Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115

Einfluss einer Widerstandserwärmung auf die Oberflächenstruktur verzinkter Stahlplatinen

Widerstandserwärmung bei verzinktem Stahl

D. Fink, S. Hübner, U. Genc, C. Gundlach, S. Hartwig, B.-A. Behrens

ZUSAMMENFASSUNG Verzinkte Bleche sind für den Korrosionsschutz von Bauteilen unverzichtbar. Die Temperierung mittels Rollenherdöfen kann hinsichtlich Qualität und Effizienz verbessert werden. Nachgeschaltete Oberflächenbehandlungen sind oft nötig, zum Beispiel für homogenen Lackauftrag. Das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) erforscht neue Temperierungsstrategien mittels Widerstandserwärmung, die schnelle Aufheizraten, hohe Wirkungsgrade und spezifische Rauheiten ermöglichen.

STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Oberflächentechnik, Produktionstechnik

Resistance heating with galvanized steel – How resistance heating affects the surface structure of galvanized steel blanks

ABSTRACT Galvanized sheets are indispensable for corrosion protection of components. Tempering of galvanized sheets using roller hearth furnaces can be improved in terms of quality and efficiency. Subsequent surface treatments are often necessary, e.g. for homogeneous paint application. The IFUM is researching on new temperature control strategies, using resistance heating to enable fast heating rates, high efficiency, and specific roughness.

1 Einführung

In der modernen Industrie sind verzinkte Bleche für den Korrosionsschutz unverzichtbar und tragen wesentlich zur Langlebigkeit und optischen Qualität von Blechbauteilen bei. Ihre hervorragende Korrosionsbeständigkeit und Oberflächenqualität sind oft ausschlaggebend für Kaufentscheidungen [1]. Die Verarbeitung dieser Materialien in temperierten Umformprozessen erfordert ausgeklügelte Temperierungsstrategien, um die Effizienz und Qualität der Fertigungsprozesse sicherzustellen. Trotz großer Nachteile dominieren in der Serienfertigung nach wie vor Rollenherdöfen zur Erwärmung der Bauteile. Diese gelten aufgrund der langen Durchlaufzeiten, der hohen Investitionskosten und des enormen Energie- und Platzbedarfs vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen als ineffizient [2–4].

Abhilfe können weitere Temperierungsverfahren, wie etwa der konduktive Erwärmungsprozess, schaffen. Dieses Temperierungsverfahren basiert auf dem Prinzip der Widerstandserwärmung und bietet viele Vorteile gegenüber den konventionellen Ofentemperierungen, die mit hohen Energieverlusten einhergehen [5]. Die Stromzuführung der konduktiven Erwärmung erfolgt über Elektroden, die an das Blech angepresst werden. Durch den elektrischen Widerstand wird die Wärme direkt im Blech erzeugt. Dabei können in wenigen Sekunden Temperaturen von bis zu 1200 °C erreicht werden [6]. Neben der hohen Erwärmungsgeschwindigkeit ist auch die gute Steuerungs- und Regelungsmöglichkeit ein entscheidender Vorteil der konduktiven Erwärmung. Der hohe Wirkungsgrad, die kompakte Bauweise und der vergleichsweise simple Aufbau halten zudem die Energie-, Unterhalts- und Investitionskosten gering [5]. Während sich die aktuellen Bemühungen auf die weitere Nutzung der Abwärme des Ofens konzentrieren, ist das konduktive Verfahren von Grund auf nachhaltig. Es gibt weder Vorheizzeit, Leerlaufverbrauch, Abgasentwicklung noch einen Energieverbrauch bei Betriebsunterbrechungen [6].

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von Temperierungsverfahren auf Basis von Wärmestrahlung sowie Konduktion auf die Oberflächenbeschaffenheit und die mechanischen Eigenschaften von feuerverzinkten Stahlblechen zu untersuchen. Dabei steht die Frage im Vordergrund, wie sich unterschiedliche Temperierungsstrategien auf die Materialeigenschaften auswirken und inwieweit diese Veränderungen für industrielle Anwendungen in der Umformtechnik relevant sind. Gerade für einen temperierten Pressfügevorgang (siehe IGF #01IF22651N) für hybride Bauteilstrukturen ist es unerlässlich, eine starke, flächendeckende Verbindung zwischen einem metallischen, feuerverzinkten Blech und einem faserverstärkten Kunststoff auf Basis des Thermoplasten Polyamid 6 (PA6) zu schaffen. Dies erfolgt über das Einschmelzen des Kunststoffs in die Oberflächentopografie des metallischen Blechs. Dadurch entsteht sowohl eine stoffliche Anbindung als auch eine mechanische Verklammerung. Somit sind unter anderem hohe Rauheitskennwerte für die resultierende Haftfestigkeit unerlässlich.

2 Methodik

Um die vorherige Fragestellung umfassend zu bearbeiten, wird ein methodischer Ansatz gewählt, der sowohl die systematische Durchführung verschiedener Versuche als auch die sorgfältige Analyse und Validierung der erzielten Ergebnisse umfasst.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Bild 1. Versuchsaufbau der konduktiven Anlage. *Foto: LUH (IFUM)*

Nach der Wärmebehandlung erfolgt eine detaillierte Untersuchung der behandelten Stahlplatinen. Dabei stehen die Messung und Bewertung der Oberflächenrauheit und des optischen Erscheinungsbildes sowie die Erfassung mechanischer Kennwerte im Vordergrund. Die Auswertung der experimentellen Daten zielt darauf ab, Zusammenhänge zwischen den angewandten Temperierungsstrategien und den resultierenden Materialkennwerten zu identifizieren. Besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, wie sich die konduktive Erwärmung im Vergleich zu traditionellen Verfahren auf die Materialqualität auswirkt und welche Optimierungspotenziale sich daraus für industrielle Anwendungen ableiten lassen.

2.1 Allgemeiner Aufbau

Die am IFUM entwickelte konduktive Erwärmungsanlage verwendet Mittelfrequenztechnik. Zwei Schweißinverter in Master-Slave-Konfiguration richten zunächst Wechselstrom gleich und erzeugen eine Rechteckspannung im Mittelfrequenzbereich. Anschließend werden Gleichstromtransformatoren (eine Kombination aus Transformator und Gleichrichter) verwendet, um die gewünschte Kombination aus Spannung (Niederspannung) und Strom an den Elektroden bereitzustellen. Das verwendete SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung)-Regelsystem, unterstützt durch ein Pyrometer zur kontinuierlichen Temperaturüberwachung, erlaubt eine präzise Kontrolle der Blechtemperatur. Die Anlage ist für eine Netzspannung von 400 V ausgelegt und kann mit 50 Hz oder 60 Hz betrieben werden. Für die Kühlung der Leistungselektronik sowie der Elektroden wird Kühlwasser (mit maximal 38 °C) verwendet. Die Elektroden werden mittels pneumatischer Zylindern auf das zu erwärmende Blech gepresst. Das Human Machine Interface (HMI) ermöglicht vielfältige Einstellungsmöglichkeiten zur Temperierung der Stahlbleche [7].

Das 3D-Profilometer „VR-3200“ von Keyence ermöglicht die berührungslose, optische Vermessung von Proben und Werkzeugen nach dem Streifenprojektionsverfahren. Es kann makroskopische Abmessungen dreidimensional darstellen und Veränderungen in der Geometrie, etwa von verschlissenen Werkzeugen, erkennen. Rauheitskennwerte werden nach ISO 25178–2:2012 [8] gemessen. Zur Signalverarbeitung werden dabei unterschiedliche Filter eingesetzt [9]. Die überdimensionierte Auswahl der Hoch- und Tiefpassfilter gewährleistet die Beseitigung jeglicher Messartefakte und resultiert dadurch in einer Verringerung der Rauheitskennwerte. So ergibt sich beispielsweise für die verwendeten Blechplatinen am Keyence-Mikroskop eine flächenbezogene Mittenrauheit S_a von rund 0,6 µm und über das Tastschrittverfahren eine Linienmittenrauheit R_a von rund 1 µm. Der entstehende Faktor kann somit auf jegliche in dieser Arbeit niedergelegten Rauheitskennwerte beaufschlagt werden. Alle Mittenrauheitswerte in dieser Arbeit wurden mittels 3D-Profilometer bestimmt.

2.2 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wurden metallische, feuerverzinkte Stahlplatinen (DP600+Z) mit einer Größe von 210 mm x 105 mm und einer Stärke von 1,5 mm eingesetzt. Sie werden wie in **Bild 1** dargestellt zwischen Messingelektroden eingespannt.

Ein taktiles Temperaturmessgerät wird in der Mitte der Platine angebracht, um die Erwärmung extern zu überwachen. Die Blechlänge wird im HMI eingegeben, um den Elektrodenabstand einzustellen und die Längenausdehnung zu kompensieren. Die Erwärmung erfolgt versuchsabhängig in mehreren Stufen mit einstellbaren Anfangs- und Endtemperaturen, Erwärmungszeiten und Leistungen. Im ersten Schritt wird das Blech in einer Sekunde auf Versuchszieltemperatur (320 °C bis 500 °C) erwärmt. Im zweiten Schritt wird die Temperatur mit einer verminderten Inverterleistung konstant gehalten. Grund für die Einführung der zweiten Stufe ist die komplexe PID (Proportional-Integral-Derivate)-Regelung der Widerstandserwärmungsanlage [7, 10].

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird der Einfluss der Temperierungen auf 320 °C bis 500 °C auf die Mittenrauheit S_a analysiert. Unterhalb der Temperierung auf 320 °C konnten keine signifikanten Veränderungen der Oberfläche beobachtet werden. Die obere Schranke von 500 °C wurde festgelegt, da oberhalb dieser Temperatur das galvanische Anlassen einsetzt [11, 12]. Die Temperierungsdauern variieren zwischen zwei Sekunden und einer Minute. Zudem wird der Einfluss verschiedener Ausrichtungen sowie Walzrichtungen der Bleche analysiert, um die Anisotropie und damit einhergehende Effekte zu untersuchen. Die wärmebehandelten Platinen werden anschließend an je drei Messpositionen auf der Vorder- und Rückseite, im Weiteren als A- und B-Seite bezeichnet, auf ihre flächenbezogenen Rauheitskennwerte untersucht. Die A-Seite entspricht der Platinenfläche mit leicht geringerer Mittenrauheit im Anlieferungszustand (vergleiche Referenz in Bild 2). Im Anschluss werden aus den Versuchsplatinen Zugprobenkörper nach DIN 50125 (H 12,5 × 50) [13] hergestellt und ihre mechanischen Festigkeiten erprobt [14].

3 Ergebnisse

3.1 Einfluss der Temperatur

Um den Einfluss der Temperatur auf die Mittenrauheit S_a zu analysieren, wurden die Platinen auf Temperaturen von 320 °C bis 500 °C in 20-°C-Abständen erwärmt. Die Erwärmung erfolgte durch die zwei bereits erwähnten Schritte, wobei der erste Schritt eine Sekunde andauert und die Platine im zweiten Schritt über 9 Sekunden auf der gewünschten Zieltemperatur gehalten wird. Um ein möglichst genaues Abbild zu schaffen wurde aus fünf Versuchen jeweils der Mittelwert aus drei Messpositionen (siehe unten in Bild 4) der flächenbezogenen Mittenrauheit einer Platine nach der Abkühlung gebildet. Ausgehend von den arithmetischen Mitteln in einer Versuchsreihe wurde der Median gebildet und in **Bild 2** dargestellt.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

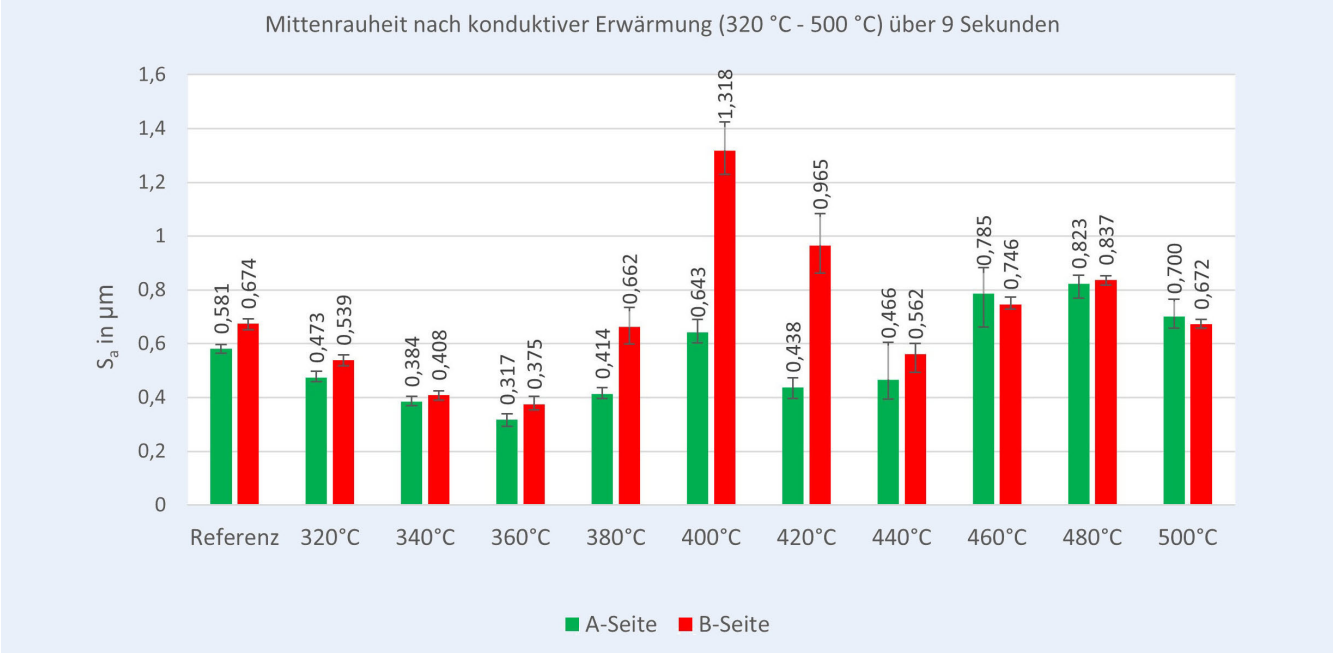

Bild 2. Flächenbezogene Mittenrauheit nach 9 Sekunden konduktiver Erwärmung zwischen 320 °C und 500 °C. *Grafik: LUH (IFUM)*

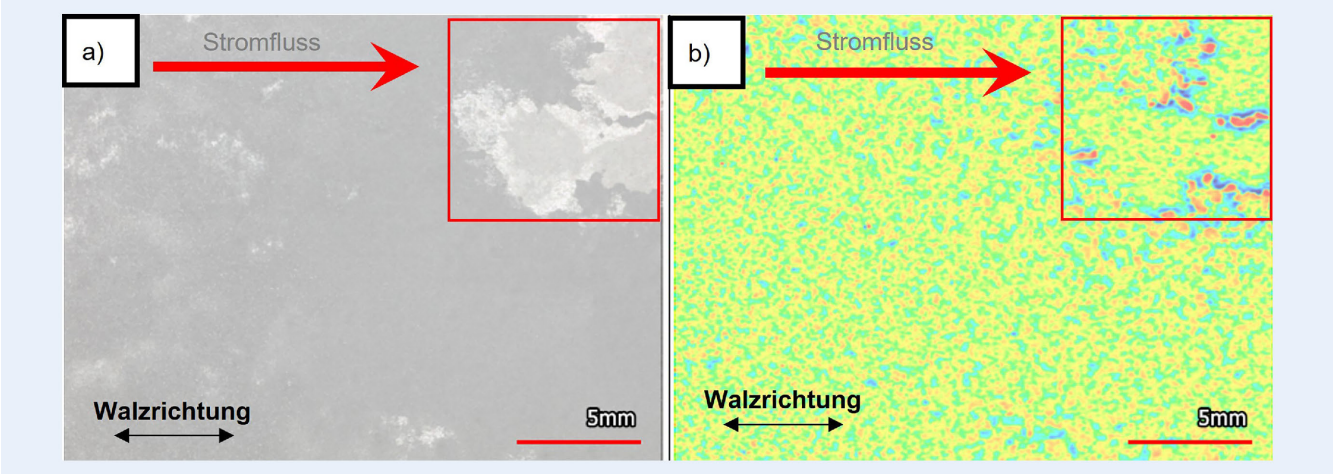

Bild 3. Tatsächliche Oberfläche (a) und skalenbegrenzte Oberfläche (b) nach 500 °C über 9 Sekunden. *Foto: LUH (IFUM)*

Die Fehlerindikatoren entsprechen dabei den Maximal- sowie Minimalwerten innerhalb der jeweiligen Platine und geben Aufschluss über die Inhomogenität der Versuchsreihe. Diese Vorgehensweise zur Ergebnisvorstellung wird im weiteren Beitrag beibehalten.

Im Durchschnitt hat eine nicht behandelte Platine eine mittlere arithmetische Höhe von 0,581 µm auf der A-Seite und von 0,674 µm auf der B-Seite. Die Platine weist also im Auslieferungszustand bereits eine höhere Rauheit auf der B-Seite auf. Bis 360 °C nimmt die Mittenrauheit S_a auf beiden Seiten in einem ähnlichen Verhältnis geringfügig aber stetig ab. Dort beträgt die mittlere Rauheit auf der A-Seite 0,317 µm und 0,375 µm auf der B-Seite. Dies entspricht knapp der Hälfte der unbehandelten Referenzbleche. Bei 380 °C nimmt die Rauheit der A-Seite um circa 0,1 µm zu, während sich die Rauheit der B-Seite fast verdoppelt und so der unbehandelten Referenz angleicht. Die höchsten Rauheiten werden für Bleche beobachtet, die kurz vor dem Schmelzpunkt des Zinks (400 °C) temperiert werden. Nach Erwärmung des Blechs auf 420 °C war zu erkennen, dass sich die Oberfläche der Platine verflüssigt und der Schmelzprozess des Zinks beginnt.

Die Mittenrauheit der Platine nimmt in diesem Zustand ab und fällt auf der A-Seite um circa 0,2 µm und auf der B-Seite um rund 0,4 µm. Bei 440 °C sind auf der A-Seite kaum Veränderungen zur vorigen Messung festzustellen, jedoch nimmt die Rauheit auf der B-Seite weiter ab und erreicht schließlich eine Mittenrauheit von 0,562 µm. Ab 460 °C scheint sich die Mittenrauheit S_a zwischen 0,66 µm und 0,86 µm sowohl auf der A- als auch auf der B-Seite zu nivellieren. Nachdem die Schmelztemperatur des Zinks überschritten wurde, sind aus optischer Sicht große Veränderungen an der Oberfläche zu erkennen. Die Farbe der ursprünglich silbernen Platinen ändert sich in ein dunkles Grau mit weißlich schimmernden Partikeln. An einigen Bereichen, verstärkt an den Rändern, treten kreisrunde Stellen auf, an denen sich vermutlich eine Zinkoxidschicht gebildet hat (**Bild 3**).

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

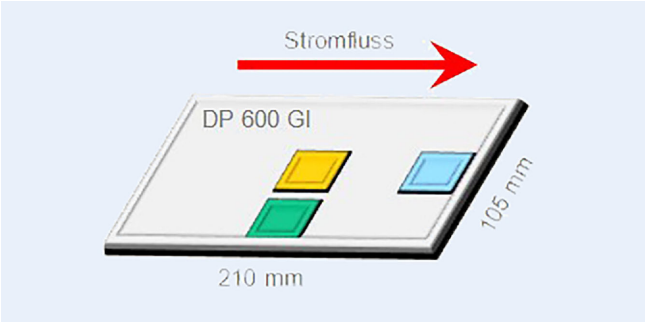

Bild 4. Positionierung der Messpositionen Mitte (mittig), Längsposition (lange Seite) und Elektrodenposition (kurze Seite) innerhalb der Stahlplatine. *Grafik: LUH (IFUM)*

3.2 Einfluss der Erwärmungsdauer

Um den Einfluss der Erwärmungsdauer zu analysieren, wurden die Platinen unter gleichen Bedingungen erwärmt. Dabei betrug die Heizphase eine Sekunde, gefolgt von einer Haltephase. Die Dauer der Haltephase bei den vorliegenden Versuchen betrug 2, 9, 15, 30, 45 und 60 Sekunden. Die jeweiligen Messpositionen sind in **Bild 4** illustriert. Die Mittenrauheitswerte sind in **Bild 5** abgebildet.

Nach zwei Sekunden konduktiver Erwärmung bei 400 °C ist eine geringe Oberflächenrauheit der Platinen zu erkennen. Die A-Seite hat eine ähnliche Rauheit wie die unbehandelten Platinen, während die B-Seite fast eine Verdoppelung der Mittenrauheit aufweist. Nach 9 Sekunden Erwärmung ist ein leichter Abfall der Rauheiten zu beobachten. Nach 15 Sekunden Erwärmung steigen die Rauheitswerte weiter an. Nach 30 Sekunden wird deutlich, dass die Elektrodenposition auf der A- und B-Seite die geringste Rauheit aufweist. Dieser Trend verstärkt sich bei 45 Sekunden mit noch größeren Unterschieden. Nach 60 Sekunden Erwärmung erreichen die Platinen die höchsten Rauheitswerte. Die Elektrodenposition bleibt deutlich glatter als die Mitte und die Längsposition. Die B-Seite ist an der Längsposition mit 1,945 µm rund dreieinhalb Mal so rau wie an der Elektrodenposition. Auch auf der A-Seite ist die Mittenrauheit in der Mitte etwa dreimal so groß wie an der Elektrodenposition.

Aus **Bild 6** geht nach linearer Interpolation der Trend hervor, dass die Rauheitswerte der Längs- und Elektrodenposition der B-Seite mit zunehmender Erwärmungsdauer auseinandergehen. Nur bei einer Haltezeit von 9 Sekunden nähern sich die Werte einander an. Dies lässt sich auf Eruptionen in der Mitte der Platine zurückführen, welche sich ringförmig um den Mittelpunkt der Platine bilden.

Bild 7 zeigt die in einer Ringstruktur angeordneten Bläschen, die sich nach hoher Erwärmungsdauer bilden.

In der Mitte dieses Rings ist zu erkennen, dass die Oberfläche zu verdunkeln beginnt. Auch wird aus der Darstellung der skalenbegrenzten Oberfläche deutlich, dass sich eine Oberflächenstruktur aus der Blechmitte ausgehend aufzeigt. Zudem ist in der Blechmitte die Profilsteigung höher, was durch den stetigen Farbwechsel zwischen roten und blauen Bereichen deutlich wird. Der Defekt im unteren Teil der Platine wurde durch das Temperaturmessgerät verursacht, das auch für den nicht geschlossenen Ring verantwortlich ist.

3.3 Einfluss der Walzrichtung

In **Bild 8** sind die flächenbezogenen, Mittenrauheiten S_a der Platinen dargestellt, deren Walzrichtung parallel (im Folgenden Parallelproben) [//] und orthogonal (im Folgenden Orthogonalproben) [□] zur Stromflussrichtung gerichtet ist und auf die Temperaturen 400 °C, 440 °C, 460 °C über eine Dauer von 9 Sekunden konduktiv erwärmt wurden. Bei der Untersuchung der Proben, die unterhalb von 400 °C behandelt wurden, zeigten sich

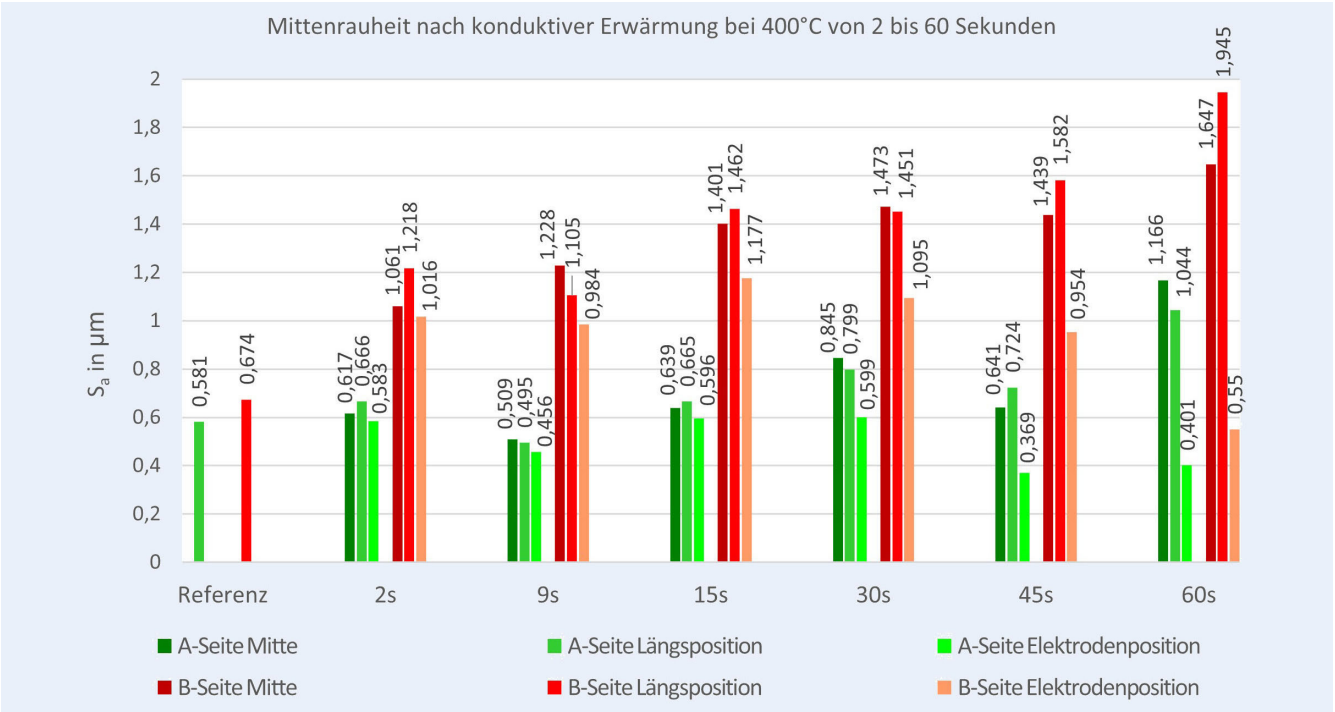

Bild 5. Flächenbezogene Mittenrauheit nach konduktiver Erwärmung auf 400 °C mit Haltezeiten von 2 bis 60 Sekunden. *Grafik: LUH (IFUM)*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

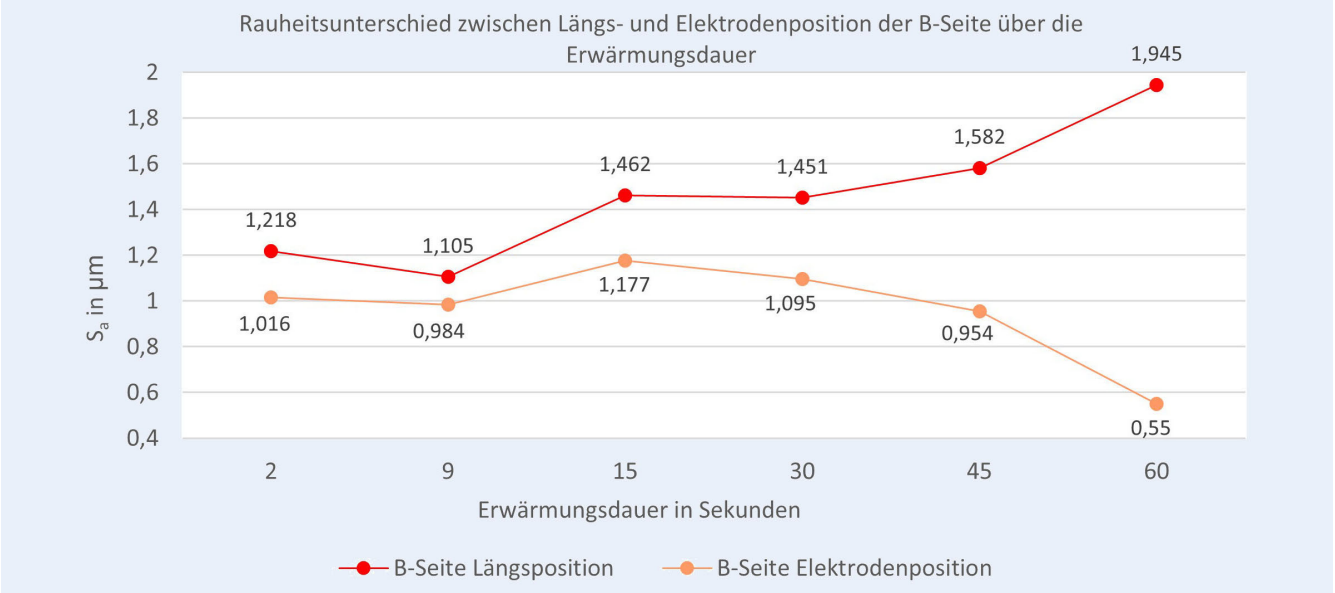

Bild 6. Vergleich der Mittenrauheit auf der Elektroden- und Längsposition. *Grafik: LUH (IFUM)*

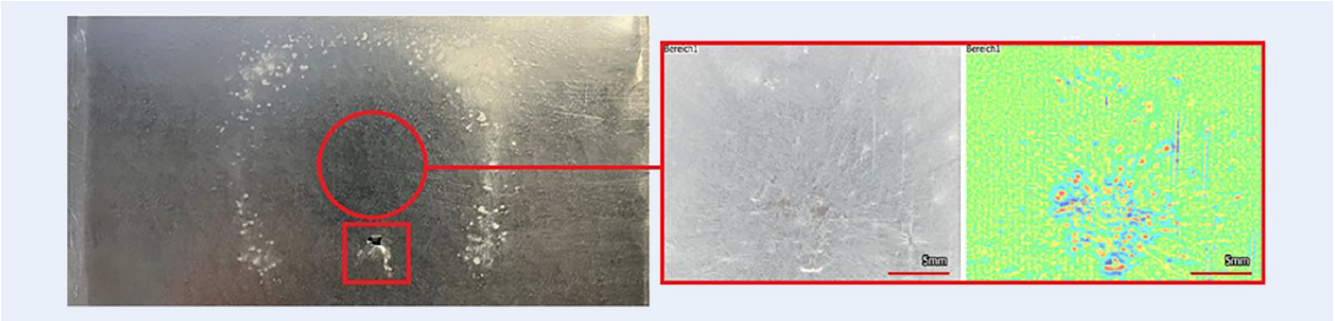

Bild 7. Ringförmige Eruptionen nach hoher Erwärmungsdauer. *Foto: LUH (IFUM)*

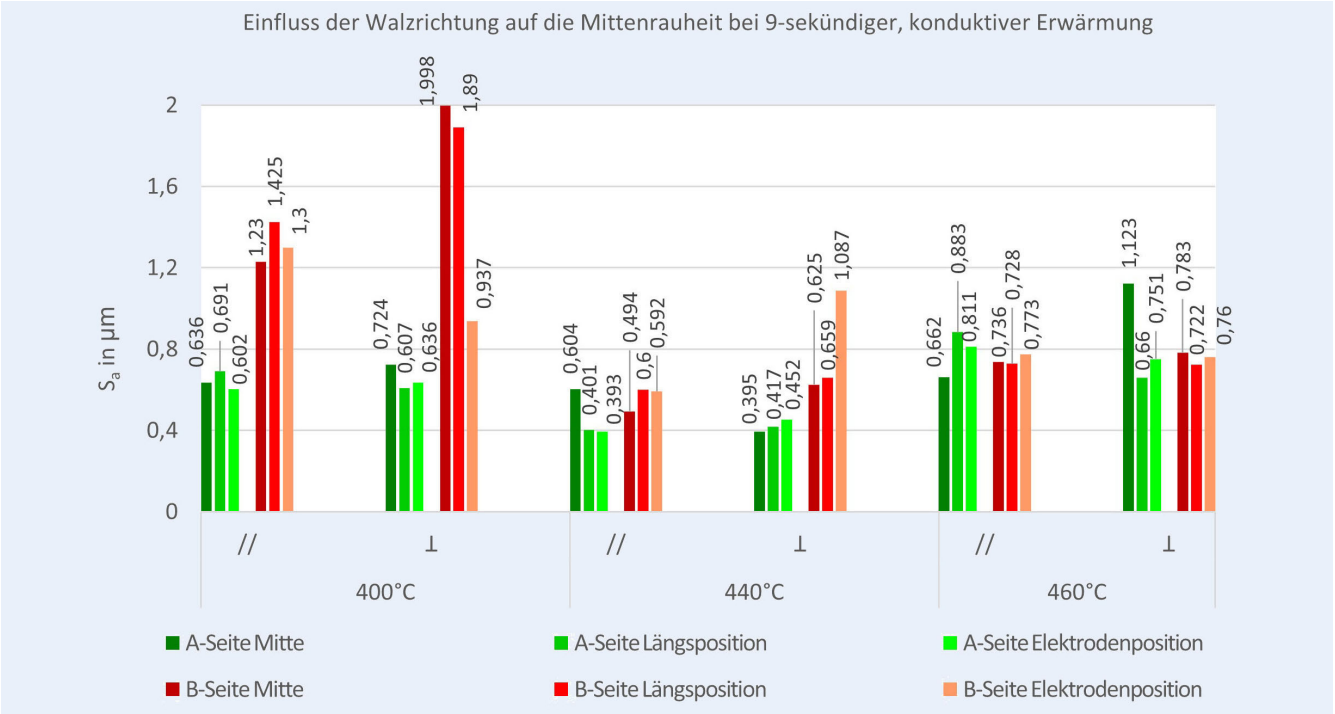

Bild 8. Einfluss der Walzrichtung auf die Mittenrauheit. *Grafik: LUH (IFUM)*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

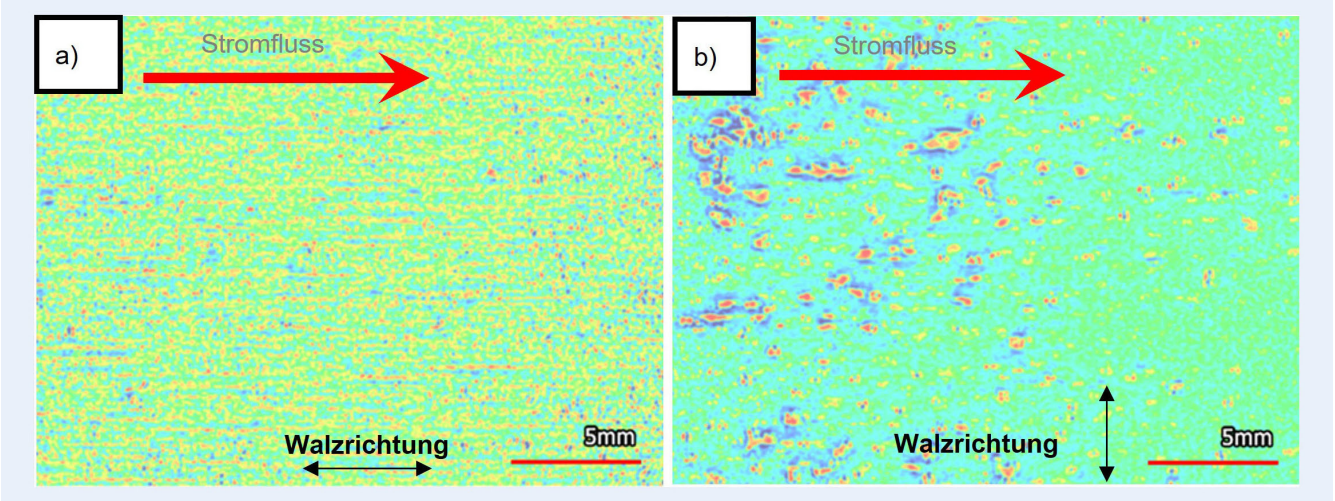

Bild 9. Skalenbegrenzte Oberfläche mit Walzrichtung parallel (a) und orthogonal (b) zum Stromfluss. *Foto: LUH (IFUM)*

nur geringe Unterschiede in den gemessenen Parametern, sodass Bild 8 nur die Temperaturen oberhalb dieser Temperatur darstellt.

Bei 400 °C ist zu erkennen, dass die Rauheit in der Mitte und an der Längsposition der B-Seite der Orthogonalproben um 0,768 µm, beziehungsweise 0,465 µm höher ist, als auf der B-Seite der Parallelproben. Die A-Seiten beider Zuschnitte weisen hingegen gewöhnliche Abweichungen auf. Auch die Orthogonalproben bei 440 °C und 460 °C weisen an der Elektrodenposition der B-Seit, beziehungsweise in der Mitte der A-Seite eine Erhöhung der Oberflächenrauheit auf. Die Differenz zwischen den einzelnen Positionen beträgt rund 84 % bei dem auf 440 °C erwärmten Blech und etwa 70 % bei 460 °C. Orthogonalproben weisen hier unabhängig von der Seite und der Messposition vermehrt ungewöhnlich hohe Rauheiten auf. Etwa jedes vierte Blech dieser Versuchsreihe zeigt diese Auffälligkeit. Die erhöhte Rauheit ist auf eine Art Bläschenbildung zurückzuführen. **Bild 9** a) zeigt eine Oberflächenrauheit von 1,083 µm nach einer konduktiven Erwärmung einer Parallelprobe. Bild 9 b) zeigt eine Oberflächenrauheit von 1,087 µm nach einer konduktiven Erwärmung der Orthogonalprobe.

Grundsätzlich weisen Parallelproben eine deutlich homogenere Oberfläche auf als Orthogonalproben. Die Größe der bläschenartigen Oberflächenfehler in Form einer Materialanhäufung wird beim Betrachten der Spitzenkrümmung deutlich. Diese beträgt für das in Bild 9 a) dargestellte Blech 0,760 1/mm und für das in Bild 9 b) dargestellte Blech 0,477 1/mm. Der Grund für die unterschiedliche Auswirkung der Walzrichtung auf die nachfolgende Oberflächenbeschaffenheit ist vermutlich die Längung der Körner, bedingt durch den Walzvorgang bei der Stahlbanderzeugung. Bei der Strombeaufschlagung in Walzrichtung fließt der Strom über schmale Korngrenzübergänge durch die Stahlplatine. Bei orthogonaler Ausrichtung hingegen sind breitere Korngrenzübergänge vorzufinden, wodurch sich Hotspots bilden und so lokale Überhitzungen einhergehend mit einem Materialtransport entstehen [15]. Resultierend erhöht sich die Mittenrauheit verstärkt.

3.4 Ofenerwärmung

Um eine umfassende Bewertung der Verfahren zur Erwärmung verzinkter Stahlbleche vornehmen zu können, werden im Ofen erwärmte Bleche als Vergleichsgrundlage herangezogen. Diese dienen als Benchmark zur Beurteilung der resultierenden Material- und Oberflächeneigenschaften sowie zur Bewertung der Effizienz konduktiv erwärmter Bleche. **Bild 10** zeigt die mittlere Rauheit der im Ofen erwärmten Bleche nach 5 Minuten.

Zu erwähnen ist, dass der Ofen vorgewärmt wurde, wodurch keine Vorheizdauer betrachtet wird. Zudem wurden Platinen derselben Abmessungen wie bei konduktiven Erwärmungsversuchen verwendet. Es ist zu erkennen, dass bei allen dargestellten Temperaturen keine signifikante Zunahme der Rauheit zu verzeichnen ist und die Werte im Bereich der unbehandelten Platinen liegen. Im Mittel nimmt jedoch die Rauheit der B-Seite gegenüber der Referenzmessung um circa 0,08 µm ab, wodurch sich die Werte der A- und B-Seite annähern. Somit ist kein eindeutiger Trend zu einer höheren Rauheit einer Seite erkennbar.

Nach einer Erwärmungszeit von 10 Minuten im Ofen ist bis 440 °C keine signifikante Veränderung der Mittenrauheit festzustellen (**Bild 11**).

Erst ab einer Temperatur von 460 °C ist eine Verdopplung der Mittenrauheit auf der B-Seite zu verzeichnen, während die A-Seite unverändert bleibt. Dieses Verhalten ist bei 480 °C und auch bei 500 °C zu beobachten. Somit handelt es sich bei der Ofenerwärmung um einen thermisch sehr trägen Prozess. Im direkten Vergleich zur konduktiven Vorbehandlung sind vergleichbare Mittenrauheiten bei einer Verringerung der Versuchstemperatur von 480 °C auf lediglich 400 °C zu verzeichnen. Die Temperierungsdauer verringert sich durch die Verwendung der Widerstandserwärmungsanlage von 10 Minuten auf 10 Sekunden. Die Vorheizzeit des Ofens ist dabei nicht berücksichtigt. Resultierend ist ein enormes Energieeinsparungspotenzial möglich.

3.5 Zugversuche

Im Weiteren gilt es, die mechanischen Eigenschaften, vor allem die Zugfestigkeits- und Dehnungswerte in Walzrichtung nach DIN EN ISO 68921, zu untersuchen. Die in der konduktiven Anlage und im Ofen erwärmten Platinen werden den Referenzblechen (Anlieferungszustand) gegenübergestellt und die Auswirkung beider Wärmevorbehandlungen verglichen. Ausgehend von den vorangegangenen Kapiteln werden hier nur die relevanten Temperaturen und die Erwärmungsdauer dargestellt. Es handelt sich bei allen angegebenen Werten um das arithmetische Mittel

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

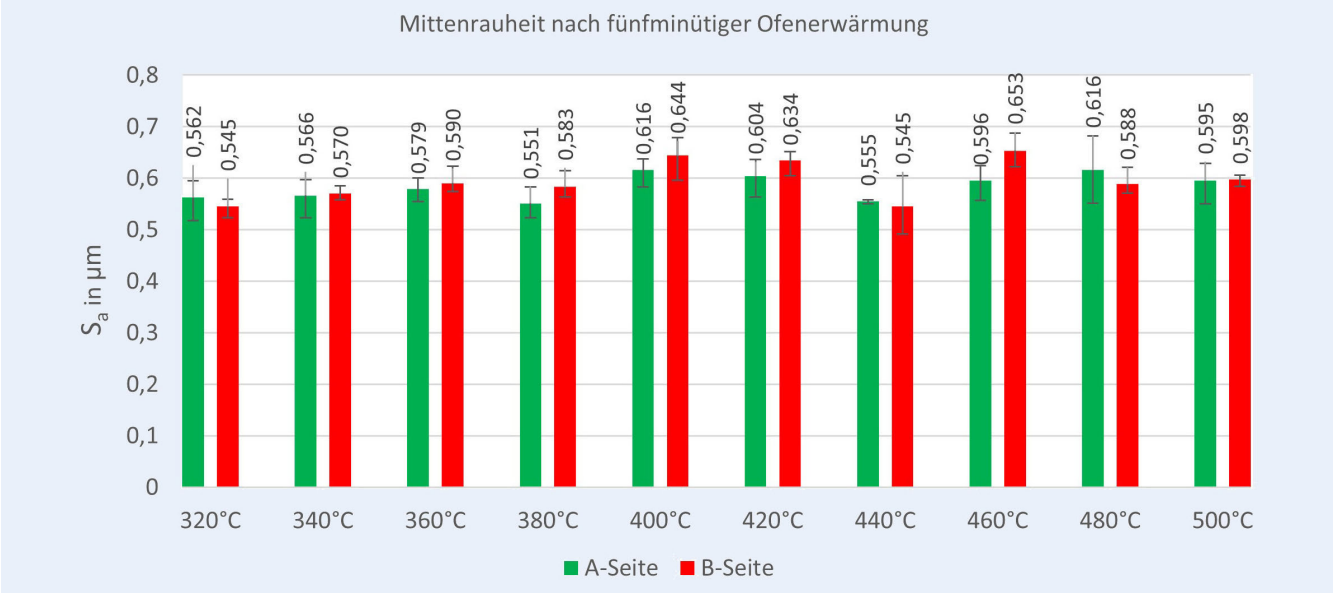

Bild 10. Flächenbezogene Mittenrauheit nach 5-minütiger Ofenerwärmung. *Grafik: LUH (IFUM)*

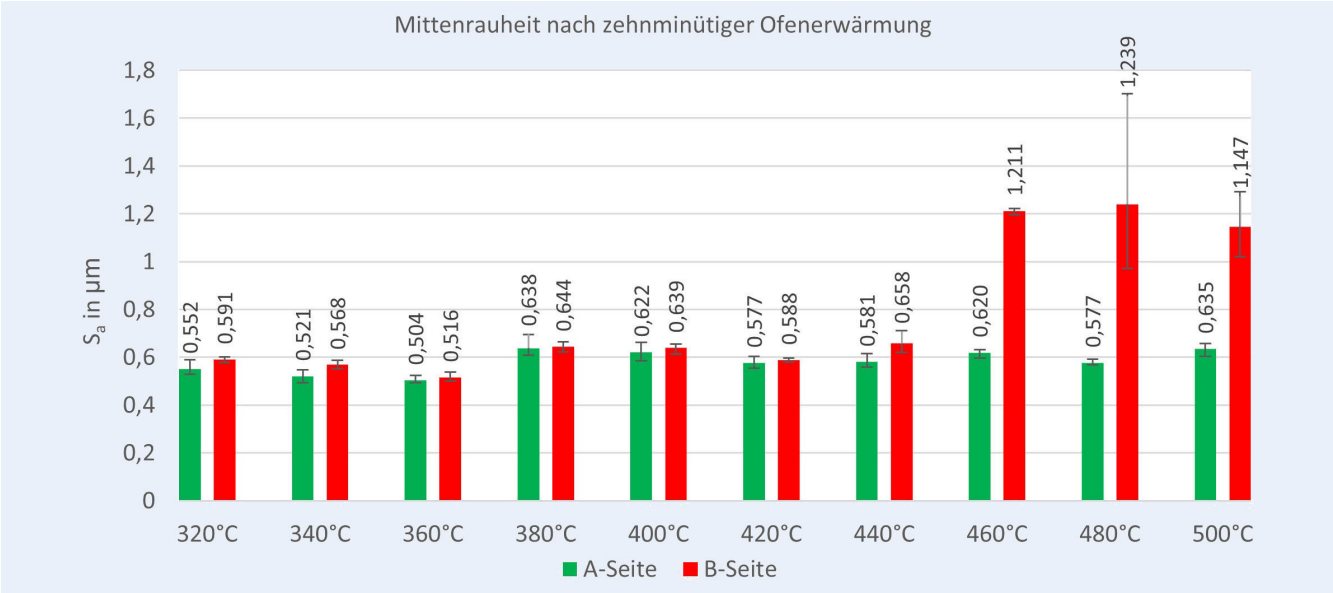

Bild 11. Flächenbezogene Mittenrauheit nach 10-minütiger Ofenerwärmung. *Grafik: LUH (IFUM)*

aus drei Zugproben. In **Tabelle 1** sind die Zugfestigkeiten sowie die relevanten Gleichmaß- und Bruchdehnungen der Zugversuche nach konduktiver Erwärmung über 9 Sekunden aufgeführt.

Zugfestigkeit, Gleichmaßdehnung und Bruchdehnung nehmen mit steigender Temperatur ab. Hintergrund ist vermutlich die temperaturbedingte Bildung von Carbiden sowie die allgemeine Versprödung von Stahl mit zunehmender Temperatur [16]. Es gilt dies allerdings durch metallographische Untersuchungen zu validieren. Zu erkennen ist, dass mit Ausnahme von Erwärmungen bei 440 °C die Gleichmaßdehnung der erwärmten Platinen im Vergleich zur Referenzmessung die höchsten Verluste aufweist. Grundsätzlich ist die Tendenz zur Abnahme der mechanischen Kennwerte mit steigender Versuchstemperatur zu verzeichnen. In **Tabelle 2** sind die konduktiven Erwärmungen in Abhängigkeit von der Erwärmungsdauer bei 400 °C dargestellt.

Die drei Zeitreihen deuten darauf hin, dass die Variierung der Erwärmungsdauer bei den konduktiven Versuchen keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Kennwerte hat. Der höchste Festigkeits- sowie Dehnungsverlust ist unmittelbar zu Beginn der Temperierung zu verzeichnen. Danach bewegen sich die beiden Dehnungswerte in einem ähnlichen Fenster. Nur die Zugfestigkeit weist nach einer Temperierungsdauer von 60 Sekunden einen weiteren, geringen Einbruch von etwa 6 MPa auf.

Als nächstes werden die im Ofen für 10 Minuten erwärmten Platinen näher betrachtet. Diese Temperierungsdauer wird beispielsweise für den Galvannealingprozess verwendet. Dabei bildet sich eine ausgeprägte Eisen-Zink-Mischkristallschicht, die sich negativ auf die Dehnung auswirkt (**Tabelle 3**).

Auch nach dem Erwärmen im Ofen ist eine Abnahme der mechanischen Kennwerte mit steigender Temperatur erkennbar. Beim direkten Vergleich der mechanischen Kennwerte der beiden

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle 1. Mechanische Kennwerte – konduktive Erwärmung über 9 Sekunde.

	R_m in MPa	A_g in %	A in %
Referenz	$647{,}01^{+1{,}4}_{-1{,}29}$	$13{,}54^{+0{,}77}_{-0{,}62}$	$24{,}52^{+0{,}57}_{-0{,}43}$
360 °C	$604{,}72^{+0{,}45}_{-0{,}9}$	$11{,}88^{+0{,}42}_{-0{,}44}$	$22{,}56^{+0{,}86}_{-0{,}53}$
400 °C	$592{,}31^{+1{,}24}_{-1{,}46}$	$11{,}74^{+0{,}25}_{-0{,}13}$	$22{,}10^{+0{,}44}_{-0{,}42}$
420 °C	$591{,}75^{+1{,}63}_{-0{,}9}$	$11{,}31^{+0{,}52}_{-0{,}62}$	$22{,}67^{+0{,}8}_{-0{,}86}$
440 °C	$581{,}98^{+1{,}97}_{-1{,}24}$	$12{,}55^{+1{,}27}_{-0{,}71}$	$22{,}46^{+0{,}96}_{-0{,}59}$
500 °C	$558{,}05^{+8{,}54}_{-6{,}46}$	$10{,}86^{+1{,}55}_{-1{,}28}$	$20{,}80^{+1{,}66}_{-2{,}38}$

Tabelle 2. Mechanische Kennwerte – konduktive Erwärmung bei 400 °C.

	R_m in MPa	A_g in %	A in %
Referenz	$647{,}01^{+1{,}4}_{-1{,}29}$	$13{,}54^{+0{,}77}_{-0{,}62}$	$24{,}52^{+0{,}57}_{-0{,}43}$
2 Sekunden	$592{,}03^{+1{,}35}_{-2{,}2}$	$11{,}88^{+0{,}96}_{-0{,}7}$	$22{,}77^{+0{,}91}_{-1{,}45}$
9 Sekunden	$592{,}31^{+1{,}24}_{-1{,}46}$	$11{,}74^{+0{,}25}_{-0{,}13}$	$22{,}10^{+0{,}44}_{-0{,}42}$
60 Sekunden	$586{,}41^{+0{,}22}_{-0{,}11}$	$11{,}29^{+0{,}09}_{-0{,}14}$	$22{,}17^{+0{,}01}_{-0{,}01}$

Tabelle 3. Mechanische Kennwerte – Ofenerwärmung.

	R_m in MPa	A_g in %	A in %
Referenz	$647{,}01^{+1{,}4}_{-1{,}29}$	$13{,}54^{+0{,}77}_{-0{,}62}$	$24{,}52^{+0{,}57}_{-0{,}43}$
400 °C	$608{,}54^{+2{,}19}_{-2{,}19}$	$11{,}42^{+1{,}34}_{-1}$	$21{,}90^{+0{,}6}_{-0{,}34}$
420 °C	$603{,}04^{+0{,}62}_{-0{,}39}$	$11{,}44^{+1{,}12}_{-0{,}68}$	$21{,}27^{+0{,}2}_{0{,}35}$
460 °C	$593{,}26^{+0{,}79}_{-0{,}73}$	$11{,}67^{+0{,}54}_{-0{,}57}$	$21{,}98^{+0{,}85}_{-0{,}91}$
480 °C	$586{,}30^{+1{,}01}_{-1{,}01}$	$10{,}62^{+0{,}46}_{-0{,}24}$	$20{,}96^{+0{,}11}_{-0{,}11}$
500 °C	$581{,}19^{+0{,}56}_{-0{,}45}$	$10{,}06^{+0{,}9}_{-0{,}45}$	$21{,}06^{+0{,}74}_{-0{,}45}$

Temperierungsmethoden für die Temperaturen 400 °C, 420 °C sowie 500 °C ist festzustellen, dass die im Ofen erwärmten Platinen grundsätzlich höhere Zugfestigkeiten aufweisen. Dies ist mit lokalen Überhitzungen bei der Widerstandserwärmung zu begründen, die sich negativ auf die mechanischen Kennwerte, aber positiv auf die Mittenrauheit auswirkt. Werden die mechanischen Eigenschaften auf Grundlage der entstehenden Mittenrauheiten, das heißt 400 °C konduktive Erwärmung mit 460 °C bis 500 °C Ofenerwärmung (circa 0,6 µm auf der A-Seite und 1,2 µm auf der B-Seite) verglichen, so sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Dennoch ist anzumerken, dass alle konduktiven Erwärmungen ein asymmetrisches Bruchbild in Form von außermittigen Einschnürungen und Brüchen aufweisen. Die Asymmetrie der Bruchbilder nach dem einachsigen Zugversuch sind in **Bild 12** durch die Verschiebung des Bruchs konduktiv erwärmter Proben in die Achsrichtung zu erkennen.

Daraus ist zu schlussfolgern, dass Inhomogenitäten nicht nur in der Oberflächenbeschichtung vorliegen, sondern ebenfalls im Stahlkern des Blechs. Die im Ofen erwärmten Platinen dagegen brachen ausnahmslos in der Mitte der Zugproben.

4 Fazit

In dieser wissenschaftlichen Arbeit wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Temperierungsstrategien auf die Eigenschaften metallischer, feuerverzinkter Stahlplatinen analysiert. Sie umfasste sowohl optische, topografische sowie mechanische Analysen. So wurden Platinenzuschnitte auf unterschiedliche Weise sowie mit unterschiedlichen Temperierungsparametern erwärmt und der konventionellen Ofentemperierung gegenübergestellt. Ziel war es, eine raue Oberfläche zu schaffen, die für einen wärmeunterstütz-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

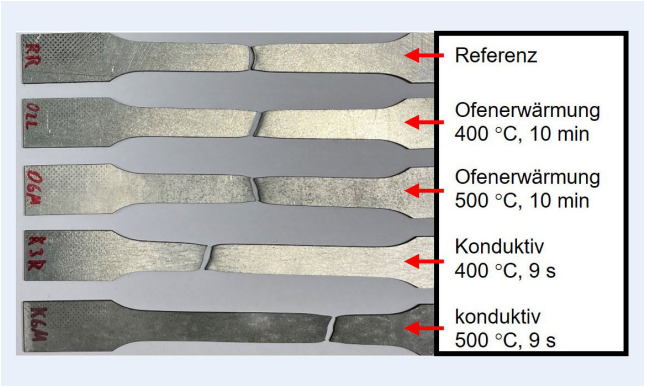

Bild 12. Erscheinungsbild verschiedener Zugprüfkörper nach einachsigem Zugversuch. *Foto: LUH (IFUM)*

ten Pressfügevorgang ohne die Verwendung eines Haftvermittlers unerlässlich ist.

In diesem Beitrag wurde die flächenbezogene Mittenrauheit genauer analysiert, da Platinen mit einer guten Fügetauglichkeit meist ein hohes S_a aufweisen. Trotzdem sind in nachfolgenden Forschungsarbeiten weitere Rauheitsparameter, beispielsweise die Profilsteigung, der wahren und wirksamen Oberfläche sowie die fraktalen Dimensionen zu analysieren, um so Korrelationen zu der Festigkeit der Pressfügeverbindung aufstellen zu können [17].

Die Untersuchungen der unterschiedlichen Temperierungsstrategien haben gezeigt, dass die gewählten Parameter einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden optischen und mechanischen Eigenschaften der feuerverzinkten Stahlplatinen haben. Außerdem wurden die Unterschiede der beiden Temperierungsmethoden deutlich. Durch die konduktive Temperierung kann abhängig von den spezifischen Parametern sowie den Bedingungen des Prozesses sowohl die Oberflächenrauheit verringert als auch erhöht werden. Dies ermöglicht nicht nur ein Rauheitsgradient zwischen der A- und B-Seite einer Platine, sondern auch eine variable Rauheitsveränderung auf derselben Seite an verschiedenen Positionen. Das entstehende Rauheitsgefälle kann sich während der Umformung zwar ungünstig auf Areale mit hoher Relativbewegung auswirken, aber zugleich auch die Fügefestigkeit während des Pressfügevorgangs oder während einer nachgeschalteten Klebstoffapplikation verbessern [18].

Es ist festzuhalten, dass beide Wärmebehandlungsverfahren Vorteile haben. Das konduktive Verfahren ermöglicht gezielte Veränderungen der Oberflächentopografie und -textur verzinkter Bleche. Ein weiterer Vorteil der Widerstandserwärmung sind die vergleichsweise geringen Temperierungsdauern, was sich positiv auf Taktzeiten in der industriellen Nutzung auswirken kann. Auch ist es aufgrund der geringen Anschaffungs- und Unterhaltskosten besonders für kleine und mittelständische Unternehmen attraktiv. Dagegen haben sich die im Ofen erwärmten Platinen mit ihrer homogenen Oberfläche und konstanten mechanischen Kennwerten als bewährtes und zuverlässiges Temperierungsverfahren vor dem Umformen erwiesen.

Zur Generierung noch höherer und flächendeckenderer Mittenrauheiten sollten sich zukünftige Forschungsarbeiten verstärkt auf den Einfluss der Walzrichtung konzentrieren. Die Untersuchung verschiedener Zuschnittswinkel könnte dazu beitragen, der Ursache auf den Grund zu gehen, weshalb sich die A- und B-Seite durch Strombeaufschlagung unterschiedlich verhalten. Darüber hinaus ist es von hohem Forschungsinteresse, die Auswirkungen verschiedener Kühlmethoden auf die Oberflächenqualität sowie die Materialgüte systematisch zu untersuchen. Um den Zusammenhang zwischen den Oberflächenmessungen und den mikrostrukturellen Veränderungen exakt interpretieren zu können, sind metallographische Untersuchungen in allen Bereichen der Prozessparameter erforderlich.

FÖRDERHINWEIS

Das IGF-Vorhaben „Leichtbaupotenzial kombiniert geformter FVK-Metall Hybridbauteile“ der Forschungsvereinigung EFB e.V. wurde unter der Fördernummer 01IF22651N über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Literatur

[1] Voestalpine: Feuerverzinktes Stahlband. Internet: www.voestalpine.com/stahl/Produkte/Stahlbaender/Feuerverzinktes-Stahlband. Zugriff am 14.10.2024
[2] Neugebauer, R.; Sterzing, A.; Göschel, A.: Prozessgröße Temperatur – Warmumformung von Karosseriewerkstoffen. 4. Chemnitzer Karosserie-Kolloquium: Werkstoffe und Technologien, Chemnitz, 2005, S. 155–170
[3] Schwartz, R.: Innovative Anlagen zum Presshärten. Bleche, Rohre, Profile 51 (2004) 5, S. 38–41
[4] Schwartz, R.: Entwicklungstendenzen beim Presshärten in der Umformtechnik. Automobilindustrie 40 (2006) 3, S. 38–41
[5] Schäffner, C.: Konduktive Erwärmung für die Warmblechumformung. Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2009
[6] Behrens, B.-A.; Hübner, S.: Konduktive Erwärmung von Formplatinen für das Presshärten. EFB Forschungsbericht Nr. 400. Hannover: EFB Hannover 2014
[7] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Schäffner, C. et al.: Wärmende Alternative – Schnelle, günstige Blecherwärmung für die Warmblechumformung. Automotive Materials 02 (2008) 08, S. 9–12
[8] DIN EN ISO 25178–2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Oberflächenkenngrößen (ISO 25178–2:2012); Deutsche Fassung September 2012
[9] Keyence: Auswertung und Filterung. Internet: www.keyence.de/ss/products/microscope/roughness/surface/evaluation_process.jsp. Zugriff am 14.10.2024
[10] Müller, C., Elektrische Widerstandserwärmung von Blechwerkstoffen zur Steigerung der Umformbarkeit, Dissertation, RWTH Aachen University, 2023

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

[11] Gogola, P.; Gabalcová, Z.; Kusý, M. et al.: High-Temperature Behaviour of Zn-Based Galvannealed Coatings on Steel. Materials 16 (2023) 9, #3341
[12] Bozorgian, B.: Anwendungsgrenzen des Feuerverzinkens für HV-Schrauben großer Abmessungen unter Berücksichtigung der Gefahr flüssigmetallinduzierter Rissbildung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2017
[13] DIN 50125:2022–08: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben. Berlin: Beuth Verlag
[14] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Heidelberg: Springer 2016
[15] Black, J. R.: Electromigration—A brief survey and some recent results. IEEE Transactions on Electron Devices 16 (1969) 4, pp. 338–347, doi.org/10.1109/T-ED.1969.16754
[16] Rademacher, L.: Anlassen von Martensit und Bainit. Vergüten oder Verspröden?: Teil 1: Praktische Beispiele für die Gebrauchseigenschaften1. HTM Journal of Heat Treatment and Materials 33 (1978) 5, pp. 241–251, doi.org/10.1515/htm-1978–330504
[17] Saborowski, Erik: Zusammenhang zwischen Struktur der Metalloberfläche und Verbundfestigkeit am Beispiel thermisch gefügter Thermoplast-Metall-Verbunde. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2022
[18] Würtele, M., Schneebauer, M.: Fertigungssysteme mit hohem Integrationspotential für neue Anwendungsfelder speziell für Hybridbauteile aus Faserverbunden. DVM-Bericht 679 (2012), S. 51

Denis Fink, M.Sc.
Foto: IFUM
fink@ifum.uni-hannover.de

Dr.-Ing Sven Hübner

Umut Genc, B.Sc.

Prof. Dr.Ing Bernd-Arno Behrens

Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik
und Umformmaschinen IFUM
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifum.uni-hannover.de/de/

Christian Gundlach, M.Sc.

Prof. Dr. Sven Hartwig

Technische Universität Braunschweig
Institut für Füge- und Schweißtechnik
Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig
www.tu-braunschweig.de/ifs

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-115 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY