

Lasergeschnittene Bauteile – eine Herausforderung für Verzinker

An lasergeschnittenen Bauteilflächen treten nach dem Feuerverzinken oft Haftungsprobleme auf. In einem Forschungsprojekt ist man den Ursachen für die Haftungsstörungen auf den Grund gegangen. Daraus lassen sich Maßnahmen zur Abhilfe ableiten.

In der metallverarbeitenden Industrie ist das Trennschneiden mit Lasern heute „Stand der Technik“ und wird weltweit angewandt. Während diese Technik in der Fertigung fast nur Vorteile bringt, stellen lasergeschnittene Flächen den Feuerverzinker vor einige Probleme. Es kommt zu unterschiedlichen Schichtstärken zwischen bearbeiteten und unbearbeiteten Bauteilflächen, und vor allem gibt es zum Teil massive Haftprobleme. Die unterschiedlichen Schichtstärken stellen mit Blick auf die genormten Anforderungen keine Probleme dar, die verminderte Haftung des Zinküberzuges sehr wohl. Die wohl entscheidendste Einflussgröße ist dabei die Oberflächenbeschaffenheit des Verzinkungsgutes vor dem Verzinken, in chemischer und physikalischer Hinsicht [1, 2].

An mehreren Instituten begann man mit Untersuchungen und stellte

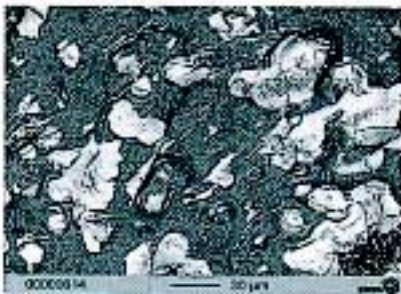


Bild 1: Abbildung der Oberfläche unterhalb einer abgeblätternen Zn-Schicht im BSE-Modus. Bei den hellen Bereichen handelt es sich um Zinkrückstände, in den dunklen Bereichen lassen sich mikroanalytisch erhebliche Sauerstoffmengen nachweisen.

verschiedene Einflussfaktoren fest:

- ◆ Es spielt eine Rolle, ob mit Sauerstoff oder Stickstoff gearbeitet wird.
- ◆ Es kommt zu unterschiedlich stabilen Oxidschichten auf der Schnittfläche.
- ◆ Durch eng begrenzte, extreme Wärmeeinwirkung finden Gefügeveränderungen statt.
- ◆ In den Wärmeeinflusszonen kommt es zu Aufhärtungen.

Diese Erkenntnisse führten zur Empfehlung, die Schnittflächen nachträglich mechanisch zu überarbeiten oder zumindest zu strahlen [3]. Eine nachträgliche mechanische Bearbeitung von lasergeschnittenen Bauteilen kommt aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht in Frage, also liegt es an der Innovationsfähigkeit der Verzinker, hierzu eine praktikable Lösung zu finden.

In der Galvaswiss AG Aarberg (GSA) begann man 1998 mit einer aufwendigen Versuchsreihe, die zwar keine befriedigenden Ergebnisse brachte, aber den Weg des weiteren Vorgehens aufzeigte. Im Juli 1999 wurde mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA in

Dübendorf ein Forschungsprojekt mit Beteiligungsverhältnis gestartet.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, die relevanten Einflussgrößen der Haftung von Zinkschichten auf lasergeschnittenen Bauteilen aus Stahl abzuklären. Man beschränkte sich auf die Stahlsorte S 355 MC mit der DIN Nr. 1.0976, wobei die Verzinkungsversuche an Prüfkörpern mit den Abmessungen 100x100x8 mm durchgeführt wurden. Die Parameter des Laserschneidprozesses, wie Schnittgeschwindigkeit und Sauerstoff als Prozessgas, wurden für alle insgesamt 380 Prüfkörper konstant gehalten.

Untersuchungsergebnisse

Anfangs musste die Oberfläche der Laserschnittkante chemisch und physikalisch charakterisiert werden. Dafür wurde Probenmaterial auf herkömmliche Weise verzinkt. Die materialkundlichen Untersuchungen beschränkten sich auf lasergeschnittene Kanten unter abgeplatzten Zinkschichten und auf Laserschnittflächen im unverzinkten Zustand.

Die Charakterisierung der Oberflächen erfolgte im Rasterelektronenmikroskop (REM, LEO 1455) in Form einer bildlichen Wiedergabe der Topographie (SE-Modus) und der Materialunterschiede (BSE-Modus). Mikroanalytisch wurden die Proben mit

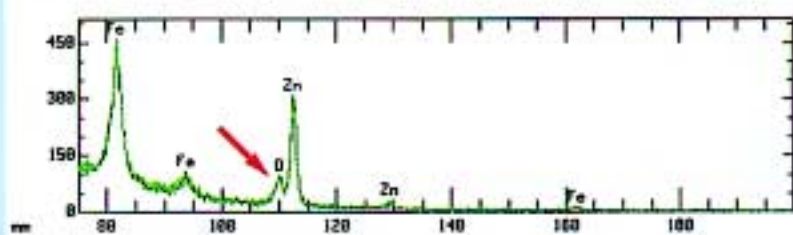


Bild 2: Unterhalb der abgeblätternen Zinkschichten lässt sich ein eindeutiger Sauerstoffpeak im EMS-Spektrum nachweisen (Pfeil)

Hilfe der Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS, JEOL 8800) beurteilt. Die Gefügecharakterisierung im Lichtmikroskop anhand metallographisch präparierter Mikroschliffe erfolgte. Die Röntgendiffraktion (XRD, Siemens 5000) sollte Aufschluss über die Zusammensetzung der durch den Laserschneidprozess entstandenen Oxide an der Laserschnittkante geben.

Diese Untersuchungen zeigten folgende Ergebnisse:

- ◆ Mittels der Röntgendiffraktion auf den Laserschnittkanten konnte eine Oberflächenschicht aus Eisenoxiden der folgenden Strukturen detektiert werden: FeO , Fe_2O_3 und Fe_3O_4 .
- ◆ Auf den von der Galvaswiss AG Aarberg (GSA) gebeizten und verzinkten Proben ist unterhalb der abgeblätterten Zinkschicht eine zusammenhängende Oxidschicht vorhanden, die in diesen Bereichen wohl für die schlechte Haftung verantwortlich gemacht werden kann. Diese Oxidschichten sind sowohl im BSE-Modus erkennbar als auch mikroanalytisch detektierbar (Bild 1, 2).
- ◆ Metallographisch lässt sich an den lasergeschnittenen Kanten neben den Oxidschichten eine nichtoxidische Schicht aus strukturlosem Martensit nachweisen. Zudem entsteht durch die Wärmeeinwirkung des Laserschneidens ein martensitisch umgewandeltes Randgefüge (Bilder 3, 4).

Sowohl die Oxidschichten als auch der strukturlose Martensit stellen sehr spröde Phasen dar. Bei einer schlagarti-

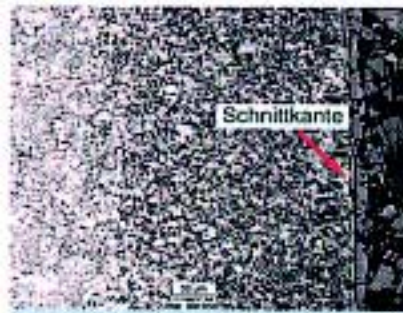


Bild 3: Geätzter Mikroschliff. Umgewandeltes Randgefüge einer lasergeschnittenen Probe, welches bis in eine Tiefe von zirka 0,3 mm reicht.

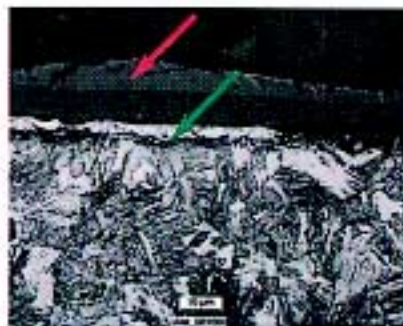


Bild 4: Geätzter Mikroschliff. Typische Randschichtausbildung einer lasergeschnittenen Kante. Es sind mehrlagige Oxidschichten erkennbar (roter Pfeil) und eine direkt darunterliegende Schicht aus strukturlosem Martensit (grüner Pfeil).

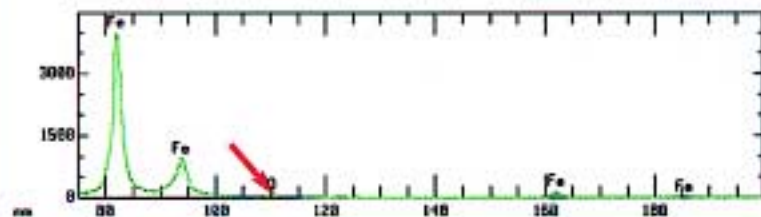
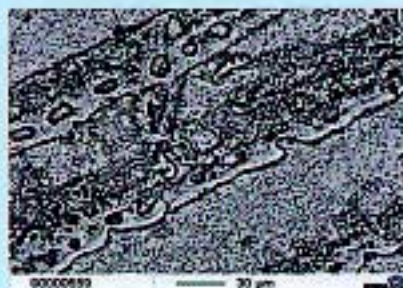
gen Beanspruchung entstehen in solchen Phasen leicht Risse, die die Haftfestigkeit der Zinkschichten stark beeinträchtigen. Offensichtlich kann die bestehende Beizlösung alleine diese Eisenoxide nicht vollständig entfer-

nen. Verschiedene Beizlösungen wurden daraufhin getestet, wobei die besten Resultate zur Auflösung dieser Mischoxide mit einem Säuregemisch aus Salz- und Schwefelsäure erzielt wurden (Bilder 5, 6).

Die quantitative Beurteilung der Oxidbelegung auf den Probenflächen wurde mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde durchgeführt. Die Analysen erfolgten sowohl unterhalb der abgeblätterten Zinkschichten nach herkömmlicher Verfahrenstechnik, als auch auf verzinkten, jedoch optimal gebeizten Laserschnittkanten. Als Referenz dienten Messungen auf nicht lasergeschnittenen, gewalzten Probenflächen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Ergebnisse.

Die Resultate zeigen deutlich, dass sich der Sauerstoffgehalt nicht unter etwa 1 Gew.% reduzieren lässt, was durch die Vergleichsmessungen auf den nicht lasergeschnittenen, gewalzten Flächen bestätigt wird.

Obwohl die optimierten Beizbäder die anhaftenden Oxide in Lösung brachten, war die Haftung der Zinkschicht immer noch ungenügend. Die Eisenoxide sind somit nicht alleine für die schlechten Ergebnisse der Haftung verantwortlich. Aus der Fachliteratur /5, 6/ ist bekannt, dass das Element Eisen mit dem Zink sehr spröde Phasen bilden kann. Aufgrund der rissbegünstigenden Wirkung solcher Phasen beschäftigte man sich in diesem Projektstadium mit dem Diffusionsverhalten des Elementes Zink im Bereich des Randgefüges der Laserschnittkanten. Von den Platten der Versuchsserie B (Tabelle 1) wurden metallographi-



Bilder 5, 6: Oberflächenabbildung einer Probe im BSE-Modus, die mit dem optimierten Verfahren gebeizt wurde. Die eisenoxydhaltigen, dunklen Bereiche konnten deutlich reduziert werden, was sich auch durch den kleineren Sauerstoffpeak im EMS-Spektrum zeigt (rechtes Bild).

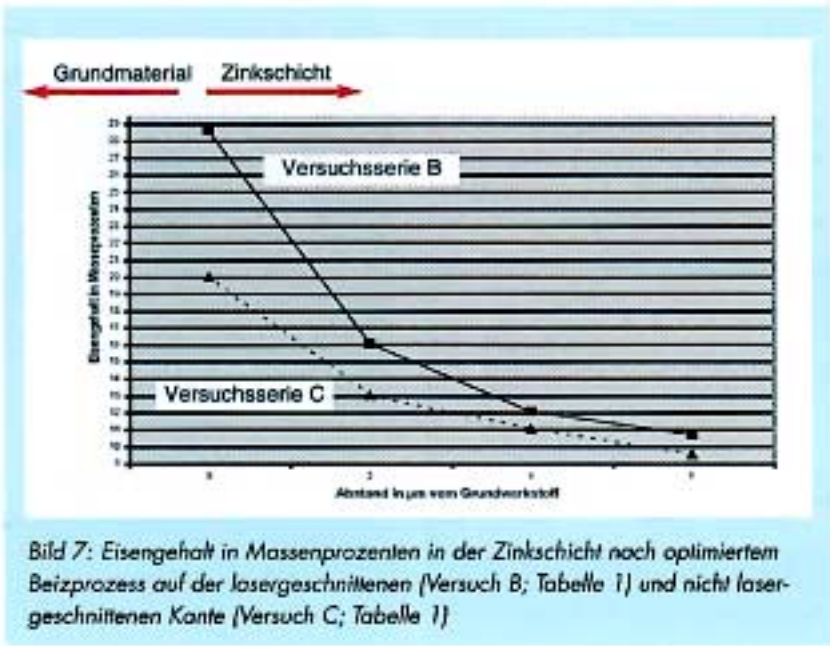
Serie	Probe	Sauerstoffgehalt in Masseprozenten
A	Gebeizt und verzinkt bei GSA, unter der Zn-Schicht auf der Laserschnittkante gemessen.	7.6
B	Aus Verzinkungsversuch, unter der Zn-Schicht auf der Laserschnittkante gemessen mit Säuregemisch HCl/H ₂ SO ₄ .	1.2
C	Gebeizt und verzinkt bei GSA, unter der Zn-Schicht auf der nicht lasergeschnittenen Kante gemessen.	1.2

Tabelle 1: Resultate der EMS-Analysen

sche Anschliffpräparate angefertigt und mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenanalytik (EDX) im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Als Referenzpunkt diente die verzinkte, gewalzte Probenfläche. Die Ergebnisse des folgenden Diagramms (Bild 7) sind nicht als Absolutwerte zu verstehen. Es handelt sich vielmehr um relative Vergleichswerte.

Die Analysenwerte zeigen deutlich, dass der Eisengehalt im Übergang von Zinkschicht zu Grundwerkstoff bei den lasergeschnittenen Kanten wesentlich höher liegt (zirka 29 Gew.%) als bei den gewalzten Probenflächen (zirka 20 Gew.%). Die Eisengehalte nehmen etwa 4µm vom Grundwerkstoff entfernt vergleichbare Konzentrationen an.

Der unterschiedliche Eisengehalt lässt sich im BSE-Modus auch bildlich anhand des Massenkontrastes darstellen. Elemente mit niedriger Ordnungszahl (Eisen 26) erscheinen im BSE-Modus dunkler als Elemente mit höherer Ordnungszahl (Zink 30). Bei den lasergeschnittenen Flächen ist der dunkle, eisenreiche Saum im Übergang vom Grundwerkstoff zur Zinkschicht deutlicher ausgebildet als bei den gewalzten Probenflächen. Die Bestätigung des rissbegünstigenden Einflusses dieser eisenreichen Phase liegt im Bruchverlauf in diesem Ausscheidungssaum begründet. Die eisenreiche Phase und der dort liegende Rissverlauf sind anhand der Probe aus der Versuchsserie B (Tabelle 1) in den Bildern 8, 9 und 10 dargestellt.



Nach einer Normalglühbehandlung der Versuchsproben bei 900°C konnte eine gute Haftung der Zinkschichten verzeichnet werden. Offensichtlich ist die Diffusion von Zink in Eisen auch abhängig von der Gefügestruktur des Grundwerkstoffes. Im Randbereich der Laserschnittkante liegt aufgrund

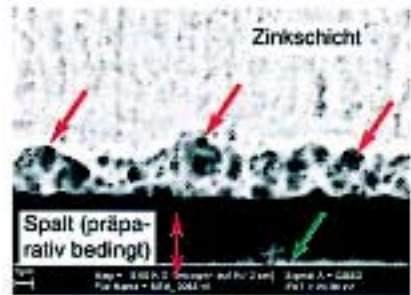


Bild 8: Geätzter Mikroschliff. BSE-Aufnahme an der lasergeschnittenen Kante. Es ist eine deutlich ausgeprägte, dunkle Zone erkennbar (Pfeile).



Bild 9: Geätzter Mikroschliff. BSE-Aufnahme an der nicht lasergeschnittenen, gewalzten Fläche. Die dunkle, eisenreiche Zone ist deutlich schmaler (Pfeile) im Gegensatz zur Laserschnittkante.



Bild 10: Geätzter Mikroschliff. BSE-Aufnahme an der lasergeschnittenen Kante im Bereich eines Schlagversuchs. Die Schichtabplatzung erfolgt am Übergang von der dunklen, eisenreichen Zone zum Grundwerkstoff (Pfeil).



Bild 11: BSE-Aufnahme an der lasergeschnittenen Kante der Versuchsserie D. Es ist keine zusätzliche Phase am Übergang Grundwerkstoff/Zinkschicht erkennbar.



Bild 12: BSE-Aufnahme an der lasergeschnittenen Fläche der Versuchsserie E. Es sind erste Ausscheidungen einer zusätzlichen Phase erkennbar (Pfeil).



Bild 13: BSE-Aufnahme an der lasergeschnittenen Kante der Versuchsserie F. Die zusätzliche Phase am Übergang Grundwerkstoff/Zinkschicht vergrößert sich (Pfeil).

der Wärmeeinwirkung des Lasers eine martensitische Gefügestruktur vor. Die Fachliteratur [4] weist auf die erhöhte Zinkdiffusion im angelassenen Martensit und/oder Perlit hin. Aus diesen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass durch die geeignete Wahl des Grundwerkstoffes – möglichst geringer Gehalt an martensitbildenden Elementen – die verstärkte Zinkdiffusion an den lasergeschnittenen Flächen

Serie	Zn-Temperatur	Verweildauer Zn-Bad	Haftung
D	460°C	1'	100 %
E	460°C	2'	80 %
F	470°C	3'	60 %

Tabelle II: Optimierung der Verzinkungsparameter

unterdrückt werden könnte. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aber die Abhängigkeit der Zn-Diffusion von der Legierungszusammensetzung nicht weiter verfolgt. Vielmehr konzentrierte man sich auf das Verhalten des hier vorliegenden Werkstoffes.

Da die guten Resultate in Bezug auf die Entfernung der Mischoxide beim Beizen ein Optimum aufzeigen, konzentrierte man sich ausschließlich auf den Verzinkungsprozess. Eine größere Anzahl von Versuchen wurde in einem breiten Spektrum von Temperatur und Verweildauer im Zinkbad gefahren. Bei den Haftprüfungen nach DIN 50978 war bei einzelnen Prüflingen eine deutliche Steigerung der Haftfestigkeit feststellbar. Die Haftfestigkeit variierte zwischen 60 und 100 %. Die Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der wichtigsten Versuchsserien.

Um die aus früheren Untersuchungen bekannte Zunahme der Zinkdiffusion im Bereich der Laserschnittkante bestätigen zu können, wurden aus allen Versuchsserien D, E und F Pro-

ben metallographisch für das Rasterelektronenmikroskop präpariert und mittels Massenkontrast (BSE-Modus) untersucht. Die Bilder 11, 12 und 13 zeigen die unterschiedlichen Gefügestrukturen dieser Versuchsserien.

Die Versuchsserie E weist im Übergang von Zinkschicht und Grundwerkstoff eine etwa 1µm dicke eisenreiche Phase auf, wobei die Versuchsserie F schon die doppelte Schichtdicke dieser spröden Phase erkennen lässt. Die gute Schichthaftung der Proben der Versuchsserie D ist wohl mit dem Fehlen des eisenreichen Ausscheidungsraumes zu erklären. Letztere weist zudem die geringste Eisenkonzentration (etwa 22 Gew.%) am Übergang zum Grundwerkstoff auf und liegt im Bereich der Eisenkonzentration von nicht lasergeschnittenen, gewalzten Probenflächen. Die Versuchsserie F mit der schlechtesten Schichthaftung hat mit zirka 27,5 Gew.% Eisen die höchste Eisenkonzentration, was im folgenden Diagramm (Bild 14) dargestellt ist.

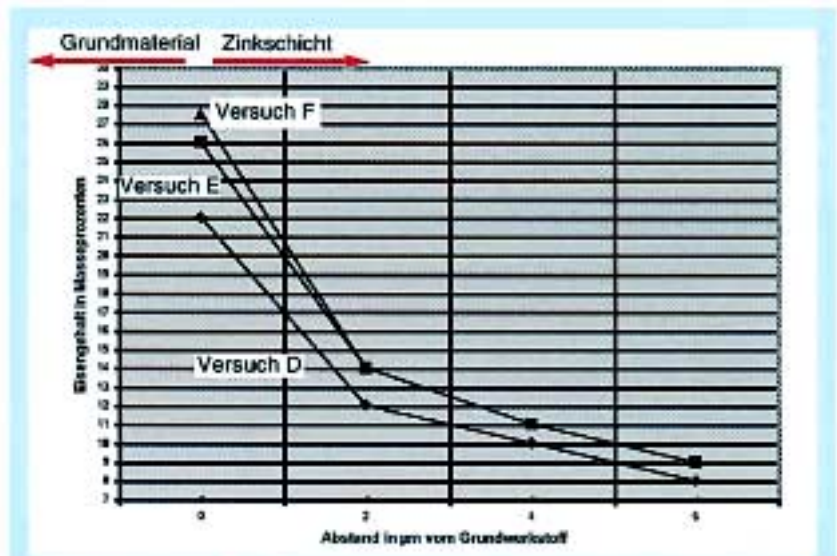


Bild 14: Eisengehalt in Massenprozent in der Zinkschicht nach optimiertem Beiz- und Verzinkungsprozess (siehe Versuchsreihe D, E und F in Tabelle 2)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat maßgeblich zur Klärung der Einflussgrößen auf die Haftfestigkeit feuerverzinkter, lasergeschnittener Bauteile aus dem Stahl S 355 MC (DIN Werkstoffnummer 1.0976) beigetragen.

Eine gute Haftfestigkeit der Zinkschichten liegt einerseits in der richtigen Vorbehandlung des Verzinkungsgutes durch optimierte Beizlösungen begründet. Eine Mischung aus Salz- und Schwefelsäure erzielte zur Auflösung der Mischoxide auf den Laserschnittkanten die besten Resultate. Andererseits verschlechtert eine spröde, eisenreiche Phase, die im Übergang von der Zinkschicht zum Grundwerkstoff vorliegt, die Haftfestigkeit deutlich. Diese eisenreichen Ausscheidungen werden durch die erhöhte Zinkdif-

fusion im martensitisch umgewandelten Randgefüge der Laserschnittkante gefördert. Mit der Optimierung von Temperatur und Verweildauer im Zinkbad kann dieser Diffusionsprozess verlangsamt beziehungsweise verkürzt werden, so dass die Haftung der Zinkschichten wieder den in der Norm definierten Anforderungen genügt. Diese guten Resultate konnten in Großserien bestätigt werden.

Eine Einschränkung ist jedoch die Materialdicke. Bei Laserschnittkanten, die dicker als 10 mm sind, nimmt die Haftung progressiv ab. ■

Literatur

/1/ G. Barton, M. Koschling und H. W. Bergmann, „Werkstofftechnische Aspekte des Laserschneidens“, *Z. Werkstofftech.* 14, pp. 257-263 (1983).

/2/ You-Hie Han, I. Decker, R. Ruge, „Laser Cutting of selected Steels: Micro-Structural Changes and Their Effect on the Mechanical Properties“, *Laser Treatment of Materials* 1988, pp. 289-298.

/3/ G.R./kl, „Aufbau und Aussehen von Zinküberzügen auf Brennschnittkanten“, *Feuerverzinken*, Nr. 4 Dez. 2000, pp. 52-54.

/4/ Dipl.-Ing. H.-J. Böttcher, „Möglichkeiten zur Minderung der Eisen-Zink-Reaktionen beim Feuerverzinken“, *Metall* 38 Heft 9, Sep. 84, pp. 862-866.

/5/ H. J. Johnen, „Zink, Zink-Taschenbuch“, Metall-Verlag, Berlin/Heidelberg 1981.

/6/ H. J. Johnen, „Zink für Stahl“, hrsg. Zinkberatung e.V. Düsseldorf 1984.

Die Autoren: Markus Zraggen und Oliver v. Trzebiatowski, beide EMPA, CH-Dübendorf; Hermann A. Haslinger, Galvaswiss AG, CH-Aarberg