

Forschungsbericht

**Einfluß der Richtanalyse und des CEV-Wertes
auf die Schweißbeignung von Betonstahl
- Sachstandsbericht -**

T 2775

T 2775

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1997, ISBN 3-8167-4949-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

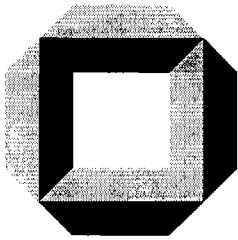
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail irb@irb.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>



Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

(Amtliche Materialprüfungsanstalt)
Universität Karlsruhe (TH)

Leitung:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. J. Blaß

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Saal

Forschungsvorhaben IV 1-5-751/94

Einfluss der Richtanalyse und des CEV-Wertes auf die Schweißbeugung von Betonstahl - Sachstandsbericht -

Durchgeführt mit Mitteln des Deutschen Institutes für Bautechnik, Berlin.

Schlußbericht

Projektleiter: Univ. Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Peter Knödel

Dipl.-Ing. Tanja Setz

Karlsruhe, März 1997

Kurzfassung

Der Sachstandsbericht zeigt, daß zur Zeit weder dokumentiert noch geregelt ist, bis zu welchen Grenzen der in Richtanalysen festgelegten Einzelwerte der chemischen Elemente bei Schweißstößen an Betonstählen unter baupraktischen Bedingungen noch bedingungsgemäße Eigenschaften sicher erreicht werden können. Bis zu welchen Grenzwerten bestimmter Einzelemente oder des CEV-Wertes in Abhängigkeit von Gefügestand, Durchmesser, Schweißverfahren, Stoßart, Schweißposition und Schweißparameter noch ohne besondere Maßnahmen geschweißt werden kann, ist dem Schrifttum nicht zu entnehmen, und es liegen hierzu auch bei den anerkannten Prüfstellen für Betonstähle keine dokumentierten Erfahrungen vor. Um genauere Aussagen über diese Zusammenhänge treffen zu können, sind experimentelle Untersuchungen notwendig. Dies ist besonders im Hinblick auf ENV 10080 von Bedeutung, da dort auch eine Erweiterung der Schweißbarkeit der Betonstähle bis zu einem Durchmesser von 40 mm vorgesehen ist.

Summary

This report shows, that at present there are neither documents nor standards which give the upper limits for chemical elements which guarantee that joints of reinforcing bars, which are welded under site conditions, satisfy the quality requirements. There were no publications that give the upper limits for the chemical composition or the carbon equivalent for which no special measures were required for welding depending on microstructure, bar size, welding procedure, type of joint, welding position and welding parameters. Also the laboratories testing reinforcing bars could not supply any documented experiences on this subject. Experimental analyses are necessary to make accurate statements about these correlations. This is most important with regard to ENV 10080, because it is envisaged there that reinforcing bars up to 40 mm diameter may be welded.

Résumé

Le rapport constate que les documents et les règlements actuels ne précisent pas la composition chimique du matériel ajouté dans les joints soudés d'acier à béton qui assure que les propriétés demandées sont obtenues sous conditions de chantier. Dans la littérature technique on ne peut pas trouver aucune information en ce qui concerne les limites supérieures de la composition chimique ou des valeurs CEV pour différentes structures du matériau, diamètres des barres, procédés de soudage, types de joint, positions et paramètres de soudage. Après notre connaissance, les autres instituts d'essai aussi ne possèdent pas telles informations. Parce que la norme ENV 10080 prévoit une extension de soudabilité de barre d'acier jusqu'à un diamètre de 40 mm, est très important de effectuer des recherches expérimentales pour préciser ces corrélations.

Forschungsvorhaben
Einfluss der Richtanalyse und des CEV-Wertes
auf die Schweißbeignung von Betonstahl
- Sachstandsbericht -

Kurztitel: Sachstand BSt-Richtanalyse-CEV

Univ. Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal
Dipl.-Ing. Peter Knödel
Dipl.-Ing. Tanja Setz

Dieser Bericht enthält 40 Seiten.

Karlsruhe, den März 1997

0. Inhalt

1. Einleitung	3
2. Forderungen bezüglich der Schweißbeignung in DIN 488 und DIN 4099	5
3. Forderungen bezüglich der Schweißbeignung in ENV 10080	7
4. Erzeugnisformen, Herstellungsarten	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Herstellen durch Kaltverformen	8
4.3 Herstellen durch Mikro-Legieren	9
4.4 Herstellen durch Wärmebehandlung	10
4.5 Herstellen durch Warmwalzen	11
5. Bisherige, systematische Untersuchungen zur Schweißbeignung von Betonstählen	11
6. Einfluß der chemischen Zusammensetzung	12
6.1 Allgemeines	12
6.2 Bewertung von Einzelelementen	13
6.3 Bewertung von Elementkombinationen	15
6.4 Bewertung unterschiedlicher Wirksummen	15
6.5 Vergleich der Grenzwerte in unterschiedlichen Normen	17
7. Einfluß der Temperaturführung	19
7.1 Allgemeines	19
7.2 Abschätzung der Vorwärmtemperatur nach DVS 1703	19
7.3 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften aus ZTU-Diagrammen	20
7.4 Festlegungen in American Welding Society	22
7.5 Festlegungen in TGL 23824	22
8. Erfahrungen der Prüfstellen	23
8.1 Stellungnahmen zu einer Anfrage des DIBt	23
8.2 Ergebnisse einer eigenen Umfrage	25
8.3 Bewertung	26
9. Bedarf der Industrie	27
10. Zusammenfassung	27
11. Vorschläge für weitere Forschung	29
12. Schrifttum	30
12.1 Normen, Richtlinien	30
12.2 Fachliteratur	33
12.3 Diplom- und Vertieferarbeiten	39
12.4 Sonstige	39

1. Einleitung

Die Zuverlässigkeit geschweißter Betonstahlverbindungen wird bisher in der Bundesrepublik Deutschland durch ein System sichergestellt, welches im wesentlichen aus drei Komponenten besteht:

- Für den Grundwerkstoff sind bestimmte Analysengrenzwerte festgelegt (DIN 488 Teil 1 [20]).
- Im Rahmen der Erstprüfung des Betonstahles sind Schweißeignungsversuche vorgeschrieben (DIN 488 Teil 7 [20]).
- Der ausführende Betrieb muß im Rahmen eines Eignungsnachweises nach DIN 4099 nachweisen, daß er in der Lage ist, die üblichen Schweißarbeiten sachgerecht auszuführen. Darüber hinaus gewährleisten eine besonders ausgebildete Schweißaufsichtsperson, sowie Arbeitsproben, die in einem bestimmten Raster zu erbringen sind, daß die aktuelle Schweißaufgabe nach dem Stand der Technik durchgeführt wird.

Langjährige Erfahrung mit diesem System zeigt (DIN 4099 seit 1972 [22], DIN 488 seit 1972 [19], vgl. DIN 488 von 1939 [18]), daß damit Schadensfälle an bewehrten Bauwerken aus Beton, die auf das Versagen der Schweißverbindungen zurückzuführen sind, wirksam verhindert werden können.

In jüngster Zeit sind jedoch Umstände eingetreten, die es erforderlich machen, den Problembereich Schweißen von Betonstahl erneut eingehend zu diskutieren:

- Im Zuge der Formulierung europäischer Normen wurde im ECISSTC 19/SC 1 beschlossen, die europäischen Regeln hinsichtlich der Begrenzung verschiedener Stahlbegleiter lockerer zu fassen als das deutsche Regelwerk. Dafür waren Überlegungen maßgebend, die den Stellenwert des Schweißens, die Wirtschaftlichkeit und die Qualitätssicherung betrafen.

Auf deutscher Seite ist man dagegen bestrebt, durch zusätzliche Festlegung eines genügend eng gefaßten Kohlenstoffäquivalentes (CEV) ausreichende Sicherheit gegen Schäden infolge schweißtechnischer Verarbeitung vorzuhalten.

- Die zukünftige Vorgehensweise zur Sicherstellung der Schweißbeignung innerhalb des neuen europäischen Normenwerkes ist gegenwärtig noch nicht eindeutig festgelegt. Möglich ist, daß eine Qualifikation der Betriebe, wie sie durch DIN 4099 [24] vorgesehen ist, nicht zu erfolgen braucht, da man davon ausgeht, daß die Regelung der chemischen Zusammensetzung des Betonstahles zur Gewährleistung der Schweißbeignung ausreicht.

Aus der geschilderten Situation ergab sich auf Seiten der Bauaufsicht zunächst die Frage, welcher Zahlenwert für das Kohlenstoffäquivalent zur Sicherstellung der Schweißbeignung festzulegen ist. Das DIBt befragte hierzu 1993 die anerkannten Prüfstellen für Betonstahl und bat um die Mitteilung von Erfahrungen und Stellungnahmen.

Nach eingehender Beschäftigung mit dieser Fragestellung kamen wir zu dem Schluß, daß eine Sicherstellung der Schweißbeignung nur über die Stoffnorm, ohne eine entsprechende Qualifikation des Betriebes, zu erhöhten Risiken führt, da sich bei jeder Festlegung der chemischen Zusammensetzung Anwendungsfälle ergeben können, in denen eine unsachgemäße schweißtechnische Verarbeitung des Betonstahls nicht ausgeschlossen werden kann.

Der bisher in der Bundesrepublik Deutschland übliche Qualifikationsnachweis der Verarbeitungsbetriebe kann durch entsprechende anerkannte Verfahrensanweisungen (aWPS gemäß DIN EN 288 [2]) ersetzt werden. Wenn die Verfahrensanweisungen präzise auf verschiedenste Anwendungsfälle zugeschnitten sind, und detaillierte Angaben zur Vorgehensweise in kritischen Fällen enthalten (Beispiel: Festlegung einer Mindest-Streckenenergie in Abhängigkeit von CEV und Stabdurchmesser) erlaubt dies eine entsprechend großzügigere Festlegung der Grenzen verschiedener Legierungselemente.

Damit läßt sich ausreichende Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit geschweißter Betonstahlverbindungen dadurch auf wirtschaftliche Weise erreichen, daß einerseits eine Begrenzung der Stahlbegleiter in einer Stoffnorm erfolgt und andererseits Festlegungen von Verfahrensanweisungen getroffen werden.

Ziel dieses Berichtes ist es, festzustellen, wieweit hierfür schon ein genügend abgesicherter Kenntnisstand vorliegt und in welcher Hinsicht noch Klärungsbedarf

herrscht. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf unzulässigen Aufhärtungen und dem damit verbundenen Zähigkeitsverlust. Effekte der Festigkeitsabnahme werden nicht betrachtet, da die Festigkeiten ausreichend hoch sind.

Zunächst werden die Forderungen bezüglich der Schweißbeignung in DIN 488 und DIN 4099 denen der ENV 10080 gegenübergestellt. Dann werden die unterschiedlichen Herstellungsarten beschrieben, da diese von unterschiedlichen Grundwerkstoffen ausgehen und zu unterschiedlichen Gefügeständen führen. Es folgt eine Zusammenstellung der bisherigen, systematischen Untersuchungen zur Schweißbeignung von Betonstählen.

Nach einer kurzen, allgemeine Bewertung der einzelnen Stahlbegleiter werden dann Verfahren zur Abschätzung der Wärmeführung angeführt, die aus dem allgemeinen Stahlbau bekannt sind.

Anschließend werden die Erfahrungen der Prüfstellen in einem gesonderten Abschnitt zusammengefaßt. Es handelt sich zwar hierbei vorwiegend um zahlenmäßig nicht belegtes Wissen, durch den unmittelbaren Bezug zur Problemstellung besitzt dieses jedoch einen sehr hohen Stellenwert.

Die in der anwendenden Industrie eingesetzten Schweißverfahren werden kurz zusammengestellt, um eine Zielrichtung für den weiteren Forschungsbedarf besser definieren zu können.

Nach einer Zusammenfassung werden Vorschläge für die weitere Forschung unterbreitet.

Eine ausführliche Darstellung des Schrifttums zum Schweißen von Betonstahl soll als Basis für weitere Forschungsarbeiten dienen.

2. Forderungen bezüglich der Schweißbeignung in DIN 488 und DIN 4099

Nach DIN 488 [20] ist die Schweißbeignung durch zwei unterschiedliche Bedingungen sichergestellt:

- Für die wichtigsten Stahlbegleiter sind folgende Grenzwerte (als maximaler Einzelwert) festgelegt:

Grenzwerte nach DIN 488 für BSt 500 S (Schmelzanalyse):													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
220			50	50									12
Grenzwerte nach DIN 488 für BSt 500 S (Stückanalyse):													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
220			55	55									13
Anteile in %/1000													

Da hier außer dem C-Gehalt keine weiteren Härtebildner genannt sind, und ein Wert von den Verfassern der DIN 488 nicht ins Auge gefaßt worden war, gibt die Ermittlung des CEV-Wertes keinen Sinn.

In den Zulassungen für die einzelnen Werke sind diese Angaben durch eine Richtanalyse präzisiert, z.B.:

Richtanalyse für BSt 500 RTS gemäß Zulassung:													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
220	350	1200	40	40	400	300	50	250	30				20
Anteile in %/1000													

Werden hier alle Elemente an der oberen Grenze gefahren, tritt ein CEV-Wert von 0,513% auf.

- Zusätzlich ist im Rahmen des Zulassungsverfahrens durch Schweißbeignungsversuche nachzuweisen, daß auch die geschweißten Verbindungen des hergestellten Stahls allen in DIN 488 geforderten Eigenschaften entsprechen.

Die in DIN 488 Ausgabe 1972 [19] noch enthaltenen nicht schweißgeeigneten Stahlsorten sind in DIN 488 Ausgabe 1984 bzw. 1986 [20] nicht mehr enthalten.

Hinsichtlich der schweißtechnischen Verarbeitung wird durch DIN 4099 [24] ein Eignungsnachweis des ausführenden Betriebes gefordert. Dieser stellt sicher, daß außer Schweißern mit spezieller Qualifikation nach DVS 1146 [28],[29] auch eine nach DVS 1175 [30],[31] ausgebildete Schweißaufsichtsperson tätig ist und auch bei kritischen Schweißaufgaben die Einhaltung der notwendigen Verfahrensweisen (z.B. ausreichende Streckenenergie, Vorwärmtemperatur) gewährleistet wird.

Dieses System aus Forderungen an den Werkstoff und Forderungen an den ausführenden Betrieb hat sich bewährt. Wo immer Schäden in der Bundesrepublik bekannt geworden sind, waren diese auf Verstöße gegen dieses System und seine Regelungen zurückzuführen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß eine allgemeine Schweißbeignung der Betonstähle bisher in der Bundesrepublik Deutschland nicht unterstellt wurde. Erst die zusätzlich geforderte ausreichende Qualifikation des ausführenden Betriebes stellte sicher, daß die ausgeführten Schweißverbindungen bedingungsgemäß sind.

3. Forderungen bezüglich der Schweißbeignung in ENV 10080

In ENV 10080: 1995 [6] ist außer den Maximalwerten für die wichtigsten Elemente ein CEV-Grenzwert festgelegt:

$$CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Grenzwerte nach ENV 10080:1995 (Schmelzanalyse):													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
220			50	50									12
Anteile in %/1000 CEV < 500													
Grenzwerte nach ENV 10080:1995 (Stückanalyse):													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
220			55	55									13
Anteile in %/1000 CEV < 520													

Hierzu wird in Abs. 6.2.3 ausgeführt: „Die Stähle gelten als schweißgeeignet Diese Eignung bezieht sich z.B. auf das Metall-Lichtbogenschweißen, Schutzgasschweißen, Abbrennstumpfschweißen, Reibschweißen und Widerstandspunktschweißen.“

Schweißbeignungsversuche sind dort nicht vorgesehen.

Bewertung:

Im Gegensatz zu dem deutschen Regelwerk soll die Schweißbeignung nach ENV 10080 nur über die chemische Zusammensetzung sichergestellt werden. Da außer C, P, S und N keine Elemente in den Einzelwerten begrenzt sind (eine Richtanalyse für das einzelne Produkt ist offenbar auch nicht vorgesehen), kann die Auswirkung der Härtebildner nur über den CEV-Wert erfaßt werden.

4. Erzeugnisformen, Herstellungsarten

4.1 Allgemeines

In der Bundesrepublik Deutschland haben sich auf dem Markt die Betonstahlerzeugnisse mit Nennstreckgrenzen von 500 N/mm² durchgesetzt. Die in DIN 488 [20] vorgesehene Güte BSt 420 S (III S) wird nur noch in unbedeutenden Mengen hergestellt.

Die Stähle der Güte BSt 500 (IV) werden nach drei unterschiedlichen Herstellungsverfahren hergestellt. Die daraus resultierenden unterschiedlichen Eigenschaften werden in den folgenden Abschnitten umrissen.

4.2 Herstellen durch Kaltverformen

Ausgangsmaterial für den durch Kaltverformen hergestellten BSt 500 RK ist ein unlegierter Qualitätsstahl, der im Naturzustand dem St 37 entspricht. Eine typische Analyse ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben, hierfür wurden die Mittelwerte aus 20 aufeinanderfolgenden Schmelzen eines deutschen Herstellers gebildet.

Bezeichnung: BSt 500 RK, Mittelwerte (nach Pittack 1994)													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
70		507			209	107	31	116					
Anteile in %/1000							CEV nach ENV 10080: 204						

Das Endprodukt wird durch Aufwalzen der Rippen im kalten Zustand und kontinuierliches oder abschnittsweises Recken mit Reckgraden von bis zu 5% hergestellt.

Das Erzielen der Endfestigkeit durch Kaltverformen kann in schweißtechnischer Hinsicht zu folgenden Problemen führen:

- Durch den Wärmeeintrag wird in der Wärmeeinflußzone (WEZ) die Wirkung der Kaltverformung durch Rekristallisation aufgehoben. Hierzu ist ein Auflösen des Kornverbandes und ein Aktivieren neuer Kristallisationskeime erforderlich. Da dieser Vorgang Zeit benötigt, kann durch möglichst geringen Wärmeeintrag und demzufolge kurze Verweilzeit im Temperaturbereich 700 ÷ 900 °C gegengesteuert werden.
- In der WEZ kann künstliche Alterung auftreten (vgl. Maierhöfer [135], Grothe [136], Timmers [139], Kammel [134]). Dies kann dadurch verhindert werden, daß der Stickstoffgehalt auf sehr geringe Werte begrenzt wird (siehe auch Abs. 6.2.8). In DIN 488 [20] ist als Grenzwert 0,012 % festgelegt, nach ENV 10080 beträgt der Grenzwert ebenfalls 0,012 %.

4.3 Herstellen durch Mikro-Legieren

Ausgangsmaterial für den durch Mikro-Legieren hergestellten BSt 500 RU ist ein unlegierter Baustahl. Durch gezielte Zugabe von Mn, Si und V werden hohe Festigkeiten bei ausreichenden Zähigkeitseigenschaften erzielt. Eine typische Analyse ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Bezeichnung: BSt 500 RUS (nach Traub [140])													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
180	230	1160	13	25	300	160					43		
Anteile in %/1000							CEV nach ENV 10080: 434						

Im allgemeinen wird die obere C-Grenze gemäß DIN 488 [20] weitgehend ausgenutzt. Zumindest bei größeren Durchmessern wird der obere Grenzwert des V-Gehaltes höher liegen als der Wert in der Tabelle.

Das Endprodukt weist einen über den Querschnitt gleichmäßigen Gefügestand auf. Aufgrund der hohen Anteile an Härtebildnern neigt das Material zum Aufhärten, wenn beim Schweißen zu hohe Abkühlgeschwindigkeiten auftreten. Schweißtechnische

Verarbeitungsregeln (z.B. erforderliche Streckenenergie, Vorwärmtemperatur) können aufgrund der Naturhärte aus dem CEV-Wert abgeleitet werden (siehe Abs. 7).

4.4 Herstellen durch Wärmebehandlung

Ausgangsmaterial für den durch Wärmebehandlung hergestellten BSt 500 RTS ist ein unlegierter Baustahl, der erhöhte Gehalte an Mn und Si enthält. Aus einer Untersuchung von Traub [140] an Stäben mit Durchmesser 12 bis 28 mm lassen sich folgende Mittelwerte ermitteln, wobei sich die Bestimmung der CEV-Werte auf die Berücksichtigung der dort angegebenen Elemente beschränken muß:

Bezeichnung: BSt 500 RTS, Mittelwerte (nach Traub [140])													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
168	233	762	15	25									
Anteile in %/1000							CEV nach ENV 10080: 295						

Aus einem Schreiben des „DIBt 1993“ sind folgende Maximalwerte gemäß Zulassung zu entnehmen:

Bezeichnung: BSt 500 RTS (Maximalwerte gemäß Zulassung, DIBt 1993)													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
200	450	1200	40	40	400	200	50	200	30	10			12
Anteile in %/1000							CEV nach ENV 10080: 490						

Nach dem Aufwalzen der Rippen in „warmem“ Zustand wird der Stahl in einer Sprühstrecke mit Wasser abgeschreckt. Dabei bildet sich in der Randzone zunächst Martensit. Durch die Wärmemenge im Kern des Stabes wird die Randzone anschließend wieder durchwärmt (Anlassen), so daß im Endzustand ein Randgefüge mit ausreichender Zähigkeit entsteht (TEMPCORE - Verfahren, vgl. Rehm u. a. [91]). Der Stahl hat damit über den Querschnitt unterschiedliche Festigkeits-, Härte- und Gefügezonen.

In schweißtechnischer Hinsicht können folgende Probleme auftreten:

- Durch den Wärmeeintrag wird in der Wärmeeinflußzone (WEZ) die Wirkung der Aufhärtung aufgehoben, es treten Festigkeitseinbußen auf.
- In der WEZ kann durch zu geringen Wärmeeintrag (z.B. bei Kreuzstößen als Heftverbindungen) erneute Aufhärtung auftreten.

Beiden Effekten kann durch richtige Wärmeführung beim Schweißen gegengesteuert werden. In der Praxis scheinen die genannten Probleme nicht aufzutreten (Rehm u. a. [91]).

4.5 Herstellen durch Warmwalzen mit anschließendem Kaltrecken

Ausgangsmaterial für den durch Warmwalzen und anschließendes Kaltrecken hergestellten BSt 500 WR ist ein unlegierter Baustahl, der im Naturzustand dem St 37 entspricht. Eine typische Analyse ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Bezeichnung: BSt 500 WR, Mittelwerte aus 9 Schmelzen													
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N
174	251	1100	21	34	300	174		138					
Anteile in %/1000							CEV nach ENV 10080: 421						

Durch Aufwalzen der Rippen in warmem Zustand und kontinuierliches oder abschnittsweises Recken wird das Endprodukt hergestellt.

Das Erzielen der Endfestigkeit durch Kaltverformen kann in schweißtechnischer Hinsicht zu den bereits für BSt 500 RK aufgeführten Problemen führen.

5. Bisherige, systematische Untersuchungen zur Schweißbeignung von Betonstählen

In einer frühen Arbeit untersucht Rußwurm 1972 die schweißtechnische Verarbeitung von Betonstählen und die dabei zu erzielenden mechanischen Eigenschaften (vgl. auch Rußwurm 1973 [106]).

Eine übersichtliche Darstellung der schweißgeeigneten Stähle für das Bauwesen mit einer verständlichen Erläuterung der Entstehungsmechanismen unerwünschter Eigenschaften wird von Franke 1980 [57] gegeben.

In einer neueren Veröffentlichung von Rußwurm 1993 [115] werden Eigenschaften und Verwendung der Betonstähle praxisorientiert dargestellt. Hier wird „Sprödbruchempfindlichkeit durch Härteneigung“ dem Werkstoff IV S, warmgewalzt, mikrolegiert in Verbindung mit Kreuzungsstößen und den Schweißverfahren E/MAG und RP (Widerstandspunktschweißen) zugeordnet (dort Tabelle 8.01). Weiter wird dort ausgeführt: „Die gelegentlich höheren Cu-Gehalte (max. 0,45 %, Erweiterung auf 0,60 % Cu nur aufgrund umfangreicher, zusätzlicher Untersuchungen möglich) sind schweißtechnisch nicht relevant.“

6. Einfluß der chemischen Zusammensetzung

6.1 Allgemeines

Aus den Bereichen allgemeiner Stahlbau, Maschinen- und Anlagenbau, Schiffbau, u.a. liegt ein umfangreicher Kenntnisstand über die schweißtechnische Verarbeitung unlegierter Kohlenstoffstähle vor. Spektakuläre Schadensfälle, z.B. Zoo-Brücke, Berlin, Liberty-Schiffe, rückten die Bedeutung der Sprödbruchsicherheit geschweißter Verbindungen ins Bewußtsein und initiierten weltweit große Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet. Eine chronologische Schrifttumssammlung zum Thema Sprödbruch seit 1938 findet sich in Baehre/Steidl [141].

Für den bauaufsichtlichen Bereich ist von den vorgenannten Sparten der allgemeine Stahlbau von Bedeutung. Für diesen stehen praxiserprobte Regeln und Verfahren zum Herstellen geschweißter Verbindungen mit ausreichender Sprödbruchsicherheit zur Verfügung.

Nachfolgend werden die wichtigsten Wirkungen der Stahlbegleiter knapp zusammengestellt. Zahlenwerte für bestimmte Wirkgrenzen sind Wirtz [131] entnommen.

6.2 Bewertung von Einzelelementen

6.2.1 Kohlenstoff

Zunehmender Kohlenstoffgehalt bewirkt zunehmende Festigkeits- und abnehmende Zähigkeitseigenschaften. Im allgemeinen wird ein Gehalt von $0,20\% < C < 0,22\%$ als obere Grenze der schweißtechnischen Verarbeitbarkeit angesehen. Diese Regel ist insofern nur eine grobe Richtlinie, als bei entsprechend hohen Ausgangstemperaturen des Grundwerkstoffes (z.B. durch Vorwärmen) und hohem Energieeintrag während des Schweißens auch Stähle mit höherem C-Gehalt mit befriedigendem Ergebnis geschweißt werden können. Andererseits können tiefe Ausgangstemperatur und extrem geringe Energiezufuhr (z.B. unsachgemäßes Heften, Zündstellen) auch unterhalb des angegebenen C-Gehaltes örtlich zu unzulässig hohen Martensitgehalten führen.

6.2.2 Silizium

In Gehalten über 0,5% bewirkt Silizium Festigkeitszunahmen.

6.2.3 Mangan

Zunehmender Mangangehalt erhöht die Festigkeitseigenschaften bei nur mäßiger Abnahme der Zähigkeitseigenschaften.

6.2.4 Phosphor

Zunehmender Phosphorgehalt bewirkt höhere Verschleißfestigkeit, verringert aber ebenfalls die Verformungseigenschaften (vgl. auch [65], [95]).

6.2.5 Schwefel

Zunehmender Schwefelgehalt erhöht die Warmrissneigung (Rotbrüchigkeit).

6.2.6 Kupfer

Kupfer gelangt in unlegierte Baustähle unbeabsichtigt bei der Erschmelzung aus Schrott. Kupfer in Gehalten bis 0,4 % wirkt als Härtebildner (vgl. S. 684 [129]). Höherer Kupfergehalt kann Lotbrüchigkeit bewirken.

6.2.7 Chrom

Chrom gelangt in unlegierte Baustähle unbeabsichtigt bei der Erschmelzung aus Schrott. Es wirkt festigkeitssteigernd und zähigkeitsmindernd.

6.2.8 Stickstoff

Zunehmender Stickstoffgehalt erhöht die Anfälligkeit des Stahles für natürliche Alterung sowie Reckalterung. (Zusammenfassende Darstellungen über die dabei auftretenden Mechanismen und deren Auswirkungen auf Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften vgl. [135], [136], [139].)

6.2.9 Wasserstoff

Atomarer Wasserstoff kann als Kristallwasser in den Schweißzusatzwerkstoffen zur Verfügung stehen und auf diese Weise in die Schweißnaht gelangen. Er kann dort durch Diffusion zu örtlichen Fehlstellen auch ohne äußere Einwirkungen zu spröden Brüchen führen (Wasserstoffversprödung, verzögerte Rißbildung).

Nach Dilthey u. a. [54] wird die Diffusion von Wasserstoff bei Raumtemperatur durch Cr, Ni, Mn und C stark behindert. Zunehmende Kaltverformung (Reckgrad) bewirkt ebenfalls eine Abnahme des Diffusionskoeffizienten. Die Diffusionskoeffizienten von Wasserstoff im Schweißgut aus basisch umhüllten Elektroden sind etwa doppelt so groß wie die Diffusionskoeffizienten in Schweißgut aus Rutil umhüllten Elektroden.

6.3 Bewertung von Elementkombinationen

Auf Elementkombinationen, denen innerhalb der Schweißtechnik eine gewisse Bedeutung beigemessen wird, wird nicht weiters eingegangen, da sie nur bei sogenannten Schwarz-Weiß-Verbindungen (niedrig legierter Baustahl „schwarz“ und hochlegierter Chrom-Nickel-Stahl „weiß“) von Interesse sind und diese Verbindungen nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens sind.

6.4 Bewertung unterschiedlicher Wirksummen

Zur Bewertung der unterschiedlichen Einflüsse der einzelnen Elemente bedient man sich sogenannter Wirksummen. Sie sollen einen Vergleich von Werkstoffen mit unterschiedlichen Gehalten an Stahlbegleitern ermöglichen.

Die bekannteste Wirksumme ist das Kohlenstoffäquivalent (Abkürzung C_{äq}, CEQ, CEV, EC, K-Wert, o.ä.). Im Kohlenstoffäquivalent wird die Wirkung der Einzelelemente mit der Wirkung des Kohlenstoffes verglichen. Die in der Schweißtechnik gebräuchlichsten CEV-Formeln sind:

$$\text{CEV} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15$$

(aus ENV 10080 [6])

$$\text{CEV} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{V})/5 + (\text{Mo} + \text{Si})/4 + \text{Ni}/15 + \text{Cu}/13 + \text{P}/2$$

(nach Voldrich/Harder und Societe National de chemin de fer, zitiert aus Wirtz [131])

$$\text{CEV} = \text{C} + \text{Mn}/6 + \text{Cr}/5 + \text{Ni}/40 + \text{Mo}/4 + \text{Si}/24$$

(nach Winn [130])

$$\text{CEV} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{V})/10 + \text{Ni}/20 + \text{Cu}/40 + \text{Mo}/50$$

(nach Winterton, zitiert aus Wirtz [131])

$$\text{CEV} = \text{C} + \text{Si}/30 + \text{Mn}/20 + \text{Cu}/20 + \text{Ni}/60 + \text{Cr}/20 + \text{Mo}/15 + \text{V}/10 + 5\text{B}$$

(nach Matsui/Inagaki zitiert nach BAM [142])

Von Wirtz [131] werden außer den genannten noch zwölf weitere, unterschiedliche Formeln zur Bewertung der begleitenden Elemente zitiert. Auffällig ist dabei, daß z.B. der Divisor für Mo zwischen 3 und 50 variiert.

Wirtz bemerkt, daß folgende wesentlichen Einflußgrößen für eine Aufhärtung durch das CEV nicht erfaßt werden:

- Herstellungsverfahren
- Gefügekorngröße
- Werkstückabmessungen
- Werkstücktemperatur
- Schweißnahtform und -dicke
- Schweißverfahren
- Elektrodendurchmesser
- Umhüllungstyp

Wirtz führt weiter an, daß aus diesem Grunde der Wert des CEV-Konzeptes umstritten ist, daß bisher dem Praktiker jedoch keine genauere und einfachere Methode gegeben werden konnte.

Mit einer Tabelle nach Mrosko (vgl. unten), die außer dem CEV-Wert nach Elektrodendurchmessern, Blechdicken und Stumpf- bzw. Kehlnähten unterscheidet, können wesentlich differenziertere Aussagen getroffen werden. Hierauf beruhen auch die Vorschläge in DVS Merkblatt 1703 [32].

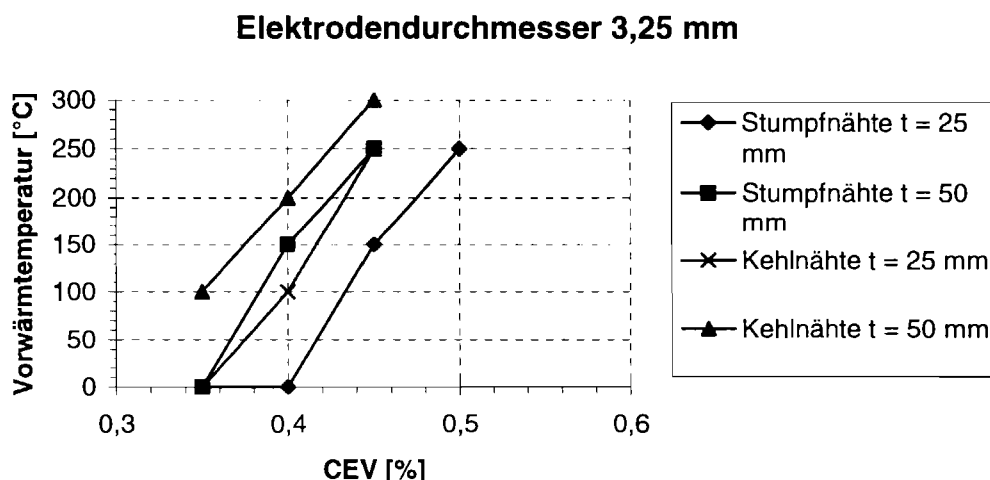


Tabelle nach Mrosko

Verschiedene Kohlenstoff-Äquivalente sowie sogenannte Rißäquivalente werden von Sohn 1991 [125] gegenübergestellt, hieraus lassen sich auch Vorwärmtemperaturen ableiten.

6.5 Vergleich der Grenzwerte in unterschiedlichen Normen

Grenzwerte für Einzelelemente und den CEV-Wert nach einigen internationalen Normen wurden von Dr. Rußwurm/ISB zusammengestellt. Diese Liste war als Anlage dem Schreiben [143] beigefügt. Sie ist nachfolgend wiedergegeben.

Anhang 1



Anlage 4
 Bl. 3

Zusammenstellung einiger Festlegungen zur Analyse und zum Kohlenstoffäquivalent

Land	Norm	Stahlbezeichnung	Chemische Zusammensetzung in Masse-%					N	C _E **
			C	Si	Mn	P/S			
Deutschland	DIN 488	BSt 500	0,22 (0,24)*	-	-	0,050 (0,055)	0,012 (0,013)	-	
Norwegen	NS 3570	K 500 TE	0,22 (0,24)	0,60 (0,65)	1,60 (1,70)	0,050 (0,055)	0,012 (0,013)	0,50 (0,52)	
Finnland	SFS 1215	A 500 HW	0,20 (0,22)	0,55 (0,60)	1,6 (1,8)	P=0,06(0,07) S=0,05(0,06)	0,010 (0,012)	0,48 (0,50)	
Schweden	SIS 212515	Ks 60 S	0,28	0,6	1,6	P<0,06 S<0,05	0,50	-	
Japan	JIS G 3112 1987	SD 490	0,32	0,55	1,90	0,040		C + $\frac{Mn}{6}$ ≤ 0,60	
Großbritannien	BS 4449	Grade 460	0,25 (0,27)	-	-	0,050 (0,055)	0,012 (0,013)	0,51 (0,54)	
Italien	UNI 6407	FeB 500 S	0,20 (0,24)	-	-	0,050 (0,055)	0,012 (0,013)	0,50 (0,52)	
Frankreich	NFA 35-018	FeE 500	0,22 (0,24)	0,50 (0,55)	-	-	-	0,50 (0,55)	
Niederlande	NEN 6008 HWL	FeB 500	0,22 (0,24)	-	-	-	-	-	
Belgien	NBN A24-302	8E 500 S	0,21 (0,23)	-	-	-	-	0,45 (0,47)	
Schweiz	SIA 162/1	S 500 S 550	0,16	-	-	-	-	0,50	
Dänemark	DS 13080-1		0,29 (0,30)	-	-	-	-	0,56	

- bedeutet keine Festlegungen

*, Klammerwerte gelten für Stückanalyse

$$** \quad C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

7. Einfluß der Temperaturführung

7.1 Allgemeines

Martensitisches Gefüge (Aufhärtung) entsteht, wenn drei Bedingungen erfüllt sind:

- Erwärmung über die GOS-Linie (ca. 723°C bis ca. 911°C).
Diese Bedingung ist beim Schmelzschweißen im Bereich jeder Schweißnaht erfüllt.
- Ausreichender Kohlenstoffgehalt, bzw. der äquivalenten Anteile anderer Stahlbegleiter, siehe Ausführungen in den vorherigen Abschnitten.
- Genügend große Abkühlgeschwindigkeit.
Die Abkühlgeschwindigkeit wird durch die Schweißparameter, z.B. Vorwärmtemperatur, eingetragene Streckenenergie, Nahtgeometrie, beeinflusst.

Zwischen den beiden letztgenannten Bedingungen besteht ein wechselseitiger Zusammenhang, da bei geringerem Kohlenstoffgehalt höhere Abkühlgeschwindigkeiten erforderlich sind, um den gleichen Anteil an Martensit zu erzeugen.

7.2 Abschätzung der Vorwärmtemperatur nach DVS 1703

Zur Abschätzung der notwendigen Vorwärmtemperatur kann das DVS Merkblatt 1703 [32] herangezogen werden. Zunächst ist der Energieeintrag während des Schweißens zu bestimmen. Da hier bewertet werden soll, ob unter praxisnahen Umständen ein Schweißen ohne Vorwärmen zu kritischem Verhalten der Schweißverbindung führen kann, wird der Energieeintrag ungünstig abgeschätzt.

Gewählt: Verfahren E-Hand, Elektrode mit Durchmesser 3,25 mm.
Nach Tabelle 1 [32] ergibt sich hier bei üblicher Geräteeinstellung und einer Schweißgeschwindigkeit von 22 cm/min eine Streckenenergie von 8,1 kJ/cm.

Anmerkung: Bei Verwendung einer Elektrode mit Durchmesser 2,5 mm (nicht in Tab. 1 [32]) enthalten) sinkt der Energieeintrag auf ca. 6,5 kJ/cm.

Um das Verfahren zur Bestimmung der Vorwärmtemperatur auf Betonstähle anwenden zu können, sind weitere Annahmen zu treffen:

- Der Stahl ist nach seinen Legierungsbestandteilen vergleichbar mit einem St 52 mit $C < 0,18\%$ und $C + Mn/6 < 0,42\%$.
- Die geometrischen Verhältnisse beim Schweißen eines Übergreifungsstoßes (Kehlnaht) entsprechen der Schweißung eines Stumpfstoßes von zwei Blechen. Dies ist eine günstige Annahme, bei der Einstufung als Kehlnaht ergeben sich deutlich höhere Vorwärmtemperaturen.

Mit diesen Annahmen läßt sich aus Bild 3 [32] entnehmen, daß bereits ab einer Werkstückdicke von ca. 13 mm sogenannte dreidimensionale Wärmeableitung vorliegt. Es ist eine Werkstücktemperatur von mindestens 80°C erforderlich.

7.3 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften aus ZTU-Diagrammen

Zur Bewertung der Abkühlgeschwindigkeit hat sich im Stahlbau das sogenannte $t_{8/5}$ -Konzept durchgesetzt. Es benutzt als Kenngröße für den näherungsweise exponentiell abklingenden Temperaturverlauf in der Wärmeeinflußzone (WEZ) die Zeit, die für eine Abkühlung von 800°C bis 500°C benötigt wird.

Im folgenden wird unter Zugrundelegen der Schweiß-ZTU-Schaubilder von Seyffarth [123] eine Bewertung der mechanischen Eigenschaften vorgenommen.

Annahmen:

Verfahren E-Hand; Lichtbogenspannung 22 V; Schweißstrom 130 A;
Schweißgeschwindigkeit 20 cm/min;

Streckenenergieparameter nach Bild 7 aus Seyffarth [123]:

$$60 EI / (v (n \cdot d)^{1/2}) = 60 \cdot 22 \cdot 130 / (20 \text{ cm/min} (1 \cdot 28 \text{ mm})^{1/2}) = 1620 \text{ J/cm}/(\text{mm})^{1/2}.$$

Nach Bild 7 [123] ergibt sich bei einer Ausgangstemperatur des Werkstückes von 20°C eine Abkühlzeit $t_{8/5} = 4 \text{ sec}$.

Unter den in [123] aufgeführten Werkstoffen entspricht „R24“ am ehesten den üblichen Betonstählen. Die chemische Zusammensetzung, die insbesondere bei den Elementen C, Si, Cr und Ni von der eines typischen Betonstahls abweicht, ist in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

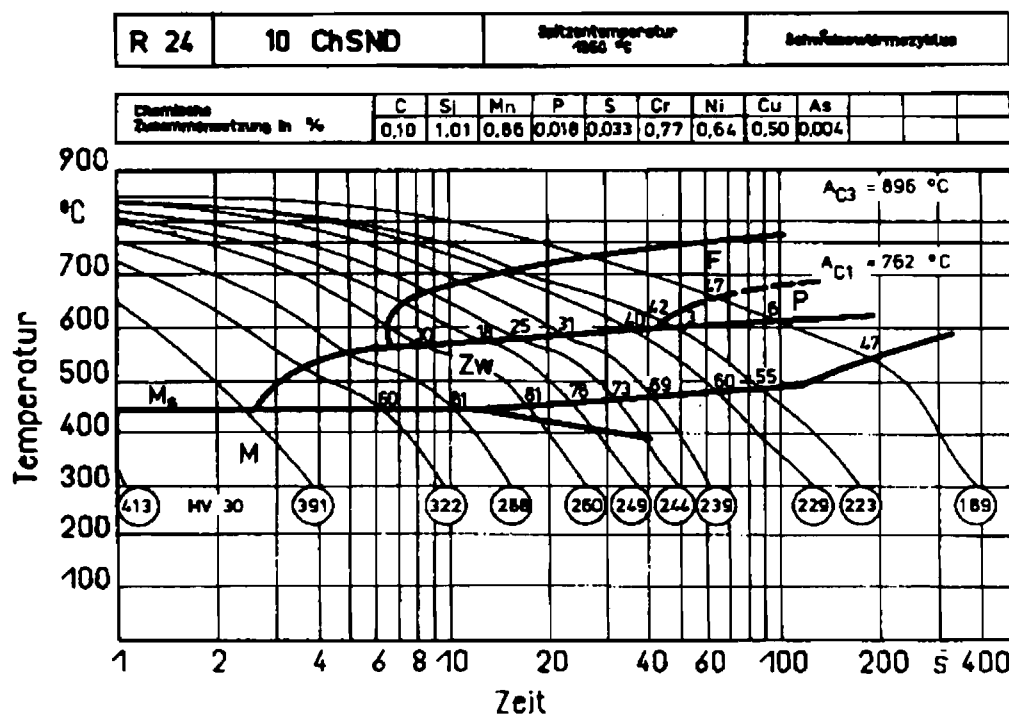
Bezeichnung: R24, Seyffarth [123]														
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn	Al	V	Nb	N	As
100	1010	860	18	33	500	770		640			43			4
Anteile in %/1000							CEV nach ENV 10080: 470							

Folgende mechanischen Werte sind nach dem Schweißen zu erwarten:

$R_m = 900 \text{ N/mm}^2$; $R_{p0,2} = 700 \text{ N/mm}^2$; $A_5 = 18\%$;

Kerbschlagarbeit a_K mit ISO-V-Proben = 13 J

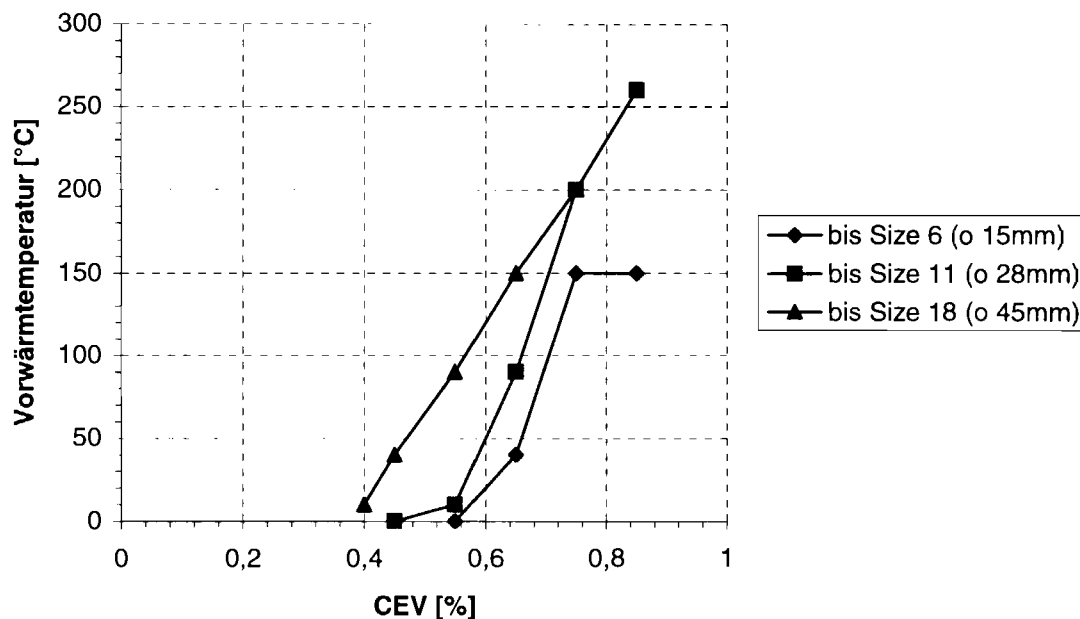
Die Übertragung auf die Betonstähle ist wegen der oben genannten Abweichung nur bedingt möglich.



7.4 Festlegungen in American Welding Society

Von der American Welding Society (AWS) wurden folgenden Festlegungen bezüglich der Temperaturführung für Betonstähle getroffen in Abhängigkeit von dem CEV-Wert (vgl. [42]):

ANSI/AWS D1.4-92 Tab. 5.2



7.5 Festlegungen in TGL 23824

In TGL 23824 [45] sind keine Angaben über die Temperaturführung für Betonstähle in Abhängigkeit von der Werkstoffzusammensetzung gemacht.

8. Erfahrungen der Prüfstellen

8.1 Stellungnahmen zu einer Anfrage des DIBt

8.1.1 Allgemeines

Mit Schreiben des DIBt vom 09.08.93 [143] wurden die Prüfstellen für Betonstahl gebeten, Stellungnahmen zur chemischen Zusammensetzung der Betonstähle abzugeben. Im folgenden werden einige Auszüge aus dem Schreiben wiedergegeben.

„Die Schweißbeignung ist dann gegeben, wenn mit den in DIN 488 zulässigen Verfahren, ohne besondere Maßnahmen wie Vorwärmen und Nachwärmen und bei Ausführung und Prüfung nach DIN 4099 Verbindungen hergestellt werden können, die bedingungsgemäße Gebrauchseigenschaften aufweisen.“

„... ob evtl. ein Einfluß von Heißbrissigkeit bei Cu-Anteilen von 0,60% relevant sein könnte.“

„Die Bauaufsicht hatte seinerzeit zur Schweißbeignung von Betonstahl einen Einspruch zur europäischen Norm eingebracht, neben einer Rahmenanalyse wurde ein CEV_{max} -Wert vorgeschlagen. Dies erfolgte im Hinblick auf den zukünftigen Wegfall von Schweißbeignungsversuchen ...“

„Diese Zusatzbedingung war erforderlich geworden, nicht zuletzt auch wegen der zunehmenden Verunreinigung der Schmelzen bei Herstellern, die vorwiegend Schrott verarbeiten.“

Die hierauf von den Prüfstellen eingegangenen Angaben werden nachfolgend zusammengefaßt und zusammen mit den Ergebnissen einer eigenen Umfrage im Abschnitt 8.3 bewertet.

8.1.2 Stellungnahme der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig

„bei Schweißbeignungsprüfungen nach DIN 488 wurde festgestellt, daß bei mikrolegierten Betonstählen auch mit einem Kohlenstoffäquivalent von $CEV < 0,50$ (Anmerkung: gemeint ist bis zu) keine Probleme bei der Herstellung von Stumpfstößen

auftraten, während bei den warmgewalzten und aus der Walzhitze behandelten Betonstählen mit $CEV = 0,41 \div 0,43$ es nicht einfach war, den geforderten Bruchdehnungswert A_{10} von 10% zu erreichen.“ (Kruse 1993)

Ein telefonisches Gespräch mit Herrn Kruse am 13.07.94 ergab, daß in diesen Fällen durch veränderte Maschineneinstellung die geforderten Werte erreicht werden konnten. Dokumentierte Ergebnisse über die Maschineneinstellung vorher und nachher liegen nicht vor.

8.1.3 Stellungnahme der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart

„In ENV 10080 ... fehlen Hinweise, ... daß eine allgemeine Schweißbarkeit nicht gewährleistet werden kann, daß die Verbindungsart, die Fertigungsbedingungen ... und die Werkstückdicken die Schweißbarkeit wesentlich beeinflussen können...“

„Die Bewertungskriterien nach DIN 4099 Abschnitt 8.1.3 (1) sollten eher noch verschärft werden, um Übereinstimmung mit den entsprechenden Anforderungen in den Zulassungsbescheiden für Betonstahlverbindungen zu erreichen ...“

„Es ist völlig unrealistisch zu erwarten, daß z.B. eine Heftverbindung durch Widerstandspunktschweißen mit einer Schweißzange zwischen einem Bügel Durchmesser 10 mm aus BSt 500 KR und einem Längsstahl Durchmesser 40 mm aus mikrolegiertem unbehandeltem BSt 500 S, gleich welche Analysengrenzen in EN 10080 festgelegt werden, in der täglichen Praxis so geschweißt werden kann, daß weder der Bügel unzulässig stark entfestigt wird noch der Längsstahl unzulässig stark aufhärtet ...“

„Von daher ist es unbedingt wünschenswert, wenn nicht zwingend erforderlich, daß die nach den verschiedenen Herstellverfahren erzeugten Betonstahlsorten unterschiedlich gekennzeichnet werden. Es können dann die Schweißbedingungen den zu verschweißenden Stählen besser angepaßt oder die Stähle der Schweißaufgabe entsprechend ausgewählt werden.“

„Als Schmelzenanalyse schlagen wir vor:

Tempcore-Stahl

$C = 0,10$ bis $0,18\%$, $CEV \leq 0,45\%$

Microlegierter Stahl

$C \leq 0,22\%$, $CEV \leq 0,50\%$

Bei der Begrenzung der Einzelemente wie Si, Mn, Cr, Mo und Ni sollte man nicht zu kleinlich sein. Die wirtschaftliche Herstellung als Massenschweiß auf Schrottbasis zwingt dazu.“ (Köhler 1993)

8.1.4 Stellungnahme der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe

„Als wichtigste Parameter der Schweißbeugung beim Schmelzschweißen niedriglegierter C-Stähle gelten der C-Gehalt bzw. das Kohlenstoffäquivalent CEV, sowie die Abkühlgeschwindigkeit. Während C bzw. CEV vom Werkstoff her vorgegeben sind, wird die Abkühlgeschwindigkeit in der Wärmeeinflußzone durch die jeweilige Schweißaufgabe bestimmt, wie z.B. Bauteildicke, Stoßform (2- oder 3-dimensionale Wärmeableitung), Schweißverfahren, Schweißparameter (eingebrachte Streckenergie) und Ausgangstemperatur der Werkstücke (ggf. vorgewärmt).“ [148]

„Wenn der Begriff „Schweißbeugung“ hier so verstanden werden soll, daß Verbindungen „... ohne besondere Maßnahmen wie Vorwärmen und Nachwärmen ...“ nach DIN 488 bzw. DIN 4099 bedingungsgemäß hergestellt werden können, dann kommt von den o.g. Einflußgrößen auf die Abkühlgeschwindigkeit auch dem Stabdurchmesser und den Schweißparametern eine besondere Bedeutung zu.“

„Im Bereich der BRD sind Schäden in letzter Zeit nicht bekannt geworden. Den Grund hierfür sehen wir darin, daß einerseits durch gütesichernde Maßnahmen im Rahmen der DIN 4099 (Einsatz besonders ausgebildeter Schweißaufsichtspersonen und Schweißer) die Einhaltung sinnvoller Schweißparameter und Durchmesserbegrenzungen sichergestellt war, und andererseits die vorhandenen CEV-Werte gewisse Obergrenzen nicht überschreiten (z.B. 0,43).“

8.2 Ergebnisse einer eigenen Umfrage

Ab Mitte Juli 1994 wurden in einer eigenen Umfrage die Prüfstellen für Betonstahl gebeten, ihre Erfahrungen mit nicht bedingungsgemäßen Ergebnissen bei

Schweißbeignungsversuchen abzugeben. Die hierauf von einer Prüfstelle eingegangenen Angaben werden nachfolgend zusammengefaßt.

Im folgenden wird die Stellungnahme von Rehm (1994) in Auszügen wiedergegeben:

- Widerstandspunktgeschweißte Verbindungen sollten möglichst C-Gehalte unter 0,12% bis 0,13% haben.
- Bei Heftschweißungen können je nach Schweißausführung C-Gehalte „von 0,20% noch toleriert werden oder 0,15% bereits zu hoch sein“.
- Die Anforderungen an die chemische Zusammensetzung der Stähle sollte differenzierter auf die Verbindungsart und das Schweißverfahren abgestimmt werden. Erfahrungsgemäß können Überlappstöße auch noch bei 0,25% ausgeführt werden, bei Stumpfstößen und Lichtbogenschweißung können noch höhere C-Werte toleriert werden.
- „Negative Erfahrungen liegen bei Stählen mit hohem Schwefel- und/oder Phosphorgehalt vor.“
- „Bei Ausführung von Kreuzungstößen und Heftverbindungen im Freien und bei niedrigen Außentemperaturen mußte mehrfach ein Vorwärmen der Stahloberflächen vorgenommen werden. Bei Stumpfstößen mittels Lichtbogenschweißung wurde mehrfach „langsames“ Schweißen mit Nachwärmen der an der Schweißstelle angrenzenden Bereiche empfohlen.“

8.3 Bewertung

Die zum Teil widersprüchlichen Aussagen der Prüfstellen zur Beherrschung des Schweißprozesses (vgl. 8.1.2 und 8.1.4) zeigen, daß die CEV-Werte in einem Grenzbereich liegen, so daß es hin und wieder Schwierigkeiten gibt, die für geschweißte Verbindungen geforderten Zähigkeitseigenschaften zu erreichen. Eine Dokumentation hierüber war von keiner Prüfstelle zu erhalten, da diese Versuche als für den vorgesehenen Zweck unbrauchbar (und damit wertlos) eingestuft werden. In solchen Fällen wird dann durch entsprechende Abstimmung des Schweißprozesses („der Schweißer wurde angewiesen, langsamer zu schweißen“) eine Optimierung vorgenommen, bis die Eigenschaften bedingungsgemäß sind. Die genauen

Schweißbedingungen werden in diesen Fällen ebenfalls nicht festgehalten, da man bis in jüngste Zeit von der Ansicht ausging „ein guter Schweißer beherrscht so etwas eben“. Erst mit der Verbreitung der angelsächsischen Philosophie dokumentierter Qualitätssicherungssysteme (z.B. nach DIN ISO 9000 ff.) rückte die Notwendigkeit des ausreichenden Dokumentierens derartiger Prozesse in den Vordergrund.

9. In der Industrie eingesetzte Verfahren

Eine Umfrage bei unterschiedlichen Betrieben der betonstahlverarbeitenden Industrie zeigte, daß Schweißen von tragenden Verbindungen auf Baustellen relativ selten vorzukommen scheint und vor allem im Bereich größerer Durchmesser bis 28 mm erfolgt. Als Verfahren wird dabei E-Hand eingesetzt, meistens werden Stumpfstöße ausgeführt oder Ankerplatten angeschweißt. Die Betriebe verfügen jeweils über einen Nachweis nach DIN 4099.

Die Angaben über die Herstellung von Heftverbindungen (überwiegend Kreuzungsstöße) bestätigen die Erfahrung, daß nahezu in allen Betrieben Heften zur Lagesicherung zumindest gelegentlich vorkommt, wobei fast ausschließlich das MAG-Verfahren zum Einsatz kommt.

10. Zusammenfassung

Eine Gegenüberstellung von den bisher in der Bundesrepublik Deutschland gültigen Regelungen zum Schweißen von Betonstahl mit ENV 10080 ergibt, daß künftig die Schweißbeignung außer der Beschränkung von C, P, S und N nur über ein Kohlenstoffäquivalent $CEV \leq 0,50\%$ nachgewiesen werden soll. Eine Rahmenanalyse zur Begrenzung weiterer Einzelelemente und ein Qualifikationsnachweis der ausführenden Betriebe soll entfallen.

Ein Vergleich verschiedener Vorschläge zur Temperaturführung beim Schweißen zeigt, daß es bei einem CEV-Wert von 0,50% Schwierigkeiten bereiten kann, bedingungsgemäße Schweißverbindungen an Durchmessern 28 mm ohne besondere Maßnahmen hinsichtlich der Wärmeleitung auszuführen. Bisher wurden diese

besonderen Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland durch besonders qualifiziertes Personal in den Betrieben angeordnet, Schäden sind hier nicht bekannt geworden.

Die Frage, bis zu welchen Grenzwerten bestimmter Einzelelemente oder des CEV-Wertes in Abhängigkeit von dem Gefügestand noch ohne besondere Maßnahmen oder bei Vorgabe bestimmter Bedingungen geschweißt werden kann, konnte weder aus dem Schrifttum geklärt werden, noch liegen hier bei den anerkannten Prüfstellen geschlossene Dokumentationen vor.

Eine Befragung ausgewählter Industriebetriebe ergab, daß im gesamten Durchmesserbereich 6 mm bis 28 mm tragend oder nicht-tragend geschweißt wird, wobei für tragende Verbindungen überwiegend E-Hand (Stumpfstöße) und für nicht-tragende Verbindungen überwiegend MAG (Kreuzungstöße) eingesetzt wird.

Aus unserer Sicht ergibt sich folgender Handlungsbedarf:

Eine Sicherstellung der „allgemeinen Schweißbeignung“ (hier verstanden auch ohne zusätzliche Maßnahmen bezüglich der Wärmeführung) nur über eine Beschränkung der Analysenwerte würde zwangsläufig zu derart niedrigen Grenzwerten führen, daß die Stähle nicht mehr wirtschaftlich hergestellt werden könnten.

Wir halten statt dessen eine Begrenzung auf dem Niveau der ENV 10080 bzw. der in der Bundesrepublik Deutschland üblichen Rahmenanalysen für sinnvoll, dies muß aber zwingend mit gewissen Verfahrensanweisungen für das Schweißen verbunden werden.

Diese Verfahrensanweisungen können einerseits durch normengemäße aWPS erfolgen (z.B. Festlegen von Streckenenergie oder Elektrodendurchmessern für bestimmte Anwendungsfälle), oder durch die Forderung nach sachkundigem Schweiß- und Aufsichtspersonal entsprechend den bisherigen Regelungen in DIN 4099. An einem entsprechenden Normenentwurf wird zur Zeit in Deutschland gearbeitet. Ein europäisches Mandat zu einer solchen Norm liegt noch nicht vor.

Da der Erfahrungsbereich mit dem bisherigen System zur Sicherstellung der Schweißbarkeit der Betonstähle in der Bundesrepublik Deutschland nur Durchmesser bis 32 mm umfaßt, während nach ENV 10080 eine Erweiterung auf den Durchmesserbereich bis 40 mm vorgesehen ist, ist für die vorgenannten Regelungen (Rahmenanalyse, Verfahrensanweisungen) auch dieser Einfluß zu beachten.

11. Vorschläge für weitere Forschung

Die Untersuchungen dieses Sachstandsberichtes zeigen, daß zur Zeit kein ausreichender Kenntnisstand darüber vorliegt, bis zu welchen Grenzen der in Richtanalysen festgelegten Einzelwerte bei Schweißstößen an Betonstählen unter baupraktischen Bedingungen noch bedingungsgemäße Eigenschaften sicher erreicht werden können. Um Aussagen über diese Zusammenhänge treffen zu können, sind experimentelle Untersuchungen notwendig. Diese sollten bei der Herstellung der Probekörper verschiedene

- Ausgangswerkstoffe (mikrolegiert, wärmebehandelt nach TEMPCORE-Verfahren, kaltverformt) mit Berücksichtigung unterschiedlicher Analysewerte
- Durchmesser (\varnothing 12 nur für Widerstandspreßschweißen, \varnothing 28 bis \varnothing 40)
- Schweißverfahren (E-Hand, MAG, Widerstandspreßschweißen)
- Stoßarten (Überlappungs-, Kreuz-, Stumpfstoß)
- Ausgangstemperaturen beim Schweißen (0°C, 20°C)
- Schweißposition und Schweißparameter

umfassen.

Der Schwerpunkt dieser Untersuchung sollte bei chemischen Analysen liegen, bei denen aufgrund des Ausgangsmaterials mögliche obere Grenzwerte der die Schweißbeignung beeinträchtigenden Elemente erreicht werden (z.B. Cu, Sn), und auch den Einfluß der aufgrund unterschiedlicher Herstellbedingungen verschiedenen Gefügestände erfassen.

Die Beurteilung der Güte der Schweißverbindungen kann vorzugsweise aufgrund der in DIN 4099 genannten Verfahren erfolgen.

Karlsruhe, den 17.03.97

Der Auftragnehmer:



(Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Saal)

Die Bearbeiterin:



(Dipl.-Ing. T. Setz)

12. Schrifttum

In der nachfolgenden Zusammenstellung des Schrifttums wurden außer den im vorliegenden Bericht verwendeten Quellen alle Dokumente erfaßt, die den Kenntnisstand zum Schweißen von Betonstahl betreffen. Das Schrifttumsverzeichnis ist daher als Basis für weitere Forschungsarbeiten aufzufassen.

12.1 Normen, Richtlinien

12.1.1 Europäische Normen/Richtlinien

- [1] Euronorm 80-85: Betonstahl für nicht vorgespannte Bewehrung, Technische Lieferbedingungen. April 1986. (ersetzt durch ENV 10080)
- [2] DIN EN 288: Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe.
Teil 1: Allgemeine Regeln für das Schmelzschweißen. April 1992
Teil 1 / A1: Allgemeine Regeln für das Schmelzschweißen. Entwurf Juni 1996
Teil 2: Schweißanweisung für das Lichtbogenschweißen. April 1992
Teil 2 / A1: Schweißanweisung für das Lichtbogenschweißen. Entwurf Juni 1996
Teil 3: Schweißverfahrensprüfungen für das Lichtbogenschweißen von Stählen. April 1992
Teil 3 / A1: Schweißverfahrensprüfungen für das Lichtbogenschweißen von Stählen. Entwurf Juni 1996
Teil 5: Anerkennung durch Einsatz anerkannter Schweißzusätze für das Lichtbogenschweißen. Oktober 1994
Teil 6: Anerkennung aufgrund vorliegender Erfahrung. Oktober 1994
Teil 7: Anerkennung von Normschweißverfahren für das Lichtbogenschweißen. August 1994
Teil 8: Anerkennung durch eine Schweißprüfung vor Fertigungsbeginn. August 1994
- [3] EN 10 002-1: 1990 + AC1:1990 Metallische Werkstoffe, Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren (bei Raumtemperatur). April 1991.
- [4] prEN 10 080: 1991 Betonbewehrungsstahl - Schweißgeeigneter gerippter Betonstahl B500; Technische Lieferbedingungen für Stäbe, Ringe und geschweißte Matten. Entwurf, Oktober 1991.
- [5] ENV 10080: 1994 Steels for the Reinforcement of Concrete. Weldable Ribbed Reinforcing Steel Grade B500; Technical Delivery Conditions for Bars, Coils and Welded Fabric. (Final Draft April 1994) ECISS/TC 19/SC 1 N 171
- [6] DIN V ENV 10080: 1995 Betonbewehrungsstahl - Schweißgeeigneter gerippter Betonstahl B500; Technische Lieferbedingungen für Stäbe, Ringe und geschweißte Matten. Deutsche Fassung, August 1995.
- [7] TC 229 / WG1 / TG4: Annex Lattice Girders. Entwurf ohne Datum. Stand 9/94.

- [8] DIN EN 45001: Allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflaboratorien; EN 45001: 1989. Mai 1990.

12.1.2 Internationale Normen/Richtlinien

- [9] DIN ISO 8930: Allgemeine Grundsätze für die Zuverlässigkeit von Tragwerken. März 1991.
- [10] DIN ISO 9000: Leitfaden zur Auswahl und Anwendung der Normen zu Qualitätsmanagement, Elementen eines Qualitätssicherungssystems und zu Qualitätssicherungs-Nachweisstufen. Mai 1987.
- [11] DIN EN ISO 9000-1: Normen zum Qualitätsmanagement und zur Qualitätssicherung / QM-Darlegung. Teil 1: Leitfaden zur Auswahl und Anwendung (ISO 9000-1:1994). August 1994.
- [12] DIN ISO 9000 Teil 2: Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsnormen. Allgemeiner Leitfaden zur Anwendung von ISO 9001, ISO 9002 und ISO 9003. Identisch mit ISO/DIS 9000-2:1991. Entwurf März 1992.
- [13] DIN ISO 9000 Teil 3: Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsnormen. Leitfaden für die Anwendung von ISO 9001 auf die Entwicklung, Lieferung und Wartung von Software (Identisch mit ISO 9000-3: 1991). Juni 1992.
- [14] DIN ISO 9000 Teil 4: Normen zu Qualitätsmanagement und zur Darlegung von Qualitätsmanagementsystemen. Leitfaden zum Management von Zuverlässigkeitsprogrammen. (Identisch mit ISO 9000-4: 1993 bzw. IEC 300-1: 1993) Deutsche Fassung EN 60300-1: 1993. Juni 1994.

12.1.3 Deutsche Normen/Richtlinien

- [15] DAST-Richtlinie 014: Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl. Januar 1981.
- [16] Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassungsgrundsätze für Betonstahl in Ringen - BSt 500 KR und BSt 500 WR, Zulassungs- und Überwachungsprüfungen bei Herstellung und Verarbeitung - (Fassung November 1993).
- [17] Deutsches Institut für Bautechnik: Richtlinie für Überwachung von geschweißten Gitterträgern als biegesteife Bewehrung - Ausgabe August 1993 - weitere Richtlinien siehe „Deutsches Institut für Bautechnik“
- [18] DIN 488 Rundstahl gewalzt für Eisenbeton. März 1939.
- [19] DIN 488 Betonstahl.
Blatt 1: Begriffe, Eigenschaften, Werkkennzeichen. April 1972.
Blatt 2: Betonstabstahl; Abmessungen. April 1972.
Blatt 3: Betonstabstahl; Prüfungen. April 1972.
Blatt 4: Betonstahlmatten; Aufbau. April 1972.
Blatt 5: Betonstahlmatten; Prüfungen. April 1972.
Blatt 6: Eignungsnachweis und Güteüberwachung. August 1974.
- [20] DIN 488 Betonstahl.
Teil 1: Sorten, Eigenschaften, Kennzeichen. September 1984.

- Teil 2: Betonstabstahl; Maße und Gewichte. Juni 1986.
Teil 3: Betonstabstahl; Prüfungen. Juni 1986.
Teil 4: Betonstahlmatten und Bewehrungsdraht; Aufbau, Maße und Gewichte. Juni 1986.
Teil 5: Betonstahlmatten und Bewehrungsdraht; Prüfungen. Juni 1986.
Teil 6: Überwachung (Güteüberwachung). Juni 1986.
Teil 7: Nachweis der Schweißbeignung von Betonstabstahl, Durchführung und Bewertung der Prüfungen. Juni 1986.
- [21] DIN 4035: Stahlbetonrohre und zugehörige Formstücke; Maße; Technische Lieferbedingungen. August 1995.
- [22] DIN 4099 Blatt 1: Schweißen von Betonstahl; Anforderungen und Prüfung. April 1972.
- [23] Vornorm DIN 4099 Teil 2: Schweißen von Betonstahl; Widerstands-Punktschweißungen an Betonstählen in Werken; Ausführung und Prüfung. Dezember 1978.
- [24] DIN 4099: Schweißen von Betonstahl; Ausführung und Prüfung. November 1985.
- [25] DIN 18200: Überwachung (Güteüberwachung) von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten; Allgemeine Grundsätze. Dezember 1986.
- [26] DIN 55303: Statistische Auswertung von Daten.
Teil 2: Testverfahren und Vertrauensbereiche für Erwartungswerte und Varianzen. Mai 1984.
Beiblatt 1 zu Teil 2: Operationscharakteristiken von Tests für Erwartungswerte und Varianzen. Mai 1984.
Teil 3: Mittelwertsvergleich im Falle gepaarter Beobachtungen. Mai 1978.
Teil 5: Bestimmung eines statistischen Anteilsbereichs. Februar 1987.
Teil 6: Testverfahren und Vertrauensbereiche für Anteile. Entwurf April 1989.
- [27] DIN ISO 11453: Statistische Auswertung von Daten; Testverfahren und Vertrauensbereiche für Anteile; Identisch mit ISO/DIS 11453: 1992. Entwurf August 1992.
- [28] DVS Richtlinie 1146: Ausbildung und Prüfung von Schweißern für das Lichtbogenhandschweißen (Metall-Lichtbogenschweißen) von Betonstahl nach DIN 4099. Juni 1974.
- [29] DVS Richtlinie 1146: DVS-Lehrgang Betonstahlschweißer; Schweißen von Betonstahl nach DIN 4099 für die Prozesse 111 (E) und 135 (MAG). September 1994.
- [30] DVS Richtlinie 1175: Schweißaufsicht; Erweiterte Ausbildung für das Schweißen von Betonstahl nach DIN 4099. Juni 1974.
- [31] DVS Richtlinie 1175: DVS-Lehrgang Schweißaufsicht; Zusatzausbildung für das Schweißen von Betonstahl nach DIN 4099. September 1994.
- [32] DVS Merkblatt 1703: Empfehlungen zur Wahl der Werkstücktemperatur beim Lichtbogenschweißen von Stahlbauten aus St 52. Oktober 1984.
- [33] Institut für Bautechnik: Hinweise für Zulassungsprüfungen von Betonstahl in Ringen aus nichtrostendem Stahl BSt 500 NR - Fassung Mai 1989 -.

- [34] Institut für Bautechnik: Durchführungsprotokoll Nr. 3, Betonstähle gemäß dem deutsch-belgischen-luxemburgischen Übereinkommen vom 20. November 1986.
- [35] Institut für Bautechnik: Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren - Allgemeine Kriterien - experimentelle Bestimmung von Eigenschaften - Festlegungen von Kontrollen, Mai 1986.
- [36] Deutsches Institut für Bautechnik: Richtlinien für die Überwachung von geschweißten Gitterträgern als biegesteife Bewehrung - Ausgabe August 1993 - .
- [37] Institut für Bautechnik: Richtlinien für Zulassungs- und Überwachungsprüfungen von Betonstahl in Ringen - BSt 500 KR und BSt 500 WR, Juli 1988. Ergänzende Bestimmungen für die Prüfung von Betonstahl in Ringen BSt 500 WR mit Nenndurchmesser 14 mm, Dezember 1989.
- [38] Deutsches Institut für Bautechnik: Zulassungsgrundsätze für von Betonstahl in Ringen - BSt 500 KR und BSt 500 WR -; - Zulassungs- und Überwachungsprüfungen bei Herstellung und Verarbeitung - (Fassung November 1993).
- [39] Institut für Bautechnik: Zulassungsbescheid Nichtrostender kaltverformter Betonrippenstahl BSt 500 NR (IV NR). Z 1.6-IV NR 1 vom 05.08.86

weitere Richtlinien siehe „Deutsches Institut für Bautechnik“

- [40] Institut für Normung e. V.: Grundlagen zur Feststellung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen. Beuth-Verlag Berlin - Köln 1981. (= „GRUSIBAU“)
- [41] Vorläufige Richtlinie für die Überwachung der Güteeigenschaften von geschweißten Stahlgitterträgern für Stahlbetondecken mit biegesteifer Bewehrung.

12.1.4 Sonstige nationale Normen/Richtlinien

- [42] ANSI/AWS D1.4-92 An American National Standard, Approved by American National Standards Institute, March 20, 1992, Structural Welding Code - Reinforcing Steel, Including Metal Inserts and Connections in Reinforced Concrete Construction.
- [43] BS 7123:1989: Metal arc welding of steel for concrete reinforcement.
- [44] NF A 35-029: Armatures pour beton arme; Assemblages soudes; Qualification d'un mode operatoire de soudage - Qualification des soudeurs. Projet Mai 1994.
- [45] TGL 23824/01: Schweißen im Stahlbetonbau; Allgemeine Grundsätze, Berechnungsgrundlagen, Konstruktive Durchbildung. Deutsche Demokratische Republik. August 1976.

12.2 Fachliteratur

- [46] Ainedter, D.: Problematik der Widerstand-Punktschweißung zugbeanspruchter Bewehrungsstäbe. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 11/1974, S. 725-730.

- [47] Apol, E.J.: Die Auswirkungen neuer Entwicklungen im Betonfertigteiltbau auf die Verbindungsdetails (III) - „Neue Möglichkeiten durch schweißbaren Betonstahl“. Betonwerk + Fertigteilt-Technik, 2/1988, S. 57-59.
- [48] Bar, R.: Some aspects of cold cracking in St 52 steel welded assembly. Metal Reports CNRM, No. 14, März 1968, S. 59-68. (zitiert nach BAM 1976 [142])
- [49] Beres, L.: Bedingungen für das Entstehen austenitischen Gefüges in Pufferlagen mit einem Chromäquivalent unter 18. Schweißen+Schneiden 44 (1992), H. 8, S. 421-425.
- [50] Beul, W. Harre, W.: Zum Schwingfestigkeitsverhalten der Betonstähle. Beton- u. Stahlbetonbau 86 (1991), H. 12.
- [51] Brandes, K. und Limberger, E.: Zur Beeinflussung der Festigkeitskennwerte von Betonstahl durch die Dehngeschwindigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 4/1985 S. 90-94.
Fortsetzung: Beton- und Stahlbetonbau 5/1985 S. 128-133.
- [52] Caplan, I.S., Landermann, E.: Preventing hydrogen-induced cracking after welding of pressure vessel steels by use of low temperature postweld heat treatment. WRC Bulletin 216 (1976), S. 1-23. (zitiert nach BAM 1976 [142])
- [53] Cziesielski, E., Friedmann, M.: Geschweißte Verbindungen im Betonfertigteiltbau. Betonwerk + Fertigteilt-Technik 5/1983, S. 318-329.
- [54] Dilthey, U., Trube, S., Pokhodnya, K., Aleksandrowitsch, V.: Untersuchung des Diffusionskoeffizienten von Wasserstoff in deformiertem Stahl und in Schweißgütern aus basischen und rutilumhüllten Elektroden. Schweißen+Schneiden 44 (1992), H. 12, S. 668-671.
- [55] Dorn, L., Stöber, E.: Mikrowiderstandsschweißen von Drahtverbindungen aus unterschiedlichen Metallen. Schweißen+Schneiden 26 (1984), H. 1, S. 28-32.
- [56] Fehr, H.-P.: Sprödbuchanfälligkeit schweißgeeigneter Baustähle - Ursachen und Vermeidung (Kurzbericht nach „Sprödbuchanfälligkeit schweißbarer Baustähle - Ursachen und Vermeidung“, Diss. TH Karl-Marx-Stadt 1985). Schweißen+Schneiden, 9/1986, S. 462.
- [57] Franke, H.: Die Schweißbeignung der Stähle für das Bauwesen. Die Bautechnik 57 (1980), H. 9, S. 289-300.
- [58] Geschweißte Betonstahlmatten - eine wirtschaftliche Bewehrung für den Stahlbeton. Betonwerk + Fertigteilt-Technik, 7/1976, S. 366.
- [59] Grohs, B.: Ultraschallprüfungen von Halbschalenschweißverbindungen an Betonstählen (nach Weinert, T., u.a.: Ultraschallprüfung von Halbschalenschweißverbindungen an Betonstählen. ZIS-Mitt. 30 (1988), H. 8, S. 835/40). Schweißen+Schneiden 41 (1989), H. 9, S. 504.
- [60] Harre, W., Rehm, G. Rußwurm, D.: Untersuchungen über die Schwingfestigkeit geschweißter Betonstahlverbindungen, Teil 1, Schwingfestigkeitsversuche. DAfStb, Heft 317, 1981.
- [61] Harre, W., Beul, W.: Zum Schwingfestigkeitsverhalten der Betonstähle. Beton- und Stahlbetonbau 86 (1991), H. 12, S. 290-296.

- [62] Hecht, W., Soretz, S.: Wirtschaftliche Herstellung der Bewehrung im Stahl-betonbau. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 5/1972, S. 345-350.
- [63] Hütten, P., Pasberg, M.: Zweckmäßige Ausführungsformen von Bügelkörben aus geschweißten Betonstahlmatten für Querkraft-Schub in Balken und Plattenbalken. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 10/1979, S. 633-636.
- [64] IIW: Guide to the welding and weldability of C-Mn steels and C-Mn microalloyed steels. Published by Svetskommissionen, Stockholm 1971. (zitiert nach BAM 1976 [142])
- [65] Kameda, J., McMahon, C.J. jr: The Effects of Sb, Sn, and P on the Strength of Grain Boundaries in a Ni-Cr Steel. Metallurgical Transactions A, Vol. 12A (January 1981), p. 31-37.
- [66] Klemm, M., Wagenführer, G., Wagner, B.: Der gereckte Betonstahl - ein einfaches Verfahren zur normgerechten Veredelung. Draht 44 (1993), H. 5, S. 263-266.
- [67] Klüsener, K.: Untersuchungen über die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften thermisch verfestigter Betonstähle (nach Klüsener, K.: Untersuchungen zu den Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften thermisch verfestigter Betonstähle. Diss. Weimar 1986). Schweißen+Schneiden, 8/1988, S. 400.
- [68] Knödel, P., Maierhöfer, D.: Wärmeübergang auf eine zylindrische Probe aus Betonstahl beim künstlichen Altern. Betonwerk + Fertigteil-Technik (1991) H. 3, S. 112-116.
- [69] König, G., Hosser, D., Schobbe, W.: Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NABau - eine Erläuterung. Bauingenieur 57 (1982), S. 69-78.
- [70] Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Bericht EUR 9901 DE, technische forschung stahl: Anwendungstechnische Untersuchungen an Betonstahl, 1986.
- [71] Krömer, R.: Rationalisierung im Betonwerk bei der Bearbeitung von Betonstahl vom Ring für Richten, Schneiden und Biegen. Betonwerk + Fertigteil-Technik 1/1987, S. 23-36.
- [72] Krull, B., Riedinger, H.: Qualitätssicherung der zugelassenen und genormten Betonstähle - Erfahrungsaustausch der fremdüberwachenden Stellen. Mitteilungen IfBt 5/1992, S. 156-157.
- [73] Kulesa, G.: Herstellung und Verarbeitung von Betonstahl in Ringen - Herstellwerke und weiterverarbeitende Betriebe von Betonstahl in Ringen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1/1987, S. 14-18.
- [74] Kuthe, E.O.: Betonrohrmaschinen - Stand und Entwicklungstendenzen. Betonstein-Zeitung, 4/1971, S. 207-212.
- [75] Liers, J.: Aufschmelzungsrisse in Schwarz-Weiß-Verbindungen. Schweißen+Schneiden 41 (1989), H. 11, S. 596-600.
- [76] Loders, T.: Bewehrungstechnik für Beton- und Fertigteilwerke. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 9/1992, S. 55-59.

- [77] Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung. Diss. München 1972.
ebenso: Schriftenreihe DASTB Heft 228.
- [78] Matsui, S., Inagaki, M.: Recent trend on research on cold cracking with the implant test in Japan. IIW-Dok. IX-970-76. (zitiert nach BAM 1976 [142])
- [79] Mazzolani, F.M., Mele, E., Piluso, V.: Carcterisation statistique des aciers de construction en vue du controle de la ductilite des structures. Construction Metallique 4/1993, p. 23-32.
- [80] Nentwig, A.: Reibschweißen - Erfahrungsaustausch im Juni 1990 in München. Schweißen+Schneiden, 11/1990, S. 594-595.
- [81] N.N.: Biege-, Richt- und Schneidemaschinen für Betonstahl von Ringen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 12/1985, S. 825-828.
- [82] N.N.: Gemeinsame Verfahrensregeln für die Antragstellung, die Vorbereitung, die Erteilung und die Zurückziehung von europäisch technischen Zulassungen. Mitteilungen IfBt 5/1991, S. 134-140.
- [83] N.N.: Forschungsprojekt Dauerschwingprüfungen von Betonstählen. Bearbeiter: Institut für Bauingenieurwesen III, Lehrstuhl für Massivbau TU München. Mitteilungen IfBt 5/1992, S. 155-156.
- [84] Nürnberger, U.: Zur Frage des Spannungsrißkorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in Nitratlösungen unter Berücksichtigung praxisnaher Verhältnisse. Schweißen+Schneiden 25 (1973), H. 7, S. 261-262.
- [85] Pietrowiak, F.: Das Betonfertigteilwerk. 2. Folge: Stahlverarbeitung. Betonstein-Zeitung, 4/1970, S. 224-230.
- [86] Rackwitz, R.: Zur Statistik von Eignungs- und Zulassungsversuchen für Bauteile. Bauingenieur 56 (1981) S. 103-107.
- [87] Rehm, G., Nürnberger, U., Waubke, N.V.: Untersuchungen an Betonstählen aus Viehstaldecken im Hinblick auf Spannungsrißkorrosionserscheinungen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 9/1973, S. 642-651.
- [88] Rehm, G., Rußwurm, D.: Die Eigenschaften von geschweißten Betonstahlmatten. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 7/1975, S. 332-341.
Teil 2. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 9/1975, S. 391-398.
- [89] Rehm, G., Rußwurm, D.: Anmerkungen zur Güte von Betonstählen.
Teil 1. Betonwerk + Fertigteil-Technik 1/1977, S. 28-34.
Teil 2. Betonwerk + Fertigteil-Technik 2/1977, S. 66-68.
- [90] Rehm, G., Rußwurm, D.: Beurteilung von Betonstählen hergestellt nach dem Tempcore-Verfahren. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 6/1977, S. 300-307.
- [91] Rehm, G., Rußwurm, D., Defourny, J.: Schweißen von Tempcore-Betonstahl. Betonwerk + Fertigteil-Technik 4/1979, S. 228-234.
- [92] Rehm, G., Rußwurm, D.: Dauerschwingfestigkeit von Betonrippenstählen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1/1980, S. 26-31.

- [93] Rehm, G., Rußwurm, D.: Warmbiegefähigkeit von Betonstählen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 7/1980, S. 431-435.
- [94] Rehm, G., Rußwurm, D.: Untersuchungen über die Schwingfestigkeit geschweißter Betonstahlverbindungen, Teil 2, Schwingfestigkeitsversuche. DAfStb, Heft 317, 1981 (UB 81 E 435).
- [95] Rellick, J.R., McMahon, C.J. jr.: Intergranular Embrittlement of Iron-Carbon Alloys by Impurities. Metallurgical Transactions 5, Nov. 1974, p. 2439-2450.
- [96] Riechers, H.-J.: Betonstahl in Ringen - Eigenschaften und bauaufsichtliches Verfahren für Zulassung und Überwachung. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 12/1985, S. 788-793.
- [97] Riechers, H.-J.: Dynamische Eignung von kaltgeripptem Betonstahl in Ringen (BSt 500 KR). Betonwerk + Fertigteil-Technik, 11/1986, S. 762-764.
- [98] Riechers, H.-J.: Betonstahl in Ringen - Verfahrensweise und bisherige Entwicklung. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1/1987, S. 19-22.
- [99] Riechers, H.-J., Hoffmann, G., Holzapfel, F.: Güteüberwachung von Betonstählen. Bautechnik 65 (1988), H. 7, S. 233-242.
- [100] Robiller, G.: Probleme des rechnergesteuerten Zugversuchs. Materialprüfung 31 (1989), H. 11-12, S. 371-376.
- [101] Rostasy, F.S., Scheuermann, J., Wiedemann, G.: Verhalten von Spann- und Bewehrungsstahl bei tiefen Temperaturen. Betonwerk + Fertigteil-Technik 2/1982, S. 74-84.
Teil 2. Betonwerk + Fertigteil-Technik 3/1982, S. 163-170.
- [102] Rostasy, F.S., Sager, H.: Zum Einfluß hoher Temperaturen auf das Verbundverhalten von Betonrippenstählen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 11/1982, S. 663-669.
Teil 2. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 12/1982, S. 732-738.
- [103] Rotermund, K.J.: Schweißen im bauaufsichtlichen Bereich - Rechtsgrundlagen und Verfahrensweg. Schweißen+Schneiden 44 (1992), H. 9, S. 492-494.
- [104] Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik. Band I: Werkstoffe, 2. Aufl. Springer, Berlin 1980.
- [105] Ruge, J., Kemmann B.: Optimierung der Einstellparameter und Streuung der Gütemerkmale beim Widerstandspunktschweißen gerippter Betonstähle. Schweißen+Schneiden 33 (1981), H. 11, S. 585-590.
- [106] Rußwurm, D.: Anwendungsmöglichkeiten des Schweißens von Bewehrungen im Stahlbetonbau. Schweißen+Schneiden 25 (1973) H. 2, S. 62-63.
- [107] Rußwurm, D., Rehm, G.: Dauerschwingfestigkeit (Betriebsfestigkeit) von Betonstahlmatten. Betonwerk + Fertigteil-Technik 3/1979, S. 169-176.
- [108] Rußwurm, D., Wagner, O.: Untersuchung der Vergleichbarkeit von Kaltversuch und Rückbiegeversuch an Betonstählen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 8/1980, S. 502-503.

- [109] Rußwurm, D.: Schweißen unterschiedlicher Metalle. Tagungsbericht 14, Landesvereinigung der Prüfengeure für Baustatik Baden-Württemberg e.V., Freudenstadt 1986, S. 48-66.
- [110] Rußwurm, D.: Schweißen im Stahlbetonbau. Schweißen+Schneiden 39 (1987), H. 1, S. 17-23.
- [111] Rußwurm, D.: Teilsicherheitsbeiwerte für Werkstoffwiderstände. Betonwerk + Fertigteil-Technik 10/1988, S. 30-36.
- [112] Rußwurm, D.: Spezielle Fragen beim Schweißen von Betonstählen. Schriftenreihe DASTB Heft 397, 1989.
- [113] Rußwurm, D.: Gleichmaßdehnung von Betonstählen. Schriftenreihe DASTB Heft 397, 1989.
- [114] Rußwurm, D.: Duktilität. Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), H. 10, S. 246-249.
- [115] Rußwurm, D.: Betonstähle für den Stahlbetonbau: Eigenschaften und Verwendung. Institut für Stahlbetonbewehrung e.V., München. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1993.
- [116] Schießl, P, Martin, H.: Zeitschwingfestigkeit von geschweißten Betonstahlmatten. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 12/1981, S. 733-738.
Teil 2. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1/1982, S. 33-38.
- [117] Schießl, P., Kutsch, H., Martin, H.: Bautechnische Anforderungen an die Spannungs-Dehnungslinie von geschweißten Betonstahlmatten. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 5/1983, S. 338-343.
Teil 2. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 6/1983, S. 380-384.
Teil 3. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 7/1983, S. 458-462.
- [118] Schmidt, W.: Der Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Eigenschaften metallischer Werkstoffe. Draht 42 (1991) H. 9, S. 622-626.
- [119] Schönherr, W.: Auswahl der Stahlgüte für geschweißte Stahlbauten - Vergleich der Regelung nach DAST-Richtlinie 009 und Eurocode 3. Stahlbau 61 (1992), H. 7, S. 199-201.
- [120] Schrage, I.: Zur Verformbarkeit punktgeschweißter Betonstahlmatten an der Schweißstelle. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1/1982, S. 41-46.
Teil 2. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 2/1982, S. 84-90.
- [121] Schwarz, S.: Praktischer Einsatz einer elektronisch gesteuerten Richt- und Schneideanlage für Betonstahl in Ringen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 8/1985, S. 540-542.
- [122] Schwarzkopf, M: Schwingverhalten von geschweißten Betonstahlverbindungen - Kreuzungsstoß Heftverbindung (KS-HV). Diss. RWTH Aachen 1992.
- [123] Seyffarth, P.: Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 75, DVS-Verlag Düsseldorf 1982.
- [124] Seyffarth, P., Meyer, B., Scharff, A.: Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 110, DVS-Verlag Düsseldorf 1992.

- [125] Sohn, M.: Schweiß- und Tieftemperatureignung von Betonstählen. Schweißen+Schneiden, 43 (1991) H. 6, S. 324-327.
- [126] Steidl, G.: Schaden durch Schweißarbeiten an Betonstählen III U. Der Praktiker (1979) H. 9.
- [127] Thier, H.: Wärmeführung beim Schweißen niedriglegierter Stähle. DVS-Berichte 107 (1987), S. 18-28.
- [128] Thier, H.: Optimierung von Schweißparametern zum Schweißen höherfester Stähle. DVS-Berichte 160, S. 114-122.
- [129] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Werkstoffkunde Stahl, Band 2: Anwendung, Springer-Verlag 1985.
- [130] Winn, W.H.: Weldability of Low Alloy Steels. Brit. Weld. J. 11 (1964), S. 366-376. (zitiert nach Ruge 1980)
- [131] Wirtz, H.: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen. Teil I: Grundlagen. DVS-Verlag, Düsseldorf 1966. Teil II: Anwendung. DVS-Verlag, Düsseldorf 1968.
- [132] Wuich, W.: Übersicht der wichtigsten Stähle und deren Eignung zum Schweißen. Stahlbau 48 (1979), H. 10, S. 315-317.
- [133] Zwätz, R.: Wer trägt die Verantwortung für eine schlechte Schweißnaht. Praktiker 6/92, S. 362-367.

12.3 Diplom- und Vertieferarbeiten

- [134] Kammel, Adi: Untersuchungen zum Einfluß der Diffusion von C und N beim Altern von (Beton-)Stählen, September 1994.
- [135] Maierhöfer, Dieter: Wärmeübergang auf die Betonstahlprobe beim künstlichen Altern, Juni 1990.
- [136] Grothe, Andreas: Untersuchungen zum Altern von Betonstählen, Februar 1991.
- [137] Häfele, Götz: Untersuchungen zur Schwankungsbreite der bezogenen Rippenfläche bei BSt 500 KR, Januar 1993.
- [138] Kuch, Thorsten: Rückbiegeverhalten von Betonstählen, 1994.
- [139] Timmers, Regine: Untersuchung einiger mechanisch-technologischer Eigenschaften von BSt 500 KR nach verschiedenen Alterungsprozeduren, Februar 1993.
- [140] Traub, Christine: Spröbruchverhalten von Betonstählen bei Temperaturen unter 0°C, 1989.

12.4 Sonstige

- [141] Baehre, R., Steidl, G.: Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile, VA Bericht Nr. 921570. Schlußbericht zum DIBt Vorhaben Az.: IV 1-5-669/92, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, Universität Karlsruhe, 01.08.94.

- [142] Bundesanstalt für Materialprüfung, Fachgruppe 6.4. „Fügetechnik“: Schreiben an das Institut für Bautechnik Flo/Bl., 29.09.78. Betr. Gutachten der BAM Az.: 6.4-43-76.
- [143] Deutsches Institut für Bautechnik: Schreiben an die Betonstahlprüfstellen; Betr.: Klärung von schweißtechnischen Fragen zur chemischen Zusammensetzung der Betonstabstähle nach DIN 488 bzw. prEN 10080. I 42-BSt-Analyse/Krull/09.08.93.
- [144] Frank, G.: BASIC-Programme zur Berechnung von Schweißdaten; 12 Programme mit 48 Anwendungsbeispielen. Fachbuchreihe Schweißtechnik 87, DVS-Verlag, Düsseldorf 1988.
- [145] Frank, G.: SZTU - Berechnen und grafisches Darstellen von Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubildern und Eigenschaftsdiagrammen für Baustähle. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [146] Köhler, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart: Brief an das Deutsche Institut für Bautechnik 22-312, 07.09.93.
- [147] Kruse, Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Braunschweig: Brief an das Institut für Bautechnik 623/Kr/Pe, datiert 08.01.93, vermutlich 08.10.93.
- [148] Mang, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine: Brief an das Deutsche Institut für Bautechnik pk, 18.08.93.
- [149] Rehm, Prüfstelle für Betonstahl Prof. Rehm: Brief an die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine Prof.R/B, 19.07.94.
- [150] Thier, H.: TEMPWEZ, Programm zur Berechnung der Temperaturen in der Wärmeeinflußzone niedriglegierter Stähle. DVS-Verlag, Düsseldorf.