

Udo Peil
Tina Hoeft
Matthias Reininghaus
Michael Wichers

Schweißen unter dynamischer Einwirkung

Im Verlauf von Instandhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen kann es erforderlich werden, Reparaturschweißungen an Bauwerken unter dynamischer Beanspruchung, d. h. bei gleichzeitiger Bewegung der Schweißnahtflanken durchzuführen. Aufgrund des Fehlens von technischen oder normativen Regelungen ist eine derartige Vorgehensweise im bauaufsichtlichen Bereich nicht zulässig, so dass häufig aufwendige Entlastungskonstruktionen zur Fixierung der Nahtflanken notwendig werden. In einigen Fällen lässt sich die dynamische Beanspruchung auch nicht beseitigen und damit eine Nahtflankenbewegung nicht verhindern. Mit Hilfe schweißtechnischer Simulationen in einer zweiachsigen, vollautomatischen Prüfmaschine wird daher untersucht, inwieweit Schweißungen unter Bewegung sinnvoll herzustellen sind. In der nachstehenden Ausführung werden Ergebnisse zum statischen und dynamischen Tragverhalten unter Bewegung geschweißter Nähte gezeigt.

Welding under dynamic loads. *During maintenance and repair works it is often necessary to weld a dynamically strained structure, i.e. to weld while the welding flanks are moving. No rules or standards are focussed on this problem. Therefore complex auxiliary constructions are necessary to relieve the strain of the structure, if an unloading is possible at all. Thus criteria are developed which indicate under which conditions welds with moving flanks can be produced successfully. Many experimental welding simulations are performed by means of a bi-axial, automatic test equipment to investigate to which extent welds in motion can be made with acceptable results. In this paper the results of the static and dynamic load-tests of welds produced under motion are presented.*

1 Einleitung

Die Erhaltung bestehender Bauwerke nimmt einen immer größeren Anteil im Baugeschehen ein. Technisch und wirtschaftlich günstige Lösungen von Instandhaltungs- und Sanierungsmaßnahmen sind deshalb sehr gefragt. Sanierungs-, Erhaltungs-, Verstärkungs- oder Umbaumaßnahmen müssen häufig unter dynamischer Beanspruchung durchgeführt werden. Beispiele hierfür sind Schweißarbeiten an Brücken, deren Sperrung für die Dauer der Reparaturarbeiten nicht möglich oder unwirtschaftlich ist. Auch an Bauwerken, bei denen eine dynamische Belastung nicht verhindert werden kann, z. B. Wind- oder Wellenbewegung bei Türmen, Masten oder Offshore-Anlagen, müssen Reparaturarbeiten unter dynamischen Einwirkungen durchgeführt werden. Diese dyna-

mischen, d. h. zeitlich veränderlichen Einwirkungen können eine Verschiebung der Schweißnahtflanken zueinander bewirken, was zu einer Beeinträchtigung der Nahtqualität führen muss. In den einschlägigen Regelwerken gibt es keine Vorgaben für die Ausführung und Bewertung von Schweißnähten unter Betriebsbeanspruchung.

Ziel des Vorhabens ist es deshalb, den Einfluss einer während des Schweißprozesses zeitlich veränderlichen Nahtflankenbewegung bzw. Nahtbeanspruchung auf die Güte der Schweißnaht zu klären. Die Veränderung der Schweißnahtgüte infolge der Relativbewegung der Nahtflanken zueinander wird durch Vergleiche mit in Ruhe geschweißten Nähten gleicher Ausbildung untersucht. Beurteilt werden die unter Bewegung geschweißten Nähte hinsichtlich ihrer statischen sowie ihrer dynamischen Tragfähigkeit.

2 Schweißversuche

2.1 Versuchsaufbau

Die Schweißversuche wurden in einem vollautomatischen Versuchsstand im Institut für Stahlbau der TU Braunschweig durchgeführt, Bild 1. In dem Versuchsstand können Probenbleche bei Einhaltung kleinstmöglicher Toleranzen zweiachsig bewegt werden. Die Probenhälften sind auf gegeneinander verschiebbare Lagerschlitten mittels Presspassung aufgeschraubt, Bild 2, so dass beliebige zwei-dimensionale Verschiebungsmuster realisiert werden können, vgl. Bild 3.

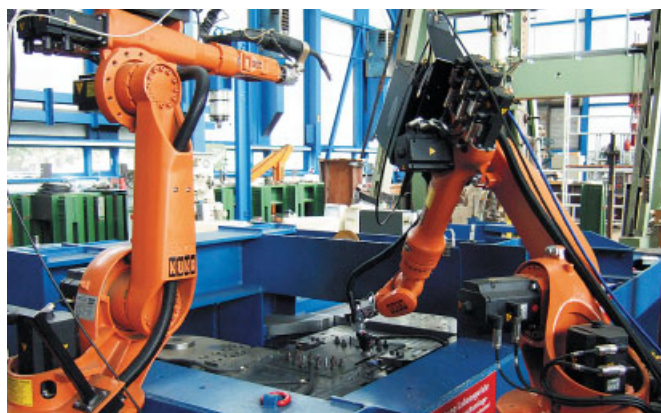


Bild 1. Versuchsstand mit Schweißroboter
Fig. 1. Experimental set-up with welding robot

Während der Versuchsdurchführung werden zwei je 6 mm dicke Blechproben der Stahlgüte S355 J2 einlagig mittels V-Naht miteinander verschweißt. Die Nahtvorbereitung sieht einen Öffnungswinkel von 45° und eine Reststeghöhe von 1 mm vor. Um sowohl bei der Probenherstellung als auch bei der Schweißnahtvorbereitung eine gleichbleibende Qualität sicherzustellen, erfolgt die Herstellung der Probenbleche auf einer CNC-gesteuerten Fräsmaschine. Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit bzw. zur Ausschaltung des Parameters menschliche Störgröße erfolgt das Verschweißen vollautomatisiert mittels Schweißroboter.

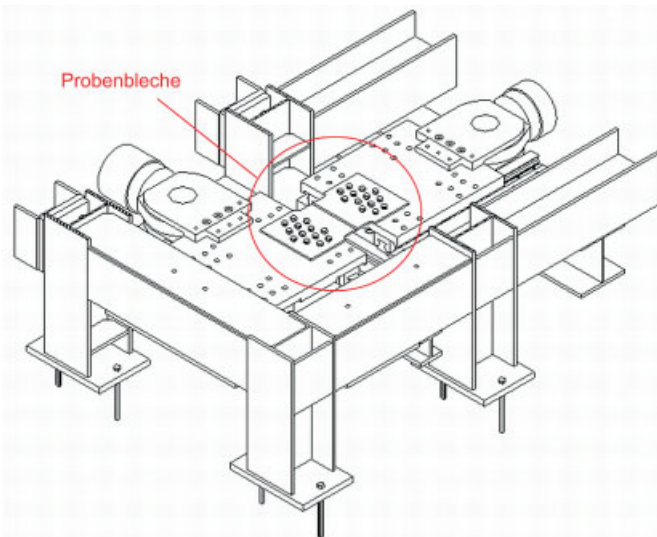


Bild 2. Versuchsrahmen mit Probenblech
Fig. 2. Testing frame with specimen

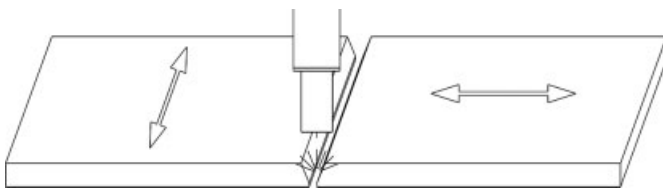


Bild 3. Prinzipskizze der Schweißversuche
Fig. 3. Concept of welding tests

Die Beanspruchung der Proben, genauer die Relativbewegung der Probenbleche zueinander, wird weggesteuert vorgenommen. Um eine einwandfreie Messung (und damit präzise Regelung) unter den extremen Bedingungen bei der Schweißung (Temperatur, Magnetfeld, Rauch) zu ermöglichen, wird ein Messsystem auf Wirbelstrombasis verwendet.

Zu Beginn der Schweißung sind beide Blechproben vollständig voneinander getrennt. Die aufzubringende Kraft beschränkt sich auf ein Minimum, welche zur Bewegung der Lagerschlitten erforderlich ist (Reibbeiwert 0,001). Mit zunehmender Schweißnahtlänge steigt die Kraft an. Der aufgebrachte Weg stellt sich in Form einer Dehnung der Probenbleche bzw. der Schweißnaht selbst dar. Die größte Dehnung erfahren dabei die Bereiche höherer Temperatur und damit niedrigster E-Moduln. Mit der Abkühlung der Probe gleicht sich die Dehnungsverteilung

im Probenblech an, wobei es zu einer Überlagerung mit den Eigenspannungen kommt.

2.2 Schweißparameter

Wie dargelegt, wird das Verschweißen der Probenbleche vollautomatisiert mittels Schweißroboter vorgenommen. Als Schweißverfahren kommt das MAG-Schutzgasschweißen mit Impulslichtbogentechnik zum Einsatz. Dieses Verfahren gewährleistet eine optimale Anpassung an die Schweißaufgabe und einen nahezu spritzerfreien Schweißprozess. Das Verschweißen erfolgt mittels einer Schweißdrahtelektrode $\varnothing 1,2$ mm vom Typ DIN EN 440-G 50 3 M G4Si1 unter Mischgas M21 (18 % CO₂ und 82 % Argon) bei einem Schutzgasstrom von 15 l/min. Die Pulsfrequenz während des Schweißprozesses beträgt 148 Hz bei einer mittleren Stromstärke von 150 A und einer Schweißspannung von 23,7 V. Der eingestellte Drahtvorschub folgt zu 4,8 m/min bei einer Schweißgeschwindigkeit von 27 cm/min.

2.3 Parameter der Nahtflankenverschiebung

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass in einem bestimmten Parameterfeld mit den Öffnungsamplituden im Bereich zwischen 0,1 bis 1,1 mm und Frequenzen von 0,25 bis 7,0 Hz ein Verbindungsschweißen möglich ist, s. Bild 4. Als „erfolgreiche“ Proben wurden dabei diejenigen gekennzeichnet, die augenscheinlich noch keine größeren Risse aufwiesen. Oberhalb der gestrichelten Grenzlinie in Bild 4 kommt es zum Auftreten größerer Risse, oder es kommt zum Versagen der Schweißnaht bereits beim Ausbau der Probe.

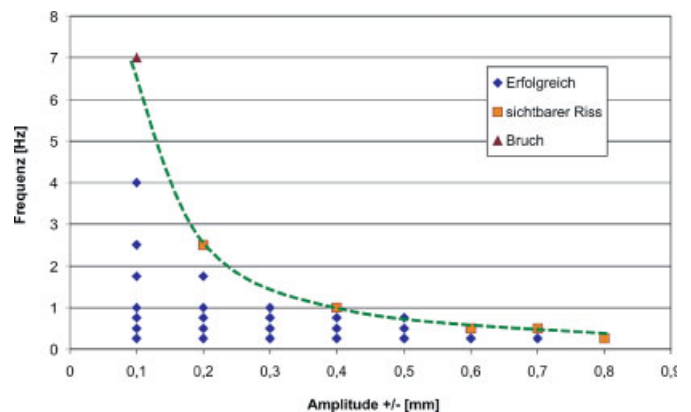


Bild 4. Parameterfeld der Schweißversuche [8]
Fig. 4. Parameter field of welding tests [8]

3 Metallurgische Betrachtungen

Grundsätzlich weisen sämtliche Versuchskörper, die unter Bewegung verschweißt wurden, regelmäßige Raster von Heißrissen in der Schweißnahtmitte auf. Diese sind in den Röntgenaufnahmen über die gesamte Probenbreite gut sichtbar, s. Bild 5. Rissgröße und Abstand korrelieren mit der Verschiebungsamplitude bzw. -frequenz. Mit zunehmender Frequenz kommt es zu einem Zusammenwachsen der Teilrisse, bis eine durchgehende Bauteiltrennung in Nahtmitte vorliegt. Als Grenze wurde bei den vorliegen-

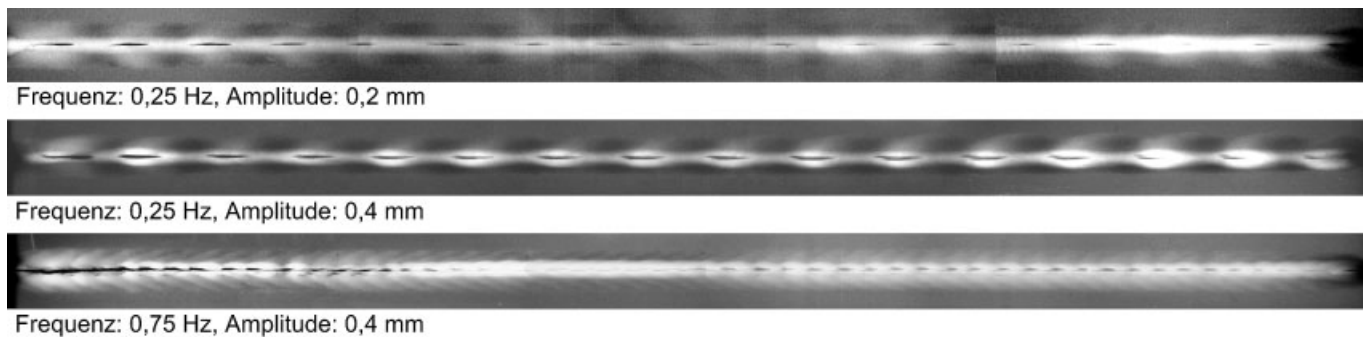


Bild 5. Röntgenaufnahmen von unter Bewegung geschweißten Blechen
Fig. 5. Radiography of welding tests under service loads

den Randbedingungen eine Frequenz der Nahtflankenverschiebung von 7,0 Hz bestimmt [8].

Die Heißrisse entstehen im Wesentlichen während der Kristallisation der Schweißschmelze im Bereich zwischen der Solidus- und Liquidustemperatur des Werkstoffes und werden auch als Erstarrungsrisse bezeichnet [7]. Die sich vor der Kristallisationsfront bildende Restschmelze weist steigerungsbedingt eine niedrigere Erstarrungstemperatur als die sich bildenden Dendriten auf. Gegen Ende des Erstarrungsvorganges kann es zum Auftreten von Rissen kommen, wenn die noch vorhandene Restschmelze nicht mehr ausreicht, um verformungsbedingte Gefügetrennungen, welche aus äußerer und/oder innerer Beanspruchung herrühren, auszuheilen [1]. Der Rissverlauf erfolgt interkristallin oder interdendritisch.

Bei einer Schweißung unter dynamischer Bewegung der Schweißnahtflanken entstehen zusätzliche Verformungen bzw. Dehnungen, welche sich zu den Dehnungsbeanspruchungen aus dem Schrumpfungsprozess der Abkühlphase addieren und so die Entstehung von Heißrissen begünstigen. In Bild 6 ist beispielhaft ein solcher Riss dargestellt. Größere Verschiebungsamplituden und -frequenzen bewirken dabei ein Risswachstum bis an die Bauteiloberflächen.

4 Statische Festigkeit von unter Bewegung geschweißter Bleche

Aus den verschweißten Blechen wurden jeweils sechs Proben gewonnen, Bild 7, deren Arbeitslinien mit Hilfe klassischer Zugversuche bestimmt wurden. Es zeigt sich, dass die Qualität der Schweißnaht am Nahtanfang geringer ist als die am Nahtende. Dieser Unterschied ist durch die fortwährende Verschiebung der Nahtflanken während des Schweißprozesses bedingt. Die Amplitude der Nahtflankenverschiebung verringert sich zunehmend, da die Bleche selbst einen immer größeren Teil der Verschiebung aufnehmen. Aufgrund des Schrumpfungsprozesses in der abkühlenden Schweißnaht, nimmt der mittlere Stegabstand während des Schweißprozesses ab, so ist er am Nahtende ca. 0,15 mm geringer als am Nahtanfang.

In Bild 5 lässt sich diese Problematik bereits ablesen. Am Nahtanfang links sind größere Risse als rechts am Nahtende zu erkennen. Interessant ist, dass die statische Zugfestigkeit am Nahtanfang zumindest bei geringen Verschiebungsamplituden nur sehr wenig gegenüber der Zugfestigkeit am Nahtende abfällt. Bei großen Verschiebun-



Bild 6. Schliffbild einer unter Bewegung geschweißten Naht (Frequenz 0,25 Hz, Amplitude 0,2 mm)

Fig. 6. Micrograph of welding under service loads (frequency 0.25 Hz, amplitude 0.2 mm)

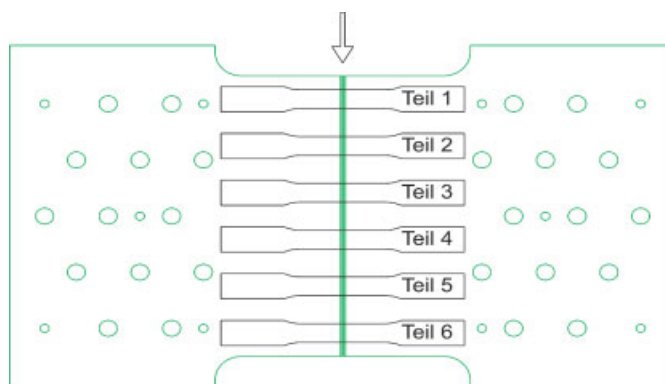


Bild 7. Lage der Teilproben auf dem verschweißten Blech
Fig. 7. Location of the local specimens on the welded plate

gen wird der Unterschied deutlicher, s. Bild 8. Bei der Ermüdungsfestigkeit wird dieser Unterschied auch schon bei kleinen Verschiebungsparametern signifikant groß.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass sowohl die Zugfestigkeit als auch die Bruchdehnung eine enge Korrelation zur vorliegenden Beanspruchung während des Schweißprozesses aufweisen. Eine Steigerung der Frequenz sowie auch eine Erhöhung der Verschiebungsamplitude führen zu einem Rückgang der Tragfähigkeit und der Duktilität der Schweißverbindung. Bild 9 zeigt das Verhältnis der Höchstzugkräfte im Zugversuch unter Be-

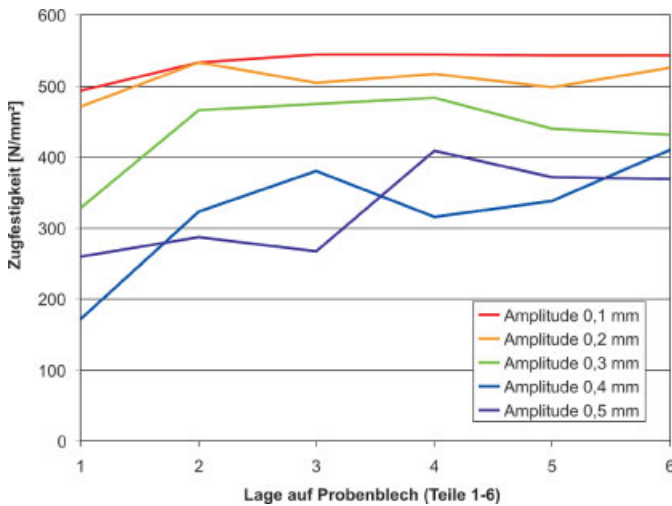


Bild 8. Höchstzugkräfte bezogen auf die Länge der Schweißnaht (Frequenz 0,5 Hz)
 Abb. 8. Tension forces with respect to the length of the weld (frequency 0.5 Hz)

wegung geschweißter Proben zu in Ruhe geschweißten Proben. Es ist deutlich zu erkennen, dass sowohl eine Zunahme der Verschiebungsamplitude als auch eine Zunahme der Frequenz während des Schweißprozesses zu einem Abfall der maximalen Zugfestigkeit der Schweißverbindung führt. Dabei fällt die maximale Zugfestigkeit der Schweißverbindungen mit Steigerung der Verschiebungsamplitude bzw. -frequenz zunächst nur mäßig ab. Ab einer bestimmten Amplitude kommt es jedoch zu einem signifikanten Abfall [8]. Man erkennt, dass auch eine unter Bewegung geschweißte Naht mindestens noch eine Festigkeit von 50 % der ungestört geschweißten Naht aufweist, wenn die Verschiebungsamplituden kleiner $\pm 0,6$ mm und die Frequenzen kleiner als 2,5 Hz sind [8]. Die Abhängigkeiten sind in Bild 9 dargestellt.

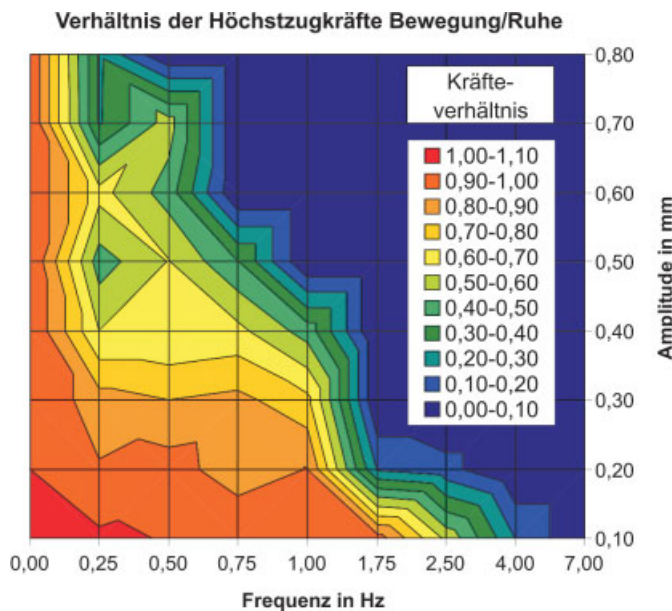


Bild 9. Verhältnis der Höchstzugkräfte der Zugproben im Zugversuch ($F_{\text{Bewegung}}/F_{\text{Ruhe}}$) [8]
 Fig. 9. Relationships of tension forces between movement and calm ($F_{\text{movement}}/F_{\text{calm}}$) [8]

Die mittleren Bruchdehnungen der unter Bewegung geschweißten Proben zeigt Bild 10. Besonders empfindlich reagiert die Bruchdehnung auf eine Vergrößerung der Verschiebungsamplitude. Bereits kleinste Erhöhungen der Amplitude führen zu einem überproportionalen Rückgang der Bruchdehnung. Ursächlich hierfür scheint die Oberflächenbeschaffenheit der Heißrissflanken zu sein [8].

Die Aussagen gelten für eine statische Belastung der Schweißnaht. Es leuchtet ein, dass die Imperfektionen der unter Bewegung geschweißten Naht darüber hinaus zu einer deutlichen Reduktion der Ermüdungsfestigkeit führen müssen.

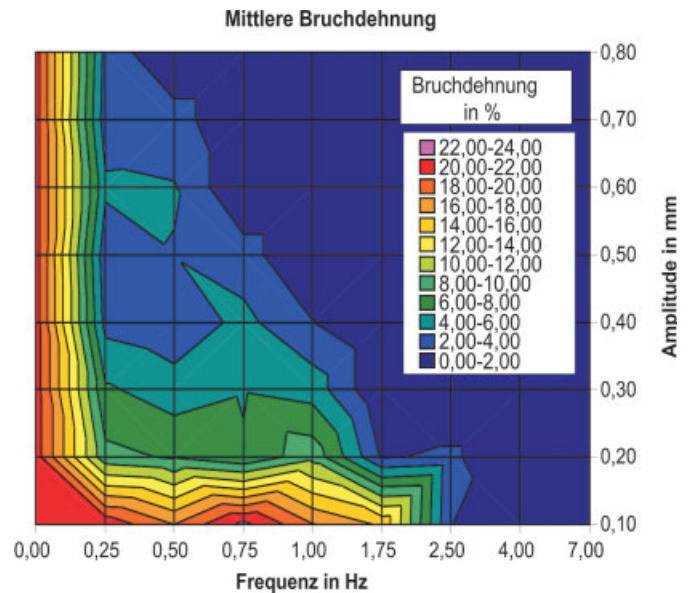


Bild 10. Mittlere Bruchdehnung der Zugproben im Zugversuch [8]
 Fig. 10. Mean ultimate strain of tensile specimen [8]

5 Dynamische Festigkeit unter Bewegung geschweißter Bleche

5.1 Durchführung und Auswertung der Ermüdungsversuche

Zur Ermittlung der vorhandenen Ermüdungsfestigkeit der in Bewegung geschweißten Nähte wurden Ermüdungsversuche durchgeführt. Aus jedem verschweißten Blech ließen sich sechs Proben für die Ermüdungsversuche gewinnen, Bild 7. Die Versuche wurden bei gleichem Spannungsverhältnis $R = 1/3$ durchgeführt. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet und nach dem EC 3 „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–9: Ermüdung“ Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 [2] in eine Ermüdungsfestigkeitskurve umgerechnet.

Für die Auswertung wurde eine Gauß-Normalverteilung der logarithmierten Werte der Doppelspannungsamplitude $\Delta\sigma$ sowie der Lastspielzahl N angenommen. Die gebräuchlichste Auswertung von Schwingfestigkeitsdaten erfolgt durch lineare Regression. Zur genauen Auswertung wurden die Versuchsergebnisse in charakteristische Werte überführt, die die Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % in Bezug auf ein zweiseitiges Vertrauensintervall des Mittels von 75 % beschreiben.

Hierbei wurde ein Anstieg der Geraden von $m = 3$ angenommen. Es ist vorgesehen, diese Annahme bei Vorliegen weiterer Versuche zu überprüfen.

5.2 Ergebnisse der Ermüdungsversuche

Es wurden zunächst Referenzschweißungen (ohne Bewegung der Nahtflanken während des Schweißens) durchgeführt, um eine Vergleichsmöglichkeit für die anschließend unter Bewegung geschweißten Bleche zu schaffen. Dafür wurden insgesamt 20 Ermüdungsversuche auf zwei Spannungshorizonten durchgeführt. In Bild 11 ist die Ermüdungsfestigkeitskurve der in Ruhe geschweißten Bleche der Ermüdungsfestigkeitskurve des entsprechenden Konstruktionsdetails (einseitig geschweißte Stumpfnah, ohne Badsicherung, mit Inspektion der Wurzellage durch ZFP) des EC 3 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die aus den Versuchen ermittelte Ermüdungsfestigkeitskurve deutlich über der Ermüdungsfestigkeitskurve aus dem EC 3 liegt. Der errechnete Bezugswert $\Delta\sigma_c = 100 \text{ N/mm}^2$ bei 2 Mio. Lastspielen ist größer als der Bezugswert des entsprechenden Konstruktionsdetails mit $\Delta\sigma_c = 71 \text{ N/mm}^2$.

Weitere Versuche wurden dann nur an den Proben durchgeführt, die eine nennenswerte statische Festigkeit aufwiesen. Es ist nicht sinnvoll, auch die Parameter mit zu untersuchen, bei denen aufgrund der inhärenten Schweißnahtfehler bereits große Risse vorliegen. Deshalb wurden nur solche Proben untersucht, die aus Blechen stammten, die mit einer Frequenz von 0,25 Hz und Verschiebungsamplituden von 0,1 bzw. 0,2 mm verschweißt wurden, d. h., es wurden Schweißnähte untersucht, die mehr als 90 % der statischen Festigkeit einer in Ruhe geschweißten Naht besitzen.

Wegen der oben dargestellten Problematik der schlechteren Nahtqualität am Nahtanfang verglichen mit der am Nahtende wurde die Auswertung der Ermüdungsversuche für die sechs unterschiedlichen Positionen auf den verschweißten Blechen gesondert betrachtet. In Bild 12 ist ein Ausschnitt der Ergebnisse der Ermüdungsversuche an Blechen, die mit einer Verschiebungsfrequenz von 0,25 Hz und einer Verschiebungsamplitude von 0,1 mm verschweißt wurden, gezeigt. Dargestellt sind neben der Ermüdungsfestigkeitskurve des entsprechenden Konstruktionsdetails aus dem EC 3, die Ermüdungsfestigkeitskurve der in Ruhe geschweißten Bleche sowie die Ermüdungsfestigkeitskurven der Proben am Nahtanfang bzw. am Nahtende. Die Ermüdungsfestigkeitskurve der Proben am Nahtanfang liegt mit $\Delta\sigma_c = 54 \text{ N/mm}^2$ deutlich tiefer als die der Proben am Nahtende mit $\Delta\sigma_c = 78 \text{ N/mm}^2$. Die Ermüdungsfestigkeit der Proben am Nahtende liegt damit aber noch deutlich über der des vergleichbaren Kerbdetails des EC 3 mit $\Delta\sigma_c = 71 \text{ N/mm}^2$.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche, die an Blechen bestimmt wurden, die mit einer Frequenz von 0,25 Hz und einer Verschiebungsamplitude von 0,2 mm verschweißt wurden, zeigen ein ähnliches Bild, vgl. Bild 13. Die Ermüdungsfestigkeitskurve der Proben am Nahtanfang ($\Delta\sigma_c = 35 \text{ N/mm}^2$) liegt wieder deutlich tiefer als die der Proben am Nahtende ($\Delta\sigma_c = 75 \text{ N/mm}^2$). Auch hier ist die Ermüdungsfestigkeit der Proben am Nahtende größer als die des Kerbdetails aus dem EC 3. Insgesamt fallen die Ergebnisse der Proben, die mit einer

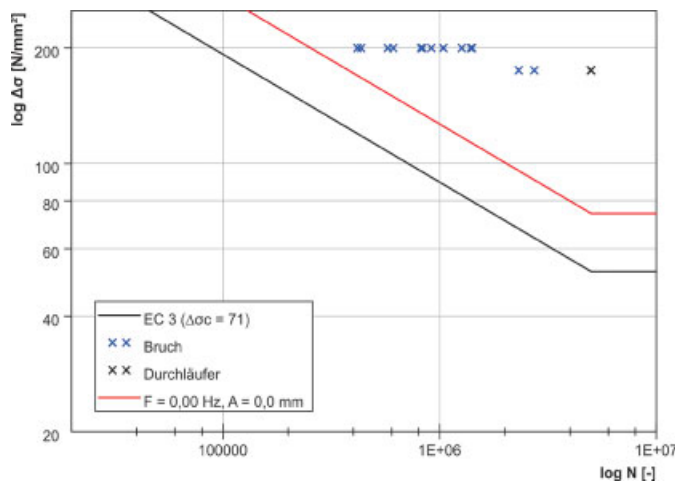


Bild 11. Ermüdungsfestigkeitskurve in Ruhe geschweißter Bleche (Frequenz 0,0 Hz, Amplitude 0,0 mm)
 Fig. 11. Fatigue strength curve of welding without movement (frequency 0.0 Hz, amplitude 0.0 mm)

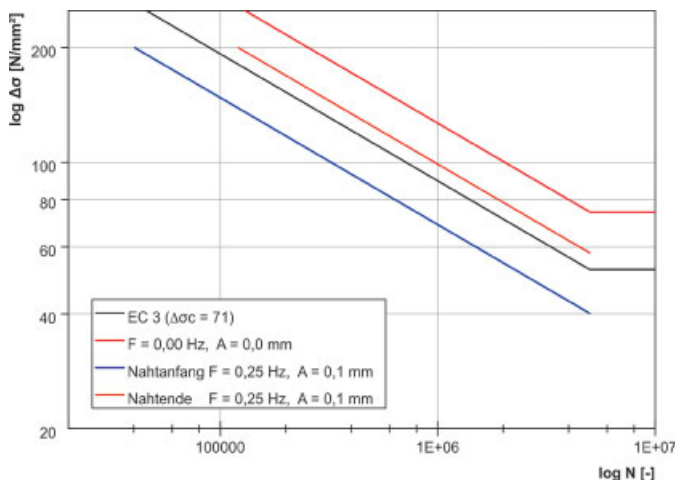


Bild 12. Ermüdungsfestigkeitskurve unter Bewegung geschweißter Nähte (Frequenz 0,25 Hz, Amplitude 0,1 mm)
 Fig. 12. Fatigue strength curve of welding under service loads (frequency 0.25 Hz, amplitude 0.1 mm)

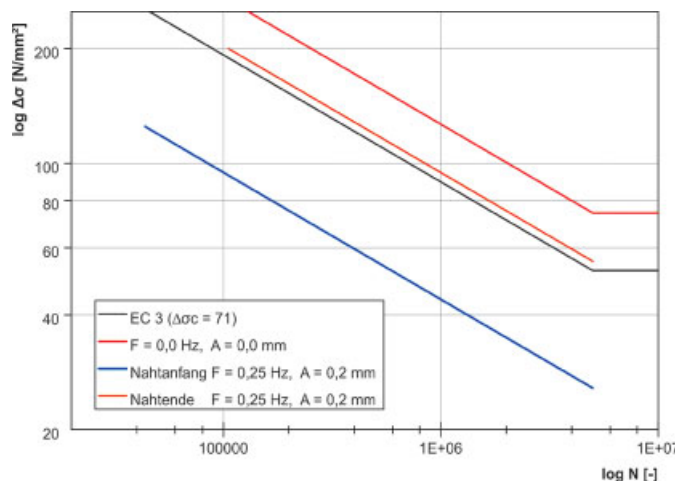


Bild 13. Ermüdungsfestigkeitskurve unter Bewegung geschweißter Nähte (Frequenz $f = 0,25 \text{ Hz}$, Amplitude $a = 0,2 \text{ mm}$)
 Fig. 13. Fatigue strength curve of welding under service loads (frequency 0.25 Hz, amplitude 0.2 mm)

größeren Verschiebungsamplitude verschweißt wurden, erwartungsgemäß schlechter aus.

Die ermittelten Ermüdungsfestigkeitskurven dienen zunächst als Anhaltswert. Es laufen derzeit Versuchsreihen mit einer deutlich größeren Probenanzahl, um eine genauere Aussage über die Ermüdungsfestigkeit von unter Bewegung geschweißten Schweißnähten treffen zu können.

6 Ertüchtigungsmaßnahmen

Die unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißverbindungen weisen zwar eine relativ geringe dynamische aber doch eine beträchtliche statische Festigkeit auf. Wenn diese erste Schweißnaht als eine Art Heftnaht angesehen wird, kann hiermit eine erste, zeitlich beschränkte Fixierung der zu verbindenden Bauteile vorgenommen werden. Die Bauteile sind dann zwar verbunden, können aber aus Gründen der Ermüdungsfestigkeit die veränderlichen Einwirkungen i. A. nicht über längere Zeiträume tragen. Die immerhin vorhandene temporäre Fixierung wird als Basis für ertüchtigende Maßnahmen verwendet.

Die primäre Naht mit nicht guter Qualität wird dazu mit Hilfe eines Plasmaschweißgerätes ohne Einbringung von Zusatzwerkstoff lokal aufgeschmolzen. Hierdurch werden, da ja die Bewegung der Schweißnahtflanken nun weitestgehend reduziert ist, Risse etc. vollständig beseitigt, d. h., es werden Schweißnähte erzeugt, die auch hohen Qualitätsansprüchen genügen.

Derzeit laufen am Institut Versuche, mit deren Hilfe die Wirkung ertüchtigender Maßnahmen im Anschluss an die Schweißung untersucht wird. Hierzu wurde der Versuchsstand um einen zweiten Roboter mit integriertem Plasmaschweißgerät der FRONIUS International GmbH erweitert. Eine digitale WIG-Stromquelle kombiniert mit dem PlasmaModule 10 und dem Plasmaschweißbrenner Robacta PTW 3500 ermöglicht ein Plasma-Stichlochschweißen für mechanisierte Anwendungen bis 8 mm Blechdicke, vgl. Bild 14.

Die unter Bewegung geschweißten Nähte werden dabei erneut aufgeschmolzen. Die Verschiebungsparameter entsprechen denen der jeweiligen Primärnaht. Da sich der aufgebrachte Gesamtweg aber jetzt aus der Dehnung der

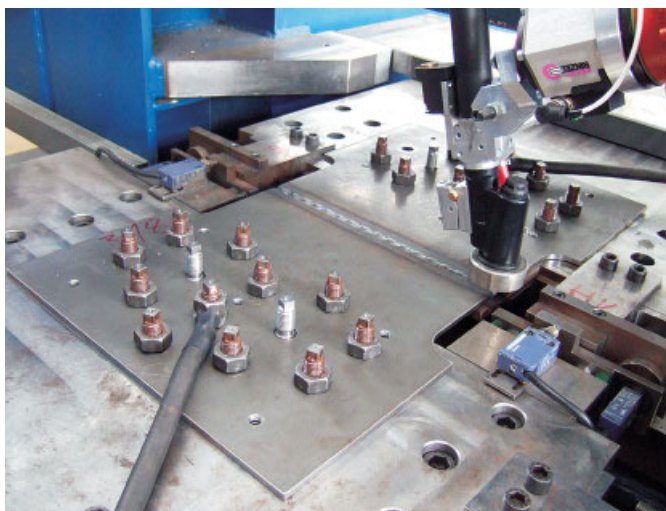


Bild 14. Eingebautes Blech im Versuchsstand
Fig. 14. Testing frame with mounted steel plate

verschweißten Gesamtprobe ergibt, ist die Dehnung in der Naht selbst gering.

Zur Zeit werden die optimalen Parameter für den Wiederaufschmelzprozess bestimmt. Zum Aufschmelzen der in Bild 15 gezeigten Naht wurde eine Plasmadüse mit einem Durchmesser von 6 mm gewählt, um die Naht in ihrer ganzen Breite zu erfassen. Die Stromstärke betrug 230 A bei einer Schweißgeschwindigkeit von 15 cm/min. Als Schutzgas sowie als Plasmagas wurde reines Argon verwendet. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Primärnaht in der Wurzel nicht vollständig aufgeschmolzen wurde, so dass weitere Versuche zur Optimierung der Schweißparameter notwendig sind.



Bild 15. Schlifffeld einer mittels Plasmaschweißverfahren wieder aufgeschmolzenen Naht

Fig. 15. Micrograph of weld melted again by plasma torch

7 Fazit

Ziel des Vorhabens ist es, den Einfluss von Schweißnahtflankenverschiebungen während des Schweißprozesses auf die Güte der Schweißnaht zu klären. Hierzu wurde der Einfluss einer Nahtflankenverschiebung bzw. einer veränderlichen Nahtbeanspruchung senkrecht zur Naht während des Schweißprozesses auf das statische und das Ermüdungsverhalten der so geschweißten Naht untersucht und bewertet.

Die Versuche zeigen, dass ein Verschweißen der Bleche in Abhängigkeit der Verschiebungsparameter möglich ist. Das Parameterfeld beinhaltet Verschiebungsamplituden von $\pm 0,1$ bis $\pm 1,1$ mm sowie Verschiebungsfrequenzen von 0,25 bis 7,0 Hz. Die Ergebnisse der Schweißversuche zeigen eine starke Abhängigkeit der Rissausbildung (Größe und Anzahl der Risse) von der Größe der aufgebrachten Verschiebungsamplitude sowie der -frequenz.

Die unter Bewegung hergestellten Nähte wurden anschließend auf ihre statische und dynamische Tragfähigkeit hin untersucht. Die statische Tragfähigkeit der aus den verschweißten Blechen entnommenen Proben wurde aus der im klassischen Zugversuch bestimmten Arbeitslinie ermittelt. Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen im Wesentlichen zwei Haupteinflüsse: Zum einen bewirkt eine Erhöhung der Verschiebungsamplitude bzw. -frequenz einen Rückgang der Zugfestigkeit der Schweißverbindung. Zum anderen führt bereits eine Verschiebungsamplitude von $\pm 0,2$ mm zu einem dramatischen Rückgang der Bruchdehnung.

Hinsichtlich ihrer dynamischen Tragfähigkeit wurden Proben mit relativ großer statischer Tragfähigkeit untersucht, also solche, die mit kleinen Verschiebungsamplituden und -frequenzen verschweißt wurden. Es zeigt sich, dass Ermüdungsfestigkeiten erzielt werden können, die mit den Normwerten vergleichbar sind. Bei der Zuordnung der dynamischen Tragfähigkeit muss zwischen dem Nahtanfang und dem Nahtende unterschieden werden, da die Qualität der Naht zu Beginn durch die dann noch großen Flankenverschiebungen schlechter ist als im Bereich des Schweißnahtendes, bei dem die Naht weitgehend geschlossen ist.

8 Ausblick

Die vorgestellten Untersuchungen sind die Basis für weiterführende Betrachtungen. Die unter realen Bedingungen am Bauwerk auftretenden Bewegungsabläufe führen oft zu einer mehrachsigen Bewegung der Nahtflanken bzw. zu einer mehrachsigen Beanspruchung der Schweißnaht. So soll der Einfluss einer reinen Schubbeanspruchung längs zur Schweißnaht sowie eine Kombination aus Längs- und Querbeanspruchung auf die Güte der Schweißnaht in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

Bei den entstehenden Rissen in Schweißnahtmitte der unter Bewegung geschweißten Nähte handelt es sich um Heißrisse. Es ist zu untersuchen, ob ein Auftreten der Heißrissbildung, bei Beibehaltung der Beanspruchung, durch geeignete schweißmetallurgische und schweißtechnische Maßnahmen in Größe und Umfang begrenzt oder gar vermieden werden kann.

Derzeit laufen Untersuchungen hinsichtlich der Erächtigung geschädigter Schweißnähte durch ein lokales Wiederaufschmelzen der Schweißnaht mit Hilfe des Plasmaschweißverfahrens an. Durch diese Nachbehandlung soll die Nahtqualität einer in Ruhe geschweißten Naht erreicht werden.

Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die Förderung des Vorhabens. Unabhängig hiervon konnten die Untersuchungen nur deshalb durchgeführt werden, weil großzügige Spenden der Industrie geleistet wurden. Hierfür danken wir insbesondere den Firmen:

August Friedberg GmbH, Gelsenkirchen, Schrauben und Verbindungsmittel; Bühler GmbH, Düsseldorf, Schleif- und Poliermaschine; DMG Gildemeister AG, Bielefeld, Drehmaschine NEF 320; AG der Dillinger Hüttenwerke, Dillingen, Maschinenbau- und Feinkornstähle; Friedrich Lütze GmbH & Co. KG, Weinstadt, Digitale E/A-Module; Fronius International GmbH, Wels, Schweißgerät, Messtechnik; GTM Messtechnik, Bickenbach, Kraftmessdosens; HAWE Hydraulik GmbH & Co. KG, München, Ventileinheiten, Hydraulikbedarf; Herbert Hänchen GmbH & Co. KG, Ostfildern, Lagerdichtungen, Zylinderhydraulik; Hch. Perschmann GmbH, Braunschweig, Fräs- und Drehwerkzeuge; Heraeus Kulzer GmbH & Co. KG, Hanau, Schleif-, Polier- und Einbettmittel; Hydac International GmbH, Sulzbach, Kolbenspeicher, Leckölpumpe; IKA-Werke

GmbH & Co. KG, Staufen, Magnetrührer; Kemper GmbH, Vreden, Schweißschutzwände; KGW Isotherm GmbH, Karlsruhe, Dewargefäße; KUKA Roboter GmbH, Augsburg, Roboterhardware; U.I. Lapp GmbH, Stuttgart, Mess- und Leitungskabel; Leica Microsystems AG, Wetzlar, Auf- und Durchlichtmikroskop; Micro Epsilon GmbH & Co. KG, Ortenburg, Wirbelstromwegmeßsystem; OM-NILAB-Laborzentrum GmbH & Co. KG, Bremen, Laborbedarf; Parker Hannifin GmbH, Kaarst, Drucksensoren; Phoenix Contact GmbH & Co. KG, Blomberg, Signalvervielfacher; ProConnecting GmbH, Burgebrach, Schaltnetzteile; Bosch Rexroth AG, Langenhagen, Rollenschienenführungen; SAB Bröckskes GmbH & Co. KG, Viersen, Mess- und Leitungskabel; Peiner Träger GmbH, Peine, Stahlprofile; Salzgitter Flachstahl GmbH, Salzgitter, Bleche; Ilseburger Grobblech GmbH, Ilseburg, Bleche; Jos. Schneider Optische Werke GmbH, Servoventile, Steuerungselektronik; Schneider Electric GmbH, Ratingen, Elektronische Steuerelemente; Stacon Stahlbau GmbH, Stade, Zuschnitte, CAD/CAM-Technik; Tietjen Automatisierte Prüftechnik, Bremen, Mess- und Auswertesoftware; Wesemann GmbH & Co. KG, Syke, Laboreinrichtung; E. Zoller GmbH & Co. KG, Freiberg, Einstell- und Messgerät

Literatur

- [1] *Boese, U.*: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen, Teil 1: Grundlagen. Düsseldorf: DVS Verlag, Fachbuchreihe Schweißtechnik Bd. 44, 1995.
- [2] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–9: Ermüdung. Deutsche Fassung EN 1993-1-9 : 2005.
- [3] *Peil, U., Wichers, M.*: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung – Werkstoffkennwerte für einen S355 J2G3 unter Temperaturen bis 1200 °C. Stahlbau 73 (2004), H. 6, S. 400–416.
- [4] *Peil, U., Wichers, M.*: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung – Werkstoffkennwerte zur Temperaturfeldberechnung für einen S355 J2G3. Stahlbau 74 (2005), H. 4, S. 249–257.
- [5] *Peil, U., Wichers, M.*: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung – Numerische und experimentelle Bestimmung des Temperaturfeldes beim Schweißen. Stahlbau 74 (2005), H. 11, S. 843–851.
- [6] *Peil, U., Wichers, M.*: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung – Experimentelle Untersuchungen unter einachsiger Nahtflankenbewegung während des Schweißprozesses. Stahlbau 74 (2005), H. 12, S. 891–900.
- [7] *Probst, R., Herold, H.*: Kompendium der Schweißtechnik, Band 2: Schweißmetallurgie. Düsseldorf: DVS-Verlag, Fachbuchreihe Schweißtechnik Bd. 128, 2002.
- [8] *Wichers, M.*: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung, Experimentelle und numerische Untersuchungen. (Dissertation): TU Braunschweig, Institut für Stahlbau, 2006:

Autoren dieses Beitrages:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Peil, Dipl.-Ing. Tina Hoefft und Dr.-Ing. Matthias Reininghaus, Institut für Stahlbau, TU Braunschweig, Beethovenstraße 51, 38106 Braunschweig
Dr.-Ing. Michael Wichers, SFI, Ingenieurteam Trebes, Schillerstrasse 11, 24116 Kiel, vormals Institut für Stahlbau, TU Braunschweig