

Der Reibbeiwert belasteter und unbelasteter feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Zeit

Von **W. Zimmermann** und **F. S. Rostásy**, Stuttgart

Bericht Nr. 75 des **Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.**

Der Reibbeiwert belasteter und unbelasteter feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Zeit

Von W. Zimmermann und F. S. Rostásy, Stuttgart

Mitteilung aus der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt, Otto-Graf-Institut, an der Universität Stuttgart¹⁾

Summary

In conclusion to the second part of a research programme the results of long time tests with high strength hot-dip galvanized connections coated with alkaline silicate dust paint were communicated in addition to the results of the short time tensile test published in [1] and compared with the former results.

Zusammenfassung

Nach Abschluß des zweiten Teiles eines Forschungsprogramms werden ergänzend zu den in [1] veröffentlichten Ergebnissen von Kurzzeit-Zugversuchen Ergebnisse von Langzeitversuchen an feuerverzinkten HV-Verbindungen mit einer Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung mitgeteilt und mit den früher gewonnenen Ergebnissen verglichen.

1. Einleitung

Im Anschluß an Versuche mit feuerverzinkten HV-Verbindungen zur Ermittlung der Reibbeiwerte in Abhängigkeit von der Nachbehandlung des Zinküberzuges (Bericht Nr. 71 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.), deren Ergebnisse in [1] veröffentlicht worden sind, wurden Zeitstandversuche und Langzeitversuche mit feuerverzinkten Probekörpern durchgeführt, deren Berührungsflächen mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe (Alk.SZn) beschichtet waren. Untersucht wurden Probekörper aus St 37 mit hellglänzendem Zinküberzug und mit grauem Eisen-Zink-Legierungsüberzug, jeweils mit Beschichtung. Außerdem wurden die Längenänderungen der verwendeten feuerverzinkten Schrauben HV-M 16-10.9 während der Langzeitversuche beobachtet.

2. Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden an zweischnittigen, feuerverzinkten Laschenverbindungen nach Bild 1 durchgeführt. Die Berührungsflächen der Verbindungen waren mit Alk.SZn beschichtet.

Die Feuerverzinkung der Probekörperteile ist gezielt so ausgeführt worden, daß einer Gruppe von Probekörpern mit hellglänzendem Zinküberzug eine zweite Gruppe mit grauem Eisen-Zink-Legierungsüberzug gegenüberstand, um den Einfluß der Verzinkungsart mit Alk.SZn-Beschichtung auf das Langzeitverhalten im belasteten und unbelasteten Zustand feststellen zu können. Das Bild 2 zeigt Schliffe von Probekörpern mit Reinzinkphase und mit durchgewachsener Eisen-Zink-Legierungsphase. Beide Überzugarten wurden vor dem Beschichten mit einem elektrischen Schwingschleifer mit Schmirgelpapier der Körnung 40 aufgeraut, um eine gute Haftung zu gewährleisten. Die Zinküberzüge waren im Mittel 100 µm dick, die Beschichtungen 35 µm.

Frühestens acht Tage nach dem Beschichten wurden die Probekörper mit geeichten, feuerverzinkten Schrauben HV-M 16 × 80 DIN 6914, 10.9 mit zugehörigen Muttern und Unterlegscheiben verschraubt. Beim Eichen der Schrauben in einer Zugprüfmaschine waren vorher deren Verlängerungen Δl bei Belastung mit $P_v = 100$ kN festgestellt worden.

Beim Vorspannen der Schrauben mit dem Drehmomentenschlüssel konnte dann die tatsächlich erzielte Vorspannung P_v aus dem Vergleich der erzielten Verlängerung mit der Verlängerung beim Eichen errechnet werden.

Zum Vergleich mit den Versuchen aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] wurden zunächst an je fünf Probekörpern mit hellglänzendem Zinküberzug (H 1 bis H 5) und mit grauem Zinküberzug (G 1 bis G 5) (jeweils mit Alk.SZn) die Reibbeiwerte $\mu = P_g / (m \cdot n \cdot P_v)$ im Kurzzeit-Zugversuch ermittelt. Als Gleit-

¹⁾ Bericht Nr. 75 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.

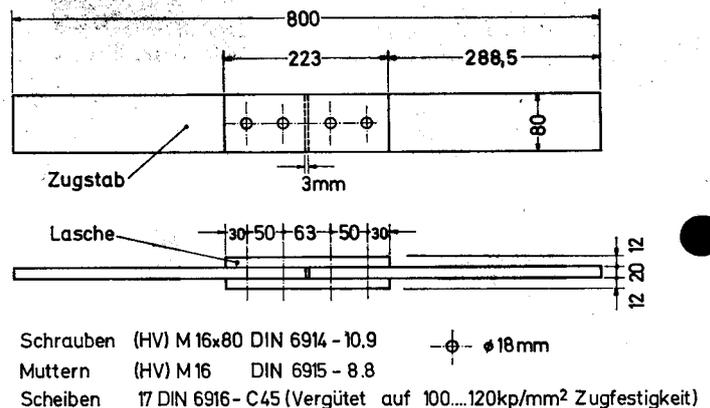


Bild 1. Probekörper

Fig. 1. Specimen

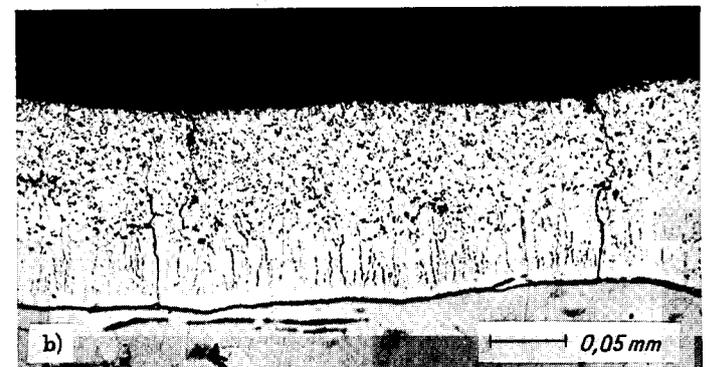


Bild 2. Zinküberzüge

Oberfläche: a) hellglänzende Reinzinkphase
b) graue Eisen-Zink-Legierungsphase

Fig. 2. Zinc coatings

Surface: a) bright pure zinc coating
b) gray iron-zinc phase

last P_g wurde wiederum diejenige Last definiert, bei der die gemessenen Verschiebungen zwischen den Verbindungsteilen schlagartig oder allmählich $150 \mu\text{m}$ überschritten.

Von den Probekörpern mit hellglänzendem Zinküberzug und Beschichtung wurden 23 Stück (L 1 bis L 23) für Reibbeiwertbestimmungen nach 5 Stunden, 24 Stunden, 5 Tagen, 5 Wochen, 1 Jahr, 2 Jahren und 5 Jahren bereitgelegt; sie sollten dazu dienen, die Änderung des Reibbeiwertes festzustellen, die sich aus dem Kriechen der Zinküberzüge und der Beschichtungen unter der Querverpressung durch die vorgespannten Schrauben in Abhängigkeit von der Zeit ergibt, ohne daß eine äußere Beanspruchung auf die Verbindung wirkt.

Gleichzeitig wurden dabei die Längenänderungen der Schrauben beobachtet, um daraus auf eventuelle Vorspannungsverluste in den Schrauben schließen zu können.

Zwei weitere Probekörpergruppen, G 6 bis G 21, mit grauem Zinküberzug und Beschichtung und H 6 bis H 20, mit hellem Zinküberzug und Beschichtung, wurden Zeitstandversuchen über 160 bis 560 Stunden mit gleichbleibender Zugkraft unterworfen, um diejenige Last festzustellen, die über lange Zeiträume hinweg ertragen werden kann, ohne daß infolge des Kriechgleitens der Zinküberzüge und Beschichtungen unerwünscht große Verschiebungen in den Verbindungen entstehen. Zum Vergleich mit den im Kurzzeitversuch ermittelten Reibbeiwerten μ wurde in den Zeitstandversuchen ein rechnerischer Reibbeiwert μ^r ermittelt:

$$\mu^r = \frac{P_z}{m \cdot n \cdot P_v}$$

mit P_z als der über die Versuchsdauer hinweg wirksamen Zeitstandlast, die auch über Jahre hinaus ertragen werden kann, ohne daß die Verschiebungen $150 \mu\text{m}$ überschreiten.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Kurzzeit-Zugversuche als Vergleichsversuche

Die Kurzzeit-Zugversuche mit den Vergleichsgruppen mit hellglänzendem Zinküberzug und Beschichtung, H 1 bis H 5, und mit grauem Zinküberzug und Beschichtung, G 1 bis G 5, hatten folgende Ergebnisse:

H 1 bis H 5: $\mu = 0,56$ bis $\mu = 0,67$; $\bar{\mu} = 0,61$

G 1 bis G 5: $\mu = 0,55$ bis $\mu = 0,65$; $\bar{\mu} = 0,59$

Bei dem vorangegangenen Forschungsvorhaben [1, Tabelle 2] lagen bei vergleichbaren Gruppen die Ergebnisse bei:

F (St 37): $\mu = 0,39$ bis $\mu = 0,56$; $\bar{\mu} = 0,49$

F (St 52): $\mu = 0,45$ bis $\mu = 0,70$; $\bar{\mu} = 0,54$

Das bessere Ergebnis der jetzigen Versuche H 1 bis H 5 mit $\bar{\mu} = 0,61$ (aus 10 Einzelergebnissen) gegenüber F (St 37) mit $\bar{\mu} = 0,49$ (aus 22 Einzelergebnissen) kann auf eine bessere Aufrauung des glatten Zinküberzuges zurückgeführt werden, während der Unterschied bei den von vornherein rauheren grauen Zinküberzügen mit $\bar{\mu} = 0,59$ gegenüber $\bar{\mu} = 0,54$ nur gering war.

3.2 Kurzzeit-Zugversuche in verschiedenen Zeitabständen nach dem Vorspannen

Die Kurzzeit-Zugversuche an Probekörpern mit hellglänzendem Zinküberzug und Beschichtung (L 1 bis L 17), in verschiedenen Zeitabständen nach dem Vorspannen der Schrauben, ergaben die Reibbeiwerte nach Tabelle 1.

Tabelle 1. Reibbeiwerte der Kurzzeit-Zugversuche

| Zeit nach dem Vorspannen | Anzahl der Ergebnisse | Reibbeiwerte min μ . . . max μ | Mittelwert $\bar{\mu}$ |
|--------------------------|-----------------------|--|------------------------|
| 5 Stunden | 10 | 0,57 . . . 0,67 | 0,62 |
| 24 Stunden | 6 | 0,54 . . . 0,60 | 0,57 |
| 5 Tage | 6 | 0,59 . . . 0,64 | 0,62 |
| 5 Wochen | 6 | 0,54 . . . 0,65 | 0,59 |
| 1 Jahr | 6 | 0,58 . . . 0,63 | 0,61 |

Alle Probekörper lagerten in der Zeit zwischen dem Vorspannen der Schrauben und dem Kurzzeit-Zugversuch bei konstanter Raumtemperatur ohne äußere Belastung in einer Prüfhalle.

Die Probekörper L 18 bis L 23 liegen für die Reibbeiwertbestimmungen nach 2 Jahren und nach 5 Jahren bereit.

Die aus Längenmessungen an den Schrauben abgeleiteten Vorspannungsverluste lagen im Mittel nach 5 Stunden bei 6%, nach einem Jahr bei 10%. Sie streuten sehr stark und ließen keinen Einfluß der Längenänderungen der Schrauben auf den Reibbeiwert erkennen (alle Reibbeiwerte wurden aus der Gleitlast und der beim Vorspannen erzielten Vorspannkraft P_v , ohne einen eventuellen Vorspannungsverlust, ermittelt.)

3.3 Zeitstandversuche

Bei den Zeitstandversuchen G 6 bis G 21 (graue Eisen-Zink-Legierungsphase mit Beschichtung) wurden über 160 bis 560 Stunden hinweg ständig wirkende Zeitstandlasten P_z ertragen, die rechnerischen Reibbeiwerten μ^r zwischen $\mu^r = 0,285$ bis $\mu^r = 0,426$ entsprachen. Die Ergebnisse sind auf Bild 3 dargestellt. Im Bereich $\mu^r = 0,400$ bis $\mu^r = 0,426$ wurden sechs Probekörper geprüft, zwölf Ergebnisse standen somit zur Verfügung. Davon waren neun Ergebnisse zufriedenstellend, d.h. auch bei Extrapolation des Verlaufs des Kriechgleitens während der Versuchsdauer auf 80 Jahre hinaus, waren keine Verschiebungen $> 150 \mu\text{m}$ zu erwarten, die festgesetzte Bedingung war erfüllt. Drei Ergebnisse waren nicht zufriedenstellend, nach 160, 450 und 560 Stunden waren Verschiebungen von 133 bis $180 \mu\text{m}$ erreicht, ein Abklingen des Kriechgleitens in absehbarer Zeit war nach dem Verlauf der Zeit-Verschiebungslinien nicht zu erwarten.

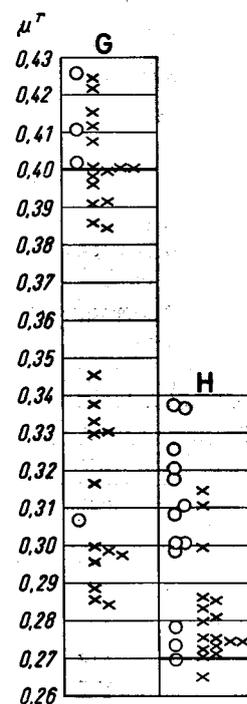


Bild 3. Ergebnisse der Zeitstandversuche
Fig. 3. Results of the tests with sustained loading

- G: Probekörper mit Beschichtung auf grauer Eisen-Zink-Legierungsphase
- H: Probekörper mit Beschichtung auf hellglänzender Reinzinkphase
- Bedingung
- x erfüllt
- o nicht erfüllt

Im Bereich $\mu^r = 0,285$ bis $\mu^r = 0,398$ erfüllte von 20 Versuchsergebnissen nur ein Ergebnis die Bedingung nicht. Eine Probekörperhälfte erreichte bereits bei der Laststeigerung von $P = 0$ auf $P_z = 123 \text{ kN} \approx \mu^r = 0,307$, Verschiebungen $v = 105 \mu\text{m}$. In 188 Stunden Versuchsdauer wuchs die Verschiebung um $35 \mu\text{m}$ auf $v = 140 \mu\text{m}$ an.

Nach dem Verlauf der Verschiebungszunahme mußte mit einem weiteren Anwachsen der Verschiebung gerechnet werden. Läßt man diesen einen „Ausreißer“ von 20 Ergebnissen außer Acht, so kann aus den insgesamt 32 Ergebnissen geschlossen werden, daß feuerverzinkte Verbindungen mit grauem Eisen-Zink-Legierungsüberzug und Alk.SZn-Beschichtung mit dauernd wirkenden Lasten, die Reibbeiwerten $\mu^r = 0,40$ entsprechen, auch über Jahre hinaus belastet werden können, ohne daß das Kriechgleiten der Zink- und Anstrichschichten Verschiebungen $> 150 \mu\text{m}$ in der Verbindung bewirkt.

Bei den Zeitstandversuchen an Probekörpern H 6 bis H 20 mit hellglänzender Reinzinkphase und Alk.SZn-Beschichtung waren die Ergebnisse wesentlich ungünstiger (s. Bild 3). Hier wurden die Zeitstandversuche mit 15 Probekörpern (= 30 Ergebnissen) über 337 bis 527 Stunden im Bereich von $\mu^r = 0,266$ bis $\mu^r = 0,338$ gefahren. Davon waren von 13 Ergebnissen im Bereich $\mu^r = 0,299$ bis $\mu^r = 0,338$ zehn Ergebnisse nicht zufriedenstellend und nur drei Ergebnisse zufriedenstellend.

Im Bereich $\mu^r = 0,266$ bis $\mu^r = 0,287$ waren von 17 Ergebnissen 14 zufriedenstellend, während drei Ergebnisse der gestellten Bedingung nicht entsprachen, es waren Versuche mit $\mu^r = 0,270$, $\mu^r = 0,274$ und $\mu^r = 0,279$.

Aus diesen 30 Versuchsergebnissen muß geschlossen werden, daß von feuerverzinkten HV-Verbindungen mit hellglänzender Reinzinkphase und Alk.SZn-Beschichtung Dauerstandlasten über lange Zeiträume hinweg ohne unerwünscht große Verschiebungen in der Verbindung durch Kriechgleiten der Zinküberzüge und Beschichtungen nur dann ertragen werden können, wenn die Dauerstandlast rechnerischen Reibbeiwerten $\mu^r \leq 0,27$ entspricht.

4. Zusammenfassung

Über den Reibbeiwert feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Nachbehandlung des Zinküberzuges wurde in [1] berichtet. Die vorliegenden Mitteilungen umfassen die Ergebnisse eines weiterführenden Forschungsvorhabens zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von feuerverzinkten HV-Verbindungen mit hellglänzender Reinzinkphase (H) und mit grauer Eisen-Zink-Legierungsphase (G), jeweils mit einer Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung. Faßt man die Ergebnisse beider Forschungsvorhaben zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

In den Jahren 1971 bis 1975 ergaben Kurzzeit-Zugversuche an vergleichbaren Probekörpern aus St 37 und St 52, die zu verschiedenen Zeiten von verschiedenen Firmen feuerverzinkt worden sind, alle jedoch mit der gleichen Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung zur Verbesserung des Reibbeiwertes versehen waren, die Ergebnisse nach Tabelle 2.

Tabelle 2. Reibbeiwert der Kurzzeit-Zugversuche aus den Jahren 1971—1975

| Mittlere Dicke des Zinküberzuges: | | 100 μm | |
|---|-----------------|-------------------|--------|
| Mittlere Dicke der Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung: | | 35 μm | |
| Probekörper | | H | G |
| Anzahl der Ergebnisse | <i>n</i> | 96 | 80 |
| Spannweite der Einzelergebnisse | min μ | 0,394 | 0,450 |
| | max μ | 0,695 | 0,770 |
| Mittelwert | $\bar{\mu}$ | 0,589 | 0,605 |
| Standardabweichung | <i>s</i> | 0,068 | 0,062 |
| Variationskoeffizient | <i>v</i> | 11,6 % | 10,3 % |
| Vertrauensbereich für den wahren Mittelwert bei 95 % statistischer Sicherheit | $\bar{\mu} - s$ | 0,575 | 0,592 |
| | $\bar{\mu} + s$ | 0,603 | 0,618 |

Die Überschneidungen der Spannweiten von $\mu = 0,39$ bis $\mu = 0,77$ und der Vertrauensbereiche für die Mittelwerte von $\bar{\mu} = 0,57$ bis $\bar{\mu} = 0,62$ zeigen, daß bei Kurzzeitbelastung nur der Anstrich mit guter Haftung für den Reibbeiwert maßgebend ist.

Reibbeiwertbestimmungen in Kurzzeit-Zugversuchen an Probekörpern mit hellglänzender Reinzinkphase und Beschichtung (H) ergaben nach 5 Stunden $\bar{\mu} = 0,62$, nach einem Jahr $\bar{\mu} = 0,61$, die Verbindungen waren in dem Zeitraum zwischen dem Vorspannen der Schrauben und der Gleitlastbestimmung unbelastet. Parallellaufende Längenmessungen an den Schrauben der Probekörper ergaben aus den Längenänderungen abgeleitete Vorspannungsverluste zwischen 6 % und 10 %, die angegebenen Reibbeiwerte sind jedoch stets aus der Gleitlast P_g und der beim Vorspannen der Schrauben tatsächlich erzielten Vorspannung P_v errechnet (ohne Berücksichtigung eines Vorspannungsverlustes).

Bei konstanter Belastung über lange Zeit kann das Kriechgleiten der Zinküberzüge und Beschichtungen zu unerwünscht großen Verschiebungen in den HV-Verbindungen führen. In Zeitstandversuchen bis zu 560 Stunden Dauer wurden Zeitstandlasten ermittelt, die über Jahre hinaus ertragen werden können, ohne daß die Verschiebungen $v > 150 \mu\text{m}$ werden. Die aus diesen Zeitstandlasten errechneten Reibbeiwerte μ^r waren für Verbindungen mit hellglänzender Reinzinkphase (H) und Beschichtung $\mu^r = 0,27$, für Verbindungen mit grauer Eisen-Zink-Legierungsphase (G) und Beschichtung $\mu^r = 0,4$. Aus diesen Versuchsreihen vorher wahllos entnommene Probekörper ergaben in Kurzzeit-Zugversuchen im Mittel aus je 10 Ergebnissen $\bar{\mu} = 0,61$ (H) und $\bar{\mu} = 0,59$ (G). Die gegenüber der grauen Eisen-Zink-Legierungsphase weichere Reinzinkphase wird hier offensichtlich für das Tragverhalten maßgebend, da die Beschichtung bei beiden Gruppen gleich dick war.

Die Verfasser danken der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e. V. Köln für die Bereitstellung der Mittel zu diesen Untersuchungen sowie dem Gemeinschaftsausschuß Verzinke e. V., einigen beteiligten Industriefirmen und dem Max-Planck-Institut in Düsseldorf für tatkräftige Unterstützung.

Schrifttum

- [1] Zimmermann, W., und Rostásy, F. S.: Der Reibbeiwert feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Nachbehandlung der Zinkschicht. Der Stahlbau 44 (1975), H. 3, S. 82—84.
- [2] Valtinat, G.: Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau — im Hinblick auf Schraubenverbindungen. Veröffentlichung der „Beratung Feuerverzinken“ Hochstraße 113, 5800 Hagen.
- [3] Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes (ORE), Frage D 90: Probleme der Verbindungen mit hochfesten vorgespannten Schrauben in Stahlbauten. Bericht Nr. 8 (Schlußbericht) Utrecht 1973. (Mit umfangreicher Literaturzusammenstellung.)