



- Herstellung von 3D-gedruckten Stahlknoten
- Laserstrahlschmelzen von austenitischem Stahl
- Additive Fertigung von Details, Verbindungen und Bauteilen
- **Verzinkbarkeit höher- und hochfester MSH-Profile**
- Vorspannkraftverluste in Ringflanschverbindungen
- Hochlagenanforderungen als verbessertes AUBI-Ersatzkriterium

# Verzinkbarkeit höher- und hochfester MSH-Profile

Die Feuerverzinkung von Stahlbauteilen ist zur Gewährleistung eines dauerhaften Korrosionsschutzes seit Jahrzehnten bekannt und etabliert. Auch für warmgewalzte Rohre und Hohlprofile ist dieses Verfahren von Vorteil, da durch das Eintauchen in die Zinkschmelze sowohl die äußere wie auch die innere Oberfläche des Bauteils mit einer Zinkschicht vollständig überzogen und geschützt wird. Die im Zuge des Verzinkungsprozesses auftretenden Ein- und Wechselwirkungen sind im Hinblick auf die Stahlkonstruktion und den verbauten Stahl selbst, bisher üblicherweise normalfeste Stähle, gut bekannt. Mit dem zunehmenden Aufkommen und Einsatz von höher- und hochfesten Stählen stellt sich die Frage, ob die vorliegenden Erkenntnisse im Hinblick auf die Einflüsse der Verzinkung auch auf diese Stähle übertragen werden können und die Verzinkbarkeit bestätigt werden kann. Im Zuge einer ausführlichen Versuchskampagne wurde hierzu an sechs Stahlwerkstoffen die Auswirkung der Feuerverzinkung auf die mechanischen Werkstoffeigenschaften und die Ausbildung der Zinkschicht untersucht. Die erzielten Ergebnisse werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt.

**Stichworte** Feuerverzinkung; Dünnschichtverzinkung; Zn5Al-Legierung; warmgewalzte nahtlose Hohlprofile; warmgefertigte nahtlose Hohlprofile; MSH; warmgewalzte Rohre; hochfeste Stähle; höherfeste Stähle; Werkstoffeigenschaften

## 1 Einleitung

Der Bedarf an kosten- und ressourceneffizienten Bauweisen hat in den letzten Jahrzehnten die Entwicklung leistungsfähiger Werkstoffe angetrieben. Für den Stahl- und Maschinenbau wurden höherfeste Stähle entwickelt, mit denen die Belastbarkeit von Konstruktionen erhöht bzw. der erforderliche Materialeinsatz reduziert werden kann. Mittlerweile sind unlegierte Stähle mit einer Mindeststreckgrenze von 355 MPa Standard. Stähle ab 500 MPa Mindeststreckgrenze haben sich ebenfalls in unterschiedlichen Anwendungen etabliert und wurden bereits bzw. werden perspektivisch in den entsprechenden Regelwerken aufgenommen [1, 2].

Zur Effizienz von stählernen Bauelementen gehört stets auch die Frage nach der Langlebigkeit, insbesondere des Verschleißes in Form von Korrosion und deren Vermeidung. Als ein über viele Jahrzehnte erprobtes Korrosionsschutzverfahren hat sich die Stückverzinkung bewährt. Aufgabe der Verzinkungsindustrie als Zulieferer der Stahl verarbeitenden Betriebe ist es, mit den allgemeinen Effizienzbestrebungen Schritt zu halten und unter den sich ändernden Randbedingungen passende Lösungen bereit-

## Galvanizing of high-strength MSH sections

Batch hot-dip galvanizing of steel components has been known and established for decades to ensure permanent corrosion protection. This process is also advantageous for hot-rolled tubes and hollow sections, as by immersion in the molten zinc, both the outer and the inner surface of the component is completely coated with a zinc layer and thus protected. The impact and interactions occurring during the galvanizing process are well known with regard, to the steel structure and the steel itself, which up to now has usually been normal strength steel. With the increasing spread of high-strength steels, the question arises, whether the available findings with regard to the influence of the galvanizing process can be transferred and confirmed to these steels. In the course of an extensive test campaign, the effect of hot-dip galvanizing on the mechanical material properties and the formation of the zinc layer was examined on six steel materials. The results obtained are presented in this paper.

**Keywords** hot-dip galvanizing; thin-film batch hot-dip galvanizing; Zn5Al-alloy; hot formed seamless hollow sections; hot finished seamless hollow sections; MSH; tubes; high strength steels; material properties

zustellen. Ein Aspekt ist hierbei die Entwicklung neuer Stückverzinkungslösungen, wie z. B. das ressourceneffiziente Dünnschichtverzinkungsverfahren microZINQ, bei dem durch Verwendung einer hoch aluminiumlegierten Zinkschmelze (Zn5%Al) sehr dünne, aber gleichzeitig leistungsstarke Zinküberzüge erzeugt werden können [3, 4]. Im Zusammenhang mit der Entwicklung höherfester Stähle gilt es im Besonderen, in Zusammenarbeit mit der Stahl-, Stahlbau- und Maschinenbauindustrie die Verzinkbarkeit moderner Stähle sowie daraus gefertigter Konstruktionen zu prüfen und die Randbedingungen für eine Nutzung zu klären.

Der Stand der Technik sieht derzeit gemäß [1] Regelungen im Hinblick auf die Verwendung von Baustählen zum Schmelztauchverzinken bis zur Sorte S500 in der Form vor, dass entsprechend Bestelloption 5 „eine für das Schmelztauchverzinken geforderte chemische Zusammensetzung“, unter Einbeziehung der DIN EN ISO 14713-2 [5], einzuhalten ist. Diese Regelungen basieren auf dem aktuell vorliegenden Wissensstand, dass bis zu diesen Festigkeiten keine bzw. keine nennenswerte Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften der Stähle durch den klassischen Stückverzinkungsprozess

**Tab. 1** Übersicht über die untersuchten Werkstoffe und Profile  
Overview of examined materials and sections

Pos.	Werkstoff	Lieferzustand	Charakteristik	Querschnitts- abmessung
1	S355J2H	warmgewalzt (+AR)	C-Mn-Stahl	100 × 100 × 8 mm
2	S460NH	normalisiert/normalisierend gewalzt (+N)	Feinkornstahl	70 × 70 × 7,1 mm
3	Forterior 500	warmgewalzt	C-Mn-Stahl	100 × 100 × 8 mm
4	Forterior 590 ImpactFIT 40	gehärtet & angelassen (+QT)	C-Mn-V-Stahl	159 × 7,1 mm
5	Forterior 620 ImpactFIT 20 (S620QH)	gehärtet & angelassen (+QT)	C-Mn-B-Stahl	100 × 100 × 8 mm
6	FineXcell 890 ImpactFIT 50 (S890QLH)	gehärtet & angelassen (+QT)	Feinkornstahl	177,8 × 8 mm

**Tab. 2** Übersicht über die chemische Zusammensetzung in M-% (Pos. 1–5 Stückanalyse/Pos. 6 Schmelzanalyse)  
Overview of steel chemistries in % per mass (Pos. 1–5 product analysis/Pos. 6 melt analysis)

Pos.	Werkstoff	Elemente												
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	Nb
1	S355J2H	0,167	0,20	1,42	0,013	0,0013	0,05	0,02	0,01	0,03	0,024	0,002	0,045	0,001
2	S460NH	0,213	0,27	1,60	0,015	0,0018	0,07	0,03	0,03	0,02	0,042	0,004	0,108	0,002
3	Forterior 500	0,215	0,34	1,73	0,012	0,0014	0,24	0,10	0,05	0,06	0,021	0,004	0,115	0,042
4	Forterior 590	0,190	0,29	1,59	0,015	0,0023	0,25	0,04	0,02	0,02	0,018	0,002	0,123	0,042
5	Forterior 620	0,224	0,20	0,75	0,012	0,0015	0,18	0,02	0,01	0,02	0,021	0,032	0,002	0,001
6	FineXcell 890	0,170	0,35	1,40	0,013	0,0013	0,64	0,16	0,36	0,15	0,030	0,003	0,050	0,001

erfolgt [6]. Dies findet sich auch in der 2016 neu aufgesetzten DASt-Richtlinie 022 wieder, in der eine Erweiterung bis zur Stahlsorte S500 vorgenommen wurde [7]. In der praktischen Anwendung hat sich die Verzinkung von höherfesten Stählen bis in den Festigkeitsbereich von 500 MPa bereits in einigen Bereichen etabliert, wie z. B. für Fahrwerkskomponenten im Automobil- und Nutzfahrzeugbau [8] sowie dem Parkhausbau [9]. Die Untersuchungen zur Verzinkbarkeit hochfester Stähle wurden in den letzten Jahren bis in den Bereich S690/S700 ausgedehnt. In [10] werden Untersuchungen an 10 mm dickem Stahlblech der Sorte S690Q beschrieben, die auf die Wasserstoffaufnahme durch den Beizprozess beim Verzinken und auf mögliche hieraus resultierende Versprödungseffekte abzielten. In [11] wird von Untersuchungen an Stahlblech der Sorte S700 gemäß DIN 10149-2 [12] zum Einfluss der Verzinkung auf die Festigkeit berichtet. Es zeigte sich in beiden Fällen, dass keine relevante Beeinträchtigung durch den Verzinkungsprozess vorliegt.

Für den Bereich der höher- und hochfesten Rohre und Hohlprofile wird in [13] der aktuelle Stand der Technik dargelegt sowie neueste Anwendungen und Anwendungspotenziale vorgestellt. Inwieweit solche Stahlsorten, mit den ihnen zugrunde liegenden Legierungskonzepten, verzinkbar sind, ist wesentliches Ziel der hier vorgestellten Untersuchung. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der zu verzinkenden Konstruktionen gilt es zu prüfen, ob sich fest haftende, homogene Zinküberzüge ausbilden. Zudem gilt es, die werkstofftechnische Frage zu beantworten, welchen Einfluss die verzinkungsspezifischen Parameter, wie die nasschemische Vorbehandlung sowie die Prozesswärme im Bereich von 450 °C, auf die Werkstoffkennwer-

te haben. Im Rahmen einer kooperativen Untersuchung wurde diesen Fragen anhand von sechs typischen Stahl- und Profilarten aus dem Portfolio der Vallourec Deutschland GmbH nachgegangen. Diese Untersuchung erscheint auch im Hinblick auf die bereits vorliegende prEN10210-3 [14] zweckmäßig, da hier nun erstmals Stähle bis zu S960 normativ definiert sind.

## 2 Werkstoffe und Verzinkungen

### 2.1 Werkstoff- und Profilvarianten

Zur Untersuchung der oben genannten Aspekte wurden Muster aus Rohr- und Hohlprofilmaterial verschiedener Stähle und Geometrien herangezogen. Hierbei erfolgte zunächst die Verzinkung der entsprechenden Musterteile und anschließend die Charakterisierung des Werkstoffs im Hinblick auf die Zinkschichtausbildung sowie eine mögliche Beeinflussung der Materialkennwerte.

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Materialien war die Zielsetzung, ein möglichst breites Spektrum niedriglegierter Werkstoffe aus dem Bereich der höher- und hochfesten Stahlwerkstoffe mit unterschiedlichen Analysekonzepten und Wärmebehandlungszuständen im Rahmen einer dennoch kompakten Prüferie zu berücksichtigen. Diesem Grundgedanken folgend, wurden sechs Werkstoffe, ausgehend von der bzgl. der Festigkeit standardmäßigen Sorte S355, ausgewählt (Tab. 1).

Bei allen Mustern handelt es sich um nahtlos warmgewalzte Rohre bzw. quadratische MSH-Profile in typischen Abmessungs-Werkstoffkombinationen.

**Tab. 3** Übersicht über die Versuchsvarianten FineXcell 890  
Overview of test variations FineXcell 890

Nr.	Variante	Strahlen	Beizen	Zinkschmelze	Temperatur
1.0	Werkstoff in Anlieferungszustand ohne Behandlung	–	–	–	–
1.1	Erwärmung auf 450 °C, ohne Verzinkung	–	–	–	450 °C für 10 min
1.2	Sandstrahlen + Beizen für 10 min + Verzinkung „Zn ISO 1461“ für 10 min	x	10 min	Zn	450 °C für 10 min
1.3	Sandstrahlen + Beizen für 10 min + Verzinkung „Zn ISO 1461“ für 3 min	x	10 min	Zn	450 °C für 3 min
1.4	Beizen für 2 h, ohne Verzinkung	–	2 h	–	–
1.5	Beizen für 2 h + Verzinkung „Zn ISO 1461“ für 10 min	–	2 h	Zn	450 °C für 10 min
1.6	Sandstrahlen + Beizen für 10 min + Verzinkung „Zn5Al“ für 10 min	x	10 min	Zn5%Al	420 °C für 10 min
1.7	Beizen für 2 h + Verzinkung „Zn5Al“ für 10 min	–	2 h	Zn5%Al	420 °C für 10 min

Ergänzend sind in Tab. 2 die chemischen Zusammensetzungen der untersuchten Werkstoffe zusammengefasst.

## 2.2 Verzinkungsvarianten

Als Verzinkungsvarianten kamen im Rahmen der Untersuchungen zum einen die klassische Stückverzinkung gemäß DIN EN ISO 1461 [15] (Kennzeichnung im Folgenden als „Zn ISO 1461“) sowie zum anderen das Dünnschichtverzinkungsverfahren gemäß prDIN 50997 [16] und AbZ Z-30.11-60 [17] mit einer 5% aluminiumhaltigen Zinkschmelze, auch unter dem Markennamen microZINQ bekannt (Kennzeichnung im Folgenden als „Zn5Al“), zur Anwendung.

Bei beiden Verfahren handelt es sich um Stückverzinkungsprozesse, bei denen die i. d. R. vollständig oder weitestgehend vorgefertigten Werkstücke zunächst im Zuge einer nasschemischen Vorbehandlung gereinigt und anschließend durch Eintauchen in die flüssigheiße Zinkschmelze mit einem Zinküberzug versehen werden. Im Fall der „Zn ISO 1461“-Verzinkung wächst die Zinkschicht während der gesamten Verweilzeit des Bauteils in der weitestgehend reinen Zinkschmelze durch diffusionsgesteuerte Prozesse unter fortschreitender Ausbildung von intermetallischen Zink-Eisen-Phasen auf. Die Dicke des resultierenden Überzugs ist hierbei maßgeblich abhängig von der Reaktivität des Stahls, hier insbesondere des Si-Gehalts, der Verweildauer des Bauteils in der Schmelze und der Verzinkungstemperatur. In der Regel liegt Letztere jedoch in einem relativ engen Betriebsfenster zwischen 445 °C und 455 °C.

Im Gegensatz dazu wird bei der „Zn5Al“-Verzinkung die Schichtbildungskinetik durch den hohen Aluminiumanteil in der Zinkschmelze beeinflusst, sodass sich ein stark abweichender Zinküberzug ausbildet. Hierbei wirkt sich der hohe Aluminiumgehalt derart aus, dass die resultierende Zinkauflage wesentlich dünner ist (weshalb dieses Verfahren auch Dünnschichtverzinkung genannt wird), jedoch gleichzeitig die Deckschichtbildung des

Zink-Aluminiumüberzugs derart positiv beeinflusst wird, dass eine sehr hohe Korrosionsschutzleistung erreicht wird. Ein im Hinblick auf eine mögliche Werkstoffbeeinflussung nennenswerter Unterschied der beiden Verfahren liegt in der Höhe der Prozesstemperatur. Da im Fall der „Zn5Al“-Verzinkung die Zusammensetzung der Zink-Aluminiumlegierung im eutektischen Punkt mit einem Schmelzpunkt von 382 °C liegt, kann die Betriebstemperatur bei diesem Verfahren auf 420 °C und damit deutlich unter die sonst übliche Temperatur abgesenkt werden.

## 3 Vorversuche anhand der Stahlsorte FineXcell 890

### 3.1 Varianten und Prüfmethodik

Im Rahmen einer ersten Versuchsserie sollten zunächst grundlegende Fragen zum Einfluss verschiedener Verzinkungsparameter auf die mechanischen Werkstoffeigenschaften geklärt werden. Hierfür wurde zunächst der hochfeste Werkstoff FineXcell 890, der die höchste Festigkeitsstufe dieser Untersuchungsreihe darstellt, im Hinblick auf die folgenden Aspekte untersucht:

- 1) Wie wirkt sich die Prozesswärme der Verzinkung auf die Werkstoffeigenschaften aus?
- 2) Ist die Verzinkungsdauer von Relevanz?
- 3) Resultiert eine Werkstoffbeeinflussung bei langen Beizeiten?
- 4) Führen die beiden Verzinkungsverfahren zu unterschiedlichen Effekten?

Die Versuchsvarianten sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Die Bewertung der verschiedenen Einflüsse der Verzinkung auf die Werkstoffeigenschaften erfolgte auf Basis von einaxialen Zugversuchen an normierten Flachzugproben gemäß DIN EN ISO 6892-1 [18]. Hierfür wurden jeweils Streifenproben in Rohr- bzw. Profillängsrichtung aus den Versuchsmustern entnommen. Zusätzlich wurden bei allen Varianten Härteverlaufsprüfungen HV1 über der Wanddicke an verschiedenen Stellen der Proben

**Tab. 4** Ergebnisse Zugversuche & Kerbschlagbiegeversuche bei  $-40^{\circ}\text{C}$  am FineXcell 890 (Einfluss der Prozesswärme)  
Results of tensile tests & Charpy impact test at  $-40^{\circ}\text{C}$  on FineXcell 890 (influence of process heat)

Variante	Zustand	$R_{p0,2}$ in $\text{N}/\text{mm}^2$	$R_m$ in $\text{N}/\text{mm}^2$	$A$ in %	Kerbschlagbiegeversuch	
					Mittelwert in J	skaliert in J
1.0	unverzinkt	947	1013	18,0	23	47
1.1	10 min bei $450^{\circ}\text{C}$ geglüht, unverzinkt	958	1027	15,0	20	41
1.2	gestrahlt, 10 min gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	951	1023	17,0	23	47

**Tab. 5** Ergebnisse Zugversuche & Kerbschlagbiegeversuche bei  $-40^{\circ}\text{C}$  am FineXcell 890 (Einfluss der Verzinkungsdauer)  
Results of tensile tests & Charpy impact test at  $-40^{\circ}\text{C}$  on FineXcell 890 (influence of galvanizing time)

Variante	Zustand	$R_{p0,2}$ in $\text{N}/\text{mm}^2$	$R_m$ in $\text{N}/\text{mm}^2$	$A$ in %	Kerbschlagbiegeversuch	
					Mittelwert in J	skaliert in J
1.0	unverzinkt	947	1013	18,0	23	47
1.2	gestrahlt, 10 min gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	951	1023	17,0	23	47
1.3	gestrahlt, 10 min gebeizt, 3 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	950	1023	16,0	21	42

durchgeführt. Der Einfluss auf die Zähigkeit wurde anhand von Kerbschlagbiegeversuchen bei  $-40^{\circ}\text{C}$  an Untermaßproben in Längsrichtung mit Charpy-V-Kerb gemäß DIN EN ISO 148-1 [19] untersucht. Die resultierenden Werte wurden anschließend auf den Standardprüfquerschnitt  $10 \times 8 \times 55 \text{ mm}$  hochskaliert. Als Referenzmaßstab dienten in allen Fällen Proben am unbehandelten, unverzinkten Grundmaterial im jeweiligen Anlieferungszustand.

### 3.2 Einfluss der Prozesswärme

Die Auswertung der Zug- und Kerbschlagbiegeversuche im Hinblick auf die Fragestellung, inwiefern die Prozesswärme Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des hochfesten Grundwerkstoffs hat, zeigt im Vergleich zur unbehandelten, unverzinkten Referenzprobe keine Auffälligkeiten. Die Ergebnisse für die untersuchten Varianten liegen in einem engen Streuband und erfüllen die jeweils vorliegenden Normanforderungen bzgl. der Streckgrenze ( $R_{p0,2} \geq 890 \text{ MPa}$ ), der Zugfestigkeit ( $960 \text{ MPa} \leq R_m \leq 1100 \text{ MPa}$ ) und der Dehnbarkeit ( $A \geq 14\%$ , Probenlage längs) (Tab. 4). Bezüglich der Zähigkeit stimmen die gemittelten Ergebnisse der verzinkten und unverzinkten Varianten überein, wohingegen die bei  $450^{\circ}\text{C}$  geglühte Probe etwas abfällt. Aufgrund der per se höheren Streu-

ung von KV-Ergebnissen ist dies jedoch nicht als negative Beeinflussung, sondern vielmehr im Rahmen der üblichen Streuung liegend zu bewerten.

Die Härtemessungen liefern für alle drei Varianten ein konstantes Niveau zwischen 335 und 340 HV1. Eine temperaturbedingte Beeinflussung trat nicht auf.

### 3.3 Einfluss der Verzinkungsdauer

Eine Beeinflussung der Verzinkungsdauer auf die mechanischen Werkstoffeigenschaften kann durch die Ergebnisse nicht belegt werden. Alle Ergebnisse liegen in einem engen Streuband innerhalb der normativen Vorgaben (Tab. 5).

Die Ergebnisse der Härtemessungen liegen auch für diese Varianten im Bereich von 335 bis 340 HV1.

### 3.4 Einfluss des Beizens

Die Untersuchung des Einflusses der Beizdauer zeigt, dass eine kurze Beizzeit von 10 min keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Bei einer Beizzeit von 2 h verändern sich die Streckgrenze und Festigkeit

**Tab. 6** Ergebnisse Zugversuche & Kerbschlagbiegeversuche bei  $-40^{\circ}\text{C}$  am FineXcell 890 (Einfluss des Beizens)  
Results of tensile tests & Charpy impact test at  $-40^{\circ}\text{C}$  on FineXcell 890 (influence of pickling)

Variante	Zustand	$R_{p0,2}$ in $\text{N}/\text{mm}^2$	$R_m$ in $\text{N}/\text{mm}^2$	$A$ in %	Kerbschlagbiegeversuch	
					Mittelwert in J	skaliert in J
1.0	unverzinkt	947	1013	18,0	23	47
1.2	gestrahlt, 10 min gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	951	1023	17,0	23	47
1.4	2 h gebeizt, unverzinkt	933	1003	17,0	22	45
1.5	2 h gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	910	968	15,0	25	50

**Tab. 7** Ergebnisse Zugversuche & Kerbschlagbiegeversuche bei  $-40^{\circ}\text{C}$  am FineXcell 890 (Einfluss der Verzinkungsart)  
Results of tensile tests & Charpy impact test at  $-40^{\circ}\text{C}$  on FineXcell 890 (influence of type of galvanizing)

Variante	Zustand	$R_{p0,2}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	A in %	Kerbschlagbiegeversuch	
					Mittelwert in J	skaliert in J
1.0	unverzinkt	947	1013	18,0	23	47
1.2	gestrahlt, 10 min gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	951	1023	17,0	23	47
1.5	2 h gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	910	968	15,0	25	50
1.6	gestrahlt, 10 min gebeizt, 10 min „Zn5Al“-verzinkt	944	1016	15,0	21	42
1.7	2 h gebeizt, 10 min „Zn5Al“-verzinkt	948	1019	16,0	20	41

des S890-Werkstoffs kaum (vgl. Varianten 1.0 und 1.4). Erst mit anschließender Verzinkung (Variante 1.5) tritt ein leichter Abfall um ca. 4 % ein. Die Härtemessung bestätigt den leichten Abfall der Variante 1.5 mit einer durchschnittlichen Härte von 320 HV1 gegenüber dem sonst vorzufindenden Härteniveau im Bereich von 335 bis 340 HV1 (Tab. 6). Die Zähigkeiten bewegen sich im üblichen Streuband. Die normativen Vorgaben werden deutlich eingehalten.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die gestrahlten und nur kurz gebeizten Varianten keine nennenswerten Abweichungen vom unbehandelten, unverzinkten Anlieferungszustand aufweisen. Die Ergebnisse legen jedoch nahe, dass bei der hier untersuchten Stahlsorte FineXcell 890 Beizzeiten  $> 2$  h vermieden werden sollten und eine Vorreinigung der Werkstücke in Form von Strahlen zwecks Verkürzung der Beizzeit anwendungsabhängig empfehlenswert erscheint.

### 3.5 Einfluss des Verzinkungsverfahrens

Der Vergleich der Verzinkungsverfahren „Zn ISO 1461“ und „Zn5Al“ offenbart nur geringfügige Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften. Die Festigkeitswerte

der beiden dünn-schichtverzinkten Varianten bleiben unabhängig von der gewählten Vorbehandlung (gebeizt bzw. gestrahlt und kurz gebeizt) auf hohem Niveau, ohne dass eine Beeinflussung wie im Fall der klassischen Verzinkung bei der gebeizten Variante auftritt. Demgegenüber kommt es bei beiden Varianten zu einer leichten Reduzierung der Dehnbarkeit, wenngleich auch hier die normative Mindestforderung noch deutlich eingehalten wird (Tab. 7).

Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche liegen wie alle anderen Varianten im Streuband von 40 bis 50 J. Es kann aus den Ergebnissen keine signifikante Beeinflussung durch die beiden Verzinkungsverfahren abgeleitet werden.

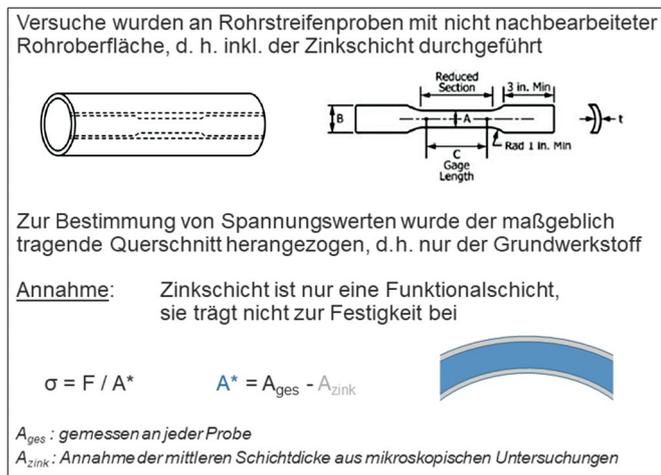
Die Ergebnisse der Härtemessungen liegen bis auf Variante 1.5 (Abschn. 3.4) wieder im Bereich von 335 bis 340 HV1.

### 3.6 Einfluss der Zinkschichtdicke bei der Versuchsauswertung

Zur Ermittlung der mechanischen Werkstoffeigenschaften wurden Streifenzugproben in Rohr- bzw. Profillängsrichtung entnommen. Bei den ermittelten Streckgrenzen-

**Tab. 8** Abmessungen und Querschnittsflächen  $A_{ges}$  der Streifenzugproben, mittlere Zinkschichtdicke, Streckgrenze und Zugfestigkeit des FineXcell 890 auf Basis des Nettoquerschnitts  $A^*$   
Dimensions and cross-sectional areas  $A_{ges}$  of strip samples, average zinc layer thickness, yield strength and tensile strength of FineXcell 890 based on net cross-section  $A^*$ 

Variante	Zustand	Streifenzugprobe					$R_{p0,2}$ in MPa	$R_m$ in MPa
		Dicke in mm	Breite in mm	Querschnitt $A_{ges}$ in mm <sup>2</sup>	mittlere Zinkschicht- dicke in mm	Querschnitt $A^*$ in mm <sup>2</sup>		
1.2	gestrahlt, 10 min gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	9,01	24,96	225,7	0,45	203,2	951	1023
1.3	gestrahlt, 10 min gebeizt, 3 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	8,75	24,97	219,3	0,20	209,3	950	1023
1.4	2 h gebeizt, unverzinkt	7,77	24,96	194,6	–	194,6	933	1003
1.5	2 h gebeizt, 10 min „Zn ISO 1461“-verzinkt	8,67	24,95	217,1	0,30	202,1	910	968
1.6	gestrahlt, 10 in gebeizt, 10 min „Zn5Al“-verzinkt	7,89	22,46	177,8	0,03	176,35	944	1016
1.7	2 h gebeizt, 10 min „Zn5Al“-verzinkt	8,03	24,96	201,1	0,05	198,6	948	1019



**Bild 1** Beispiel: Zinkschichtdickeneinfluss  
 Example: influence of zinc layer thickness

und Zugfestigkeitswerten ergaben sich zunächst bei den „Zn ISO 1461“-verzinkten Proben deutliche Abfälle gegenüber den als Referenz dienenden Lieferzuständen wie auch gegenüber den „Zn5Al“-verzinkten Proben. Die nähere Betrachtung der verschiedenen Einflussmöglichkeiten offenbarte, dass die Zinkauflage auf den Zugproben ursächlich für die nur vordergründige negative Festigkeitsbeeinflussung war. Zum Tragen kommt hierbei, dass der hohe Siliziumgehalt im verwendeten Werkstoff bei der klassischen Verzinkung gemäß DIN EN ISO 1461 [15] zu hohen Zinkschichtdicken führt. Hintergrund für diesen Effekt ist die durch den Siliziumgehalt beeinflusste Diffusionsrate zwischen der Zinkschmelze und dem Grundwerkstoff und dem hierdurch verursachten starken Aufwachsen der Zink-Eisen-Phasen. Bei Zn5%Al-Schmelzen wird dieser Effekt durch die Ausbildung einer FeAl-Phase im Grenzbereich zwischen Grundwerkstoff und Zinkschicht, die als Diffusionssperre dient, blockiert und tritt entsprechend bei dieser Verzinkungsart nicht auf.

Die bei den vorliegenden Untersuchungen teils bis zu 500 µm dicken, beidseitig an den Probengeometrien aufliegenden Zinkschichten ergeben bei einer Rohrnennwanddicke von 8 mm einen über 10%igen Querschnittsanteil der Zugproben, der bei einer Festigkeit der Zinkschicht von ca. 130 MPa nur etwa 12% der typischen Zugfestigkeit des S890 ausmacht. Bei der Bestimmung der im Zugversuch erreichten rechnerischen Festigkeitskennwerte tritt somit ein systematischer Fehler auf, wenn bei derart hohen Zinkauflagen der Zinkanteil nicht vom

Gesamtprobenquerschnitt abgezogen und die Festigkeiten mit dem allein relevanten Stahlquerschnitt bestimmt werden. Zur Verdeutlichung siehe Bild 1 und Tab. 8.

Die Ergebnisse aus Tab. 8 zeigen, dass bei der gewählten Streifenzugprobengeometrie bei Rohrnennwanddicken bis 10 mm ab einer Zinkschichtdicke von ca. 100 µm (Rohrinnen- und Rohraußenseite) bzw. 10% der Substratnennwanddicke ein nicht mehr zu vernachlässigender Effekt auftritt. Aufgrund der durchweg hohen Si-Gehalte > 0,2% wird diese Schichtdicke bei allen gemäß DIN EN ISO 1461 verzinkten Proben deutlich überschritten. Aus diesem Grund wurde bei sämtlichen Streifenproben der „Zn ISO 1461“-Varianten die zugehörige durchschnittliche mittlere Zinkschichtdicke bestimmt, um die bei der rechnerischen Bestimmung der Festigkeit zugrunde gelegte Gesamtprobenquerschnitt reduziert wurde.

## 4 Weiterführende Versuche mit Stahlsorten S355H bis Forterrior 620

### 4.1 Varianten und Prüfmethodik

Die erste Versuchsreihe diente der Klärung grundlegender Fragen im Hinblick auf mögliche Effekte der Verzinkung. Dafür wurde der hochfeste Stahl FineXcell 890 verwendet, der das höchste Festigkeitsniveau des betrachteten Festigkeitsbereichs darstellt. Vor dem Hintergrund der zusammenfassend als positiv zu bewertenden Ergebnisse erfolgte die weiterführende Untersuchung der Verzinkungseinflüsse auf die Werkstoffe der Positionen 1–5 im Bereich der Mindeststreckgrenze von 355 MPa bis 620 MPa (s. Tab. 1, 2). Hierbei wurden wie zuvor die mechanischen Werkstoffkennwerte mittels Zugproben sowie die Zähigkeit mittels Kerbschlagbiegeversuch jeweils für die drei Zustände „Ausgangszustand“, „Zn ISO 1461“-verzinkt“ und „Zn5Al“-verzinkt“ bestimmt und verglichen.

Basierend auf den Erkenntnissen der ersten Versuchsreihe wurden insbesondere die Parameter der Beiz- und Verzinkungsdauer angepasst und praxisübliche Prozessparameter gewählt. Ergänzend wurde zudem für die beiden Werkstoffe Forterrior 590 und Forterrior 620 eine gezielt längere Tauchzeit gewählt, um für diese Werkstoffe den Effekt des Si-Gehalts bei längeren Verweilzeiten zu prüfen. Die Verzinkungsprozessparameter für die beiden Verfahren ergaben sich somit wie in Tab. 9 aufgeführt.

**Tab. 9** Verfahrensweise Verzinkungsprozesse  
 Procedure of galvanizing processes

Prozessschritt	Verfahren „Zn ISO 1461“	Verfahren „Zn5Al“
Entfettung	30 min	30 min
Beize	60 min	60 min
Verzinkung	7 min (für S355, S460 und Forterrior 500) 13:30 min (für Forterrior 590 und Forterrior 620)	12 min

**Tab. 10** Ergebnisse Zugversuche S355 – Forterior 620  
Results of tensile tests S355 – Forterior 620

Werkstoff	Zustand	$R_{eH}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_{t0,5}$ in N/mm <sup>2</sup>	Norm- anforderung $R_{eH}$ in N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	Norm- anforderung $R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	A in %	Norm- anforderung A in %
S355	warmgewalzt	391	–	377	≥ 355	518	470–630	29,1	≥ 20
	„Zn5Al“-verzinkt	409	–	389		539		29,4	
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	412	–	392		542		28,3	
S460	normalisiert	487	–	473	≥ 460	665	540–720	24,5	≥ 17
	„Zn5Al“-verzinkt	515	–	505		681		24,9	
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	532	–	513		686		24,4	
Forterior 500	AR	–	–	515	≥ 500	855	≥ 610	19,5	≥ 17
	„Zn5Al“-verzinkt	597	–	596		797		18,5	
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	–	585	586		820		18,7	
Forterior 590	QT	–	702	676	≥ 590	818	700–850	15,0	≥ 14
	„Zn5Al“-verzinkt	726	–	713		806		15,4	
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	721	–	714		787		16,1	
Forterior 620	QT	699	–	695	≥ 620	758	700– 890	16,5	≥ 13
	„Zn5Al“-verzinkt	718	–	714		782		15,6	
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	728	–	707		774		16,3	

**Tab. 11** Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuche S355 – Forterior 620  
Results of charpy impact tests S355 – Forterior 620

Werkstoff	Zustand	Probe 1 in J	Probe 2 in J	Mittelwert (Untermaß) in J	Mittelwert (hochskaliert auf Standardmaß) in J
S355	warmgewalzt	150	154	152	190
	„Zn5Al“-verzinkt	165	153	159	194
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	148	185	167	205
S460	normalisiert	14	45	30	42
	„Zn5Al“-verzinkt	83	67	75	107
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	48	62	55	73
Forterior 500	AR	16	9	13	15
	„Zn5Al“-verzinkt	27	25	26	33
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	28	26	27	34
Forterior 590	QT	31	35	33	45
	„Zn5Al“-verzinkt	31	40	36	49
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	34	30	32	42
Forterior 620	QT	138	127	133	164
	„Zn5Al“-verzinkt	147	161	154	185
	„Zn ISO 1461“-verzinkt	149	148	149	183

## 4.2 Ergebnisse Zugversuch

Die Ergebnisse an den verzinkten Proben stellen jeweils den Mittelwert aus zwei Proben dar. Auch hier wurden die Festigkeitsergebnisse um den Querschnittsflächenbetrag der mittleren Zinkschichtdicke korrigiert (Tab. 10).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Werkstoffe eine unterschiedliche Anlassbeständigkeit aufweisen, die auf verschiedene Wärmebehandlungszustände und Legierungskonzepte der Stähle zurückzuführen sind. Entsprechend treten temperaturbedingte Effekte aus dem Verzinkungs-

prozess unterschiedlich stark auf, wobei zwischen den beiden Verzinkungsverfahren „Zn ISO 1461“ sowie „Zn5Al“ kein nennenswerter Unterschied zu erkennen ist. Insgesamt ist eine tendenziell positive Beeinflussung der untersuchten Werkstoffe durch die Verzinkung festzustellen.

Das Streckgrenzeniveau wird in allen Fällen leicht erhöht, bei den Stahlsorten S460NH und Forterior 500 sogar deutlich. Die Zugfestigkeit wird teilweise leicht vermindert, teilweise leicht erhöht. Der Einfluss auf die Dehnbarkeit schwankt ebenfalls in begrenztem Maße.



**Bild 2** Vergleich optische Schichtausbildung verzinktes Hohlprofil  $70 \times 70 \times 7,1$  der Stahlsorte S460NH: „Zn5Al“ (links) und „Zn ISO 1461“ (rechts)  
Comparison of optical layer characteristic on galvanized hollow section  $70 \times 70 \times 7.1$  made of steel grade S460NH: „Zn5Al“ (left) and „Zn ISO 1461“ (right)

Vor dem Hintergrund, dass die Normanforderungen in allen Fällen sicher eingehalten werden und der für die statische Bemessung und bei Ansatz eines elastischen Tragverhaltens relevante Wert der Streckgrenze sogar durchweg eine Erhöhung im verzinkten Zustand erfährt, werden die vereinzelt auftretenden Abminderungen der Zugfestigkeit sowie der Dehnbarkeit als für die Praxis akzeptabel bewertet.

### 4.3 Ergebnisse Kerbschlagbiegeversuch

Die bei einer Prüftemperatur von  $-40^\circ\text{C}$  erzielten Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfungen sind in Tab. 11 zu-

sammengefasst. Hierbei sind sowohl die jeweils auf Untermaßproben basierenden realen Versuchsergebnisse sowie die auf den Standardprüfquerschnitt  $10 \times 8 \times 55$  mm hochskalierten Werte angegeben.

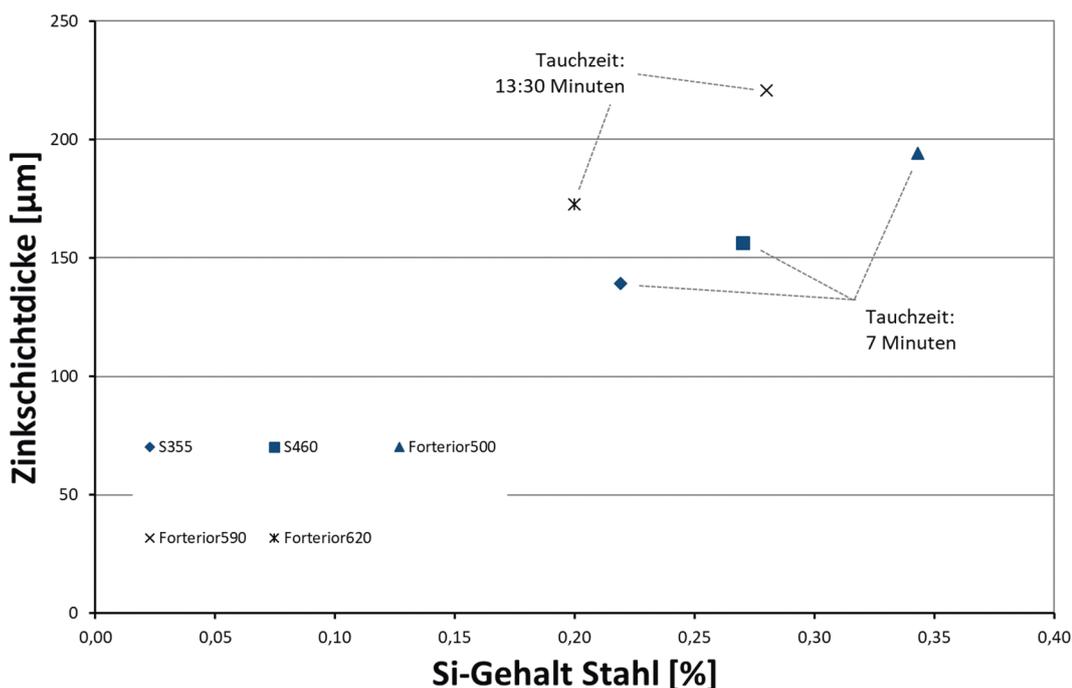
Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass bei den Sorten S460NH und Forterior 500 im Mittelwert jeweils eine deutliche Zähigkeitszunahme der verzinkten Proben um über 100% gegenüber dem Referenzzustand auftritt. Hierbei besteht die Vermutung, dass die Prozesstemperaturen von  $450^\circ\text{C}$  („Zn ISO 1461“) bzw.  $420^\circ\text{C}$  („Zn5Al“) eine zähigkeitssteigernde Auswirkung auf die Ausscheidungskinetik der Werkstoffe haben, welche wiederum auf die Legierungskonzepte der Stähle zurückzuführen ist. Bei den Sorten S355J2H, Forterior 590 und Forterior 620 ist im Rahmen üblicher Streuungen keine bzw. keine signifikante Beeinflussung der Werkstoffzähigkeit durch den Verzinkungsprozess festzustellen.

## 5 Schichtanalytik

### 5.1 Makroskopische Charakterisierung

Alle Musterteile der „Zn ISO 1461“-Verzinkung weisen mattgraue, glatte und homogene Zinkschichten auf. Die Graufärbung der Überzüge ist durch den prinzipiell relativ hohen Si-Gehalt ( $\geq 0,20$  M-%) der Werkstoffe zu erklären. Exemplarisch ist in Bild 2 der optische Unterschied der beiden Musterteile für den Werkstoff S460NH dargestellt.

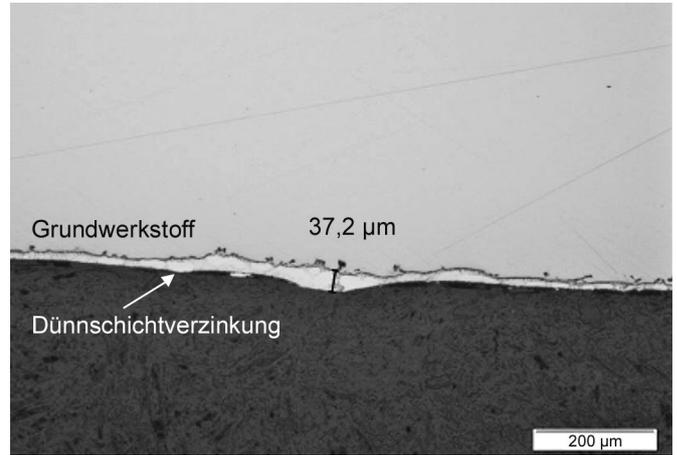
Die Zinkschichtdicke ist an – über die gesamte äußere Oberfläche verteilten – Messpunkten mittels magnetinduktiver Messung erfasst worden. Erwartungsgemäß korreliert die Schichtdicke mit dem Si-Gehalt und steigt ent-



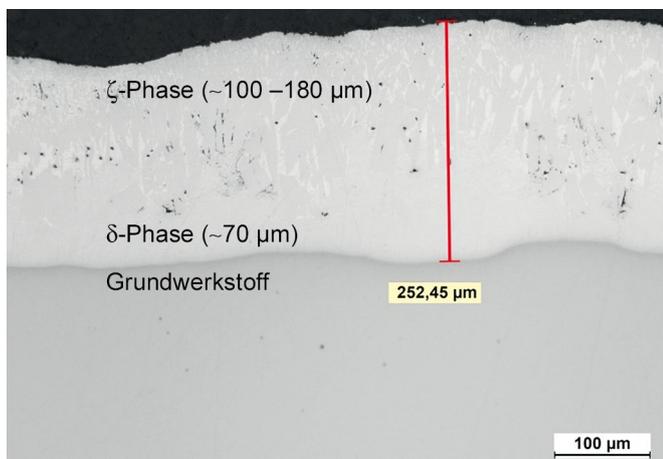
**Bild 3** Einfluss des Si-Gehalts sowie der Tauchzeit auf die Zinkschichtdicke bei der „Zn ISO 1461“-Verzinkung  
Influence of Si-content and galvanizing time on zinc layer thickness in „Zn ISO 1461“-galvanizing



**Bild 4** „Zn5Al“-verzinktes Rohr und MSH-Profile  
“Zn5Al“-galvanized tube and MSH-sections



**Bild 6** Mikroskopische Aufnahme der „Zn5Al“-Zinkschicht auf dem Werkstoff Forterrior 620  
Microscopic picture of “Zn5Al“-zinc layer on material Forterrior 620



**Bild 5** Mikroskopische Aufnahme der „Zn ISO 1461“-Zinkschicht auf dem Werkstoff Forterrior 590  
Microscopic picture of “Zn ISO 1461“-zinc layer on material Forterrior 590

sprechend bei gleicher Verzinkungszeit linear an. Die deutliche Verlängerung der Tauchzeit (und damit der Reaktionszeit zwischen Zinkschmelze und Stahl) für die Werkstoffe Forterrior 590 sowie Forterrior 620 hat eine auch hier erwartungsgemäße deutliche Erhöhung der Zinkschichtdicke zur Folge (Bild 3).

Wie in Bild 4 zu sehen ist, weisen die „Zn5Al“-verzinkten Musterteile eine helle, silbrig glänzende Zinkschicht auf (s. a. Bild 2). Die Zinkschichtdicken liegen im Bereich von 8,2 bis 18 µm. Wie bereits oben erläutert, ist die Ausbildung der Zinkschicht bei diesem Verzinkungsverfahren relativ dünn und unabhängig von der Stahlchemie.

## 5.2 Lichtoptische Untersuchungen (LOM)

Die „Zn ISO 1461“- und „Zn5Al“-Überzüge zeigen bei den Prüfkörpern jeweils auf allen Werkstoffen praktisch das gleiche Aussehen und den gleichen Schichtaufbau. Deshalb wird nachfolgend exemplarisch auf die Proben aus Forterrior 590 und Forterrior 620 eingegangen.

Bei der „Zn ISO 1461“-Verzinkung des Forterrior 590 zeigt sich im Schlibbild der typische Phasenaufbau einer Zn-Stückverzinkungsschicht mit einer am Substrat direkt anliegenden, dichten δ-Phase von ca. 70 µm Dicke (unter Vernachlässigung der nur wenige 100 nm dünnen Γ-Phase) und einer darauf aufbauenden ζ-Phase mit einer Dicke von 100 bis 180 µm (Bild 5). Eine Reinzinkschicht oberhalb der ζ-Phase ist erwartungsgemäß nicht zu finden, da der hohe Si-Gehalt des Werkstoffs zu einer hohen Diffusionsgeschwindigkeit beim Aufwachsen der Zinkschicht und dabei zum Durchwachsen der ZnFe-Dendriten bis zur Überzugsoberfläche führt. Aus diesem Effekt resultiert auch die mattgraue Erscheinung des Überzugs.

Bei der „Zn5Al“-Verzinkung des Forterrior 620 zeigt sich eine gegenüber der klassischen „Zn ISO 1461“-Schicht stark abweichende, feinkristalline bzw. globulare Erstarrungsstruktur. Eine Diffusionszone liegt nicht vor, ebenso wenig wie ausgeprägte intermetallische Phasen. Der Überzug ist homogen und liegt dicht auf, die Unebenheiten in der Substratoberfläche werden regelrecht ausgefüllt, sodass die Überzugsoberseite einen sehr gleichmäßigen Verlauf zeigt (Bild 6).

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen der hier vorgestellten ausführlichen Versuchskampagne wurde die Verzinkbarkeit von MSH-Profilen aus höher- und hochfesten Stählen untersucht. Hierzu wurden sechs Stahl- und Profilvarianten in zwei verschiedenen Stückverzinkungsverfahren verzinkt und die Einflüsse auf die mechanischen Werkstoffeigenschaften sowie auf die Zinkschichtausbildung untersucht. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass nahtlos warmgewalzte Rohre und MSH-Profile der untersuchten Werkstoffe S355J2H, S460NH, Forterrior 500, Forterrior 590, Forterrior 620 und FineXcell 890 grundsätzlich in hoher Qualität verzinkbar sind. Die Prozesstemperaturen beim Verzinken wirken sich nicht negativ aus, je nach Legie-

rungskonzept und Wärmebehandlungszustand der Stähle tritt sogar ein positiver Effekt auf die Festigkeit und das Zähigkeitsverhalten auf. Ferner zeigten die Versuche, dass beim FineXcell 890 die Beizzeit auf max. 2 h begrenzt werden sollte. Auf die schweißtechnische Verarbeitung und daraus resultierende werkstofftechnische Effekte ist besonderes Augenmerk zu legen und es sind ggf. zusätzliche Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verzinkung durchzuführen.

Insgesamt wurde in allen Untersuchungen kein nennenswerter negativer Einfluss des Verzinkungsprozesses auf die Werkstoffeigenschaften festgestellt. Die Normvorgaben wurden in allen Fällen sicher erfüllt. Zwischen den

Verfahren der klassischen Stückverzinkung gemäß DIN EN ISO 1461 sowie der microZINQ-Dünnschichtverzinkung mit einer 5% aluminiumhaltigen Zinkschmelze ist kein Unterschied im Hinblick auf die Robustheit bzgl. der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe zu erkennen. Beide Zinküberzüge beschichten die Profile gleichmäßig und vollständig.

Der zunehmenden Anwendung höher- und hochfester MSH-Profil-Werkstoffe im verzinkten Zustand spricht – unter der Voraussetzung ordnungsgemäßer Detailausbildung und Werkstückvorbereitung sowie nachfolgender Durchführung der Verzinkung – auf Basis dieser Versuchsreihe nichts entgegen.

## Literatur

- [1] DIN EN 10025 (2019) *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen*. Berlin: Beuth.
- [2] DIN EN 10210 (2006) *Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen*. Berlin: Beuth.
- [3] Pinger, T. (2014) *Korrosionsfeste hochaluminiumhaltige Stückverzinkung – Rohstoffeffizienz-Preis 2013 des BMWi*. 7. Nano und Material Symposium Niedersachsen, Lingen (Ems), 26./27. Nov. 2014.
- [4] Pinger, T. (2014) *Dünnschicht-Stückverzinken – Eigenschaften, Anwendungsgebiete und Potentiale durch Nutzung hochaluminiumhaltiger Zinkschmelzen*. 11. Dresdner Korrosionsschutztag, Dresden, 15./16. Okt. 2014.
- [5] DIN EN ISO 14713 (2020) *Zinküberzüge – Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion – Teil 2: Feuerverzinken*. Berlin: Beuth.
- [6] James, N. (2007) *Effect of Galvanizing on modern Structural Steels: Results from ILZRO ZC-21*. EGGA-Assembly 2007. Edinburgh.
- [7] DAST-Richtlinie 022 (2016) *Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen*. Düsseldorf.
- [8] Pinger, T. (2016) *Stückverzinkte Fahrwerkskomponenten im Automobil- und Nutzfahrzeugbau*. VDI-Fachkonferenz Korrosionsschutz im Automobilbau. Neustadt a. d. Donau, 28./29. Juni 2016.
- [9] Sedlacek, G.; Dahl, W.; Hoffmeister, B.; Kühn, B.; Feldmann, M.; Pinger, T.; Langenberg, P.; Eichenmüller, H.; Grotmann, D.; Blum, M. (2004) *Zur sicheren Anwendung feuerverzinkter Stahlträger* in: *Stahlbau* 73, H. 6, S. 427–437. <https://doi.org/10.1002/stab.200490113>
- [10] Feldmann, M.; Bleck, W.; Pohl, M.; Schütz, A.; Vormwald, M.; Berger, C.; Keitel, S. (2010) *Abschlussbericht AiF-Vorhaben-Nr. 265 ZBG „Technologie und Sicherheitsgewinnung beim Feuerverzinken zum Ausbau der Marktposition des verzinkten Stahlbaus“*. Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), FOSTA P766.
- [11] Pinger, T. (2016) *Verzinken von hochfesten Stählen* in: *Konstruktiver Ingenieurbau*, H. 2, S. 64–67.
- [12] DIN EN 10149-2 (2013) *Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle*. Berlin: Beuth.
- [13] Müller, T.; Straetmans, B. (2015) *Hochfeste nahtlose Rohre und Stahlbauhohlprofile für Krane und den Maschinenbau – Herstellung und Eigenschaften* in: *Stahlbau* 84, H. 9, S. 650–654. <https://doi.org/10.1002/stab.201510310>
- [14] prEN 10210-3:2019-06 (2019) *Technische Lieferbedingungen für Anwendungen im Maschinenbau*.
- [15] DIN EN ISO 1461 (2009) *Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgetragene Zinküberzüge (Stückverzinken) – Anforderungen und Prüfungen*. Berlin: Beuth.
- [16] prDIN 50997 (2019) *Durch Dünnschichtverzinken auf Stahl aufgetragene Zink-Aluminiumüberzüge – Anforderungen und Prüfungen*.
- [17] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.11-60 (2015) *Mit dem Dünnschicht-Stückverzinkungsverfahren microZINQ® 5 feuerverzinkte Bauteile*. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
- [18] DIN EN ISO 6892-1 (2017) *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Berlin: Beuth.
- [19] DIN EN ISO 148-1 (2017) *Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren*. Berlin: Beuth.

**Autoren**

Dr.-Ing. Thomas Pinger (Korrespondenzautor)  
thomas.pinger@zinq.com  
ZINQ Technologie GmbH  
An den Schleusen 6  
45881 Gelsenkirchen

Dr.-Ing. Waldemar Wessel  
waldemar.wessel@vallourec.com  
Vallourec Deutschland GmbH  
Theodorstraße 109  
40472 Düsseldorf

Dr.-Ing. Thomas Müller  
thomas.mueller@vallourec.com  
Vallourec Deutschland GmbH  
Theodorstraße 109  
40472 Düsseldorf

Dipl.-Ing. Christoph Kaucke  
christoph.kaucke@vallourec.com  
Vallourec Deutschland GmbH  
Theodorstraße 109  
40472 Düsseldorf

Dipl.-Ing. Boris Straetmans  
boris.straetmans@vallourec.com  
Vallourec Deutschland GmbH  
Theodorstraße 109  
40472 Düsseldorf

**Zitieren Sie diesen Beitrag**

Pinger, T.; Müller, T.; Kaucke, C.; Straetmans, B.; Wessel, W. (2020) *Verzinkbarkeit höher- und hochfester MSH-Profile*. Stahlbau 89, H. 12, S. 1002. <https://doi.org/10.1002/stab.202000022>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 9. März 2020; angenommen: 1. Mai 2020.