

ISBN 3-88314-934-9

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Forschungsbericht 164

Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger

von Rolf Helms, Bernd Jaenicke,
Hartmut Wohler, Claus-Peter Bork

September 1989

104 Seiten, 50 Abbildungen, 13 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 8 11 20 29 Teletex 2 627-308 372=bamb

Copyright © 1989 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war die Überprüfung der Festigkeitskennwerte in Technischen Regelwerken für Schweißverbindungen in bezug auf ihre Anwendbarkeit bei der Dimensionierung geschweißter Großbauteile.

Es wurden Ermüdungsversuche an großen geschweißten I-Blechträgern (Steghöhe 500 mm, Stegdicke 15 mm, Gurtbreite 250 mm, Gurtdicke 35 mm, Länge 12 bzw. 7 m) bei wechselnder bzw. schwelender Einstufen-Beanspruchung durchgeführt (R = -1 bzw. R = 0). Untersucht wurden E-Hand-Schweißungen: Querbeanspruchte Stumpfstöße und längsbeanspruchte Halsnähte, die sowohl als Werkstattschweißung als auch als Montageschweißung ausgeführt waren. In einem weiteren Schritt wurde untersucht, wie die Schwingfestigkeit von Halsnähten durch eine Automaten-Schweißung beeinflußt wird.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den zulässigen Spannungen einiger Regelwerke für Schweißverbindungen (DIN 15018 (84), DS 804 (83) und EUROCODE 3 (84)) zeigt, daß eine auf den Kennwerten der DIN 15018 basierende Bemessung geschweißter Großbauteile bei den hier untersuchten Nahtformen (Kerbfällen) unzureichende Sicherheiten aufweist. Die in DS 804 ausgewiesenen zulässigen Spannungen ermöglichen eine sichere Bemessung, wenn die in Großbauteilen vorhandenen Eigenspannungen in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Für den EUROCODE 3 (Entwurfassung 84) ergeben sich Änderungsvorschläge. Die im EUROCODE vorgenommene Besserstellung Automaten geschweißter Halsnähte ist nur dann berechtigt, wenn Unterbrechungen des Schweißprozesses durch besondere Qualitätssicherungsmaßnahmen während der Fertigung verhindert werden können.

Die Schwingfestigkeit geschweißter Großbauteile wird wesentlich durch die Häufigkeit von Schweißfehlern in den Nähten bestimmt. Daher kommt dem Aufdecken derartiger Imperfektionen mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) eine besondere Bedeutung zu. Aus der mangelhaften Korrelation zwischen Befunden von Ultraschallprüfungen in Standardprüftechnik (d.h. bei Anwendung von Routine-Prüfköpfen) und den bei den Versuchen dann tatsächlich freigelegten Schweißfehlern kann gefolgert werden, daß der ZfP bei Konstruktionen der hier untersuchten Art allenfalls die Bedeutung eines die Sorgfalt des Schweißers beeinflussenden Elements der Qualitätssicherung zukommt.

Schlagwörter

Schwingfestigkeit - geschweißte Großbauteile - St 52-3 - Stumpfstoß - Längskehlnaht - Werkstattschweißung - Montageschweißung - Lichtbogenhandschweißung - UP Automaten-schweißung - Zerstörungsfreie Prüfung - Schweißfehler - zulässige Spannungen - Regelwerke

Summary

The aim of this investigation was to check the allowable stresses for fatigued welded joints with respect to safe design of large welded structures.

Fatigue tests with constant amplitudes under alternating respectively pulsating loads (stress ratio $R = -1$ respectively $R = 0$) were performed on large welded I-beams: (web height 500 mm, web thickness 15 mm, flange width 250 mm, flange thickness 35 mm, total length 12 m respectively 7 m). The investigation was focused on manual arc weldings: transverse stressed butt joints (welded under site conditions) and longitudinal stressed double fillet welds (welded under workshop conditions). Moreover the influence of automatic submerged arc welding on the fatigue strength of fillet welds was investigated.

The comparison between the experimental results with the allowable stresses of three standards concerning welded joints (DIN 15018, DS 804, EUROCODE 3) point out, that the safety of large welded structures designed according to DIN 15018 is not sufficient as far as the above mentioned types of joints are concerned. Applying the allowable stresses given in DS 804 leads to a safe design if the existing residual stresses in large welded structures are considered in an appropriate manner. Proposals for modifications in EUROCODE 3 (draft 1984) are given. The bonus given in EUROCODE 3 for automatic submerged arc welded fillets can only be granted if interruptions of the welding process are prevented by special quality-control precautions during fabrication.

The fatigue strength of large welded structures is essentially determined by the amount of weld defects in the seams. The detection of such defects with non destructive testing methods therefore was attached specific significance. However, the correlation between the results of ultrasonic tests and the real points where fatigue cracks developed from internal weld defects was very poor.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	7
2. Aufgabenstellung	11
3. Versuchskörper	12
3.1 Allgemeines	12
3.2 Trägerabmessungen, Nahtform, Nahtvorbereitung..	12
3.3 Trägerherstellung, Werkstoffe, Nahtnachbe- arbeitung	20
3.4 Qualität der Schweißnähte	25
4. Durchgeführte Untersuchungen	31
4.1 Ermüdungsversuche	31
4.1.1 Versuchsaufbau.....	31
4.1.2 Schädigungskriterium	37
4.1.3 Versuchsende	38
4.2 Lastspannungen	38
4.3 Eigenspannungen	41
5. Versuchsergebnisse und Vergleich mit Regel- werken	45
5.1 Versuchsergebnisse	45
5.2 Anmerkungen zu den Regelwerken	49
5.3 Vergleich der Versuchsergebnisse mit zulässigen Spannungen aus Regelwerken	55
5.3.1 Stumpfstöße (E-Hand-Schweißung)	56
5.3.2 Halsnähte (E-Hand-Schweißung)	62
5.3.3 Halsnähte (Automaten-Schweißung).....	67
5.3.4 Spezielle Analyse der E-Hand-geschweißten Halsnähte.....	70
6. Analyse der Versuchsergebnisse im Hinblick auf Einflüsse der Nahtform, des Schweißverfahrens und der Fertigungsbedingungen.....	74
6.1 Zweck der Analyse.....	74
6.2 Vorgehensweise.....	74
6.3 Ergebnisse der Analyse.....	78
7. Fraktographische Untersuchungen	81
7.1 Anzahl und Lage der Schwingungsbrüche.....	81
7.2 Rißauslösende Schweißimperfectionen.....	85
8. Aussagekraft von zerstörungsfreien Prüfungen und von Fertigungsprotokollen im Hinblick auf rißrelevante Imperfectionen	91
9. Bewertende Zusammenfassung	94
9.1 Anmerkungen zum EUROCODE 3 (84)	96
10. Danksagungen	97
11. Literaturverzeichnis	98

Formelzeichen und Erläuterungen

k	Neigungsexponent der Wöhlerlinie in doppelt-logarithmischer Auftragung
L	Gesamtlänge eines "frei-frei"-schwingenden Trägers
x	Längskoordinate in Richtung der Trägerlängsachse
$y(x)$	Verlauf der Trägersauslenkung
$M_a(x)$	Verlauf der Biegemomenten-Amplitude
N_A	Anrißschwingspielzahl
N_{A_i}	Anrißschwingspielzahl des i -ten Anrisses
$N_{A\text{ Bezug}}$	Bezugs-Anrißschwingspielzahl $N = 2 \cdot 10^6$ (Bild 5.3-6) für Analyse in Abschn. 5.3.4
$N_{A_i\text{ Bezug}}$	auf einheitliches Nennspannungsamplituden-Niveau (75 N/mm^2) extrapolierte Anrißschwingspielzahl des i -ten Anrisses für Analyse in Abschn. 6.2 (Bild 6.2-1)
N_E	Schwingspielzahl bei Versuchsende (Abbruch)
R	Spannungsverhältnis = σ_u / σ_o
T_A	Streuspanne der Spannungsamplituden = $\sigma_{aPB90\%} / \sigma_{aPB10\%}$
σ_a	Amplitude der Nennspannung in Trägerlängsrichtung
σ_{a_i}	Amplitude der Nennspannung in Trägerlängsrichtung des i -ten Anrisses
$\sigma_{a\text{ Bezug}}$	Nennspannungsamplituden-Niveau (Bild 6.2-1) für Analyse in Abschn. 6.2
$\sigma_{a_i\text{ Bezug}}$	auf Bezugsschwingspielzahl ($N_A = 2 \cdot 10^6$) extrapolierte Nennspannungsamplitude des i -ten Anrisses für Analyse in Abschn. 5.3.4 (Bild 5.3-6)
$\sigma_{a, \ddot{o}}$	Örtliche Nennspannungsamplitude an der Stelle des Schwinganrisses (bezogen auf die x -Koordinate)
σ_{aR}	Amplitude der Biegerandspannung
$\sigma_a(x)$	Nennspannungsamplituden-Verlauf
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung

1. Einleitung

Die Vielfalt von nicht vorwiegend statisch belasteten großen Stahlkonstruktionen in geschweißter Ausführung ist einer der Gründe, dem Festigkeitsverhalten bzw. der Lebensdauer unter schwingender Beanspruchung nachzugehen. Der Anwendungsbereich großer Schweißkonstruktionen ist heute nicht nur auf den Baubereich (Eisenbahn- und Straßenbrücken) beschränkt. Auch im Schwermaschinenbau, im Kranbau, im Schiffbau und in der Offshore-Technik finden sich zahlreiche Beispiele großer geschweißter Konstruktionen.

Die Zahl der nationalen Regelwerke für die zeit- und dauerfeste Auslegung von Schweißverbindungen ist groß /2 ...7/. Oft sind diese auf bestimmte Anwendungsfälle bezogen, gehen dabei von gewachsenen, aber recht unterschiedlichen Grundvorstellungen aus und führen daher teilweise auch zu unterschiedlichen zulässigen Beanspruchungen. Da der Stahlbau in vielen Bereichen der Technik in Konkurrenz zu anderen Bauweisen steht, ist die Erarbeitung von sicheren Auslegungswerten mit möglichst geringen, dabei aber sicher quantifizierbaren Sicherheitsabständen notwendig, um so, neben den heute immer wichtiger werdenden Gesichtspunkten der Unterhaltung und der Wegnehmbarkeit von Bauwerken, auch von der Seite der Auslegung her spezifische wirtschaftliche Vorteile der Stahlbauweise herausstellen zu können.

Die in den Regelwerken für Schweißverbindungen angegebenen zulässigen Spannungen wurden zunächst überwiegend auf der Grundlage allgemeiner Ingenieurserfahrungen festgelegt. Ihre Brauchbarkeit wurde später anhand von Versuchen mit Proben überprüft. So wurden z.B. im Rahmen eines Untersuchungsprogramms des DAST /8/ die in der zu jener Zeit gültigen Bundesbahnvorschrift DV 848 /1/ zugelassenen Spannungen mit sogenannten Kleinflachproben (Länge 620 mm, Prüfquerschnitt 60 x 14 mm) überprüft und im wesentlichen auch bestätigt.

Die Ergebnisse einer später auf Veranlassung der Deutschen Bundesbahn durchgeführten umfangreichen Analyse der seinerzeit verfügbaren Versuchsergebnisse von schwingbeanspruchten Schweißverbindungen /9/ machten jedoch bei einzelnen Nahtformen

zeit verfügbaren Versuchsergebnisse von schwingbeanspruchten Schweißverbindungen /9/ machten jedoch bei einzelnen Nahtformen deutliche Reduzierungen der zulässigen Spannungen notwendig. Diese wurden dann bei der grundlegenden Überarbeitung der alten DV 848 /1/ im Zusammenhang mit der Einführung eines Betriebsfestigkeitsnachweises in der neuen DS 804 /2/ berücksichtigt. Spätere Untersuchungsergebnisse zum Schwingfestigkeitsverhalten schubbeanspruchter Kehlnähte /11/ führten dann zu einer Reduzierung der betreffenden zulässigen Spannungen in den Regelwerken /2/ und /4/.

Die im Laufe der Zeit weiter angewachsenen Erfahrungen zum Schwingfestigkeitsverhalten von Schweißverbindungen führte zu der Erkenntnis, daß nach dem Schweißen von Bauteilen, die nachträglich nicht mehr wärmebehandelt werden, in vielen Fällen Eigenspannungszustände vorliegen, die zu weitgehend mittelspannungsunabhängigen ertragbaren Spannungsamplituden führen /10.1/. Die heute allgemein vorhandene Einschätzung eines geringen Einflusses von Lastmittelspannungen auf die zulässigen Spannungsamplituden von Schweißverbindungen findet ihren Niederschlag in zwei neueren Regelwerken /12, 13/ und einem weiteren Regelwerksentwurf /14/.

Auf welche Weise dem Größen- und dem Fertigungseinfluß bei geschweißten Großbauteilen Rechnung zu tragen ist, blieb bisher jedoch noch weitgehend offen. Zwar wurde, gestützt auf die in Teil 1 der o.a. Analyse /9/ enthaltenen Versuchsdaten zur Schwingfestigkeit bauteilähnlicher, großer geschweißter Versuchskörper, bereits in /10.1/ darauf verwiesen, daß bei großen geschweißten Bauteilen geringere Schwingfestigkeiten beobachtet werden (bei gleichzeitig reduzierten Streuungen). Ähnliche Befunde ließen sich auch aus Untersuchungen /15/ ableiten, die im Auftrag des Forschungs- und Versuchsamtes des Internationalen Eisenbahnverbandes (ORE) durchgeführt wurden. Vermutlich hat man den Umfang diesbezüglicher Versuchsergebnisse jedoch als noch zu gering angesehen /10.1/, so daß bei der Neuformulierung der Bundesbahn-Vorschrift DS 804 /2/ ausschließlich Versuchsergebnisse von Kleinprüfkörpern berücksichtigt wurden.

mit Zwängungen verbunden (z.B. bei großen Montagestößen), die zusätzliche Zwängungsspannungen hervorrufen. Zum anderen ergeben sich an Bauteilen in vielen Fällen ungünstigere Schweißpositionen als an Proben (Herstellungseinfluß). Während Proben in der Regel ohne äußere Verspannung und zumeist in Wannenposition geschweißt werden, können die Fertigungsbedingungen bei Großbauteilen (z.B. Steignähte, Überkopf-Arbeiten) sowohl eine Verschlechterung der Schweißnahtaußengeometrie (Formfehler wie z.B. Nahtschuppung, Einbrandkerben etc.) als auch eine Zunahme von Imperfektionen im Nahtquerschnitt (Innenfehler wie z.B. Bindefehler, Poren etc.) zur Folge haben (fertigungstechnischer Größeneinfluß). Doch selbst wenn in Sonderfällen die Fertigungsbedingungen großer Bauteile denen von Laborproben weitgehend angeglichen werden können, so ist wegen des mit zunehmender Bauteilgröße wachsenden Schweißnahtvolumens bzw. der zunehmenden Schweißnahtlänge von einer zunehmenden Wahrscheinlichkeit für das Auftreten gefährlicher äußerer und innerer Imperfektionen auszugehen, wodurch sich der Kerbeinfluß insgesamt mit wachsender Bauteilgröße verstärkt (statistischer Größeneinfluß).

In diesem Zusammenhang kommt der Aufdeckung von fertigungsbedingten inneren Fehlern eine große Bedeutung zu. Hieraus wiederum ergibt sich die Notwendigkeit einer engen Kooperation zwischen der Schweißtechnik und den Fachleuten der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP).

Während Schweißnahtaußenkerben durch relativ einfache Nachbearbeitungen (Beschleifen oder WIG-Nachbehandlung) in ihrer Wirkung weitgehend entschärft werden können, ist eine nachträgliche Entfernung von Innenfehlern oft nur mit erheblichem Aufwand möglich. Für eine Vielzahl geschweißter Großbauteile ist die Forderung nach absolut fehlerfreien Schweißnähten wirtschaftlich nicht vertretbar. Daher muß - neben sichtbaren äußeren Imperfektionen - auch vom Vorhandensein von Innenfehlern in unbekannter Anzahl und Geometrie von vornherein ausgegangen werden. Bei der experimentellen Gewinnung praxisbezogener Aussagen über das Schwingfestigkeitsverhalten von großen geschweißten Bauteilen sind demnach die in der Praxis erreichbaren Schweißnahtqualitäten zu berücksichtigen.

Die Berücksichtigung schweißtechnischer Imperfektionen bei der Dimensionierung bzw. beim Festigkeitsnachweis geschweißter Großbauteile kann auf unterschiedliche Weise erfolgen:

- a) In den Fällen, in denen innere und äußere Imperfektionen ausreichend genau zu detektieren und geometrisch zu beschreiben sind, kann die Schwingfestigkeit geschweißter Bauteile heute durch Anwendung der Kerb- und/oder Bruchmechanik nachgewiesen werden.
- b) In den Fällen, in denen eine hinreichende Erfassung und Beschreibung dieser Fehler nicht möglich ist, muß der Schweißfehlereinfluß summarisch auf der Basis statistisch abgesicherter Versuchsdaten von geschweißten Großbauteilen berücksichtigt werden.

Die vorliegende Untersuchung liefert einen Beitrag zu der unter b) genannten, zur Zeit noch am häufigsten angewendeten Vorgehensweise. Gleichzeitig werden die Möglichkeiten für eine zerstörungsfreie Erfassung von Schweißnahtinnenfehlern untersucht.

Der Forschungsbericht faßt die Ergebnisse von insgesamt vier Teilvorhaben, die über einen längeren Zeitraum im Labor 1.22 "Schwingfestigkeit" der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, durchgeführt wurden, zusammen.

2. Aufgabenstellung

Ausgangspunkt der Untersuchungen war ursprünglich die Frage, ob die in den alten Vorschriften für geschweißte Eisenbahnbrücken der Deutschen Bundesbahn (DV 848, Ausgabe 1955 /1/ - jetzt DS 804, Ausgabe 1983 /2/) festgelegten Spannungen für Schweißverbindungen in Eisenbahnbrücken durch Versuche mit Bauteilen in Realgröße bestätigt werden oder ob sie geändert werden müssen. Im Vordergrund des Interesses stand dabei besonders das Verhalten von Montagestößen vorgefertigter Träger. Aufgrund der Weiterentwicklung der Regelwerke rückte dann ein genereller Vergleich der erzielten Ergebnisse mit zulässigen Beanspruchungen in den Mittelpunkt des Interesses, wobei auch die Schweißnähte außerhalb von Montagestößen zu beachten waren.

Während bei Montagestößen die E-Hand-Schweißung angewendet werden muß, wird bei der Vorfertigung längerer Trägerabschnitte häufig die Automaten-schweißung (UP-Schweißung) herangezogen. Speziell für die Halsnähte war somit ein Vergleich beider Schweißverfahren einzubeziehen.

Als weitere Einflußvarianten waren konstruktiv unterschiedliche Stoßformen, die bei Eisenbahnbrücken Verwendung finden, zu untersuchen. Eine zusätzliche Variante war die unterschiedliche Ausbildung der Halsnähte, nämlich als durchgeschweißte DHV-Naht bzw. als Doppelkehlnaht mit Wurzelspalt. Hier war zu klären, ob bei der wirtschaftlicher zu fertigenden Doppelkehlnaht-Variante Abstriche bezüglich der Beanspruchbarkeit hinzunehmen sind.

Besondere Bedeutung kam der jeweiligen Nahtqualität der Stoßnähte zu. Die Stoßbereiche waren während der Fertigung zu durchstrahlen, damit eine bestimmte Nahtqualität eingehalten wurde; zusätzlich dazu wurde ein Teil der prüffähigen (durchgeschweißten) Halsnähte vor der Schwingprüfung mittels Ultraschallprüfung untersucht. Mit Hilfe dieser Befunde sollte geklärt werden, ob schwingbruchauslösende Imperfektionen detektierbar sind und/oder ob sie sich bestimmten Fertigungsereignissen zuordnen lassen. Zur Untersuchung des zuletzt genannten Aspekts waren umfangreiche Protokollierungen der Fertigung der Halsnähte erforderlich.

3. Versuchskörper

3.1 Allgemeines

Bei der Planung des Versuchsprogramms stand die Praxisbezogenheit der Ergebnisse im Vordergrund. Die Untersuchungen konzentrierten sich zunächst auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Baustellenstößen in großen geschweißten I-Blechträgern.

Im Gegensatz zu anderen aus der Literatur bekannten Untersuchungen an geschweißten Großbauteilen aus Stahl /16...19/ kamen hier die Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (ZfP) konsequent zur Anwendung, von denen eine Verbesserung der Vorhersage über das Schwingfestigkeitsverhalten der Bauteile erwartet wurde. Außerdem wurde wegen der im Verlauf der Untersuchungen festgestellten Schwächen der zerstörungsfreien Prüfverfahren in bezug auf die Aufdeckung von Schwachstellen in den Halsnähten versucht, durch eine Protokollierung des gesamten Fertigungsablaufs der Versuchsträger einen Zusammenhang zwischen der Lage von Schwingungsbrüchen und Ereignissen während des Schweißens herzustellen.

Die Versuchsträger wurden von besonders dafür abgestellten erfahrenen Schweißern (Prüfgruppe BII bzw. RII nach DIN 8560) in einem industriellen Stahlbau-Betrieb hergestellt. Neben der Fertigungseigenüberwachung durch den Hersteller einschließlich einer Durchstrahlungsprüfung der Stoßbereiche erfolgte die bereits erwähnte aufwendige Protokollierung des Fertigungsablaufs durch einen Mitarbeiter der BAM, und später eine ergänzende zerstörungsfreie Prüfung in der BAM.

3.2 Trägerabmessungen, Nahtform, Nahtvorbereitung

Es standen insgesamt 51 Versuchskörper in unterschiedlichen Bauformen zur Verfügung (Tabelle 3.2-1). Die Träger hatten je 500 mm Steghöhe und Längen von 12 m bzw. 7 m. Nahezu die Hälfte aller Versuchskörper kam dadurch zustande, daß nach

Tabelle 3.2-1 Versuchsträgertypen

Träger- typ	Ausführungsart			Schweiß- verfahren	An- zahl	R	Träger-Nr.
	Halsnähte	Gurtstoß	Stegstoß				
Ia1	Halsnähte im Stoßbereich ca. 120 mm als DHV-, sonst als Doppelkehlnähte; in Stoßnähe ca. 500 mm in Zwangslage, sonst in Wannenlage geschweißt	U-Naht	V-Naht	E-Hand	4	-1	S1-1 S1-2 SS1-1 S11-2
Ia2		X-Naht	X-Naht	E-Hand	4	0,05	S1-11 S1-12 S1-31 S3-32
Ib	Halsnähte durchgehend als DHV- Nähte; in Stoßnähe ca. 500 mm in Zwangslage, sonst in Wannen- lage geschweißt	X-Naht	X-Naht	E-Hand	4	0,05	S1-13 S1-14 S3-33 S3-34
					3	-1	S2-21 S2-22 S4-41 S4-42 S2-23 S2-24 S4-44
IIa	Halsnähte im Stoßbereich ca. 200 mm als DHV-, sonst als Doppelkehlnähte; in Stoßnähe ca. 420 mm in Zwangslage, sonst in Wannenlage geschweißt	1) U-Naht	1) V-Naht	E-Hand	4	-1	S5-1 S5-2 SS5-1 SS5-2
IIb		1) X-Naht	1) X-Naht	E-Hand	4	-1	S5-51 S5-52 SS5-51 SS5-52
IIIa	Halsnähte durchgehend als Doppelkehlnaht in Wannen- lage geschweißt (ohne Stoß)	-	-	E-Hand	2	0,05	01-11 01-12
					2	-1	01-13 01-14
IIIb	Halsnähte durchgehend als Doppel- kehlnaht; im Mittenbereich ca. 500 mm in Zwangslage, sonst in Wannenlage geschweißt (ohne Stoß)	-	-	E-Hand	2	0,05	03-31 03-32
					2	-1	03-33 03-34
IVa	Halsnähte durchgehend als DHV-Nähte in Wannenlage geschweißt (ohne Stoß)	-	-	E-Hand	2	0,05	02-21 02-22
					2	-1	02-23 02-24
IVb	Halsnähte durchgehend als DHV-Nähte; im Mittenbereich ca. 500 mm in Zwangslage, sonst in Wannenlage geschweißt (ohne Stoß)	-	-	E-Hand	2	0,05	04-41 04-42
					2	-1	04-43 04-44
A 1	Halsnähte durchgehend als Doppel- kehlnähte in Werkstattsschweißung (ohne Stoß)	-	-	UP-Automat	2	-1	A 1-15 A 1-16
A 2	Halsnähte durchgehend als DHV- Nähte in Werkstattsschweißung (ohne Stoß)	-	-	UP-Automat	2	-1	A 2-25 A 2-26
SA 1	Halsnähte im Stoßbereich ca. 120 mm als DHV-, sonst als Doppelkehl- nähte; in Stoßnähe ca. 500 mm in Zwangslage, sonst Werkstattsschweißung	X-Naht	V-Naht	E-Hand/ UP-Automat	2	-1	SA 1-15 SA 1-16
SA 2	Halsnähte durchgehend als DHV-Nähte; in Stoßnähe ca. 500 mm in Zwangs- lage, sonst Werkstattsschweißung	X-Naht	V-Naht	E-Hand/ UP-Automat	2	-1	SA 2-25 SA 2-26

1) Gurtstoß von ein auf zwei Gurtlamellen übergehend,
Gurt- und Stegstoß ca. 200 mm versetzt

Abschluß eines Schwingversuch jeweils der hochbeanspruchte
Stoß- bzw. Mittenbereich (s. Abschnitt 4) samt den ent-
standenen Ermüdungsanrissen herausgeschnitten und die nur
gering beanspruchten Trägerenden zu einem neuen Versuchs-

träger mit Montagestoß verschweißt wurden. Die äußeren Enden sämtlicher Versuchsträger erhielten bereits zu Beginn eine entsprechende Nahtvorbereitung.

Die Untersuchungen erfolgten in mehreren Teilabschnitten. Der erste Untersuchungsabschnitt konzentrierte sich auf die als Montageschweißung unter Baustellenbedingungen (Zwangslage) hergestellten Stöße. Hier wurden insgesamt 8 Träger geprüft:

- Trägertyp I:

Je 4 I-Blechträger mit jeweils einer Gurtplatte auf jeder Seite und durchgehendem Stumpfstoß im Gurt und im Steg (Bild 3.2-1) und

- Trägertyp II:

Je 4 I-Blechträger mit in Gurt und Steg versetztem Stumpfstoß, in der Gurtstoßstelle von einer Gurtplatte auf zwei Gurtplatten übergehend (Bild 3.2-2). Der Übergangsbereich wurde hier, entsprechend der zum Zeitpunkt der Konzipierung des Vorhabens noch gültigen DV 848, Abschn. 5.44 /1/, mit einer Neigung von 1:4 ausgeführt.

Ausgangshalbzeug für diese beiden Trägertypen waren vorgefertigte I-Blechträger, die im gleichen Fertigungsbetrieb als Werkstattschweißung (E-Handschiweißung, Wannennlage) hergestellt worden waren. Die Halsnähte zwischen Gurt und Steg waren dabei im Bereich der Werkstattschweißung (Wannennposition) als Doppelkehlnähte ausgebildet.

Im Zwangslagenbereich der Montageschweißung gingen die Doppelkehlnähte in eine DHV-Naht mit Doppelkehlnaht über, die die U-Naht bzw. die X-Naht des Gurtstoßes und die V-Naht des Stegstoßes kreuzte.

Um nach dem Schweißen der Gurtstöße die Stegbleche, die in den meisten Fällen dann nicht mehr genau fluchten, noch ausrichten zu können und um die Schrumpfungen der Montage-Stumpfnähte auf einer größeren Länge abbauen zu können (DV 848, Abschn. 6.17), müssen die Halsnähte im Zwangslagenbereich über eine genügend große Länge offen bleiben. Diese Forderung wurde dadurch erfüllt, daß die Trägerhälften über den spanend vorbereiteten Halsnahtbereich hinaus ca. 250 mm offen gehalten wurden (Bild 3.2-1 u. 3.2-2). Der gesamte offen gehaltene Bereich wurde bei der späteren Ver-

Trägertyp I

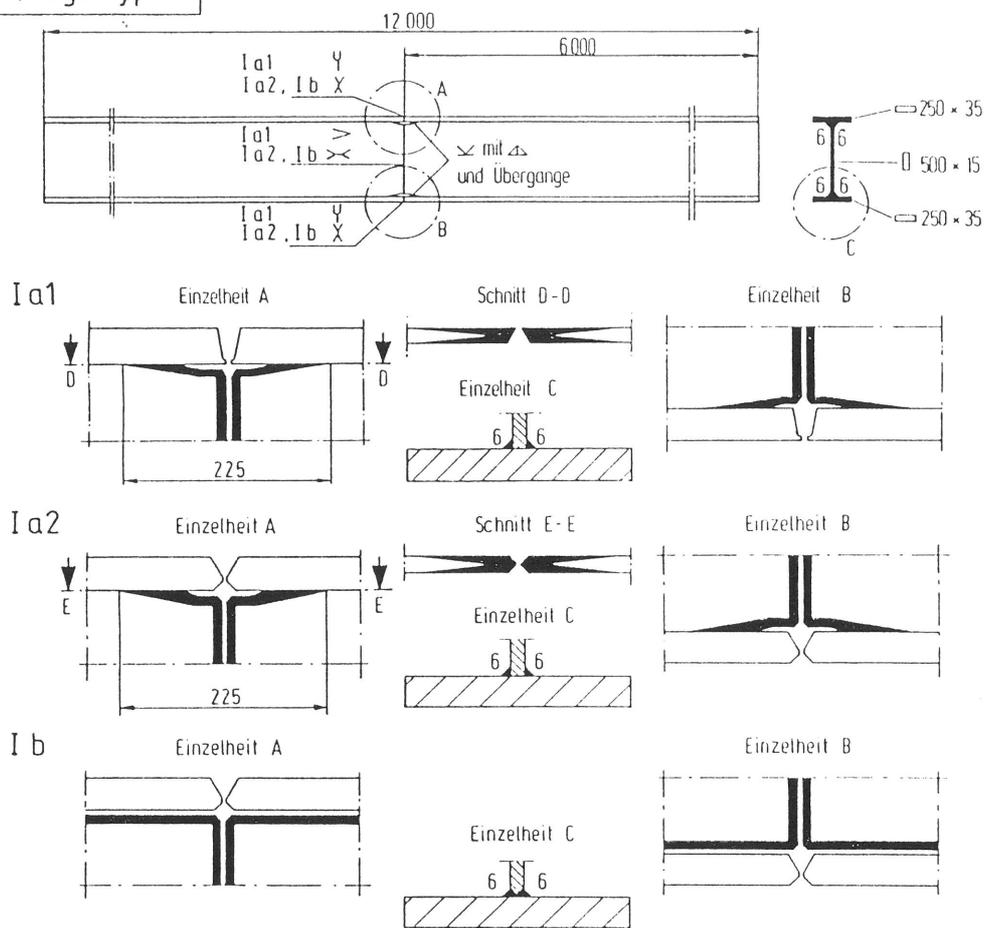


Bild 3.2-1 Trägertyp I (E-Hand-Schweißung), lange Form (siehe Tabelle 3.2-1)

Trägertyp II

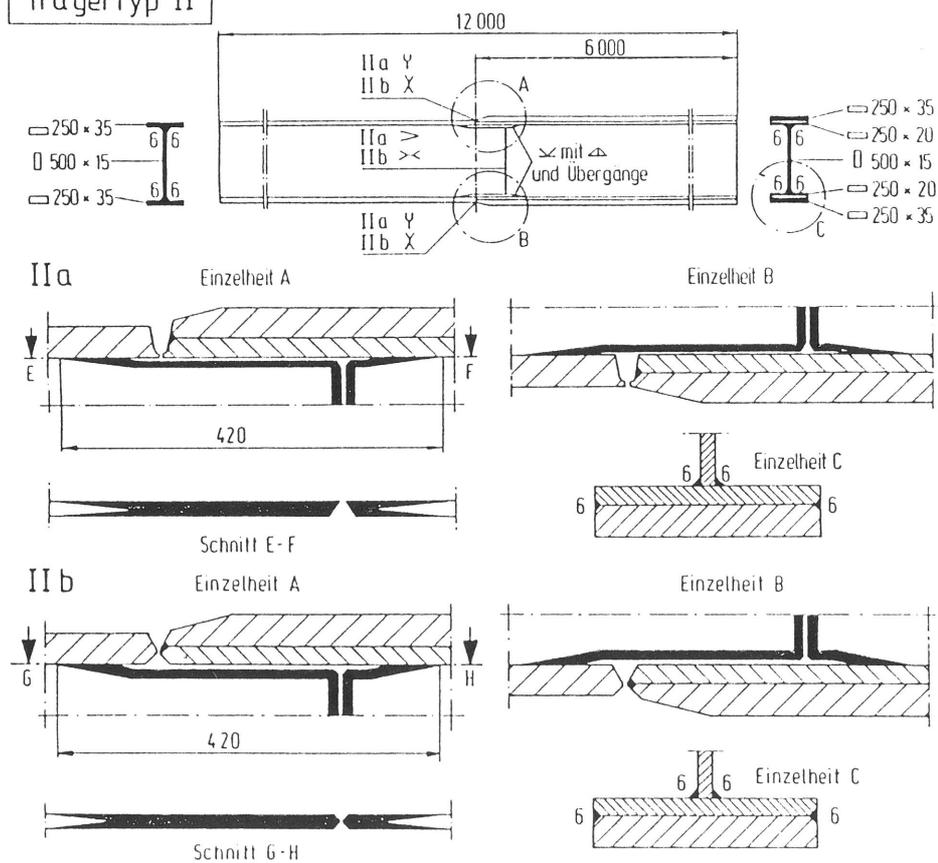
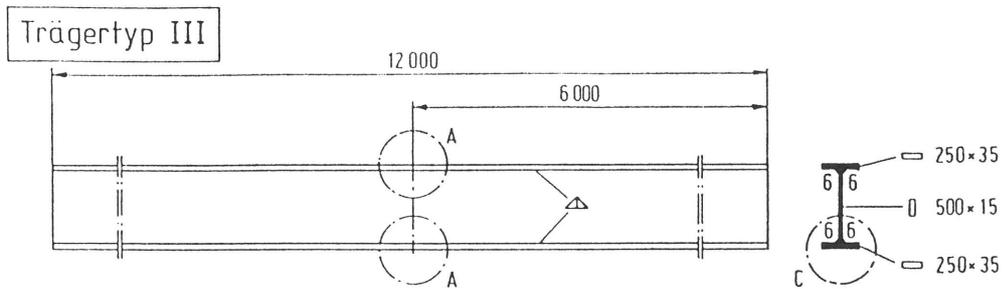


Bild 3.2-2 Trägertyp II (E-Hand-Schweißung), lange Form (siehe Tabelle 3.2-1)

suchsauswertung dann dem Bereich der Montageschweißung zugerechnet.

Da sich bei der Prüfung dieser Versuchsstücke zeigte, daß Ermüdungsrisse auch in den in Wannenposition geschweißten Bereichen der Halsnähte sowie vermehrt im Übergangsbereich Werkstatt-/Montageschweißung auftraten, wurden dann schwerpunktmäßig zwei zusätzliche Trägertypen (Typ III und IV, Bild 3.2-3), ohne Stoß untersucht:

- die Typen IIIa und IVa wiesen durchgehend in Wannenlage



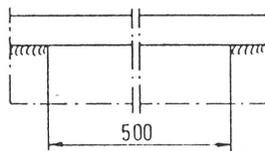
III a durchgehend Wannenlage

Einzelheit C



III b
wie III a

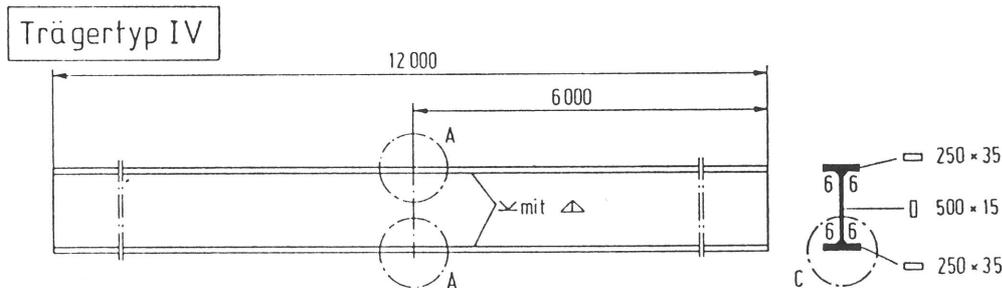
Einzelheit A



Einzelheit C



Zwangslage, bei Schweißposition "w" offen gelassen



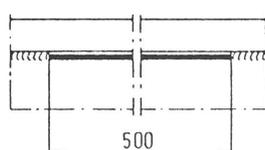
IV a durchgehend Wannenlage

Einzelheit C



IV b
wie IV a

Einzelheit A



Einzelheit C



Zwangslage, bei Schweißposition "w" offen gelassen

Bild 3.2-3 Trägertypen III und IV (E-Hand-Schweißung), lange Form (siehe Tabelle 3.2-1)

geschweißte Halsnähte auf, die beim Typ III als Doppelkehlnaht und beim Typ IV als DHV- mit Doppelkehlnaht ausgebildet waren.

- Bei der Fertigung der Typen IIIb und IVb wurde ein 500 mm langer Bereich in Trägermitte freigehalten, der nach Fertigstellung der Wannenlagenbereiche in Zwangslage geschweißt wurde.

Durch Gegenüberstellung der Ergebnisse der Typen "a" und "b" sollten Hinweise über den Einfluß des kritischen Übergangsbereichs Werkstatt-/Montageschweißung gewonnen werden.

Zusätzlich zu diesen, nach dem E-Handschweißverfahren hergestellten Versuchskörpern, wurden weitere 8 Träger durch

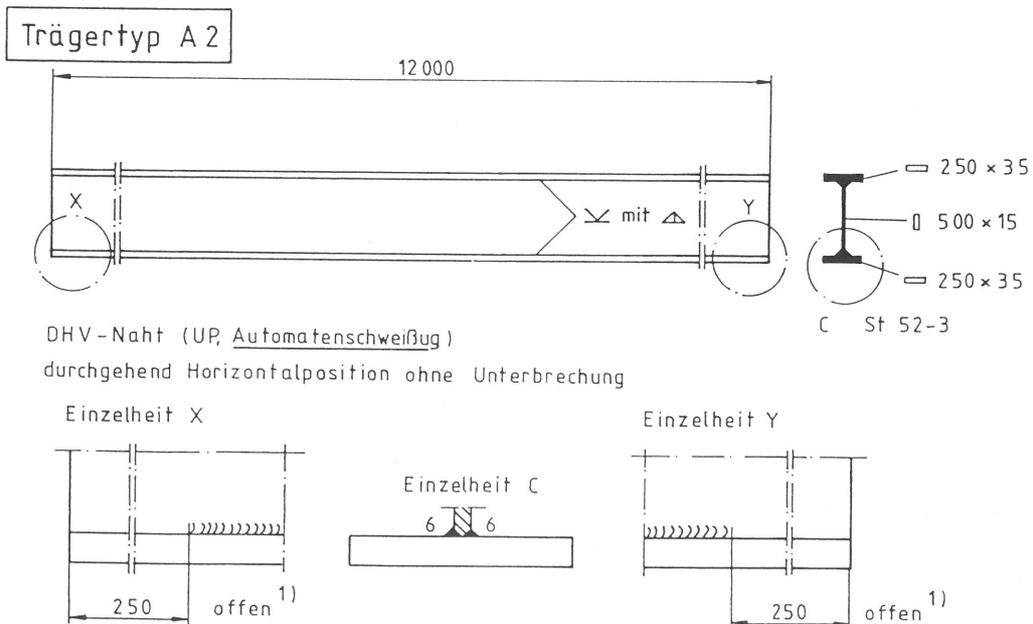
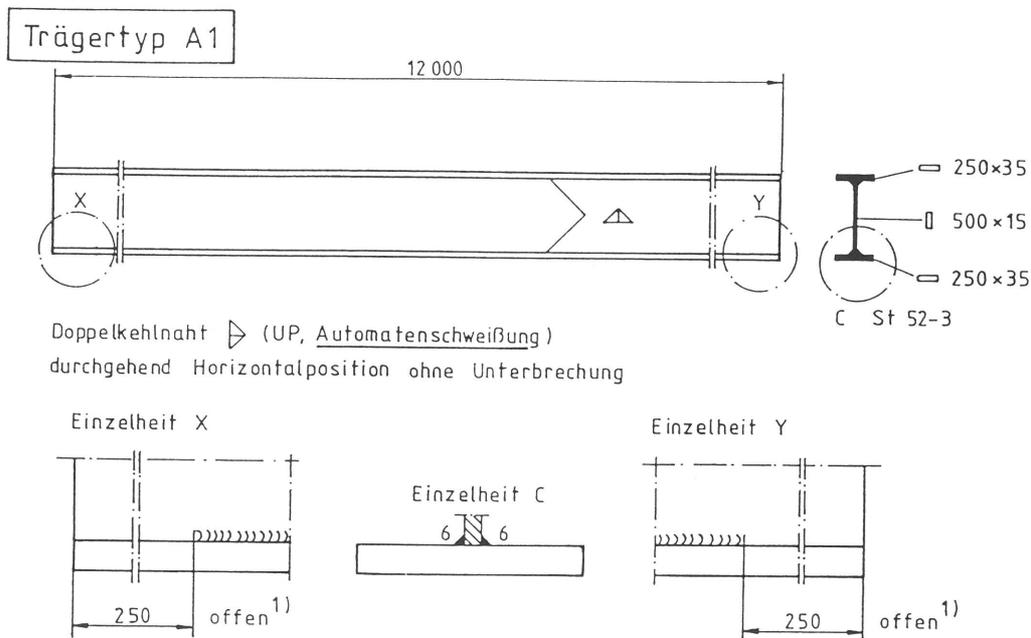


Bild 3.2-4 Trägertypen A1 und A2 (UP Automaten-Schweißung), lange Form (siehe Tabelle 3.2-1)

Automaten-Schweißung (UP-Schweißung) hergestellt, um auch die Auswirkung eines Schweißverfahrens ohne Unterbrechungen bei den langen Halsnähten studieren zu können. Im einzelnen waren das:

- Trägertyp A1:

2 Träger ohne Stoß mit durchgehender Doppelkehl-Halsnaht zur Verbindung von Steg und Gurt (Bild 3.2-4 oben),

- Trägertyp A2:

2 Träger ohne Stoß mit durchgehender DHV-Halsnaht zur Verbindung von Steg und Gurt (Bild 3.2-4 unten).

Nach Abschluß des ersten Versuchsabschnitts wurden, wie zuvor beschrieben, die Mittenbereiche dieser Träger samt den entstandenen Ermüdungsrissen entfernt und die Träger an den dafür vorbereiteten Enden (siehe Bild 3.2-5) bei einheit-

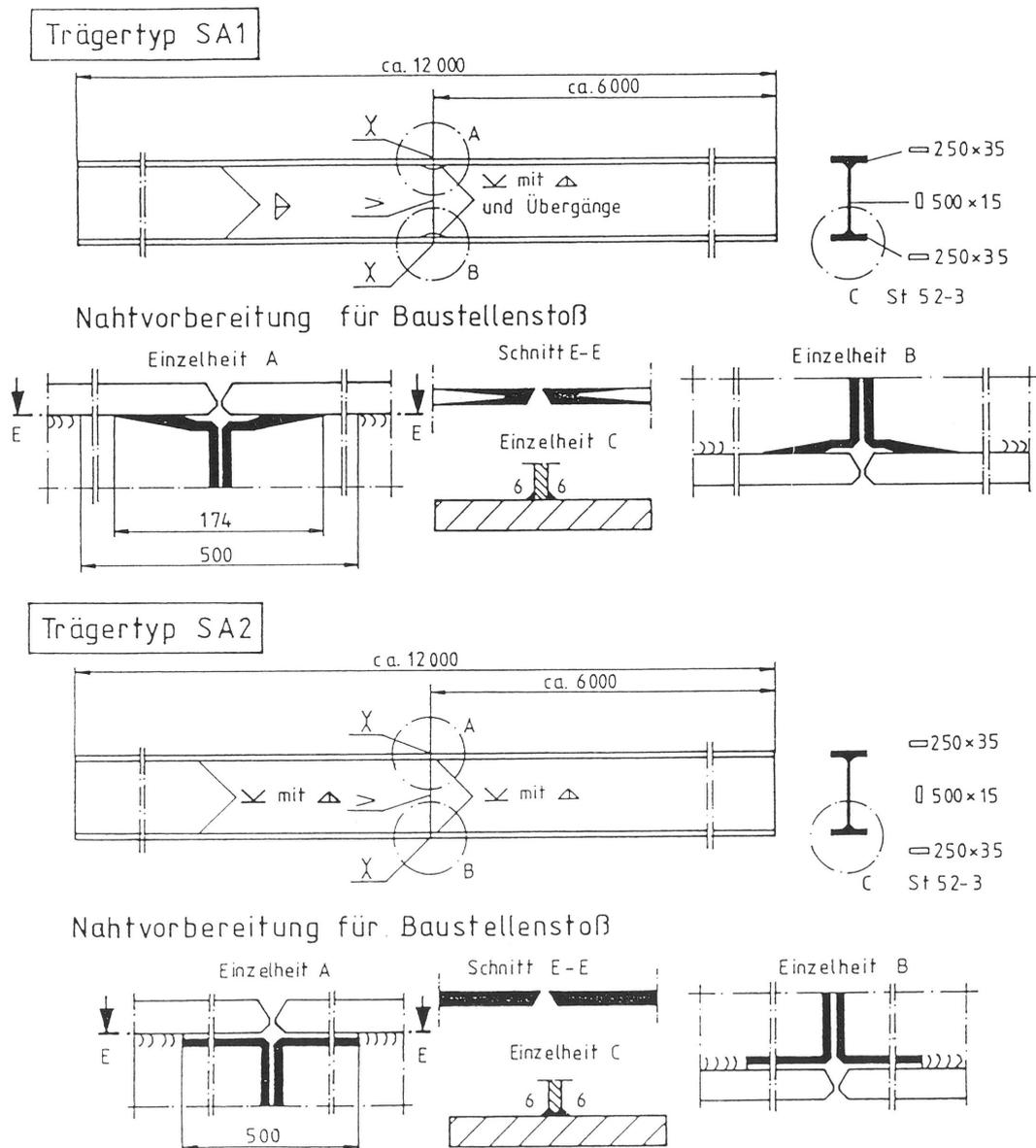


Bild 3.2-5 Trägertypen SA1 und SA2 (UP Automaten-Schweißung), lange Form (siehe Tabelle 3.2-1)

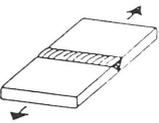
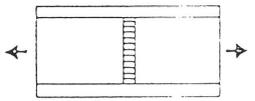
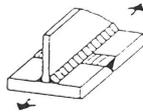
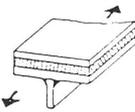
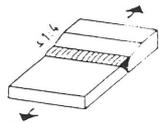
Nahtformen der Versuchsträger	
Durchlaufende Kehl- oder DHV-Naht zur Verbindung von Stegen mit Gurten	
Einteilige, quer zur Kraft- richtung durch Stumpfnah- Normalgüte verbundene Bauteile, Wurzel gegen- geschweißt	
Mit Stumpfnah- Normalgüte quer verbundene Steg- bleche	
Durchlaufende Kehl- oder DHV-Naht kreuzt eine Stumpfnah	
zusätzlich bei Trägertyp II	
Durchlaufende Flankenkehl-/ Stirnfugennaht zur Verbindung von Gurtplatten unterein- ander	
Einteilige, quer zur Krafrichtg. durch Stumpfnah- Normalgüte verbundene Bauteile mit ver- schiedenen Blechdicken, Wurzel gegengeschweißt	

Bild 3.2-6

Untersuchte Nahtformen

licher Nahtvorbereitung in Zwangslage geschweißt (E-Hand- Schweißung, Baustellenstoß). Damit ergaben sich dann zu- sätzlich die

- Trägertypen SA1 und SA2:

4 Träger mit Baustellenstoß (Bild 3.2-5).

Das gesamte Versuchsprogramm erfaßte somit folgende Trä- gertypen und Nahtformen (Tabelle 3.2-1 u. Bild 3.2-6):

- Durchlaufende Kehl- oder DHV-Naht zur Verbindung von Stegen mit Gurten (Halsnaht),
- einteilige, quer zur Krafrichtung durch Stumpfnah ver- bundene Bauteile (Normalgüte, Wurzel gegengeschweißt);
- mit Stumpfnah (Normalgüte) quer verbundene Stegbleche,
- durchlaufende Kehl- oder DHV-Naht, Stumpfnah kreuzend,

- durchlaufende Flankenkehl-/Stirnfugennaht zur Verbindung von Gurtplatten untereinander,
- einteilige, quer zur Kraftrichtung durch Stumpfnah (Normalgüte) verbundene Bauteile mit verschiedenen Blechdicken (Wurzel gegengeschweißt).

3.3 Trägerherstellung, Werkstoffe, Nahtnachbearbeitung

Als Grundwerkstoff für alle Versuchskörper wurde St 52-3 nach DIN 17000 verwendet (Tabelle 3.3-1).

Tabelle 3.3-1 Festigkeitswerte von Schweißnaht und Grundwerkstoff (E-Hand-Schweißungen)

Lage der Zugstäbe	Stabdurchmesser mm	0,2/Grenze $R_{p0,2}$ N/mm ²	Zugfestigkeit R_m N/mm ²	Bruchdehnung A_5 %
Schweißnaht längs	12,03	447	519	23,5
Schweißnaht quer	7,01	368 ¹⁾	470 ¹⁾	7,5 ¹⁾
Schweißnaht quer	10,50	368 ¹⁾	510 ¹⁾	10,0 ¹⁾
Grundwerkst. längs	12,01	388	602	29,5
Grundwerkst. längs	12,01	382	573	32,5

Probenentnahme: Trägertyp II, Träger-Nr. SS5-1

1) Beim Zugversuch wurden globulare Schweißfehler in den Bruchflächen freigelegt

Die im Lichtbogenhandschweißverfahren hergestellten Träger bzw. Stoßbereiche wurden mit unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffen¹⁾ (Tabelle 3.3-2) hergestellt. Zumeist wurden Elektroden mit titansaurem Umhüllung (Ti VIII bs) verwendet. Dies geschah im Einklang mit Vorstellungen aus der Praxis, nach denen Ti-Elektroden wegen ihrer leichteren Handhabbarkeit und wegen des damit erreichbaren besseren Nahtaussehens vielfach der Vorzug gegenüber solchen mit kalkbasischer (Kb) Umhüllung gegeben wird. Der entscheidende Vorbehalt gegenüber Kb-Elektroden resultierte möglicherweise auch aus dem Zwang zu besonderer Sorgfalt beim Trocknen dieser Elektrodenart vor dem Schweißen. Nur ein Teil der Baustellengröße (Zwangslagenbereich) wurde mit Kb IXs-Elektroden geschweißt.

1) alte, zum Zeitpunkt der Trägerherstellung gültige Elektrodenbezeichnungen

Tabelle 3.3-2 E-Hand-geschweißte Versuchsträger, verwendete Elektrodentypen

Trägertyp	Elektrodentypen ¹⁾		
Ia1	Werkstattschweißung Montageschweißung	Ti VIII Ti VIII	bs bs
IIa	Werkstattschweißung Montageschweißung	Ti VIII Kb IX	bs s
Ia2, Ib, IIb, III, IV	Sämtliche Elektroden: Typ Ti		
	Kehlnaht w	DIN 1913/E	RR 11
	h	"	RR(B)7
	h	"	RR 11
	hü	"	RR(B)7
	DHV-Naht w	DIN 1913-E	RR(B)7
	w	"	RR 8
	w	"	AR 7
	w	"	RR 11
	h	"	RR(B)7
	h	"	RR 8
	h	"	RR 11
	hü	"	RR(B)7
	DY-Naht w	DIN 1913-E	RR(B)7
	"	"	RR 11
	ü	"	RR(B)7
	Ausfugen der Wurzel:	Arcair Electrodes copperclad (Im x 12PC) Cuivrees CC	

1) Elektrodendurchmesser: 3,5/4,0/5,0 mm
Bezeichnung der Schweißelektroden entsprechend der zum Zeitpunkt der Trägerherstellung gültigen Vorschrift. Ab 1984 geänderte Bezeichnungen (siehe DIN 1913, Ausg. Juni 1984)

Die UP Automaten-geschweißten Träger wurden auf einer großen Portal-Schweißanlage (Bild 3.3-1) hergestellt, die das Schweißen von Trägern bis zu 45 m Länge erlaubt. Das Schweißen der Halsnähte erfolgte jeweils gleichzeitig von beiden Seiten des Stegblechs mit je einem Schweißkopf, wobei der eine Schweißkopf gegenüber dem anderen in Schweißrichtung (Längsrichtung) versetzt nachlief (Nachlauf ca. 200 mm, Tabelle 3.3-3 u. 3.3-4). Die Schweißposition war horizontal. Im Hinblick auf das mit dieser Alternative verfolgte Ziel wurde besonders darauf geachtet, daß der Schweißprozeß möglichst kontinuierlich ablief, d.h. keine Schweißunterbrechungen und somit keine Ansatzstellen auftraten. Die Bilder 3.3-2 u. 3.3-3 zeigen die Unterschiede des Lagenaufbaus und der Wärmeeinflußzone durch das unterschiedliche Schweißverfahren am Beispiel der Halsnähte.

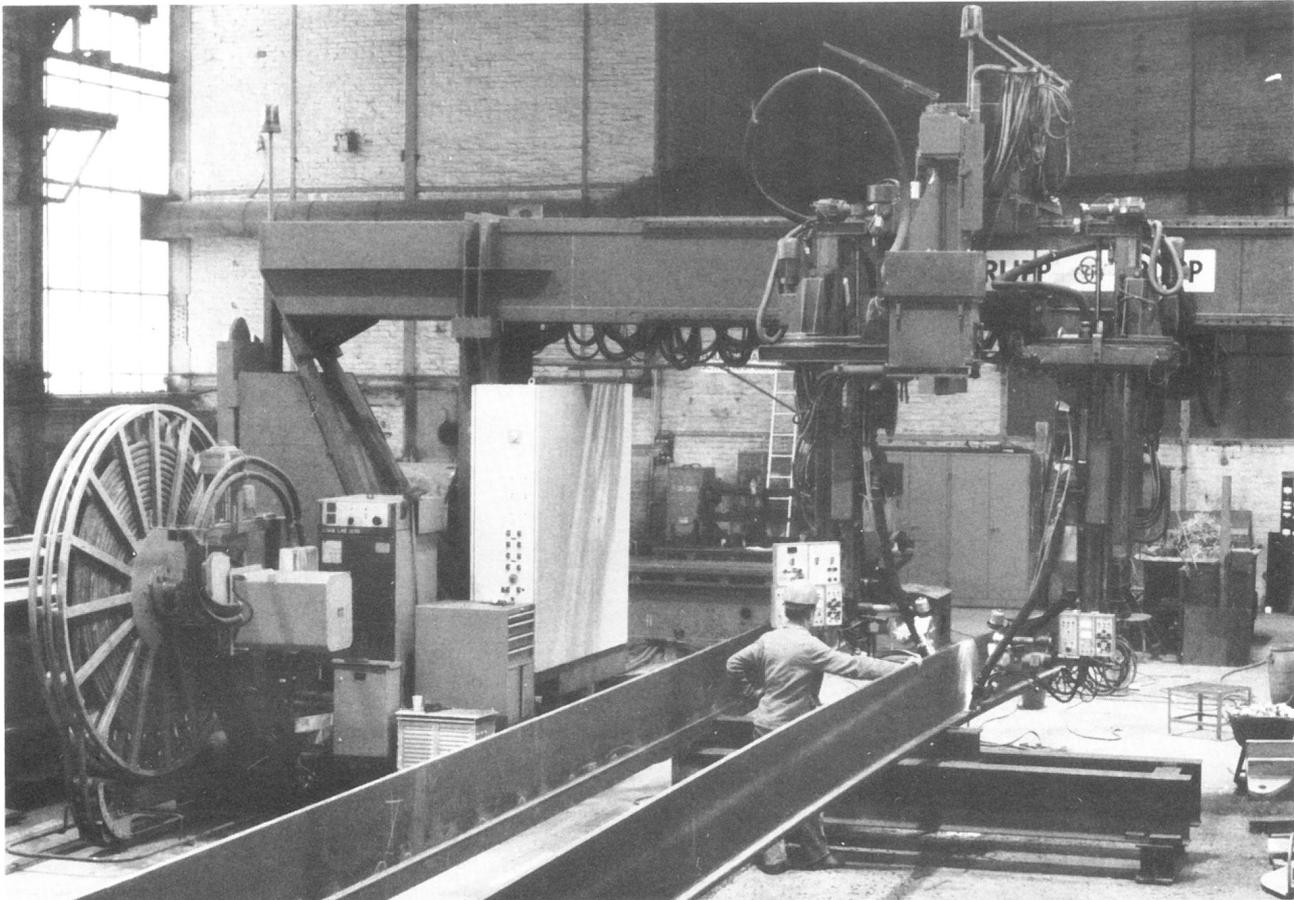


Bild 3.3-1 UP Automaten-Schweißung der Halsnähte in einer großen Portalschweißmaschine (max. Schweißlänge 45 m)

Tabelle 3.3-3 Fertigungsschritte der UP Automaten-geschweißten Versuchsträger

- Heften der Teile

Länge der Heftstellen: ca. 50 mm, Abstand der Heftstellen: 200...300 mm

MAG-Schweißung von Hand

Schweißdraht: ϕ 1 mm DIN 8559-SG2 (Fa. Oerlikon, Marke Carbofil 1)
Schutzgas: Corgon 18 M 21 (Mischgas M 21 von der Fa. Linde)

- Herstellung der Halsnähte

Portal-Schweißanlage, Hersteller Messer Griesheim, max. Schweißlänge 45 m
gleichzeitiges Schweißen mit 2 Schweißköpfen,
Abstand 1. zu 2. Schweißkopf (Nachlauf in Schweißrichtung): 200 mm,
je Schweißkopf 2 Drähte (9 mm Abstand)

UP-Automatenschweißung

Schweißposition horizontal
Schweißdraht: ϕ 2,5 DIN 8557-S2 (Fa. Oerlikon, Marke OE-S2)
Schweißpulver: BAR 1 88 AC 15 SK DIN 32522 (Flux-780 von Lincoln-Electric)
Vorwärmung der Teile ca. 100 °C (Thermostiftkontrolle)

- Ausbessern der Halsnähte

E-Handschiweißung

Stabelektroden E 5155 B 10 DIN 1913, Durchmesser 3,25 und 5 mm

- Herstellung der Baustellstöße

E-Handschiweißung

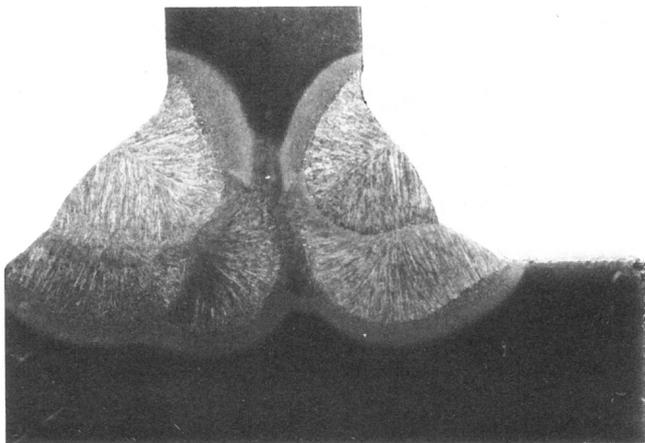
Stabelektroden E 5155 B 10 DIN 1913, Durchmesser 3,25 , 4 und 5 mm
Vorwärmung der Teile ca. 100 °C (Thermostiftkontrolle)

Tabelle 3.3-4 UP Automaten-geschweißte Versuchsträger, Schweißdaten

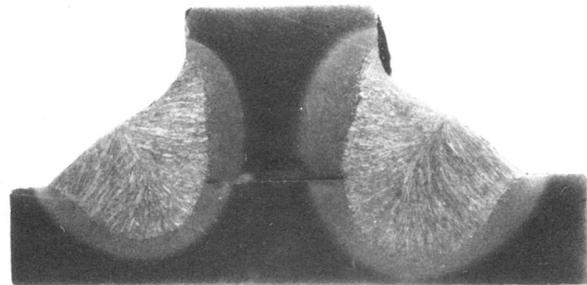
Durchlaufende Doppelkehlnähte			(Träger-Nr. A1-15 und A1-16)							
Schweißfolge:										
1. Naht III und IV, Schweißkopf für Naht III Vorlauf vor Naht IV										
2. Naht I und II, Schweißkopf für Naht II Vorlauf vor Naht I										
Schweißstrom: 750...850 A,										
Schweißspannung: 27...29 V,										
Schweißgeschwindigkeit: ca. 0,50 m/min										
Streckenenergie: ca. 27 kJ/cm										
Durchlaufende DHV-Nähte			(Träger-Nr. A2-25 und A2-26)							
Träger	Arbeitsgang	Lage	Vorlauf Naht α	Nachlauf Naht α	Spannung V [*]	Strom A [*]	Schweißgeschw. m/min [*]	Streckenenergie kJ/cm [*]		
A 2-25	1 2 3 4 5 6	1 1 2 3 2 3	I 29° IV 29° IV 29° IV 29° I 29° I 29°	II 35° III 35° III 29° III 29° II 29° II 29°	29 29 28 30 30 29	850 850 750 750 750 750	0,51 0,53 0,46 0,60 0,50 0,60	29 28 27 23 27 22		
A 2-26	1 2 3 4 5 6	1 1 2 3 2 3	II 35° III 29° III 29° III 29° II 29° II 29°	I 35° IV 35° IV 29° IV 29° I 29° I 29°	28 28 30 30 30 30	850 850 800 750 825 725	0,51 0,57 0,50 0,61 0,50 0,61	28 25 29 22 30 21		

$\alpha = 30^\circ$

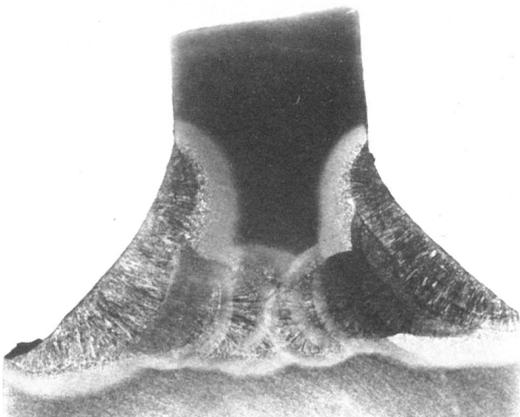
α : Anstellwinkel des Schweißkopfs



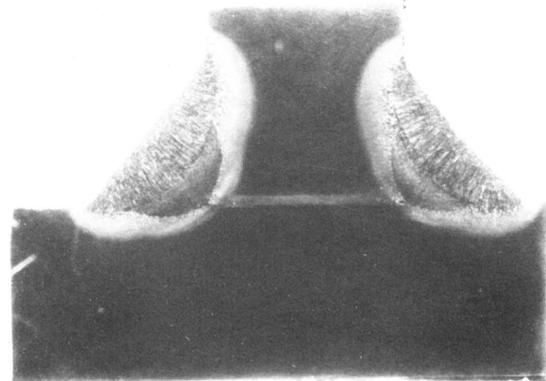
Träger A2-25



Träger A1-16



Träger 04-44



Träger 03-34

Bild 3.3-2
Lagenaufbau und Wärmeinflusszone der DHV-Halsnähte; UP Automaten-Schweißung (oben), E-Hand-Schweißung (unten)

Bild 3.3-3
Lagenaufbau und Wärmeinflusszone der Doppelkehl-Halsnähte; UP Automaten-Schweißung (oben), E-Hand-Schweißung (unten)

Die Versuchskörper wurden nach dem Schweißen vom Hersteller sandgestrahlt und teilweise flammengerichtet.

In Anlehnung an eine entsprechende Bundesbahnvorschrift (DV 848 /1/, Abschn. 5.44), die bei Gurtstößen mit ungleichen Blechdicken in Kraftrichtung kerbfreie Nahtübergänge vorschrieb (eine sinngemäße Vorschrift findet sich auch in /2/ unter Abschn. 3.4.3), wurden sämtliche Schweißnähte im Bereich der Montageschweißung (und hier besonders die Nahtübergänge) nach Anlieferung in der BAM mit einer Handschleifmaschine nachbearbeitet (Schleifriefen in Trägerlängsrichtung). Bei dieser Nachbearbeitung wurde, abweichend von den o.a. Festlegungen jedoch lediglich eine Angleichung der durch grobe Nahtschuppung, Elektrodenansatzstellen etc. bedingten örtlichen Oberflächengestaltmaxima an benachbarte -minima bei kleinstmöglicher Werkstoffabtragung angestrebt. Die Einbrandkerben wurden auf diese Weise entfernt, die Schweißnahtüberhöhung blieb jedoch nahezu vollständig erhalten. Damit wurden die schweißtechnisch bedingten Sekundärkerben /20/ zwar gemindert, aber nicht völlig eliminiert (Bild 3.3-4). Die Wirkung der konstruktiv bedingten Primärkerben /20/ wurden beim Trägertyp II (Bild 3.2-2) durch diese Nahtnachbearbeitung nicht beeinflusst.

Aus Gründen der Gleichbehandlung wurde dieselbe Nahtnachbearbeitung dann auch bei sämtlichen Versuchsträgern mit gleichbleibender Gurtdicke durchgeführt.

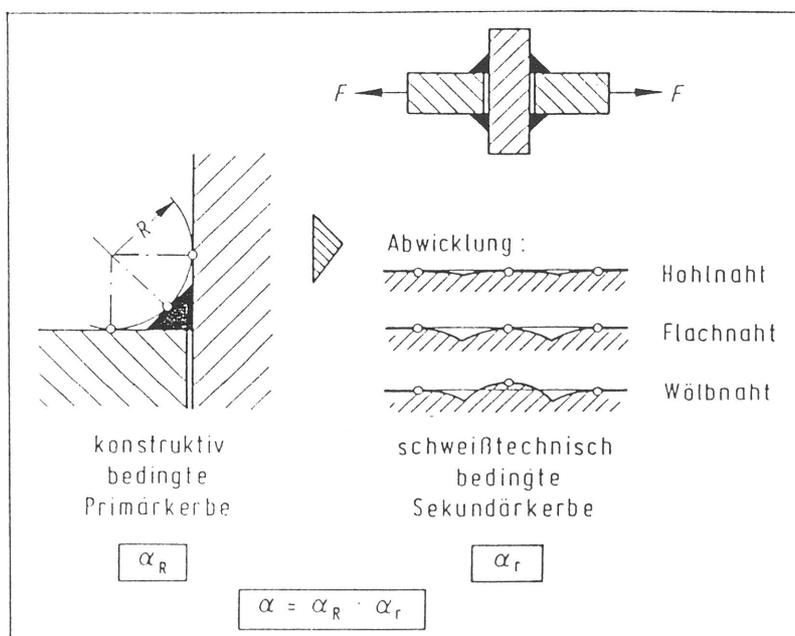


Bild 3.3-4
Primär- und Sekundärkerben an
Schweißverbindungen nach
E. HAIBACH /20/

3.4 Qualität der Schweißnähte

An den Schweißnähten der Stumpfstöße wurden im Fertigungsbetrieb fertigungsbegleitend mehrfach Durchstrahlungsprüfungen durchgeführt und größere Fehler durch Ausschleifen bzw. Ausfugen und Nachschweißen sofort entfernt. Der Endzustand des zu Beginn der Untersuchungen als besonders fehlerträchtig angesehenen Übergangsbereiches "DHV-Naht kreuzt Gurtstoß" wurde in der BAM zusätzlich mit Ir 192 durchstrahlt. Die Aufnahmeergebnisse waren hinsichtlich der Fehleridentifizierung aber unbefriedigend.

Grundsätzlich bieten sich für die Beschreibung der Qualität von Schweißnähten verschiedene Möglichkeiten an /21...24/. International besonders verbreitet ist die Qualifizierung anhand von Röntgenbildern durch Vergleich mit Referenz-Röntgenbildern des IIW-Katalogs /21/. Die Einwände gegen diese globale Qualifikationsmethode wie

- starker Einfluß der Röntgenfilmqualität auf den Qualitätsbefund,
- mangelhafte Treffsicherheit der Qualitätszuordnung bei Bewertung durch verschiedene Beurteiler,
- unzureichende Berücksichtigung unterschiedlich gefährlicher Schweißfehlertypen u.a.m.

sind hinlänglich bekannt. In Ermangelung geeigneterer Klassifizierungsmethoden, die vergleichbar leicht zu handhaben sind und auch eine vergleichbare Verbreitung aufweisen, erfolgte die Ermittlung der Fertigungsqualität hier einheitlich mit Hilfe des IIW-Katalogs. Die dabei auf den Röntgenbildern nachgewiesenen Schweißnahtinnenfehler lagen innerhalb der bei IIW-Qualität "blau" zulässigen Grenzen.

An zwei prüfbareren E-Hand-geschweißten Versuchsträgern (Halsnähte DHV- mit Doppelkehlnaht) wurden zusätzlich Ultraschallprüfungen im Bereich der Montageschweißung durchgeführt. Die festgestellten US-Anzeigen ließen auf relativ dicht verteilte, überwiegend räumliche Schweißfehler (Poren u.ä.) mit geringen Längen- und Tiefenausdehnungen (Ersatzreflektorgröße ERG 1 bis 3) schließen. Eine Klassifikation der Nähte in Anlehnung an AD-Merkblatt HP 5/3 /24/ ergab das Qualitätsmerkmal "Nacharbeit nicht erforderlich".

Bei weiteren E-Hand-geschweißten Versuchsstücken wurden außerdem sämtliche Halsnähte mit DHV-Anschluß systematisch ultraschallgeprüft. Die Bilder 3.4-1...3.4-3 zeigen beispielhaft einige Ergebnisse dieser Untersuchungen. US-Anzeigen mit Ersatzreflektorgrößen $< 2\text{mm}$ wurden nicht berücksichtigt. Vereinzelt wurden dabei Schweißnahtinnenfehler detektiert, die aufgrund ihrer Größe (ERG) bzw. ihrer Längenausdehnung bei strikter Anwendung des AD-Merkblattes HP-5/3 ein Ausbessern erfordert hätten. Diese Ausbesserungen wurden aber aus zwei Gründen unterlassen. Zum einen verursachen auch sorgfältige Ausbesserungen, in vielen Fällen neben dem erhöhten Aufwand allenfalls geringfügige Verbesserungen im Ergebnis. Zum anderen sollte überprüft werden, ob sich in den Bereichen mit signifikanten Ultraschall-Anzeigen im Ermüdungsversuch tatsächlich Schwingungsbrüche entwickeln.

Für die automatisch geschweißten Versuchsstücke wurden vor Beginn der Untersuchungen folgende Vereinbarungen in bezug auf die Soll-Güte der Schweißarbeiten getroffen:

- Güteklasse AK bzw. AS gemäß DIN 8563 Teil 3 für die autotomengeschweißten Halsnähte sowie für die in Wannennlage E-Hand-geschweißten Gurtstöße,
- Güteklasse BK bzw. BS für sämtliche E-Hand-Zwangslagenschweißungen der Baustellenstöße.

Die für die Schweißarbeiten eingesetzten Schweißer hatten hier die Qualifikation E-B IIg bzw. SG-B IIs gemäß DIN 8560.

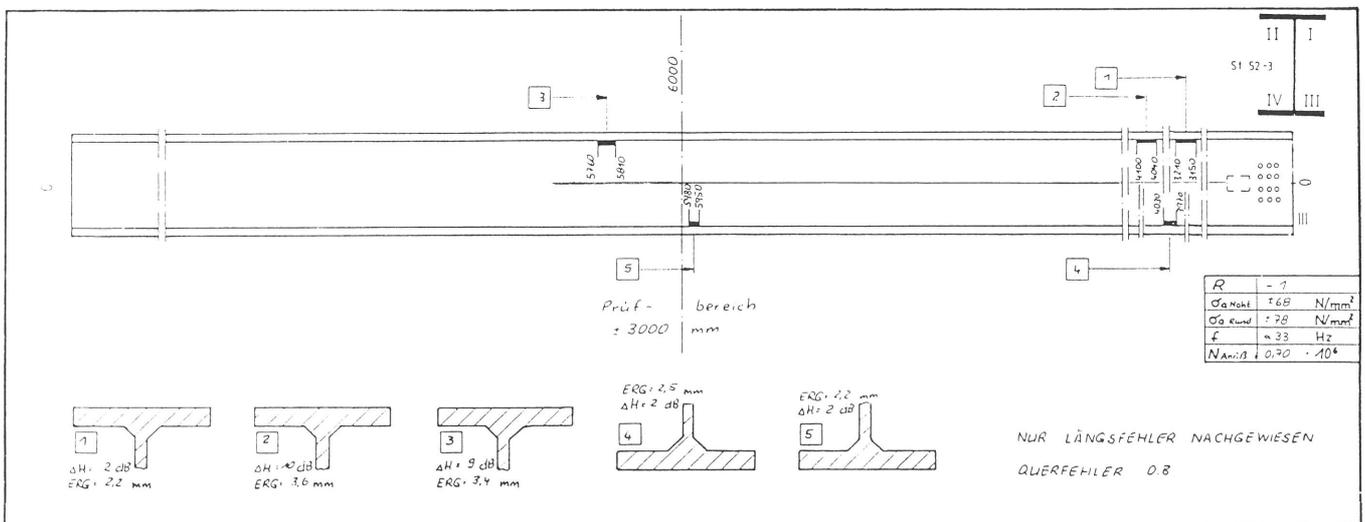


Bild 3.4-1 Ergebnis von Ultraschall-Untersuchungen im Halsnahtbereich (DHV- mit Doppelkehlnaht), Träger-Nr. 02-24, Trägertyp IVA

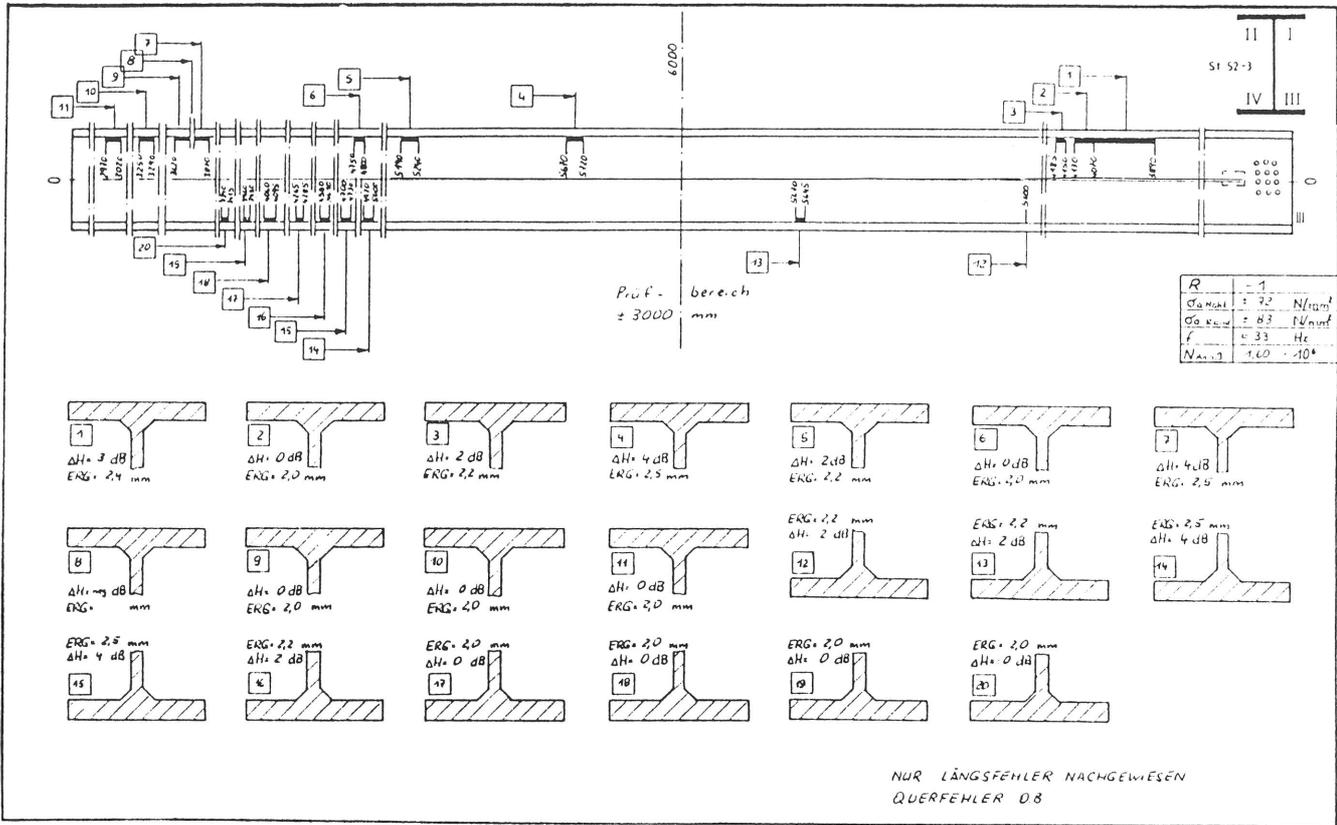


Bild 3.4-2 Ergebnis von Ultraschall-Untersuchungen im Halsnahtbereich (DHV- mit Doppelkehlnaht), Träger-Nr. 04-43, Trägertyp IVb

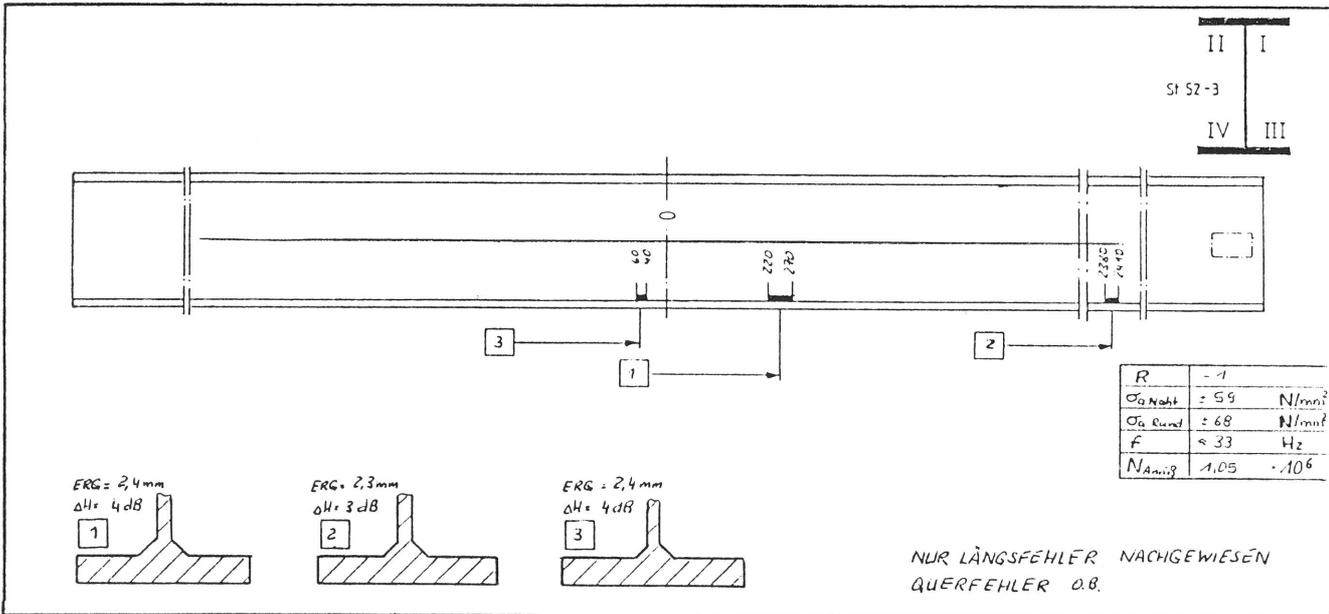


Bild 3.4-3 Ergebnis von Ultraschall-Untersuchungen im Halsnahtbereich (DHV- mit Doppelkehlnaht), Träger-Nr. S2-23, Trägertyp Ib

Sämtliche Automaten-geschweißten Halsnähte wurden beim Hersteller einer Sichtprüfung und einer Oberflächenrißprüfung mit Hilfe eines Farbeindringverfahrens unterzogen. Im Falle unzureichender Nahtqualität wurden die entsprechenden Bereiche der Naht mittels E-Hand-Schweißung ausgebessert. In der BAM wurden die Halsnähte dann zusätzlich ultraschallgeprüft.

Dabei wurden auch hier vereinzelte Anzeigen oberhalb der eingestellten Registriergrenze von 2 mm Ersatzreflektorgröße (ERG) festgestellt.

Da sich im Verlauf der Untersuchungen relativ schnell herausstellte, daß die in den Ermüdungsbruchflächen freigelegten inneren Schweißnahtimperfektionen mit den Ergebnissen der zerstörungsfreien Prüfungen nicht korrelierten, wurde zusätzlich untersucht, ob sich die Vorhersagbarkeit von Ermüdungsrissen aus der Kenntnis fehlerträchtiger Fertigungsmerkmale verbessern läßt. Hierzu wurde der gesamte Fertigungsablauf der Versuchsträger durchprotokolliert. Dabei wurden folgende Einzelheiten erfaßt:

- Körnerschläge für das Ausrichten des Steges auf dem Gurt vor dem Heften,
- Lage und Abmessungen der Heftstellen,
- Elektrodenansatzstellen sämtlicher Lagen,
- Lagenaufbau,
- verwendete Elektrodentypen und -abmessungen,
- Schweißfolge, Schweißrichtung, Schweißposition,
- Wärmeeinbringung (an ausgewählten Stellen),
- Vorwärmung (Art der Maßnahmen zur Überprüfung der vorgegebenen Vorwärmtemperatur),
- alle Arten und Ursachen für Ausbesserungen an den Halsnähten,
- ausführender Schweißer,
- gegebenenfalls beeinträchtigende Umgebungsbedingungen.

Damit konnte jedem Versuchsträger ein individuelles Fertigungsablauf- und -merkmalsbild zugeordnet werden.

Die Protokolle (Beispiele siehe Bild 3.4-4...3.4-5) weisen eine große Variationsbreite im Fertigungsablauf, insbesondere bezüglich der Schweißfolge und der Kontrolle der Vorwärmung auf. Dies erklärt sich daraus, daß innerhalb der Verantwortlichkeit des Fertigungsbetriebes für die Herstellung der Versuchsträger eine weitgehende Freiheit im Fertigungsablauf vereinbart worden war. Nur so konnten weitgehend praxisnahe Fertigungsabläufe- und -merkmalsbilder gewonnen werden. Lediglich bei der Herstellung der Stumpfstoße wurden bezüglich der Schweißfolge folgende Vorgaben beachtet:

1. Schweißen des Stegstoßes,
2. Schweißen der zugbeanspruchten Gurtstoßlamelle,
3. Schweißen der druckbeanspruchten Gurtstoßlamelle.

Kennzahlfern-gewässelbe Elektrodenansatzstellen in den Lagen in m						Schwinger/Kennzahl-gewässelbe Elektrodenansatzstellen in den Lagen									
Körn. 1. Gel	2. Mil	3. Mil	4. Mil	5. Del	6. Körn. 1. Gel	2. Mil	3. Mil	4. Mil	5. Del	6. Körn. 1. Gel	2. Mil	3. Mil	4. Mil	5. Del	6. Körn. 1. Gel
0,07	0,27	0,28	0,27	0,27	0,20	0,26	0,27	0,28	0,28	0,23	0,26	0,27	0,28	0,28	0,23
0,62	0,32	0,40	0,50	0,50	0,49	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
0,72	0,70	0,70	0,70	0,70	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
1,20	1,10	1,06	1,03	1,03	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
1,18	1,19	1,15	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
1,83	1,81	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
2,16	2,14	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09
2,73	2,61	2,59	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52
3,01	3,01	3,04	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07
3,06	3,06	3,04	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22	3,22
3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26
3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29	3,29
3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32	3,32
3,34	3,34	3,34	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36	3,36
3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39	3,39
3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46
4,11	4,11	4,12	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30
4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43
4,73	4,73	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
4,99	4,99	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96
5,09	5,09	5,16	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21	5,21
5,40	5,40	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43	5,43
5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72	5,72

SCHWEISSPOSITIONEN (DIN 1912)

- Wul Wurzellage
- Mil Mittellage
- Del Decklage
- Gel Gegenlage
- W Wannenposition
- H Horizontalposition
- F Fallposition
- U Überkopposition

BEARBEITUNGSZEICHEN (SYMBOLS)

- 1 Mittlere Übergeschweib
- 2 Mittlere Übergeschweib
- 3 Mittlere Übergeschweib
- 4 Mittlere Übergeschweib
- 5 Schleife/Pore/Loch
- geschl.-geschweib

NAHTAUFBAU

Heftnaht $\phi 25$ R(18)
Vorgewärmt = 100 °C

BEARBEITUNGSZEICHEN (SYMBOLS)

- 1 Mittlere Übergeschweib
- 2 Mittlere Übergeschweib
- 3 Mittlere Übergeschweib
- 4 Mittlere Übergeschweib
- 5 Schleife/Pore/Loch
- geschl.-geschweib

Elektronenabmessungen/-typen

1. Gel	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
2. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
3. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
4. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
5. Del	$\phi 50 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8

Elektronenabmessungen/-typen

1. Gel	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
2. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
3. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
4. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
5. Del	$\phi 50 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8

Elektronenabmessungen/-typen

1. Gel	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
2. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
3. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
4. Mil	$\phi 40 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8
5. Del	$\phi 50 \times 450$	DIN 1913-B	5132	HR 8

Bild 3.4-4 Schweißprotokoll einer Halsnaht im Bereich der Werkstattsschweißung, Träger-Nr. 04-43, Trägertyp IVb

4. Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Ermüdungsversuche

Es wurden Ermüdungsversuche mit Biegebeanspruchungen im Schwell- und Wechselbereich durchgeführt. Die Biegewechselversuche ($R = -1$) wurden nach dem vor allem für große Teile wirtschaftlichen Prinzip der Resonanzerregung durchgeführt. Der Versuchsaufbau kann dabei besonders einfach gehalten werden. Die Schwingfrequenz ist ausreichend hoch (im vorliegenden Fall ca. 30 Hz) und ermöglicht kurze Versuchszeiten. Allerdings sind nach diesem Versuchsprinzip nur Einstufenversuche möglich.

Zur Klärung der Frage, wie Mittelspannungen das Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Großbauteile beeinflussen, wurden zusätzlich auch Biegeschwellversuche ($R = 0$) durchgeführt.

Wie weit mit Wechselbeanspruchungen praktische Betriebsbeanspruchungen von Brückenträgern nachgebildet werden, hängt von den Randbedingungen ab, die sich aus der Lage der Träger innerhalb der gesamten Brückenkonstruktion ergeben; in vielen Fällen werden auch Schwellbeanspruchungen vorliegen. Unabhängig vom Mittelspannungseinfluß gibt es den versuchstechnischen Nachteil einer Schwellbeanspruchung (z.B. $R = 0$), daß nur die Schweißnahtbereiche in einem der Gurte einer Zugbeanspruchung ausgesetzt werden, die Wirkung von Imperfektionen im anderen (Druck-)Gurt, die im praktischen Einsatz u.U. auch ausbreitungsfähig sind, hierbei jedoch nicht erfaßt wird. Dieser entscheidende Nachteil wird bei einer Wechselbeanspruchung ($R = -1$) vermieden, da Fehler sowohl im Ober- als auch im Untergurt gleichermaßen beansprucht und einer generellen Aussage über die Dauerfestigkeit der Schweißkonstruktion zugeführt werden können.

4.1.1 Versuchsaufbau

Bild 4.1-1 zeigt den Versuchsaufbau bei den Biegewechselversuchen ($R = -1$). Der Träger wird dabei mittels eines am

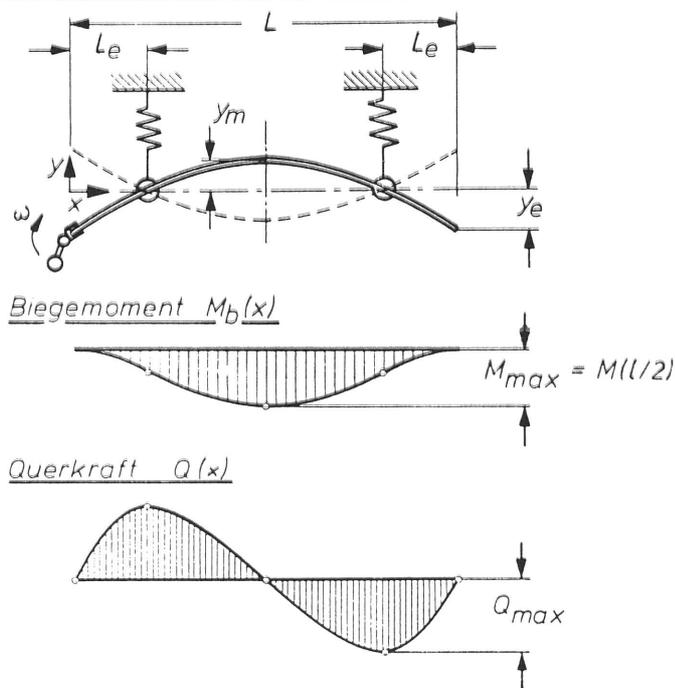
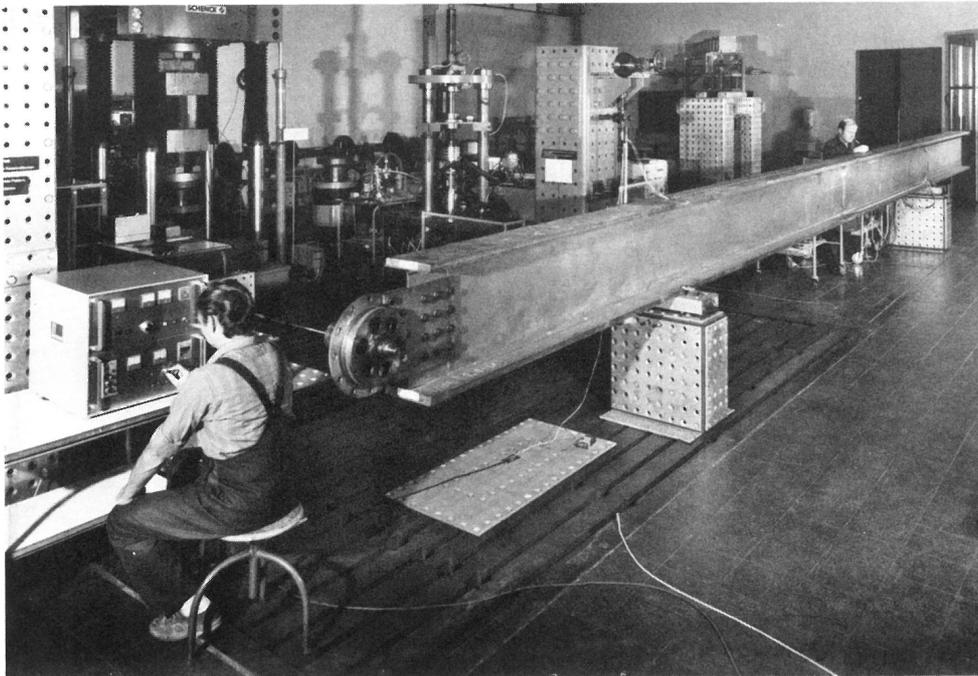


Bild 4.1-1 Biegeversuch ($R = -1$) nach dem Prinzip der Resonanzregung (Versuchsfrequenz: 30 Hz); Versuchsaufbau und Schema der Querschwingung von Stäben

Trägerende angebrachten Unwuchtschwingers zu Biegeversuchsschwingungen im Bereich seiner ersten Eigenfrequenz (Grundschiwingung) angeregt. Die Schwingamplituden und damit die Biegeversuchsmomente können über eine Drehzahlregelung des Unwuchtschwingers, d.h. durch die Einstellung des Arbeitspunktes auf der ansteigenden Flanke der sehr steilen Resonanzkurve (geringe Dämpfung) variiert werden. Entsprechend den Randbedingungen an den Enden des beidseitig frei schwingenden Trägers heben sich die durch die Schwingbewegung auftretenden Massenkräfte im System auf, womit die-

ses nach außen hin kräftefrei wird. Die Abstützung des Träger-Eigengewichtes erfolgte über Gummielemente im Bereich der Schwingungsknoten. Die in den unmittelbaren Nachbarbereichen der Knotenpunkte auftretenden relativ geringen Verformungen und Bewegungen wurden durch die Gummielemente zwanglos ermöglicht.

Die mechanischen Verhältnisse bei den Trägern vom Typ I, III und IV (konstante Biegesteifigkeit und Massenbelegung) können nach der Theorie der Querschwingungen von Stäben /25/ geklärt werden. Die Lösung der Differentialgleichung der Transversalschwingung

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = -\mu \frac{\partial^4 w}{\partial t^2} \quad \text{mit} \quad (4.1-1)$$

$$w(x,t) = y(x) \cdot T(t)$$

EI: Biegesteifigkeit des Stabes

μ : Massenbelegung des Stabes (kg/m)

x: Längskoordinate

t: Zeit

führt für die Verteilung der Schwingungsausschläge zu

$$y(x) = C_1 \cos \frac{\lambda}{L} x + C_2 \sin \frac{\lambda}{L} x + C_3 \cosh \frac{\lambda}{L} x + C_4 \sinh \frac{\lambda}{L} x \quad (4.1-2)$$

mit

$$\lambda^4 = \frac{\mu}{EI} \omega^2 L^4$$

Mit den vier Randbedingungen eines "frei-frei"-schwingenden Stabes der Länge l

$$y''(x=0) = y''(x=L) = 0 \quad (\text{Momente} = 0) \quad (4.1-3 \text{ a,b})$$

$$y^{(3)}(x=0) = y^{(3)}(x=L) = 0 \quad (\text{Querkräfte} = 0) \quad (4.1-3 \text{ c,d})$$

wird zunächst nach einer nichttrivialen Lösung ($y \neq 0$) durch Nullsetzen der Koeffizientendeterminante dieses linearen Gleichungssystems gesucht. Das führt auf die Bestimmungsgleichung für die Eigenwerte λ

$$\cos \lambda \cdot \cosh \lambda = 1, \quad \text{mit} \quad (4.1-4)$$

$$\lambda_1 = \frac{3}{2}\pi + 0,01765 = 4,73004$$

als erstem hier besonders interessierenden Eigenwert der Grundschiwingung eines Stabes. Mit λ ergibt sich dann die Kreiseigenfrequenz zu

$$\omega = 2\pi f = \frac{\lambda_1^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad (4.1-5)$$

Aus dem Gleichungssystem (4.1-3 a...d) können die Koeffizienten $C_1 \dots C_4$ bestimmt werden:

$$C_1 = C_3; \quad C_2 = C_4; \quad C_2 = -C_1 \cdot \frac{\cos \lambda - \cosh \lambda}{\sin \lambda - \sinh \lambda}$$

Dies führt zur Verteilung der Schwingungsausschläge des querschwingenden Stabes

$$y(x) = C_1 \cdot \left[\cos \frac{\lambda}{L}x + \cosh \frac{\lambda}{L}x - \frac{\cos \lambda \cdot \cosh \lambda}{\sin \lambda - \sinh \lambda} \cdot (-\sin \frac{\lambda}{L}x + \sinh \frac{\lambda}{L}x) \right] \quad (4.1-6)$$

und zur Verteilung der Biegemomente

$$y''(x) = \frac{M(x)}{EI} = K \cdot \left[-\cos \frac{\lambda}{L}x + \cosh \frac{\lambda}{L}x - \frac{\cos \lambda - \cosh \lambda}{\sin \lambda - \sinh \lambda} \cdot (-\sin \frac{\lambda}{L}x + \sinh \frac{\lambda}{L}x) \right] \quad (4.1-7)$$

$$\text{mit } K = C_1 \cdot \frac{\lambda^2}{L^2}$$

Mit den Werten der Trägertypen I, III und IV

$$E = 210.000 \text{ N/mm}^2,$$

$$I_y = 1.410 \cdot 10^9 \text{ mm}^4,$$

$$\mu = 195 \text{ kg/m}$$

und der Trägerlänge $L = 12 \text{ m}$ ergibt sich die Eigenfrequenz der Grundschiwingung gemäß

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{22,4}{L^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\mu}} \quad (4.1-5a)$$

zu $f_1 = 30,5 \text{ s}^{-1}$. Die Schwingfrequenz bei den Versuchen betrug ca. $27,5 \text{ s}^{-1}$. Die Abweichung von rd. 10 % nach unten ist durch die Lage des Arbeitspunktes im ansteigenden Ast der Resonanzkurve ($f < f_1$) und durch den Unwuchtschwinger an dem einen Trägerende, zu erklären, der sich im Sinne einer Verlängerung des Trägers auswirkt.

Die Verteilung der Biegemomente nach (4.1-7) ist an Hand der bezogenen Werte

$$M(x)/M_{\max} = M(x)/M(x=L/2)$$

in Bild 4.1-2 wiedergegeben. Eingetragen sind ebenfalls die während der Ermüdungsversuche mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen auf den Trägergurten ermittelten bezogenen Biegerandspannungsamplituden

$$\sigma_{aR}(x)/\sigma_{aR, \max} = \sigma_{aR}(x)/\sigma_{aR}(x=L/2)$$

Die Punkte entsprechen Mittelwerten aus bis zu 4 Einzelergebnissen. Die Übereinstimmung zwischen dem Verlauf nach (4.1-7) und den Meßergebnissen ist besonders im Mittenbereich des Trägers gut. Die leichte Unsymmetrie ist wiederum durch den einseitig angebrachten Unwuchtschwinger zu erklären.

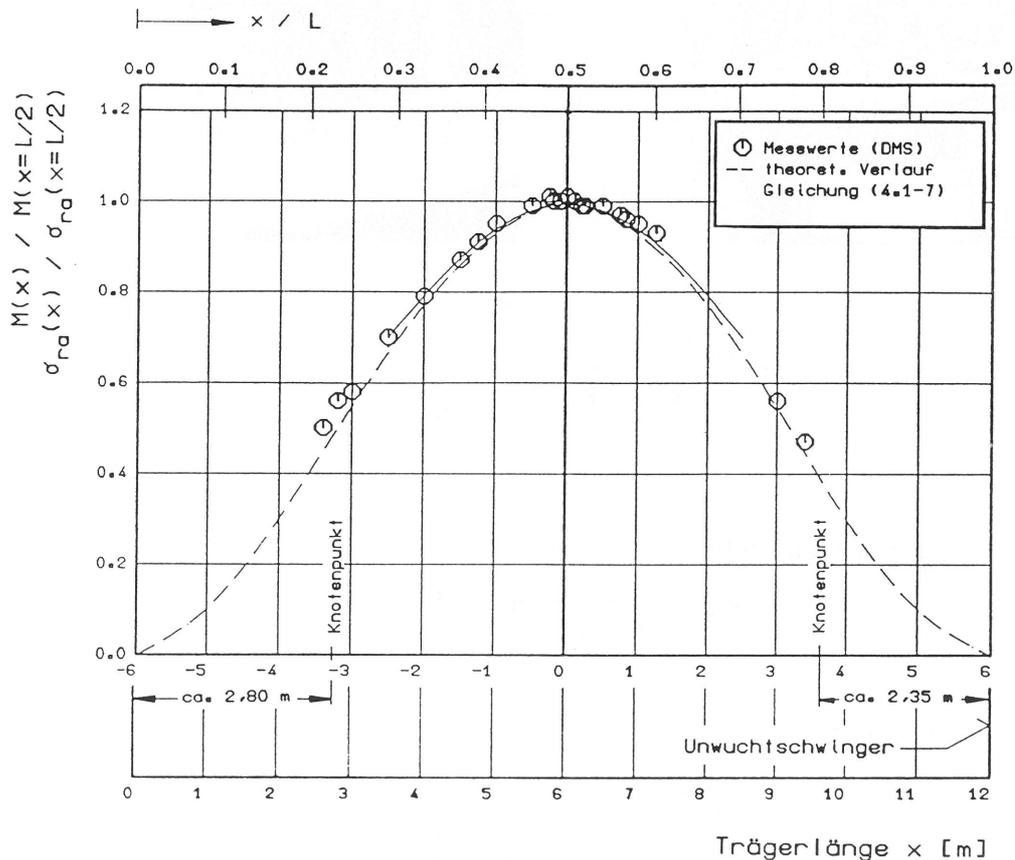


Bild 4.1-2 Verteilung der Biegemomente und der Biegerandspannungen über der Trägerlänge (Trägertypen I, III und IV); Vergleich von Messungen mit theoretischen Ergebnissen

Das Maximum der Momentenverteilung liegt in der Mitte des Trägers (Stoßbereich) und verläuft dann über einen weiten Bereich sehr flach. Die Querkraft kann in diesem Gebiet daher als vernachlässigbar klein angenommen werden. Für den Mittenbereich der Versuchsträger entspricht die durch die Grundschiwingung bewirkte Biegemomenten- und Querkraftverteilung also weitgehend der einer entsprechenden Vierpunkt-Biegung, wobei das Prinzip der Resonanzerrregung aber noch den Vorteil hat, daß keine Krafteinleitungspunkte vorliegen

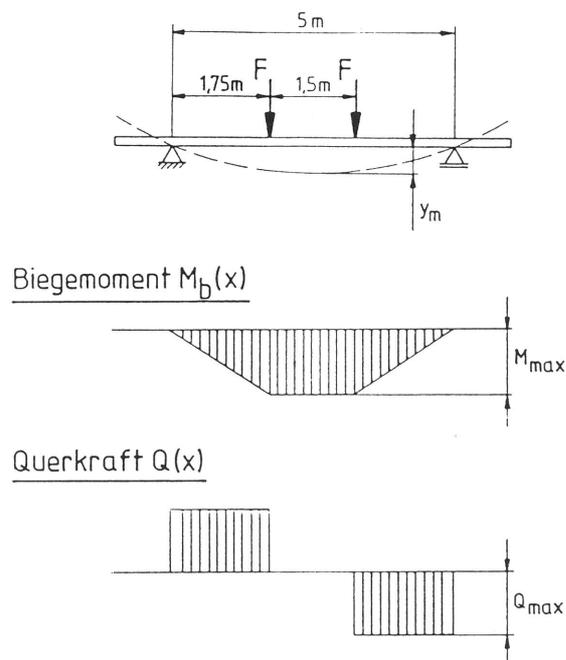
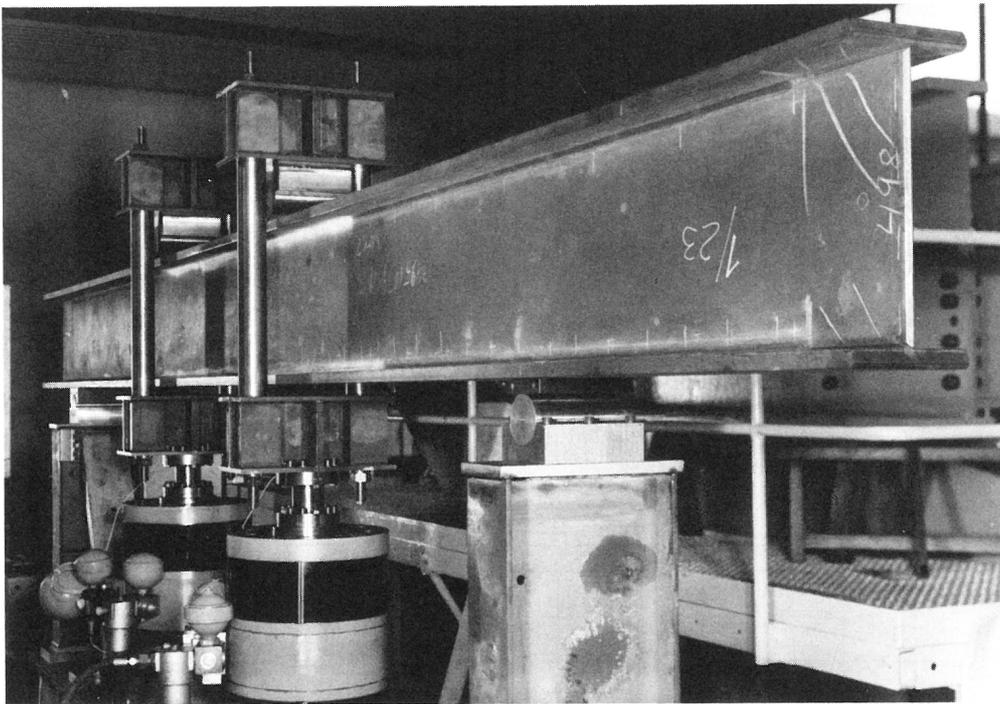


Bild 4.1-3 Biegeschwellversuch ($R = 0,05$), Zwangserregung durch zwei simultan geregelte Servohydraulikzylinder (Versuchsfrequenz: 2 Hz)

und somit auch keine Zusatzbeanspruchungen auftreten. Rißfortschrittsmessungen sind bei Resonanzregung wegen der großen Schwingwege allerdings erschwert, da hierzu der Träger in Ruhestellung gebracht werden muß und sich der Riß dann schließt. Die Rißlänge ist dann in den meisten Fällen nur noch sehr schwer zu ermitteln.

Die aus Gründen der Vergleichbarkeit ebenfalls mit einer Einstufenbelastung durchgeführten Biegeschwellversuche ($R = 0,05$) wurden unter Vierpunkt-Biegung durchgeführt (Bild 4.1-3). Der Versuchsaufbau besteht aus einem an jedem Ende mit je einem Auflager für den Versuchsträger versehenen biegesteifen Rahmen. Auf diesem stützen sich zwei 600 kN Servohydraulikzylinder ab, die die Belastung über zwei Traversen in den Träger einleiten. Die Hydraulikzylinder sind synchron geregelt.

Bei den Biegewechselversuchen wurde die jeweilige Beanspruchungshöhe über Dehnungsmeßstreifen geregelt, die in ausreichender Entfernung von der Stoßstelle angebracht waren, so daß Kerbeeinflüsse nicht wirksam waren. Die an diesen Streifen gemessenen Dehnungswerte wurden über eine Regelungseinrichtung während der gesamten Versuchsdauer konstant gehalten. Die Biegeschwellversuche wurden kraftgeregelt durchgeführt, wobei die Kraftaufnehmer jeweils zwischen Kolbenstange und Kraft-einleitungstraverse angeordnet waren.

4.1.2 Schädigungskriterium

Da bei den Wechselversuchen mit wachsendem Schwingungsriß das Resonanz-Schwingsystem Träger zunehmend verstimmt und schließlich "außer Tritt" gerät, gelingt es hier zumeist nicht, einen vollständigen Bruch zu erzeugen. Als praxisorientiertes Schädigungskriterium galt bei den Biegewechselversuchen deshalb das Sichtbarwerden von Ermüdungsrissen an der jeweiligen Blech- bzw. Schweißnahtoberfläche. Dieses Kriterium wurde auch bei den servohydraulisch durchgeführten Versuchen unter Schwellbeanspruchung beibehalten.

4.1.3 Versuchsende

Der Zeitpunkt des jeweiligen Versuchsabbruchs wurde nach Erfahrungskriterien festgelegt: Die entstandenen Ermüdungsrisse sollten eine ausreichende Ausdehnung erreicht haben, die Bruchflächen infolge des bei Wechselbeanspruchung unvermeidbaren Aufeinanderschlagens der Reißflächen aber nicht beschädigt werden, damit eine fraktographische Auswertung und ein Freilegen der Bruchausgangsstelle noch möglich war. In der Regel wurde ein Versuch (sowohl bei $R = -1$ als auch bei $R = 0$) dann abgebrochen, wenn der am weitesten gewachsene Riß den betreffenden Gurt (bei den Schwellversuchen war dies der Zuggurt) vollständig durchsetzt hatte. Die Schwingenspielzahl N_E beim Abbruch eines Versuchs wurde festgehalten.

4.2 Lastspannungen

Nach den derzeit gängigen Dimensionierungsrichtlinien für Schweißverbindungen werden die in den Versuchsträgern vorkommenden Nahtformen (siehe Bild 3.2-6) bestimmten Kerbfallgruppen zugeordnet, für die den Regelwerken dann jeweils zulässige Spannungen entnommen werden können.

Da zunächst der Montagestoßbereich derartiger Träger als besonders ermüdungsbruchgefährdet angesehen wurde, wurden die in diesem Gebiet vorkommenden Nahtformen

- Gurtstoß: "Durch Stumpfnaht-Normalgüte gestoßene Bauteile (Naht quer zur Kraftrichtung, Wurzel gegengeschweißt, durchstrahlt)" und

- Stegstoß: "Stumpfnaht am Stegblechquerstoß, unbearbeitet" dem Kerbfall "D" der damals gültigen DV 848 /1/ zugeordnet, für den die zulässige Beanspruchung für Wechselbeanspruchung ($R = -1$) und Grundwerkstoff St52-3 bei

$\sigma_{a, zul} = \pm 88 \text{ N/mm}^2$ lag. Als Versuchsbeanspruchungen wurden mit $\sigma_a = \pm 78 \text{ N/mm}^2$ und $\pm 98 \text{ N/mm}^2$, zwei Spannungshorizonte dicht ober- und unterhalb dieses zulässigen Wertes gewählt. Der Vergleichbarkeit wegen wurden diese Beanspruchungshorizonte dann generell bei allen weiteren Wechselversuchen ($R = -1$) beibehalten, wobei leichtere Abweichungen hiervon aus versuchstechnischen Gründen hingenommen werden mußten.

Bei den Biegeschwellversuchen ($R = 0,05$) wurden ebenfalls Spannungshorizonte dicht ober- und unterhalb der zulässigen Spannungen eingestellt, die sich für den jeweils schärfsten Kerbfall je Trägervariante ergaben. Die zulässigen Werte wurden hierbei der Bundesbahnvorschrift DS 804 /2/ entnommen, die in der Zwischenzeit an die Stelle der alten DV 848 getreten war.

An einigen Versuchsträgern wurde die Lastspannungsverteilung über einen größeren Bereich der Trägerlänge mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen exemplarisch ermittelt.

- Beim Trägertyp I, III u. IV (gleichbleibende Gurtdicke) wurden die rechnerischen Nennwerte mit einem im Trägermittenbereich flachen Spannungsverlauf (Bild 4.1-2) experimentell im wesentlichen bestätigt. Lediglich im Bereich des Nahtübergangs des Stoßes stiegen die Dehnungswerte im Vergleich zu den benachbarten ungeschweißten Bereichen leicht an. Die dort gemessenen Spannungskonzentrationen infolge des Nahtübergangs an der ausgeschliffenen Einbrandkerbe und der Nahtüberhöhung konnten über den Ansatz einer flachen Außenkerbe nach NEUBER /26/ bestätigt werden.
- Beim Trägertyp II (einseitig verstärkter Gurt) wies die Dehnungsanalyse einen deutlichen Anstieg der Dehnungswerte im Bereich des Nahtüberganges auf (Bild 4.2-1). Ein Vergleich der Dehnungsverteilungen an den Gurtober- und -unterseiten zeigt, daß bei diesem Trägertyp im Stoßbereich Zusatzbiegespannungen als Folge der außermittigen Beanspruchung durch die unterschiedlichen Gurtblechdicken vorhanden sind.

Für den späteren Vergleich der Versuchsbeanspruchungen mit den zulässigen Spannungen aus Regelwerken wurden die Nennspannungen der Gurtstöße und der Halsnähte wie folgt definiert (Bild 4.2-2):

- Als Nennspannung der Stumpfnahtbereiche der Trägerstöße gilt die Biegerandspannung an den Gurtaußenflächen σ_{aR} .
- als Nennspannung der Halsnähte gilt die Spannung σ_a in der Ebene der Gurtinnenflächen.

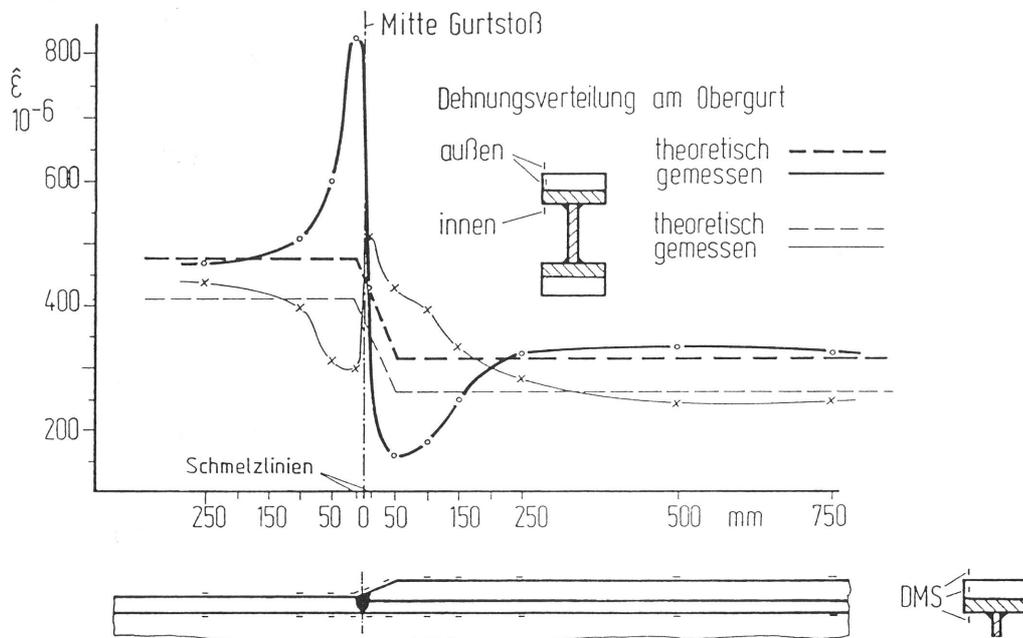


Bild 4.2-1 Lastdehnungsverteilung im Stoßbereich des Trägertyps II mit einseitig verstärktem Gurt

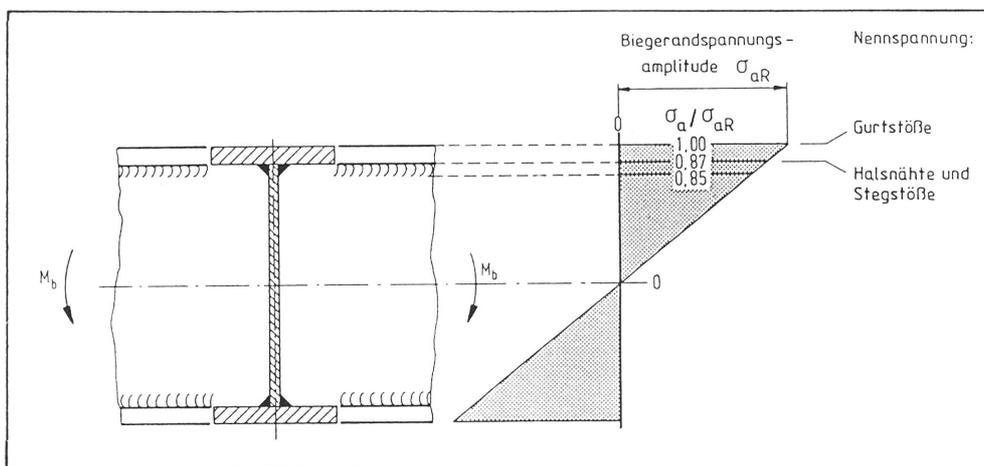


Bild 4.2-2 Rechnerische Verteilung der Lastspannungen im Trägerquerschnitt; Nennspannungsdefinitionen

Bei der Auswertung der Ermüdungsbrüche (siehe 5.3) wurde dann wie folgt verfahren:

- Schwingungsrissen in Gurtstößen wurde, unabhängig von der tatsächlichen Höhenlage des den Bruch auslösenden Fehlers im Gurtblech, jeweils die maximale Biegerandspannung σ_{aR} zugeordnet.
- Schwingungsrissen in Halsnähten wurde, unabhängig von der Höhenlage der Bruchausgangsstelle relativ zur neutralen Faser des Trägers, jeweils die Biegespannung an der Gurtinnenfläche zugeordnet.
- Schwingungsrisse in Stegstößen wurden wie Schwingungsrisse in Halsnähten behandelt.

Die bei der weiteren Auswertung der Versuchsergebnisse erforderliche Zuordnung der Beanspruchung zur Schwingrißlage bei Rissen außerhalb der Trägermitte erfolgte bei allen Trägern entsprechend der gemessenen Beanspruchungsverteilungen $\sigma_{aR}(x)/\sigma_{aR}(x = L/2)$ (Bild 4.1-2) und nicht nach dem theoretisch ermittelten Verlauf (im engeren Mittembereich ± 2 m stimmten beide Verläufe nahezu völlig überein, siehe Bild 4.1-2). Die Ausdrücke $\sigma_{aR}(x)$ bei Gurtstößen bzw. $\sigma_a(x)$ bei Halsnähten werden im folgenden örtliche Nennspannung $\sigma_{a,\delta}$ genannt. Im Abstand von 1 m von der Trägermitte betragen die örtlichen Nennspannungen ca. 95% der maximalen Nennspannungen $\sigma_{aR}(x = L/2)$.

4.3 Eigenspannungen

Bei einer Ermüdungsbeanspruchung nimmt der Einfluß der Lastmittelspannungen auf die Schwingfestigkeit von geschweißten Teilen mit zunehmenden Eigenspannungen erfahrungsgemäß ab. Über die Höhe der in geschweißten Bauteilen vorhandenen Eigenspannungen liegen in der Regel keine Informationen vor. Der beobachtete Effekt hat vermutlich seine Begründung darin, daß sich hohe Eigenspannungen in den meisten Fällen nach wenigen Lastwechseln soweit abbauen, daß die Last-Oberspannung als Summe aus Last-Mittelspannung und verbleibender Eigenspannung durch die zyklische Fließgrenze begrenzt wird. Dadurch wird das Bauteil unabhängig von der Höhe der Lastmittelspannungen (sofern die Eigenspannungen eine Mindestgröße nicht unterschreiten) immer in einem etwa gleichen Ausmaß mittelspannungsbeansprucht. In Bezug auf geschweißte Großbauteile waren jedoch zwei Dinge ungeklärt:

- Welche Eigenspannungen (Vorzeichen, Größe) sind überhaupt zu erwarten?
- Wie wirkt sich die für großvolumige Bauteile charakteristische große Steifigkeit auf den Abbau der Eigenspannungen aus?

Um einen groben Anhalt über die Verteilung und den zeitlichen Verlauf der Eigenspannungen vor und während der Schwingbeanspruchung zu bekommen, wurden an einem Versuchsträger röntgenographische Messungen durchgeführt /27/. Hierzu wurde ein transportables Röntgendiffraktometer in

ψ -Anordnung verwendet. An insgesamt 8 Meßstellen auf der Trägersoberseite des Gurtstoßes wurden dabei die Längseigen-
spannungskomponenten (Trägerlängsrichtung) gemessen. Die Lage der Meßstellen zeigt Bild 4.3-1. Zwei Meßstellen be-
fanden sich auf der Gurtstoßnaht, zwei weitere im Über-
gangsbereich zum Grundwerkstoff; der Rest lag im Grund-
werkstoffbereich. Sieben Meßpunkte waren dabei in dem von
Hand überschlifften Bereich angeordnet, eine Meßstelle lag
innerhalb der nur durch Sandstrahlen behandelten Oberfläche.
Die Eigenspannungen wurden zunächst im Anlieferungszustand
der Träger nach der Nahtnachbearbeitung gemessen; dann wurde
der Schwingversuch durchgeführt. Nach definierten Schwing-
spielzahlen wurde der Versuch jeweils unterbrochen und die
Eigenspannungsmessungen wiederholt.

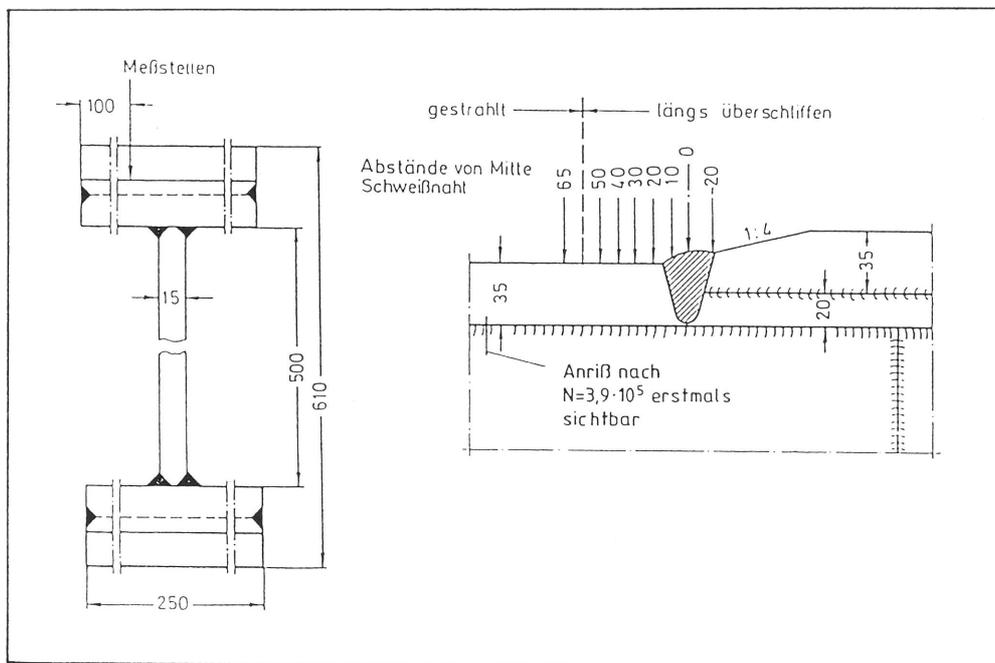


Bild 4.3-1 Meßstellenplan für Eigenspannungsmessungen
(Träger-Nr. SS5-1, Trägertyp IIa)

Nach $3,9 \cdot 10^5$ Schwingspielen mit einer Schwingbeanspruchung $\sigma_{aR} = \pm 99 \text{ N/mm}^2$ zeigte sich bei dem hier untersuchten Träger ein Anriß in der Kehlnaht an der Obergurtunterseite (vgl. Bild 4.3-1). Der Versuch wurde dann bei $N = 4,35 \cdot 10^5$ unterbrochen und der erreichte Eigenspannungszustand nochmals an allen Meßstellen aufgenommen. Weiterhin wurden einige zusätzliche Messungen nach elektrolytischem Abtragen einer etwa 0,25 mm dicken Oberflächenschicht vorgenommen.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.3-1 zusammengestellt. Es handelt sich mit Ausnahme des letzten Wertes (Meßstelle

Tabelle 4.3-1 . Eigenspannungskomponenten in Trägerlängsrichtung (Träger SS5-1, Trägertyp II)

Biege- rand- spannung σ_{aR} N/mm ²	Zustand bzw. Schwing- spiel- zahl N·10 ³	Eigenspannungen (Längskomponenten) in N/mm ²							
		Meßstellen (siehe Bild 4.3-1)							
		-20	0	10	20	30	40	50	65
0	0 ¹⁾	109	367	205	115	72	260	438	-263
80	0,30	356		86		261		-266	
100	0,70	355		121		245		-244	
100	7,00	347		116		298		-246	
100	70,00	321		107		241		469	-266
100	435,00 angerissen ²⁾	12	305	248	101	103	264	478	-212
100	435,00 el. pol. Tiefe 0,25 mm	-186		44		-74		82	

1) Anlieferungszustand einschl. Nahtnachbearbeitung

2) erstes Sichtbarwerden des Anrisses bei $N = 390 \cdot 10^3$
(Anrißlage siehe Bild 4.3-1)

50) um Eigenspannungskomponenten in Trägerlängsrichtung, die mit der Schleifrichtung identisch sind. Alle ermittelten Eigenspannungen waren demnach Zugeigenspannungen mit höchsten Werten am Anfang des überschlifften Bereiches (Meßstelle 50) und in der Mitte der Schweißnaht (Meßstelle 0). An beiden Stellen kann der Einfluß eines besonders intensiven Schleifens vermutet werden. Dagegen traten in den Mulden bei den Meßstellen -20 und +20 besonders niedrige Eigenspannungen auf. Nur an Meßstelle 65 im gestrahlten Bereich ergaben sich Druckeigenspannungen. Die durchschnittliche Standardabweichung aller in Tabelle 4.3-1 angegebenen Meßwerte betrug ± 15 N/mm².

Der Abbau der Eigenspannungen während des Versuches war uneinheitlich: Nur an Meßstelle -20 wurde ein stärkerer Abbau von 109 auf 12 N/mm² gemessen. In Schweißnahtmitte zeigte sich ein monoton abfallender Verlauf von 367 auf 305 N/mm². Geringe oder keine Veränderungen wiesen die Meßstellen 20, 40 und 65 auf sowie 50, wenn die Werte der Meßreihe 5 und 6 miteinander verglichen werden. Die Eigenspannungserhöhungen an den Meßstellen 10 und 30 um 43 N/mm² bzw. 31 N/mm² sind noch nicht als signifikant anzusehen. Die Eigenspannungen wurden durch die Schwingbeanspruchungen insgesamt im Mittel

um $7,9 \text{ N/mm}^2$ abgebaut. Die Werte im gestrahlten Bereich, Meßstelle 65, wurden dabei offenbar nicht verändert.

Werden die Nenn-Lastspannungen den gemessenen Eigenspannungen überlagert, liegen die Beanspruchungsspitzen im Grundwerkstoff bei 580 , im Schweißgut bei 470 N/mm^2 . Unter Beachtung der Festigkeitswerte für Grundwerkstoff und Schweißgut muß somit davon ausgegangen werden, daß die Trägeroberfläche durch Sandstrahlen und Schleifen innerhalb einer dünnen Schicht stark kaltverfestigt wurde.

Um auch eine Antwort auf die Frage zu erhalten, ob bei der vorliegenden Bauteilsteifigkeit auch Quereigenspannungen vorhanden sind, wurden diese stichprobenartig an einer Meßstelle (50) ermittelt. Die Messung ergab mit 74 N/mm^2 einen relativ niedrigen Eigenspannungswert.

Die Messungen erlauben insgesamt keine Aussage über die Eigenspannungsverteilungen und deren schwingspielzahl-abhängige Änderungen in dem durch das Schleifen oder Strahlen nicht beeinflussten Werkstoff. Sie weisen aber darauf hin, daß die Nachbearbeitungs-Eigenspannungen (Schleifen, Sandstrahlen) in der Trägeroberfläche die Schweißeigenspannungen dort völlig überdecken. Die letzte Zeile von Tabelle 4.3-1 enthält ergänzende Angaben über den Eigenspannungszustand $0,25 \text{ mm}$ unterhalb der Oberfläche (nach Abschluß der Schwingversuche gemessen). Hier dürfte es sich um die beim Schweißen der Quernaht entstandenen Schweißeigenspannungen handeln.

5. Versuchsergebnisse und Vergleiche mit Regelwerken

5.1 Versuchsergebnisse

Die Amplitude der nominellen Biegerandspannung wurde auch nach dem Sichtbarwerden des ersten Anrisses im Sinne eines Einstufenversuches weiter konstant gehalten. Mit wachsendem Riß und konstant gehaltener Belastung (Biegerandbeanspruchung) nimmt die Rißausbreitungsgeschwindigkeit zu. Außerdem verursacht ein sich ausbreitender Ermüdungsriß zunehmend Spannungsumlagerungen in Nachbarbereichen, die zur Initiierung weiterer Risse in zuvor u.U. weniger stark beanspruchten Bereichen oder auch zu einem Stillstand bereits vorhandener Risse führen können. Bei den vergleichenden Auswertungen wurde die Möglichkeit von Spannungsumlagerungen nicht berücksichtigt, da sie meßtechnisch nicht erfaßt wurden. Es wurde angenommen, daß während der Rißentstehungsphase keine gegenseitigen Beeinflussungen der Rißausgangsstellen untereinander vorlagen.

Die Schwingenspielzahlen beim Sichtbarwerden der Anrisse wurden registriert und in der Reihenfolge des Auftretens nummeriert. Ein verhältnismäßig großer Teil der Ermüdungsrisse, namentlich im Bereich der Kehlnähte, konnte erst nach Abbruch der Versuche durch systematisches Absuchen der Nähte mit Hilfe eines Farbeindringverfahrens ermittelt werden. Damit sind die während der Versuche festgestellten zeitlichen Reihenfolgen der Schwingungsrisse in unterschiedlichem Ausmaß unvollständig.

Die Ergebnisse aller Versuche sind in den Tabellen 5.1-1a... 5.1-1c zusammengestellt. Sie enthalten die Schwingenspielzahlen N_{A_i} beim ersten Sichtbarwerden des jeweiligen Anrisses "i", die Nennspannungen σ_a in Trägermitte und die örtlich an der jeweiligen Bruchausgangsstelle wirksam gewesenen Nennspannungen $\sigma_{a,\delta}$. Dabei wurde auch berücksichtigt, daß den Halsnähten der Träger - verglichen mit den Biegerandspannungen σ_{aR} - deutlich verringerte Nennspannungen (Faktor 0,87; Bild 4.2-2) zuzuordnen sind. Außerdem enthalten diese Tabellen Bezugs-Schwingenspielzahlen $N_{A\text{ Bezug}}$, die in Abschnitt 6

Tabelle 5.1-1a Versuchsergebnisse

lfd. Nr.	Träger Typ	Träger Nr.	Bruch Nr.	R	$\pm \sigma_{\text{StoB}}$ MPa 1)	$\pm \sigma_{\text{Halbn.}}$ MPa 1)	Ab-stand mm 2)	$\pm \sigma_{\text{örtl.}}$ MPa 3)	N_A $\times 10^6$	$N_{A \text{ bez.}}$ $\times 10^6$	N_E $\times 10^6$	Naht-Vari-ante 3)	Anriß-po-sition	Nahtart	Schw. Pos. 4)	Feh-ler Nr. 5)
1	Ia1	S1-1	1	-1	78,5	68,4	0	78,5	0,76	0,90	0,94	S1	Obergurtstoß	U-Naht	w	2
2			2				0	78,5	0,77	0,91		S3	Stegstoß unten	V-Naht	s	2
3			3				200	68,3	0,94	0,66		H5	Naht III	Kehl-naht	h	1
4	Ia1	S1-2	1	-1	95,2	83,0	0	95,2	0,88	2,15	1,13	S1	Obergurtstoß	U-Naht	w	12
5			2				25	83,0	0,90	1,32		H6	Naht II	DHV-Naht	hü	4
6			3				60	83,0	1,00	1,46		01	Naht III	DHV-/Kehl-naht	h	1
7			4				170	82,9	1,00	1,45		H5	Naht I	Kehl-naht	hü	4
8			5				230	82,8	1,10	1,59		H5	Naht IV	Kehl-naht	h	1
9			6				235	82,8	1,10	1,59		H5	Naht III	Kehl-naht	h	1
10			7				240	82,7	1,13	1,63		H5	Naht II	Kehl-naht	hü	1
11			8				245	82,7	1,13	1,63		H5	Naht I	Kehl-naht	hü	1
12			9				690	80,9	1,13	1,50		H1	Naht III	Kehl-naht	w	5
13			10				430	82,2	1,13	1,59		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	5
14	Ia1	SS1-1	1	-1	78,3	68,1	250	67,9	1,30	0,89	2,10	U2	Naht II	Kehl-naht	w/hü	4
15			2				0	78,3	1,87	2,20		S1	Untergurtstoß	U-Naht	w	2
16			3				235	67,9	1,95	1,34		H5	Naht II	Kehl-naht	hü	1
17			4				116	68,1	2,05	1,42		01	Naht III	DHV-/Kehl-naht	h	1
18	Ia1	SS1-2	1	-1	97,9	85,2	242	84,9	1,02	1,63	1,32	H5	Naht II	Kehl-naht	hü	4
19			2				255	84,9	1,21	1,93		U2	Naht I	Kehl-naht	w/hü	1
20			3				650	83,2	1,27	1,88		H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8
21			4				257	84,9	1,27	2,02		U2	Naht III	Kehl-naht	w/h	1
22			5				252	84,9	1,27	2,02		U2	Naht II	Kehl-naht	w/hü	4
23			6				450	84,3	1,32	2,04		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
24	Ia2	S1-11	1	0,05	68,0	59,0	675	68,0	3,22	2,23	3,26	G1	Untergurt			11
25	Ia2	S1-12	1	0,05	60,0	52,0	340	52,0	3,78	0,96	3,99	H1	Naht III/IV	Kehl-naht	w	12
26	Ia2	S3-31	1	0,05	66,0	57,0	10	66,0	1,87	1,16	2,59	S2	Untergurtstoß	X-Naht	w	2
27			2				130	57,0	2,05	0,73		H5	Naht III	Kehl-naht	h	4
28	Ia2	S3-32	1	0,05	70,0	61,0	40	61,0	0,80	0,37	1,06	H6	Naht IV	DHV-Naht	h	4
29			3				10	70,0	0,90	0,69		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	2
30			4				235	61,0	1,06	0,49		U2	Naht IV	Kehl-naht	w/h	4
31			5				30	70,0	1,06	0,82		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	13
32	Ia2	S1-13	1	-1	78,8	68,5	0	78,8	1,30	1,56	1,41	S2	Obergurtstoß	X-Naht	w	2
33			2				240	68,3	1,40	0,98		U2	Naht IV	Kehl-naht	w/h	4
34			4				180	68,4	1,40	0,99		H5	Naht I/II	Kehl-naht	hü	8
35	Ia2	S1-14	1	-1	70,0	61,2	1005	57,9	0,85	0,32	1,27	H1	(Naht I/II)			11
36			3				285	60,9	1,15	0,53		H1	Naht III	Kehl-naht	w	4
37			4				240	61,0	1,18	0,54		U2	Naht III	Kehl-naht	w/h	12
38			5				65	70,0	1,20	0,93		G1	Obergurt			11
39	Ia2	S3-33	1	-1	78,5	68,0	100	78,5	1,15	1,36	1,25	G1	Obergurt			11
40	Ia2	S3-34	1	-1	81,5	71,0	235	70,8	1,42	1,14	1,75	U2	Naht IV	Kehl-naht	w/h	4
41			2				235	70,8	1,50	1,21		U2	Naht II	Kehl-naht	w/hü	4
42	Ib	S2-21	1	0,05	74,0	64,0	235	64,0	0,79	0,44	0,92	H6	Naht IV	DHV-Naht	h	4
43	Ib	S2-22	1	0,05	70,0	60,9	10	70,0	1,66	1,28	1,76	S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	10
44	Ib	S4-41	1	0,05	72,0	62,5	0	72,0	0,82	0,70	0,84	S2	Untergurtstoß	X-Naht	w	2
45	Ib	S4-42	1	0,05	69,5	60,5	255	60,5	1,58	0,71	1,68	U3	Naht III	DHV-Naht	w/h	1
46			3				230	60,5	1,60	0,71		H6	Naht III	DHV-Naht	h	12
47	Ib	S2-23	1	-1	68,0	59,0	225	58,8	1,05	0,42	1,73	U3	Naht III	DHV-Naht	w/h	4
48			2				0	68,0	1,33	0,92		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	2
49			4				10	68,0	1,60	1,11		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	2
50			5				250	58,8	1,65	0,66		U3	Naht II	DHV-Naht	w/hü	4
51	Ib	S2-24	1	-1	66,0	57,5	585	56,4	2,35	0,81	2,76	H2	Naht I	DHV-Naht	w	3
52			3				330	57,2	2,70	0,97		U3	Naht IV	DHV-Naht	w/h	3
53	Ib	S4-44	1	-1	72,5	63,0	10	72,5	1,20	1,06	2,38	S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	2
54			2				785	60,9	2,06	0,94		H2	Naht I	DHV-Naht	w	3
55			3				10	72,5	2,20	1,94		S2	Obergurtstoß	X-Naht	w	2
56	IIa	S5-1	1	-1	78,5	68,3	0	78,5	1,10	1,31	1,90	S4	Untergurtstoß	U-Naht		7
57			2				0	78,5	1,70	2,02		S4	Obergurtstoß	U-Naht		7
58	IIa	S5-2	1	-1	101,0	87,9	0	101,0	0,37	1,13	0,55	S1	Obergurtstoß	U-Naht	w	2
59	IIa	SS5-1	1	-1	99,1	86,2	110	86,1	0,39	0,66	1,09	01	Naht I	DHV-/Kehl-naht	hü	1
60			2				100	86,2	0,55	0,93		01	Naht III	DHV-/Kehl-naht	h	1
61			3				230	86,0	0,92	1,53		H5	Naht I/II	Kehl-naht	hü	8
62			4				0	99,1	0,98	2,79		S1	Untergurtstoß	U-Naht	w	2
63			5				620	84,4	1,09	1,70		H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8
64			6				670	84,1	1,09	1,67		H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8
65			7				700	83,9	1,09	1,66		H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8

1) In Trägermitte $x = l/2$ bei den Versuchen mit $R = -1$, innerhalb der Kräfteinleitungsstellen bei den Versuchen mit $R = 0,05$

2) Rißabstand von der Trägermitte bzw. vom Gurtstoß

3) Gemäß Tabelle 6.1-1

4) Siehe Tabelle 6.1-1, Fußnote 1)

5) Siehe Tabelle 7.2-1

Tabelle 5.1-1b Versuchsergebnisse

lfd. Nr.	Träger Typ	Träger Nr.	Bruch Nr.	R	$\pm \sigma_{\text{Stoß}}$ MPa 1)	$\pm \sigma_{\text{Halsn.}}$ MPa 1)	Ab- stand mm 2)	$\pm \sigma_{\text{u, g}}$ örtl. MPa	N_A $\times 10^6$	$N_{A, \text{bez.}}$ $\times 10^6$	N_E $\times 10^6$	Naht- Vari- ante 3)	Anriß- posi- tion	Nahtart	Schw. Pos. 4)	Feh- ler Nr. 5)
66	IIa	SS5-2	1	-1	78,7	68,5	0	78,7	1,37	1,64	1,61	S4	Untergurtstoß	U-Naht		7
67			2				110	68,5	1,50	1,07	U1	Naht IV	DHV-/Kehlnaht	h	1	
68			3				122	68,4	1,50	1,06	H5	Naht II	Kehlnaht	hü	4	
69			4				0	78,7	1,50	1,80	S1	Obergurtstoß	U-Naht	w	12	
70	IIb	SS5-51	1	-1	100,0	87,0	0	100,0	0,30	0,89	0,36	S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	2
71	IIb	SS5-52	1	-1	89,0	77,4	0	89,0	0,90	1,71	0,97	S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	2
72			2				0	89,0	0,95	1,80	S2	Obergurtstoß	X-Naht	w	2	
73	IIb	SS5-51	1	-1	74,0	64,5	15	74,0	0,49	0,47	0,88	S2	Obergurtstoß	X-Naht	w	2
74			2				15	74,0	0,58	0,55		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	10
75			3				15	74,0	0,64	0,61		S2	Obergurtstoß	X-Naht	w	2
76			4				115	64,5	0,80	0,45		U1	Naht IV	DHV-/Kehlnaht	h	12
77			5				15	74,0	0,84	0,80		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	2
78	IIb	SS5-52	1	-1	69,0	60,0	15	69,0	0,76	0,56	1,17	S2	Obergurtstoß	X-Naht	w	10
79			2				110	60,0	0,94	0,41		U1	Naht IV	DHV-/Kehlnaht	h	4
80			3				15	69,0	1,11	0,81		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	10
81			4				20	69,0	1,14	0,83		S2	Untergurtstoß	X-Naht	ü	10
82	IIIa	01-11	1	0,05	84,5	73,5	120	73,5	1,25	1,16	1,84	H1	Naht IV	Kehlnaht	w	3
83			2				925	63,9	1,26	0,69		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	3
84			3				220	73,5	1,50	1,39		H1	Naht III	Kehlnaht	w	3
85			4				70	73,5	1,50	1,39		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	4
86			6				300	73,5	1,70	1,58		H1	Naht III/IV	Kehlnaht	w	8
87			7				935	63,9	1,70	0,93		H1	Naht III	Kehlnaht	w	13
88			8				895	64,7	1,70	0,98		H1	Naht III	Kehlnaht	w	13
89			IIIa				01-12	1	0,05	71,0		62,0	995	53,3	3,10	0,86
90	2	505		62,0	3,23	1,58		H1			Naht III		Kehlnaht	w	4	
91	3	380		62,0	3,25	1,59		H1			Naht IV		Kehlnaht	w	1	
92	4	115		62,0	3,25	1,59		H1			Naht IV		Kehlnaht	w	4	
93	6	800		61,4	3,25	1,53		H1			Naht IV		Kehlnaht	w	4	
94	7	785		61,4	3,25	1,53		H1			Naht III/IV		Kehlnaht	w	8	
95	IIIa	01-13		1	-1	87,0		76,0			1780		63,3	1,33	0,70	1,48
96			2	1100			71,0		1,33	1,09	H1	Naht III	Kehlnaht	w	3	
97			3	90			76,0		1,33	1,40	H1	Naht III	Kehlnaht	w	3	
98			4	810			73,3		1,33	1,22	H1	Naht IV	Kehlnaht	w	4	
99			5	720			73,9		1,33	1,26	H1	Naht I	Kehlnaht	w	3	
100			6	220			75,8		1,33	1,38	H1	Naht I	Kehlnaht	w	3	
101			7	660			74,2		1,33	1,28	H1	Naht II	Kehlnaht	w	4	
102			8	780			73,5		1,33	1,23	H1	Naht II	Kehlnaht	w	3	
103			9	15			76,0		1,33	1,40	H1	Naht IV	Kehlnaht	w	4	
104			10	810			73,3		1,33	1,22	H1	Naht I/II	Kehlnaht	w	8	
105			12	1010			71,8		1,48	1,26	H1	Naht II	Kehlnaht	w	4	
106			13	1060			71,4		1,48	1,23	H1	Naht I	Kehlnaht	w	4	
107			14	755			73,7		1,48	1,38	H1	Naht III	Kehlnaht	w	3	
108			15	90			76,0		1,48	1,55	H1	Naht III	Kehlnaht	w	4	
109			16	810			73,3		1,48	1,36	H1	Naht I	Kehlnaht	w	4	
110			IIIa	01-14			1		-1	78,0	68,0	235	67,8	1,47	1,01	
111	2	205			67,8	1,47	1,01	H1				Naht II	Kehlnaht	w	3	
112	4	670			66,3	1,69	1,07	H1				Naht IV	Kehlnaht	w	3	
113	5	1070			63,8	1,69	0,92	H1				Naht IV	Kehlnaht	w	3	
114	IIIb	03-31	1	0,05	76,0	66,0	150	66,0	1,76	1,09	2,20	H5	Naht III	Kehlnaht	h	13
115			2				320	66,0	1,76	1,09		U2	Naht IV	Kehlnaht	w/h	4
116			3				240	66,0	1,76	1,09		U2	Naht III	Kehlnaht	w/h	8
117			5				370	66,0	1,85	1,15		H1	Naht III/IV	Kehlnaht	w	8
118			7				485	66,0	2,20	1,36		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	8
119	IIIb	03-32	1	0,05	82,5	72,0	440	72,0	1,30	1,12	1,56	H1	Naht IV	Kehlnaht	w	1
120			2				620	72,0	1,31	1,12		H1	Naht III	Kehlnaht	w	13
121			4				270	72,0	1,43	1,23		U2	Naht III	Kehlnaht	w/h	13
122			6				300	72,0	1,44	1,24		U2	Naht IV	Kehlnaht	w/h	13
123			7				630	72,0	1,45	1,24		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	13
124			8				520	72,0	1,56	1,34		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	13
125			9				540	72,0	1,56	1,34		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	13
126			10				250	72,0	1,56	1,34		U2	Naht IV	Kehlnaht	w/h	13
127			11				940	64,2	1,56	0,87		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	13
128			12				780	70,8	1,56	1,26		H1	Naht IV	Kehlnaht	w	13
129			13				660	72,0	1,56	1,34		H1	Naht III	Kehlnaht	w	3
130	IIIb	03-33	1	-1	76,0	66,0	920	63,0	2,34	1,22	2,45	H1	Naht II	Kehlnaht	w	4
131			2				460	65,2	2,34	1,39		H1	Naht I	Kehlnaht	w	4
132			3				375	65,5	2,34	1,41		H1	Naht I	Kehlnaht	w	4
133			6				1092	61,8	2,45	1,18		H1	Naht III	Kehlnaht	w	8
134			7				365	65,5	2,45	1,48		H1	Naht III	Kehlnaht	w	8
135			8				265	65,7	2,45	1,50		H1	Naht I	Kehlnaht	w	4

1) In Trägermitte $x = 1/2$ bei den Versuchen mit $R = -1$, innerhalb der Kräfteinleitungsstellen bei den Versuchen mit $R = 0,05$

2) Rißabstand von der Trägermitte bzw. vom Gurtstoß

3) Gemäß Tabelle 6.1-1

4) Siehe Tabelle 6.1-1, Fußnote 1)

5) Siehe Tabelle 7.2-1

Tabelle 5.1-1c Versuchsergebnisse

lfd. Nr.	Träger Typ	Träger Nr.	Bruch Nr.	R	$\pm \sigma_{\text{Stoß}}$ MPa 1)	$\pm \sigma_{\text{Halsn.}}$ MPa 1)	Abstand mm 2)	$\pm \sigma_{\text{a,b}}$ örtl. MPa	N_A $\times 10^6$	$N_{A \text{ rez.}}$ $\times 10^6$	N_E $\times 10^6$	Naht-Variante 3)	Anriß-position	Nahtart	Schw. Pos. 4)	Fehler Nr. 5)
136	IIIb	03-34	1	-1	86,0	75,0	320	74,6	1,53	1,50	1,70	02	Naht III	Kehl-naht	w/h	3
137			2				660	73,2	1,53	1,40		H1	Naht III	Kehl-naht	w	3
138			3				330	74,6	1,53	1,50		H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8
139			5				260	74,7	1,53	1,51		02	Naht II	Kehl-naht	w/hü	5
140			6				1100	70,1	1,53	1,19		H1	Naht II	Kehl-naht	w	3
141			7				490	74,0	1,59	1,51		H1	Naht II	Kehl-naht	w	4
142			10				320	74,6	1,64	1,61		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
143			11				820	72,3	1,64	1,43		H1	Naht III	Kehl-naht	w	3
144			12				340	74,5	1,64	1,60		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
145			13				810	72,3	1,64	1,43		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
146			14				840	72,1	1,64	1,42		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
147			15				920	71,6	1,64	1,38		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
148			16				980	71,1	1,64	1,34		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
149			17				1010	70,9	1,64	1,33		H1	Naht IV	Kehl-naht	w	4
150			18				630	73,4	1,64	1,51		H1	Naht I	Kehl-naht	w	4
151			19				570	73,7	1,64	1,53		H1	Naht II	Kehl-naht	w	4
152	20	510	73,9	1,64	1,55	H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8						
153	21	450	74,2	1,64	1,57	H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8						
154	22	1030	70,7	1,64	1,31	H1	Naht III	Kehl-naht	w	3						
155	23	430	74,2	1,64	1,58	H1	Naht III	Kehl-naht	w	8						
156	24	440	74,2	1,64	1,58	H1	Naht III	Kehl-naht	w	8						
157	25	1430	66,8	1,64	1,06	H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8						
158	26	1470	66,3	1,64	1,04	H1	Naht I	Kehl-naht	w	3						
159	27	960	71,3	1,64	1,35	H1	Naht I	Kehl-naht	w	8						
160	28	620	73,4	1,64	1,52	H1	Naht I/II	Kehl-naht	w	8						
161	29	500	74,0	1,64	1,56	H1	Naht I	Kehl-naht	w	4						
162	31	430	74,2	1,64	1,58	H1	Naht I	Kehl-naht	w	4						
163	IVa	02-21	1	0,05	72,0	63,0	360	63,0	2,30	1,20	3,08	H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
164	IVa	02-22	1	0,05	76,8	66,8	820	65,5	1,90	1,14	2,66	H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
165			2				555	66,8	1,98	1,28		H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
166	IVa	02-23	1	-1	87,0	75,7	255	75,4	0,40	0,41	0,40	H2	Naht I	DHV-Naht	w	4
167	IVa	02-24	1	-1	78,0	68,0	238	67,8	0,70	0,48	0,90	H2	Naht I	DHV-Naht	w	4
168	IVb	04-41	1	0,05	83,0	72,0	500	72,0	0,98	0,84	1,42	H2	Naht IV	DHV-Naht	w	3
169			2				830	70,5	0,99	0,78		H2	Naht IV	DHV-Naht	w	3
170			3				550	72,0	1,08	0,93		H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
171			4				310	72,0	1,08	0,93		H2	Naht IV	DHV-Naht	w	3
172			5				390	72,0	1,21	1,04		H2	Naht IV	DHV-Naht	w	3
173			6				700	72,0	1,21	1,04		H2	Naht IV	DHV-Naht	w	3
174			7				90	72,0	1,28	1,10		H6	Naht IV	DHV-Naht	h	3
175	IVb	04-42	1	0,05	78,0	68,0	270	68,0	1,31	0,91	2,45	03	Naht IV	DHV-Naht	w/h	3
176			3				1120	53,7	2,45	0,70		H2	Naht IV	DHV-Naht	w	3
177	IVb	04-43	1	-1	77,0	67,0	930	73,4	1,60	1,48	1,68	G2	Obergurt			11
178	IVb	04-44	1	-1	83,0	72,0	1590	62,3	1,30	0,65	1,39	H2	Naht III	DHV-Naht	w	4
179			3				370	71,5	1,32	1,10		H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
180			5				1260	65,9	1,35	0,83		H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
181			6				1010	68,0	1,35	0,94		H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
182			8				435	71,3	1,35	1,11		H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
183			9				650	70,3	1,35	1,06		H2	Naht III	DHV-Naht	w	3
184			A1				A1-15	1	-1	78,0		68,0	575	66,8	2,60	1,68
185	2	1382		61,1	2,81	1,30		H3			Naht IV		Kehl-naht	h	6	
186	3	505		67,1	2,91	1,91		H3			Naht III		Kehl-naht	h	1	
187	4	355		67,5	2,95	1,99		H3			Naht III		Kehl-naht	h	1	
188	5	318		67,6	2,95	2,00		H3			Naht III		Kehl-naht	h	1	
189	6	113		68,0	2,95	2,04		H3			Naht III		Kehl-naht	h	1	
190	7	575		66,8	2,95	1,91		H3			Naht III		Kehl-naht	h	1	
191	A1	A1-16	1	-1	90,0	78,0	240	77,8	1,60	1,83	1,82	H3	Naht III	Kehl-naht	h	1
192	A2	A2-25	1	-1	79,0	69,0	0	79,0	2,58	3,14	2,70	G2	Obergurt			11
193			2				375	68,5	2,58	1,83		H4	Naht I	DHV-Naht	h	5
194	A2	A2-26	1	-1	88,0	77,0	67	77,0	1,35	1,49	1,53	H4	Naht III	DHV-Naht	h	6
195	SA1	SA1-15	1	-1	79,0	69,0	0	79,0	1,08	1,31	1,15	S2	Obergurtstoß	X-Naht	ü	9
196	SA1	SA1-16	1	-1	89,0	77,0	1110	83,1	0,67	0,98	0,69	G2	Obergurt			11
197	SA2	SA2-25	1	-1	78,0	68,0	370	67,5	0,93	0,63	1,48	H4	Naht II	DHV-Naht	h	3
198			2				15	78,0	1,37	1,59		S2	Obergurtstoß	X-Naht	w	10
199	SA2	SA2-26	1	-1	88,0	76,0	13	88,0	1,17	2,13	1,18	S2	Obergurtstoß	X-Naht	ü	9
200			2				500	75,0	1,17	1,17		H4	Naht II	DHV-Naht	h	3
201			3				110	75,9	1,17	1,23		H6	Naht II	DHV-Naht	hü	3
202			4				235	75,8	1,17	1,22		H6	Naht II	DHV-Naht	hü	3

1) In Trägermitte $x = 1/2$ bei den Versuchen mit $R = -1$, innerhalb der Kräfteeinleitungsstellen bei den Versuchen mit $R = 0,05$

2) Rißabstand von der Trägermitte bzw. vom Gurtstoß

3) Gemäß Tabelle 6.1-1

4) Siehe Tabelle 6.1-1, Fußnote 1)

5) Siehe Tabelle 7.2-1

für einen Vergleich der unterschiedlichen Schweißnahtvarianten benötigt werden (Erläuterungen hierzu siehe 6.2), sowie weitere Angaben zu den Rißpositionen und den Rißausgangsstellen.

Die Ergebnisse sind, für Halsnähte und Stumpfstöße getrennt, in Wöhler-Diagrammen dargestellt, und zwar für den jeweils ersten in einem Versuchsstück aufgetretenen Riß je Nahtvariante und Versuch. Den Versuchspunkten sind Wöhlerlinien für zulässige Beanspruchungen nach drei z. Zt. gültigen Regelwerken für Schweißverbindungen /2, 3, 12/ gegenübergestellt.

5.2 Anmerkungen zu den Regelwerken

Die derzeit gültigen Regelwerke für Schweißverbindungen im Bereich des Stahlbaus /2...5, 12, 13/ basieren auf dem sogenannten Nennspannungskonzept, d. h. die Dimensionierung geht von geometrischen Idealformen aus und läßt makro- und mikrogeometrische Kerben, die sich aus der Art der Naht (z.B. Nahtüberhöhung bei Stumpfnähten) oder aus dem Schweißprozeß selbst (z.B. Nahtübergang Grundwerkstoff/Schweißgut) ergeben, unberücksichtigt. Die unterschiedliche Kerbschärfe unterschiedlicher Nahtformen wird dann durch Zuordnung zu bestimmten Kerbfallgruppen berücksichtigt. Die zulässigen Spannungen je Kerbfall basieren auf älteren Versuchsergebnissen mit kerbfalltypischen Proben. Die Kerbschärfe von Nahtformen (Kerbfällen), für die keine Versuchswerte vorlagen, wurden unter Berücksichtigung der spannungsmechanischen Besonderheiten empirisch aus experimentell abgesicherten Kerbfällen abgeleitet. Auf diese Weise entstand ein relativ engmaschiges Kerbfallgruppen-Raster.

Die Regelwerke unterscheiden sich vor allem hinsichtlich folgender Punkte:

- Dichte des Kerbfallgruppen-Rasters,
- Zuordnung Nahtform-Kerbfall/zulässige Beanspruchung,
- Zusammenhang zwischen Ausführungsqualität und zulässiger Beanspruchung
- Gesonderte Berücksichtigung von Automaten-Schweißungen (Schweißen ohne Unterbrechungen).

Das Raster der Kerbfallgruppen ist in unterschiedlichen Regelwerken unterschiedlich grob. Wie in den Bildern 5.2-1a... 5.2-1g gezeigt, sind z.B. die in den Versuchsträgern vorkommenden Nahtformen

- Stegstoß,
- Halsnaht kreuzt Stumpfnaht,
- Flankenkehl-/Stirnfugennaht zur Verbindung von Gurtplatten untereinander

nicht in allen Regelwerken als eigene Kerbfälle ausgewiesen.

Die Einschätzung der Kerbschärfen-Reihenfolge ist in allen Richtlinien weitgehend identisch. Die Höhe der einem Kerbfall zugeordneten zulässigen Spannungen ist jedoch wegen der unterschiedlichen Konzepte (Wöhlerlinienneigung, Mittelspannungseinfluß, Sicherheitsfaktoren) unterschiedlich. Tabelle 5.2-1 verdeutlicht die Unterschiede in den zulässigen Spannungen für sämtliche in den Versuchsstücken vorkommenden Nahtformen.

Bei den Nahtformen, bei denen die Ermittlung einer "inneren Kerbwirkung" durch Schweißnahtinnenfehler problematisch ist (vor allem Halsnähte), beachten die Regelwerke lediglich die "äußere Kerbwirkung" bei der Kerbfall-Zuordnung. Bei Nahtformen, die eine zerstörungsfreie Prüfung auch des Schweißnahtinneren ermöglichen, wird teilweise auch die "Innenqualität" in Form der Nahtgüte mit zur Beurteilung herangezogen. So unterscheidet z.B. DIN 15018 bei Stumpfstoßverbindungen in bezug auf die innere Kerbwirkung zwischen den Merkmalen "Nahtgüte nachgewiesen" und "Nahtgüte nicht nachgewiesen" und in bezug auf die äußere Kerbwirkung bei Stumpfnähten zwischen "Normalgüte" und "Sondergüte". Hierbei ist anzumerken, daß der Begriff "Sondergüte" nicht eindeutig definiert ist. Zum einen wird mit Sondergüte die Forderung umschrieben, daß die Nahtqualität an definierten Stellen mit Hilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren nachzuweisen ist (Zusatz: Nahtgüte nachgewiesen). In der Praxis wird der Begriff "Sondergüte" mitunter aber auch nur als Kurzform für blecheben abgearbeitete Stumpfnähte verwendet. Weiterhin steht "Sondergüte" auch für eine Kombination der beiden genannten Nahtmerkmale.

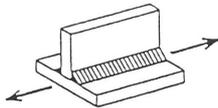
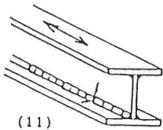
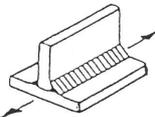
Nr.	Versuchsträger bzw. REGELWERK	Nahtform	Kerbfall-Beschreibung
1	Versuchsträger	Doppelkehlnaht 	durchlaufende <u>Doppelkehlnaht</u> , Verbindung von Blechen (Gurt und Steg), beide Seiten nacheinander mit Unterbrechungen des Schweißprozesses (Elektrodenwechsel) <u>E-Hand-geschweißt</u> (Werkstattschweißung) Schweißposition w, Nahtqualität (Soll): AK gem. DIN 8563, Teil 3
	EUROCODE 3 (1984)	 (11) Kategorie 112 Nr.11	Bereiche mit durchgehender Längsnaht (Kehl- oder Stumpfnaht), die von beiden Seiten mit Schweißunterbrechung geschweißt wurden.
	DS 804 (DB) (1983)	 KV Nr. 1	Durchlaufende Kehl-, K- oder HV-Naht zur Verbindung von Stegen mit Gurten. Durchlaufende Flankenkehlnaht und Stirnfugennaht zur Verbindung von Gurtplatten untereinander.
	DIN 15018 (1984)	 K1 Nr.123	Mit <u>K e h l n a h t</u> - Normalgüte längs zur <u>K r a f t r i c h t u n g</u> v e r b u n d e n e T e i l e

Bild 5.2-1a E-Hand-geschweißte Doppelkehlnähte in den Versuchsträgern; Kerbfallgruppen-Zuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

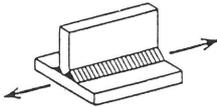
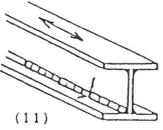
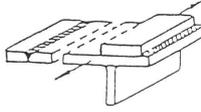
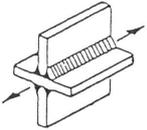
Nr.	Versuchsträger bzw. REGELWERK	Nahtform	Kerbfall-Beschreibung
2	Versuchsträger	DHV-Naht 	durchlaufende <u>DHV-Naht</u> , Verbindung von Blechen (Gurt und Steg), beide Seiten nacheinander <u>E-Hand-geschweißt</u> (Werkstattschweißung) mit Unterbrechung des Schweißprozesses (Elektrodenwechsel), Schweißposition w, Nahtqualität (Soll): AK gem. DIN 8563, Teil 3
	EUROCODE 3 (1984)	 (11) Kategorie 112 Nr.11	Bereiche mit durchgehender Längsnaht (Kehl- oder Stumpfnaht), die von beiden Seiten mit Schweißunterbrechung geschweißt wurden.
	DS 804 (DB) (1983)	 K V Nr.1	Durchlaufende Kehl-, K- oder HV-Naht zur Verbindung von Stegen mit Gurten. Durchlaufende Flankenkehlnaht und Stirnfugennaht zur Verbindung von Gurtplatten untereinander.
	DIN 15018 (1984)	 K0 Nr.023	Mit <u>K - N a h t</u> mit <u>D o p p e l - k e h l n a h t</u> längs zur <u>K r a f t r i c h t u n g</u> v e r b u n d e n e T e i l e

Bild 5.2-1b E-Hand-geschweißte DHV-Nähte in den Versuchsträgern; Kerbfallgruppen-Zuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

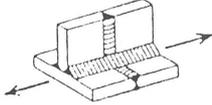
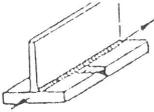
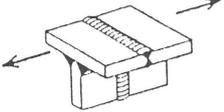
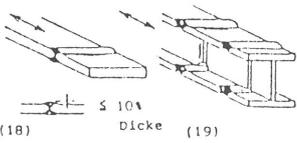
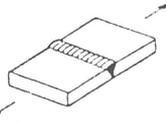
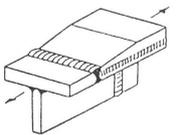
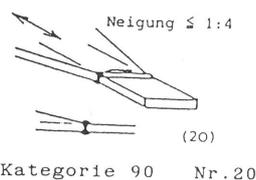
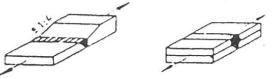
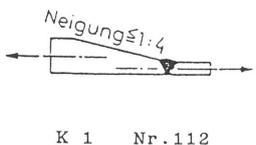
Nr.	Versuchsträger bzw. REGELWERK	Nahtform	Kerbfall-Beschreibung
3	Versuchsträger	Halsnaht kreuzt Stoßnaht 	DHV-Naht (E-Hand), Verbindung von Blechen (Gurt und Steg), Kreuzung mit Gurt- und Stegstoß, beide Seiten nacheinander geschweißt mit Unterbrechungen des Schweißprozesses (Elektrodenwechsel) Schweißpositionen h bzw. hu, Montageschweißung (Bauteilzwängungen), Nahtqualität (Soll): BK gem. DIN 8563, Teil 3
	EUROCODE 3 (1984)		keine Angaben ersatzweise: Durchlaufende Längsnaht Kat. 112, Nr. 11 (siehe Nr. 1/Doppelkehlnaht und Nr. 2/DHV-Naht)
	DS 804 (DB) (1983)	 K VI Nr. 1	Durchlaufende Kehl-, K- oder HV-Naht kreuzt eine Stumpfnah.
	DIN 15018 (1984)		keine Angaben ersatzweise: Durchlaufende K-Naht mit Doppelkehlnaht, K0, Nr. 023 (siehe Nr. 2/DHV-Naht)

Bild 5.2-1c E-Hand-geschweißte DHV-Nähte im Bereich der Baustellenstöße der Versuchsträger; Kerbfallgruppen-Zuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

Nr.	Versuchsträger bzw. REGELWERK	Nahtform	Kerbfall-Beschreibung
4	Versuchsträger	Gurtstoß 	U- bzw. X-Stoß, Verbindung der Gurt- und Stegbleche von I-Blechträgerhälften, E-Hand-geschweißt, Wurzel ausgeräumt und gegengeschweißt, Montageschweißung (Bauteilzwängungen), röntgengeprüft: IIW-Qualität blau, Nahtqualität (Soll): BS gem. DIN 8563, Teil 3
	EUROCODE 3 (1984)	 (18) $\leq 10\%$ Dicke (19) Kat. 90 (19)	<u>Stumpfnah in Querrichtung (voller Einbrand)</u> Nahtenden eben abgeschliffen und frei von Defekten (18) Querstöße von Blechen, Flachblechen, Walzprofilen ¹⁾ oder Blechträgern geschweißt in <u>Hannenlage</u> . Nahtüberhöhung nicht größer als 10% der Nahtbreite mit glatten Übergang zur Blechoberfläche. (19) Querstöße von Walzprofilen ¹⁾ oder geschweißten Blechträgern mit oder ohne Ausnehmung. Schweißnähte wie in (18).
	DS 804 (DB) (1983)	 K V Nr. 2	Einteilige, quer zur Krafrichtung durch Stumpfnah-Normalgüte verbundene Bauteile, Wurzel gegengeschweißt oder Wurzel auf Keramik-Unterlage geschweißt, durchstrahlt.
	DIN 15018 (1984)	 K1 Nr. 111	Mit <u>S t u m p f n a h t</u> - Normalgüte quer zur Krafrichtung verbundene Teile. <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> ∇ P oder P 100 </div> <div style="text-align: center;"> \times P oder P 100 </div> </div>

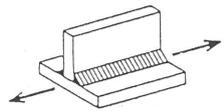
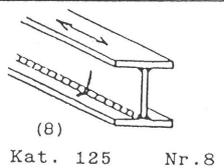
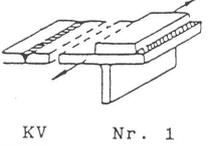
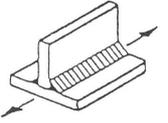
1) Nach DS 804 Abschn. 27.1 Abs. 495 ist die Verwendung von Form- u. Stabstahl für Querstöße in tragenden Komponenten von Brückenbauwerken nicht zulässig. In DIN 15018 werden Querstöße in Form- u. Stabstahl um eine Kerbfallgruppe schärfer eingestuft als Querstöße in Flachstahl.

Bild 5.2-1d E-Hand-geschweißte Gurtstöße in den Versuchsträgern; Kerbfallgruppen-Zuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

Nr.	Versuchsträger bzw. REGELWERK	Nahtform	Kerbfall-Beschreibung
5	Versuchsträger	unsymmetrischer Gurtstoß 	Gurtstoß (U bzw. X), Gurt und Steg versetzt gestoßen, Verbindung einteiliges auf zwei- teiliges Gurtblech von I-Blechträgerhälften, <u>E-Hand-geschweißt</u> , Wurzel ausgeräumt und gegengeschweißt, Montageschweißung (Bauteil- zwangungen). Röntgengeprüft: IIW-Qualität blau. Nahtqualität (Soll): BS gem. DIN 8563, Teil 3.
	EUROCODE 3 (1984)		kein 100% zutreffender Kerbfall ersatzweise: (20) Querstöße mit in Breite oder Dicke beigezo- genen Blechen oder Flachblechen mit einer Neigung $\leq 1:4$.
	DS 804 (DB) (1983)		kein 100% zutreffender Kerbfall ersatzweise: K V Nr. 3: einteilige, quer zur Kraft- richtung durch Stumpfnah-Normalgüte verbundene Bauteile bzw. K VIII Nr. 2: mehrteilige, quer zur Kraft- richtung durch Stumpfnah verbundene Bauteile.
	DIN 15018 (1984)		kein 100% zutreffender Kerbfall ersatzweise: Mit Stumpfnah-Normalgüte quer zur Kraft- richtung verbundene Teile verschiedener Dicken mit unsymmetrischem Stoß und Schräge $\leq 1:4$ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> ∇ P oder P 100 \times P oder P 100 </div>

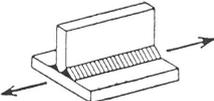
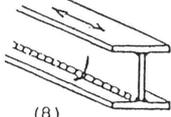
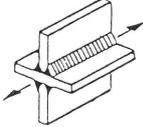
1) Nach DS 804 Absch. 27.1 Abs.495 ist die Verwendung von Form- u. Stabstahl für Querstöße in tragenden Komponenten von Brückenbauwerken nicht zulässig. In DIN 15018 werden Querstöße in Form- u. Stabstahl um eine Kerbfallgruppe schärfer eingestuft als Querstöße in Flachstahl.

Bild 5.2-1e E-Hand-geschweißte unsymmetrische Gurtstöße in den Versuchsträgern; Kerbfallgruppen-Zuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

Nr.	Versuchsträger bzw. REGELWERK	Nahtform	Kerbfall-Beschreibung
6	Versuchsträger		durchlaufende Doppelkehlnaht, Verbindung von Blechen (Gurt und Steg), von beiden Seiten gleichzeitig ohne Unterbrechung ¹⁾ des Schwei- ßprozesses <u>automatengeschweißt</u> (UP), Schweiß- position h, Nahtqualität (Soll): AK gem. DIN 8563, Teil 3
	EUROCODE 3 (1984)		Bereiche mit durchgehenden <u>automatisch</u> ge- schweißten Längsnähten (Kehl- oder Stumpfnäh- ten), die von <u>beiden Seiten ohne Schweißun- terbrechung</u> geschweißt wurden.
	DS 804 (DB) (1983)		keine 100% zutreffende Kerbfallbeschreibung ersatzweise: Durchlaufende Kehl-, K- oder HV-Nah zur Ver- bindung von Stegen mit Gurten. Durchlaufende Flankenkehlnaht und Stirnfugennaht zur Verbin- dung von Gurtplatten untereinander.
	DIN 15018 (1984)		keine 100% zutreffende Kerbfallbeschreibung ersatzweise: Mit K e h l n a h t - Normalgüte längs zur Kraft- r i c h t u n g v e r b u n d e n e T e i l e

1) Sollzustand, bei der Herstellung der Versuchsträger jedoch nicht immer realisiert

Bild 5.2-1f Automaten-geschweißte Doppelkehlnähte in den Versuchsträgern; Kerbfallgruppen-Zuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

Nr.	Versuchsträger bzw. REGELWERK	Nahtform	Kerbfall-Beschreibung
7	Versuchsträger		durchlaufende DHV-Naht, Verbindung von Blechen (Gurt und Steg), von beiden Seiten gleichzeitig ohne Unterbrechung ¹⁾ des Schweißprozesses automatisch geschweißt (UP), Schweißposition h, Nahtqualität (Soll): AK gem. DIN 8563, Teil 3
	EUROCODE 3 (1984)	 (8) Kat. 125 Nr.8	Bereiche mit durchgehenden <u>automatisch</u> geschweißten Längsnähten (Kehl- oder Stumpfnähten), die von <u>beiden Seiten ohne Schweißunterbrechung</u> geschweißt wurden.
	DS 804 (DB) (1983)	 K V Nr.1	keine 100% zutreffende Kerbfallbeschreibung ersatzweise: Durchlaufende Kehl-, K- oder HV-Naht zur Verbindung von Stegen mit Gurten. Durchlaufende Flankenkehlnaht und Stirn fugennaht zur Verbindung von Gurtplatten untereinander.
	DIN 15018 (1984)	 K0 Nr.023	keine 100% zutreffende Kerbfallbeschreibung ersatzweise: Mit K-N a h t mit D o p p e l k e h l n a h t längs zur Kraft-richtung v e r b u n d e n e Teile

1) Sollzustand, bei der Herstellung der Versuchsträger jedoch nicht immer realisiert

Bild 5.2-1g Automaten-geschweißte DHV-Nähte in den Versuchsträgern; Kerbfallgruppen-Zuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

Tabelle 5.2-1 Zulässige Spannungen für die untersuchten Nahtformen gemäß Kerbfallzuordnung in unterschiedlichen Regelwerken

Nr.	NAHTFORM Versuchsträger	KERBFALL				
		EUROCODE 3 (R = beliebig)	DS 804 (R = -1) (R = 0)		DIN 15018 (R = -1) (R = 0)	
		zulässige Nennspannungsamplituden σ_a N/mm ² für N = 2 · 10 ⁶				
1	durchgehende Doppelkehl-Halsnaht, E-Hand-Schweißung	Kat.112, Nr. 11 ± 56	K V, Nr. 1 ± 65 ± 49		K 1, Nr. 123 ± 75 ± 63	
2	durchgehende DHV-Halsnaht, E-Hand-Schweißung	Kat.112, Nr. 11 ± 56	K V, Nr. 1 ± 65 ± 49		K 0, Nr. 023 ± 84 ± 70	
3	DHV-Halsnaht im Bereich des Baustellenstoßes (E-Hand)	ersatzweise: Kat.112, Nr. 11 ± 56	K VI, Nr. 1 ± 52 ± 44		ersatzweise: K 0, Nr. 023 ± 84 ± 70	
4	Gurtstoß, E-Hand-Schweißung	Kat. 90, Nr. 19 ± 45	K V, Nr.2 ± 65 ± 49		K 1, Nr. 111 ± 75 ± 63	
5	unsymmetrischer, Gurtstoß E-Hand-Schweißung	ersatzweise: Kat. 90, Nr. 20 ± 45	ersatzweise: ¹⁾ K V, Nr. 3 ± 65 ± 49		ersatzweise: K 1, Nr. 111 ± 75 ± 63	
6	durchgehende Doppelkehl-Halsnaht, Automat.-Schweißung	Kat.125, Nr. 8 ± 63	ersatzweise: K V, Nr. 1 ± 65 ± 49		ersatzweise: K 1, Nr. 123 ± 75 ± 63	
7	durchgehende DHV-Halsnaht, Automat.-Schweißung	Kat.125, Nr. 8 ± 63	ersatzweise: K V, Nr. 1 ± 65 ± 49		ersatzweise: K 1, Nr. 123 ± 75 ± 63	

1) bei konservativer Auslegung der Kerbfallbeschreibung in DS 804 wäre der Übergang von einem einteiligen auf ein mehrteiliges Gurtblech im Gurtstoß auch der Kerbgruppe KVIII, Nr.2 zuzuordnen (R = -1: $\sigma_a = \pm 41$ N/mm²; R = 0: $\sigma_a = \pm 35$ N/mm²)

Keines der herangezogenen Regelwerke macht Aussagen zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren als Qualifizierungsmittel. So läßt z.B. DIN 15018 nicht nur die Art des Nachweises sondern auch die Bewertungsgruppe für die Nahtqualität offen.

Ein lückenloser Zusammenhang zwischen Ausführungsqualität und zulässigen Spannungen bei Schwingbeanspruchung ist erst in einem der zur Zeit gültigen Regelwerke enthalten /36, 37/.

5.3 Vergleich der Versuchsergebnisse mit zulässigen Spannungen aus Regelwerken

Eine notwendige Voraussetzung für diesen Vergleich ist die sinnvolle Zuordnung einer Kerbfallgruppe zu den in den Versuchsstücken vorliegenden konstruktiven und fertigungstechnischen Einzelheiten. Für bestimmte Einzelheiten waren genau passende Kerbfallbeschreibungen aber nicht immer und nicht durchgehend in allen herangezogenen Regelwerken zu finden. In einigen Fällen war somit lediglich eine plausible Zuordnung möglich (siehe Bild 5.2-1a...5.2-1g).

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit zulässigen Spannungen aus Regelwerken wurden nur die jeweils ersten auftretenden Schwingungsrisse je Nahtvariante und Versuch herangezogen, wobei im Hinblick auf spätere Schlußfolgerungen anzumerken ist, daß die Lebensdauerdifferenzen vom Sichtbarwerden des ersten Anrisses bis zum Abschalten eines Ermüdungsversuchs relativ klein waren (siehe Tabelle 5.1-1a...5.1-1c), die Lebensdauerreserven bis zum endgültigen Versagen mithin gering sind.

Die Vergleiche erfolgten anhand der Regelwerke DS 804 /2/, DIN 15018 /3/ und EUROCODE 3 /12/. Es wurde nur nach zwei Kerbfällen

- a) Stumpfstöße (Montagestöße) und
- b) Halsnähte

und dem Spannungsverhältnis $R = \sigma_u / \sigma_o$ während der Prüfung differenziert. Unterschiede infolge der Nahtform (Kehlnaht/DHV-Naht) und der Fertigungsbedingungen (Werkstattschweißung/Baustellenschweißung, Schweißpositionen, Nahtvorbereitung und Schweißverfahren) wurden in weitergehenden Analysen

(siehe Abschnitt 6) untersucht. In diese Analysen wurden dann jeweils alle während eines Versuches aufgetretenden Schwingungsrisse einbezogen.

Die in den folgenden Bildern eingetragenen Versuchspunkte stellen jeweils die zu einem Anriß "i" gehörende örtliche Nennspannungsamplitude $\sigma_{a\ddot{o},i}$ über der Schwingenspielzahl $N_{A,i}$ beim ersten Sichtbarwerden dieses Risses dar. Dabei wurde, wie unter 4.2 beschrieben, unabhängig von der tatsächlichen Lage der Bruchausgangsstelle relativ zur neutralen Faser des Biegeträgers, nach folgendem einheitlichen Schema verfahren:

- Schwingungsrisse in Gurtstößen wurde als maximale Nennspannung die Biegerandspannung σ_{aR} am äußeren Rand des (dünneren) Gurtblechs zugeordnet.
- Schwingungsrisse in Halsnähten wurde als maximale Nennspannung die Biegespannung σ_a am inneren Rand des (dünneren) Gurtblechs (siehe Bild 4.2-2) zugeordnet.
- Schwingungsrisse in Stegstößen wurden wie Schwingungsrisse in Halsnähten behandelt.

5.3.1 Stumpfstöße (E-Hand-Schweißung)

Die im Bereich der Stumpfstöße bei $R = -1$ erzeugten jeweils ersten Schwingungsrisse sind in Bild 5.3-1a dargestellt. Bild 5.3-1b zeigt die Lage der Versuchspunkte in bezug zum passenden Kerbfall nach DIN 15018, Bild 5.3-1c den Vergleich mit DS 804 und Bild 5.3-1d den Vergleich mit den nach EUROCODE 3 zulässigen Werten. Danach gewährleistet nur der R-Wert-unabhängige EUROCODE eine ausreichende Sicherheit von Stumpfstoßverbindungen in großen Bauteilen gegen Schwingungsbruch, wenn die jeweils zulässigen Spannungen für eine Wechselbeanspruchung zugrunde gelegt werden.

Große geschweißte und ungeglühte Bauteile haben hohe Schweiß eigenspannungen, die ungünstigstenfalls an kritischen Bereichen der Schweißverbindung in Form von Zugeigenspannungen vorliegen können. Das Zusammenwirken derartiger Eigenspannungen mit den Lastspannungsamplituden hat zur Folge, daß auch bei Wechselbelastungen "wirksame" Schwingbeanspruchungen mit $R \geq 0$ vorliegen. Die Bilder 5.3-1e u. 5.3-1f zeigen einen Vergleich der bei einem Lastspannungsverhältnis $R = -1$ erzielten Ergebnisse mit den zulässigen Beanspruchun-

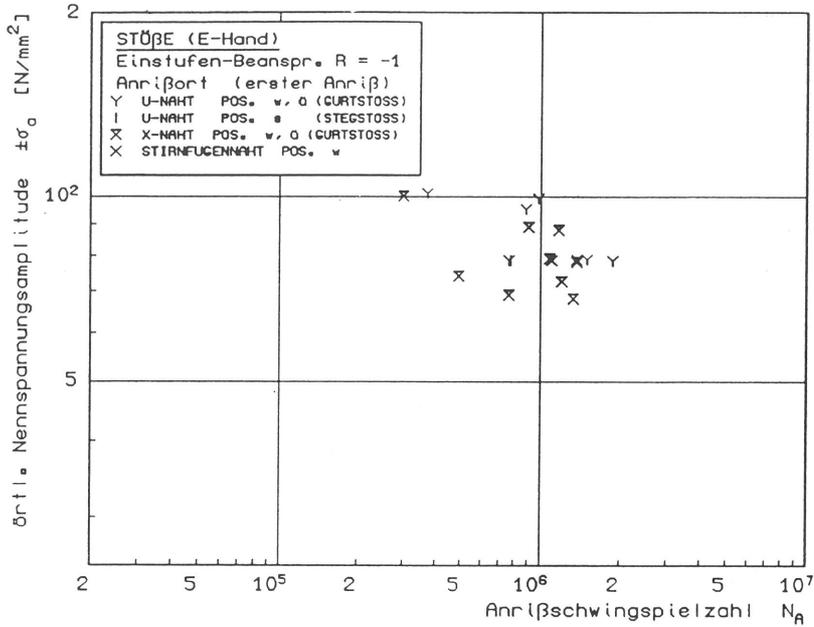


Bild 5.3-1a
Erste Anrisse in Stumpfstößen
(E-Hand-Schweißung) bei
Wechselbeanspruchung

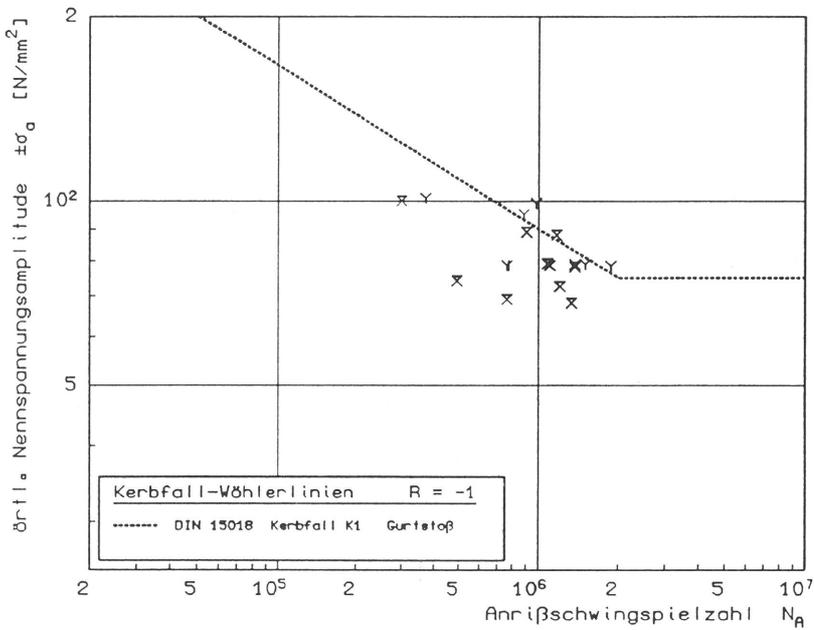


Bild 5.3-1b
Vergleich der Versuchswerte
(Stöße) bei $R = -1$
mit zulässigen Spannungen
nach DIN 15018 für $R = -1$

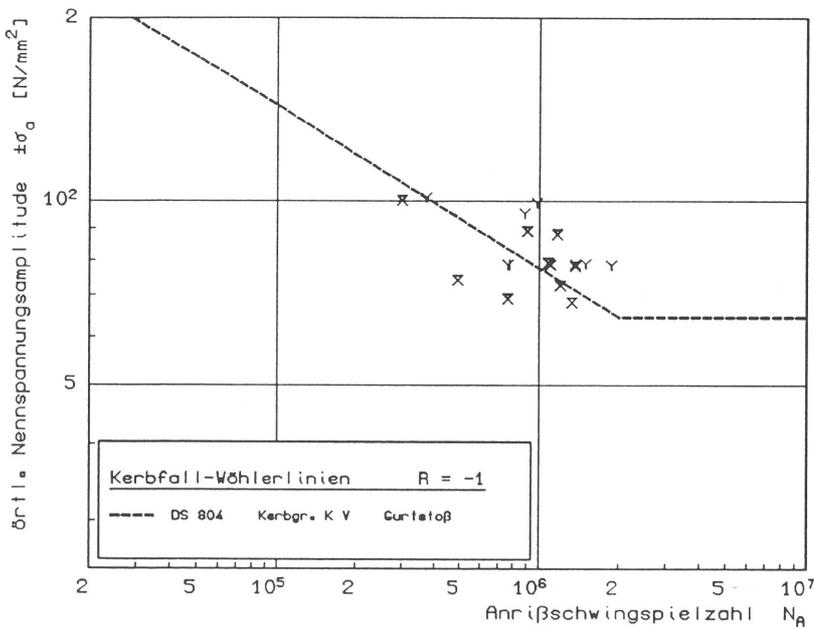


Bild 5.3-1c
Vergleich der Versuchswerte
(Stöße) bei $R = -1$
mit zulässigen Spannungen nach
DS 804 für $R = -1$

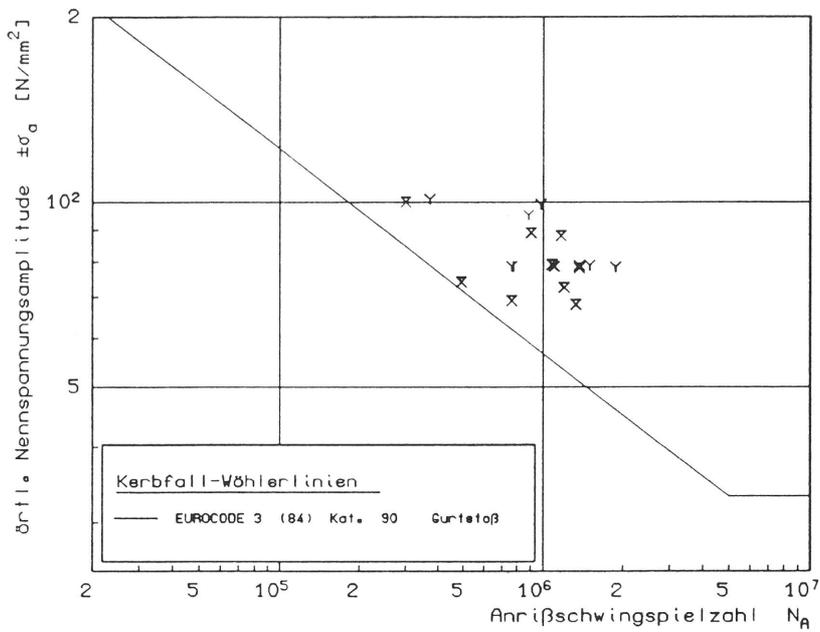


Bild 5.3-1d
 Vergleich der Versuchswerte
 (Stöße) bei $R = -1$
 mit zulässigen Spannungen nach
 EUROCODE 3

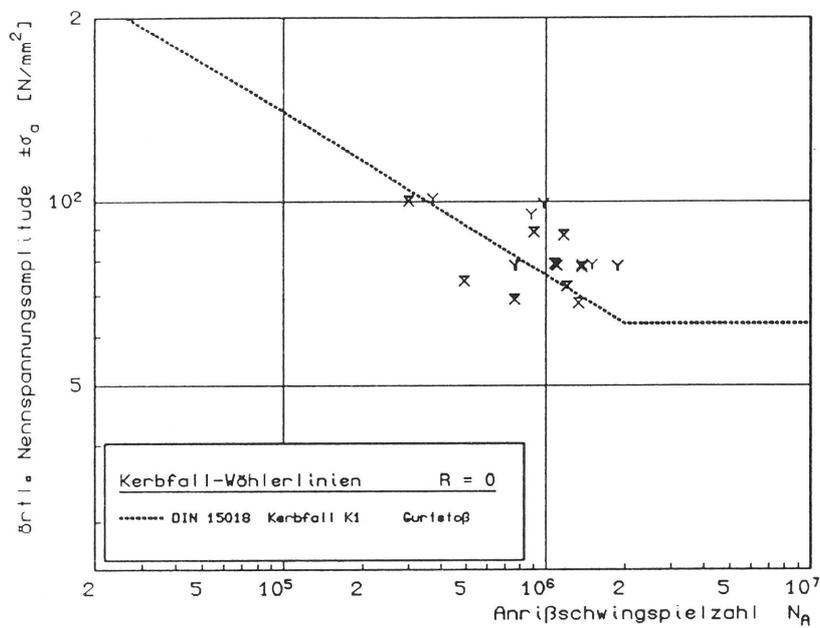


Bild 5.3-1e
 Vergleich der Versuchswerte
 (Stöße) bei $R = -1$
 mit zulässigen Spannungen nach
 DIN 15018 für $R = 0$

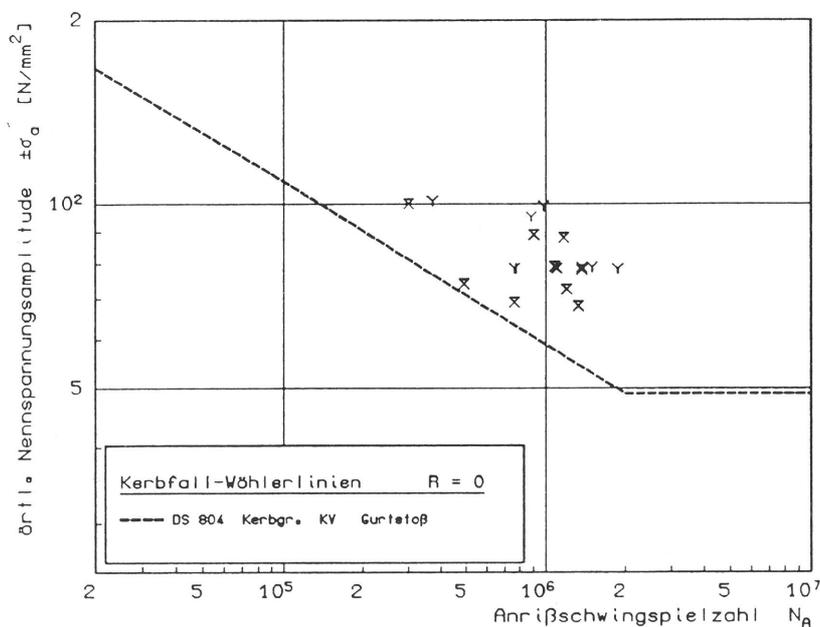


Bild 5.3-1f
 Vergleich der Versuchswerte
 (Stöße) bei $R = -1$
 mit zulässigen Spannungen
 nach DS 804 für $R = 0$

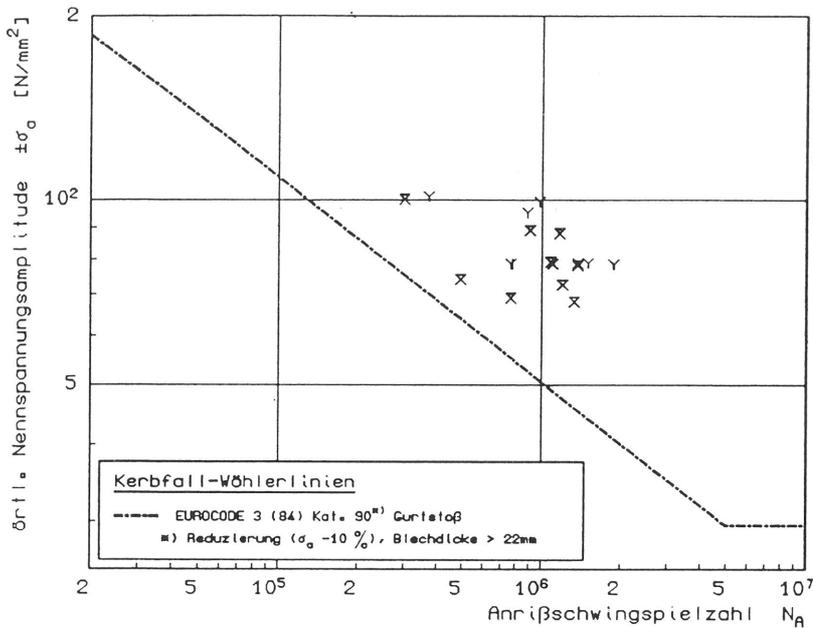


Bild 5.3-1g
 Vergleich der Versuchswerte
 (Stöße) bei R = -1
 mit zulässigen Spannungen
 nach EUROCODE 3 für
 Blechdicken > 22 mm

gen für R = 0 nach DIN 15018 bzw. DS 804. Während bei dieser Betrachtungsweise die Kranbahnnorm DIN 15018 weiterhin nur eine rechnerische Sicherheit γ_R von etwa 1,0 gegen 50% Bruchwahrscheinlichkeit erwarten läßt, sind mit der DS 804 ebenso wie mit dem R-Wert-unabhängigen EUROCODE 3 ausreichend sichere Bemessungen möglich.

Eine weitere Erhöhung des Sicherheitsabstandes liegt beim EUROCODE 3 vor, wenn dort noch die vorgesehene blechdickenabhängige Reduzierung der zulässigen Spannungsamplituden (bei Blechdicke >22 mm) beachtet wird (Bild 5.3-1g). Gemäß /12.1/ berechnet sich die reduzierte Spannung $\Delta\sigma_R$ zu

$$\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_{R22} \cdot \left(\frac{22}{t_0}\right)^{0,25} \quad \text{mit} \quad (5.3-1)$$

$\Delta\sigma_R$: reduzierte zulässige Spannung für Schweißverbindungen mit Blechdicken t_0

$\Delta\sigma_{22}$: zulässige Spannung entsprechend Kerbfall für Schweißverbindungen mit maximal 22 mm Blechdicke

Die o.a. Spannungskorrektur ist in /12.1/ zwar auf die Auslegung der Schweißverbindungen an Rohrknoten u.ä. nach dem Hot-spot-Konzept beschränkt, eine sinngemäße Anwendung dieser Vorschrift auch auf die hier vorliegenden Gurtstöße dürfte aber unumstritten sein. Bei einer Gurtblechdicke von 35 mm ergeben sich im vorliegenden Fall um rd. 10% reduzierte zulässige Spannungen.

Die entsprechenden Ergebnisse für die Schwellversuche ($R = 0,05$) sind in Bild 5.3-2a dargestellt. Der Vergleich mit den zulässigen Spannungsamplituden nach DIN 15018 (Bild 5.3-2b) zeigt, daß danach eine sichere Bemessung nicht möglich ist. Dagegen zeigen die Bilder 5.3-2c...5.3-2e, daß bei einer Bemessung nach DS 804 und EUROCODE 3 ausreichende Sicherheitsabstände vorhanden sind, besonders auch wenn man nach EUROCODE 3 wiederum den blechdickenabhängigen Abschlag von 10 % berücksichtigt.

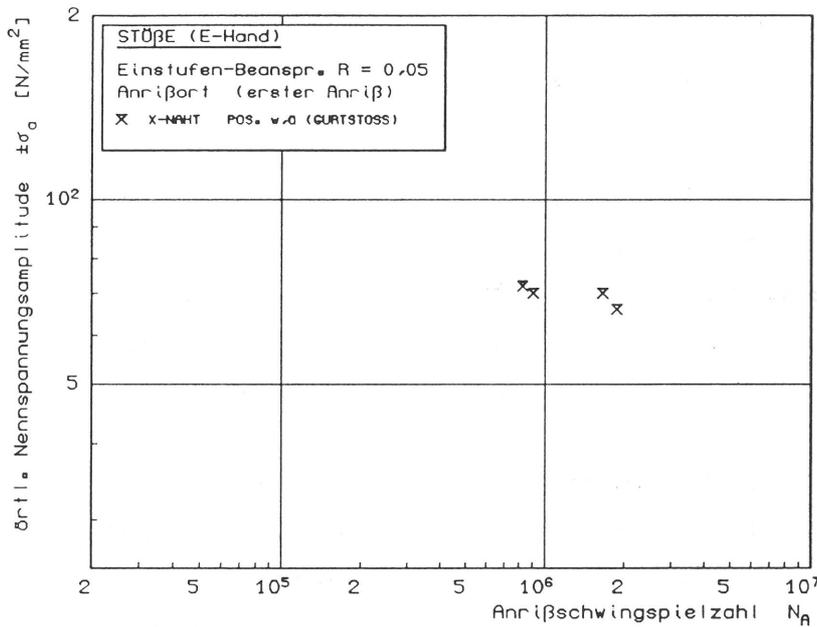


Bild 5.3-2a
 Erste Anrisse in Stumpfstoßen (E-Hand-Schweißung) bei Schwellbeanspruchung ($R = 0$)

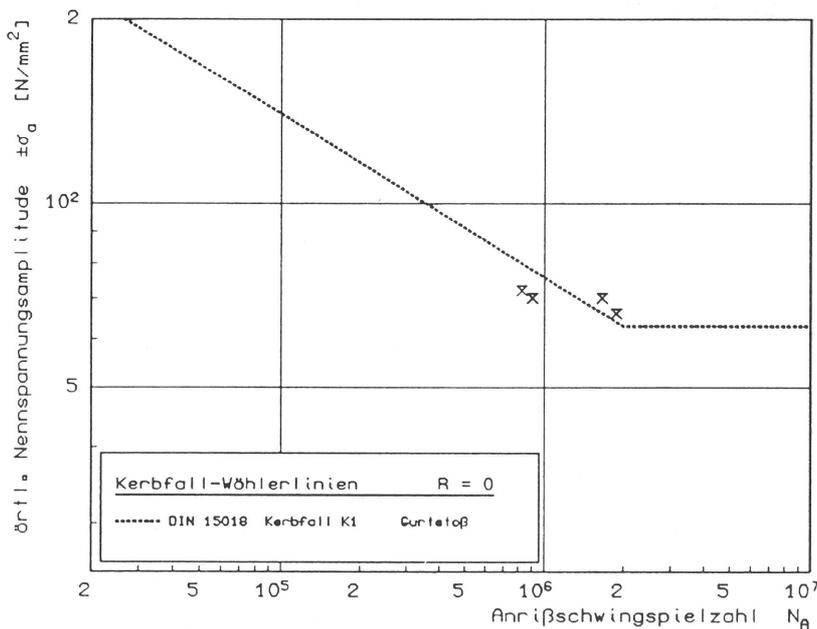


Bild 5.3-2b
 Vergleich der Versuchswerte (Stöße) bei $R = 0$ mit zulässigen Spannungen nach DIN 15018 für $R = 0$

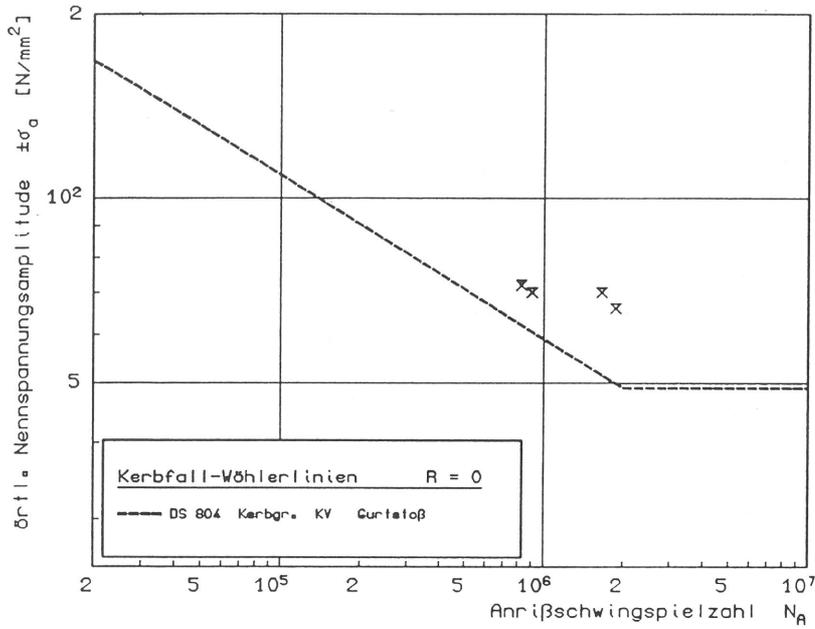


Bild 5.3-2c
 Vergleich der Versuchswerte
 (Stöße) bei $R = 0$
 mit zulässigen Spannungen nach
 DS 804 für $R = 0$

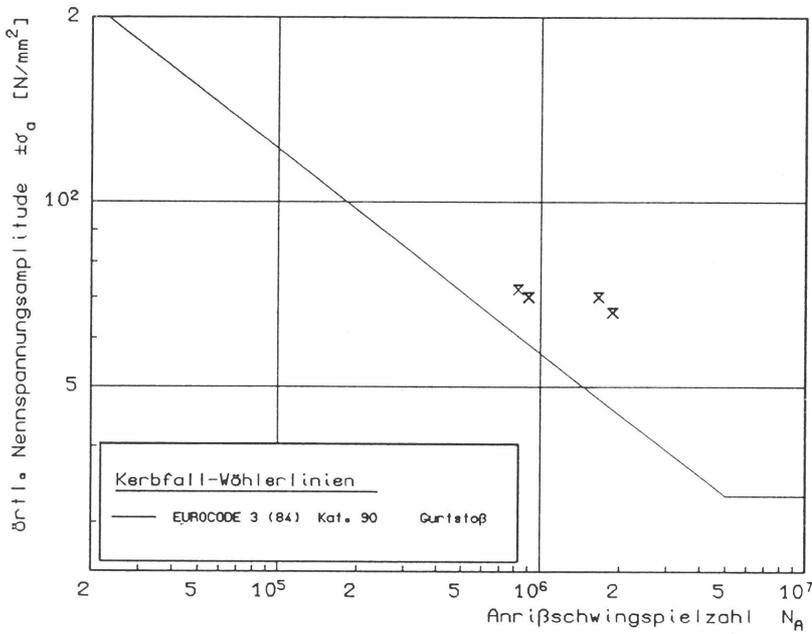


Bild 5.3-2d
 Vergleich der Versuchswerte
 (Stöße) bei $R = 0$
 mit zulässigen Spannungen nach
 EUROCODE 3

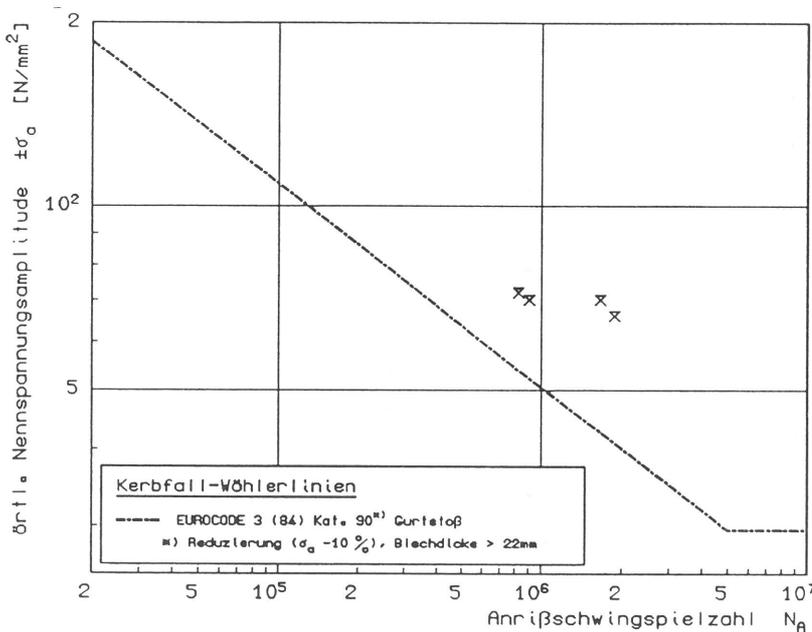


Bild 5.3-2e
 Vergleich der Versuchswerte
 (Stöße) bei $R = -1$
 mit zulässigen Spannungen
 nach EUROCODE 3 für
 Blechdicken > 22 mm

5.3.2 Halsnähte (E-Hand-Schweißung)

Die bei den Wechselversuchen ($R = -1$) in den Halsnähten aufgetretenen Schwingungsbrüche sind in Bild 5.3-3a zusammengestellt. Der Vergleich mit den zulässigen Spannungsamplituden nach DIN 15018 (Bild 5.3-3b), DS 804 (Bild 5.3-3c) zeigt, daß diese Regelwerke die Schwingrißgefährdung von Halsnähten in großen I-Trägern unterschätzen, wenn die zulässigen Spannungen für $R = -1$ zugrunde gelegt werden. Zu einer ähnlichen Unterschätzung führt auch der R-unabhängige EUROCODE 3 (Bild 5.3-3d).

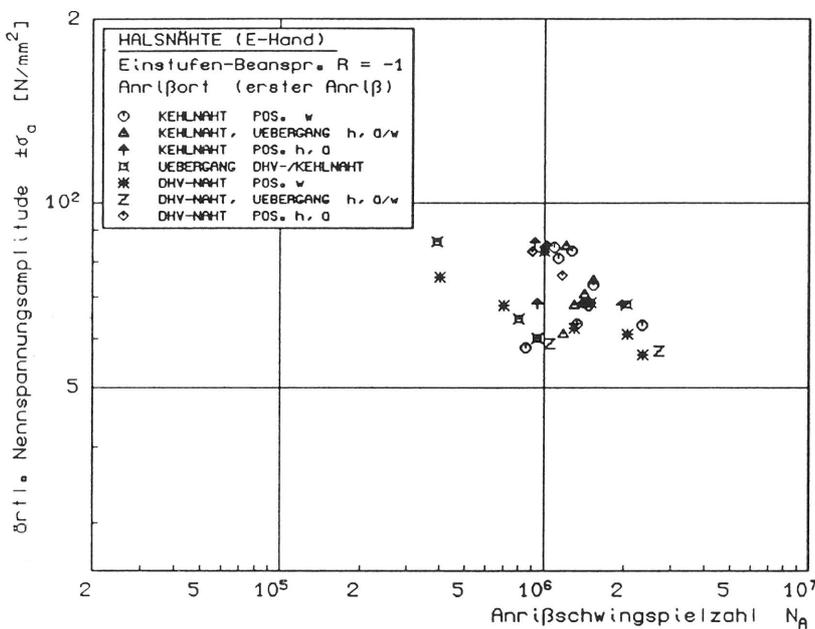


Bild 5.3-3a
 Erste Anrisse in Halsnähten (E-Hand-Schweißung) bei Wechselbeanspruchung ($R = -1$)

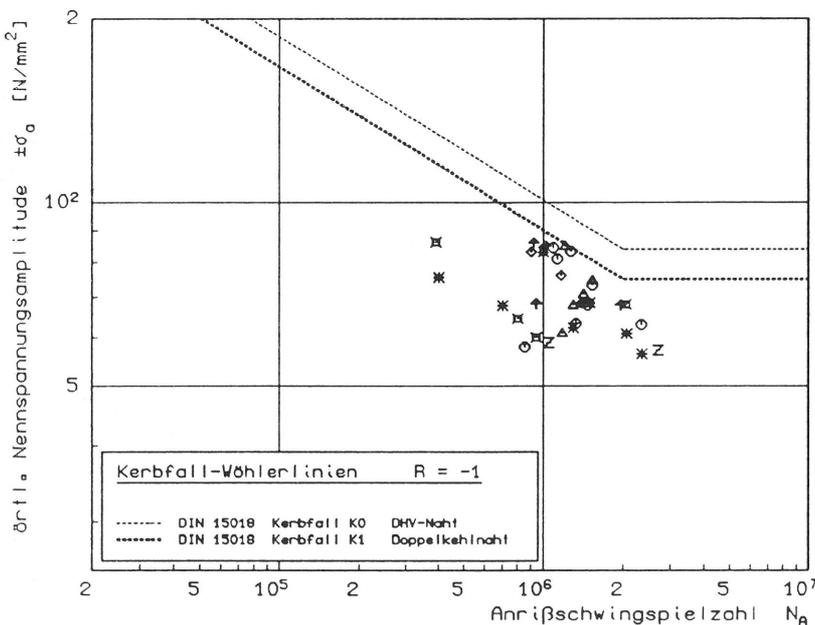


Bild 5.3-3b
 Vergleich der Versuchswerte (Halsnähte) bei $R = -1$ mit zulässigen Spannungen nach DIN 15018 für $R = -1$

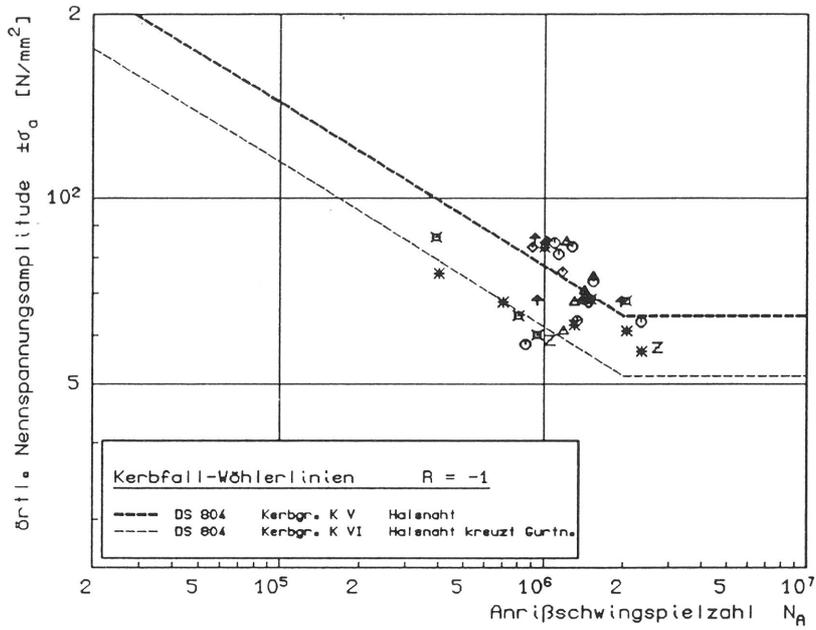


Bild 5.3-3c
 Vergleich der Versuchswerte (Halsnähte) bei $R = -1$ mit zulässigen Spannungen nach DS 804 für $R = -1$

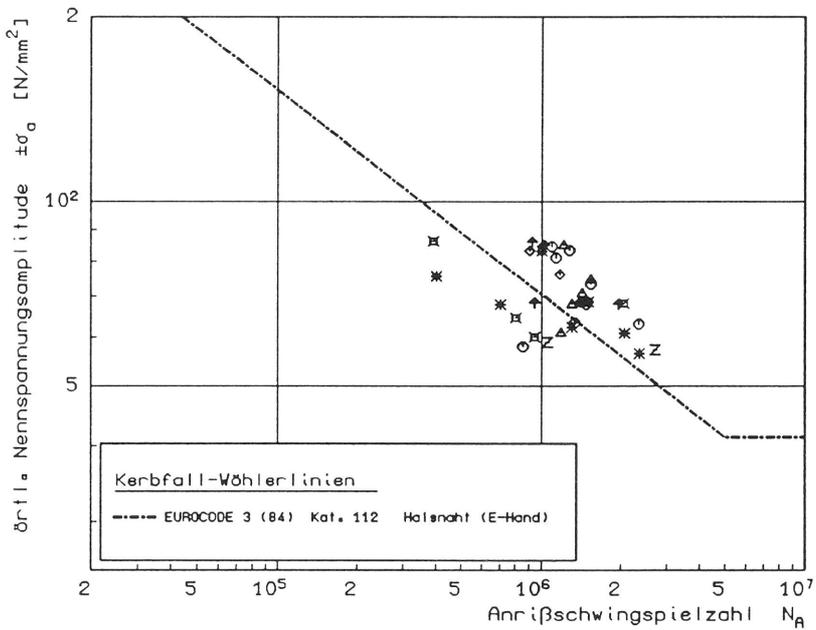


Bild 5.3-3d
 Vergleich der Versuchswerte (Halsnähte) bei $R = -1$ mit zulässigen Spannungen nach EUROCODE 3

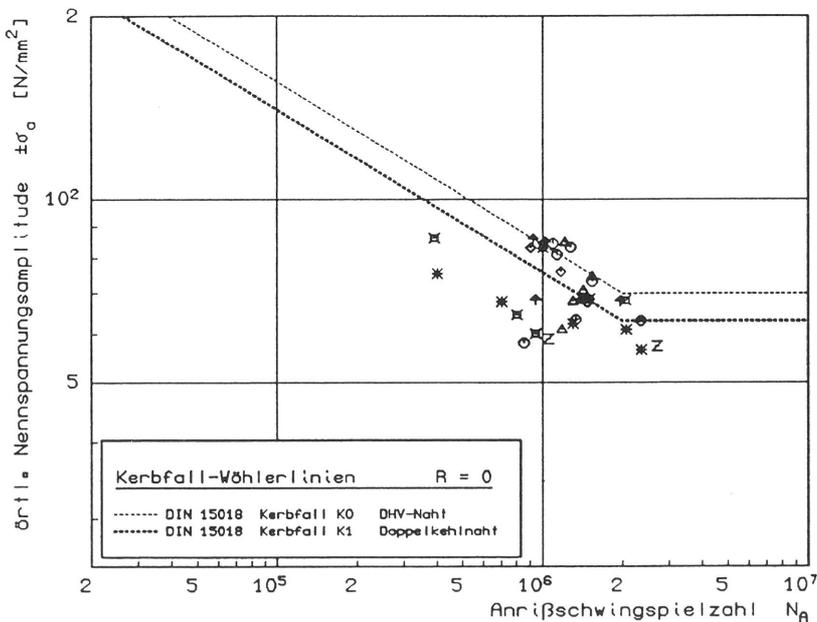


Bild 5.3-3e
 Vergleich der Versuchswerte (Halsnähte) bei $R = -1$ mit zulässigen Spannungen nach DIN 15018 für $R = 0$

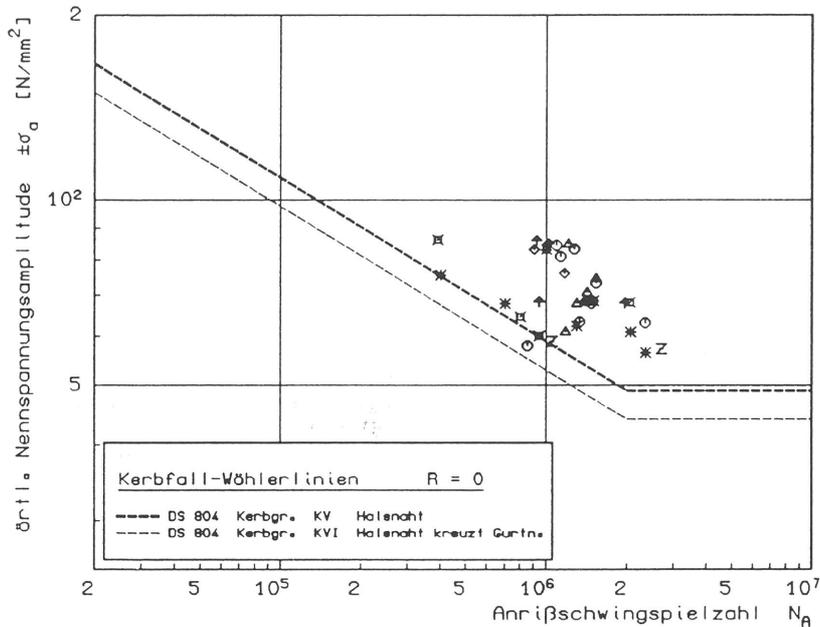


Bild 5.3-3f
Vergleich der Versuchswerte (Halsnähte) bei $R = -1$ mit zulässigen Spannungen nach DS 804 für $R = 0$

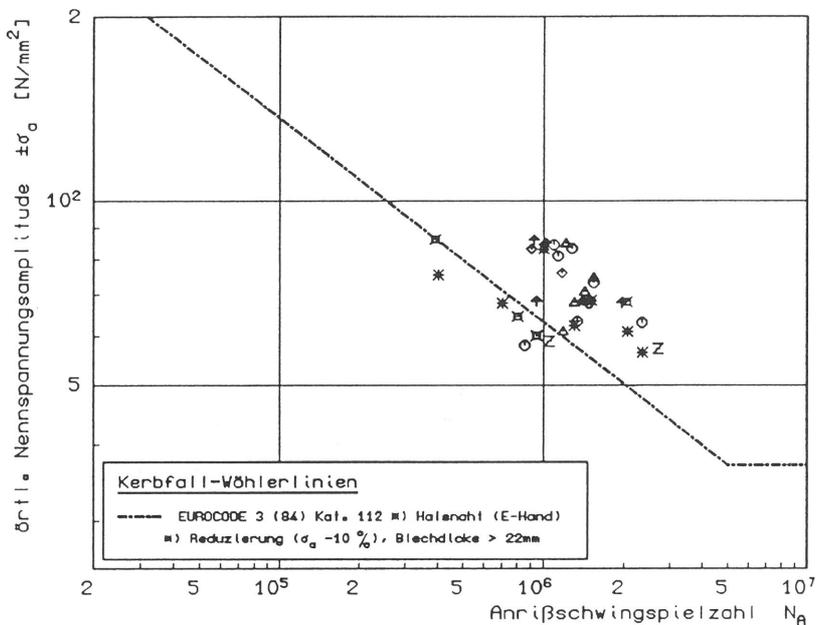


Bild 5.3-3g
Vergleich der Versuchswerte (Halsnähte) bei $R = -1$ mit zulässigen Spannungen nach EUROCODE 3 für Blechdicken > 22 mm

Legt man, ähnlich wie bei den Stumpfstoßen, wieder eine "wirksame" Schwingbeanspruchung mit $R \geq 0$ als Folge einer angenommenen Überlagerung der Lastspannungsamplituden mit hohen Zugeigenspannungen für den Vergleich zugrunde, so ist mit DIN 15018 (Bild 5.3-3e) auch dann keine sichere Bemessung möglich. Mit DS 804 (Bild 5.3-3f) wird unter diesen Voraussetzungen die Schwingrißgefährdung der Halsnähte realistischer eingeschätzt, jedoch sind in einigen Fällen die ertragbaren Spannungsamplituden ungefähr gleich den zulässigen. Der R-Wert-unabhängige EUROCODE 3 (Bild 5.3-3g) ermöglicht auch bei einer Berücksichtigung einer blechdickenabhängigen Absenkung der zulässigen Spannungen keine sichere Bemessung der Halsnähte.

Ob die blechdickenabhängige Spannungskorrektur auf längsbeanspruchte Halsnähte überhaupt anzuwenden ist, und welche Blechdicken ggf. zugrunde zu legen sind, läßt sich aus dem entsprechenden Abschnitt in /12.1/ nicht ableiten, weil er keine Begründungen enthält. Unveröffentlichte Untersuchungen, die zeigen, daß der Blechdickeneinfluß rein spannungsmechanische Ursachen hat ("die Spannungskonzentration am Nahtübergang nimmt bei konstant gehaltenem Übergangsradius mit zunehmender Blechdicke zu" /28/), legen den Schluß nahe, daß die o.a. Spannungskorrektur für die längsbeanspruchten Halsnähte in den Versuchsträgern nicht anwendbar ist. Dessen ungeachtet wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit angenommen, die 10prozentige Reduzierung der Span-

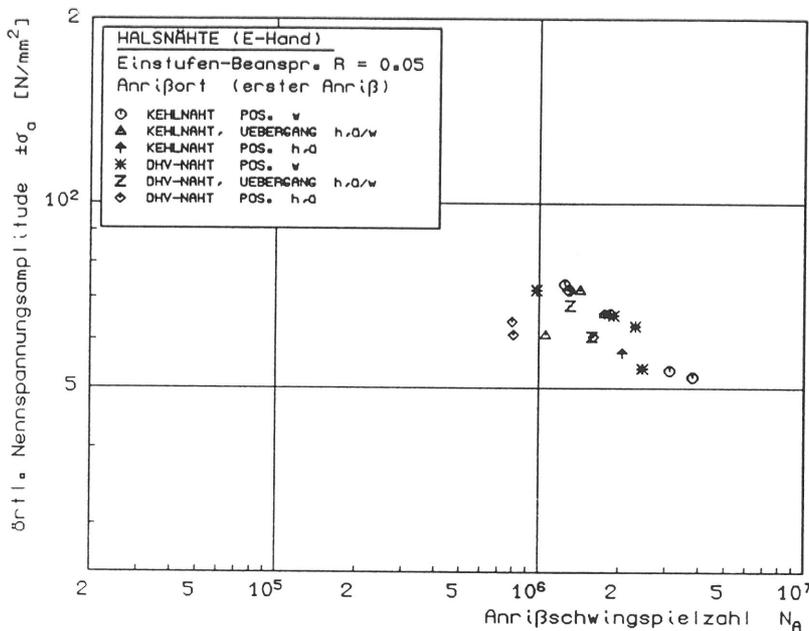


Bild 5.3.-4a
 Erste Anrisse in Halsnähten (E-Hand-Schweißung) bei Schwellbeanspruchung (R = 0)

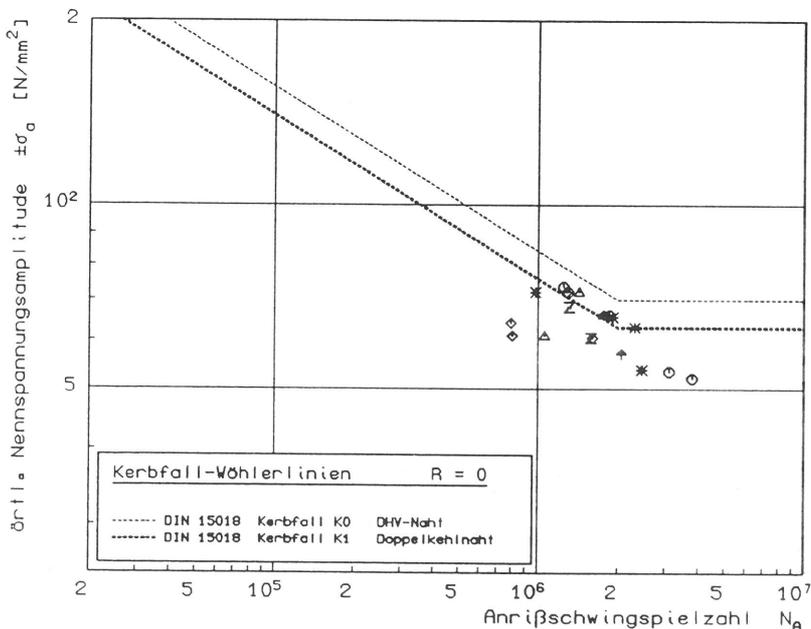


Bild 5.3-4b
 Vergleich der Versuchswerte (Halsnähte) bei R = 0 mit zulässigen Spannungen nach DIN 15018 für R = 0

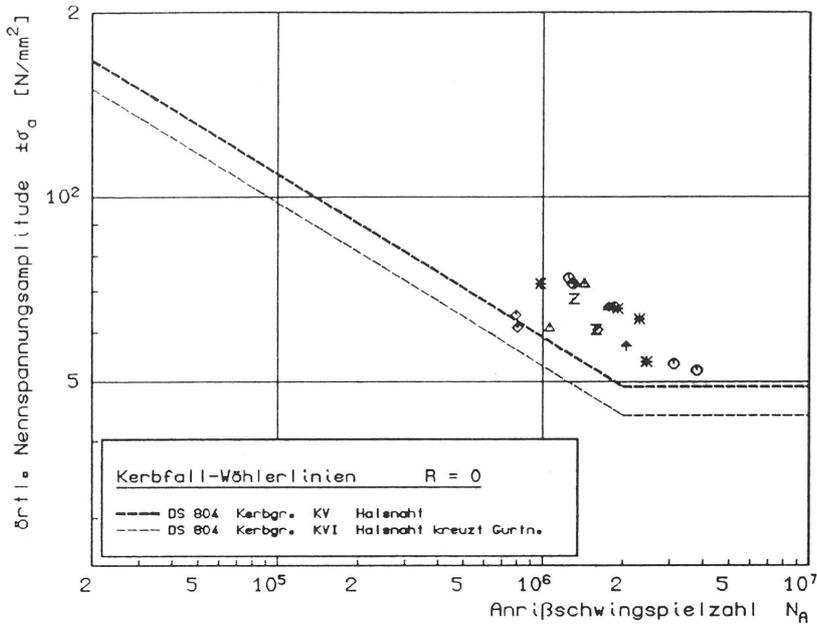


Bild 5.3-4c
 Vergleich der Versuchswerte
 (Halsnähte) bei $R = 0$ mit
 zulässigen Spannungen nach
 DS 804 für $R = 0$

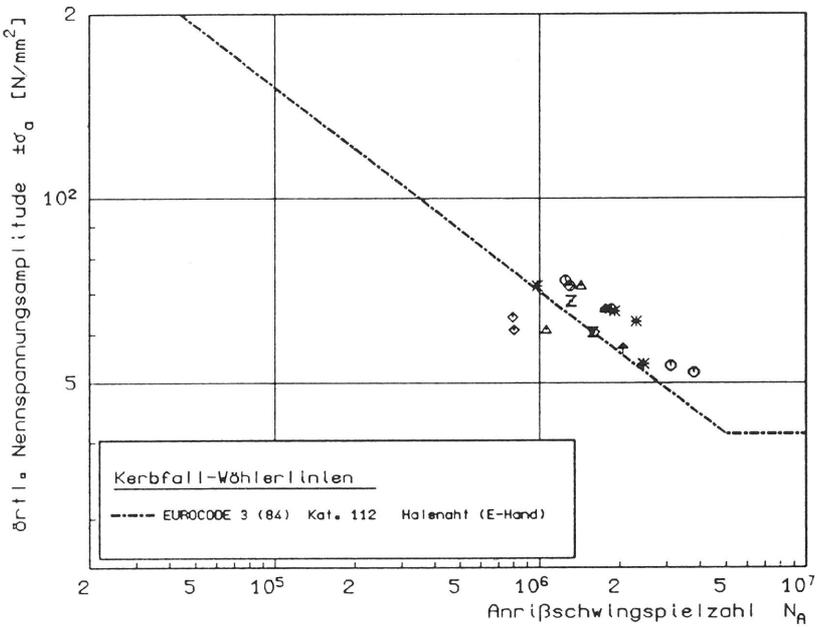


Bild 5.3-4d
 Vergleich der Versuchswerte
 (Halsnähte) bei $R = 0$ mit
 zulässigen Spannungen nach
 EUROCODE 3

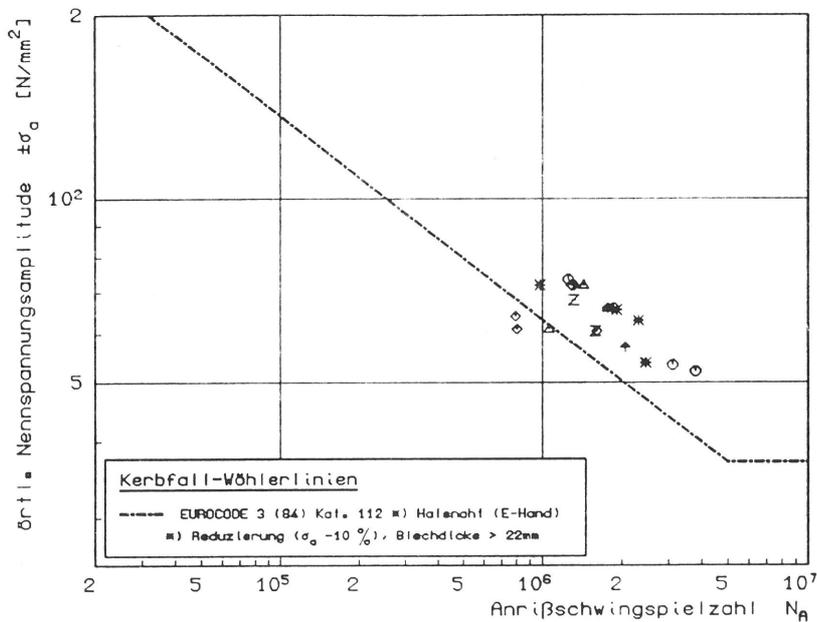


Bild 5.3-4e
 Vergleich der Versuchswerte
 (Halsnähte) bei $R = 0$ mit
 zulässigen Spannungen nach
 EUROCODE 3 für Blechdicken
 > 22 mm

des EUROCODE zur Berücksichtigung der höheren Gurtblechdicke sei auch für die Halsnähte zutreffend.

Die Ergebnisse für die schwellend ($R = 0,05$) beanspruchten Halsnähte sind in den Bildern 5.3-4a...5.3-4e zusammengestellt. Ein Vergleich der Versuchspunkte im Wöhlerschaubild mit den Regelwerksspannungen zeigt, daß mit DIN 15018 keine sichere Bemessung möglich ist (Bild 5.3-4b). Bei Anwendung des EUROCODE 3 liegen einige ertragbare Spannungen unter den zulässigen, und zwar auch nach blechdickenabhängiger Absenkung der zulässigen Spannungen (Bilder 5.3-4e). Die Bemessung längsbeanspruchter Halsnähte auf der Basis dieses Regelwerks führt zu relativ hohen Bruchwahrscheinlichkeiten (36%, siehe 5.3.4). Lediglich DS 804 (Bild 5.3-4c) schätzt die Schwingungsgefährdung der Halsnähte genügend realistisch ein.

5.3.3 Halsnähte (Automaten-Schweißung)

Aus den Wechselversuchen ($R = -1$) mit nur acht Trägern, bei denen die Halsnähte durch Automaten-Schweißung (UP) hergestellt worden waren, wurden insgesamt nur 6 erste Schwinganrisse gewonnen, die ihren Ausgang eindeutig in der UP-Schweißung hatten, und zwar zwei an Doppelkehlnähten und vier an DHV-Nähten (Bild 5.3-5a). In den Bildern 5.3-5b...5.3-5d sind die Versuchswerte den zulässigen Beanspruchungen für $R = -1$ aus DIN 15018 /3/ und DS 804 /2/ sowie den R-unabhängigen Spannungen aus dem EUROCODE 3 /12/ gegenübergestellt. Danach wird die Schwingfestigkeit von UP-geschweißten Halsnähten in keinem der drei Regelwerke sicher eingeschätzt.

Wenn zur Berücksichtigung der Schweißeigenspannungen wieder die geringeren zulässigen Spannungen für $R = 0$ aus den Regelwerken herangezogen werden, dann wird die Schwingfestigkeit Automaten-geschweißter Halsnähte in großen Trägern in DS 804 ausreichend sicher abgeschätzt (Bild 5.3-5f), in DIN 15018 dagegen nicht (Bild 5.3-5e). Verwendet man im EUROCODE die blechdickenabhängigen reduzierten Spannungen (Bild 5.3-5g), so wird die Schwingfestigkeit der UP-geschweißten Halsnähte nur dann sicher eingeschätzt, wenn man die Wöhlerlinie für E-Hand-geschweißte Halsnähte zugrunde legt.

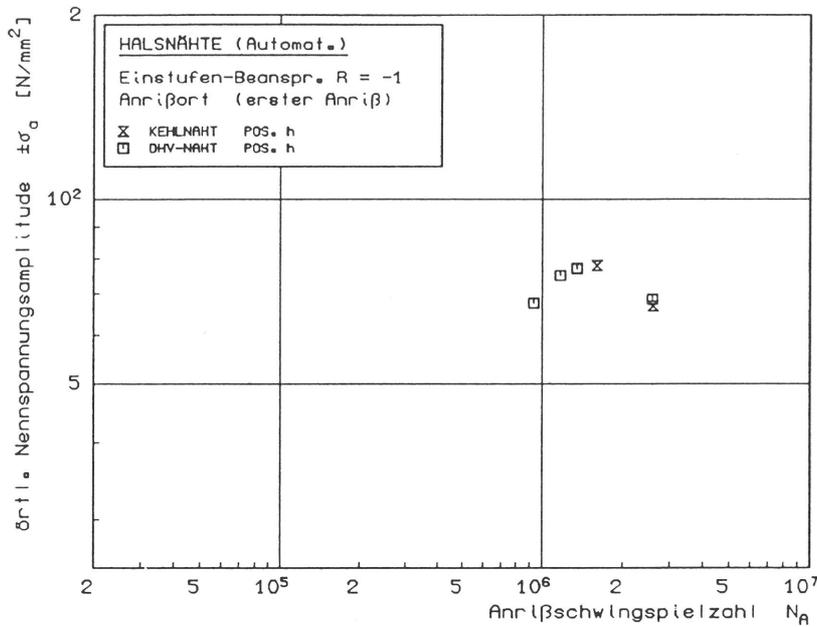


Bild 5.3-5a
Erste Anrisse in Halsnähten
(UP Automaten-Schweißung)
bei Wechselbeanspruchung
(R = -1)

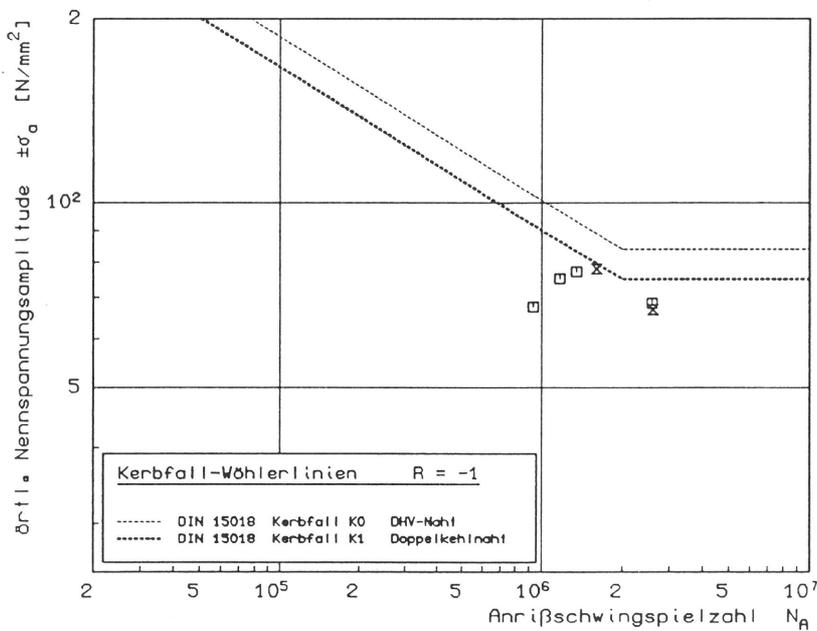


Bild 5.3-5b
Vergleich der Versuchswerte
(UP Halsnähte) bei R = -1
mit zulässigen Spannungen
nach DIN 15018 für R = -1

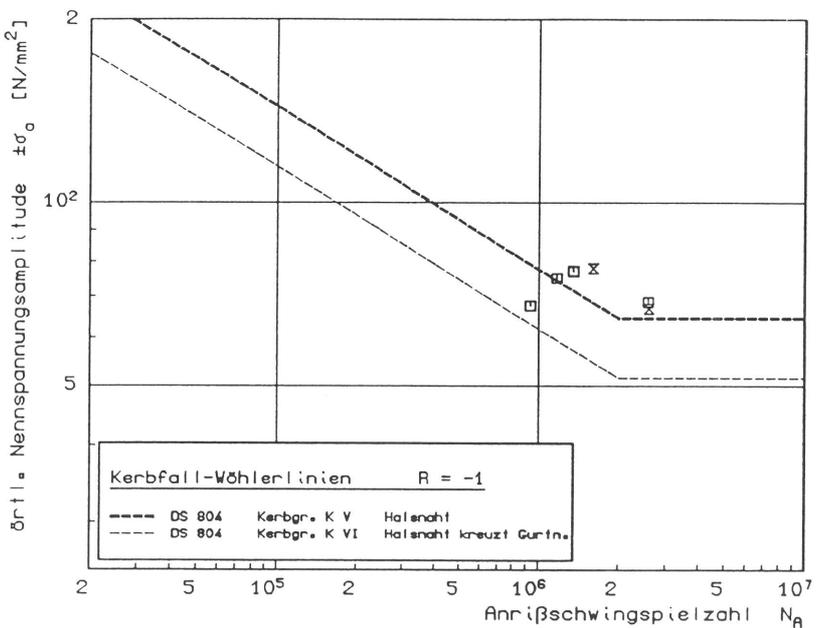


Bild 5.3-5c
Vergleich der Versuchswerte
(UP Halsnähte) bei R = -1 mit
zulässigen Spannungen nach
DS 804 für R = -1

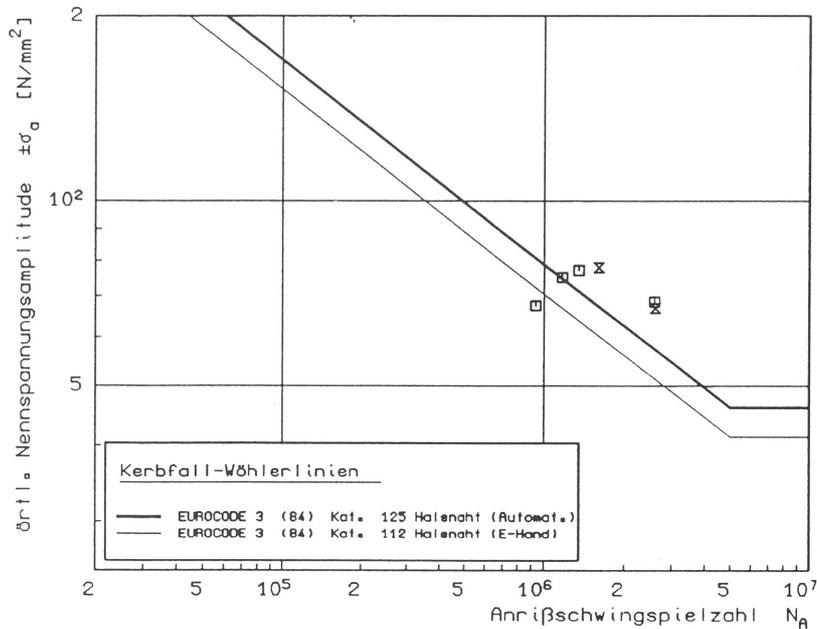


Bild 5.3-5d
 Vergleich der Versuchswerte
 (UP Halsnähte) bei $R = -1$ mit
 zulässigen Spannungen nach
 EUROCODE 3

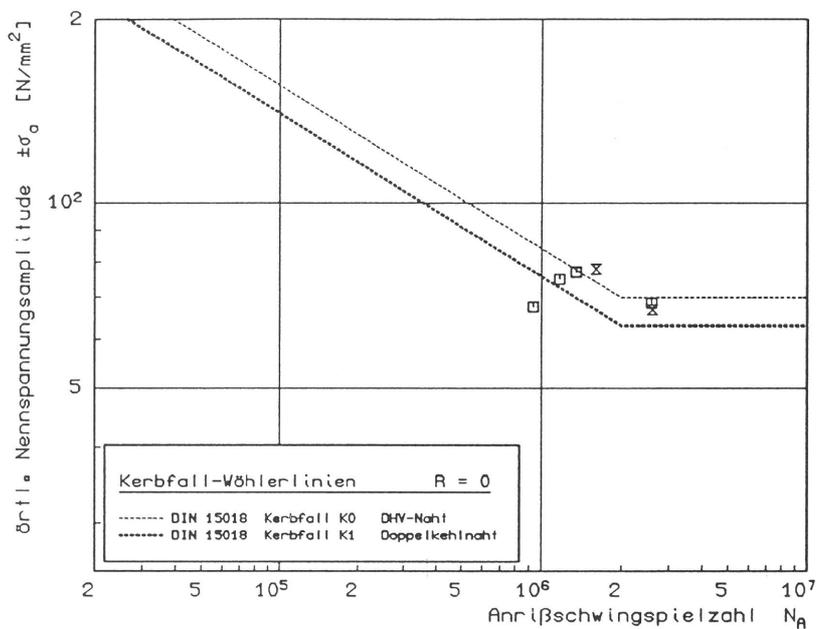


Bild 5.3-5e
 Vergleich der Versuchswerte
 (UP Halsnähte) bei $R = -1$ mit
 zulässigen Spannungen nach
 DIN 15018 für $R = 0$

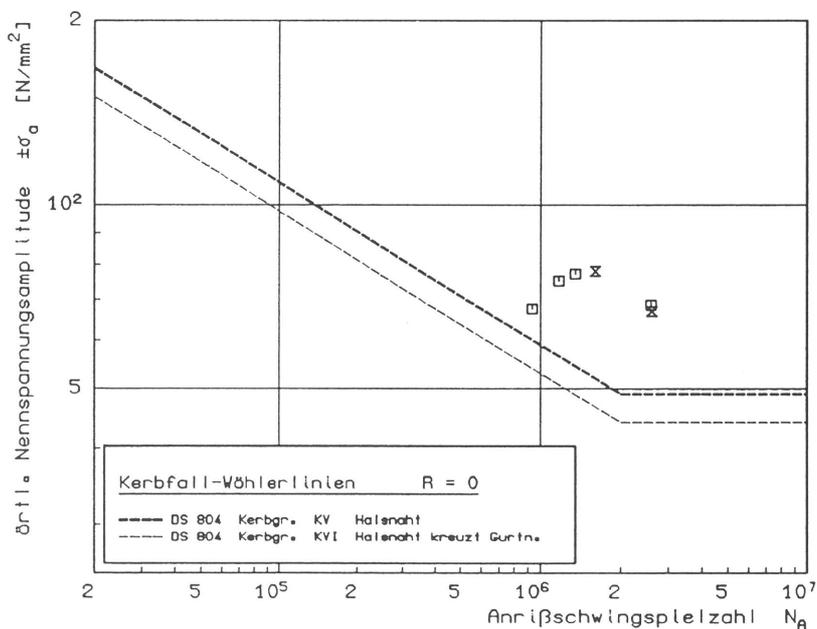


Bild 5.3-5f
 Vergleich der Versuchswerte
 (UP Halsnähte) bei $R = -1$ mit
 zulässigen Spannungen nach
 DS 804 für $R = 0$

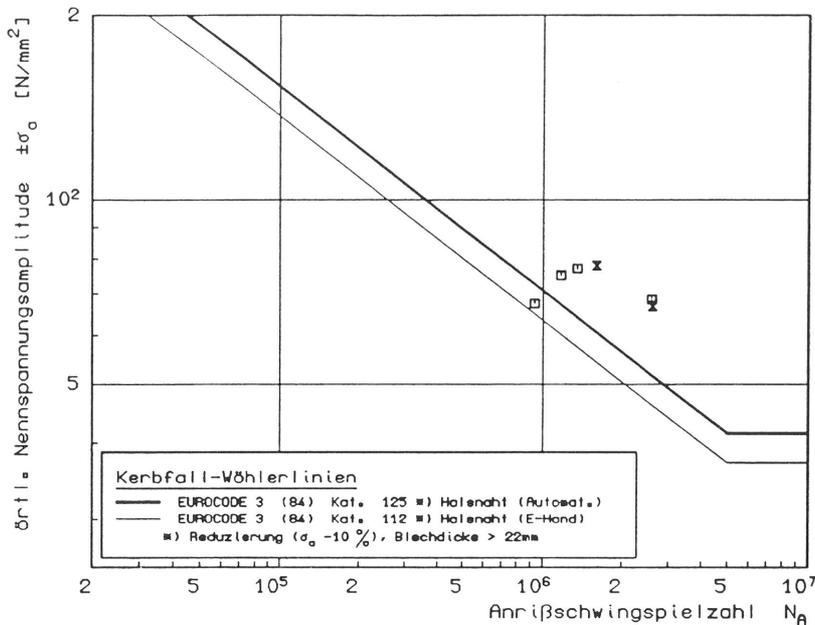


Bild 5.3-5g
Vergleich der Versuchswerte
(UP Halsnähte) bei $R = -1$ mit
zulässigen Spannungen nach
EUROCODE 3 für Blechdicken
> 22 mm

Anmerkung:

Der weit links liegende Punkt in den Bildern 5.3-5a...5.3-5g entstammt aus einer E-Hand-Ausbesserung im Bereich der Automaten-geschweißten DHV-Naht. Da die Fertigungsprotokolle belegen, daß unbeabsichtigte Unterbrechungen des Schweißprozesses praktisch nicht vermeidbar waren, muß mit dem Auftreten derartiger Fehler in der Praxis wohl immer gerechnet werden, es sei denn, man verhindert dies durch besondere Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Fertigung.

Unter der zuletzt genannten Voraussetzung könnte der die E-Hand-Ausbesserung repräsentierende Versuchspunkt im Datenfeld eliminiert werden. Dann wäre die im EUROCODE 3 vorgesehene Kerbfalleinstufung der Automaten-geschweißten Halsnähte (Kategorie 125) als zutreffend anzusehen. Die statistische Absicherung dieses Befundes ist wegen des geringen Stichprobenumfangs (nunmehr nur noch 5 Versuchspunkte bzw. Anrisse) jedoch noch unzureichend.

5.3.4 Spezielle Analyse der E-Hand-geschweißten Halsnähte

Da die Versuchspunkte bei den Halsnähten teilweise unterhalb der nach den Regelwerken zulässigen Wöhlerlinien lagen, wurden diese Versuchsergebnisse nachträglich gesondert ausgewertet. Hierbei wurden, wie in Bild 5.3-6 dargestellt, alle σ_{ai} -Werte mit der Wöhlerlinienneigung k des jeweils herangezogenen Regelwerks auf bezogene Werte $\sigma_{ai \text{ Bezug}}$ bei einer einheitlichen Schwingspielzahl $N_{A \text{ Bezug}} = 2 \cdot 10^6$ um-

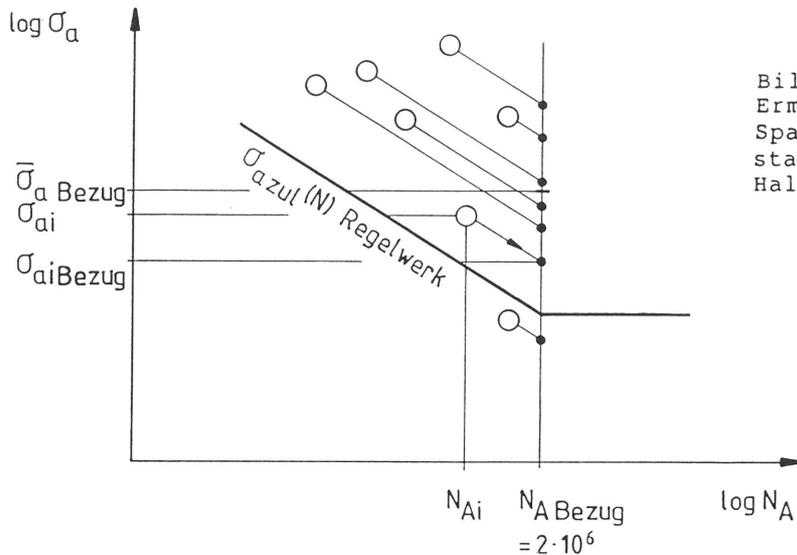


Bild 5.3-6
Ermittlung der bezogenen Spannungen für eine spezielle statistische Analyse der Halsnähte

gerechnet. Unter der Annahme, die so gewonnenen bezogenen Spannungen $\sigma_{ai \text{ Bezug}}$ seien logarithmisch-normalverteilt, wurde aus den Logarithmen dieser Werte der Mittelwert $\sigma_{a \text{ Bezug}}$ ermittelt, der als Bezugsbasis für die weitere statistische Auswertung diente.

Die Spannungsquotienten $\sigma_{ai \text{ Bezug}} / \bar{\sigma}_{a \text{ Bezug}}$ für die Bezugsschwingungszahl $N_{A \text{ Bezug}} = 2 \cdot 10^6$ wurden im Gauß'schen Summenhäufigkeitsnetz aufgetragen und die Ausgleichsgrade durch diese Punkte auf die Linie der resultierenden Bruchwahrscheinlichkeit (siehe Tabelle 5.3-1) für das jeweils zum Vergleich herangezogene Regelwerk extrapoliert. Anschließend wurde mit dem für das Regelwerk gültigen Spannungsquotienten $\sigma_{a \text{ zul}} / \bar{\sigma}_{a \text{ Bezug}} = \text{konst.}$ verglichen.

Tabelle 5.3-1 Sicherheitskonzepte (zulässige Spannungen und resultierende Überlebenswahrscheinlichkeit) in unterschiedlichen Regelwerken

Regelwerk	zulässige Spannungen σ_{zul}	Resultierende Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}$ (nach /33/)
DIN 15018	$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{ertr, P\ddot{u}50\%}}{4/3}$	$P_{\ddot{u}} = 99,9\%$ entspr. $\sigma_{ertr, P\ddot{u}50\%} - 3 \cdot s$ ¹⁾
DS 804	$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{ertr, P\ddot{u}50\%}}{1,65}$	$P_{\ddot{u}} = 99,9\%$ entspr. $\sigma_{ertr, P\ddot{u}50\%} - 3 \cdot s$ ²⁾
EUROCODE 3	$\sigma_{zul} = \sigma_{ertr, P\ddot{u}50\%} - 2 \cdot s$ ³⁾	$P_{\ddot{u}} = 97,7\%$

s: Standardabweichung

1) bezogen auf einzelne Wöhlerlinien unbekannter Herkunft /32/

2) bezogen auf normierte Wöhlerlinien /9/

3) bezogen auf Versuchsergebnisse (Herkunft z.Zt noch ungeklärt)

Bruchwahrscheinlichkeit $P_B = 1 - P_{\ddot{u}}$

In den Bildern 5.3-7 u. 5.3-8 ist der Vergleich mit den Angaben in DS 804, in den Bildern 5.3-9 u. 5.3-10 für den R-Wert-unabhängigen EUROCODE 3 durchgeführt. Wie Bild 5.3-7 erkennen läßt, ist bei einer Auslegung nach DS 804 ($R = 0$, Kerbfall V) der bei $R = -1$ beanspruchten Halsnähte noch mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 5%, für die bei $R = 0$ beanspruchten mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 3% zu rechnen (Bild 5.3-8). Bei einer Auslegung nach EUROCODE 3 (Kat. 112) beträgt die zu erwartende Bruchwahrscheinlichkeit im Falle einer Wechselbeanspruchung 36% (Bild 5.3-9), bei einer Schwellbeanspruchung ebenfalls 36% (Bild 5.3-10).

Um die in DS 804 angestrebte resultierende Bruchwahrscheinlichkeit von 0,13% (entspr. 99,87% Überlebenswahrscheinlichkeit) einzuhalten, müßten die zul. Spannungsamplituden für wechselbeanspruchte Halsnähte ($R = -1$) um rd. 17%, für schwellbeanspruchte Halsnähte ($R = 0$) um rd. 14% abgesenkt werden. Um die im EUROCODE 3 vorgesehene Bruchwahrscheinlichkeit von 2,3% (entsprechend 97,7% Überlebenswahrscheinlichkeit) zu erreichen, müßten die zulässigen Spannungen für Halsnähte (Kat. 112) um ca 20% vermindert werden (für Wechselbeanspruchung um rd. 23%, für Schwellbeanspruchung um rd. 19%).

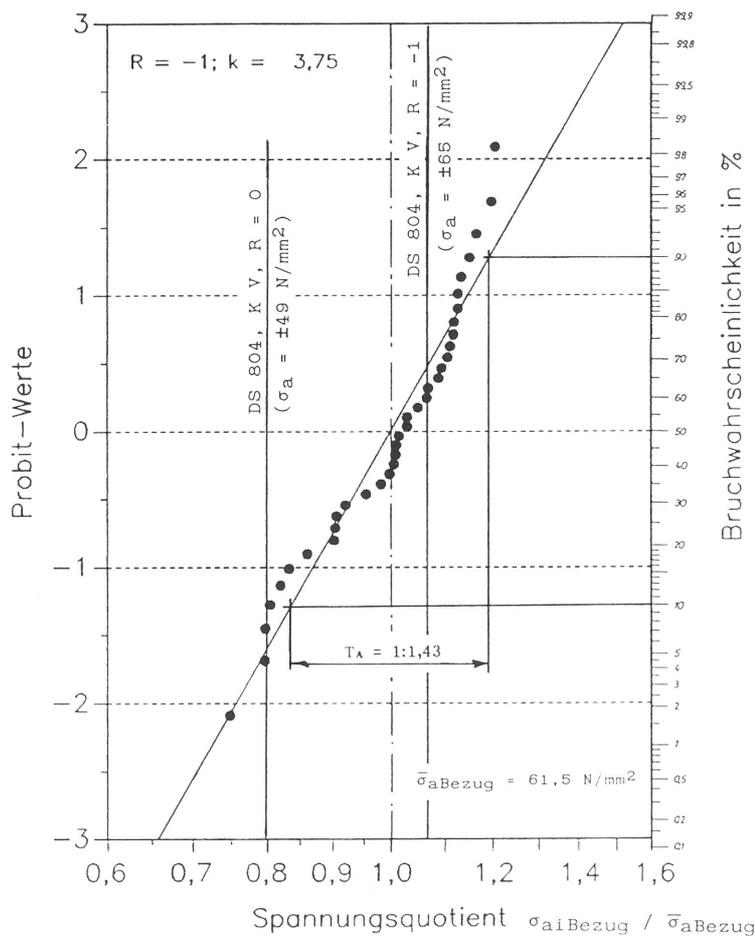


Bild 5.3-7
Bruchwahrscheinlichkeit an Halsnähten in den Versuchsträgern bei Versuchen mit $R = -1$ im Vergleich zu DS 804

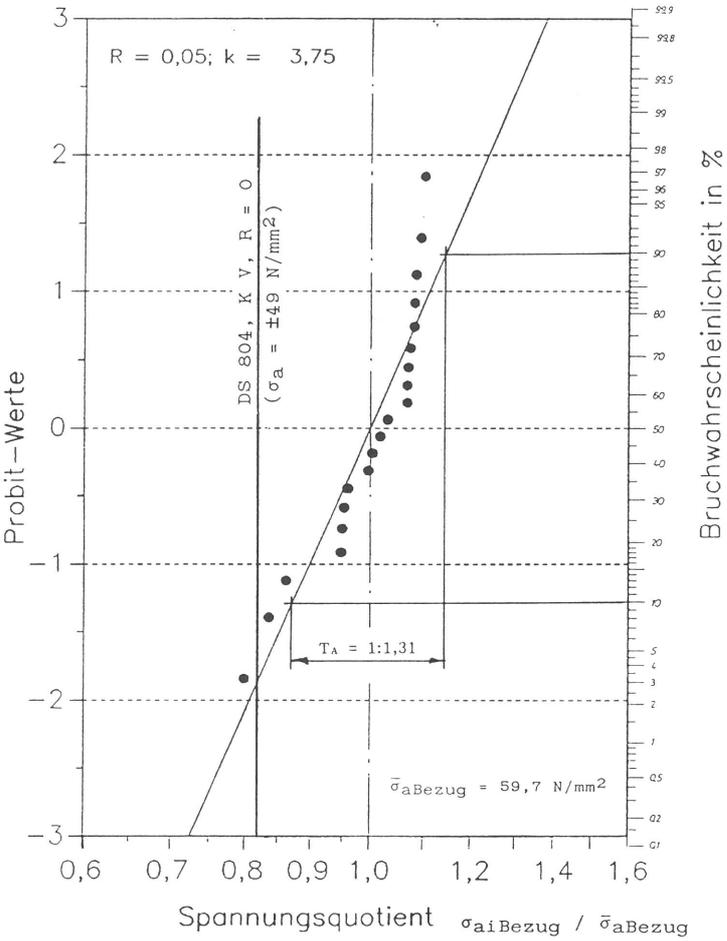


Bild 5.3-8
Bruchwahrscheinlichkeit an Halsnähten in den Versuchsträgern bei Versuchen mit $R = 0,05$ im Vergleich zu DS 804

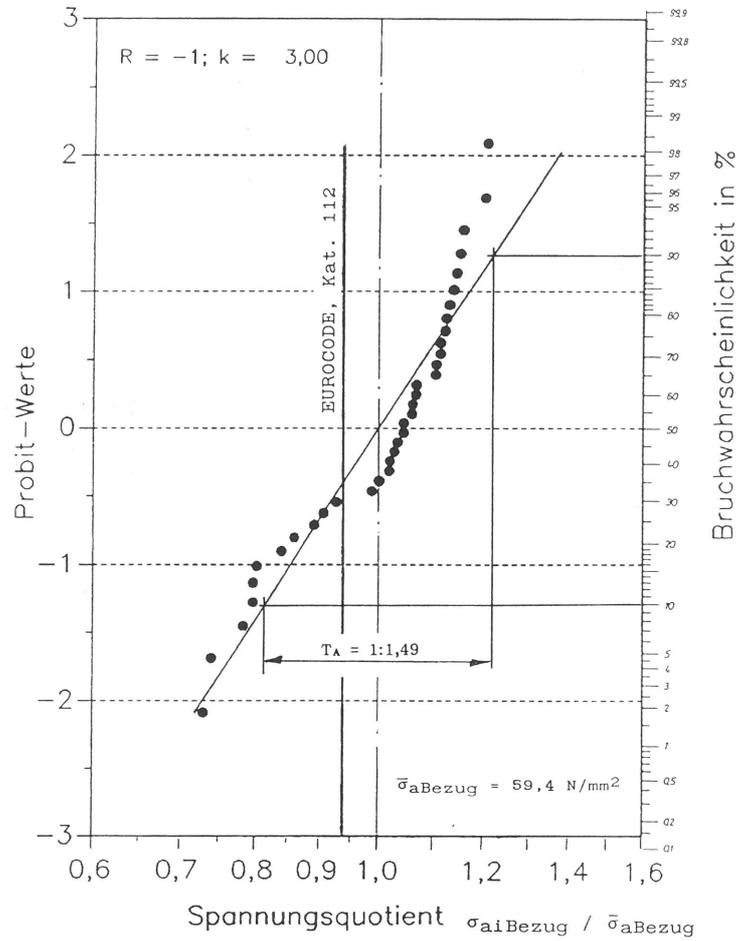


Bild 5.3-9
Bruchwahrscheinlichkeit an Halsnähten in den Versuchsträgern bei Versuchen mit $R = -1$ im Vergleich zu EUROCODE 3 (84)

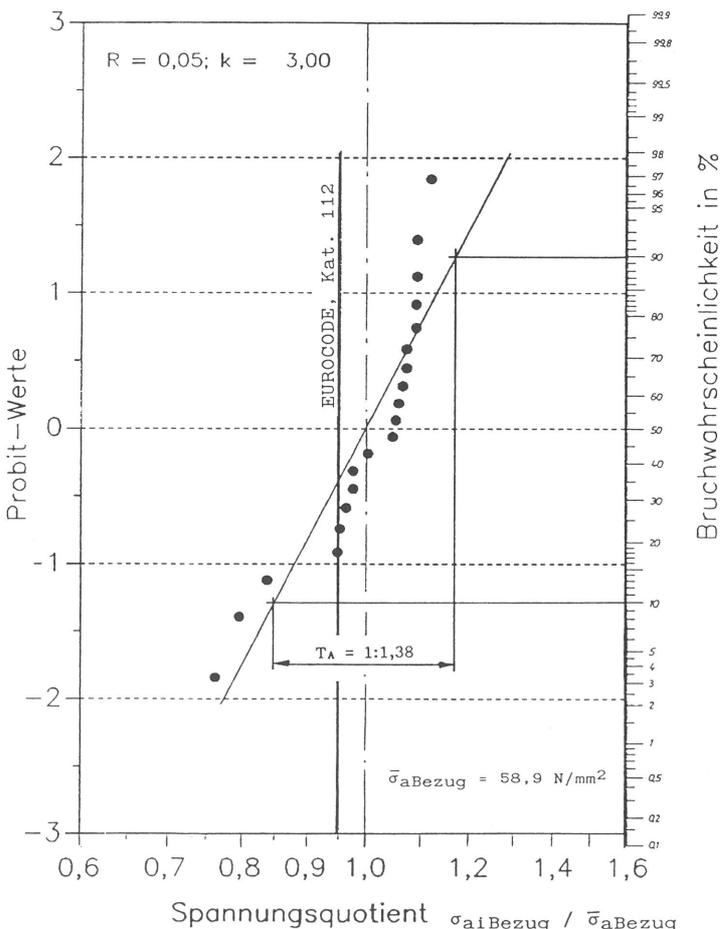


Bild 5.3-10
Bruchwahrscheinlichkeit an Halsnähten in den Versuchsträgern bei Versuchen mit $R = 0,05$ im Vergleich zu EUROCODE 3 (84)

6. Analyse der Versuchsergebnisse im Hinblick auf Einflüsse der Nahtform, des Schweißverfahrens und der Fertigungsbedingungen

6.1 Zweck der Analyse

Der Zweck dieser Analyse ist ein Vergleich der Lebensdauerwerte für die unterschiedlichen Nahtvarianten und Schweißnahtbereiche der Versuchsträger, unabhängig von deren Einstufungen in bestehenden Regelwerken. Zugrunde gelegt wurden dazu alle in den Tabellen 5.1-1a...5.1-1c aufgelisteten 202 Schwinganrisse, unterschieden nach dem Merkmal "Nahtform" und dem den jeweiligen Anriß enthaltenden "Schweißnahtbereich". Die Tabelle 6.1-1 gibt eine Übersicht über alle die Schweißnahtbereiche (Bild 6.1-1) in den Trägern, die potentielle Ausgangspunkte für Schwingungsrisse darstellten. Sie werden im folgenden unter dem Sammelbegriff "Schweißnahtvarianten" geführt und gliedern sich in die Hauptgruppen

- Halsnähte
- Haltnahtübergänge
- Stumpfstöße

Zusätzlich sind hierin auch die in ganz seltenen Fällen wirksam gewordenen Grundwerkstoffbeschädigungen ausgewiesen.

6.2 Vorgehensweise

Die Analyse wurde auf der Basis von bezogenen Lebensdauern durchgeführt. Hierzu wurden sämtliche Versuchswerte (σ_{ai} , N_{Ai}) auf ein einheitliches Nennspannungsamplituden-Niveau $\sigma_{a \text{ Bezug}} = \pm 75 \text{ N/mm}^2$ (siehe Bild 6.2-1) umgerechnet. Das Bezugsniveau entsprach in etwa dem Mittelwert aus sämtlichen Versuchswerten. Die Umrechnung auf ($\sigma_{a \text{ Bezug}}$, $N_{Ai \text{ Bezug}}$) erfolgte mit Hilfe des Ansatzes (6.2-1)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{a \text{ Bezug}}} = \left[\frac{N_A}{N_{A \text{ Bezug}}} \right]^{-\frac{1}{k}} \quad (6.2-1)$$

Der Neigungsparameter k der Wöhlerlinie wurde gemäß /3/ zu $k = 3,75$ gesetzt. Die bezogenen Werte $N_{Ai \text{ Bezug}}$ je Schweißnahtvariante wurden zu Stichproben zusammengefaßt.

Tabelle 6.1-1 Kennzeichnung der Trägerbereiche (gem. Bild 6.1-1) und Nahtvarianten mit Ermüdungsrissen

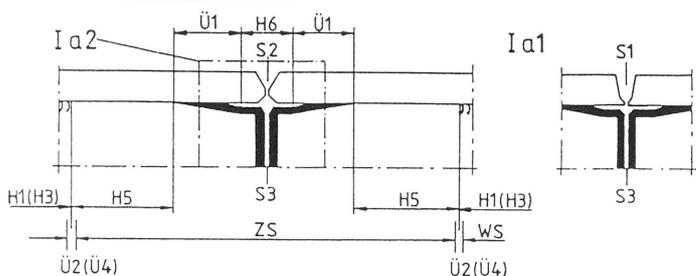
Lage der Bruchausgangsstellen	Kurzzeichen	Nahtarten und Sonstiges	Schweißposition ¹⁾	Fertigungsbedingung ²⁾	Schweißverfahren	möglich bei Träger-Typ
Halsnähte	H1	Doppelkehlnähte	w	WS	E-Hand	Ia, II, III
	H2	DHV-Nähte	w	WS	E-Hand	IV
	H3	Doppelkehlnähte	h	WS	UP-Automaten	A1, SA1
	H4	DHV-Nähte	h	WS	UP-Automaten	A2, SA2
	H5	Doppelkehlnähte	h bzw. hü	ZS	E-Hand	I, IIb, SA1
	H6	DHV-Nähte	h bzw. hü	ZS	E-Hand	I, II, IVb, SA2
Halsnaht-Übergänge ³⁾	Ü1	DHV-/Doppelkehlnaht	h bzw. hü	ZS	E-Hand	Ia, II, SA1
	Ü2	Doppelkehl-/Doppelkehlnaht	h/w bzw. hü/w	ZS/WS	E-Hand	Ia, II, IIIb
	Ü3	DHV-/DHV-Naht	h/w bzw. hü/w	ZS/WS	E-Hand	Ib, IVb
	Ü4	Doppelkehl-/Doppelkehlnaht	h/h bzw. hü/h	ZS/WS	E-Hand/Autom.	SA1
	Ü5	DHV-/DHV-Naht	h/h bzw. hü/h	ZS/WS	E-Hand/Autom.	SA2
Stumpfstoße	S1	U-Gurtstoß	w oder ü	ZS	E-Hand	Ia1, IIa
	S2	X-Gurtstoß	w oder ü	ZS	E-Hand	Ia2, Ib, IIb, SA
	S3	Stegstoß (V oder X)	s	ZS	E-Hand	I, II, SA
	S4	Stirnfugennaht der Doppelgurtlamellen	q	ZS	E-Hand	II
Grundwerkstoffbeschädigungen	G1	Innere Fehler	--	--	--	alle Träger
	G2	Oberflächenfehler	--	--	--	alle Träger

1) Schweißpositionen gemäß DIN 1912, Teil 2:
 w : Wannenposition
 h : Horizontalposition
 ü : Überkopfposition
 s : Steigposition
 hü: Horizontal-Überkopfposition
 q : Querposition

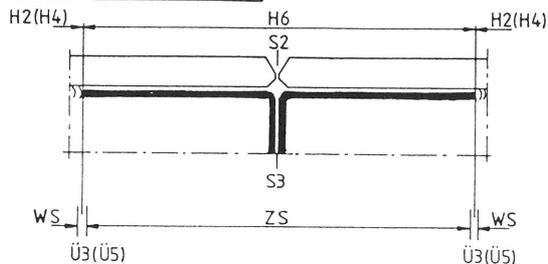


2) WS : Werkstattschweißung
 ZS : Zwangslagenschweißung (Montagebedingungen)
 3) Ü1 : Übergangsbereich von der DHV-Naht zur Doppelkehlnaht innerhalb der Zwangslagen-Schweißung der Baustellenstöße
 Ü2...Ü5: Übergangspunkte zwischen Werkstatt- und Zwangslagenschweißung (ca. 25mm) (keine Schwingungsbrüche bei Ü4 und Ü5)

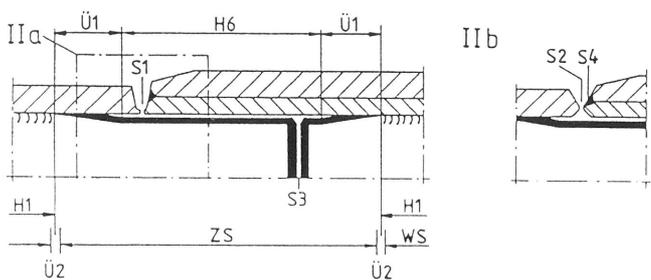
Trägertyp Ia(SA1)



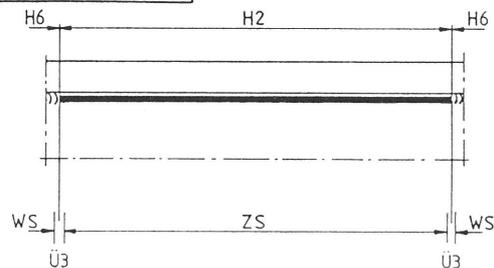
Trägertyp Ib(SA2)



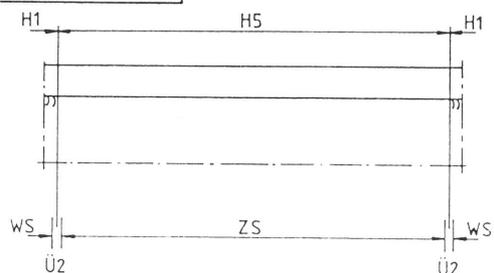
Trägertyp II



Trägertyp IIIb



Trägertyp IV b



Trägertyp IIIa : durchgehend H1
 Trägertyp IV a : durchgehend H2
 Trägertyp A1 : durchgehend H3
 Trägertyp A2 : durchgehend H4

Bild 6.1-1 Definition der Schweißnahtbereiche (gemäß Tabelle 6.1-1)

In einem ersten Schritt wurden für alle die Schweißnahtvarianten, für die Versuchswerte sowohl bei $R = -1$ als auch bei $R = 0,05$ vorlagen, Signifikanztests (siehe unten) bezüglich des R-Einflusses durchgeführt. Dabei ergaben sich, von einer Ausnahme abgesehen, keine statistisch signifikanten Lebensdauerunterschiede zwischen Stichproben, die Wechselversuchen entstammten, und solchen, die zu Schwellversuchen gehörten (Tabelle 6.2-1). Es erschien daher zulässig, im zweiten Schritt sämtliche Versuchswerte einer Schweißnahtvariante zu einer gemeinsamen Stichprobe zusammenzufassen, unabhängig vom wirksamen R-Wert beim jeweiligen Versuch.

Tabelle 6.2-1 Ergebnisse der Signifikanztests¹⁾ bezüglich der Unterschiede in den Mittelwerten der bezogenen Anrißschwingspielzahlen; Vergleiche zum Einfluß des R-Wertes

Vergleich: Variante A Variante B (siehe Tabelle 6.1-1)	Ergebnis ²⁾
H1 (R = -1) H1 (R = 0)	nicht signifikant
H2 (R = -1) H2 (R = 0)	nicht signifikant
H5 (R = -1) H51 (R = 0)	nicht signifikant
H6 (R = -1) H6 (R = 0)	signifikant
Ü2 (R = -1) Ü2 (R = 0)	nicht signifikant
Ü3 (R = -1) Ü3 (R = 0)	nicht signifikant
S2 (R = -1) S2 (R = 0)	nicht signifikant

¹⁾ t-Tests für zweiseitige Fragestellung (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) unter der Annahme, die bezogenen Anrißschwingspielzahlen seien log-normal-verteilt

²⁾ die Prüfung erfolgte unter der Annahme, die Varianzen der Stichproben seien ungleich (inhomogen)

In Bild 6.2-2 sind die Mittelwerte und die Streuungen der bezogenen Lebensdauern der 13 unterschiedlichen Schweißnahtvarianten, in denen Ermüdungsrisse auftraten, separat dargestellt und zwar aus Gründen der besseren Anschaulichkeit in der Form $\lg N_{A \text{ Bezug}}$. Die je Variante berücksichtigte Anzahl von Ermüdungsanrissen ist jeweils in Klammern hinzugefügt.

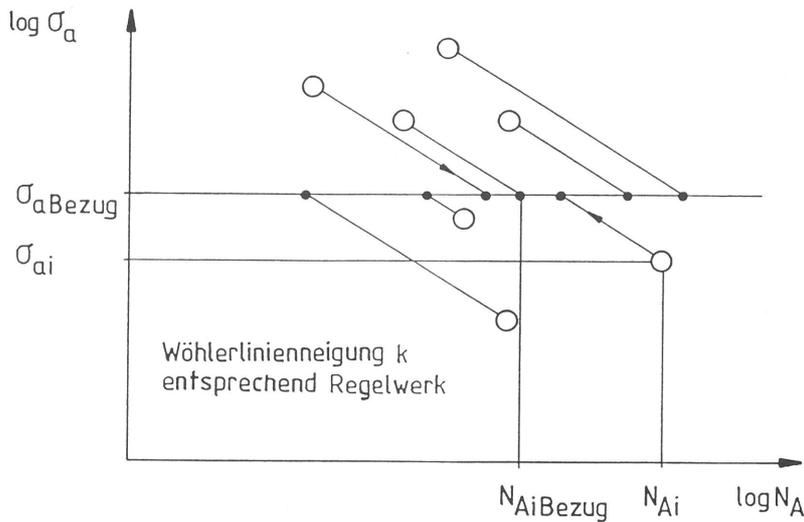


Bild 6.2-1
Ermittlung der bezogenen Lebensdauern

Die Lebensdauerunterschiede sind insgesamt vergleichsweise gering (siehe Bild 6.2-2). Da den Auswertungen sehr unterschiedliche Stichprobenumfänge zugrunde lagen, wurde die statistische Signifikanz der Unterschiede mit Hilfe von t-Tests /29/ überprüft (Tabelle 6.2-2). Diese Tests beantworten die Frage, ob festgestellte Unterschiede zufällig sind oder nicht, d.h. ob die jeweils einander gegenübergestellten Stichproben zur gleichen Grundgesamtheit gehören oder nicht (Nullhypothese: "Mittelwerte der Grundgesamtheiten sind gleich").

Es wurden log-normalverteilte Grundgesamtheiten für die Werte $N_{Ai \text{ Bezug}}$ angenommen. Der Vergleich wurde dann für unbekannte, nicht gleiche (inhomogene) Varianzen der Grund-

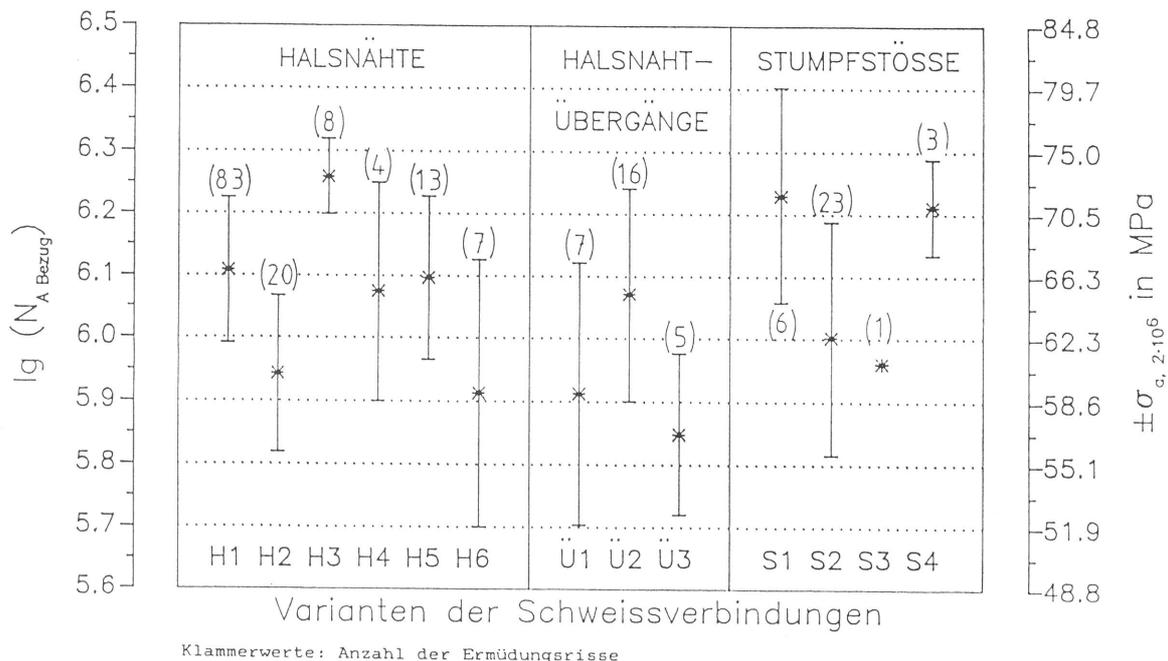


Bild 6.2-2 Mittelwerte und Streuungen der bezogenen Anrißschwingenspielzahlen und zugeordnete ertragbare Spannungsamplituden (Skalierung rechts)

gesamtheiten durchgeführt. Der Test wurde dabei zweiseitig auf einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ durchgeführt, was bedeutet, daß die Nullhypothese in nur 5 % aller Fälle zu Unrecht abgelehnt wird.

6.3 Ergebnisse der Analyse

- Der Vergleich der Halsnaht-Varianten "Doppelkehlnaht" und "DHV-Naht" (d.h. H1 verglichen mit H2 bzw. H3 mit H4) ergab im Mittel längere Lebensdauern für die Doppelkehlnähte, wobei die Unterschiede jedoch nur für die E-Handschweißungen auch statistisch signifikant waren.

Tabelle 6.2-2 Ergebnisse der Signifikanztests¹⁾ bezüglich der Unterschiede in den Mittelwerten der bezogenen Anrißschwingspielzahlen; R-Wert-unabhängige Vergleiche

Verqleich: Variante A Variante B (siehe Tabelle 6.1-1)	Ergebnis ²⁾
H1 H2	signifikant
H3 H4	nicht signifikant
H1 H3	signifikant
H2 H4	nicht signifikant
H1 H5	nicht signifikant
H2 H6	nicht signifikant
S1 S2	signifikant
Ü1 + Ü3 Ü2	signifikant
H1 + H2 + H5 + H6 Ü1 + Ü2 + Ü3	signifikant
Trägertyp I: S1 + S2 + S3 Trägertyp II: S1 + S2 + S3 + S4	nicht signifikant

1) t-Tests für zweiseitige Fragestellung (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) unter der Annahme, die bezogenen Anrißschwingspielzahlen seien log-normal-verteilt

2) die Prüfung erfolgte unter der Annahme, die Varianzen der Stichproben seien ungleich (inhomogen)

- Die UP-geschweißten Halsnähte wiesen deutlich höhere Lebensdauern auf als die E-Hand-geschweißten und zwar bei beiden Halsnahtvarianten (vergleiche H1 mit H3 bzw. H2 mit H4). Wegen des geringen Stichprobenumfangs der Variante H4 (nur 4 Anrisse) ist diese Aussage statistisch jedoch nicht gesichert.
- Halsnähte (E-Hand) in Werkstattsschweißung (H1 und H2) zeigten im Vergleich zu solchen in Zwangslagenschweißung unter Montagebedingungen (H5 und H6) keine signifikanten Unterschiede in den Anrißschwingspielzahlen.
- Halsnahtübergänge (Werkstattsschweißung/Montageschweißung), an denen DHV-Nähte beteiligt waren (Ü1 und Ü3), zeigten signifikant geringere Lebensdauerwerte als solche, bei denen der Übergang von Kehlnaht auf Kehlnaht erfolgte (Ü2).
- Bei den Gurtstößen verhielt sich der U-Stoß (S1) signifikant besser als der X-Stoß (S2).
- Kein signifikanter Unterschied besteht dagegen zwischen den Gurtstößen mit gleichdicken Gurtlamellen und den un-symmetrischen Gurtstößen mit Gurten unterschiedlicher Dicke (Bild 6.3-1a u. 6.3-1b).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die im Vergleich zur Doppelkehlnaht wesentlich aufwendigere DHV-Naht kürzere Lebensdauern ergeben hat. Bei den E-Hand-Schweißungen der Halsnähte hat die Schweißposition keinen Einfluß auf die Lebensdauer. Wird das E-Hand-Schweißen der Halsnähte auf ein automatisches Schweißverfahren (ohne Unterbrechungen) umgestellt, so sind u.U. Vorteile bezüglich der Lebensdauer zu erwarten (statistisch jedoch nicht gesichert). Die aufwendigere Nahtvorbereitung (U-Naht) bei den Gurtstößen ergibt Lebensdauer Vorteile. Halsnahtübergänge zwischen Werkstatt- und Montageschweißung, bei denen zumindest auf einer Seite DHV-Nähte beteiligt sind, verhalten sich ungünstiger als solche, die keine DHV-Nähte enthalten.

Zur Orientierung über das Ausmaß der Schwankungsbreiten der ertragbaren Spannungsamplituden und zum Vergleich mit den Regelwerken sind in Bild 6.2-2 rechts, auf einer zusätzlichen (nicht linearen) Skala die auf eine angenommene

Anrißschwingspielzahl $N_A = 2 \cdot 10^6$ umgerechneten Amplitudenwerte $\sigma_a, 2 \cdot 10^6$ aufgetragen. Diese Umrechnung erfolgte mit dem Ansatz (6.2-1a), wobei wiederum $k = 3,75$ gesetzt wurde.

$$\frac{\sigma_{a \text{ Bezug}}}{\sigma_{a, 2 \cdot 10^6}} = \left[\frac{N_{A \text{ Bezug}}}{N_{A, 2 \cdot 10^6}} \right]^{-\frac{1}{k}} \quad (6.2-1a)$$

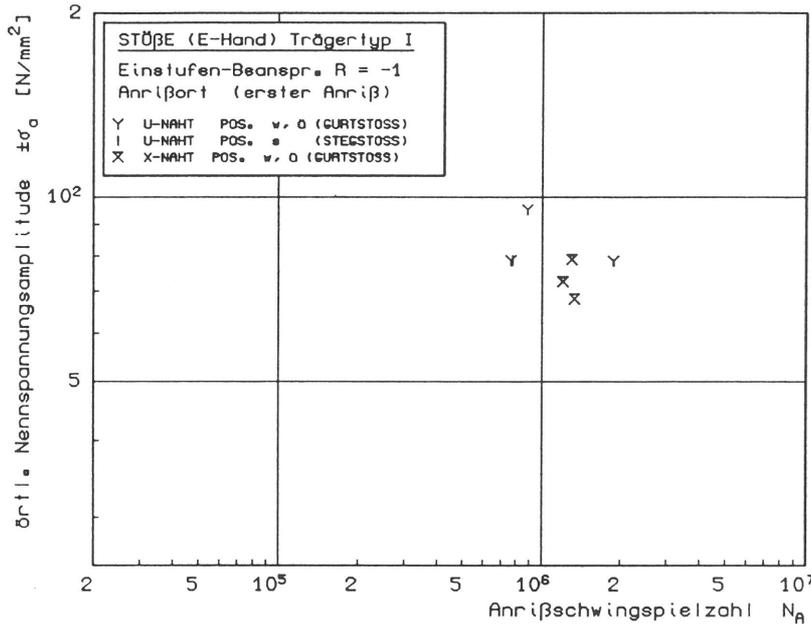


Bild 6.3-1a
 Erste Anrisse in E-Handgeschweißten Gurtstößen bei Wechselbeanspruchung ($R = -1$), Träger Typ I

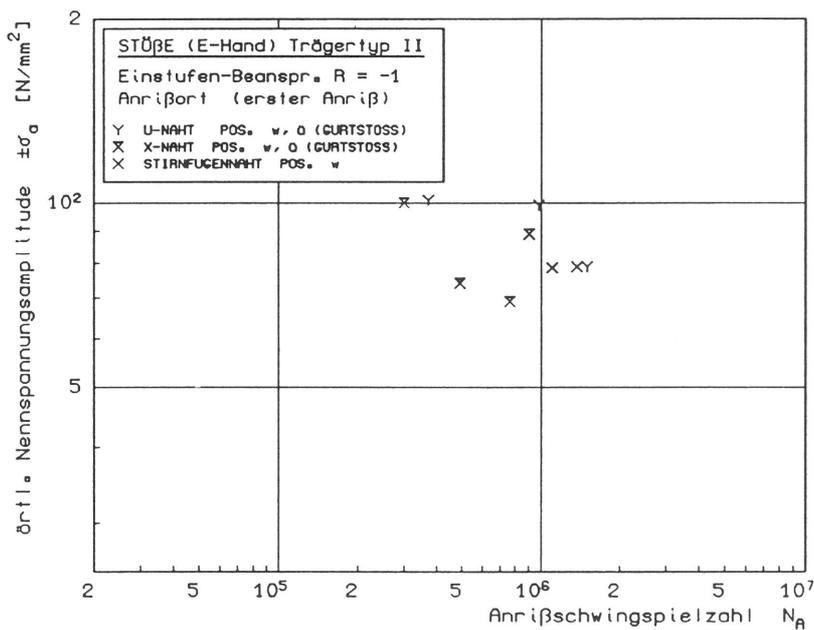


Bild 6.3-1b
 Erste Anrisse in E-Handgeschweißten Gurtstößen bei Wechselbeanspruchung ($R = -1$), Träger Typ II

7. Fraktographische Untersuchungen

7.1 Anzahl und Lage der Schwingungsbrüche

Jeweils nach Beendigung eines Versuchs wurden die Lagen der Ermüdungsrisse, bezogen auf die Trägerlängsachse, vermessen und in ein Rißlagen-Protokoll eingetragen. Sobald die Bruchflächen durch Freisägen geöffnet worden waren, wurde zusätzlich der Bruchflächenverlauf bei Versuchsende in diese Protokolle eingetragen. Die Bilder 7.1-1...3 zeigen Beispiele der Rißlagen-Protokolle. Den Untersuchungen lagen insgesamt 202 Schwingungsrisse aus Versuchen mit E-Hand- und Automaten-geschweißten Trägern zugrunde (Einzelheiten siehe Tabellen 5.1-1a...5.1-1c).

Tabelle 7.1-1 zeigt die Häufigkeit der Schwingungsrisse je Schweißnahtvariante und vermittelt damit einen ersten Eindruck über die Anfälligkeiten der unterschiedlichen Schweißnaht- bzw. Trägerbereiche bezüglich der Entstehung von Ermüdungsrisen. Da die verschiedenen Schweißnahtvarianten bei den Versuchen mit unterschiedlicher Häufigkeit vorkamen bzw. die insgesamt mechanisch beanspruchte Schweißnahtlänge je Schweißnahtvariante stark unterschiedlich war, würde die Beurteilung der Rißanfälligkeit einer Schweißnahtvariante anhand der absoluten Rißhäufigkeiten allein zu nicht sachgerechten Aussagen führen. Die Tabelle 7.1-1 enthält daher zusätzliche, auf die Zahl der Versuche sowie auf die Nahtlängen bezogene Häufigkeiten der Schwingungsrisse. Für die Nahtübergangsstellen, die als eigene Varianten in der Tabelle 6.1-1 aufgeführt sind, wurden dazu als ingenieurmäßige Abschätzung Längen von je 25 mm angesetzt. Weiterhin ist zu beachten, daß das stark unterschiedliche Schweißnahtvolumen bei Halsnähten und Gurtstumpfnähten in Tabelle 7.1-1 nicht berücksichtigt wurde. Ein Vergleich dieser beiden Nahtformen ist daher auch anhand der bezogenen Werte nur unter Vorbehalt möglich.

Eine vergleichende Auswertung der Zahl der Schwingungsbrüche in Tabelle 7.1-1 ergibt folgendes Bild:

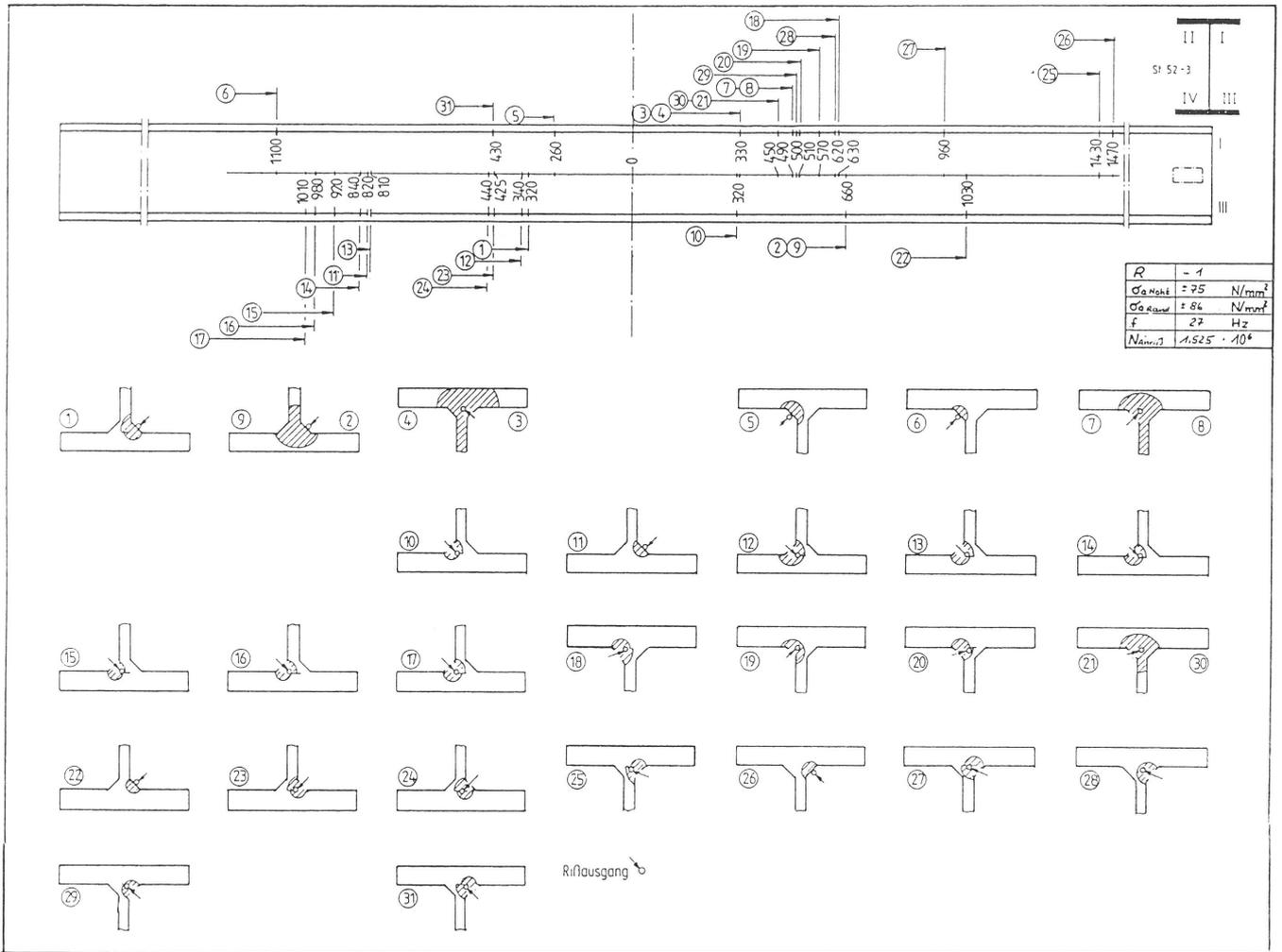


Bild 7.1-1 Rißlagenprotokoll (Träger 03-34, Trägertyp IIIb)

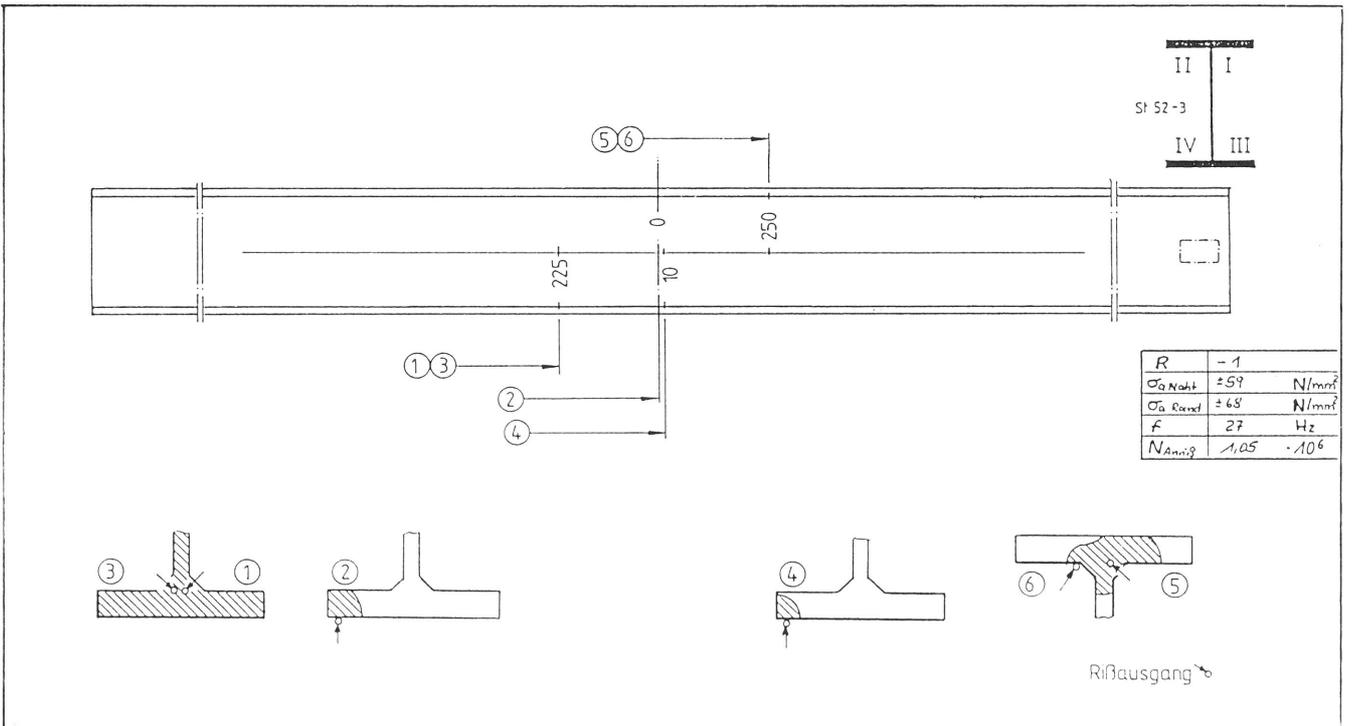


Bild 7.1-2 Rißlagenprotokoll (Träger S2-23, Trägertyp Ib)

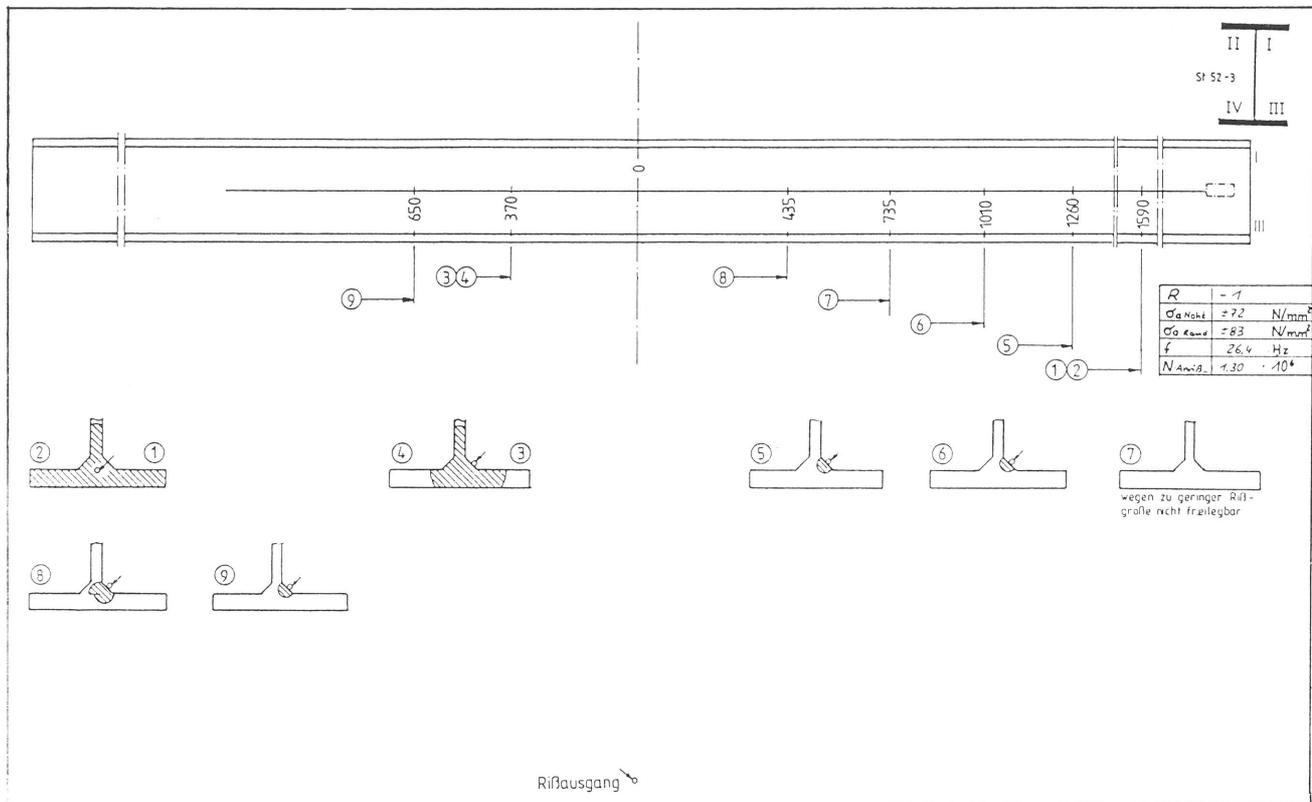


Bild 7.1-3 Rißlagenprotokoll (Träger 04-44, Trägertyp IVIb)

Tabelle 7.1-1 Anrißhäufigkeit in unterschiedlichen Schweißnahtvarianten (gem. Tabelle 6.1-1)

Lage der Bruchausgangsstellen	Variante, Kurzzeichen (Tab.6.1-1)	R	Zahl der die Variante enthaltenden Versuche		Relevante Gesamtschweißnaht-Länge in m		Zahl der Schwingungsbrüche		Bezogene Zahl der Brüche		
									je Versuch	je m Nahtlänge	
Halsnähte	H1	-1 0,05	20 8	28	126,6 18,0	144,6	59 24	83	2,95 3,00	0,47 0,75	0,57
	H2	-1 0,05	4 4	8	28,0 10,0	38,0	10 10	20	2,50 2,50	0,36 1,00	0,53
	H3	-1	4		28,0		8		2,00		0,29
	H4	-1	4		28,0		4		1,00		0,14
	H5	-1 0,05	12 6	18	15,5 4,2	19,7	11 2	13	0,92 0,33	0,71 0,48	0,66
	H6	-1 0,05	23 6	29	21,2 3	24,2	3 4	7	0,13 0,67	0,14 1,33	0,29
Halsnahtübergänge	Ü1	-1 0,05	18 4	22	7,2 0,8	8,0	7 -	-	0,39 --	0,97 --	0,88
	Ü2	-1 0,05	18 6	24	3,6 0,6	4,2	10 6	16	0,56 1,00	2,78 10,00	3,81
	Ü3	-1 0,05	5 6	11	1,0 0,6	1,6	3 2	5	0,60 0,33	3,0 3,33	3,13
	Ü4	-1	2		0,4		-		--	--	--
	Ü5	-1	2		0,4		-		--	--	--
Stumpfstöße	S1	-1	8		4,0		6		0,75		1,50
	S2	-1 0,05	15 8	23	7,5 2,0	9,5	18 5	23	1,20 0,63	2,40 2,50	2,42
	S3	-1 0,05	23 8	31	**)		1 -	1	0,04 --	--	--
	S4	-1	8		2,0		3		0,38		1,5
Grundwerkstoffbeschädigungen	G1	-1 0,05	35 16	51	--		2 1	3	0,06 0,06	--	--
	G2	-1 0,05	35 16	51	--		3 -	3	0,09 --	--	--

*) Beanspruchte Nahtlänge x Zahl der Versuche
Beanspruchte Einzel-Nahtlänge:

- Halsnähte: 2 m für Versuche bei R = -1 (Trägermittbereich, Nennbiegemoment 100 ... 95%)
1,5 m für Versuche bei R = 0,05 (Trägermittbereich zwischen den Lasteinleitungspunkten)
- Halsnahtübergänge: ca. 5 cm bei Ü1

***) Angabe nicht sinnvoll

- Halsnähte:

Bezogen auf die Schweißnahtlänge zeigen die E-Hand-Schweißungen bei Doppelkehlnähten (H1) bzw. DHV-Nähten (H2) im Bereich der Werkstattschweißung annähernd gleiche Schwingbruchhäufigkeiten (0,53 bzw. 0,57 Anrisse/m), während im Bereich der Zwangslagenschweißung die Doppelkehlnähte (H5) deutlich höhere Anrißhäufigkeiten aufweisen (0,66 Anrisse/m) als die DHV-Nähte (H6: 0,29 Anrisse/m). Wie unter 5.3 gezeigt wurde, ergeben sich für die DHV-Nähte daraus jedoch keine Vorteile bezüglich der Lebensdauer bzw. der ertragbaren Spannungsamplituden.

Die Werkstatt-Automaten-Schweißungen zeigen insgesamt geringere Bruchhäufigkeiten (0,14 bzw. 0,29 Anrisse/m). Bezogen auf die Zahl der die jeweiligen Variante enthaltenden Versuche sind die Unterschiede zwischen E-Hand- und Automaten-Schweißungen nicht so stark ausgeprägt.

- Halsnaht-Übergangsbereiche bzw. -Übergangspunkte:

Hier ist eigentlich nur ein Vergleich anhand der auf die Zahl der Versuche bezogenen Häufigkeiten sinnvoll. Tabelle 7.1-1 zeigt, daß die Schwingbruchhäufigkeit für Ü1 bis Ü3 zwischen 1 und 2 Brüche je 3 Versuche liegt. Bei Bezug auf die hier kurzen Schweißnahtlängen ergibt sich, daß die Übergänge eine wesentlich höhere Neigung zur Rißbildung zeigen als die Halsnahtvarianten H1 bis H6.

- Stumpfstöße:

Ein Vergleich der Gurtstöße mit U- bzw. X-Naht (S1 bzw. S2) zeigt eine leicht erhöhte Rißhäufigkeit für die letztere Nahtform. Ein Vergleich der Gurt-Stumpfstöße (S1, S2) mit den Halsnähten (H1...H6) suggeriert bei Bezug auf die Schweißnahtlänge eine höhere Rißneigung der Stumpfnähte. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Stumpfnähtelängen in Trägerkonstruktionen zwar kurz im Vergleich zu den Halsnahtlängen sind, Gurtstöße aufgrund ihres deutlich höheren Nahtvolumens jedoch eine gegenüber Halsnähten größere Anzahl von Schweißlagen aufweisen, was bei dem vorliegenden Vergleich aber nicht berücksichtigt wurde.

Möglicherweise wird die Rißneigung praxisnäher beschrieben, wenn man die Anzahl von Anrissen je Schweißnahtvariante auf die jeweilige Anzahl der die Schweißnahtvariante enthaltenden Versuche bezieht. Werden hierbei die Varian-

ten H1 bis H4 den Varianten S1 und S2 gegenübergestellt, ergibt sich eine höhere Schwingrißanfälligkeit der Halsnähte im Vergleich zu den Gurtstößen.

7.2 Rißauslösende Schweißimperfektionen

Mit wenigen Ausnahmen wurden sämtliche Schwingungsrisse freigelegt und auch fotografiert. In Ausnahmefällen wurden auch aufwendigere fraktographische Untersuchungen vorgenommen (REM, Metallographie, Mikrohärteprüfung).

Die Bezeichnung der rißauslösenden Fehlertypen (Tabelle 7.2-1) wurde in Anlehnung an den Schweißfehlerkatalog in DIN 8524 /30/ vorgenommen. Mitunter finden sich allerdings auch mehrere Ausgangsstellen auf der Bruchfläche, die z.T. unterschiedlichen Fehlertypen zuzuordnen waren. In der Mehrzahl dieser Fälle wurde die Zuordnung dann nach dem Merkmal vorgenommen, das als primär schwingrißauslösend angesehen wurde. Doch nicht in jedem Fall konnten die bruchauslösenden Schweißimperfektionen eindeutig bestimmt und dem Fehlerkatalog in DIN 8524 zugeordnet werden. Zu den einzelnen Fehlertypen ist folgendes anzumerken:

Tabelle 7.2-1 Ausgangsstellen der Schwingungsrisse, Ergebnisse fraktographischer Untersuchungen

Kenn- ziffer	Beschreibung	Zahl der Schwingungsbrüche		
		E-Handschweißungen (Hals- und Stumpfnähte)	UP-geschweißte Halsnähte	gesamt
1	Wurzelfehler (in Halsnähten)	16	6	22
2	Bindefehler (in Stoßnähten)	-	19	19
3	nicht aufgeschmolzener Endkrater und/oder Nahtansatzstelle (in Halsnähten)	44	2 [*]	46
4	vermutl. Querriß in der WEZ bei Halsnähten	49		49
5	Oberflächenpore	3	1	4
6	nichtmetallischer Einschuß	-	3	3
7	Stirnfugennaht der Doppelgurtlamelle	3		3
8	Brennschnittkante am Steg bei Doppelkehlnähten	22		22
9	Einbrandkerbe		2	2
10	Hohlkehle an der Oberfläche der Gurtstöße bedingt durch Ausschlift von Schweißraupen- rändern, Einbrandkerben oder Bindefehlern		6	6
11	Fehler bzw. Beschädigung im Grundwerkstoff	7 ^{**})		7 ^{**})
12	nicht identifizierbar	6		6
13	nicht freigelegt, bzw. fehlen	13		13

*) E-Handausbesserungen

**) Bei der vergleichenden Auswertung wurde in einem Fall dieser Fehlertyp (wie auch Fehlertyp 8) den Halsnähten zugeordnet, weil die Ausgangsstelle innerhalb des Halsnahtbereichs lag

- Querrisse:

Dieser Fehlertyp war oft mit einem grobkristallinen Aussehen des Schwingungsriß-Ausgangsbereiches verknüpft (Bild 7.2-1 und 7.2-2). Risse dieser Art lagen bei Halsnähten im Übergangsbereich zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff sowohl im Wurzel- als auch im Decklagenbereich. Waren noch weitere Rißausgangsstellen in der freigelegten Bruchfläche erkennbar, so wurden die Querrisse wegen ihrer größeren Kerbschärfe in Zweifelsfällen als primäre Bruchursache angesehen.

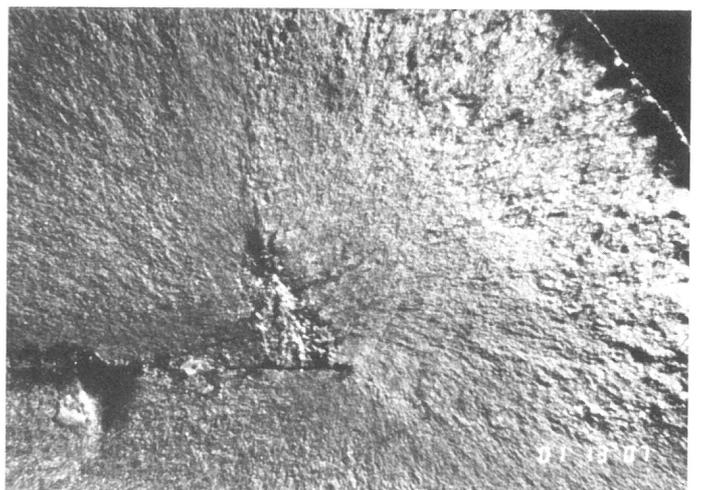
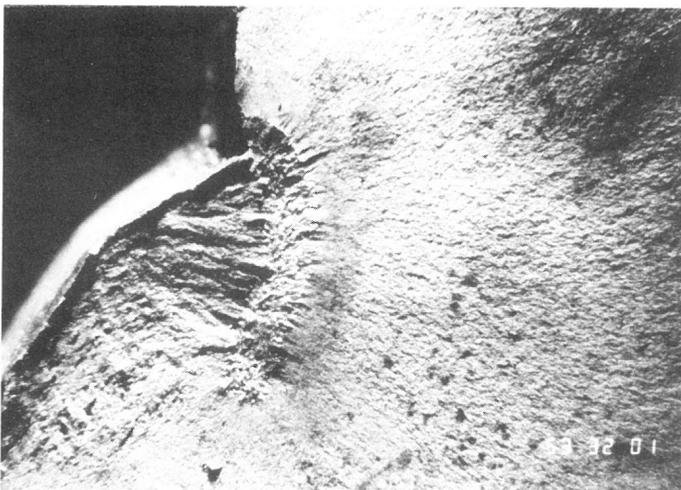
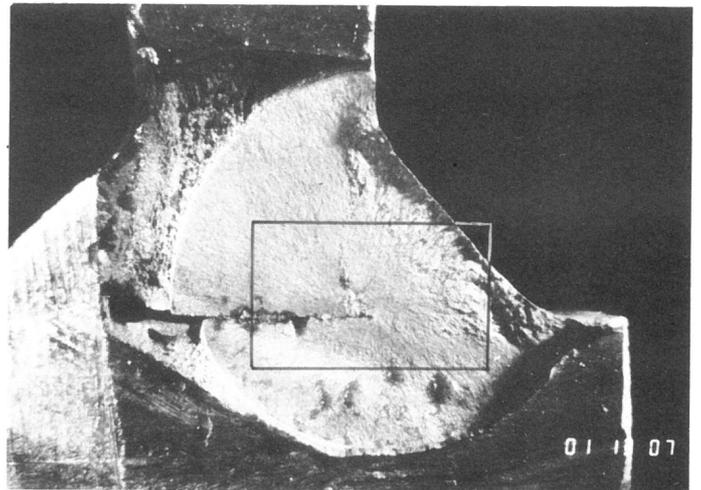
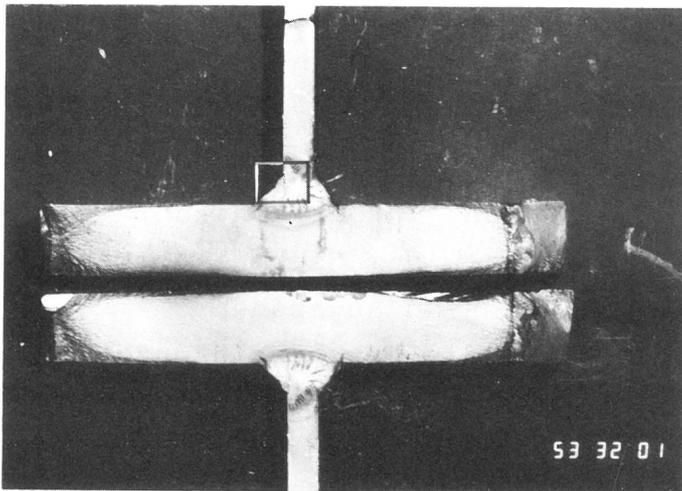


Bild 7.2-1

Bruchausgang in der WEZ einer E-Handgeschweißten DHV-Naht (Fehlertyp 4 gem. Tabelle 7.2-1), vermutlich Querriß im Bereich der Decklage stegseitig; Träger-Nr. S3-32, Bruch-Nr. 1

Bild 7.2-2

Bruchausgang in der WEZ einer E-Handgeschweißten Doppelkehlnaht (Fehlertyp 4 gem. Tabelle 7.2-1), vermutlich Querriß im Wurzelbereich stegseitig; Träger-Nr. 01-13, Bruch-Nr. 7

- Wurzelfehler:

Mit Ausnahme der Querrisse wurden Bruchausgangsstellen, die in der Schweißnahtwurzel der Halsnähte lagen, zusammenfassend als Wurzelfehler bezeichnet (Bild 7.2-3).

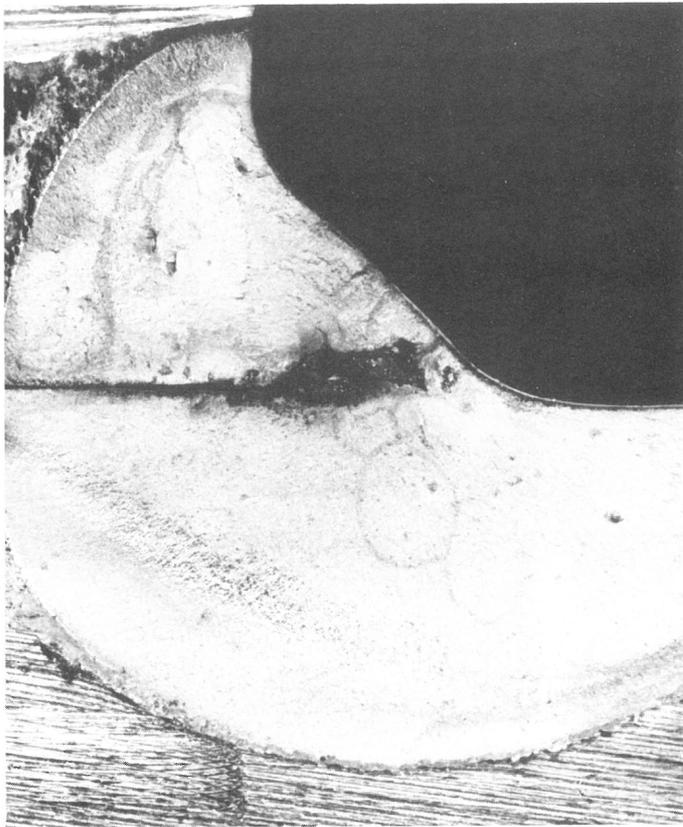


Bild 7.2-3
Bruchausgang an einem
schlauchförmigen Schlack-
einschluß im Wurzelbereich
einer E-Hand-geschweißten
Doppelkehlnaht
(Fehlertyp 1 gem. Tabelle 7.2-1);
Träger-Nr. S1-2, Bruch-Nr. 5

Überwiegend handelte es sich dabei um Schlackeneinschlüsse und andere, teilweise mit Schlacke gefüllte Hohlräume mit Porencharakter (länglich oder kugelförmig), fast ausnahmslos bei Kehl Nähten oder Übergängen DHV-/Kehl naht. Bei letzteren handelt es sich vermutlich um durch Gasdruck transportierte Schlacke (Bild 7.2-4).

- Bindefehler:

Bindefehler, vorwiegend mit Schlackenbelag (Bild 7.2-5), traten im Bereich der Gurtstoßnähte zumeist zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff, seltener zwischen den Lagen auf. Häufig fanden sich diese Ausgangsstellen im Bereich der Decklage unterhalb einer Einbrandkerbe. Hierbei ist anzumerken, daß Einbrandkerben einschließlich bemerkter Bindefehler, soweit makroskopisch erkennbar, stets vor Beginn der Versuche ausgeschliffen wurden (siehe Abschn. 3.3). In einigen Fällen führte dann die Kerbwirkung der dabei entstandenen Hohlkehlen zu Schwingungsanrissen.

- Endkrater, Nahtansatzstellen:

Häufige Bruchausgangsstellen bei Halsnähten waren nicht aufgeschmolzene Endkrater (Bild 7.2-6), oft in Verbindung mit einer Nahtansatzstelle (Bild 7.2-7). Ermüdungsrisse

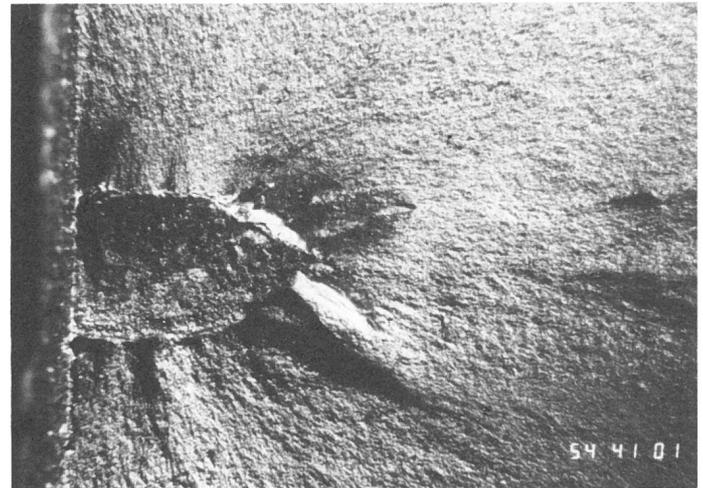
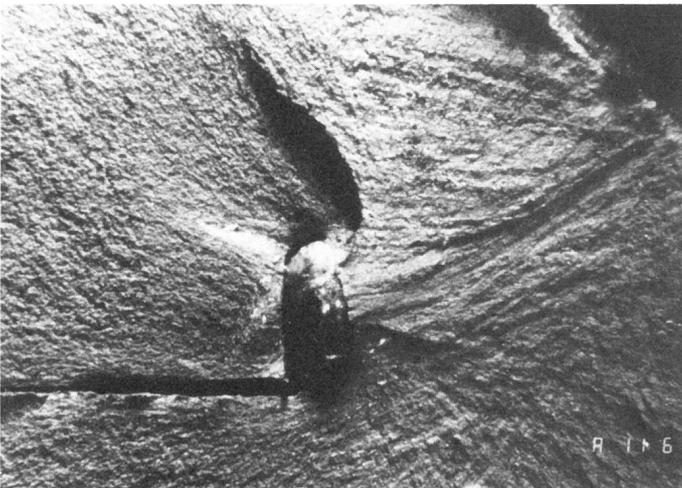
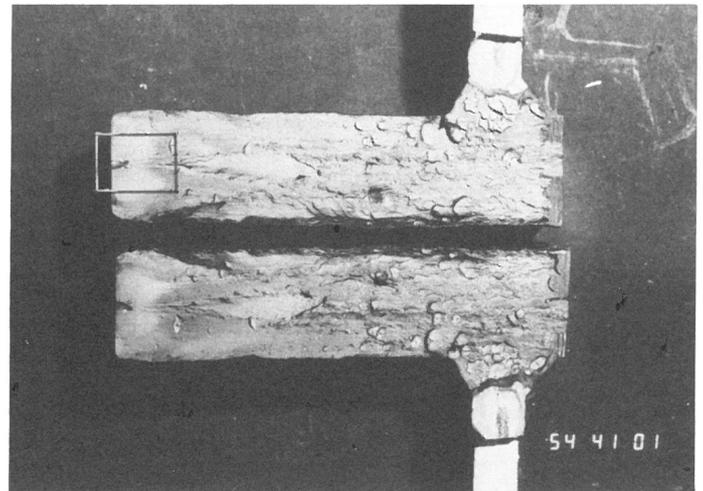
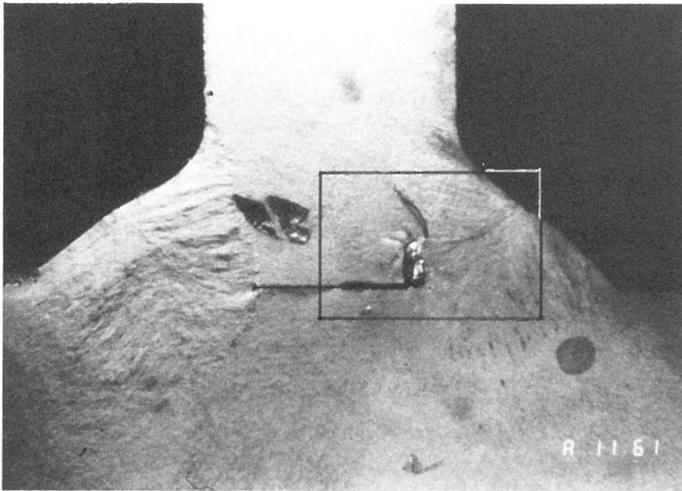


Bild 7.2-4
Bruchausgang an einem schalenartigen Schlackeneinschluß im Wurzelbereich einer Automaten-geschweißten (UP) Doppelkehlnaht (Fehlertyp 1 gem. Tabelle 7.2-1); Träger-Nr. A1-16, Bruch-Nr. 1

Bild 7.2-5
Bruchausgang an einem Bindefehler an der Gurtaußenkante im Bereich der Füllagen (Fehlertyp 2 gem. Tabelle 7.2-1); Träger-Nr. S4-41, Bruch-Nr. 1

traten aber auch an Nahtansatzstellen ohne Endkrater auf. In seltenen Fällen lagen Schweißspritzer auf dem Endkrater vor. Hauptsächlichste Ursache für Ermüdungsrißbildung an Endkratern ist neben der hier geringfügigen Schwächung des Nahtquerschnitts das schlechte Gefüge des Schweißwerkstoffs an dieser Stelle. Die Verunreinigungen im Schweißbad konzentrieren sich im Gebiet der zuletzt flüssigen Phase (Seigerung). In diesem Gebiet wirkt sich dann der Kerbeinfluß durch eine wulstförmige oder schuppige Ansatzstelle noch verstärkend aus. Bei den Automaten-geschweißten Trägern trat dieser Fehlertyp im Bereich von E-Hand-Ausbesserungen auf.

- Brennschnittkante:

Bei den Doppelkehlnähten wurden relativ häufig Bruchausgangsstellen an der Brennschnittkante des Stegbleches im

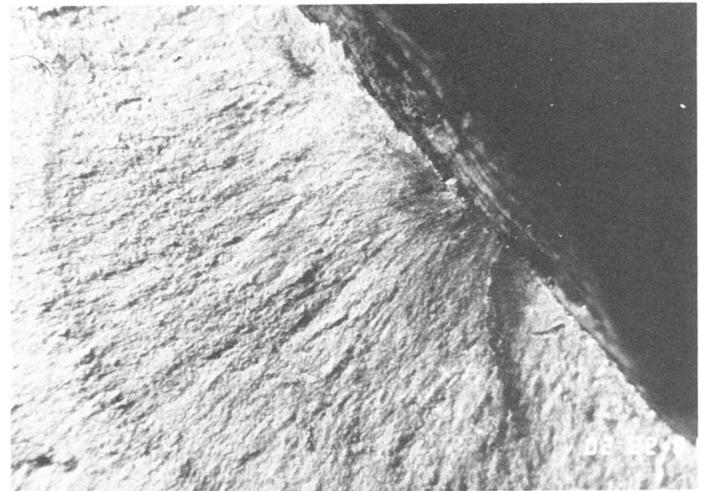
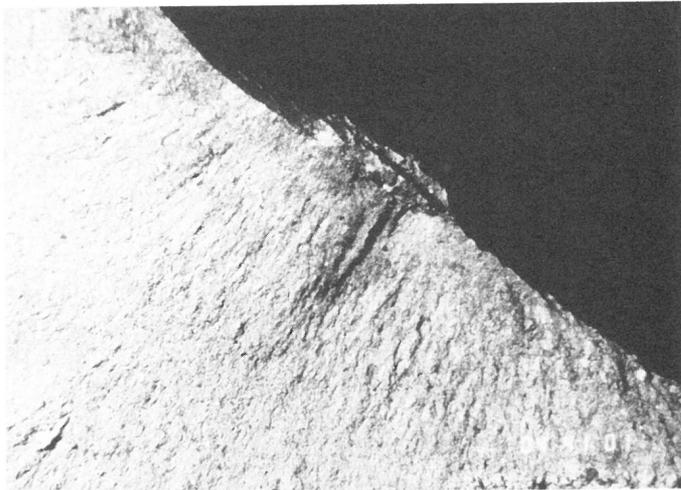
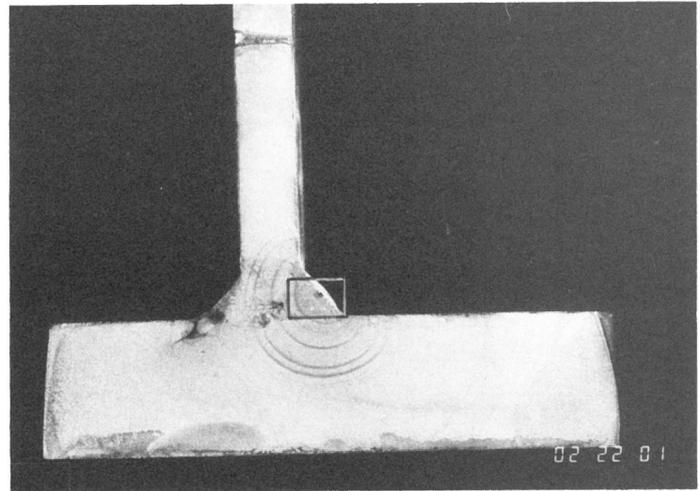
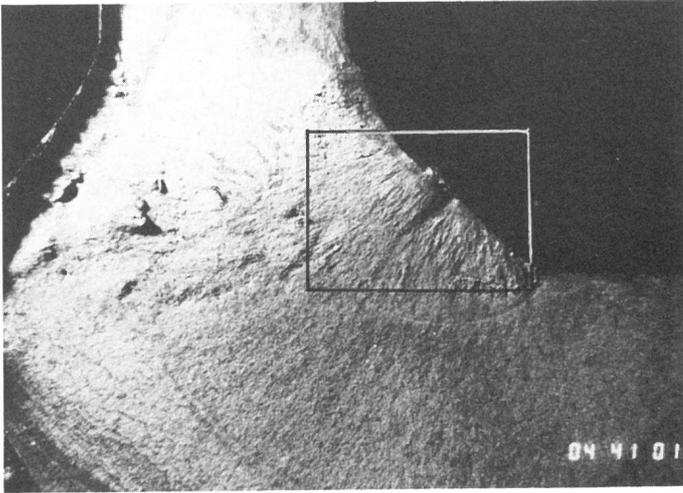


Bild 7.2-6
Bruchausgang an einem nicht aufgeschmolzenen Endkrater auf der Decklage einer DHV-Naht (Fehlertyp 3 gem. Tabelle 7.2-1); Träger-Nr. 04-41, Bruch-Nr. 1

Bild 7.2-7
Bruchausgang an einer Nahtansatzstelle auf der Decklage einer DHV-Naht (Fehlertyp 3 gem. Tabelle 7.2-1); Träger-Nr. 02-22, Bruch-Nr. 1

Spalt zwischen den beiden Wurzeln der Halsnähte festgestellt (Bild 7.2-8). Oft lag hier eine weitere Ausgangsstelle am zum Teil auch mit Schlackeeinschlüssen aufgefüllten Wurzelspalt vor, die aber als sekundär interpretiert wurde, wenn ein Fortschreiten des Dauerbruchs um den Spalt herum erkennbar war. Eine vertiefte Analyse dieser Ausgangsstellen im Hinblick auf Brennschneidfehler wurde nicht vorgenommen.

Eine einordnende Zusammenstellung der Schwingbruchausgangsstellen ist in Tabelle 7.2-1 wiedergegeben. Danach ergibt sich eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Anrißhäufigkeiten auf die Arten der schwingbruchauslösenden Imperfektionen. Besonders häufig sind mit rd. 24% und 23% die Fehlertypen 4 (vermutlich Querrisse in der WEZ bei Halsnähten) und 3 (nicht aufgeschmolzene Endkrater und/oder Naht

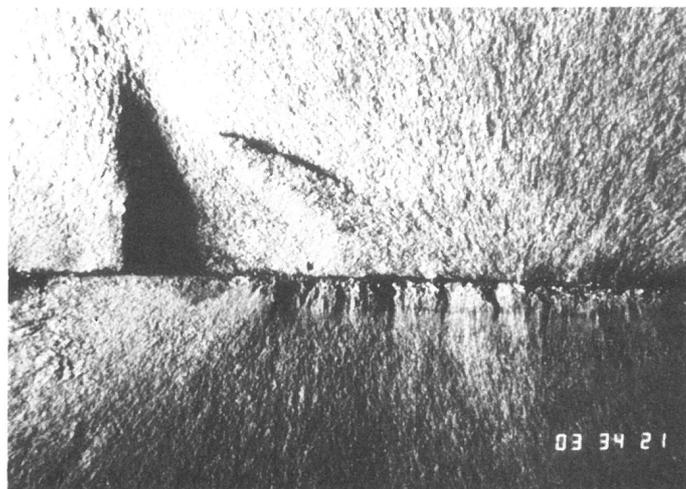
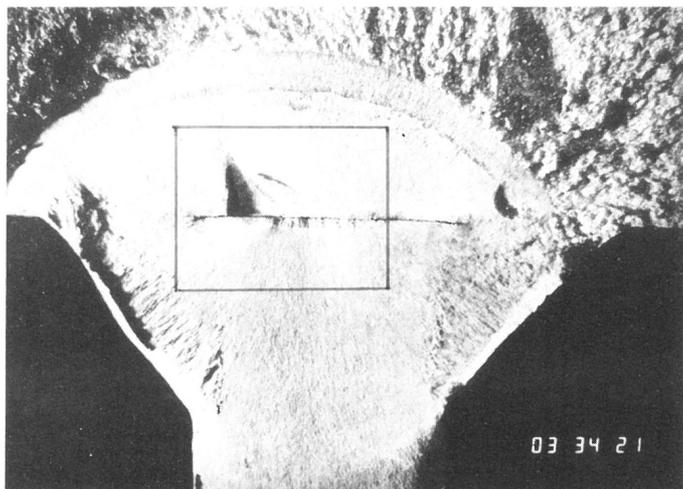


Bild 7.2-8
Bruchausgang an einer Brennschnittkante im Stegblech (Fehlertyp 8 gem. Tabelle 7.2-1);
Träger-Nr. 03-34, Bruch-Nr. 21

ansatzstellen). Etwa halb so oft treten die Typen 8 (Brennschnittkanten) und 2 (Bindefehler in Stoßnähten) mit rd. 11% und 9% auf, gefolgt von Typ 1 (Wurzelfehler) mit rd. 8%. Die übrigen Fehlertypen fallen weniger ins Gewicht, wobei zu erwähnen ist, daß im Zwangslagenbereich die Einbrandkerben, die Längsrillen zwischen Schweißraupen, sowie die nach außen tretenden Flankenbindefehler von geringer Tiefe weitgehend ausgeschliffen wurden, was dann in Einzelfällen zu Typ 10 (Kerbwirkung der Hohlkehle) führte. In rd. 3% der Bruchflächen war die Bruchausgangsstelle nicht identifizierbar (Fehlertyp 12) und rd. 6% der Bruchflächen konnten nicht freigelegt werden bzw. sind verlorengegangen (Typ 13).

Beachtenswert ist, daß die bei großen Bauteilen dieser Art vermeidbare Grundwerkstoffbeschädigungen (Fehlertyp 11) auch trotz größerer Sorgfalt nicht immer bemerkt und beseitigt wurden. Diese Fehlerart führte immerhin in 3% der Fälle zu Schwingungsbrüchen. Bei zwei Versuchsträgern (Träger Nr. SA1-16 und 04-43) war dieser Fehlertyp sogar die einzige Schwingbruchursache. Die im Rahmen dieser Untersuchung den Halsnahtbrüchen zugeordneten Bruchausgangsstellen, die von Brennschnittkanten der Stege ausgingen (Typ 8), könnten u.U. ebenfalls als Grundwerkstoffbeschädigungen angesehen werden.

8. Aussagekraft von zerstörungsfreien Prüfungen und von Fertigungsprotokollen im Hinblick auf rißrelevante Imperfektionen

Die Suche nach Schweißnahtinnenfehlern im Montagestoßbereich mit Hilfe der Durchstrahlungsprüfung führte zu unbefriedigenden Ergebnissen, obwohl der Aufwand hierfür sehr hoch war. Eine eindeutige Identifizierung der durch die Schwinganrisse angeschnittenen Schweißimperfektionen anhand von Röntgenbildern, die nach dem Schweißen aufgenommen worden waren, war nicht möglich. So wurden selbst größere Innenfehler, die im Gebiet der DHV-Naht im Stoßbereich freigelegt wurden, bei der Röntgenprüfung nicht aufgedeckt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde dann zusätzlich auch das Ultraschallverfahren im Bereich der Montageschweißung angewendet, bei dem sich aber eine ähnlich unbefriedigende Zuordnung von vorher aufgespürten zu nachher in den Schwingrißflächen freigelegten Schweißimperfektionen ergab wie bei der Durchstrahlungsprüfung. Ein wesentlicher Grund hierfür war, daß sich Schwinganrisse häufig in den Halsnähten bildeten, zum großen Teil in Kehlnähten.

Kehlnähte gelten unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als praktisch nicht ultraschall-prüfgerecht. Das sichere Auffinden von Fehlern in Kehlnähten ist wegen der unvermeidbaren Laufwegdifferenzen infolge von Formechos mit großen Schwierigkeiten verbunden. Ähnlich liegen die Verhältnisse im Übergangsbereich der Halsnähte von der Werkstattschweißung zur Montageschweißung, bei der die Doppelkehlnaht allmählich in die DHV-Naht übergeht. Wegen der sich dabei ständig ändernden, undefinierten Nahtdicke muß dieser Bereich ebenfalls als nicht prüfgerecht angesehen werden.

Der Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfung wurde nochmals genauer anhand des Trägertyps IV nachgegangen, dessen gesamte Gurt-Steg-Verbindung als prüffähige, durchgehende E-Hand-DHV-Naht ausgeführt war. Die Verbesserung der Prüfbarkeit der Halsnähte hatte jedoch auch hier keine verbesserte Übereinstimmung zwischen den Befunden der zerstörungsfreien Prüfung (Ersatz-Reflektor-Größe ERG >2 mm) und

der Lage der Schwinganrisse zur Folge. Trotz der großen Anzahl von Ultraschallanzeigen (insgesamt 93) einerseits und Schwingungsbrüchen (insgesamt 30) andererseits stimmte die Lage von US-Anzeige und Ermüdungsriß nur in insgesamt drei Fällen überein.

Bei den automatisch UP-geschweißten Trägern wurden sämtliche durchgehenden Halsnähte ultraschallgeprüft, und zwar auch die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten praktisch als nicht prüfgerecht geltenden Doppelkehlnähte. Das sichere Auffinden von Fehlern in Kehlnähten ist - wie bereits oben erwähnt - generell mit Schwierigkeiten verbunden und erfordert einen größeren Aufwand als die US-Prüfung von DHV-Nähten. In den mittels Ultraschall untersuchten 4 Trägern ohne Stoß (durchgehende Halsnähte) stimmte die Lage von US-Anzeigen (insgesamt 21) und Ermüdungsrissen (insgesamt 11) in keinem einzigen Fall überein.

Die Koinzidenz zwischen den Lagen der Ermüdungsrisse und den Befunden der zerstörungsfreien Prüfung in Standardprüftechnik, d. h. bei Anwendung von Routine-Prüfköpfen, muß demnach als unzureichend bezeichnet werden. Durch die Anwendung von speziell für die Nahtform optimierten ZfP-Techniken ist - bei gleich guter handwerklicher Technik (Qualifikation des Prüfers U1 bzw. U2) - möglicherweise eine bessere Übereinstimmung erreichbar. Aus Kostengründen bleibt die Anwendung dieser Technik jedoch Sonderfällen vorbehalten.

Der sehr hohe Aufwand für die Protokollierung des Fertigungsablaufs der Träger war nur durch das grundsätzliche Interesse an möglicherweise noch unentdeckten Ursachen für die Bildung von Ermüdungsrissen in praxisorientiert hergestellten Schweißnähten gerechtfertigt. Wesentliche Erkenntnis ist die Beobachtung einer relativ weiten Variabilität im Fertigungsablauf unter realen Fertigungsbedingungen, sofern diese nicht durch strikte Anweisungen und Überwachungen von Seiten des Herstellbetriebes bewußt eingeschränkt ist. Hierzu gehören im wesentlichen

- Vorwärmung (ggf. auch beim Heften),

- Schweißfolge, Schweißrichtung,
- Nahtaufbau,
- Arbeitssorgfalt (z. B. Beschleifen von Brennschnittriefen, Anschleifen von Heftstellenansätzen, Aufschmelzen von Endkratern).

Darüber hinaus liefert das Protokoll Hinweise zur Entstehungsursache von zahlreichen Ermüdungsanrissen in den E-Hand-geschweißten Halsnähten. So konnten in 31 Fällen Anrisse, bei denen an der Ausgangsstelle Grobkornbereiche festgestellt wurden (zumeist war dies beim Fehlertyp 4 "Querriß" der Fall), den Fertigungsmerkmalen "Heftstelle" und "Nahtansatz" (Wurzellage, Gegenlage, Mittellage) zugeordnet werden. In weiteren 25 Fällen gingen Risse von auch im Protokoll vermerkten "Endkratern" aus.

Die Protokollierung des Fertigungsablaufs bei den Automaten-Schweißungen der Halsnähte erbrachte als wesentliche Erkenntnisse:

- Beim automatischen Schweißen der relativ langen Halsnähte (12 m) ließen sich Unterbrechungen nicht immer vermeiden. Ursachen für Unterbrechungen waren
 - Stromaussetzer (Unterbrechung des Lichtbogens),
 - Stocken der Drahtzufuhr (z.B. infolge eines notwendigen Wechsels der Drahtrolle),
 - Unterbrechungen der Schweißpulverzufuhr.
- Aus Bereichen der vor dem Automaten-Schweißen angelegten Heftstellen entwickelten sich praktisch keine Ermüdungsrisse.
- Einige Ermüdungsrisse gingen auch von Ausbesserungen (E-Hand-Schweißung) innerhalb der Automaten-geschweißten Halsnähte aus.

9. Bewertende Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse wurden hinsichtlich folgender Kriterien (Fragestellungen) ausgewertet:

- Wurden die Versuchsergebnisse an großen ungeglühten Trägern durch Mittelspannungen beeinflusst?
- Welchen Einfluß haben die bei großen Trägern vorkommenden Nahtformen, die unterschiedlichen Fertigungsverfahren und die unterschiedlichen Fertigungsbereiche (Trägerbereiche) auf die Anrißlebensdauer?
- Unterscheiden sich die bei großen Trägern vorkommenden Schweißnahtvarianten hinsichtlich der Neigung zur Ermüdungsrißbildung an inneren und äußeren Schweißimperfektionen?
- Wie gut stimmen die Versuchsergebnisse mit zulässigen Spannungen aus aktuellen Regelwerken überein?

Da bei den vorliegenden Untersuchungen kein technisch relevanter Mittelspannungseinfluß festgestellt werden konnte, können die Versuchsergebnisse für $R = -1$ und $R = 0,05$ zusammengefaßt in die Bewertung eingebracht werden.

Ein Einfluß des Fertigungsverfahrens auf die Lebensdauer bzw. auf die ertragbaren Spannungen im Zeitfestigkeitsgebiet zeigte sich nur bei den langen Halskehlnähten, bei denen eine Überlegenheit der Automaten-Schweißung (UP) gegenüber der E-Hand-Schweißung festgestellt wurde. Die aufwendigen DHV-Nähte wirken sich im Vergleich zu den wirtschaftlicher herstellbaren Doppelkehlnähten negativ aus. Letzteres gilt jedoch nur für das E-Hand-Schweißverfahren. Gleiches trifft auch zu für die am kritischsten einzuschätzenden Halsnahtübergänge, sofern diese wenigstens einseitig eine DHV-Naht aufweisen. Die Unterschiede sind zwar zum größten Teil statistisch abgesichert, jedoch nicht immer so groß, daß eine Zuordnung zu unterschiedlichen Kerbfällen zwingend geboten erscheint.

Bei den Montage-Stumpfstößen der Gurte (U- bzw. X-Naht) wurden signifikante Lebensdauer-Unterschiede zugunsten der U-Nähte festgestellt. Die Anrißschwingspielzahlen der Stumpfstöße (grundsätzlich E-Hand) unterschieden sich nicht drastisch von denen der Halsnähte.

Die durch Zahl der Anrisse beschriebene Neigung zur Rißbildung ist bei Bezug auf die Nahtlänge bei den UP-geschweißten Halsnähten geringer als bei den E-Hand-geschweißten. Insgesamt ist sie bei den durchlaufenden Halsnähten geringer als bei den Halsnahtübergängen und bei den Stumpfstößen der Gurte, die allerdings ein ungleich größeres Nahtvolumen haben. Verwendet man die Zahl der durchgeführten Versuche als Bezugswert, so ist die Neigung der Halsnähte zur Schwingrißbildung insgesamt größer als die der Stumpfnähte.

Die Versuchsträger enthielten verschiedene Schweißnahtformen, deren Kerbschärfe in den herangezogenen Regelwerken in ähnlicher Weise eingestuft wird (Zuordnung Nahtform/Kerbfall). Die für diese Kerbfälle zugelassenen Spannungen sind teilweise jedoch unterschiedlich.

Der Vergleich der an den Versuchsträgern erzielten Ergebnisse mit Festigkeitskennwerten einiger Regelwerke zeigt, daß nur die in DS 804 /2/ vorgeschriebenen zulässigen Spannungen eine nahezu schwingbruchsichere Auslegung ermöglichen. Voraussetzung ist aber, daß die in DS 804 für $R \geq 0$ vorgesehenen zulässigen Werte verwendet werden. Ein derartiges Vorgehen findet seine Berechtigung darin, daß bei den hier geprüften großen Bauteilen hohe Schweißeigenspannungen im Sinne von hohen Zug-Mittelspannungen wirksam sind. Bei welchen Bauteilformen und von welcher Bauteilgröße ab bei ungeglühten Teilen derart vorzugehen ist, ist noch zu klären.

Die Regelwerke wurden ursprünglich auf der Basis von Untersuchungen von relativ kleinen geschweißten Proben aufgestellt. Ein möglicher Größeneinfluß wurde dabei durch eingearbeitete Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Die Größeneinflüsse sind zum einen statistischer Art /31/, zum anderen wirken sich insbesondere bei manuellen Schweißverfahren zusätzlich auch fertigungstechnische Unterschiede aus. Dem Größeneinfluß wurde bei der Weiterentwicklung der Regelwerke in den letzten Jahren bereits dadurch Rechnung getragen, daß die zulässigen Werte mehrmals verringert wurden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch, daß auch nach der Absenkung der zulässigen Spannungen die erwarteten niedrigen Bruchwahrscheinlichkeiten bei den Halsnähten noch nicht ganz erreicht werden.

Wegen der sich überschneidenden unterschiedlich großen

Streuungen scheinen sich alle Ergebnisse dem gleichen Streufeld (σ_a ; N_A) zuordnen zu lassen. Erst die statistische Auswertung ergibt signifikante, teilweise aber nur geringe Unterschiede. Die festgestellten Unterschiede der Lebensdauer-Mittelwerte (bzw. Zeitfestigkeitswerte) können wegen der unterschiedlichen Streuungen jedoch nicht in eine entsprechend fein abgestufte Kerbfallreihe umgesetzt werden.

Die nach unterschiedlichen Methoden durchgeführten zerstörungsfreien Untersuchungen der Schweißverbindungen in Standard-Prüftechnik ergaben zahlreiche Befunde, deren Lage und Größe jedoch nicht mit der Lage von Schwingungsbrüchen zu korrelieren war. Zerstörungsfreien Prüfverfahren kommt bei Konstruktionen der hier untersuchten Art offenbar nur die Bedeutung einer globalen Qualitätssicherung zu. Die Beobachtung, daß sich ein großer Teil der Ermüdungsrisse aus Schweißnahtinnenfehlern entwickelte, deutet an, daß die Möglichkeiten für technisch relevante Verbesserungen der Ermüdungsfestigkeit derartiger geschweißter Großbauteile durch Nachbehandlungsverfahren wie z.B. Beschleifen oder WIG-Nachbehandlung /34/ begrenzt sind.

9.1 Anmerkungen zum EUROCODE 3 (84)

Der EUROCODE 3 in seiner Fassung von 1984 stellt einen Regelwerksentwurf dar (siehe /12.3/). In der Zwischenzeit wurden in entsprechenden Fachgremien zahlreiche Änderungen beraten. Einige aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse empfehlenswerte Anpassungen wurden dabei bereits vorweggenommen:

Die vorgesehenen Änderungen /35/ betreffen zum einen die Einstufung E-Hand-geschweißter Halsnähte unter Längsbeanspruchung in eine niedrigere Kerbfallkategorie mit entsprechend reduzierten Spannungen, zum anderen die Einführung von zwei zusätzlichen Kerbfallkategorien mit verringerten zulässigen Spannungen für Automaten-geschweißte Halsnähte, womit die durch Ansatzstellen und E-Hand-Ausbesserungen verminderte Schwingfestigkeit angemessen berücksichtigt wird. Da künftig die blechdickenabhängige Spannungskorrektur nur noch ausschließlich bei querbeanspruchten Nähten erfolgen soll, sind die in Abschn. 5.3.2 geäußerten Bedenken gegen die Anwendung dieser Korrektur bei längsbeanspruchten Halsnähten berücksichtigt.

10. Danksagungen

Die vorliegenden Untersuchungen wurden in vier Teilvorhaben mit Mitteln der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), Köln, gefördert. Die fachliche Betreuung erfolgte in allen vier Abschnitten durch den Unterausschuß "Betriebsfestigkeit" im Deutschen Ausschuß für Stahlbau (DASt). Der dritte Teilabschnitt wurde zusätzlich von der VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH betreut.

Der für die Versuchsträger verwendete Stahl wurde zum größten Teil von der AG der Dillinger Hüttenwerke freundlicherweise kostenlos zur Verfügung gestellt. Die Fertigung der Träger erfolgte bei der Firma Krupp Stahlbau GmbH & Co KG Berlin unter Übernahme eines erheblichen Eigenanteils.

Allen Beteiligten, die diese über einen längeren Zeitraum sich erstreckenden Arbeiten durch Rat und Tat unterstützt haben, sei an dieser Stelle gedankt.

11. Literaturverzeichnis

- /1/ DV 848:
Vorschriften für geschweißte Eisenbahnbrücken. Deutsche Bundesbahn, Ausgabe 1955
- /2/ DS 804:
Vorschriften für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. Deutsche Bundesbahn, München, Ausgabe 1983
- /3/ DIN 15018:
Krane, Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnung. Beuth Verlag, Berlin 1984
- /4/ DIN 4132
Kranbahnen, Stahltragwerke, Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung. Beuth Verlag, Berlin 1981
- /5/ DAST-Richtlinie 011:
Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle St E 460 und St E 690, Anwendung für Stahlbauten. Stahlbau-Verlag, Köln 1979
- /6/ Germanischer Lloyd
Vorschriften für Konstruktionen und Prüfung von Meerestechnischen Einrichtungen. Band 1: Meerestechnische Einheiten (Seebauwerke) Ausgabe 1976
- /7/ TRB-Technische Regeln für Druckbehälter, TRB 300 Berechnung, S2: Berechnung auf Schwingbeanspruchung. Sept. 1981
- /8/ Deutscher Ausschuß für Stahlbau:
Dauerfestigkeitsprogramme I ... VII
- /9/ R. Olivier, W. Ritter:
Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen. Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), Düsseldorf.
Teil 1: Stumpfstoß. (1979)
Teil 2: Quersteife. (1980)
Teil 3: Doppel-T-Stoß. (1981)
Teil 4: Längssteife. (1982)
Teil 5: Längskehlnaht, aufgeschweißter Bolzen, Brennschnittkante. (1985)
- /10/ W. Stier:
Gedanken zur Entwicklung der neuen Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (DS 804) der Deutschen Bundesbahn. Stahlbau 50 (1981), S. 226/232
- /10.1/ → S. 229
- /10.2/ → S.228
- /11/ T. Seeger, R. Olivier:
Ertragbare und zulässige Schubspannungen schwingbeanspruchter Schweißverbindungen. Stahlbau 56 (1987), S. 231/238

- /12/ EUROCODE 3:
Gemeinsame einheitliche Regeln für Stahlbauten.
Stahlbauverlagsgesellschaft mbH, Köln, 1984
- /12.1/ Abschnitt 9.5.4.2 → S. 9.10/9.11
- /12.2/ Abschnitt 9.5.1 → S. 9.9
- /12.3/ Vorwort, Abschnitt 1.2 → S. 0.3

- /13/ Europäische Konvention für Stahlbau – Technische Kommission 6 – Ermüdung:
Empfehlungen für die Bemessung und Konstruktion von ermüdungsbeanspruchten Stahlbauten. EKS-Publikation Nr. 43, Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau, CH-8034 Zürich, Postfach, 1987

- /14/ DIN 18800, Teil 6:
Stahlbauten; Bemessung und Konstruktion bei häufig wiederholter Belastung (Betriebsfestigkeit). Entwurf, 1987

- /15/ N.N:
Ermüdungserscheinungen in Schweißverbindungen von Brücken und Kränen. (Frage D 130). Interner Bericht des Forschungs- und Versuchsamtes des internationalen Eisenbahnverbandes (ORE) Bericht Nr. 10 (Schlußbericht), Utrecht, April 1979.

- /16/ M.A. Hirt:
Fatigue behavior of rolled and welded beams. Ph. D. Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, Oct. 1971

- /17/ P.A. Albrecht:
Fatigue strength of welded beams with stiffeners. Ph. D. Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, July 1972

- /18/ EUR 5386 e
Synthesis of cooperative fatigue investigations with notched plates and welded ship structures of St 42 and St 52. Commission of the European Communities Luxembourg, 1975

- /19/ M.A. Hirt u. J.W. Fisher:
Fatigue crack growth in welded beams. Engineering Fracture Mechanics 1973, Vol. 5, pp. 415/429

- /20/ E. Haibach:
Die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Bericht Nr.FB-77 (1968)

- /21/ Collection of reference radiographs of welds.
Herausgeber: International Institute of Welding, London und Paris, (ohne Jahresangabe)

- /22/ DVS Fehlerkatalog
Richtreihe für die Beurteilung von Schweißfehlern
DVS-Verlag Düsseldorf, 1962

- /23/ DIN 8563, Teil 3
Sicherung der Güte von Schweißarbeiten. Ausgabe 1985

- /24/ AD-Merkblatt HP 5/3
Herstellung und Prüfung von Druckbehältern; Herstellung und Prüfung der Verbindungen; Zerstörungsfreie Prüfung der Schweißnähte. Entwurf 1974
- /25/ P. Gummert, K.-A. Reckling:
Mechanik. Vieweg Verlag, Braunschweig 1986, S. 636 ff
- /26/ H. Neuber: Kerbspannungslehre. Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 2. Aufl. 1958
- /27/ U. Wolfstieg:
Röntgenographische Eigenspannungsmessungen an einem Eisenbahnbrückenträger. Unveröffentlichter Bericht aus dem Lehrstuhl und Institut für Werkstoffkunde I, Universität Karlsruhe, 1978
- /28/ T. Seeger
Private Mitteilung vom 18.7.89, entnommen aus:
R. Olivier:
Unveröffentlichte Untersuchungen zum Einfluß der Blechdicke bei Schweißverbindungen. Institut für Stahlbau u. Werkstoffmechanik, TH Darmstadt.
- /29/ L. Sachs:
Angewandte Statistik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Auflage, 1974, → S. 209/216
- /30/ DIN 8524:
Fehler an Schweißverbindungen aus metallischen Werkstoffen. Teil 1: Schmelzschweißen, Ausgabe Juli 1986
- /31/ J. Köhler:
Statistischer Größeneinfluß im Dauerschwingverhalten ungekerbter und gekerbter metallischer Bauteile. Dissertation, TU München, 1975
- /32/ T. Seeger: Private Mitteilung vom 22.2.89
- /33/ T. Seeger, J. Degenkolbe, R. Olivier, W. Ritter:
Einfluß einer Bewitterung auf die Schwingfestigkeit wetterfester Baustähle. Stahl u. Eisen 107 (1987), S. 479/487, → S. 485
- /34/ H.H. Minner, T. Seeger:
Erhöhung der Schwingfestigkeiten von Schweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen durch das WIG-Nachbehandlungsverfahren. Der Stahlbau 46 (1977), S.257/263
- /35/ J. Oxfort: Schriftliche Mitteilung vom 2.8.89
- /36/ Richtlinien des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen:
Berechnungsgrundlagen für Großgetriebe in Tagebauen. Ausgabe 1986
- /37/ Richtlinien des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen:
Sicherung der Güte von Schweißarbeiten. Ausgabe 1982

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungssaiten als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkverdichtete für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/1972

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütere beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/1973

Das Sprödbbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften

von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung

von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/1976

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/1976

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/1976

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/1976

Das Sprödbbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/1976

Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/1976

Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/1977 (vergriffen)

Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/1977

Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/1977

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner

Nr. 49/1977

Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/1978 (vergriffen)

Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/1978

Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/1978

Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/1978

Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54/1978

Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/1978

Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/1979

Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie

Nr. 57/1979

Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

- Nr. 58/1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrie mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines vollzentrischen Präzisionsgoniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitskapseln (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/(vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Swellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltbrühe höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworski
- Nr. 83/1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
— Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982
Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ —
Materials Research and Testing
— Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme “Basic Technological Research” —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügekennkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983
Untersuchungen der Störsschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren
— Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984
Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985
Zur Wirkung der Schrumpfbegrenzung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985
Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützw
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)

- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985
Farbempfindungsmerkmal Elementaruntun und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985
Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung
Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht
- Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/1986
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/1986
Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Förberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/1986
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organischer Baustoffe entstehenden Brandgase
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch
- Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/1986
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas
- Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/1986 (vergriffen)
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst
- Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/1986
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X/1986
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 131/ISBN 3-88 314-585-8/1986
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 132/ISBN 3-88 314-595-5/1987
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
von Dipl.-Ing. Christian Herold und Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Vogdt
- Nr. 133/ISBN 3-88 314-609-9/1987 (vergriffen)
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
von Dipl.-Ing. Mathias Woydt und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 134/ISBN 3-88 314-615-3/1987
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
von Dr. Götz Andreae und Gottfried Niessen
- Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/1987
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
von Dipl.-Ing. Jörg Ludwig, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Mischke und Dipl.-Ing. Armin Ulrich
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
von Prof. Dr. rer. silv. Hans-Joachim Deppe und Klaus Schmidt
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Komponentensicherheit
Projektleiter: Dr. Dietmar Aurich
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
von Dipl.-Geol. Michael Dogunke und Dr.-Ing. Frank Buchardt
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle.
von Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski und Sven-Peter Scholz
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
von Dr.-Ing. Frank Buchardt, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Ing. Günter Krüger, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Dr. rer. nat. Sigrid von Zahn-Ullmann
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen
- zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung**
Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
von/by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
von Dr.-Ing. Frank Buchardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Michael Weber, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr.-Ing. Jürgen Altes,
Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
von Dr.-Ing. Ulrich Holzjöhner
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
von Dipl.-Ing. Wolfgang Schön und Dipl.-Ing. Michael Mallon
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
von Dipl.-Ing. Hans-Dieter Kleinschrodt
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
von Dipl.-Ing. Wilfried Müller
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988
Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
von Dr.-Ing. Ulrich Holzjöhner
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988
VG3D Zeichenprogramm für die Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch-Saworski
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
von Dr.-Ing. Günther Plauk, Dipl.-Ing. Günter Kretschmann, Dipl.-Ing. Rolf-G. Rohrmann
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander, Professor Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
von Dr. rer. nat. Konrad Breittkreutz, Dr. rer. nat. Rüdiger Uttech, Dr.-Ing. Kurt Haedecke
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
von Dr.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
von Dr.-Ing. Günter Klamrowski, Dipl.-Ing. Paul Neustupny, Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe, Ing. Klaus Schmidt und Dr.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dr.-Ing. Klaus Brandes
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht —
von Dr.-Ing. Rolf Wäsche und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Haus-schornsteinen nach DIN 18160 Teil 6

von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989

Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten

von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989

Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen

von Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989

Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben

von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner

Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989

Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen

von Dipl.-Ing. Wolfgang Brünner, Dipl.-Ing. Günter Mellmann, Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989

Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger

Rolf Helms, Bernd Jaenicke, Hartmut Wolter, Claus-Peter Bork

Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989

Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission.

Teil B: Textilien

von Dipl.-Chem. Petra Göbel, Dr.-Ing. Lothar Meckel, Dr. rer. nat. Wolfgang Schiller

Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989

Modelle für Stereologische Analysen

von Dr. rer. nat. Konrad Breikreutz

Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989

Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen

von Dipl.-Ing. Alkiviadis Mitakidis, Dr.-Ing. Werner Rucker

Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990

Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels

von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dr.-Ing. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990

Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)

von Dipl.-Ing. Christian Kohl, Dr.-Ing. Werner Rucker

Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990

Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen

von Dr. rer. nat. Peter Studt, Dr. agr. Waltraut Kerner, Dr. Tin Win