



Zentrum für Konstruktionswerkstoffe  
Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt  
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde  
Prof. Dr.-Ing. C. Berger



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

## Kompetenzbereich Metallkunde

### Entwicklung eines praxisgeeigneten Prüfverfahrens zur Untersuchung der Einflussgrößen bei der Rissbildung von Bauteilen aus Stahl in Zinkschmelzen

**Vorhaben:** AiF 150081 N

**Laufzeit:** 01.03.2007 – 28.02-2009

**Förderung:** Gemeinschaftsausschuss Feuerverzinken e.V. (GAV)

**Bericht:** Der Abschlussbericht kann beim GAV, Sohnstraße 66, 40237 Düsseldorf, angefordert werden.

#### 1 Wissenschaftliche Problemstellung

Beim Feuerverzinken von Stahlteilen kann es beim Zusammenwirken kritischer Parameter (Beanspruchung, Werkstoffzustand, Zinkschmelze) zu Schäden infolge interkristalliner Rissbildung in der Flüssigzinkphase kommen. Bei diesem auch als „Liquid Metal Embrittlement“ (LME) bzw. „Liquid Metal Assisted Cracking“ (LMAC) bezeichneten Schädigungsmechanismus dringt das Zink entlang der Korngrenzen in die unter Zugspannung stehenden Bereiche ein und führt zu einer erheblichen Schwächung des Gefügezusammenhaltes.

#### 2 Ziele

In dem Vorhaben war ein Prüfverfahren zu entwickeln, mit dem das mögliche Gefährdungspotenzial von Zinkschmelzen ermittelt und bewertet werden kann. Mit diesem Prüfverfahren sollten in ersten Schritten zur Überprüfung der Eignung des Prüfverfahrens die rissverursachenden und rissauslösenden Parameter beim Verzinken variiert werden, um dann Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden durch flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion entwickeln zu können.

Die zu untersuchenden Parameter waren die Stahlsorte (Festigkeit, Zusammensetzung), die Zusammensetzung der Zinkschmelze sowie nicht zuletzt die Beanspruchung der Probe. Durch den über eine reine Parameterstudie hinausgehenden wissenschaftlichen Ansatz der Untersuchung, die metallkundliche und mikroanalytische Methoden einschloß, sollte ein über die einfache praktische Anwendung des Prüfverfahrens hinausgehender Erkenntnisgewinn über die Einflussgrößen auf den Schadensmechanismus erzielt werden, der auch bei Entwicklung von Zinkschmelzen von Bedeutung ist.

#### 3 Vorgehensweise

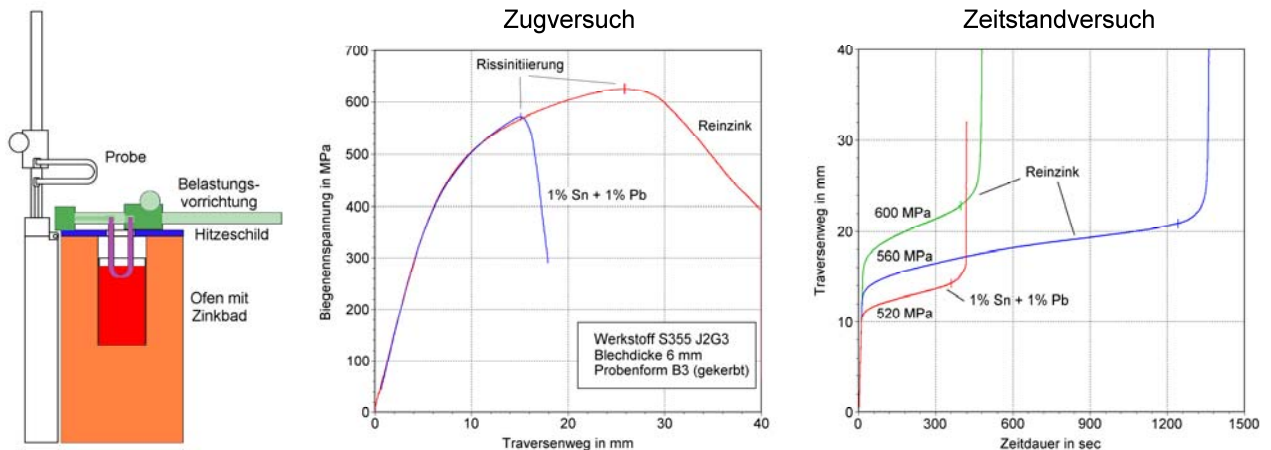
Als Versuchsmaterial wurden 6mm-Grobbleche aus den Baustählen S235 J2G3, S355 J2G3 und S500 MC sowie dem Vergütungsstahl 42CrMo4 beschafft und mittels Wasserstrahlschneiden ungekerbte und gekerbte U-förmige Biegeproben gefertigt. Dabei wurde der in der Praxis weit verbreitete Stahl S355 J2G3 schwerpunktmäßig untersucht. Die Proben wurden in einer für das Projekt modifizierten Prüfvorrichtung (**Bild 1**) in unterschiedlichen Zinkschmelzen geprüft, die systematisch mit den Elementen Blei, Zinn und Wismuth sowohl einzeln als auch in Kombination aufgelegt wurden.

Zunächst wurde die grundsätzliche Eignung der möglichen Versuchsarten und ihrer Last-Zeit-Funktionen untersucht. Während im Relaxationsversuch (konstante Aufweitung) keine Anrisse erzeugt werden konnten, erwiesen sich der Zeitstandversuch (konstante Prüfkraft) und der Zugversuch (konstante Aufweirate) als prinzipiell geeignet, LMAC-Bedingungen einzustellen. Bei beiden Versuchsvarianten wird die Probe nach dem Eintauchen in die Zinkschmelze zunächst spannungsfrei erwärmt bevor der eigentliche Versuch gestartet wird.

Auf diese Weise ist die im Versuch aufgezeichnete Aufweitung der Probe (Maschinenweg) nicht durch die Wärmedehnung verfälscht, sondern allein durch die elastisch-plastische Beanspruchung bedingt.

Die Aufweitung hängt eng mit dem Dehnungszustand der Probe zusammen. Um die plastische Vergleichsdehnung im höchstbeanspruchten Bereich (Kerbe) zu bestimmen, die als Maß für den Schädigungszustand und damit die Beanspruchbarkeit verwendet werden kann, wurden für die primär verwendete Proben (gekerbte Form B, Werkstoff S355 J2G3) FEM-Rechnungen durchgeführt. Das hierzu erforderliche Werkstoffgesetz wurde in Warmzugversuchen an Luft bei Verzinkungstemperatur ermittelt.

In **Bild 2** sind die beiden Versuchsarten am Beispiel von Einzelergebnissen in Reinzink (Referenzschmelze) und in einer aggressiven Schmelze mit 1% Sn und 1% Pb einander gegenübergestellt. Ausgewertet wurden das Maximum im Kraft-Weg-Diagramm (Höchstkraft im Zugversuch) bzw. der Beginn des Geschwindigkeitsanstiegs (Zeitstandversuch), die jeweils als die einzigen unmittelbar aus den Diagrammen ableitbaren Punkte als Beginn der Rissinitiierung interpretiert werden können.



**Bild 1:** Prüfvorrichtung **Bild 2:** Zugversuch und Zeitstandversuch

Um den Einfluss der mechanischen Beanspruchung bei der Verzinkungstemperatur von 450°C isoliert vom Angriff des Zinks auf die Stahloberfläche zu ermitteln, wurden zusätzlich Referenzversuche in einer neutralen Salzsäure durchgeföhrt. Der Vergleich der in der Salzsäure und den verschiedenen Zinkschmelzen aufgenommenen Aufweitungen ergab, dass bereits vor den anhand der Messwerte erkennbaren Versagenspunkten Schädigungen stattfinden, die die Aufweitung vergrößern und nicht als reale Dehnung des Werkstoffs interpretiert werden dürfen.

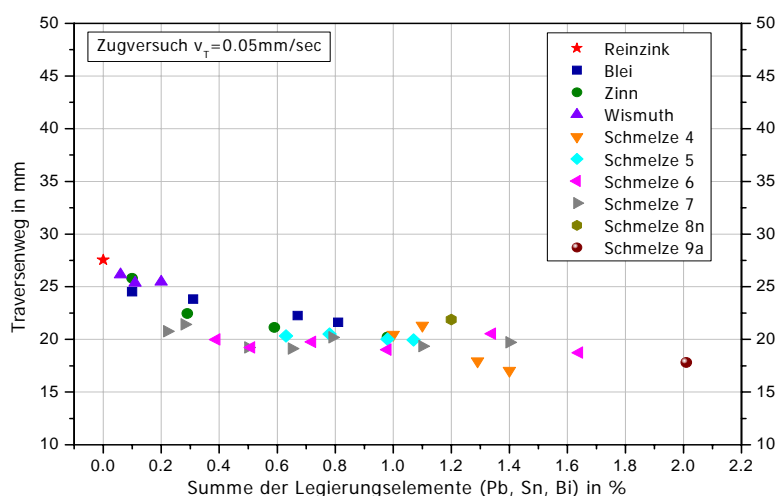
Da bei den untersuchten Baustählen weit im plastischen Bereich liegende Beanspruchungen erforderlich sind, um LMAC zu erzeugen und darüber hinaus der Schädigungsmechanismus auf Diffusion beruht, ist unabhängig davon, welche Größe zur Charakterisierung der Beanspruchbarkeit (Spannung oder Dehnung) herangezogen wird, immer auch die Zeit ein maßgeblicher Faktor. Während beim Zeitstandversuch Versuchsdauern von bis zu einer Stunde untersucht wurden, stellten sich beim Zugversuch, abhängig vom jeweils erreichten Weg, Versuchsdauern von ca. 5min bis 15min ein. Zur weiteren Untersuchung des Zeiteinflusses wurden in einem Teil der Schmelzen auch schnelle Zugversuche mit einer 20-fach höheren Geschwindigkeit durchgeföhrt, die zu Versagenszeiten kleiner 30sec führten, wie sie auch vielfach bei Schadenfällen an realen Bauteilen beobachtet wurden.

## 4 Ergebnisse

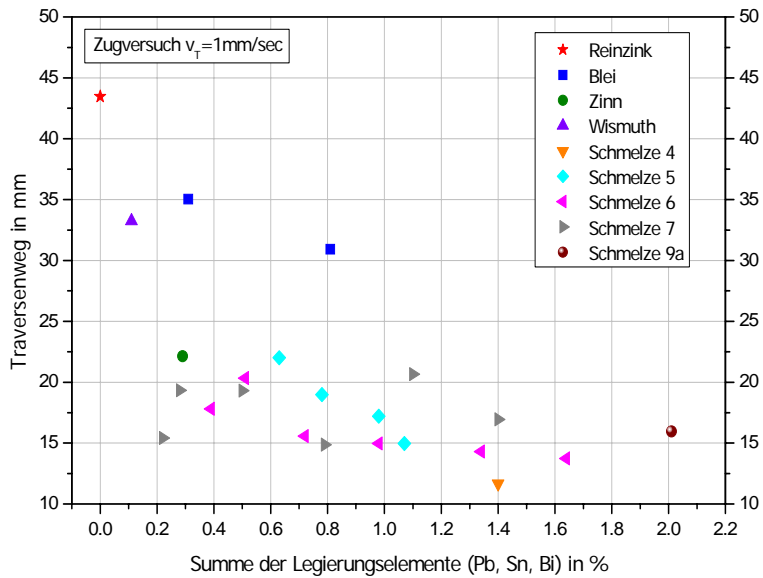
Die in dem Vorhaben verwendete Biegeprobe (U-Probe) ist zusammen mit der vorgestellten Versuchsführung und den entwickelten Auswerteroutinen prinzipiell geeignet, Zinkschmelzen hinsichtlich ihres LMAC-Gefährdungspotenzial zu untersuchen. Sowohl der Zeitstandversuch als auch der Zugversuch zeigen einen signifikanten und reproduzierbaren Einfluss des Gehalts an Legierungselementen auf die im Versuch erreichten Aufweitungen und die ertragbaren Biegespannungen. Dabei wurde bei Versuchszeiten, die mit den üblichen Verzinkungszeiten von 5min bis 15min vergleichbar sind, kein Unterschied in der Wirkung der Elemente Blei und Zinn auf das LMAC-Risiko festgestellt.

Dieses Ergebnis steht nicht im Einklang zu anderen Untersuchungsergebnissen, die dem Element Zinn eine größere negative Wirkung zusprechend. Dieses Ergebnis muss deshalb vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden sehr duktilen Baustähle und den gegen LMAC vergleichsweise wenig anfälligen Werkstoffzuständen gesehen werden. Bei der deutlich erhöhten Versuchsgeschwindigkeit des schnellen Zugversuchs war dagegen ein deutlicher Unterschied in der Wirkung der Elemente Blei und Zinn festzustellen und die zinnlegierten Schmelzen erreichten im Vergleich zu den bleilegierten signifikant geringere Aufweitungen und Dehnungen. Während bei den nur mit Blei legierten Schmelzen bei schneller Versuchsführung im Vergleich zum langsamen Zugversuch systematisch größere Aufweitungen erreicht werden, reduziert sich bei den zinnlegierten Schmelzen die erreichte Aufweitung. Dies bedeutet, dass Zinn vor allem die Dynamik der Rissbildung bei großen Dehngeschwindigkeiten erhöht.

In den **Bildern 3 bis 5** sind für den Werkstoff S355 J2 die in den einzelnen Versuchsvarianten ermittelten Werte über dem Summengehalt der Legierungselemente dargestellt. Beim Zugversuch sind als Ergebnis die jeweils bei der Höchstkraft erreichten Traversenwege dargestellt, die nicht um die scheinbare Dehnung infolge der einsetzenden Mikrorissbildung korrigiert wurden. Bei den Versuchen mit konstanter Beanspruchung sind dagegen die für eine Tauchdauer von 800sec ertragbaren Nennspannungen und korrigierten plastischen Dehnungen dargestellt. Es zeichnet sich jeweils eine untere Grenzkurve ab, die zur Ableitung eines Bemessungskennwerts herangezogen werden kann.

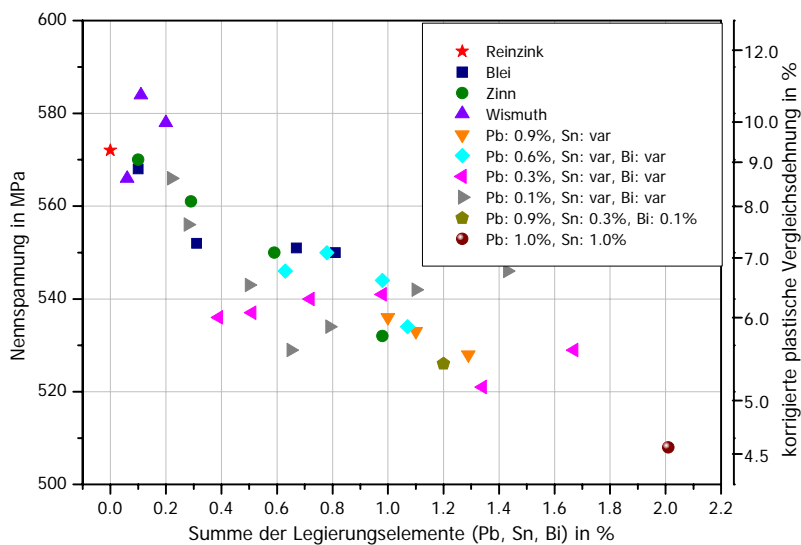


**Bild 3:**  
Erreichte Aufweitung im langsamen Zugversuch



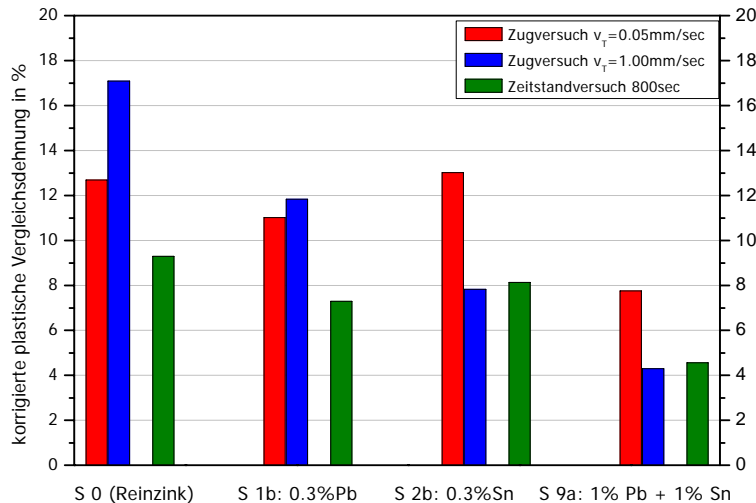
**Bild 4:**

Erreichte Aufweitung im schnellen Zugversuch



**Bild 5:**

Ergebnis des Zeitstandversuchs für eine Tauchdauer von 800 sec. Ertragbare Nennspannungen und korrigierte plastische Vergleichsdehnungen in Abhängigkeit vom Summengehalt der Legierungselemente.



**Bild 6:**

Vergleich der im Zeitstand- und Zugversuch erreichten korrigierten plastischen Vergleichsdehnungen

In **Bild 6** sind schließlich die im Zeitstand- und Zugversuch erreichten plastischen Dehnungen, die um die durch die beginnende Mikrorissbildung bedingte scheinbaren Dehnungen korrigiert wurden, für einige Schmelzen gegenübergestellt. Die kleinsten Dehnungen wurden jeweils bei den zinnlegierten Schmelzen erreicht, wobei der Zeitstandversuch und der schnelle Zugversuch jeweils zu vergleichbaren Werten führten. Bei den zinnfreien Legierungen werden dagegen im Zeitstandversuch kleinere und damit sicherere Werte erreicht als im Zugversuch.

Für die Praxis kann aufgrund dieser Ergebnisse keine eindeutige Priorisierung einer Versuchsführung empfohlen werden. Während bei zinnlegierten Schmelzen der schnelle Zugversuch allein als ausreichend angesehen werden kann, kann bei zinnfreien Schmelzen nicht auf die Durchführung der wesentlich zeit- und probenintensiveren Zeitstandversuche verzichtet werden, um sichere Kennwerte für die ertragbare Dehnung eines Werkstoffs in einer Schmelze zu ermitteln.

### Kontakt:

Dipl. phys. Dominik Körber  
 Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt  
 Technische Universität Darmstadt  
 Grafenstraße 2  
 64283 Darmstadt  
 Tel.: 06151-16-4572