel für die Protokollierung einer Schweißung zur Herstellung von reinem Schweißgut aus den Versuchsdrähten zu weiteren Untersuchung (hier Bsp. reines Schweißgut B1)

Es war auffällig, dass die von Partner 1 empfohlenen Lichtbogenspannungen nicht realisiert werden konnten. Sie bewirkten einen unruhigen Lichtbogen, Spritzverluste und eine relativ starke Nahtüberhöhung. Partner 1 führte seine Untersuchungen mit einer Schweißstromquelle der Firma Fronius durch. Dieser Fakt gibt weiteren Grund zu der Annahme, dass das Schweißergebnis auch von der Wahl der Schweißmaschine abhängt. Durch eine Erhöhung der Spannung um 2 bis 3 Volt verbesserte sich der Abschmelzprozess. Der Lagenaufbau erfolgte so, dass für die Herstellung des reinen Schweißgutes in der Regel 13 bis 14 Lagen zum Füllen der Fuge erforderlich waren (vgl. **Bild 6.2** und **6.3**).

**Bild 6.3** zeigt, dass die Schweißungen nicht immer fehlerfrei ausgeführt werden konnten. Die befundenen Poren liegen aber im, nach /6.5/ für Bewertungsgruppe B, zulässigen Größenbereich (vgl. auch Abschnitt 7).



**Bild 6.3:** Lagenaufbau einer Probe zur Untersuchung reinen Schweißgutes im Querschliff (hier Bsp. reines SG M8)

### 6.3 Eigenschaften des reinen Schweißgutes der Fülldrahtelektroden

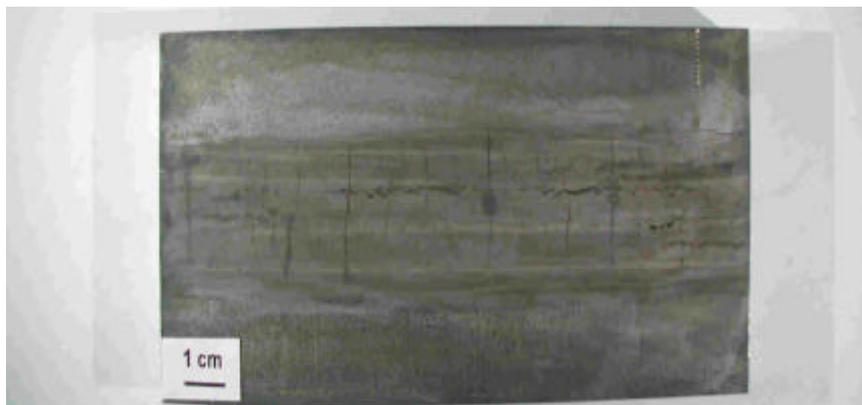
#### 6.3.1 Unregelmäßigkeiten

Alle Proben wurden während und nach dem Schweißen einer Sichtkontrolle unterzogen. I.d.R. waren die Schweißungen frei von Unregelmäßigkeiten, die man mittels einer Sichtprüfung feststellen kann.

Eine Ausnahme bildeten die Schweißungen mit den Versuchschargen B2 und M4. Wie in **Bild 6.4** dargestellt, wurden bei diesen Schweißungen Querrisse befundet.



a) B2



b) M4

**Bild 6.4:** Querrisse in den Schweißgutproben der Versuchschargen a) B2 und b) M4

Um beim Schweißen dieser Versuchschargen Rissfreiheit zu erreichen, wurden Testschweißungen unter folgenden Gesichtspunkten durchgeführt:

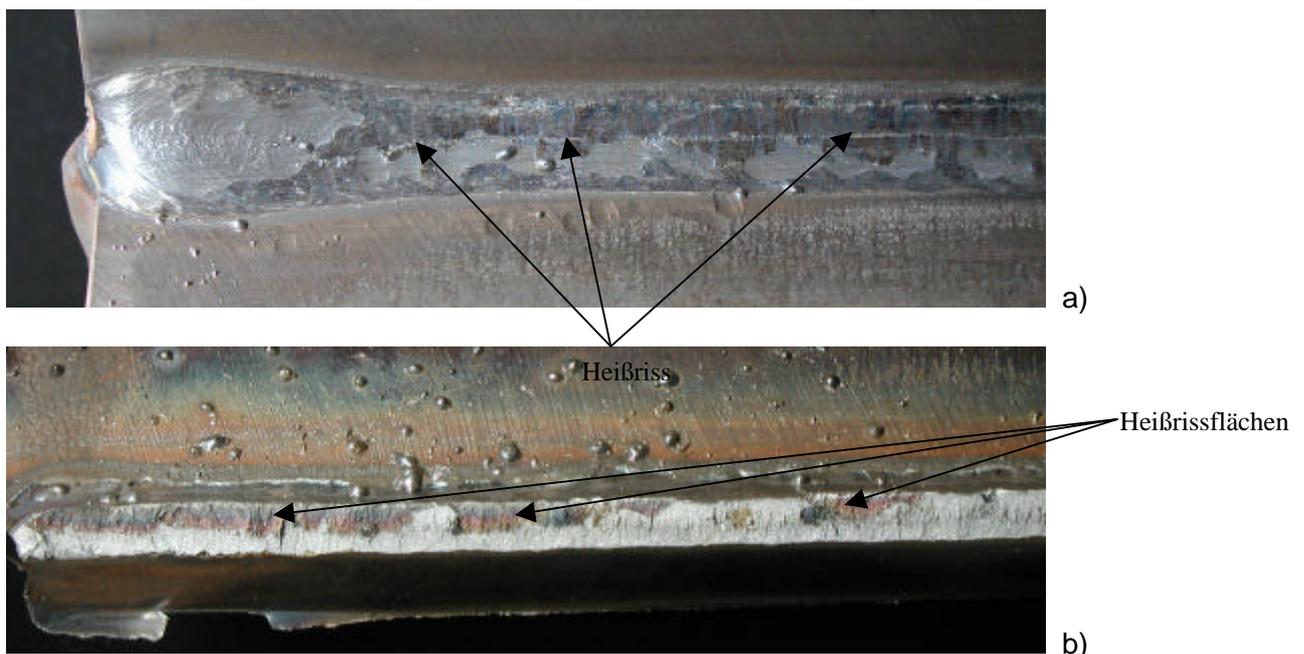
- Erhöhung der Streckenenergie
- Verwendung verschiedener Schutzgase bei konstanter Drahtvorschubgeschwindigkeit und konstanter oder geringerer Streckenenergie
- Verwendung von verschiedenen Schutzgasmengen bei konstanter oder höherer Streckenenergie
- veränderte Polung bei höherer Streckenenergie und höherer Schutzgasmenge
- veränderte Drahtvorschubgeschwindigkeit bei höherer Schutzgasmenge
- veränderte Schweißgeschwindigkeit bei höherer Schutzgasmenge
- veränderte Polung, stechende und schleppende Schweißung

Die Ergebnisse mit der Versuchscharge M4 blieben weiterhin unbefriedigend, die Ergebnisse mit der Versuchscharge B2 konnten verbessert werden.

Mit den Versuchschargen B2 und M4 wurden zusätzlich Heißrisstests nach DVS-Merkblatt 1004 Teil 3 /6.7/ durchgeführt.

**Tab. 6.4** im Anlage gibt einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen und die Ergebnisse.

**Bild 6.5** zeigt Beispiele aufgetretener Heißrisse. I.d.R. traten die Risse als Oberflächenrisse auf.



**Bild 6.5:** Bei Vorversuchen aufgetretene Heißrisse

- a) Draufsicht auf die Nahtoberfläche (Bsp. Versuch B2.2)
- b) Bruchfläche einer Bruchprobe (Bsp. Versuch B2.9)

Als geeignete Parameter wurden die Schweißungen B 2.10 und M 4.4 gewählt. Es konnten rissfreie Schweißungen hergestellt werden. Trotzdem wurden diese Versuchschargen aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da eine Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse nicht gewährleistet war. Die Härtewerte des reinen Schweißgutes waren außerdem sehr hoch (vgl. Abschn. 6.3.3).

Von allen Proben des reinen Schweißgutes wurden Querschliffe zur Kontrolle auf mögliche Nahtunregelmäßigkeiten in der Schliffebene und Dokumentation im Makroschliffbild, zur

Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißgutes und zu Härtemessungen hergestellt.

I.d.R. wurden als Unregelmäßigkeiten nur vereinzelt Poren gefunden (vgl. **Bild 6.3**).

Makroschliffbilder werden im Bericht nur beispielhaft zur Veranschaulichung bestimmter Sachverhalte abgebildet. Ein Bilderarchiv befindet sich beim PL und ist jederzeit einsehbar.

### **6.3.2 Chemische Zusammensetzung**

Die chemische Zusammensetzung der reinen Schweißgüter wurden mit einem Spectrolab der Fa. Spectro Kleve bestimmt.

Die Ergebnisse der chemischen Analysen des reinen Schweißgutes sind im Zusammenhang mit der Entstehung von Mischschweißgut bei Verbindungsschweißungen von Bedeutung und im Vergleich zu den Angaben des P1 in **Tab. 6.5** dargestellt (s. Anlage).

Es wird ersichtlich, dass sich das Schweißgut der verschiedenen Versuchschargen im C-, Cr-, Ni- und Mo-Gehalt unterscheidet.

Es gibt auch Unterschiede bei den Analysenwerten des P1 und denen, die bei P2 ermittelt wurden, wenn diese auch nicht bedeutend sind.

### **6.3.3 Härtemessungen**

An allen Makroschliffen wurden Härtemessungen ausgeführt. Diese erfolgten in Anlehnung an die DIN EN 1043-1 /6.8/. In Vorversuchen wurde untersucht, ob eine „flächendeckende“ Härtemessung einen Nutzen bringen kann. Dies war nicht der Fall, so dass im folgenden nur 4 Messreihen entsprechend **Bild 6.6** (s. Anlagelage) ausgeführt wurden. Die Messungen wiesen im Bereich des Schweißgutes z.T. starke Schwankungen auf. Diese werden durch Gefügeheterogenitäten (WEZ innerhalb des Schweißgutes durch die Folgelagen) oder Unregelmäßigkeiten verursacht.

Aufgrund der Messungen wurde ein durchschnittlicher Härtewert für das reine Schweißgut der jeweiligen Versuchscharge ermittelt (vgl. **Tab. 6.6**, s. Anlage). Dabei wurden starke „Ausreißer“ nicht einbezogen.

Die durchschnittlichen Härtewerte liegen zwischen 275 HV10 (M1) und 440 HV10 (M8). Die durchschnittlichen Härtewerte für die Versuchschargen M4 und B2 sind mit 440 HV10 und 470 HV10 sehr hoch. Diese Versuchschargen wurden auch aufgrund ihrer Rissanfälligkeit (vgl. Abschn. 6.3.1) nicht weiter untersucht. Deshalb liegen für diese Chargen auch keine Angaben für weitere mechanisch-technologische Eigenschaften vor (vgl. Abschn. 6.3.5).

### **6.3.4 Bestimmung des Nadelferritgehalt**

Nach /6.11/ ist im Schweißgut ein Gefüge aus Nadelferrit anzustreben, um ähnlich gute mechanisch/technologische Eigenschaften wie im Grundwerkstoff zu erzielen. Gefüge aus Nadelferrit besitzt eine sehr hohe Festigkeit bei gleichzeitig optimaler Zähigkeit, hervorgerufen durch die feine Verzahnung der Ferritkörner miteinander.

Die Bildung von Nadelferrit hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren, wie der chemischen Zusammensetzung, der Abkühlgeschwindigkeit, der Austenitkorngröße sowie der Art, Menge, Form und Verteilung der Einschlüsse ab. Aus / 6.11/ ist bekannt, dass das Legierungselement Titan in Kombination mit Sauerstoff durch die Bildung von Titanoxiden bevorzugte Keimbildungsstellen für den Nadelferrit schafft.

Zur Bestimmung des Nadelferritgehaltes wurden die Makroschliffe nochmals getrennt und Mikroschliffe präpariert.

Es wurden Aufnahmen der Gefüge des reinen Schweißgutes entsprechend dem Beispiel in **Bild 6.7** (s. Anlage) angefertigt. Für die Auswertung der Gefüge mussten die in 1000-facher Vergrößerung aufgenommenen Bilder verwendet werden. Das Gefüge der Schweißgüter ist so fein, dass bei geringerer Vergrößerung eine Zuordnung der Gefügebestandteile noch schwieriger war.

Die Ermittlung der Gefügeanteile erfolgte nach dem Linienschnittverfahren in Anlehnung an /6.9/. In **Tab. 6.7** sind die Ergebnisse zusammengefasst.

**Tab. 6.7:** Ergebnisse der Bestimmung der Gefügeanteile nach dem Linienschnittverfahren

reines Schweißgut	Gefügeanteile in % bestimmt in					
	mittlerer Decklage			Fülllage Mitte		
	PF <sup>1)</sup>	AF <sup>2)</sup>	FS <sup>3)</sup>	PF	AF	FS
B1/groß	2	67	31	26	74	-
B1/klein	-	-	-	36	64	-
B33	0	100	0	12	88	-
B3E	0	95	5	9	91	-
M1/längs	32	68	0	43	57	-
M1/quer	10	68	22	12	88	-
M2/längs	0	100	0			-
M2/quer/links	3	31	66	7	93	-
M2/quer/rechts	11	11	78	6	94	-
M3/links	-	-	-	16	84	-
M3/rechts	-	-	-	21	79	-
M5/links	0	100	0	8	92	-
M5/rechts	3	90	7	3	97	-
M6	0	100	0			-
M8	3	69	28	0	100	-

1) PF ... Primärferrit    2) AF ... Nadelferrit    3) FS ... Ferrit mit Sekundärphase (Bainit)

Aus **Tab. 6.5** wird deutlich, dass zum Teil hohe Nadelferritanteile auftreten. Im Rahmen dieses Themas konnten jedoch keine systematischen Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren auf die Nadelferritbildung, die Nadelferritmenge und die Zähigkeit hergestellt werden. Das Projekt lieferte hierzu nicht die geeigneten Daten, da die Zielstellung eine andere war. Da der Nadelferrit aber nach /6.11/ einen entsprechend hohe Bedeutung hat, bedarf es weiterführender Untersuchungen, vgl. Abschn. 8.

### 6.3.5 Mechanisch-technologische Eigenschaften

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften wurden Längszug- und Kerbschlagbiegeversuche an Proben aus reinem Schweißgut durchgeführt. Die Prüfung des reinen Schweißgutes im Feindehnungsversuch erfolgte nach DIN EN 10002-1 /6.4/, die Kerbschlagversuche nach DIN EN 875 /6.2/.

**Tab. 6.6** (s. Anlage) gibt einen Überblick über die ermittelten mechanisch-technologischen Kennwerte des reinen Schweißgutes im Vergleich zu den von P1 bestimmten Werten. Dabei wird ersichtlich, dass die vom Drahthersteller (P1) ermittelten Eigenschaften des Formänderungswiderstandes bei den Metallpulverdrähten mit Ausnahme der Drahtelektrode M3 und der basischen Versuchschargen nicht erreicht werden konnten. Geringere Werte ergaben sich bei der Bruchdehnung, wobei sich das Schweißgut der Metallpulverdrahtelektroden M7 und M8 fast vollständig spröde verhielt. Als Kriterium für die Kerbschlagarbeit sollten 47J bei einer Prüftemperatur von -40°C im reinen Schweißgut erreicht werden. Der Drahthersteller (P1) erzielte diesen Wert nur bei dem Schweißgut der Drahtelektroden M2, M6, B1 und B3. Durch die vorliegenden Untersuchungen konnten diese Ergebnisse mit Ausnahme von M1 und M6 nicht bestätigt werden. Zu beachten ist allerdings, dass die Zähigkeitswerte der Verbindungsschweißungen, die im folgenden untersucht werden, relevant sind. Bezüglich der erreichbaren Festigkeitswerte rechtfertigten die Ergebnisse der Versuchschargen M1 und M6 eine weitere Untersuchung der Drahtelektroden als Zusatzwerkstoffe für das Schweißen der Stähle S 890 und S 960.

### 6.3.6 Diffusibler Wasserstoffgehalt des reinen Schweißgutes

Von großer Bedeutung für die Kaltrissicherheit der Verbindungsschweißungen ist der diffusible Wasserstoffgehalt des abgeschmolzenen Schweißgutes.

Zur Messung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes mittels Warmextraktion bei 120 °C wurde ein Wasserstoffanalysator H<sub>2</sub>A 2002 der Firma Rosemount verwendet. Die Probenform wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 3690 /6.12/ gewählt.

Hinsichtlich des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im Schweißgut bestätigten sich die Angaben des Herstellers, der für alle nahtlosen Fülldrahtelektroden absolute Unempfindlichkeit gegen Feuchtigkeitsaufnahme und damit HD < 5 ml/100gSG garantiert. Damit entfiel das aufwendige Rücktrocknen der Fülldrahtelektroden auch nach längerer Lagerung.

Die Ergebnisse der Messungen des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im reinen Schweißgut sind in **Tab. 6.8** enthalten. Da die Fülldrahtelektroden B2 und M4 für die weiteren Untersuchungen nicht mehr in Betracht kamen, sind sie in **Tab. 6.6** nicht mehr aufgeführt.

Die diffusiblen Wasserstoffgehalte reichen von 0,48 cm<sup>3</sup>/100g bis 2,17 cm<sup>3</sup>/100g Schweißgut und zeigen, dass alle Fülldrahtelektroden sehr wenig Wasserstoff in das Schweißgut einbringen. Damit ist die Kaltrissgefahr durch Wasserstoff minimal.

Bemerkenswert ist jedoch die Tatsache, dass die Schweißgüter der basischen Fülldrahtelektroden die höchsten diffusiblen Wasserstoffgehalte aufweisen.

**Tab. 6.8:** Diffusible Wasserstoffgehalte der untersuchten Versuchschargen

Versuchscharge	H <sub>diff</sub> in cm <sup>3</sup> /100 g
B1	2,17
B3	1,87
M1	0,48
M2	0,67
M3	0,66
M5	1,05
M6	0,75
M7	1,39
M8	1,15

### 6.4 Auswahlkriterien geeigneter Fülldrahtelektroden

Als Kriterien für die Auswahl der geeigneten Drahtelektroden wurden Rissfreiheit des reinen Schweißgutes nach dem Schweißen, die mechanische Bearbeitbarkeit des Probematerials und die mechanisch- technologischen Eigenschaften festgelegt. Bezüglich der erzielbaren mechanischen Eigenschaften galten die Werte der 0,2- Dehngrenze und der Kerbschlagarbeit bei einer Prüftemperatur von – 40°C als Beurteilungskriterium (**Tab. 6.9**).

**Tab. 6.9:** Auswahlkriterien für Versuchschargen, die für weitere Untersuchungen geeignet sind

Proben-Nr.	Rissfreiheit <sup>1)</sup> vorhanden	mechanische Bearbeitbarkeit <sup>2)</sup> möglich	mechanische Eigenschaften <sup>3)</sup>	
			0.2-Dehngrenze (N/mm <sup>2</sup> )	Kerbschlag- arbeit (47J; -40°C) (J)
M1	x	x	759	69
M2	x	x	947	39
M3	x	x	901	37
M4	Risse	bedingt	-	-
M5	x	x	954	34
M6	x	x	733	48
M7	x	x	879	40
M8	x	x	849	20,6
B1	x	x	995	32
B2	Risse	bedingt	-	-
B3	x	x	875	43

- 1) Rissfreiheit des reinen Schweißgutes
- Sichtprüfung
  - Makroschliffe
- 2) mechanische Bearbeitbarkeit
- bei der Herstellung der Zug- und Kerbschlagbiegeproben (Sägen, Fräsen, Drehen)
- 3) mechanische Eigenschaften
- 0,2 Dehngrenze
  - Kerbschlagarbeit (47J; -40°C)

Die Rissfreiheit wurde durch Sichtprüfung während und nach dem Schweißen geprüft. In unklaren Fällen wurden Makroschliffe angefertigt.

Bei der mechanischen Bearbeitung kam es bei einigen Proben zu Rissen oder Brüchen, die eine Weiterbearbeitung unmöglich machten. Meist wiesen die Proben zu große Härten auf. Es traten vorwiegend Querrisse auf (vgl. **Bild 6.4**).

Da das Schweißgut B2 Heißrisse aufwies, wurde durch Variation der Vorwärmtemperatur und der Schutzgaszusammensetzung versucht, diese zu vermeiden. Dies gelang jedoch nicht.

Damit entfielen M4 und B2 für weitere Untersuchungen, vgl. Abschn. 6.3.1.

Die Fülldrahtelektroden M1 und M2 sind bereits im Lieferprogramm der Drahtzug Stein GmbH enthalten und für Stähle bis S 690 zugelassen.

Das Schweißgut von M2 (Megafil 742 M) besitzt jedoch einen so hohen Streckgrenzenwert, dass dafür eine Zulassung als Zusatzwerkstoff für den S 890 beantragt wird.

Gleiches gilt auch für die Drahtelektrode B1 (Megafil 745 B), für die bisher noch keine Zulassung beantragt wurde.

Nach Bewertung der Schweißguteigenschaften der anderen Versuchschargen erwiesen sich deshalb die Fülldrahtelektroden M3, M5, M7, M8, B1 und B3 als für weitere Untersuchungen geeignet.

Damit ergab sich eine denkbare Zuordnung geeigneter Fülldrahtelektroden zum Schweißen folgender Stähle (vgl. grüne Kennzeichnung in **Tab. 6.9**) :

S 890: M2, M3, M5, M7, M8, B3

S 960: M5, B1

S 1100: M5, M8, B1

Die Entwicklung der Versuchschargen M7 und M8 konnte durch den Drahthersteller erst Mitte bzw. Endes des Jahres 2002 abgeschlossen werden, so dass die Untersuchung des Schweißgutes nicht mehr im erforderlichen Umfang im Rahmen dieses Projektes erfolgen konnte.

### 6.5 Vorversuche an Verbindungsschweißungen

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes bestimmen nicht allein die der gesamten Schweißverbindung.

Diese werden durch die chemische Zusammensetzung und mechanisch- technologischen Eigenschaften der Grobkornzone in der WEZ bestimmt.

Deshalb wurde bei allen Schweißverbindungen die chemische Zusammensetzung des entstandenen Mischschweißgutes ermittelt (**Tab. 6.10**, s. Anlage zum Bericht).

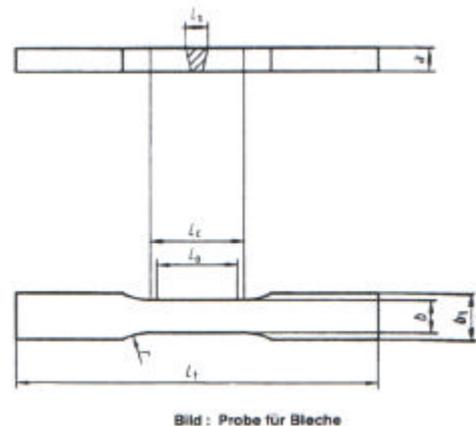
Zur besseren Planung der weiteren Untersuchungen wurden beispielhaft zwei Verbindungsschweißungen hergestellt und durch Zugversuche geprüft.

Als Grundwerkstoff wurde der S 960 verwendet, der sowohl mit den Versuchschargen M3 (undermatching) als auch mit B1 (overmatching) verbunden wurde. Es wurden doppelte V-Nähte mit einem Öffnungswinkel von 30° vorbereitet. Die Wurzellage wurde auf einer runden Keramikbadsicherung (Ø7mm) manuell geschweißt.

Die Querzugversuche wurden nach DIN EN 895 /6.10/ durchgeführt. Probeform und Probeabmessungen sind in **Bild 6.8** dargestellt:

#### Prüfstück :

Gesamtlänge	$L_t = 320 \text{ mm}$
Kopfbreite	$b_1 = 37 \text{ mm}$
Breite der parallelen Länge	$b = 25 \text{ mm}$
Probendicke	
max. Schweißnahtbreite	$L_s = 20 \text{ mm}$
Parallele Länge	$L_c > L_s + 60$
Anfangslänge	$L_o = 80 \text{ mm}$
Radius	$r > 25 \text{ mm}$



**Bild 6.8:** Querzugversuch an Verbindungsschweißungen nach DIN EN 895 /6.10/

Für alle weiteren Verbindungsschweißungen wurden Querzugproben mit diesen Abmessungen verwendet. Die Nahtüberhöhung aller Flachzugproben wurden durch mechanische Bearbeitung eingeebnet.

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in **Tab. 6.11** zusammengefasst. Es wurden jeweils 4 Proben geprüft.

**Tab. 6.11:** Mechanische Eigenschaften der Verbindungsschweißung S 960 mit B1 und M3

Pr.-Nr.	obere Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Brucheinschnürung	Bruchlage	Bemerkung
	$R_{eH}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)	Z (%)		
(rsB1)	(995)	(1057)	(20)	(55)		
B1/1	981	1062	17	48	GW	zäh
B1/2	981	1044	16	52	GW	zäh
B1/3	1017	1050	16	51	GW	zäh
B1/4	981	1056	16	50	GW	zäh
<b>Mittelwert</b>	<b>990</b>	<b>1053</b>	<b>16</b>	<b>50</b>		
(rsM3)	(901)	(936)	(6)	(19)		
M3/1	978	1011	7	25	SG	zäh
M3/2	965	1000	7	29	SG	zäh
M3/3	951	1011	6	22	SG	zäh
M3/4	986	1003	8	32	SG	zäh
<b>Mittelwert</b>	<b>970</b>	<b>1006</b>	<b>7</b>	<b>27</b>		

(rs ... ) Ergebnisse aus Versuchen mit reinem Schweißgut; hier zum Vergleich angegeben

Die Vorversuche zeigten erwartungsgemäß, dass durch das „overmatching“ der Bruch der Zugproben im Grundwerkstoff und durch das „undermatching“ im Schweißgut erfolgte. Bemerkenswert ist jedoch, dass das Schweißgut der Metallpulverdrahtelektrode durch Aufmischung mit dem Grundwerkstoff eine höhere Festigkeit erhielt als die des reinen Schweißgutes, während dies beim Schweißgut der basischen Versuchscharge nicht der Fall war.

Die Festigkeitseigenschaften des reinen Schweißgutes sind zum Vergleich in den Zeilen (rsB1) und (rsM3) eingetragen.

Das Bruchbild zeigt bei allen Proben einen Zähbruch.

Brucheinschnürung und Bruchdehnung weisen im Mischschweißgut der Metallpulverdrahtelektrode nur geringe Werte auf. Das basische Mischschweißgut zeigt höhere Werte.

Der Bruch im Grundwerkstoff S 960 zeigt eine ausgeprägte Mittenseigerung, die das Ergebnis nicht beeinflusst hat.

Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Werte der 0,2- Dehngrenze und der Zugfestigkeit bei allen Versuchen nur sehr wenig streuen und zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff nur geringe Differenzen bestehen.

Das niedrige Formänderungsvermögen des Mischschweißgutes M3 dokumentiert sich auch durch eine nicht ausgeprägte Streckgrenze beim Zugversuch.

Es kann festgestellt werden, dass die Versuchscharge B1 ein "matching" für den Stahl S 960 darstellt.

## 6.6 Mechanische Eigenschaften von Verbindungsschweißungen zur Bewertung der Versuchschargen

Die Vorversuche zeigten, dass durch Realschweißungen eine relativ genaue Bewertung der Eignung von Versuchschargen für Verbindungsschweißungen an den hochfesten Stählen möglich ist.

Deswegen wurden weitere Verbindungsschweißungen hergestellt und geprüft.

Eine Übersicht über alle Vorversuche zur Auswahl geeigneter Drahtelektroden für Verbindungsschweißungen in der Praxis enthält **Tab. 6.12**.

Je nach Blechdicke erfolgte die Schweißung mit V- oder Doppel-V- Nahtvorbereitung:

S 890 s = 12,2 mm V- Naht, Kapplage + 4 Fülllagen

S 960 s = 15,0 mm X- Naht, Wurzel + 8 Fülllagen

S 1100 s = 10,0 mm V- Naht, Kapplage + 4 Fülllagen.

Für die Wurzel- und Kapplagenschweißungen wurden im Durchschnitt 10 kJ/cm Streckenenergie in das Blech eingebracht.

Eine Ausnahme war bei der Verbindung B1 + S 1100 erforderlich.

Da das Verschweißen der basischen Fülldrahtelektrode mit geringer Streckenenergie nicht fehlerfrei möglich war, mussten mehrmals Fülllagen wieder herausgearbeitet werden.

**Tab. 6.12:** Vorversuche zur Auswahl geeigneter Drahtelektroden für Verbindungsschweißungen in der Praxis

Verbindung	mittlere Streckenenergie in kJ/cm	R <sub>p0,2</sub> / R <sub>m</sub> in MPa KV <sub>SG</sub> /KV <sub>WEZ</sub> in J Mittelwerte	Bemerkungen
S 890 mit M3	Kapplage 10,4 Fülllage 9,0	855/ 927 66/83 (RT) 47/51 (-40)	S = 12,2 mm; V-N; Kapplage + 7 Fülllagen <b>Bruch im GW</b>
M5	Kapplage 10,48 Fülllage 8,83	838/ 923 59/71 (RT) 40/46 (-40)	S = 12,2 mm; V-N; Kapplage + 7 Fülllagen <b>Bruch im GW</b>
B3	Kapplage 9,6 Fülllage 8,1	791/ 891 65/68 (RT) 58/77 (-40)	S = 12,2 mm V-N; Kapplage + 7 Fülllagen <b>Bruch im GW</b>
M7	Kapplage 18,0 Fülllage 12,4	853/908 34/64 (-40)	S = 12,2 mm; V-N; Kapplage + 7 Fülllagen <b>Bruch im GW</b>
S 960 mit B1	Wurzel 11,4 Fülllage 8,4- 9,0	997/ 1053 -	S = 15 mm; X- N Wurzel + 7 Fülllagen <b>Bruch im GW</b>
M3	Wurzel 11,7 Fülllage 8,18- 8,7	970/ 1006 -	S = 15 mm; X-N; Wurzel + 7 Fülllagen <b>Bruch im SG</b>
M5	Wurzel 12,7 Fülllage 9,4-9,8	983/ 1040 -	S = 15 mm; X-N; Wurzel + 7 Fülllagen <b>Bruch im GW</b>
S 1100 mit B1	Kapplage 10,36 Fülllage 11,2-11,6	945/ 1119 -	S = 10 mm; V-N; Kapplage + 4 Fülllagen <b>Bruch im SG</b>
M5 .	Kapplage 11,4 Fülllage 10,3	- /1006 -	S = 10 mm; V-N Kapplage + 4 Fülllagen <b>Bruch im SG</b>
M8	Kapplage 12,25 Fülllage 9,8-9,9	- /1047 -	S = 10 mm; V-N Kapplage + 4 Fülllagen <b>Bruch im SG</b>
B1	Kapp. 21,0 Fülllage 10,7-11,1	1087/1120 -	S = 10 mm; V-N Kapplage + 3 Fülllagen <b>Bruch im SG</b>

Deshalb wurde diese Schweißung mit neuen Parametern wiederholt. Durch höheres Wärmeeinbringen ließen sich fehlerfreie Schweißverbindungen erzeugen. Allerdings verzögert sich dadurch die Abkühlung deutlich, so dass zunächst mit einer Abnahme der Festigkeit in der WEZ gerechnet werden musste. Die Angaben in **Tab. 6.12** zeigen, dass sich durch diese Maßnahme die Festigkeit im Schweißgut erhöhte. Es ergab sich durch die gewählten Schweißparameter eine günstigere Aufmischung des Schweißgutes.

## 6.7 Zusatzwerkstoffauswahl für Schweißungen in der Praxis

Die Zusammenfassung der Vorversuchsergebnisse zeigt **Tab. 6.13**:

**Tab. 6.13:** Festigkeitswerte der untersuchten Verbindungsschweißungen

Versuch	obere Streckgrenze $R_{eH}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Zugfestigkeit $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Bruchlage
S890 /B3	791	891	GW
/M3	855	927	GW
/M5	838	923	GW
/M7	853	908	GW
S960 /B1	997	1053	GW
/M5	983	1040	GW
/M3	970	1006	SG
S1100 /B1	945/1086	1119/1120	SG
/M5	*	1006	SG
/M8	*	1047	SG

\* wegen spröden Verhaltens keine Streckgrenze feststellbar

Insgesamt ergeben sich damit folgende geeignete Versuchschargen – Stahl – Kombinationen:

M2, M3, M5, M7	+	S 890
B1, M5	+	S 960
B1 (M8)	+	S 1100 mit Einschränkungen

Die Kombination B1 + S 1100 stellt eine „undermatching“ Grenzkombination dar. Sie erfordert eine Optimierung der Schweißparameter und der Zusammensetzung des Mischschweißgutes mit dem Grundwerkstoff.

Eine „overmatching“ – Verbindung konnte mit den zur Verfügung stehenden Fülldrahtelektroden für den S 1100 nicht erzielt werden.

Die Versuchscharge M8 wurde für den Stahl S1100 für weitere Untersuchungen empfohlen, da es die derzeit letzte Versuchscharge des Drahtherstellers war, die in die Untersuchungen einbezogen werden konnte.

Es wurde angestrebt, für die Untersuchungen in den Pilotunternehmen je eine basische und eine Metallpulver-Versuchscharge auszuwählen.

Folgende Versuchschargen-Stahl-Kombinationen wurden für die Schweißungen in den Pilotunternehmen festgelegt:

B1 und M5 für die Stähle S890 und S960  
B1 und M8 für den Stahl S1100.

## 6.8 Literatur

- /6.1/ DIN EN 1597-1:  
Schweißzusätze - Prüfmethode - Teil 1: Prüfstück zur Entnahme von Proben aus reinem Schweißgut an Stahl, Nickel und Nickellegierungen.  
Ausgabe 10/1997
  
- /6.2/ DIN EN 875:  
Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Kerbschlagbiegeversuch - Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung.  
Ausgabe 10/1995
  
- /6.3/ DIN EN 876:  
Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen. Längszugversuch an Schweißgut in Schmelzschweißverbindungen.  
Ausgabe 10/1995
  
- /6.4/ DIN EN 10002-1:  
Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.  
Ausgabe 12/2001
  
- /6.5/ DIN EN ISO 6847:  
Schweißzusätze - Auftragung von Schweißgut zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung. Ausgabe 02/2002
  
- /6.6/ DIN EN 25817:  
Lichtbogenschweißverbindungen an Stahl; Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten.  
Ausgabe 09/1992
  
- /6.7/ DVS 1004-3:  
Heißrissprüfverfahren mit selbstbeanspruchenden Proben. Ausgabe 09/1990
  
- /6.8/ DIN EN 1043-1:  
Härteprüfung. Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschweißverbindungen.  
Ausgabe 02/96
  
- /6.9/ IIW-Doc. No. IX-1377-85:  
Guidelines for classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the light microscope.
  
- /6.10/ DIN EN 895:  
Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Querkzugversuch. Ausgabe 05/1999
  
- /6.11/ U. Diltthey et al:  
Untersuchungen der Randbedingungen für die Bildung von Nadelferrit in Schweißgütern bei schneller Abkühlung.  
Schweissen & Schneiden 53 (2001) Heft 7 S. 416ff
  
- /6.12/ DIN EN ISO 3690:  
Schweißen und verwandte Prozesse - Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im ferritischen Schweißgut.  
Ausgabe 03/2001