



Schweißnaht an Blech

Dipl.-Ing. Rainer Olivier und Dipl.-Ing. Helmut Rückert,  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt

Inst-  
ard  
1.

## Schwingfestigkeit feuerverzinkter Schweißverbindungen ohne und mit Korrosion

Bericht Nr. 97  
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V.

Sonderdruck aus „Schweißen + Schneiden“  
37 (1985) 10, Seite 519–523

Wingebensprachter Schweiß-  
naht führen und damit die  
verbleibende Zink kann dagegen  
ben vorab verzinkter Bleche oder  
halten von Konstruktionen z.  
Einfluß auf das statische und dynam  
von vorab geschweißten Verbindun  
ch umfangreichen Untersuchungen

chromelektrode (z. B. 100 mV) ...  
 150 mV für verzinkte Proben ist vielmehr zu ver-  
 suchen die lebensdauersteigernde Wirkung des Zink-  
 überzuges bei einer Trennung vom Korrosionsmedium  
 durch eine kathodischen Schutzwirkung des Zinks  
 zu untersuchen. Die Fragen, inwieweit der Zinküberzug  
 die Lebensdauer verlängert, wie auch die  
 Wirkungsgrenzen sowie die Kosten der Schutz-  
 maßnahmen, sind ebenfalls zu untersuchen.

# Schwingfestigkeit feuerverzinkter Schweiß- verbindungen ohne und mit Korrosion<sup>1)</sup>

Dipl.-Ing. Rainer Olivier und Dipl.-Ing. Helmut Rückert, Darmstadt

Im Hinblick auf einen zunehmenden Einsatz feuerverzinkter Schweißkonstruktionen werden maßgebliche Einflußgrößen auf die Schwingfestigkeit im Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuch insbesondere in künstlichem Meerwasser untersucht. Die Vielzahl einbezogener Parameter wie drei Stähle verschiedener Festigkeit, drei Blechdicken, zwei Schweißverfahren, unverzinkte und vor oder nach dem Schweißen verzinkte Proben, Versuche an Luft oder im Korrosionsmedium, dem Ansatz der Versuche auf unterschiedlich hohen Spannungshorizonten unter wechselnder oder schwellender Belastung erfordert eine statistische Versuchsplanung. Eine mehrfache Streuungserlegung der Ergebnisse liefert verlässliche Ansatzpunkte zum Einfluß einer Feuerverzinkung auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Schweißverbindungen mit und ohne Korrosion.

## 1 Einleitung

Korrosionsschäden führen in der Bundesrepublik Deutschland zu volkswirtschaftlichen Verlusten vor allem an Rohstoffen und Energie in Höhe von jährlich einigen Milliarden DM [1]. Die zunehmende Forderung nach Einsparung von Energie und Rohstoffen sowie mithin nach einer Vermeidung von Korrosionsschäden macht Korrosionsschutzmaßnahmen – im allgemeinen handelt es sich um Beschichtungen oder Überzüge – unerlässlich. Von den metallischen

Überzügen, die für den Korrosionsschutz eingesetzt werden, kommt der Feuerverzinkung aufgrund der ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit eines ausreichend dicken und mit der Stahloberfläche fest verbundenen Zinküberzugs wachsende Bedeutung zu [2]. So werden neuerdings nicht nur leichte Stahlbauten, sondern zunehmend auch schwere bis hin zu Brückenkomponenten feuerverzinkt [3].

## 2 Problemstellung

Nach umfangreichen Untersuchungen bleibt das Verzinken von vorab geschweißten Verbindungen ohne merklichen Einfluß auf das statische und dynamische Festigkeitsverhalten von Konstruktionen [3...8]. Das beim Überschweißen vorab verzinkter Bleche oder vorab verzinkter Bauteile verdampfende Zink kann dagegen in den Schweißnähten zu Poren führen und damit die Festigkeit insbesondere schwingbeanspruchter Schweißverbindungen mindern. Zudem sind dann im Schweißnahtbereich nachträgliche Korrosionsschutzmaßnahmen, beispielsweise durch Spritzverzinken, zu treffen. In [8] wird außerdem auf einen möglichen nachteiligen Einfluß des Feuerverzinkens aufgrund einer Lot- oder Zinkrissigkeit bei eigenspannungsbehafteten Kehlnähten in geschweißten und feuerverzinkten, vor allem dickwandigen Großbauteilen unter Schwingbeanspruchung hingewiesen. Die nach bisherigen Untersuchungen noch offenen und einer verstärkten Anwendung des Verzinkens entgegenstehenden Fragen lassen sich demnach wie folgt zusammenfassen:

Bislang verfügbare Ergebnisse für vor oder nach dem Schweißen verzinkte Verbindungen stammen zunächst aus-

<sup>1)</sup> Bericht aus dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, sowie Bericht 97 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken, Düsseldorf. Weitere Einzelheiten zur Untersuchung mit einer Auflistung und Auswertung aller Ergebnisse enthält ein Forschungsbericht, der beim Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit erschienen ist.

nahmslos aus Untersuchungen unter nur einstufiger Beanspruchung im Wöhlerversuch. Ein diesem entsprechender Beanspruchungsablauf tritt in der Praxis jedoch lediglich in Ausnahmefällen auf. Neuere Vorschriften und Regelwerke gehen deshalb mehr und mehr zu einer Bemessung auf Betriebsfestigkeit über, zum Beispiel [9; 10]. Zur Klärung eines Lot- oder Zinkrisigkeitseinflusses sind Schwingfestigkeitsversuche an verzinkten Schweißverbindungen unterschiedlicher Bauteilgrößen mit entsprechend hohen Schweißspannungen durchzuführen. Schließlich ist die für den Einsatz feuerverzinkter Bauteile wesentliche Frage bisher nicht untersucht, ob und inwieweit sich bei schwingbeanspruchten geschweißten Bauteilen ein Zinküberzug als Korrosionsschutz in korrosiver Umgebung lebensdauersteigernd auswirkt.

### 3 Versuchsbedingungen

Für die Versuche standen die Stähle St37-2, St52-3 und St70-2 (nach DIN 17100) bzw. Fe360, FeE355KT und FeE690V (nach Euronorm 25, 133 und 137) jeweils in 8, 15 und 30 mm Blechdicke zur Verfügung. Die Wahl der Proben – kehlnahtgeschweißte Winkelproben unter Längskraftbiegung nach Bild 1 – lehnte sich an andere Untersuchungen an, um das Vorhaben in einem eng umrissenen Programm abzuwickeln und gleichzeitig die Ergebnisse in den Rahmen einer mehrere hundert Versuche umfassenden Gesamtanalyse einzubeziehen [11...13]. In Zusammenarbeit mit dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken, Düsseldorf, sowie der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg wurden Arbeitspläne zur Fertigung der Proben erstellt. Danach wurden jeweils zwei der in größeren Abmessungen bezogenen unverzinkten oder verzinkten Bleche nach entsprechender Kennzeichnung rechtwinklig lichtbogenhand- (8 oder 15 mm Blechdicke) oder unter Kohlendioxid metall-aktivgasgeschweißt (15 oder 30 mm Blechdicke) und anschließend die Proben durch Sägeschnitt und Fräsen herausgearbeitet, Bild 2. Die Angaben zu den Schweißbedingungen für die innere Kehlnaht wurden für jede Schweißung protokolliert. Als Beispiel für die unter den üblichen Bedingungen einer fachgerechten Betriebschweißung vorgenommene Fertigung sei hier der Fall der 30 mm dicken Bleche aus St52-3 angeführt. Die innenseitige Kehlnaht ist in vier Lagen (neun bis zehn Raupen) in Wannenposition unter Gleichstrom (Elektrode am Pluspol) mit 1,2 mm dicken Drahtelektroden SG2 aufgebaut worden (Schweißstrom 250 A, Schweißspannung 30 V, Schweißgeschwindigkeit 0,4 m/min).

Die aus verzinkten Blechen hergestellten Proben sind sodann im Bereich der Schweißnaht durch thermisches Zinkspritzen (Schichtdicke etwa 150 µm) und eine eindringende Beschichtung nachgebessert worden. Die Proben aus vorab unverzinkten Blechen wurden im Schweißzustand belassen oder spannungsarmgeglüht. Das Feuerverzinken nahm ein Stückverzinkungsbetrieb unter praxisüblichen Bedingungen vor: 2 h Beizen in 12%iger Salzsäurelösung, Spülen in Wasser und Tauchflußmittelbehandlung, Verzinken bei 452°C, und zwar 4 min bei 8 und 15 mm Blechdicke sowie 5,5 min bei 30 mm Blechdicke mit jeweils anschließendem Abkühlen in Wasser. Die erzielte Zinküberzugdicke lag zwischen 80 und 180 µm. Aus Vergleichsgründen blieben auch Proben unverzinkt.

Die Winkelproben wurden in der Prüfmaschine von für Serienversuche ausgelegten Einspannvorrichtungen aufgenommen, die die Prüfkraft durch Reibschluß auf die Schenkel der Winkelproben übertragen. Die Schweißverbindun-

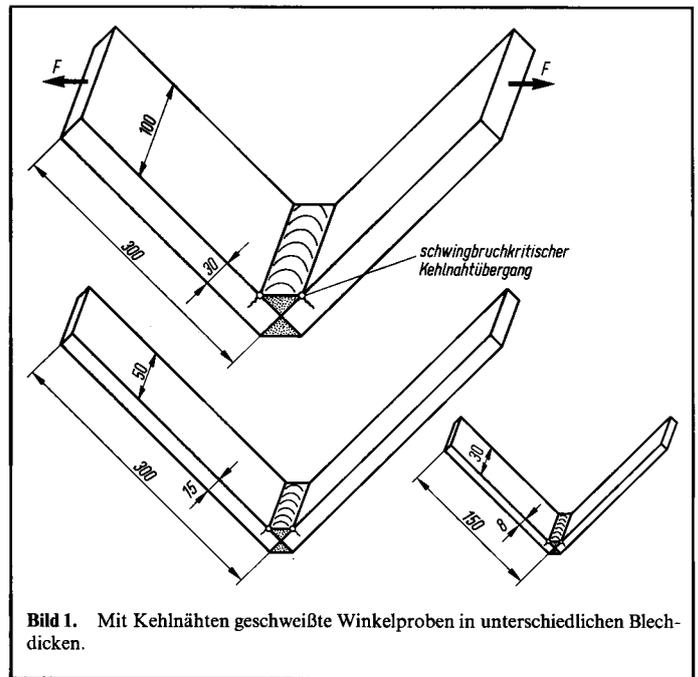


Bild 1. Mit Kehl Nähten geschweißte Winkelproben in unterschiedlichen Blechdicken.

gen tauchten dabei in 10-l-Prüfzellen ein, wo sie von künstlichem, luftgesättigtem Meerwasser nach ASTM-Standard D 1141-52 (ohne Schwermetallzusätze) umspült wurden. Das aus 100-l-Vorratsbehältern kontinuierlich zu- und abgeführte Korrosionsmedium wurde auf einer konstanten Temperatur von  $15^{\circ}\text{C} \pm 1\text{K}$  gehalten und der pH-Wert auf  $8,1 \pm 0,1$  eingeregelt. Vergleichsversuche sind auch an Luft gefahren worden.

Die Durchführung der Untersuchung geschah im Wöhlerversuch unter wechselnder ( $R = \sigma_u/\sigma_o = -1$ ) oder zugschwellender ( $R = 0$ ) Beanspruchung sowie im Betriebsfestigkeitsversuch unter  $\bar{R} = -1$ . Die zufallsartig veränderliche Beanspruchung im Betriebsfestigkeitsversuch beruhte in Anlehnung an [13; 14] auf einem annähernd Geradenlinienkollektiv mit einem Teilfolgeumfang von  $\bar{H} = 1 \cdot 10^6$ , das nach [15] in eine für Betriebsfestigkeitsversuche geeignete Belastungs-Zeit-Funktion mit einem Unregelmäßig-

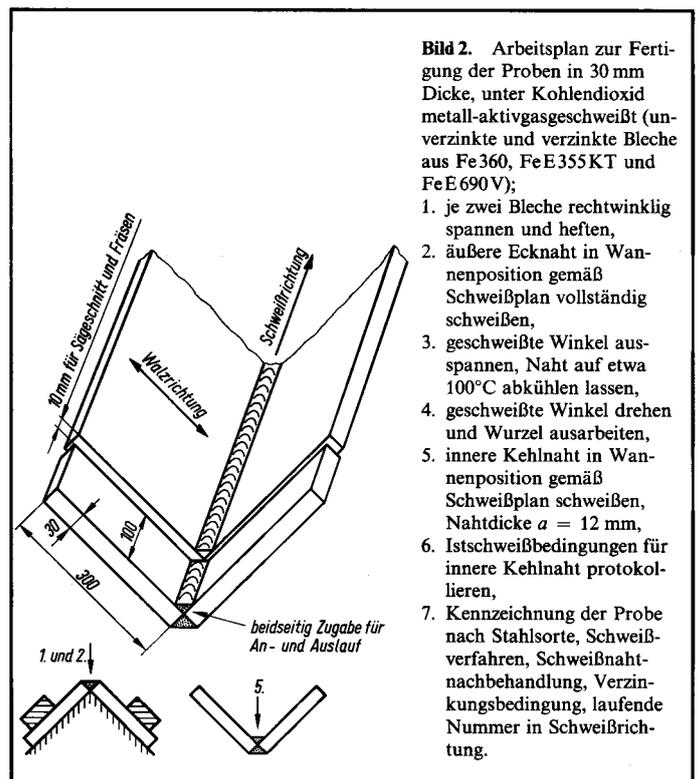
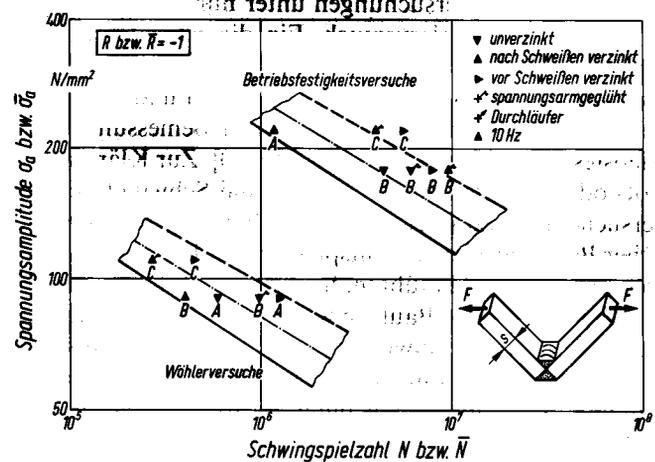


Bild 2. Arbeitsplan zur Fertigung der Proben in 30 mm Dicke, unter Kohlendioxid metall-aktivgasgeschweißt (unverzinkte und verzinkte Bleche aus Fe360, FeE355KT und FeE690V);

1. je zwei Bleche rechtwinklig spannen und heften,
2. äußere Ecknaht in Wannenposition gemäß Schweißplan vollständig schweißen,
3. geschweißte Winkel ausspannen, Naht auf etwa  $100^{\circ}\text{C}$  abkühlen lassen,
4. geschweißte Winkel drehen und Wurzel ausarbeiten,
5. innere Kehlnaht in Wannenposition gemäß Schweißplan schweißen, Nahtdicke  $a = 12\text{mm}$ ,
6. Istschweißbedingungen für innere Kehlnaht protokollieren,
7. Kennzeichnung der Probe nach Stahlorte, Schweißverfahren, Schweißnahtnachbehandlung, Verzinkungsbedingung, laufende Nummer in Schweißrichtung.

Charakter von  $r = 0,25$  als Schwertsignal zur Steuerung des servohydraulischen Zylinders umgesetzt wurde, Bild 3. Die Versuche wurden auf mehreren, unterschiedlich hohen Spannungshorizonten  $\sigma_{ai}$  bzw.  $\bar{\sigma}_{ai}$  nach Nennspannungen angesetzt, die für den schwingbruchkritischen Querschnitt am Nahtübergang unter Längsbruchreibung nach  $\sigma_a = F/A + M/W$  berechnet worden sind. Die in der Mehrzahl der Schwingfestigkeitsversuche gewählte Prüffrequenz von  $f = 10$  Hz führte bei vergleichsweise niedrigen, tatsächlichen Betriebsbedingungen nahekommenen Spannungshorizonten mit Verweilzeiten im Korrosionsmedium bis zu etwa 120 Tagen auf Schwingspielzahlen von  $N \approx 10^8$ . Stichprobenartig sind zudem bei entsprechend höheren Spannungsamplituden auch Versuche mit  $f = 1$  Hz mit Verweilzeiten im Korrosionsmedium bis zu 100 Tagen gefahren worden. (Im Betriebsfestigkeitsversuch mit zufallsartig veränderlicher Höhe der Beanspruchung ergibt sich aufgrund konstanter Lastanstiegsgeschwindigkeit eine mittlere Prüffrequenz als Quotient aus Schwingspielzahl und Versuchsdauer. Die Frequenzangabe 10 oder 1 Hz stellt demnach einen Mittelwert dar, wobei hohe, vergleichsweise seltene Kollektivbelastungen mit niedrigeren Frequenzen von etwa  $f \approx 2$  oder 0,2 Hz auftreten, häufige kleine Kollektivlasten mit höheren Frequenzen von  $f_{max} = 12$  Hz oder  $f \approx 4$  Hz.) Die Vielzahl einbezogener werkstofflicher, verzinkungs-, schweiß- und versuchstechnischer Parameter verlangte eine statistische Versuchsplanung auch als Grundlage für eine varianzanalytische statistische Auswertung der Ergebnisse [16]. Bei deren Anwendung bereits bei Planung und Ansatz der Versuche läßt sich die Aussagefähigkeit eines eingegrenzten Versuchsprogrammes, bei dem auch aus Zeit- und Kostengründen eine vollständige Belegung sämtlicher Varianten unvermeidbar wäre, deutlich erhöhen. Dabei wäre jede einzelne der behandelten Merkmalsgrößen auf jedem der Prüfhorizonte mit einer auf den gewünschten Vertrauensgrad abgestimmten Anzahl von Versuchspunkten im Sinne einer mehrfach vollständig belegten Matrix vertreten. Vielmehr werden die einzelnen Merkmalsgrößen auf die Prüfhorizonte so verteilt, daß alle erfahrungsgemäß bedeutsamen Parameter mehrfach belegt sind und aufgrund einer systematischen Kennzeichnung aller Proben hinsichtlich Stahlsorte, Schweißverfahren, Schweißnahtnachbehandlung, Verzinkungsbedingung und Ausgangslage der Probe innerhalb der in größeren Abmessungen geschweißten Bleche unterscheidbar sind. Diese Kennzeichnungen, die nach einer Ergänzung mit den Versuchsbedingungen wie Art der Korrosion, Prüffrequenz, Einstufen- oder Betriebsfestigkeitsversuch, Spannungsverhältnis, Spannungshori-



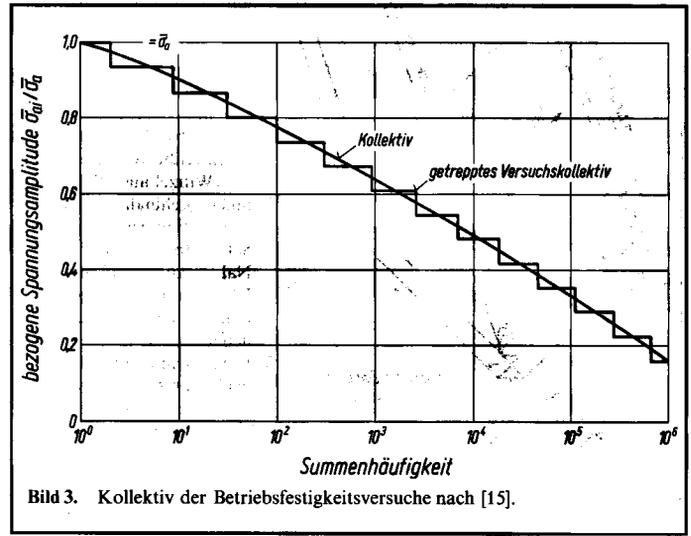
**Bild 4.** Ergebnisse aus Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuchen an Luft; Blechdicke  $s = 30$  mm, unter Kohlendioxid metall-aktivgasgeschweißt, Stahl Fe360 (A), FeE355KT (B) bzw. FeE690V (C).

zont und ertragene Schwingspielzahl in einem rechnerischen Schema abgespeichert sind, können mittels geeigneter Suchprogramme abgerufen und nach einzelnen oder miteinander verknüpften Merkmalsgrößen für die statistische Auswertung bereitgestellt werden.

#### 4 Versuchsergebnisse

Die Darstellung und Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgten im doppellogarithmischen Netz der Wöhler- oder Lebensdauerlinie sowie im Balkendiagramm nach einer mehrfachen Streuungserlegung. In Bild 4 und 5 sind beispielhaft Versuchsergebnisse für unter Kohlendioxid metall-aktivgasgeschweißte Winkelproben in 30 mm Blechdicke gegenübergestellt, und zwar bei einer Versuchsdurchführung an Luft oder bei freier Korrosion in künstlichem Meerwasser. Die einzelnen Ergebnisse aus den Wöhlerversuchen sind mit dem Streuband der normierten Wöhlerlinie nach [17] beschrieben, das für Schweißverbindungen aus Baustählen einheitliche Gesetzmäßigkeiten aufweist und sich bei der Auswertung von bisher etwa 15000 Versuchsergebnissen in [18] als zutreffend erwiesen hat. Davon ausgehend sind – bei Außerachtlassung einer Dauerfestigkeit – die Ergebnisse aus den Betriebsfestigkeitsversuchen mit Lebensdauerlinienstreubändern beschrieben, die aus einer linearen Schadensakkumulationsrechnung nach Palmgren-Miner bestimmt wurden, in Übereinstimmung mit [13; 14; 19] unter Ansatz einer Schadenssumme von  $S = 0,5$ . Die so eingezeichneten Streubänder ermöglichen schon rein augenscheinlich gewisse Gegenüberstellungen der untersuchten Varianten:

- Die einbezogenen Stahlsorten bleiben – insbesondere nach der Gesamtauswertung –, wie auch beispielsweise nach [18] zu erwarten, ohne Einfluß auf die Schwingfestigkeit.
- Bei einer Versuchsdurchführung an Luft, Bild 4, liegen die Ergebnisse für unverzinkte Winkelproben im Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuch innerhalb erfahrungsgemäß zutreffender Streugrenzen. Unterschiedliche Verzinkungsvarianten bleiben demnach, insbesondere wiederum auch nach der Gesamtauswertung, ohne signifikanten Einfluß auf die Versuchsergebnisse.
- Bei einer Versuchsdurchführung in künstlichem Meerwasser, Bild 5, setzen sich die Ergebnisse für die unverzinkten Winkelproben zu deutlich niedrigeren Lebens-



**Bild 3.** Kollektiv der Betriebsfestigkeitsversuche nach [15].

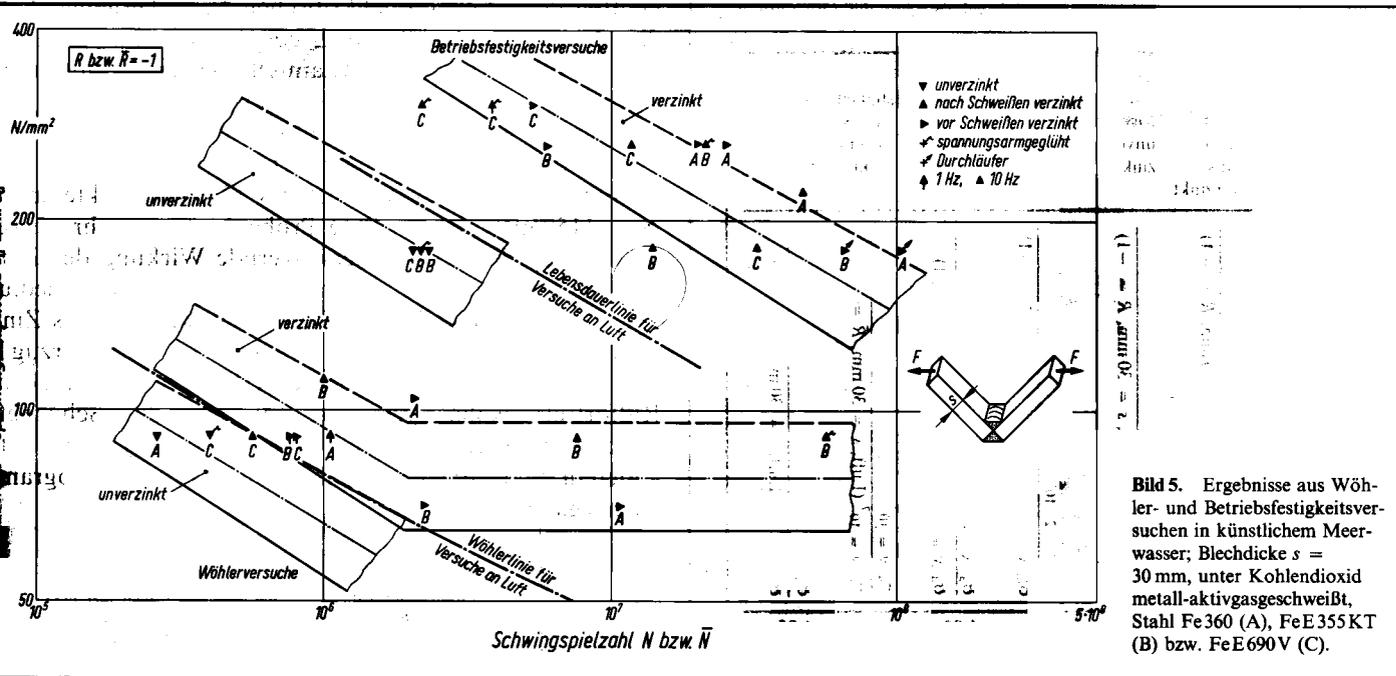


Bild 5. Ergebnisse aus Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuchen in künstlichem Meerwasser; Blechdicke  $s = 30$  mm, unter Kohlendioxid metall-aktivgasgeschweißt, Stahl Fe 360 (A), Fe 355KT (B) bzw. Fe E 690 V (C).

dauerwerten hin ab. Sie führen entsprechend [13; 14] im Wöhler- und Betriebsfestigkeitsversuch zu einer etwa 1:2,0 kürzeren Lebensdauer bzw. zu einer ungefähr 1:1,20 geringeren Schwingfestigkeit als an Luft nach Bild 4.

Vor oder nach dem Schweißen verzinkte Winkelproben weisen im Wöhlerversuch in künstlichem Meerwasser eine etwa 1,5:1 längere Lebensdauer oder 1,1:1 größere Schwingfestigkeit auf als an Luft nach Bild 4. Dabei tritt – im Gegensatz zu Wöhlerversuchen an unverzinkten und damit ungeschützten Winkelproben – ein deutlicher waagrecht verlaufender Dauerfestigkeitsbereich des Wöhlerlinienstreubandes zutage.

Der Betriebsfestigkeitsversuch in künstlichem Meerwasser führt bei den verzinkten Proben zu einer noch augenfälligeren Steigerung der Lebensdauer um etwa 10:1 bzw. der Schwingfestigkeit von ungefähr 1,8:1 als an Luft nach Bild 4.

Wie nach den beispielhaft vorgestellten Ergebnissen für 15 mm dicke Winkelproben unter wechselnder Beanspruchung mit  $R = -1$  festzustellenden Einflüsse auf die Lebensdauer bzw. die Schwingfestigkeit werden von den weiteren Versuchen unter schwelender Beanspruchung mit  $R = 0$  und vor allem von den Versuchen an Winkelproben mit nur 15 und 8 mm Blechdicke durchweg bestätigt. Der mit abnehmender Blechdicke zu findende geometrische Größeneinfluss bringt bei einer Halbierung der Blechdicke eine bis zu 3:1 längere Lebensdauer oder 1,3:1 größere Schwingfestigkeit mit sich [11...13]. Wie bereits in [12; 13] umfassend untersucht, bleiben auch hier unterschiedliche Prüffrequenzen von 1 und 10 Hz bei Verweilzeiten im künstlichen Meerwasser bis zu 120 Tagen ohne merklichen Einfluß auf das Versuchsergebnis. Das gleiche gilt für die bei den in die Untersuchung einbezogenen Schweißverfahren, die sich bei den Winkelproben in 15 mm Blechdicke direkt gegenüberstellen lassen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluß der Wärmebehandlung durch spannungsarmglühen der unverzinkten und nach dem Schweißen verzinkten Proben.

Die bisherige Auswertung der Ergebnisse im doppellogarithmischen Netz der Wöhler- und Lebensdauerlinie liefert eine mehr summarische Bewertung der einbezogenen Varianten; eine gezielte Aufschlüsselung macht eine mehrfache

Streuungszerlegung sämtlicher Einzelergebnisse unumgänglich. Die Anwendung dieses mathematisch-statistischen Verfahrens setzt allerdings voraus, daß beispielsweise aufgrund geometrischer Größeneinflüsse oder von Versuchen auf unterschiedlich hohen Spannungshorizonten zunächst untereinander nicht direkt vergleichbare Ergebnisse aussagefähig gegenüberzustellen sind. Hierzu wird das Verhältnis der in jedem Einzelversuch erzielten Schwingspielzahl zum Mittelwert der zugehörigen Wöhler- oder Lebensdauerlinie auf dem jeweiligen Spannungshorizont betrachtet, das im doppellogarithmischen Netz dem waagerechten Abstand des Versuchspunktes von der Mittellinie des vorgegebenen Streubandes entspricht und der weiteren Auswertung zugrunde liegt.

So verdeutlicht Bild 6 den in der Untersuchung im Vordergrund des Interesses stehenden Einfluß der Verzinkung auf die Betriebsfestigkeit. Bezogen auf die im Mittel = 1 gesetzten Ergebnisse für unverzinkte Winkelproben an Luft führen auch vor oder nach dem Schweißen verzinkte Proben an Luft auf nahezu das gleiche Ergebnis. Die Schwingfestigkeit  $\Delta\sigma$  bzw. die Lebensdauer  $\Delta N$  von unverzinkten Winkelproben mindert sich in künstlichem Meerwasser er-

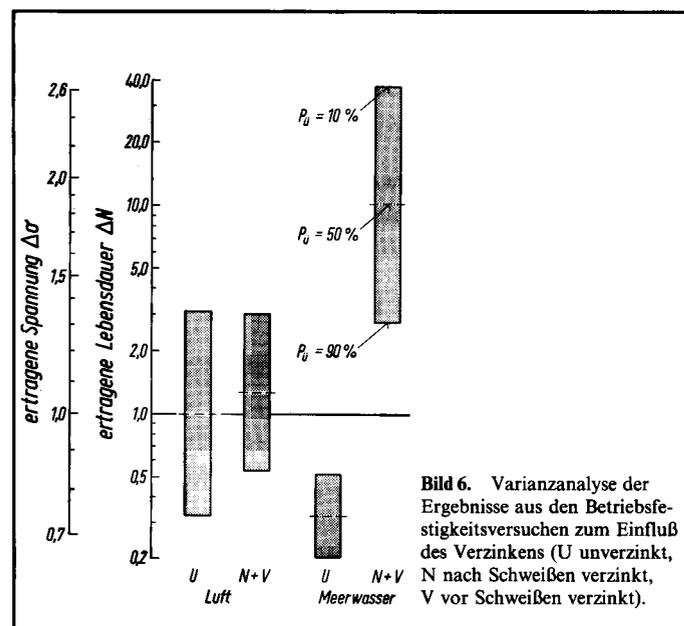


Bild 6. Varianzanalyse der Ergebnisse aus den Betriebsfestigkeitsversuchen zum Einfluß des Verzinkens (U unverzinkt, N nach Schweißen verzinkt, V vor Schweißen verzinkt).

Tabelle 1. Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus der Gesamtuntersuchung.

Blechdicke $s$ mm	Spannungsverhältnis $R$ bzw. $\bar{R}$	bezogene ertragbare Spannungen im Wöhlerversuch			Betriebsfestigkeitsversuch		
		Luft unverzinkt/verzinkt	Meerwasser unverzinkt	Meerwasser verzinkt	Luft unverzinkt/verzinkt	Meerwasser unverzinkt	Meerwasser verzinkt
		$\sigma_{a,N} = 2 \cdot 10^6$	$\sigma_{a,N} = 2 \cdot 10^6$	$\sigma_{a,N} = 2 \cdot 10^6$	$\sigma_{a,N} = 10^7$	$\sigma_{a,N} = 10^7$	$\sigma_{a,N} = 10^7$
		(Luft, $s = 30$ mm, $R = -1$ )			(Luft, $s = 30$ mm, $\bar{R} = -1$ )		
		$\sigma_{a,N} = 2 \cdot 10^6$	$\sigma_{a,N} = 2 \cdot 10^6$	$\sigma_{a,N} = 2 \cdot 10^6$	$\sigma_{a,N} = 10^7$	$\sigma_{a,N} = 10^7$	$\sigma_{a,N} = 10^7$
		(Luft, $s = 30$ mm, $R = -1$ )			(Luft, $s = 30$ mm, $\bar{R} = -1$ )		
30	-1	1,00	0,80	1,15	1,00	0,85	1,85
	0	0,85	0,65	0,95	nicht belegt		
15	-1	2,00	1,60	2,30	2,00	1,70	3,70
	0	1,40	1,15	1,60	nicht belegt		
8	-1	2,55	2,05	2,95	2,55	2,20	4,65
	0	nicht belegt					

wartungsgemäß deutlich ab. Vor oder nach dem Schweißen verzinkte Winkelproben weisen hingegen in künstlichem Meerwasser eine signifikant höhere Schwingfestigkeit  $\Delta\sigma$  bzw. Lebensdauer  $\Delta N$  auf.

Die Zusammenfassung in Tabelle 1 vermittelt einen Überblick über die Gesamtheit der erzielten Ergebnisse und die danach festzustellenden Einflüsse auf die Schwingfestigkeit. Die vorliegende Untersuchung bestätigt innerhalb erfahrungsgemäßer Streuspannen zunächst gesicherte Erkenntnisse zum Einfluß von Stahlsorte, Blechdicke, Schweißverfahren und künstlichem Meerwasser auf die Schwingfestigkeit von ungeschützten Schweißverbindungen. Die Ergebnisse zum Einfluß des Feuerverzinkens, vor allem bei verschiedenen Blechdicken, lassen sich nach Tabelle 1 wie folgt zusammenfassen:

- Bezogen auf gleiche Lebensdauer liegen die ertragbaren Spannungen für 15 mm Blechdicke um etwa 2:1 höher als bei 30 mm Blechdicke. Eine Verringerung von 15 auf 8 mm Blechdicke bringt eine nochmalige Steigerung der ertragbaren Spannungen um etwa 1,3:1.
- Unverzinkte und vor oder nach dem Schweißen verzinkte Winkelproben führen an Luft auf die annähernd gleiche Schwingfestigkeit, so daß ein Einfluß des Verzinkens auch bei Schweißverbindungen an dicken Blechen auszuschließen ist.
- An unverzinkten Schweißverbindungen mindert eine Dauertauchbeanspruchung in künstlichem Meerwasser die ertragbaren Spannungen um etwa 1:1,2.
- Bei verzinkten Schweißverbindungen hebt eine Dauertauchbeanspruchung in künstlichem Meerwasser die ertragbaren Spannungen bis zu ungefähr 2:1 an.

## 5 Schlußbemerkungen

Die signifikant lebensdauerverlängernde Wirkung des Zinküberzuges bei Dauertauchbeanspruchung in künstlichem Meerwasser hat offensichtlich elektrochemische Ursachen. Ein zunächst naheliegender mechanischer Einfluß mit einem

Glätten des schwingbruchkritischen Nahtübergangs durch den Zinküberzug müßte auch bei Versuchen an Luft auftreten. Außerdem geben dynamische Dehnungsmessungen am Nahtübergang unverzinkter und verzinkter Proben keine Hinweise auf eine mögliche Verminderung der Kerbwirkung. Aufgrund von Ruhepotentialmessungen mit einer Kalomelektrode ( $\epsilon_R \approx -650$  mV für unverzinkte und  $\epsilon_R \approx -1150$  mV für verzinkte Proben) ist vielmehr zu vermuten, daß die lebensdauersteigernde Wirkung des Zinküberzuges neben einer Trennung vom Korrosionsmedium vor allem auf einer katodischen Schutzwirkung des Zinks beruht. Noch offene Fragen, inwieweit der Zinküberzug lediglich die Rißeinleitungsphase verlängert oder auch die Rißfortschrittsphase verzögert sowie nach dem Schwingfestigkeitsverhalten bei Wecheltauchversuchen, wird unter anderem in einem derzeit laufenden Versuchsprogramm nachgegangen.

*Die Arbeit wurde im Rahmen der vom Bundesminister für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen geförderten industriellen Gemeinschaftsforschung mit Unterstützung des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik durchgeführt. Für diese Förderung sei ebenso gedankt wie dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken, Düsseldorf, für die Unterstützung der Untersuchungen.*

## Schrifttum

- N. N.: Damit Rost und Verschleiß nicht Milliarden fressen. BMFT-Report 1983, Bonn.
- Merkblatt 400 „Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl“. Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf 1983.
- Valtinat, G.: Die Feuerverzinkung im Stahlbau; in: 25 Jahre Gemeinschaftsausschuß Verzinken, Düsseldorf 1977.
- Wiegand, H., u. F. Nieth: Untersuchungen über das Verhalten feuerverzinkter Stähle und Bauteile. Stahl u. Eisen 84 (1964), H. 2, S. 82/88.
- Nieth, F.: Festigkeitsfragen im Zusammenhang mit der Feuerverzinkung. Diss., TH Darmstadt 1965.
- Nieth, F., u. H. Wiegand: Das Verhalten von Baustählen höherer Festigkeit nach dem Feuerverzinken bei dynamischer Beanspruchung. Archiv Eisenhüttenwesen 46 (1975), H. 9, S. 589/93.
- Merkblatt 367 „Schweißen von stückverzinktem Stahl“. Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf 1979.
- Petersen, Ch.: Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen nach Überschiessen der Feuerverzinkung. Stahlbau 46 (1977), H. 9, S. 277/82.
- DIN 15018 „Krane – Grundsatz für Stahltragwerke, Berechnung“, 1974.
- DS 804 „Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke – Bemessung“. Deutsche Bundesbahn, 1984.
- Haibach, E., R. Olivier u. W. Ritter: Einfluß der Naht- und Blechdicke auf die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen mit Kehlnähten. Schw. Schn. 30 (1978), H. 11, S. 442/46.
- Greif, M., u. R. Olivier: Schwingfestigkeit von Kehlnaht-Schweißverbindungen aus höherfesten Baustählen in Abhängigkeit von Blechdicke, Nahtdicke und Schweißverfahren. LBF-Bericht FB-163, Darmstadt 1982.
- Olivier, R., M. Greif, M. Oberparleiter u. W. Schütz: Untersuchungen zur Korrosionsermüdung von Offshore-Konstruktionen unter einstufiger und unter zufallsartiger Schwingbeanspruchung; in: EUR-Bericht 7347, Kommission der EG, Luxemburg 1981.
- Grimme, D., E. Lachmann, B. Müsgen, W. Oberparleiter, R. Olivier, H. Rückert u. W. Schütz: Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von geschweißten Offshore-Konstruktionen in Seewasser. VDEh-Abschlußbericht zum EGKS-Vorhaben 7210-KG/101, Düsseldorf 1984.
- Fischer, R., M. Hück, H. G. Köbler u. W. Schütz: Eine dem stationären Gaußprozeß verwandte Beanspruchungs-Zeit-Funktion für Betriebsfestigkeitsversuche. Fortschritts-Berichte VDI-Z, Reihe 5, Nr. 30. VDI-Verlag, Düsseldorf 1977.
- Haibach, E., R. Olivier u. F. Rinaldi: Statistical Design and Analysis of an Interlaboratory Program on the Fatigue Properties of Welded Joints in Structural Steels. ASTM STP 744 (1981), S. 89/113.
- Gaßner, E., u. E. Haibach: Die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus der Sicht einer örtlichen Beanspruchungsmessung. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 53/1, S. 47/73. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1968.
- Olivier, R., u. W. Ritter: Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen. DVS-Bericht 56/1 bis V. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1979/1985.
- Haibach, E., H. Ostermann u. H. Rückert: Betriebsfestigkeit von Schweißverbindungen aus Baustahl unter einer Zufallsfolge der Belastung. Schw. Schn. 32 (1980), H. 3, S. 93/98.