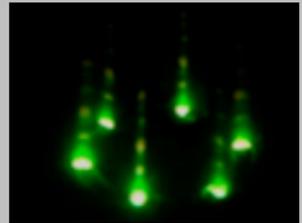


ELEKTRONENSTRAHL- RANDSCHICHTBEHANDLUNG

Innovative Technologien für höchste
industrielle Ansprüche

Rolf Zenker,
Anja Buchwalder



pro beam

Dieses Buch wurde von den Autoren im Auftrag der
pro-beam AG & Co. KGaA erarbeitet.

Zenker, Rolf; Buchwalder, Anja:
Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung
Innovative Technologien für höchste industrielle Ansprüche
2010

2. überarbeitete Auflage
Eigendruck im Selbstverlag

©2010 Alle Rechte für das Gesamtwerk bei pro-beam AG & Co. KGaA

©Abbildungen:

Abb. 87	SLV Halle
Abb. 44; 46; 90	Stahlzentrum Freiberg
Abb. 63a; 64; 66a, b; 70a; 71a; 72a; 73a; 80; 81a; 88a, b	pro-beam AG & Co. KGaA
Abb. 1; 10; 11; 12; 20; 23; 32; 35; 37; 39; 41-43; 45; 50-52; 54-60; 67; 75; 78; 79; 83; 84; 86; 88c, d, e	IWT, TU Bergakademie Freiberg
alle übrigen Abbildungen	Zenker-Consult

Printed in Germany

Inhalt

1	EINFÜHRUNG	4
2	VERFAHRENSTECHNISCHE GRUNDLAGEN	6
2.1	Wirkprinzip.....	6
2.2	Verfahrensübersicht	8
2.3	Technologie.....	12
2.4	Strahlführungstechnik.....	15
2.5	Werkstofftechnologie	22
2.6	Bauteilspezifik	23
2.7	Prozesstechnik	27
3	RANDSCHICHTTECHNOLOGIEN	29
3.1	Festphasenprozesse	29
3.1.1	EB-Härten.....	29
3.1.2	EB-Glühen.....	35
3.2	Flüssigphasenprozesse	36
3.2.1	EB-Umschmelzen.....	36
3.2.2	EB-Umschmelzlegieren/-dispergieren	40
3.2.3	EB-Auftragen.....	48
3.3	Kombinierte EB-Randschichttechnologien.....	49
3.3.1	Kombination mit thermochemischen Behandlungen	50
3.3.2	Kombination mit Hartstoffbeschichtungen (PVD, CVD).....	51
3.4	Sonderverfahren.....	53
4	ANWENDUNG	55
4.1	Anwendungsrichtlinien und Einsatzkriterien.....	55
4.2	Anwendungsbeispiele.....	58
4.2.1	Festphasenprozesse	58
4.2.2	Flüssigphasenprozesse	72
5	POTENZIALE	80
6	ANLAGEN	83

1 Einführung

Der Elektronenstrahl (EB – Electron Beam) hat sich trotz Konkurrenz mit anderen Randschichttechnologien, insbesondere der Laserstrahlbehandlung, in den letzten 20 Jahren in vielen Bereichen der metallverarbeitenden Industrie durch zahlreiche industrielle Anwendungen einen festen Platz erobert.

Basierend auf der nahezu trägheitslosen Form- und Ablenkbarkeit des Elektronenstrahls wurden Techniken entwickelt, die es gestatten, die Energieübertragung innerhalb eines Ablenkfeldes nahezu beliebig an die Bauteilkontur anzupassen bzw. definierte lokale Temperatur-Zeit-Regime zu realisieren. Damit sind die Bedingungen für eine maßgeschneiderte, beanspruchungsgerechte Behandlungstechnologie erfüllt.

EB-Randschichttechnologien werden vor allem für den Verschleißschutz eingesetzt und zeichnen sich durch ihre ausgezeichnete Produktivität, den hohen Wirkungsgrad, ihre große Flexibilität und die technologische Vielfalt sowie durch die exzellente Reproduzierbarkeit der Behandlungsergebnisse aus.

Mittlerweile gewinnen aber auch EB-behandelte Randschichten zum Schutz gegen Korrosion an Bedeutung. Selbst zur gezielten Beeinflussung des Eigenspannungszustandes (Erzeugung von Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich) wird z. B. das EB-Härten genutzt.

EB-Randschichttechnologien sind Vakuumprozesse. Das in der Vergangenheit als Nachteil für EB-Verfahren angesehene Vakuum ist eher als Vorzug zu werten, weil durch die inerte Atmosphäre einerseits schädliche Nebenwirkungen verhindert werden (Oxidation, Entkohlung, Wasserstoffversprödung u. a.) und andererseits positive Auswirkungen auf den Prozess zu verzeichnen sind (Porenreduzierung, Verdampfen von Verunreinigungen u. a.). Durch geschickte Anlagenkonzepte sind die Evakuierungszeiten nicht mehr prozessbestimmend, sondern sie werden zu Nebenzeiten.

EB-Technologien maßgeschneidert und beanspruchungsgerecht

Vakuum als Vorteil

Für den erfolgreichen Einsatz von Strahl-Randschichttechnologien sind folgende Aspekte wichtig:

- Der Energieeintrag muss so erfolgen, dass werkstoffspezifisch beanspruchungsgerechte Randschichteigenschaften bzw. Eigenschaftsgradienten eingestellt werden.
- Die Strahlführung muss werkstoff- und geometriespezifisch an das Bauteil angepasst werden.
- Die Wirtschaftlichkeit muss gewährleistet sein, wobei der Gesamtprozess zu betrachten ist.

In dem Maße, wie die Realisierung dieser Forderungen gelingt, werden sich Elektronenstrahlverfahren immer mehr in der industriellen Praxis durchsetzen.

EB-Randschichtbehandlungstechnologien sind prädestiniert für den Einsatz in allen Bereichen der metallverarbeitenden Industrie, wie z. B. Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Werkzeugmaschinenindustrie, Elektrotechnik, Metallurgie, Werkzeugindustrie, Medizintechnik, Feinwerktechnik u. a.

Die im Jahre 2003 vorgelegte Monographie hat aufgrund ihrer Praxishöhe zahlreiche Leser ermutigt, eine der modernsten Randschichttechnologien für sich zu erschließen und zu nutzen. Es wurden einerseits zahlreiche neue Applikationen industriell eingeführt und andererseits neue wissenschaftliche Erkenntnisse auf diesem Gebiet hinzugewonnen. Mit der nunmehr vorliegenden 2. überarbeiteten Auflage steht dem Fachmann und denen, die sich mit dem Gebiet der Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung vertraut machen wollen, dem aktuellen Stand entsprechendes Material zur Verfügung. Die Kapitel Strahlführungstechnik, Flüssigphasenprozesse sowie Kombinationsverfahren wurden nahezu vollständig neu gestaltet. Die Abschnitte zur Anwendung wurden ergänzt, um weitere Anregungen für den Einsatz von EB-Technologien zu geben. Im Kap. 5 Potenziale wird zusätzlich zur Erörterung neuer hochproduktiver EB-Mehrprozessstechnologien auf verwandte Verfahren der Oberflächenmodifikation verwiesen.



Abb. 1

Einwirkung des EB auf eine Bauteiloberfläche

2 Verfahrenstechnische Grundlagen

2.1 Wirkprinzip

Treffen stark beschleunigte Elektronen, die sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu $2/3$ der Lichtgeschwindigkeit bewegen, auf Material, so wird deren kinetische Energie in einer dünnen Absorptionsschicht (einige μm) umgewandelt (Abb. 2).

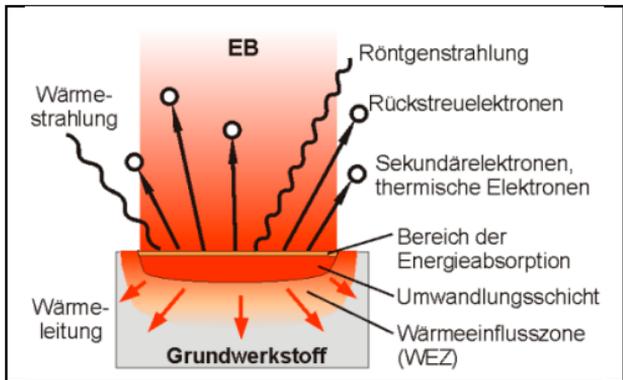


Abb. 2
Wechselwirkung
zwischen EB
und Material

Der in thermische Energie übergehende Anteil bewirkt im Werkstoff durch Wärmeleitungsprozesse eine lokale Temperaturerhöhung, wodurch in einer Randschicht werkstoffspezifische Fest- oder/und Flüssigphasenumwandlungen ablaufen, die für die Randschichtmodifizierung gezielt genutzt werden.

Bedingt durch die lokal begrenzte Einwirkzone des Elektronenstrahls und die hohe Energiedichte, die bei den Randschichtbehandlungsprozessen nutzbar ist ($10^4 \dots 10^5 \text{ W/cm}^2$), erwärmt sich das Material sehr schnell und kühlt durch Selbstabschreckung (kein zusätzliches Abschreckmedium) ebenso rasch wieder ab ($10^3 \dots 10^4 \text{ K/s}$). Dies hat zur Folge, dass die Umgebung der EB-Einwirkzone verhältnismäßig wenig thermisch belastet wird. Die Rückstreuelektronen können, wie noch gezeigt werden wird, äußerst nutzbringend zur Oberflächenabbildung bzw. zur Prozesskontrolle eingesetzt werden. Die Entstehung von Röntgenstrahlung hat zur Folge, dass

Energiedichte
 $10^4 \dots 10^5 \text{ W/cm}^2$

besondere Schutzmaßnahmen gegen ihren Austritt aus der Arbeitskammer getroffen werden müssen. Es sei aber gleich in diesem Zusammenhang vermerkt, dass bei Einhaltung der entsprechenden Strahlenschutzbestimmungen keinerlei Gefahr für Bediener von EB-Anlagen besteht, so dass nicht einmal Röntgenplaketten getragen werden müssen, wie z. B. in technischen oder medizinischen Röntgenlaboratorien.

Abb. 3

Energiebilanz bei EB-Randschichtprozessen
 a) EB-Material-Wechselwirkung
 b) EB-Anlagentechnik

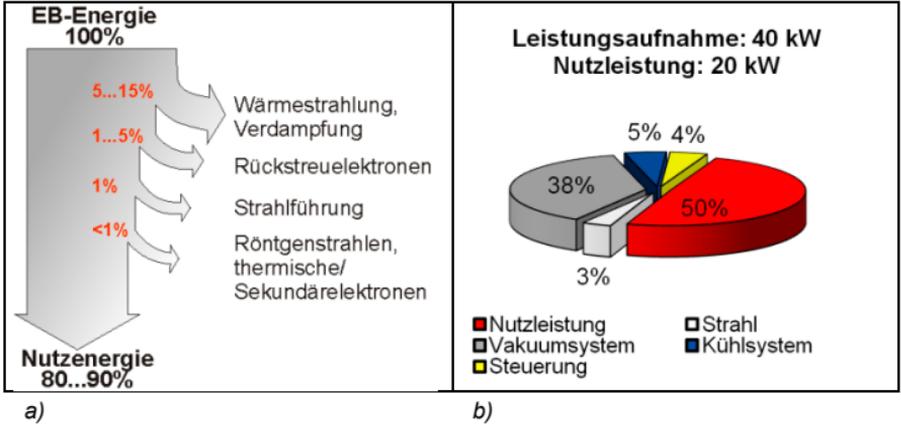


Abb. 3 zeigt die Anteile an Nutz- und Verlustenergien, die durch die einzelnen Wechselwirkungsprozesse verursacht werden. Im Falle der Flüssigphasenprozesse liegt der Anteil an thermischer Nutzenergie bei etwa 90 %, bei Festphasenprozessen an der unteren angegebenen Grenze (80 %). Es ist besonders hervorzuheben, dass der Wirkungsgrad des EB deutlich höher ist als der des Lasers (CO_2 -Laser < 5%, Festkörperlaser 10...20%, Diodenlaser 20...30%, Faserlaser \leq 30%, Scheibenlaser < 50%).

In Abhängigkeit von der Energiedichte in der EB-Einwirkzone kommt es zu verschiedenen Wechselwirkungsprozessen (Abb. 4). Wird die Schmelztemperatur nicht überschritten (Abb. 4a), bleibt der Werkstoff im festen Zustand und wird lediglich durch Festphasenumwandlungen verändert.

Bei Überschreiten der Schmelztemperatur bildet sich wie beim EB-Schmelzschweißen ein „Schmelz-

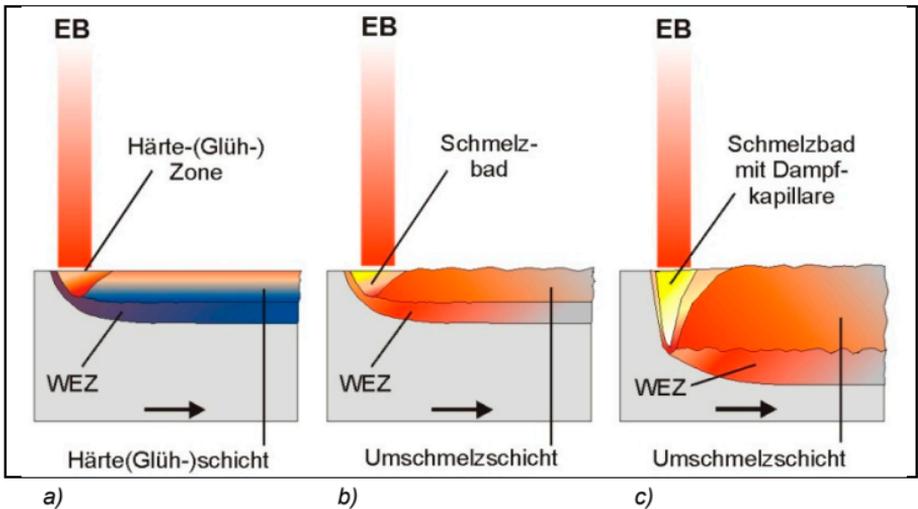
Abb. 4

Entstehung der Umwandlungszone bei Fest- und Flüssigphasenprozessen

- a) EB-Härten, EB-Glühen
- b) Umschmelzen ohne Dampfkapillare
- c) Umschmelzen mit Dampfkapillare

bad“ aus (Abb. 4b), das nach Beendigung der Einwirkung des EB rasch erstarrt. Ist die Energiedichte des EB so hoch, dass sogar die Verdampfungstemperatur des Materials überschritten wird, dann bildet sich wie beim EB-Tiefschweißen eine Dampfkapillare (Abb. 4c). Auch hier kommt es nach Abschalten oder „Verschieben“ des EB zur Ausbildung einer Erstarrungsschicht, die deutlich dicker ist als im Falle geringerer Energiedichten.

Welche technologische Variante zur Anwendung kommt, hängt vom Werkstoff und den Beanspruchungsbedingungen ab.

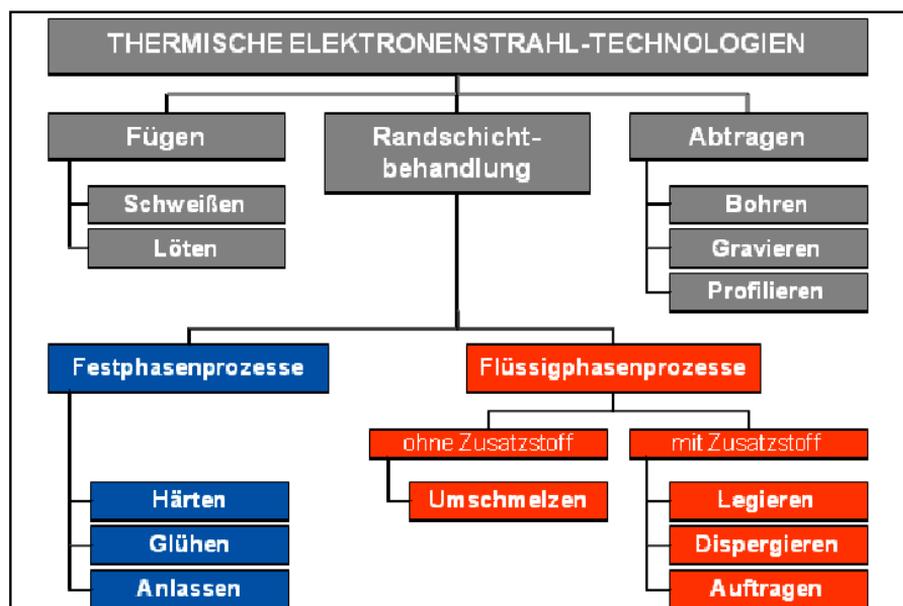


2.2 Verfahrensübersicht

Die thermischen EB-Technologien werden in die Verfahrensgruppen Fügen, Abtragen und Randschichtbehandlung unterteilt (Abb. 5).

Bei der EB-Randschichtbehandlung werden in Abhängigkeit von der gewählten Behandlungstemperatur (T_B) im Vergleich zur Schmelztemperatur (T_S) des Grundwerkstoffes die technologischen Varianten Festphasenprozesse ($T_B < T_S$) und Flüssigphasenprozesse ($T_B > T_S$) unterschieden (Abb. 5).

Das bekannteste und am meisten verbreitete Verfahren ist das EB-Randschichthärten.



Inzwischen haben aber auch das EB-Umschmelzen (ohne Zusatzstoff) und das EB-Umschmelzlegieren (mit Zusatzstoff) in Form erster Anwendungen Zugang zur industriellen Praxis gefunden. Dennoch werden die technisch-technologischen Möglichkeiten dieser und weiterer Flüssigphasentechnologien bei weitem nicht genutzt.

Abb. 5
Verfahrensübersicht
thermische EB-Technologien

EB-Härten (EBH)

Der Werkstoff wird bis in eine bestimmte Tiefe (0,1...2 mm) auf eine Temperatur (dicht) unterhalb des Schmelzpunktes erwärmt und nach kurzer Haltezeitdauer (0,1...einige Sekunden) durch Selbstabschreckung abgekühlt, so dass eine martensitische Umwandlung abläuft.

EB-Glühen/-Anlassen (EBG)

Der Werkstoff wird bis in eine bestimmte Tiefe auf eine Temperatur erwärmt, bei der die gewünschten Werkstoffveränderungen (Rekristallisations- und Ausscheidungsvorgänge) herbeigeführt werden.

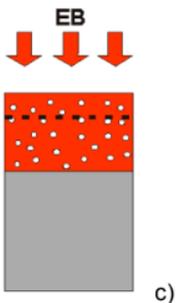
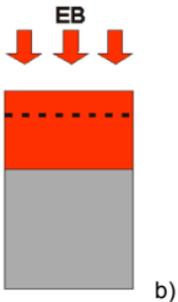
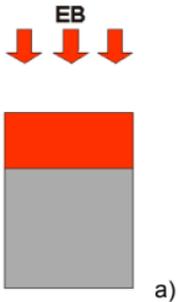


Abb. 6
Festphasenprozesse
EBH, EBG

Abb. 7

Flüssigphasen-
prozesse

- a) EBU
- b) EBUL
- c) EBUD
- d) EBA



Während das EB-Härten nur für Werkstoffe mit einem entsprechenden Umwandlungsverhalten (härtbare Werkstoffe, insbesondere Stahl und Gusseisen mit $> 0,25\% \text{C}$) anwendbar ist, werden die EB-Flüssigphasenprozesse für nicht härtbare Werkstoffe (z. B. NE-Legierungen, niedrig C-haltige hochlegierte Stähle, ferritisches Gusseisen) eingesetzt, sind aber auch für härtbare Werkstoffe nutzbar.

EB-Umschmelzen (EBU)

Der Werkstoff wird mittels Elektronenstrahl bis in eine bestimmte Tiefe (0,1...3,0 (10) mm) auf Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur (T_s) erwärmt und erstarrt rasch nach Beendigung der EB-Einwirkung durch Selbstabkühlung (Abb. 7a), wobei sich Struktur- und Gefügeaufbau ändern, nicht aber die chemische Zusammensetzung.

EB-Umschmelzlegieren (EBUL)

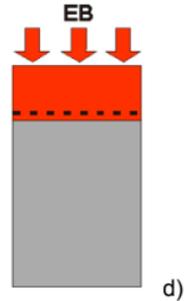
Die Randschicht eines Werkstoffes und ein Zusatzstoff, der vorher aufgebracht oder während des Prozesses zugegeben wird, werden bis in eine bestimmte Tiefe (0,1...3,0 (10) mm) mittels EB auf eine Temperatur oberhalb T_s von Grund- und Zusatzstoff erwärmt (Abb. 7b). Beim nachfolgenden Erstarren durch Selbstabschreckung bildet sich durch Ablauf bestimmter metallurgischer Prozesse eine Schicht mit veränderter chemischer Zusammensetzung und Struktur-/Gefügeausbildung.

EB-Umschmelzdispargieren (EBUD)

Die Randschicht eines Werkstoffes und ein Zusatzstoff werden mittels EB bis in eine bestimmte Tiefe (0,1...3,0 (10) mm) auf eine Temperatur oberhalb T_s des Grundwerkstoffes erwärmt und die nicht geschmolzenen Partikel des Zusatzstoffes in der aufgeschmolzenen Schicht eingelagert (Abb. 7c). Bei der anschließenden Erstarrung durch Selbstabschrecken wird dieser Zustand „eingefroren“.

EB-Auftragen/-Beschichten/-Cladding (EBA)

Ein vorher aufgebracht oder während des Prozesses eingebrachter Zusatzstoff wird durch Einwirken des Elektronenstrahls auf eine Temperatur oberhalb T_s des Zusatzstoffes und des Grundwerkstoffes erwärmt, wobei der Zusatzstoff teilweise oder vollständig, der Grundwerkstoff nur bis in eine geringe Tiefe (0,05...0,25 mm) in den flüssigen Zustand überführt wird (Abb. 7d). Im Ergebnis der nachfolgenden raschen Erstarrung bildet sich eine auf dem Grundwerkstoff festhaftende Schicht mit anderer chemischer Zusammensetzung und Struktur- bzw. Gefügeausbildung als der Grundwerkstoff.



Kombinationsbehandlungen

Neben diesen „Ein-Prozess-Technologien“ gibt es einige kombinierte Technologien (Abb. 8), wie z. B.

- EBH + thermochemische Behandlung (TCB)
- EBH + Hartstoffbeschichtung (HSB)
- EBU + EBH
- EBU + Hartstoffbeschichtung (HSB)

oder Verfahrenskombinationen unter Einbeziehung von EB-Prozessen, die nicht zur Gruppe der Randschichttechnologien gehören, wie z. B. im Falle des EB-Gravierhärtens (EB-Gravieren + EBH).

Bei Kombinationsbehandlungen spielt die Reihenfolge der Verfahrensschritte eine entscheidende Rolle. Wird z. B. eine Hartstoffbeschichtung nach der EB-Behandlung durchgeführt (EBH+HSB; EBU+HSB), muss die Beschichtungstemperatur unter Berücksichtigung der thermischen Beständigkeit der mittels EB vorher erzeugten Schichten bzw. des Grundwerkstoffes (Anlassbeständigkeit von Eisenwerkstoffen oder Stabilität des Ausscheidungs-zustandes bei NE-Legierungen) eingestellt werden. Bei umgekehrter Reihenfolge der Prozessschritte (z. B. HSB+EBH) ist die Stabilität der Schichten das entscheidende Kriterium für die Festlegung der EB-Parameter, wobei es in Einzelfällen auch zu gewünschten Schichtänderungen bzgl. der Struktur durch die thermische Einwirkung kommen kann.

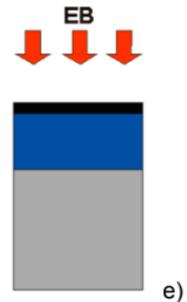


Abb. 8

Kombinations-
behandlung
(z. B. TCB+EBH)

2.3 Technologie

EB-Randschichttechnologien sind durch die folgenden vorteilhaften Merkmale gekennzeichnet:

- hohe Produktivität (kurze Behandlungszyklen, reduzierter Fertigungsaufwand, Einsparung von Prozessstufen)
- geringer Energieverbrauch
- hochgradige Automatisierbarkeit
- Flexibilität (Realisierung mehrerer Fertigungsverfahren in einer Anlage, wie z. B. Schweißen, Randschichtbehandlung, Gravieren)
- hohe Anpassungsfähigkeit an wechselnde technologische Aufgaben (Fertigungsverfahren, Teilesortimente)
- Eingliederung in Fertigungssysteme bzw. -prozessabläufe
- verbesserte Qualität der Erzeugnisse (bessere Gebrauchseigenschaften, höhere Lebensdauer)
- große Fertigungssicherheit (sehr genau reproduzierbare Behandlungsergebnisse)
- verbesserte Arbeitsbedingungen
- keine Umweltbelastung

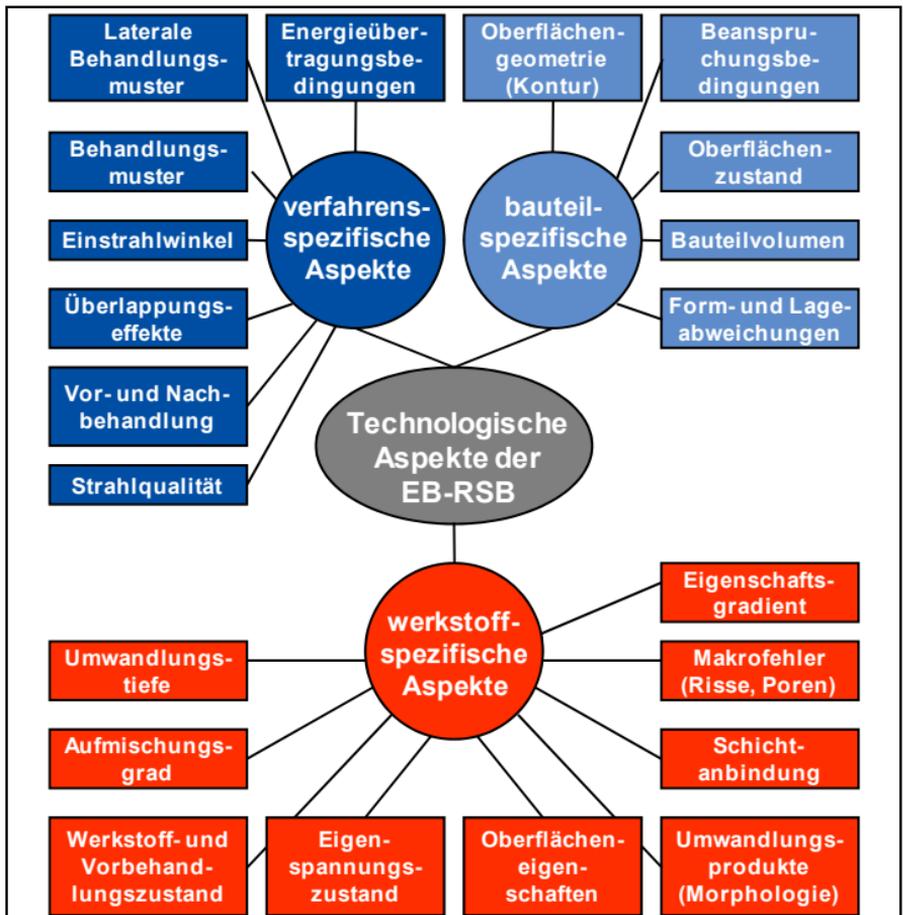
**EB-Technologien
hochproduktiv,
multivalent und
flexibel einsetzbar**

Nachteilig können sich auswirken:

- hohe Anlagenkosten
- Begrenzung der Bauteilgröße durch Rezipientenvolumen
- zusätzlicher Prozessschritt bei magnetischen Werkstoffen: Entmagnetisierung der Bauteile vor der EB-Behandlung

Entmagnetisierung

Entscheidend für die erfolgreiche Verfahrensanwendung sind die verfahrens- und anlagentechnisch optimale Ausnutzung der physikalisch-technischen Vorzüge des EB, die genaue Kenntnis der verfahrensspezifischen und werkstofftechnischen Zusammenhänge sowie daraus resultierend optimal auf die Beanspruchungsbedingungen abgestimmte Werkstoff- und Behandlungsparameter (Abb. 9).



Wird der industrielle Einsatz von EB-Technologien allein von den Investitionskosten abhängig gemacht, entspricht dies nicht dem tatsächlichen wirtschaftlichen und technisch-technologischen Potenzial. EB-Randschichttechnologien zeichnen sich in der Regel durch besonders niedrige Produktionsnebenkosten aus. In vielen Fällen können Prozessstufen eingespart werden (z. B. Anlassen nach dem Härten, Schleifen nach der EB-Festphasenumwandlung) bzw. der EB kann an mehreren Prozessorten gleichzeitig einwirken (Mehrspot-Technik, vgl. Kap. 2.4 und 5), oder es können mehrere Prozesse gleichzeitig in einem Verfahrensschritt realisiert werden (Mehrprozess-Technologien, vgl. Kap. 2.4 und 5).

Abb. 9
Technologische Aspekte der EB-Randschichtbehandlung

Niedrige Produktionsnebenkosten

Werden die spezifischen Merkmale der EB-Randschichttechnologien bereits bei der konstruktiven Gestaltung von Bauteilen und Werkzeugen berücksichtigt, bringt dies in den meisten Fällen erhebliche wirtschaftliche, technische und technologische Vorteile. Ein als „einfach“ eingestufte Austausch von anderen Randschichttechnologien durch eine EB-Behandlung im „Nachgang“ erweist sich nicht immer als vorteilhaft oder sinnvoll.

Zur orientierenden Bewertung der Leistungsfähigkeit der EB-Randschichttechnologien sind in Tab. 1 typische Prozessparameter für die EB-Randschichtbehandlung zusammengestellt. Die in Klammern gesetzten Obergrenzen werden bisher nur in Einzelfällen ausgeschöpft. Die zum Teil recht großen Bandbreiten resultieren vor allem aus der Verfahrensvielfalt. Die Prozessparameter stehen in engem Zusammenhang mit den in Tab. 2 erfassten Strahlparametern (vgl. Kapitel 2.4).

Tab. 1

Typische Prozessparameter für die EB-Randschichtbehandlung

Parameter	Festphasenprozesse	Flüssigphasenprozesse
Behandlungstiefe	0,05...1,8 (2,0) mm	0,1...3,0 (10,0) mm
Prozessgeschwindigkeit	0,5...5 (10) cm/s	0,1...5 (10) cm/s
Max. Behandlungsbreite (abhängig von Einwirktiefe)	100 (200) mm	50 (100) mm
Flächendurchsatz	...50 (100) cm ² /s	...50 (100) cm ² /s
Energieübertragungstechnik (typische Varianten)	Linienlaser, Feldtechnik, Flasketchnik, Mehrfokustechnik, Mehrfeldtechnik	(dynamische) Mehrbad-/ Mehrbahntechnik
	Mehrprozessentechnik	

2.4 Strahlführungstechnik

Die Prozesse der EB-Randschichtbehandlung erfordern im Gegensatz z. B. zum EB-Schweißen eine größere Oberflächenbereiche erfassende Energieübertragung. Eine wesentliche Voraussetzung für die effektive Nutzung von EB-Randschichtbehandlungstechnologien ist die Anwendung einer hochfrequenten 2D- bzw. 3D-Strahlablenkung, die es gestattet, mit Ablenkfrequenzen bis zu 100 kHz nahezu jedes beliebige laterale Muster innerhalb eines definierten Energieübertragungsfeldes (im optimalen Arbeitsabstand: 200 mm x 200 mm) einzustellen.

Parameter	EB-Randschichtbehandlung
Beschleunigungsspannung	60...120 (150) kV
Strahlleistung	1...15 (20) kW
Strahldurchmesser (Fokus, Abb. 10)	0,3...0,5 mm
genutzte Leistungsflussdichte	$10^3 \dots 10^5 (10^4) \text{ W/cm}^2$
Größe des Energieübertragungsfeldes	$\dots 2 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$
max. Strahlablenkfrequenz	100 kHz
Arbeitsabstand (EB-Austritt bis Bauteil)	100...500...1500 mm

Hierbei werden die gute Ablenk- und Formbarkeit des EB genutzt, die allein daraus resultieren, dass Elektronen sehr kleine geladene Teilchen mit einer äußerst geringen Masse sind, die sich durch elektromagnetische Felder beeinflussen lassen. Das Grundprinzip dieser Ablenktechnik besteht darin, dass innerhalb eines vorgegebenen Energieübertragungsfeldes unterschiedliche laterale geometrische Elemente (Spots, Linien) als „Muster“ programmiert werden, die dann vom EB in definierter Reihenfolge mit Energie beaufschlagt werden. Für den Werkstoff entsteht wegen der hohen Ablenkfrequenz und begrenzter Wärmeleitfähigkeit der Eindruck, dass in allen programmierten Bereichen quasi gleichzeitig die kinetische Energie der Elektronen in Wärmeenergie umgewandelt wird. Durch Variation der Verweildauer pro Spot bzw. durch

Hochfrequente programmierte Strahlablenkung

Tab. 2

Typische Strahlparameter für die EB-Randschichtbehandlung

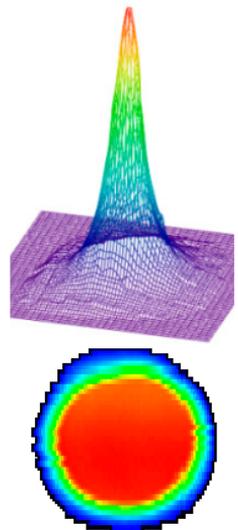
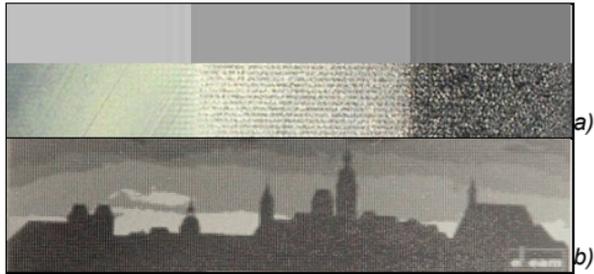


Abb. 10

3D-Energieverteilung (Gaussfunktion) im EB-Brennfleck

eine unterschiedliche Anzahl von Energiebeaufschlagungen pro Spot kann die Intensität des Energieeintrags und damit das T-t-Regime lokal exakt definiert werden. Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche in Grauwerttöne abgestufte Darstellungen (Muster oder „Bilder“) erzeugen (Abb. 11).

Abb. 11
Energieübertragungsmuster
a) Graustufenfelder
b) Graustufenbild
(8 Bit)



Die Angaben zur Pixelanzahl eines Bildes beinhalten Informationen zu Anzahl und zum Abstand der einzelnen EB-Ablenkpositionen (Spots). Diese Spots werden wie oben beschrieben mit einer Energieverteilung (Abb. 10) überlagert und ergeben so unterschiedliche Schattierungen auf einer Metalloberfläche (Abb. 11b). Dabei können in jedem Pixel (= Spot) bis zu 256 Graustufen dargestellt werden. Diese Art der Strahlführungstechnik kommt z. B. beim Nanostrukturieren zur Anwendung.

Bei der EB-Randschichtbehandlung sind die mit Energie beaufschlagten Flächenelemente wesentlich gröber strukturiert und werden als „Punkt-, Linien- oder Flächenmuster“ programmiert. Diese lateralen Muster werden an die jeweiligen Beanspruchungsbedingungen und/oder Bauteilkonturen angepasst. Das funktioniert allerdings nur innerhalb bestimmter elektronischer (Ablenktechnik) und physikalischer Grenzen (Wärmeleitfähigkeit u. a.). Bzgl. der Relativbewegung zwischen Bauteil und Strahl während der EB-Einwirkung gibt es zwei grundlegende strahlführungstechnische Varianten:

- **CI-Technik (Continuous Interacting):**
Strahl und Bauteil bewegen sich relativ zueinander
- **Flash-Technik:**
Bauteil ist fest unter dem Strahl positioniert

Während die CI-Technik meist zur Behandlung größerer Bauteilbereiche i. d. R. in Form von Bahnen prädestiniert ist, lassen sich mit der Flash-Technik vor allem Bauteilflächen, die nicht größer sind als das maximal mögliche Energieübertragungsfeld, vorteilhaft behandeln.

CI- und Flash-Technik

Energieübertragungsfeld

Beim EB-Härten oder -Glühen wird das Energieübertragungsfeld in der Regel so programmiert, dass eine möglichst rasche Erwärmung erfolgt, die Temperatur an der Oberfläche lokal kurze Zeit konstant gehalten und anschließend die erwärmte Zone durch Eigenabschreckung rasch abgekühlt wird.

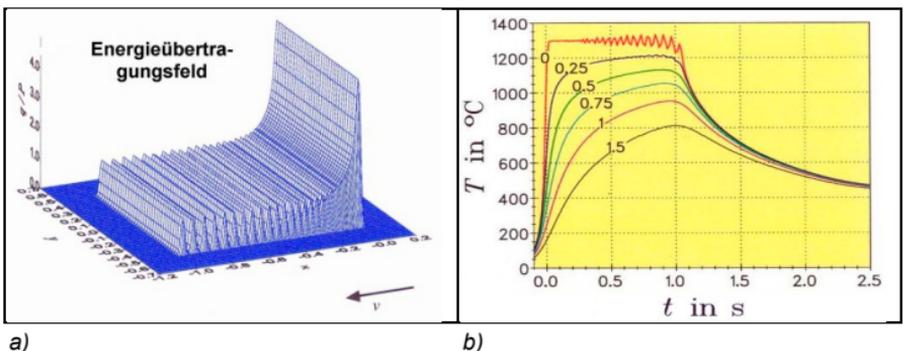
Abb. 12a zeigt ein typisches Beispiel für ein Energieübertragungsfeld, das sich relativ zum Bauteil bewegt (CI-Technik). Die höchste Energiedichte definiert die Front des Feldes. Die dazu gehörigen Temperatur-Zeit-Verläufe in unterschiedlichen Abständen von der Oberfläche zeigt Abb. 12b.

Diese Art der Energieübertragung bezeichnet man als oberflächenisotherm, weil die Oberflächentemperatur im Einwirkungsbereich des Feldes konstant bleibt.

Dieses vor allem beim EBH zur Anwendung kommende Energieübertragungsfeld muss in seiner Länge (Anzahl der Linien) und deren Dichte (Abstand der Linien) innerhalb des Feldes aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten bzgl. des zu behandelnden Werkstoffes optimiert werden.

Abb. 12

- a) Energieübertragungsfeld
 b) Temperatur-Zeit-Verläufe (variable Abstände von der Oberfläche)



Vielfach werden auch Energieübertragungsfelder mit konstanter Energie über die gesamte Fläche zum EBH von Bauteilen genutzt. Das hat zur Folge, dass die Temperatur über die Feldlänge ansteigt. Um zu vermeiden, dass die Schmelztemperatur des Werkstoffes lokal überschritten wird (Oberflächenanschmelzungen), ist die übertragbare Energie und damit die erreichbare Umwandlungstiefe gegenüber der oberflächenisothermen Energieübertragung vergleichsweise geringer.

Die beschriebenen Energieübertragungsfelder lassen sich als Linien- oder als Punktraster programmieren.

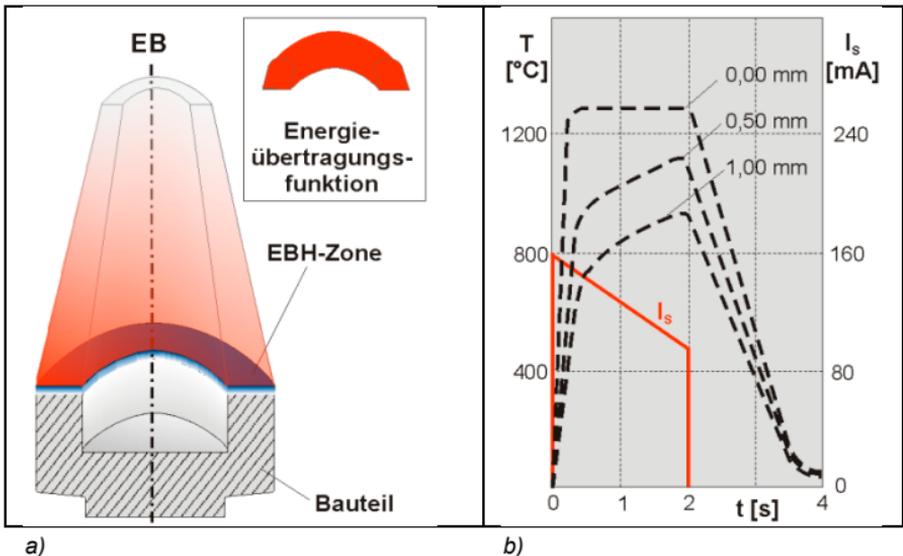
Flashtechnik

Abb. 13

Flashtechnik

- a) Flash-Ring, Bauteil
- b) Strahlstrom (I_s)- und Temperatur-Zeit-Verlauf im Bauteil für verschiedene Oberflächenabstände

Abb. 13 zeigt das Prinzip der oberflächenisothermen Energieübertragung für den Fall der Flash-Technik. Die an die Bauteilkontur zur Erzielung einer konstanten Behandlungstiefe über die Stegbreite angepasste Energieübertragungsfunktion in Form eines Rings (Abb. 13a) wird während der Einwirkungsdauer (z. B. 2 s) in seiner Intensität reduziert (z. B. Verringerung des Strahlstroms) und die Oberflächentemperatur bleibt konstant (Abb. 13b).

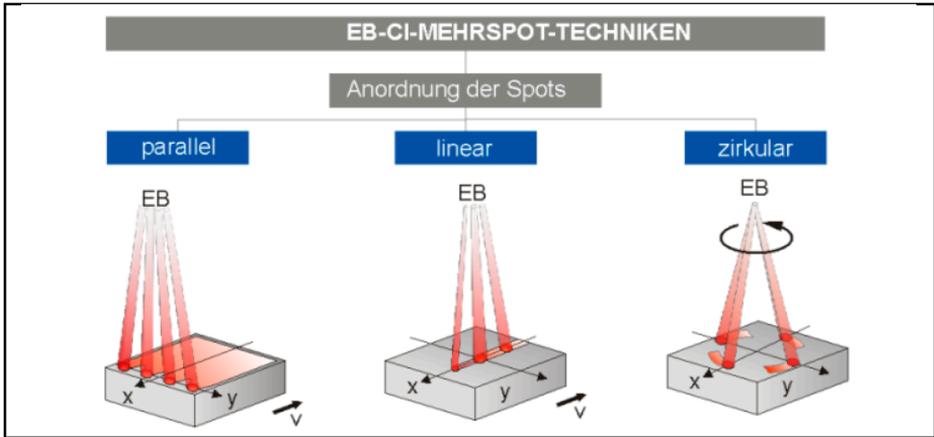


Mehrspot-Technik

Für EB-Flüssigphasenprozesse (Umschmelzen, Legieren und Dispergieren) kommen andere Energieübertragungsprinzipien in Form von Mehrspot-Techniken zur Anwendung (Abb. 14).

Abb. 14

EB-Mehrspot-
Techniken



Im Falle linearer Anordnung (Abb. 14, mittig) wird erreicht, dass durch aufeinanderfolgendes mehrfaches Aufschmelzen die Umschmelzschichten homogener und porenärmer sind.

Die zirkulare Anordnung (Abb. 14, rechts) führt zur Erhöhung der Produktivität oder bei mehrmaligem Umlauf ebenfalls zur Reduzierung des Porenanteils und zur Verbesserung der Homogenität der Umschmelzschichten, insbesondere im Zusammenhang mit Zusatzstoffen (Legieren, Dispergieren).

Die Anzahl der Spots ist innerhalb der maximalen Ablenkweiten und unter Berücksichtigung von deren Durchmesser variabel (bis zu 20 Spots auf 20 mm Bahnbreite bei der Mehrbahn-Technik).

Bei zirkularer Anordnung sind in Abhängigkeit von den Kreisdurchmessern bis zu 6 Schmelzbäder sinnvoll, wogegen sich bei linearer Anordnung nur 2...3 (4) Spots als praktikabel erwiesen haben.

Die Anordnung der Spots parallel (Abb. 14, links) hat andere Gründe. Aufgrund dessen, dass die Energieeinwirkung auf kleine Bäder beschränkt wird, kann die Oberflächenspannung und/oder Vis-

Geringe Oberflächendeformationen

kosität der Schmelze besser kontrolliert werden, was geringere Oberflächendeformationen zur Folge hat. Das gilt insbesondere für die Mehrbahn-Technik.

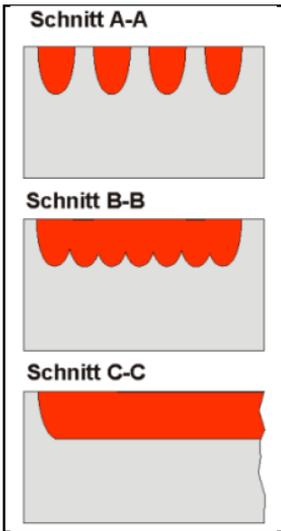
Abb. 15 zeigt zwei Schmelzfronten mit exemplarisch jeweils 4 bzw. 3 nebeneinander liegenden Schmelzbädern (Abb. 15a).

Abb. 15

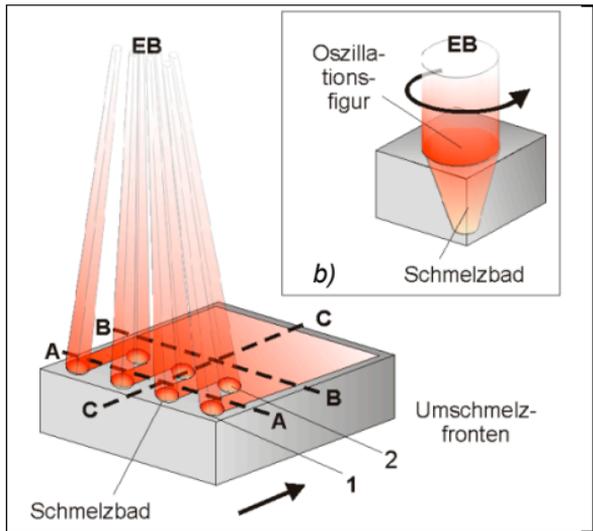
Mehrbad-EBU

- a) Gestaltung der Schmelzfronten
- b) Strahloszillation
- c) Umschmelzgeometrie

Der Badabstand und der Abstand der Schmelzfronten zueinander sind werkstoffspezifisch so eingestellt, dass nach Durchlaufen der Behandlungszone bei optimierter Vorschubgeschwindigkeit geschlossene, homogene Umschmelzschichten (Abb. 15c) mit Tiefen bis zu einigen mm und Oberflächendeformationen von „nur“ 0,1...0,3 mm erzeugt werden.



c)



a)

Mehrprozess-Technologie

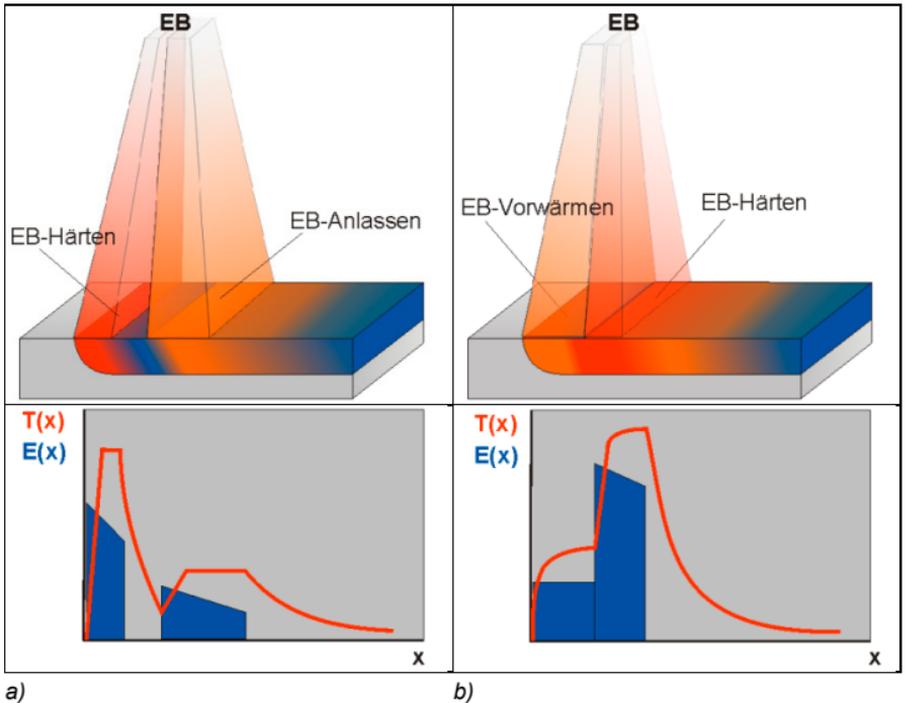
Im Gegensatz zur Mehrspot-Technik, bei der in jedem Spot der gleiche Prozess abläuft, finden bei der Mehrprozess-Technologie in jedem Strahleinwirkungsbereich unterschiedliche Prozesse statt.

Die bisher industriell genutzten Varianten beschränken sich auf Festphasenprozesse, wie:

- EB-Härten + EB-Anlassen (Abb. 16a)
- EB-Vorwärmen + EB-Härten (Abb. 16b)

Der Vorteil dieser Technologien besteht darin, dass mehrere Prozesse in einem Durchlauf realisiert werden und damit eine deutliche Erhöhung der Produktivität erreicht wird.

Das EB-Härten und EB-Anlassen kann für un- bzw. niedriglegierte Stähle bzw. Gusseisen eingesetzt werden (Abb. 16a).



Die Variante EB-Vorwärmen und EB-Härten wurde für hochlegierte Stähle entwickelt, um größere Umwandlungstiefen einzustellen (Abb. 16b). Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe muss der Energieeintrag „dosiert“ erfolgen, damit Oberflächenanschmelzungen vermieden werden.

Abb. 16

Schematische Darstellung von EB-Mehrprozessvarianten mit T-x-Verlauf und Energieprofil E(x)

- a) EB-Härten + EB-Anlassen
- b) EB-Vorwärmen und EB-Härten

**Werkstoff-
merkmale**

2.5 Werkstofftechnologie

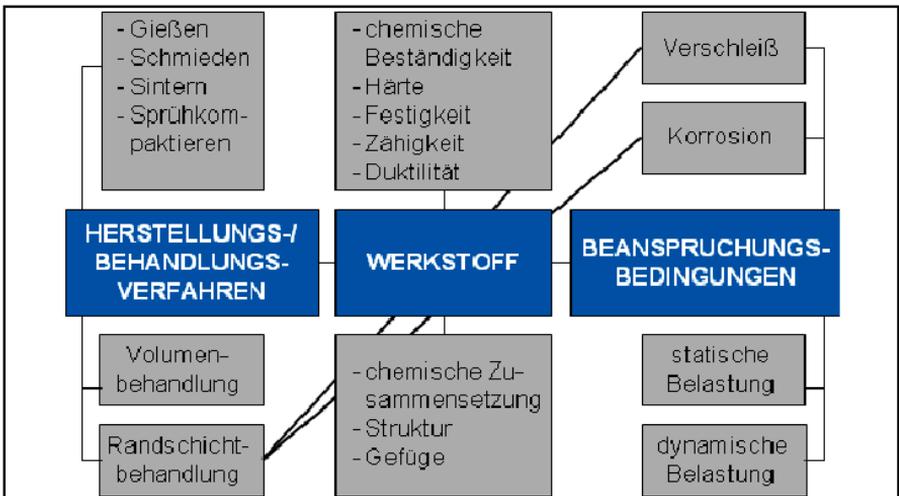
Bei der Diskussion der technologischen Aspekte (Kapitel 2.3) wurde bereits deutlich, dass alle Bemühungen um den Elektronenstrahl nicht von Erfolg gekrönt sind, wenn der Werkstoff und dessen Merkmale nicht berücksichtigt werden.

Dies ist z. B. vom EB-Schweißen hinreichend bekannt. Insbesondere bei komplexen Werkstoffen (Zusammensetzung, Behandlungszustand) bzw. bei Mischverbindungen (verschiedene Werkstoffe) müssen erhebliche Anstrengungen unternommen werden, anforderungsgerechte Schweißungen herzustellen.

Bei der EB-Randschichtbehandlung sind die Verhältnisse, bedingt durch die technologische Vielfalt in Verbindung mit den strahlungstechnischen Möglichkeiten und einer umfangreichen Palette von Werkstoffen (und Zusatzstoffen), noch umfassender und komplexer als beim Schweißen (Abb. 17).

Der Werkstoff mit seinen Merkmalen und Eigenschaften muss als Bauteil den Beanspruchungsbedingungen gerecht werden. Wenn z. B. die Hauptbeanspruchungsart Verschleiß und/oder Korrosion ist, bietet sich eine Randschichtbehandlung geradezu an.

Abb. 17
Zusammenhang
zwischen Beanspruchungsbedingungen,
Werkstoff und
Behandlungsverfahren
(stark vereinfachte
Darstellung)



Wenn es sich darüber hinaus noch um eine lokal begrenzte Beanspruchung handelt, sind Strahl-Randschichttechnologien besonders geeignet. Die Entscheidung, welche dieser Technologien (z. B. in Verbindung mit EB oder Laser) zur Anwendung kommt, hängt von zahlreichen objektiven und subjektiven Faktoren ab. Je exakter die Zusammenhänge zwischen Behandlungsparametern, Struktur/Gefüge und Eigenschaften bekannt und je genauer die Beanspruchungsverhältnisse definiert sind, desto größer ist die Chance der Auswahl der richtigen Behandlungstechnologie für den am besten geeigneten Werkstoff oder umgekehrt. Details hierzu werden im Kapitel 3 ausführlich erörtert.

2.6 Bauteilspezifik

Die EB-Randschichtbehandlung ist ein technologischer Prozess, bei dem – wie bei anderen Verfahren mehr oder weniger auch – die Merkmale des Bauteils (Größe, Volumen, Masse, Geometrie, Oberflächenkontur, Wandstärke) mit denen des Verfahrens (lokal begrenzter Einwirkungsbereich, Einstrahlbedingungen) in Einklang gebracht werden müssen (vgl. auch Kap. 2.3, Abb. 8).

Verfahrensbedingt ergeben sich hieraus gewisse Einsatzbeschränkungen. Kann der EB die zu behandelnde Fläche nicht „sehen“ und kann dieses Defizit auch nicht durch eine Bauteilkipfung oder Strahlknickung ausgeglichen werden, ist das Bauteil (oder die EB-Behandlung) ungeeignet. Innenkonturen (Bohrungen, Durchbrüche) mit einem Durchmesser/Tiefen-Verhältnis ≥ 1 lassen sich mit Schrägeinstrahlung bis 45° bei Festphasenprozessen noch gut behandeln (Abb. 18).

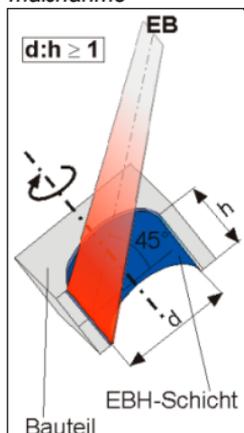
Geringe Volumina bzw. Wandstärken begrenzen die Behandelbarkeit von Bauteilen vor allem für das EBH (es gilt Wanddicke:Umwandlungstiefe $\approx 10:1$). Große Wanddickenunterschiede schränken ebenso wie scharfe Kanten, Hinterschneidungen und Bohrungen die Ausschöpfung des vollen Energieangebots ein, denn es besteht bei Festphasenprozessen

Randschichtbehandlung zum lokalen Verschleiß- und Korrosionsschutz

Bauteilmerkmale

Abb. 18

EB-Randschichtbehandlung von Bohrungen ohne Zusatzmaßnahme



die Gefahr von Anschmelzungen. Die temperaturgesteuerte Leistungsregelung (vgl. Kap. 2.7) ist ein Mittel, diesem Handicap entgegenzuwirken.

Welche Bauteilkontur für das EB-Härten wie gut geeignet ist, zeigt die Übersicht in Abb. 19.

Bauteilkonturen

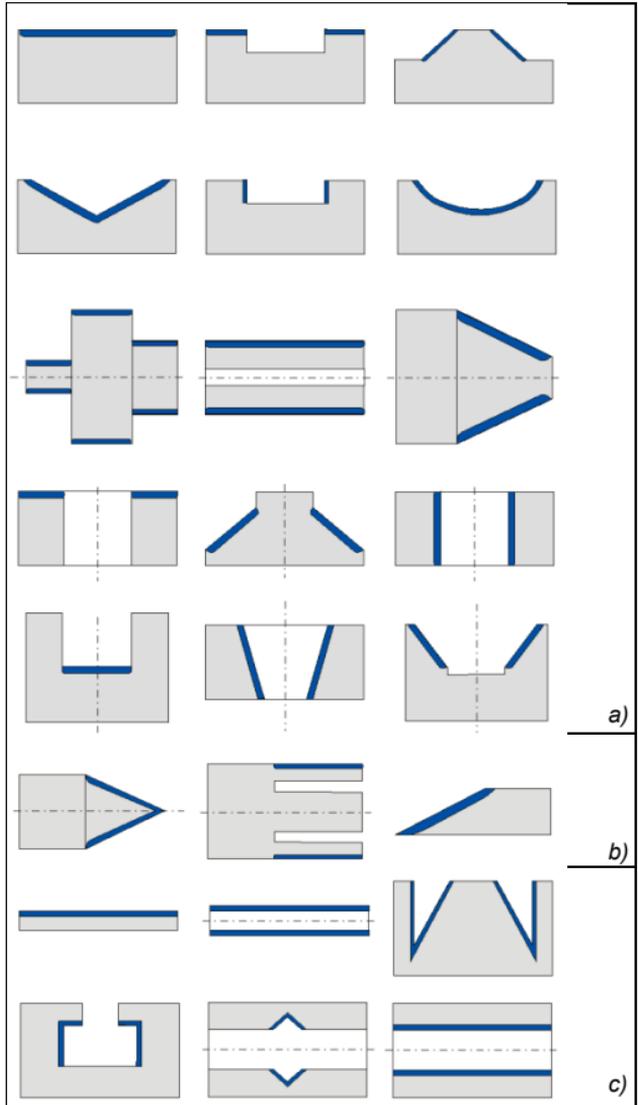


Abb. 19
Eignung von Bauteilgeometrien für das EB-Härten
a) gut geeignet
b) bedingt geeignet
c) nicht geeignet

Bei Flüssigphasenprozessen muss zusätzlich die Wirkung der Schwerkraft, d. h. der Neigungswinkel der zu behandelnden Fläche berücksichtigt werden.

Je größer das Schmelzbadvolumen ist, desto stärker wirkt dieser Effekt. Grundsätzlich gilt für Flüssigphasenprozesse, dass die Oberflächen des zu behandelnden Volumens horizontal angeordnet sein müssen und eine feste seitliche Begrenzung des Schmelzbades (analog zum Schweißen: Badsicherung) erforderlich ist, das das Abfließen der Schmelze verhindert.

Durch den energetisch und lokal exakt definierbaren Energieeintrag kann die Einwirkzone bei einer EB-Randschichtbehandlung genau auf die beanspruchten Bauteilbereiche und die beanspruchungsbedingt erforderliche Behandlungstiefe beschränkt werden. Damit reduziert sich die thermische Belastung erheblich und die Form- und Maßänderungen liegen in der Regel innerhalb der üblichen Fertigungstoleranzgrenzen.

An den Oberflächenzustand von Bauteilen werden weitaus geringere Anforderungen gestellt als z. B. bei der Laserstrahl-Randschichtbehandlung. Elektronen benötigen keine zusätzlichen Absorptionsschichten. Sie dringen selbst bei ungünstigen Einstrahlwinkeln sowohl in metallisch blankes als auch in beschichtetes Material (z. B. dünne Oxidations- oder Phosphatierschichten, thermochemische und Hartstoff-Schichten, vgl. Kap. 2.2 und 3.3) ein.

Die Rauheit ist eher unkritisch. Bei großen Rautiefen kommt es durch Abschmelzen der „Spitzen“ sogar zur Glättung. Für Teile, die nach der EB-Behandlung nicht mehr mechanisch bearbeitet werden sollen (Festphasenprozesse), bestimmt die Rauheit vor der EB-Behandlung das Endergebnis.

Beim EBH kommt es in Abhängigkeit von der Einhärtungstiefe zu Oberflächendeformationen im μm -Bereich bis max. 15 μm (Abb. 20a).

Bei Flüssigphasenprozessen lassen sich Oberflächendeformationen, die stark von den thermischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs (Viskosität u. a.) und der Behandlungstechnologie abhängig sind, nicht vermeiden (Abb. 20b), jedoch durch geeignete Strahlführungstechniken so gering wie möglich halten (vgl. Kap. 2.4, Mehrspot-Technik).

Form- und Maßabweichungen innerhalb der Fertigungstoleranzen

Oberflächenrauheit unkritisch

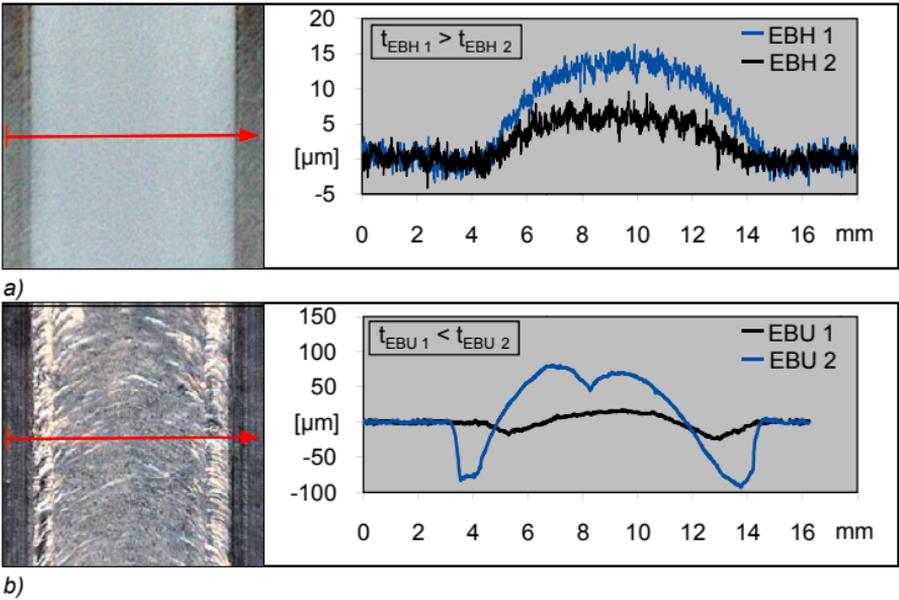


Abb. 20
Oberflächen und
Oberflächennprofile
quer über die
Schichten nach dem
a) EBH (Stahl)
b) EBU (AlSi10Mg)

Ein Fertigungsaufmaß muss bei Festphasenprozessen üblicherweise nicht vorgesehen werden. Im Falle höchster Ansprüche an die Maßtoleranzen der Bauteile wird ein Aufmaß von 0,1 mm, mit dem gleichzeitig eventuell auftretende minimale Maß- und Formabweichungen kompensiert werden, empfohlen.

Bei Flüssigphasenprozessen macht sich die Vergabe eines Fertigungsaufmaßes – von Sonderfällen abgesehen – zwingend erforderlich. Hier wird vorsorglich als Richtwert $\leq 0,3$ mm empfohlen.

Bauteile müssen frei von Schmutz, Bearbeitungsemulsionen oder Konservierungsstoffen sein. Die Entfernung derartiger Rückstände kann mit Hilfe chemischer oder mechanischer Verfahren erfolgen. Die Anforderungen sind mit denen beim EB-Schweißen vergleichbar (siehe in „Elektronenstrahlschweißen“, Verlag Moderne Industrie, Die Bibliothek der Technik Bd. 221, S. 44).

2.7 Prozesstechnik

Für die technische Umsetzung der EB-Randschichttechnologien werden höchste Anforderungen an die Hardware und Software gestellt.

Das Grundprinzip der schnellen programmierten Strahlablenkung ist im Abschnitt 2.4 erläutert. In „Elektronenstrahlschweißen“, Die Bibliothek der Technik Band 221 wird deren technische Umsetzung beschrieben.

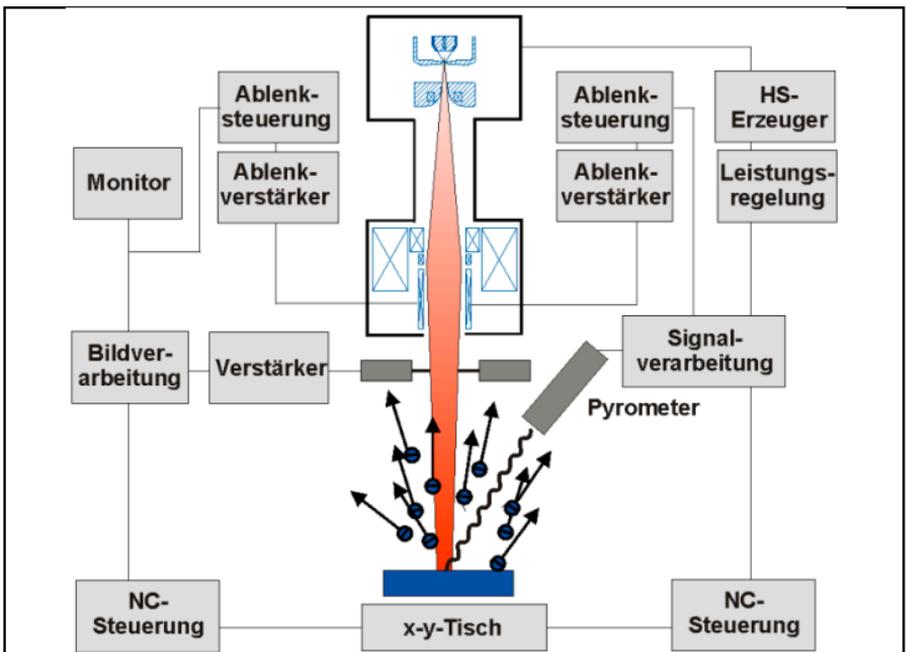
Moderne Anlagenkonzepte sorgen dafür, dass die hohe Prozessgeschwindigkeit (kurze thermische Zyklen) in der Serienfertigung produktiv durch kurze Taktzeiten umgesetzt wird.

Sind Strahlerzeugersysteme mit der entsprechenden Hardware und Software für eine schnelle Strahlablenkung ausgerüstet, können für die Randschichtbehandlung die gleichen Anlagen genutzt werden wie für das EB-Schweißen und es bestehen an die Anlagentechnik auch vergleichbare Anforderungen (vgl. „Elektronenstrahlschweißen“, Die Bibliothek der Technik, Band 221, S. 20 ff)

Kurze Taktzeiten

Abb. 21

Online-Prozesskontrolle



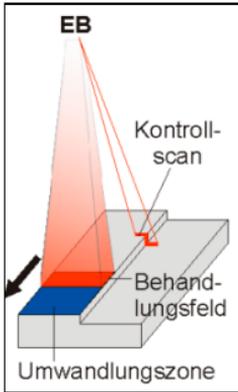


Abb. 22

Positionssteuerung



Abb. 23

Elektronenoptisches Monitoring (ELO)

Für ein anspruchsvolles Qualitätsmanagement ist eine Online-Prozesskontrolle (Abb. 21) unerlässlich. Das betrifft die Datenerfassung und Archivierung, die Prozessbeobachtung und auch die Prozesskontrolle sowie -steuerung.

Für die Positionssteuerung (Abb. 22) werden die rückgestreuten Elektronen zur Abbildung der Oberfläche genutzt. Die aufgefangenen Elektronen werden in elektrische Signale gewandelt und können entweder zu deren Abbildung (elektronenoptisches Monitoring (ELO), Abb. 23) oder zur Ansteuerung der EB-Ablenkeinheit und/oder des Werkstückbewegungssystems genutzt werden. Diese automatische Strahlpositionierung (Abb. 22) wird z. B. für lange bzw. dünnwandige Bauteile, die sich während der EB-Einwirkung durch die Wärmeentwicklung deformieren, genutzt. Die Abweichung der tatsächlichen Position von der „0-Position“ wird in situ erfasst, der Strahlablenkung und/oder der Bewegungseinheit mitgeteilt, die dann den Einwirkort entsprechend korrigiert. Dieser Prozess läuft so rasch ab, dass die EB-Einwirkung immer genau am gewünschten Ort erfolgt (vgl. Abb. 21).

Das Prinzip der temperaturkontrollierten Leistungssteuerung beruht darauf, dass mit einem Thermosensor (Pyrometer, Thermobildkamera) die Temperatur bzw. die Temperaturverteilung an der Oberfläche erfasst und das Signal für die Regelung der vom Elektronenstrahl auf das Bauteil übertragenen Energie (z. T. mit einer Variation der Vorschubgeschwindigkeit) genutzt wird.

Diese Art Prozessregelung ermöglicht es, auch Bauteile mit komplizierten Konturen bzw. Wanddickenschwankungen oder Hohlräumen dicht unter der Oberfläche (Kühlkanäle, Schmiermittelbohrungen u. a.) ohne die Gefahr von Anschmelzungen (Festphasenprozesse) oder unkontrollierte Schichtveränderungen (Flüssigphasenprozesse) zu behandeln. Der Wärmeeintrag wird durch Reduzierung der eingebrachten Energie optimiert.

3 Randschichttechnologien

3.1 Festphasenprozesse

Das Prinzip der EB-Festphasenprozesse ist in Abb. 24 schematisch dargestellt.

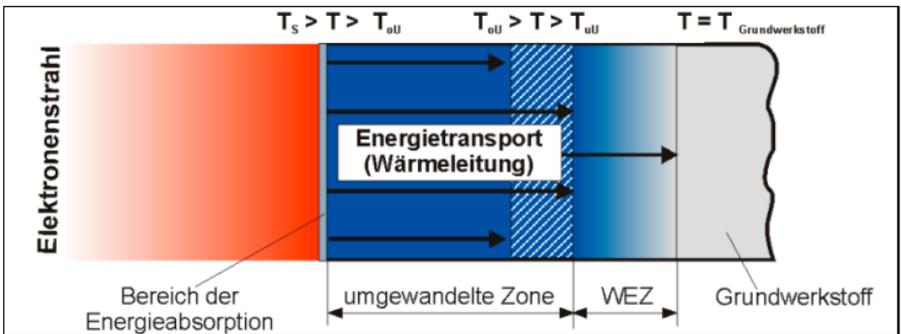
Die Menge an absorbierter Elektronenenergie ist gerade so groß, dass die Schmelztemperatur nicht überschritten aber das Material bis in eine geeignete Tiefe auf Temperaturen oberhalb der oberen Umwandlungstemperatur (T_{ou}) erwärmt und vollständig umgewandelt wird.

In einem bestimmten Abstand von der Oberfläche wird nur noch die untere Umwandlungstemperatur (T_{uU}) erreicht. In dieser Zone erfolgt eine unvollständige Umwandlung.

Die Wärmeleitung bewirkt eine thermische Beeinflussung des Materials bis zum Ende der Wärmeinflusszone.

Abb. 24

Prinzip der EB-Festphasenprozesse (schematisch)



3.1.1 EB-Härten

Das EBH ist an Stähle und Gusseisen mit Kohlenstoffgehalten $\geq 0,25\%$ gebunden. Diese Anforderung entspricht der für das konventionelle Härten.

In Tab. 3 ist eine Auswahl von Eisenwerkstoffen angegeben, für die gesicherte industrielle Erfahrungen für das EBH vorliegen.

Beim Volumen Härten bzw. anderen thermischen Randschichthärteverfahren (Flammen-, Induktionshärten) ist die Wahl des Abschreckmediums von

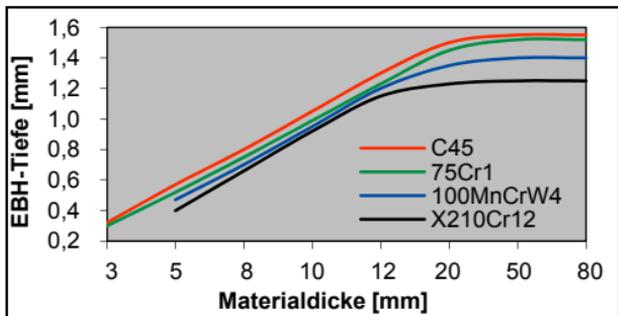
Werkstoffgruppe	Werkstoffauswahl
Vergütungsstähle	C30, C35, C45, C60, 30CrMoV9, 36CrNiMo4, 37MnSi5, 38MnSi4, 40Mn4, 41Cr4, 42CrMo4, 50CrV4
unlegierte Werkzeugstähle	C70W1, C80W2, C125W
Kaltarbeitsstähle	40CrMnMo7, 50NiCr13, 51CrV4, 62SiMnCr4, 75Cr1, 80CrV2, 90MnCrV8, 100MnCrW4, X50CrMoW9-1-1, X155CrVMo12-1, X165CrMoV12, X210Cr12, X210CrW12, X220CrVMo12-2
Warmarbeitsstähle	55NiCrMoV6, 59CrV4, 65MnCrMo4, X38CrMoV5-1, X40CrMoV5-1, X42Cr13
Wälzlagerstähle	100Cr6, 100CrMn6
Federstähle	Ck67, 55Si7, 58CrV4, 67SiCr5
rost- und säurebest. Stähle	X35CrMo17; X39Cr13, X46Cr13, X90CrMoV18
thermochemisch „behandelte“ Stähle	14NiCr18 aufgekühlt, 16MnCr5 aufgekühlt, C15 aufgekühlt, 31CrMoV9 nitriert, 34CrAl6 nitriert,
Gusseisen (perlitisch)	EN-GJL-250, EN-GJL-300, EN-GJS-500, EN-GJS-600, EN-GJS-700,

Tab. 3
Werkstoffauswahl für
das EB-Härten

**Eigenabkühlung;
Abschreck-
geschwindigkeit
bis zu 10^4 K/s**

ausschlaggebender Bedeutung für das Härteergebnis. Bei zu langsamer Abkühlung werden die geforderten Härtewerte nicht erreicht. Die beim EBH üblichen Abschreckgeschwindigkeiten durch Eigenabkühlung liegen mit $10^3 \dots 10^4$ K/s deutlich über den selbst bei einer Wasserabschreckung erreichbaren Werten. Die Eigenabkühlung wird jedoch durch das Bauteilvolumen bzw. die Materialdicke begrenzt. Kann die eingebrachte Energie nicht hinreichend gut abgeführt werden, heizt sich das Bauteil auf, d. h. der Temperaturgradient Rand-Kern wird flacher und die kritische Abkühlgeschwindigkeit für die Martensitbildung wird nicht mehr erreicht (Abb. 25).

Abb. 25
Maximal erreichbare
EBH-Tiefe in
Abhängigkeit von der
Materialdicke



Auch der EB-Einstrahlwinkel beeinflusst die EBH-Tiefe (Abb. 26). Die Verluste an Umwandlungstiefe bei einem Einstrahlwinkel von $\approx 60^\circ$ betragen ohne Zusatzaßnahmen ca. 50 %.

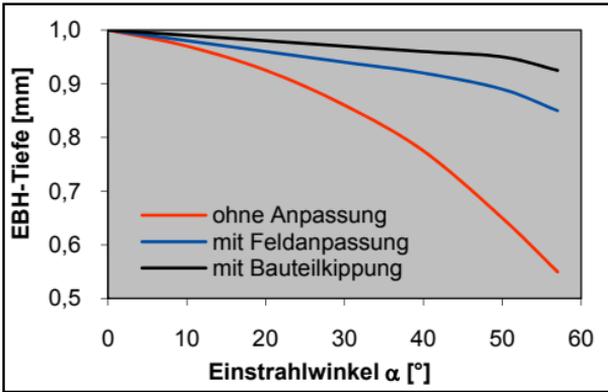
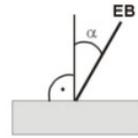


Abb. 26

Maximal erreichbare EBH-Tiefe in Abhängigkeit vom EB-Einstrahlwinkel



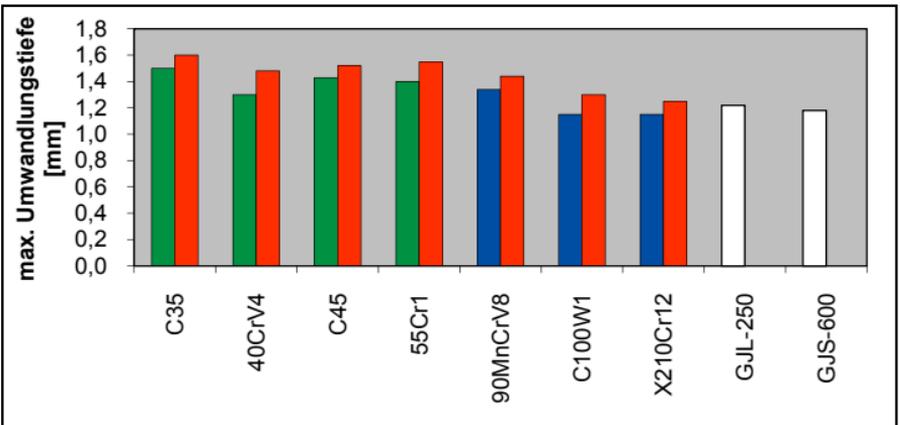
Durch eine Bauteilkipfung oder eine Energiefeldanpassung (Veränderung der Energieverteilungsfunktion) kann diesem Effekt wirkungsvoll entgegen gewirkt werden (Abb. 26).

Bei optimalen Einstrahlbedingungen und hinreichend großen Bauteilvolumina ist die EBH-Tiefe abhängig von der chemischen Zusammensetzung und dem Vorbehandlungszustand des Werkstoffs. Eine aufgrund hoher Anteile an Kohlenstoff und Legierungselementen geringe Wärmeleitfähigkeit bewirkt prinzipiell geringere EBH-Tiefen.

Ein normalisierter (N) oder weichgeglühter (W) Zustand zeigt nach dem EBH vor allem wegen der inhomogeneren Verteilung des Kohlenstoffs im Vergleich zum vergüteten (V) oder gehärtet und angelassenen (H+A) Zustand eine ca. 5...15 % geringere EBH-Tiefe (Abb. 27).

Abb. 27

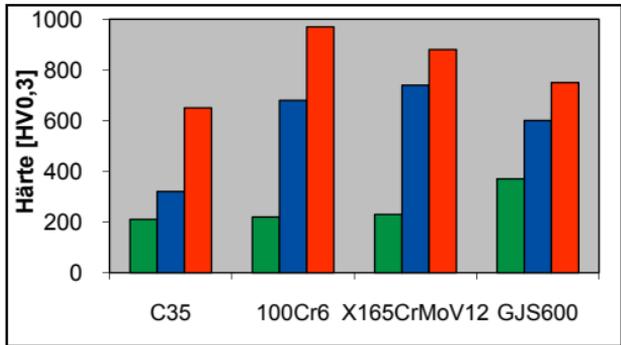
Maximale EBH-Tiefen in Abhängigkeit vom Werkstoff und dessen Vorbehandlungszustand



Die am häufigsten für ein erfolgreiches EBH herangezogene Kenngröße ist die Oberflächenhärte (Abb. 28). Üblicherweise liegt diese wegen der feineren Gefügeausbildung stets etwas höher als nach dem konventionellen Härten. Die Härteunterschiede im Vergleich zum vergüteten bzw. gehärteten und angelassenem Zustand in Abb. 28 sind darauf zurückzuführen, dass nach dem EBH in der überwiegenden Zahl der Anwendungsfälle nicht angelassen werden muss. Ausnahme bilden besonders rissgefährdete Werkstoffe, z. B. 90MnCrV8.

Abb. 28

Oberflächenhärte nach dem EBH im Vergleich zur konventionellen Wärmebehandlung

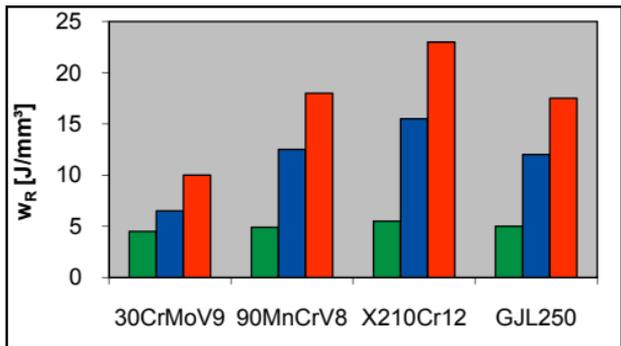


Die Härte ist bezogen auf die Einsatzbedingungen in vielen Fällen nicht aussagefähig. Um das Behandlungsergebnis besser beschreiben zu können, werden Verschleißtests herangezogen, die in vielfältiger Form an unterschiedliche tribologische Systeme angenäherte Resultate liefern.

Die Messung des Abrasionsverschleißwiderstandes (Ritzenergiedichte) ist eine recht praktikable Methode zur Schichtcharakterisierung (Abb. 29).

Abb. 29

Ritzenergiedichte (w_R) nach dem EBH im Vergleich zur konventionellen Wärmebehandlung

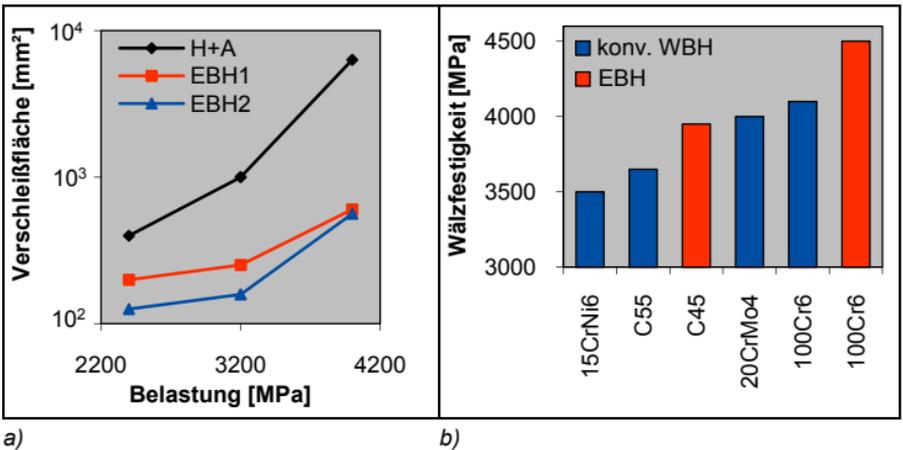


Hinsichtlich der Wirkung des EBH zeichnen sich ähnliche Tendenzen wie bei den Oberflächenhärtemessungen ab. Andere Verschleißmechanismen werden durch die Kontaktermüdung (Abb. 30a) bzw. die Wälzfestigkeit (Abb. 30b) charakterisiert. In beiden Fällen bewegt sich auf einem Verschleißkörper ein metallischer Gegenkörper (Rollen, Hartmetallscheibe), d. h. es werden die Verhältnisse in Lagern simuliert. Wie Abb. 30 zeigt, lassen sich beide Kenngrößen durch ein EBH gegenüber konventionellen Behandlungen deutlich verbessern.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich ausschließlich auf die „Oberflächeneigenschaften“, die allerdings im Allgemeinen keine Rückschlüsse auf die Merkmale der gesamten EBH-Schicht und schon gar nicht den Schicht-Matrix-Verbund zulassen.

Abb. 30

Vergleichende Verschleißtests an EB- und konventionell gehärteten Werkstoffen
 a) Kontaktermüdungsverleiß (100Cr6)
 b) Wälzfestigkeit



Aufgrund des Temperaturgradienten vom Rand zum Kern laufen unterschiedliche Umwandlungsvorgänge ab, die verschiedene Gefügeausbildungen zur Folge haben. Diese Vorgänge variieren von Werkstoff zu Werkstoff. Unterschiedliche Eigenschaften bzw. Eigenschaftsgradienten sind die Folge. Dabei ist natürlich die Wahl der EB-Parameter (zeitlich-örtlicher Energieeintrag) von erheblicher Bedeutung.

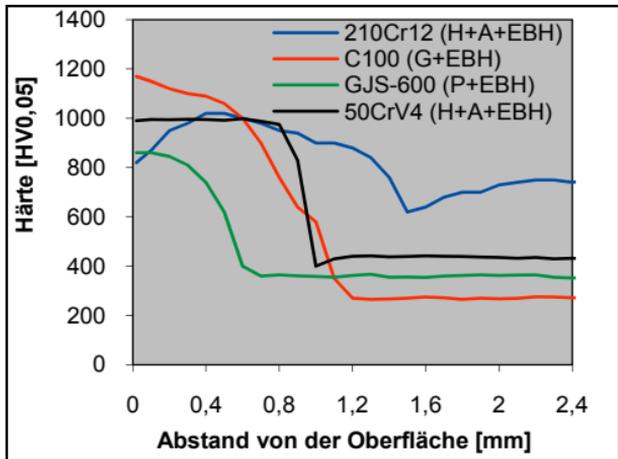
Eigenschaftsgradienten

Abb. 31 zeigt am Beispiel ausgewählter Härte-Tiefen-Verläufe die große Vielfalt möglicher Eigen-

schaftsgradienten, die jeweils auf die Art, Menge, Morphologie und Verteilung der Umwandlungsprodukte zurückzuführen ist.

Abb. 31

Härte-Tiefen-Verläufe
verschiedener Eisen-
werkstoffe nach dem
EBH



Aus metallographischen Übersichtsaufnahmen der EBH-Schichten wird der unterschiedliche EBH-Schichtaufbau deutlich (Abb. 32).

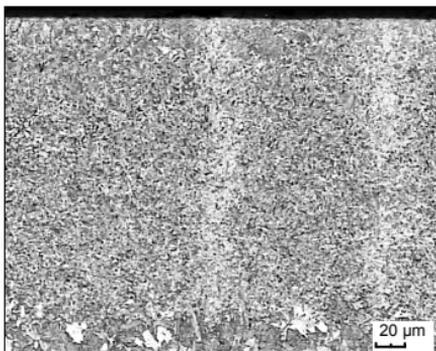
Abb. 32

EBH-Schichten

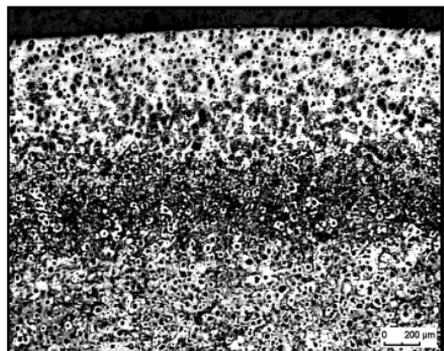
a) Vergütungsstahl
42CrMoV4

b) Gusseisen
EN-GJS-600

In jedem Fall bildet sich eine sehr feine martensitische Schichtmatrix (Abb. 32a, b), die im speziellen Fall der Gusseisenwerkstoffe zusätzlich Graphit in seiner ursprünglichen Form (hier Kugelgraphit) enthält (Abb. 32b).



a)



b)

3.1.2 EB-Glühen

Das EB-Glühen (EBG) ist ein Verfahren, das als Rekristallisationsglühen für ganz spezielle Anwendungsfälle genutzt wird, wie z. B. für die Erzeugung von sehr feinkörnigen Randschichtbereichen bei Al- und Mg-Werkstoffen zum lokalen Schutz gegen Korrosion (und Verschleiß).

Eine in größerem Umfang angewandte Glhetechnologie dient der lokalen Verbesserung des Umformverhaltens. Dazu wird das Material (austenitischer Stahl) kurzzeitig auf Temperaturen oberhalb $0,4 \cdot T_s$ erwärmt und durch nachfolgendes rasches Abkühlen ein feines, duktiles Rekristallisationsgefge erzeugt (Abb. 33a). Der exakt definierte Energieeintrag ist zwingend notwendig, da sonst sehr rasch auch Kornvergrberung einsetzt.

Durch das EBG wird die Härte auf $\approx 60\%$ der Ausgangshärte (AZ) verringert (Abb. 33b).

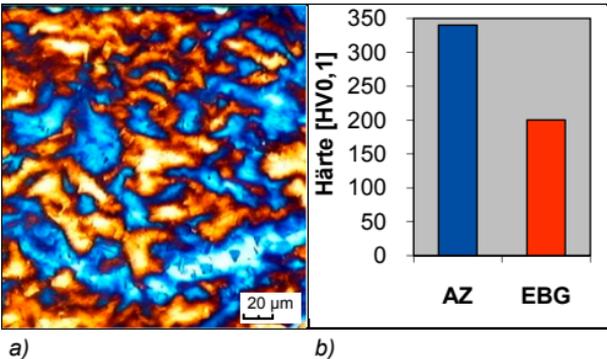


Abb. 33

- a) Rekristallisationsgefge
 b) Härte vor (AZ) und nach dem EB-Glühen (EBG)

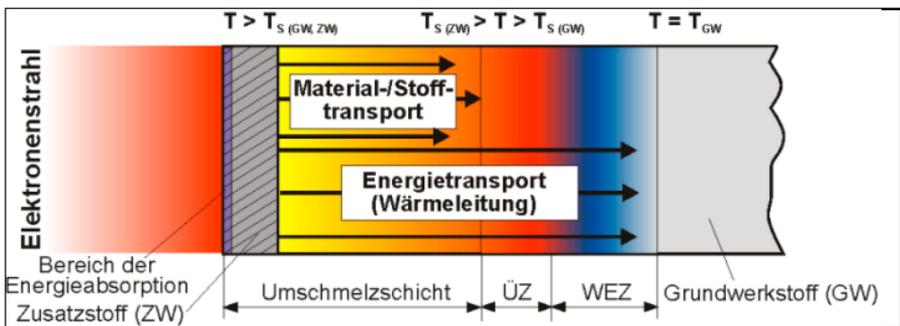
Es ist auch bekannt, dass das lokale Biegeverhalten von dünnwandigen Blechen durch ein EB-Glühen verbessert bzw. während der EB-Einwirkung ein definierter Biegewinkel eingestellt werden kann. Die Grundlage für diese Technologie ist ebenfalls das Rekristallisationsglühen. Allerdings muss für den zuletzt genannten Fall ein exakt definierter Umformzustand vorliegen und der Wärmeeintrag hinsichtlich Position des Energieübertragungsfeldes, der Intensität sowie der Energieverteilungsfunktion genau dosiert sein.

3.2 Flüssigphasenprozesse

Bei Flüssigphasenprozessen kommt es nach Absorption der kinetischen Energie der Elektronen im oberflächennahen Bereich des Grundwerkstoffs (einige μm) (EBU) bzw. des Zusatzstoffs (EBUL, EBUDL) und anschließendem Energietransport durch Wärmeleitung zum Aufschmelzen der Grundwerkstoffrandschicht (0,05... > 8 mm) sowie der deponierten Zusatzstoffe (vollständig oder teilweise). Gleichzeitig findet neben dem Wärme- auch ein Stofftransport (Badbewegung) bis in eine Tiefe, in der $T_{S(\text{GW})}$ überschritten wird, statt (Abb. 34). Da vor allem bei NE-Werkstoffen meist gilt $T_{S(\text{ZW})} > T_{S(\text{GW})}$, bildet sich zusätzlich eine schmale Übergangszone (ÜZ) aus, die nur aus umgeschmolzenem Grundwerkstoff besteht. Daran schließt sich die Wärmeinflusszone (WEZ) an, in der das Material im festen Zustand verbleibt. Bei Werkstoffen, die einen Phasenübergang aufweisen, kommt es hier zu Nichtgleichgewichtsumwandlungen (z. B. bei Fe-Legierungen zur Martensitbildung).

Abb. 34

Prinzip der EB-Flüssigphasenprozesse (schematisch)



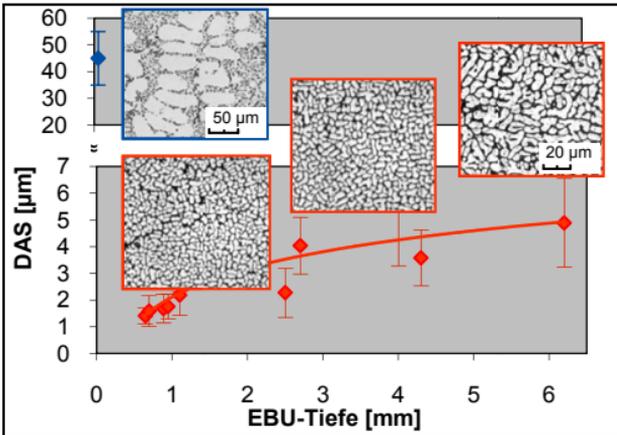
3.2.1 EB-Umschmelzen

Die wesentlichste Auswirkung des EB-Umschmelzens (EBU) ist die wegen der hohen Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeiten bei gleichzeitig extrem kurzen Haltedauern (max. einige Sekunden) eintretende Kornfeinung. Zusätzlich zur Kornfeinung wirken sich Umwandlungsvorgänge beim schnellen Abkühlen auf das EBU-Ergebnis aus, wie z. B. Ledeburitbildung bei Gusseisenwerkstoffen.

Kornfeinung

NE-Werkstoffe

Messgröße für die Bewertung der erreichten Kornfeinheit ist z. B. bei Al-Werkstoffen der Dendritenarmabstand (DAS). Im Vergleich zu konventionell erzeugten Al-Gusslegierungen wird der DAS von 40...60 μm (Sandguss) bzw. > 25...35 μm (Kokillenguss) durch das EBU in der Randschicht auf > 1...10 μm für EBU-Tiefen zwischen 1...8 mm reduziert (Abb. 35).

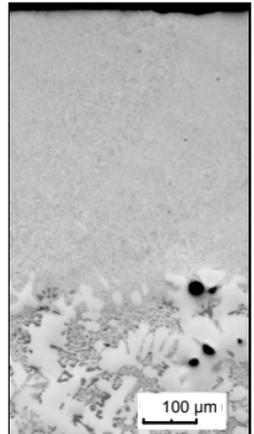


a)

Abb. 35

Einfluss des EBU auf Al-Gussgefüge (Sandguss)

a) DAS in Abhängigkeit von der EBU-Tiefe
b) EBU-Schicht



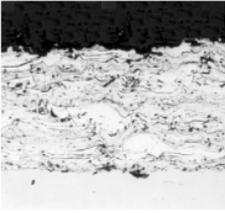
b)

Der DAS ist abhängig von den EB-Parametern und der verwendeten Strahlführungstechnik. Je mehr Energie lokal in den Werkstoff eingetragen wurde, d. h. je größer das EBU-Volumen bzw. die Umwandlungstiefe ist, desto größer wird der DAS, bleibt aber stets um einen Faktor 5...10 niedriger als im konventionellen Gusszustand (Abb. 35a). Das führt zu einer Verbesserung des Widerstands gegen bestimmte Arten von Korrosion (z. B. bei Mg-Werkstoffen), aber auch zu einer Härtesteigerung. Mehr als eine Verdopplung der Härte wurde jedoch nicht erreicht. In einigen Fällen (z. B. ausgehärtete Al-Legierungen) führt das EBU zum Härteverlust.

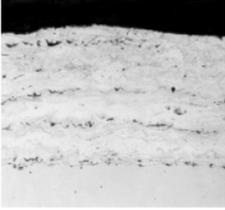
Das EB-Umschmelzverdichten hat für mehr oder weniger poröse Werkstoffe (z. B. Al-Guss- oder Sinterwerkstoffe) bzw. Schichten (z. B. thermische Spritzschichten) Bedeutung erlangt.

Durch den kurzen thermischen Zyklus Erwärmen-

Verringerung des Dendritenarmabstandes



a)



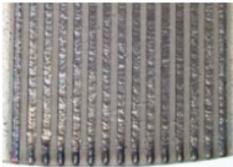
b)

Abb. 36

EB-Umschmelz-
verdichten

a) Spritzschicht (La-
gerbronze auf Stahl)

b) EBU-Schicht



a)



b)

Abb. 37

Oberfläche nach dem
EBU (EN-GJL-250)

a) laterale Zeilen

b) geschlossene
Schicht

(Halten)-Abkühlen (wenige Sekunden) wandelt ein porenbehaftetes Gussgefüge in sehr feinkörniges (Abb. 35b), (nahezu) porenfreies Umschmelzgefüge um. Das wird durch die intensive Schmelzbadbewegung in der Umgebung der Dampfkapillare und das Vakuum als Prozessatmosphäre bewirkt. So behandelte Werkstoffe sind durch eine meist etwas höhere Oberflächenhärte, verbessertes Korrosionsverhalten, vor allem aber durch eine erhöhte Temperaturwechselbeständigkeit charakterisiert.

Beim EB-Umschmelzverdichten von thermischen Spritzschichten (Abb. 36a) kommt es durch die oben beschriebenen Vorgänge einerseits zu einer Reduzierung des Porenanteils sowie zur (teilweisen) Beseitigung von Oxiden und andererseits zu einer besseren schmelzmetallurgischen Anbindung der Schicht an den Grundwerkstoff (Abb. 36b).

Fe-Werkstoffe

Gusseisen wird als Schalenhartguss für besonders stark verschleißbeanspruchte Bauteile hergestellt. Die mechanische Bearbeitung dieses Materials gestaltet sich aber wegen der harten z. T. weit in das Innere reichenden ledeburitischen Zone als äußerst schwierig („Hart-Weich-Bearbeitung“). Des Weiteren ist die Herstellung kompliziert geformter Bauteile mit erheblichem Aufwand (gekühlte Kokillen) verbunden bzw. gar nicht möglich.

Alternativ dazu kann ein EB-Randschichtumschmelzen der hochbeanspruchten Bereiche nach dem Zerspanen von konventionell vergossenem Material (GJS, GJL, GJV u. a.) durchgeführt werden und erspart so die aufwändige „Hartbearbeitung“. Dabei können sowohl laterale „Zeilenprofile“ (Abb. 37a) als auch geschlossene Schichten (Abb. 37b) u. a. unter Nutzung der hochproduktiven EB-Mehrbahntechnik erzeugt werden. Bedingt durch die hohe Erstarrungsgeschwindigkeit wandelt die Randschicht nach dem metastabilen Fe-C-Zustandsdiagramm um und es bildet sich harter ledeburitischer Zementit, der eine hohe Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit hat.

Entscheidend für den Erfolg dieser Technologie ist, inwieweit es gelingt, die nachfolgende Festphasenumwandlung der Matrix in Martensit zu vermeiden. Dadurch wird verhindert, dass es zur Überlagerung der hohen Umwandlungsspannungen mit den Abkühlspannungen infolge Volumenreduzierung kommt, wodurch eine nahezu zwangsläufige Rissbildung verhindert wird.

Dem wirkt als günstigste Lösung ein Vorwärmen auf Temperaturen zwischen 380 °C und 450 °C (werkstoffabhängig) entgegen. Wegen des flacheren Temperaturgradienten bildet sich in den interdendritischen Bereichen relativ weicher, sehr feinkörniger Perlit. Die Härte sinkt zwar ab (Abb. 38), die Verschleißigenschaften werden aber wegen des feinen widerstandsfähigen dendritischen Ledeburits kaum beeinträchtigt.

Das EB-Umschmelzhärten kann sowohl für perlitische als auch für ferritische Gusseisensorten angewendet werden.

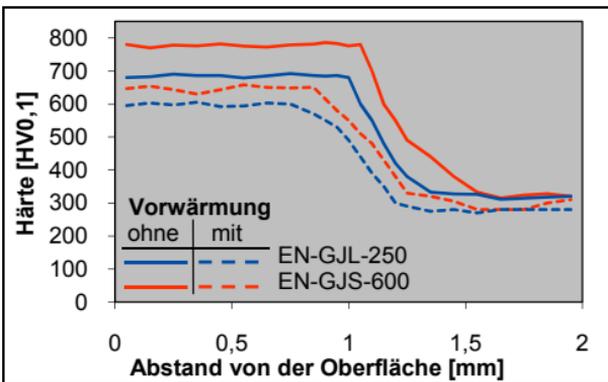
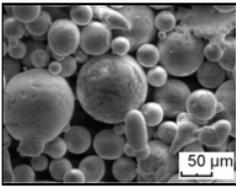


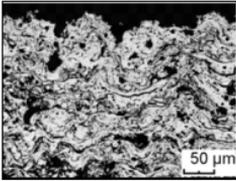
Abb. 38

Härte-Tiefen-Verläufe nach dem EBU verschiedener Gusseisensorten ohne und mit Vorwärmung

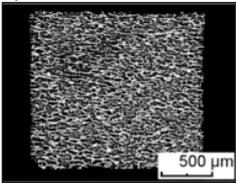
Für Stähle liegen ebenfalls Erkenntnisse zum EB-Randschichtumschmelzen vor. Die Entwicklungsziele sind hierbei einerseits auf die Erzeugung nanokristalliner Strukturen und andererseits auf die Beseitigung von Verunreinigungen (nichtmetallische und oxidische Einschlüsse), die sich negativ auf das tribologische Verhalten auswirken, fokussiert.



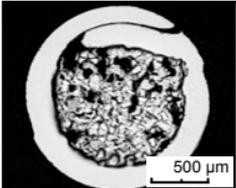
a)



b)



c)



d)

Abb. 39

Deponierverfahren für
Zusatzstoffe

- a) Paste
- b) Spritzschicht
- c) Sintereinlage
- d) Fülldraht

3.2.2 EB-Umschmelzlegieren/-dispergieren

EB-Umschmelzlegieren (EBUL) und -Dispergieren (EBUD) sind durch die Beteiligung von Zusatzstoffen am Randschichtumschmelzprozess gekennzeichnet (vgl. Kap. 2.2). Im Zusammenhang mit dem EB-Dispergieren werden als Zusatzstoffe neben den unlöslichen Hartstoffpartikeln, wie z. B. WC, VC, CrB, AlN, TiC, Cr₃C₂, Al₂O₃ u. a. meist auch lösliche Komponenten (Tab. 4) zugegeben, woraus eine kombinierte Technologie, das EB-Umschmelzdispersionslegieren (EBUDL) resultiert. Insbesondere bei relativ weichen Grundwerkstoffen werden durch das zusätzliche Legieren die z. T. äußerst harten Partikel bei Beanspruchung nicht zu stark in die Schichtmatrix eingedrückt.

Diese Verfahrensgruppen bieten wegen ihrer großen Variationsbreite bzgl. der Deponierverfahren (Abb. 39) und Zusatzstoffe sowohl für NE-Basiswerkstoffe (Hauptentwicklungsrichtung) als auch für ausgewählte Fe-Werkstoffe hervorragende Potenziale zur Verbesserung der Randschichteigenschaften.

Die Auswahl der Zusatzstoffe erfolgt ausgehend von einer umfassenden Beanspruchungsanalyse (Reibung, Verschleiß, Korrosion, statische und dynamische Belastung, thermische Stabilität u. a.) in erster Linie nach dem geforderten Eigenschaftsprofil. Für eine erfolgreiche Umsetzung spielen allerdings auch weitere Aspekte bzgl. der Grundwerkstoff-Zusatzstoff-Kombination, wie die thermophysikalischen Eigenschaften (Wärmeleitung, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Viskosität u. a.), die schmelzmetallurgische Kompatibilität, d. h. Möglichkeit der Phasenbildung, Schmelzpunktunterschiede u. a. eine wichtige Rolle.

Die Zusatzstoffe können in Form von reinen Elementen sowie metallischen und nichtmetallischen Verbindungen bzw. deren Mischung zugegeben werden. Eine Auswahl ist in Tab. 4 angegeben.

Zusatzstoff		Grundwerkstoff-Basis			
Basis	Zusätze	Fe-	Al-	Mg-	Ti-
Al-	Mo				x
	Ti			x	
	Si		x	x	
	Zr			x	
Ni-	Cr-B-Si, Cr-Al	x			
	Al		x		
	Cr, Cr-Fe	x	x		
Fe-	Al, Al-Cr		x		
	Cr-C-V-W, +B	x			
Cu-	Ni, Ni-Cr		x		x
Co-	Cr-Fe-Ni-Mo, +W		x		
Mo-					x
Ti-	Al		x	x	

Tab. 4

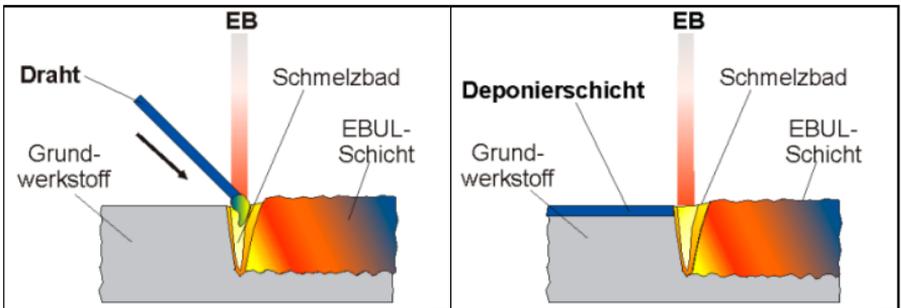
Auswahl an Zusatzstoffen für das EBUL unterschiedlicher Basiswerkstoffe

Die Zusatzstoffe werden entweder ein- oder zweistufig auf dem Grundwerkstoff deponiert (Abb. 40).

Die einstufige Zusatzstoffdeponierung (Abb. 40a) wird vor allem dann gewählt, wenn schmale Verschleiß- oder Korrosionsschutzzonen gefordert sind und/oder lokal relativ große Mengen an Zusatzstoff einlegiert werden sollen, wie z. B. beim EB-Auftragen oder EB-Dispergieren (Kap. 2.2 und 2.3).

Abb. 40

Deponierung von Zusatzstoffen für das EBUL, EBD, EBA
 a) einstufig
 b) zweistufig



a)

b)

Beim zweistufigen Deponierprozess (Abb. 40b) wird der Zusatzstoff in einem ersten Verfahrensschritt aufgebracht (Siebdruck, thermische Spritzschicht, Aufsintern u. a.) und dann gemeinsam mit dem Grundwerkstoff bis in die gewünschte Tiefe umgeschmolzen. Diese Technologie wird vorteilhaft dann eingesetzt, wenn größere Flächen behandelt werden sollen, entsprechende Drähte nicht herstellbar sind oder die Zugänglichkeit der Bauteilkontur für die Drahtzuführung nicht gewährleistet ist.

**Zusammenhang
EB-Parameter -
Grundwerkstoff -
Zusatzstoff**

Die EB-Parameter (Energieübertragungsfunktion, Flächenenergie usw.), die Strahlführungstechnik (Cl-, Flash-Technik) und der Prozessablauf (Anzahl, Reihenfolge der Behandlungsschritte, Vor- und/oder Nachbehandlung, Prozessgeschwindigkeit) müssen für eine erfolgreiche technologische Umsetzung optimal auf Basis- und Zusatzmaterial abgestimmt sein. Die Schichteigenschaften, insbesondere die Härte und der Verschleißwiderstand werden durch die Art, Menge, Größe, Verteilung, Morphologie und die chemische Zusammensetzung der entstehenden Phasen und Gefügebestandteile bestimmt.

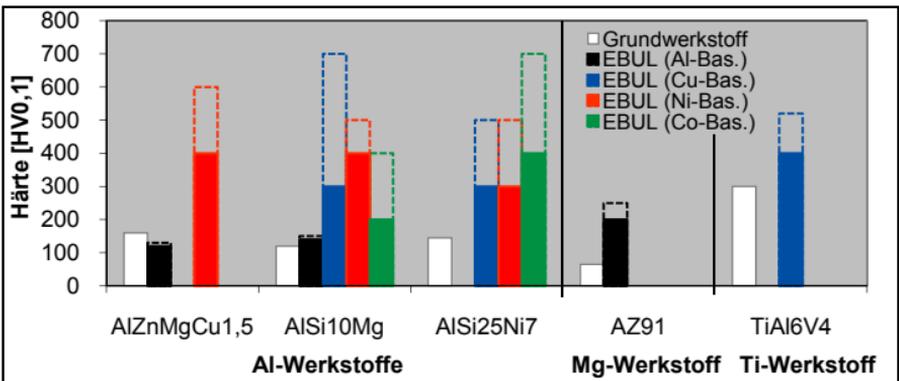
NE-Werkstoffe

Der Einsatz von NE-Werkstoffen wird dem ständig steigenden Bedarf an Leichtbaukonzepten gerecht. Im Bereich lokal hochbeanspruchter Bauteilbereiche, wie z. B. Motorkomponenten sind, meist zusätzliche Maßnahmen für den Verschleiß- und/oder Korrosionsschutz erforderlich. Weil die meisten NE-Werkstoffe im Gegensatz zu Fe-Werkstoffen im festen Zustand keine oder keine relevanten Umwandlungsintervalle aufweisen, sind für NE-Werkstoffe lediglich Flüssigphasen-Technologien, insbesondere mit Zusatzstoff wirksam nutzbar.

Abb. 41

Erreichbare Härte-
werte nach dem EBUL
von Nichteisenwerk-
stoffen

Abb. 41 zeigt für ausgewählte Leichtbaumaterialien und verschiedene Zusatzstoffe die erreichbaren Schichthärtewerte, wobei die angegebenen Bereiche für das Kriterium rissfreie Schichten gelten.



Die Umschmelztiefe, die im Wesentlichen durch den Energieeintrag definiert ist, bestimmt den Auflegierungsgrad (Anteil an Zusatzstoff in der EBUL-Schicht). Abb. 42 zeigt am Bsp. einer EBUL-Behandlung einer Al-Legierung mit Ni-Basis-Zusatzstoff, dass mit zunehmendem Strahlstrom (= Energieeintrag) der Anteil an Al-Matrix (Grundwerkstoff) in der EBUL-Schicht steigt, während der Anteil intermetallischer Phasen sinkt. Dadurch nimmt die Härte bei konstanter Menge an deponiertem Zusatzstoff mit zunehmender EBUL-Tiefe ab.

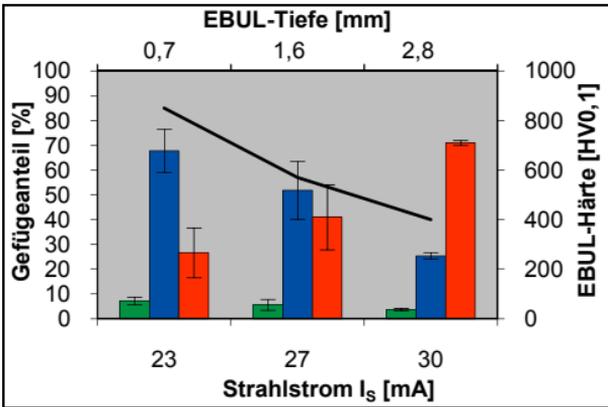
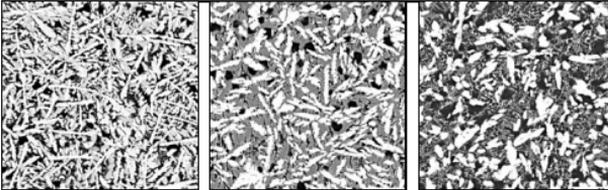


Abb. 42

Einfluss des Energieeintrages (I_s) auf Gefüge und Eigenschaften der EBUL-Schicht auf einer Al-Legierung mit Ni-Bas.-Zusatzstoff

- Primäre Si-Ausscheidungen
- Intermetallische Phasen (Ni-Bas.)
- Matrix (Al-Bas.)
- Härte



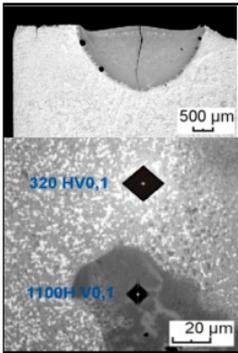
a) 23 mA

b) 27 mA

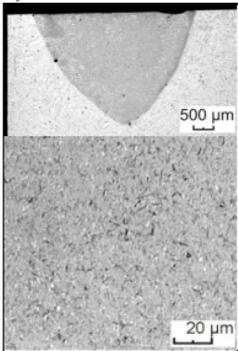
c) 30 mA

Die größten Härtesteigerungen, z. T. auf das 6- bis 12-fache, sind technisch nicht nutzbar, weil die Schichten rissbehaftet sind, zahlreiche Poren enthalten und/oder sehr inhomogen legiert sind (z. B. unaufgelöste Zusatzstoffanteile (Abb. 43a).

Aus diesem Grund muss entweder die Menge an deponiertem Zusatzstoff verringert oder die EBUL-Schichtdicke erhöht werden. Im Ergebnis entstehen bzgl. Verteilung der Härte und Gefügebestandteile homogene, fehlerfreie Schichten (Abb. 43b).



a)



b)

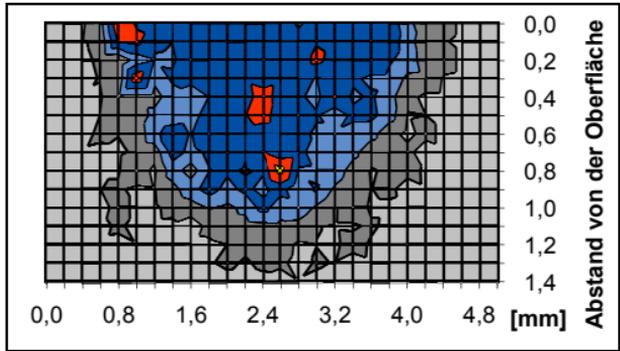
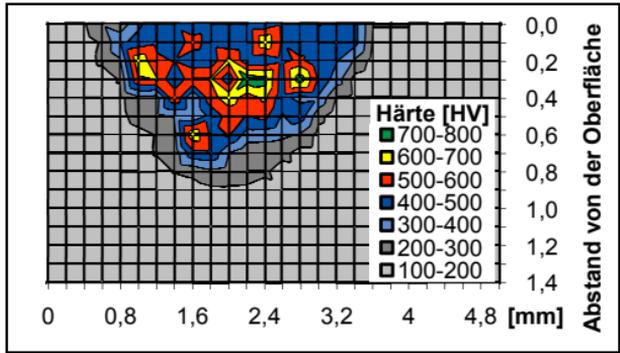


Abb. 43

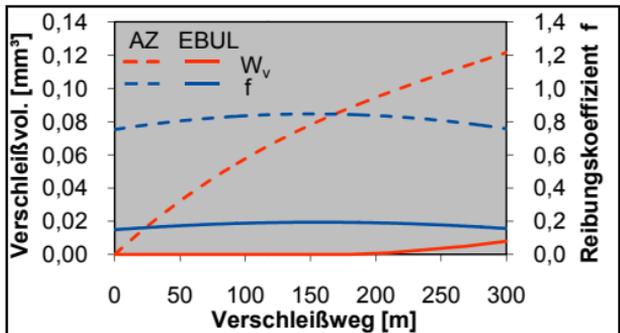
EBUL-Schichtgefüge und Härtemapping (AlSi10Mg + Ni-Bas.-Zusatzstoff)

- a) Energieeintrag niedrig
- b) Energieeintrag hoch

Im Zusammenhang mit der erzielten Härtesteigerung wird naturgemäß eine Verbesserung des abrasiven Verschleißverhaltens erzielt. Aber auch im Falle komplexerer tribologischer Beanspruchungen wirkt sich die EBUL-Schicht positiv aus. Bemerkenswert ist, dass neben einem verringerten Verschleißvolumen (Maß für den Materialabtrag) gleichzeitig eine Verbesserung des Reibungskoeffizienten erreicht wird (Abb. 44).

Abb. 44

Verschleißvolumen und Reibungskoeffizient vor (AZ) und nach dem EBUL (AlSi12 + NiAl20)



Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand können auf Mg-Legierungen EBUL-Schichten mit Härtewerten bis max. 250 HV_{0,1} erzeugt werden, da aufgrund der Korrosionsproblematik bei dieser Werkstoffgruppe lediglich Al-basierte Zusatzstoffe infrage kommen.

Auf neuartige Lösungsansätze in Verbindung mit innovativen Strahlführungstechniken, die zur Erweiterung des Leistungsprofils von NE-Werkstoffen über derzeitige Grenzen hinaus führen, wird in Kap. 5 eingegangen.

Die Wirkung der Dispersionsschichten zielt darauf ab, verschleißbeständige harte „Inseln“ in einer tragfähigen, hinreichend festen aber noch duktilen Matrix zu erzeugen, um vor allem den abrasiv/adhäsiven Verschleißwiderstand sowie den Ermüdungsverschleiß zu verbessern. Als Zusatzstoffe werden beim EB-Umschmelzdispergieren in der Matrix nicht oder nur eingeschränkt lösliche Hartstoffe, meist mit deutlich höheren Schmelzpunkten als der Grundwerkstoff, verwendet. Es wird in bestimmten Fällen bewusst ausgenutzt, dass eine teilweise Auflösung dieser eingebrachten Partikel ein Auflegieren der Matrix bewirkt (EBUDL).

Dispersions- schichten

Die Anwendung von Pulvern ist für EB-Flüssigphasenprozesse z. Z. nur als vorher deponierter Zusatzstoff oder in Form ummantelter Pulverdrähte realisierbar. Es kann nicht wie beim Laser- oder Plasmaauftragen in das Schmelzbad eingeblasen werden (Vakuum).

Verwendung von ummantelten Pul- verdrähten

Für den Behandlungsprozess müssen die EB-Parameter so optimiert sein, dass die Teilchen durch die Schmelzbadbewegung stochastisch „verwirbelt“ und nicht am Rand des Bades abgelagert werden (Abb. 46a). Neben der eingeschränkten Löslichkeit in der Matrix und der höheren Schmelztemperatur sind Partikelgröße und -form, Dichte, Ausdehnungskoeffizienten, Wärmeleitfähigkeit, Affinität zu anderen Phasen (bei Zusatzstoffgemischen) u. a. für das Behandlungsergebnis von Bedeutung.

Schmelzbad- bewegung

Die Einzelmesswerte in Abb. 46b charakterisieren die wesentlich höheren Härtewerte (1000-2500 HV)

der eingelagerten Hartstoffpartikel. Die Härte der Schichtmatrix ist bis in etwa 2 mm Abstand von der Oberfläche höher (450 HV_{0,1}) als die des Grundwerkstoffes (100 HV_{0,1}).

Abb. 45

EBUDL-Schicht
(AlSi10Mg + Ni₂WSc)
a) EBUDL-Schicht mit Härteeindrücken
b) Härte-Tiefenverlauf

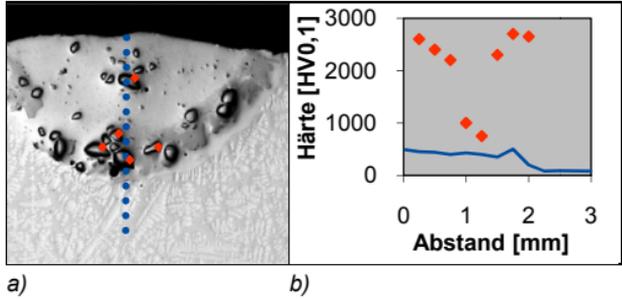
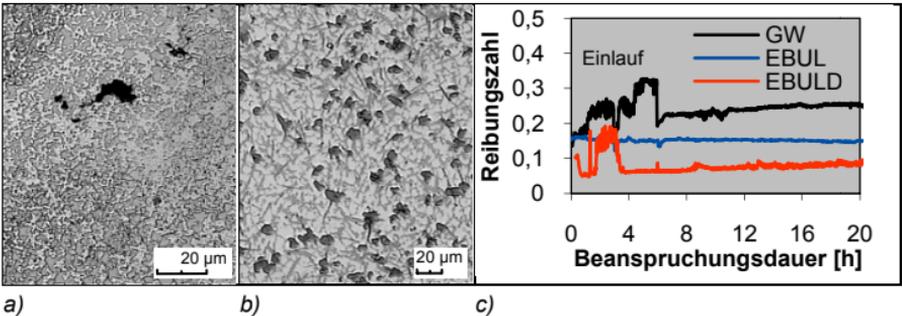


Abb. 46

EBUDL-Schicht
(AlSi10Mg + WC/Co 88/12)
a) Spritzschicht (Zusatzstoffdeponierung)
b) EBUDL-Schichtgefüge
c) Reibungszahl

Um eine gleichmäßige Verteilung der harten Partikel zu erreichen, ist es günstiger, wesentlich feinkörnigeres Ausgangspulver bei der Zusatzstoff-Deposition zu verwenden. Im gezeigten Fall (Abb. 46a) sind das agglomerierte Pulver (WC/Co) mit Korndurchmessern $\sim 5 \mu\text{m}$, die als Spritzschicht vordeponiert wurden. Im Ergebnis bekommt man eine Co-legierte Schichtmatrix mit gleichmäßig verteilten, sehr feinen WC-Partikeln (Abb. 46b).

Die Reibungszahl ist während einer Einlaufphase typischerweise starken Schwankungen unterworfen (Abb. 46c). Im stationären Bereich wird dann eine deutliche Verbesserung des Reibverhaltens durch die Absenkung der Reibungszahl (Abb. 46c) von 0,25 für AlSi10Mg (GW) auf 0,16 beim EBUL (Co-Basis-Zusatzstoff) und nochmals auf 0,085 nach dem EBUDL (WC/Co-Zusatzstoff) sichtbar.



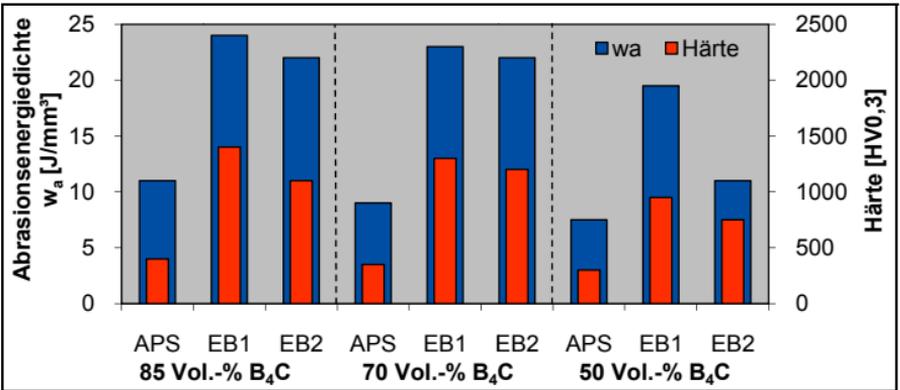
Fe-Werkstoffe

Auch bei Fe-Werkstoffen lassen sich beim EBUL allein durch die Änderung der Mengenanteile an Zusatzstoffen erhebliche Eigenschaftsunterschiede einstellen.

Abb. 47 zeigt dies am Beispiel des Stahls C45 mit B_4C/Fe als Zusatzstoff. Bemerkenswert sind auch die deutlich besseren Härte- und Abrasionsverschleißwerte der EBUL-Schichten gegenüber den APS-Schichten bei gleichen Zusammensetzungen.

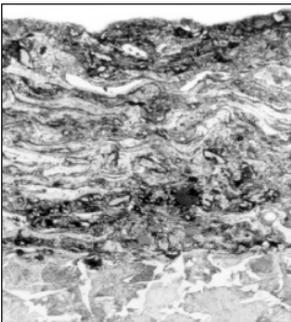
Abb. 47

Härte und Abrasionsenergiegedichte (w_a) von EBUL-Schichten im Vergleich zu APS-Schichten (Stahl C45 mit B_4C)



EBUL-Schichten sind wesentlich homogener als APS-Schichten und haften besser auf dem Grundmaterial (Abb. 48). Der Eigenschaftsgradient Rand-Kern wird durch ein EBUL wesentlich flacher. Der scharfe Übergang, der typisch für alle thermischen Spritzschichten ist, tritt beim EBUL nicht auf. Es lassen sich z. T. Oberflächenhärte von über 1000 HV0,3 erreichen.

Flacher Eigenschaftsgradient



a)



b)

Abb. 48

Randschichten (C45 mit $B_4C/Fe + B_4C$)
a) vor dem EBUL
b) nach dem EBUL

3.2.3 EB-Auftragen

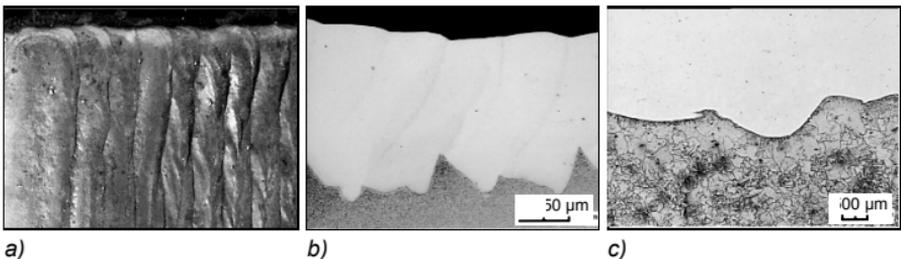
Das EB-Auftragen kann sowohl für Fe- als auch NE-Werkstoffe angewendet werden. Die Wahl des Auftragswerkstoffs richtet sich natürlich zunächst nach den Beanspruchungsbedingungen, häufig handelt es sich um stark abrasiven (Werkzeuge, Geräte u. a.) oder kavitativen Verschleiß (z. B. Kraftwerksturbinen).

Im Gegensatz zu allen anderen bisher erörterten Randschichtbehandlungstechnologien wird bei dieser Variante der Grundwerkstoff nur insofern in den Prozess einbezogen, dass durch das Aufschmelzen einer möglichst dünnen Zone eine bessere metallurgische Anbindung der Schicht und damit eine Verbesserung der Haftfestigkeit gewährleistet wird.

Abb. 49b zeigt, dass sich ebenso wie bei anderen Auftragsschweißverfahren geschlossene, riss- und porenfreie Schichten herstellen lassen, die eine feste schmelzmetallurgische Anbindung zum Grundwerkstoff haben (Abb. 49c). Das Ergebnis des Auftragens (Cladding) hängt im Bereich der Anbindung zum Grundwerkstoff mit den in Kap. 3.2.2 genannten Einflussgrößen zum EBUL und im Bereich der Auftragsschicht vom Überlappungsgrad der Schmelzraupen (Abb. 49a) bei senkrechter Auftragung sowie von der Anzahl der Lagen bei horizontaler Auftragung u. a. ab. Das EBA wird bevorzugt als Einstufenprozess mit Drahtzuführung (Legierungsdrähte, ummantelte Pulverdrähte) ausgeführt. Es kommen im Prinzip alle für das Auftragsschweißen verfügbaren Drähte infrage.

Feste schmelzmetallurgische Schichtanbindung

Abb. 49
EB-Auftragsschicht
(Stahl / NiCrBSi)
a) Auftragsraupen
b) Querschliff
c) Übergang Schicht-Grundwerkstoff



3.3 Kombinierte EB-Randschichttechnologien

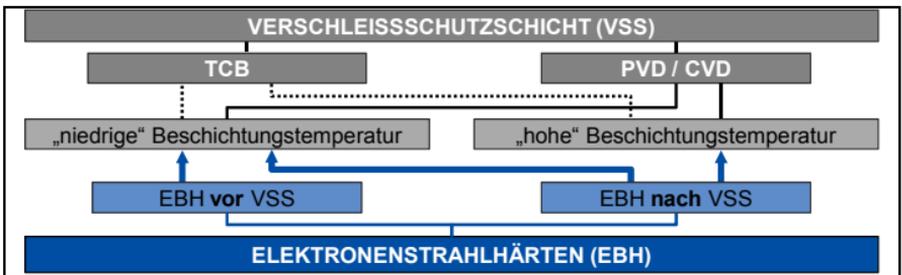
Unter kombinierten EB-Randschichttechnologien sind Verfahren einzuordnen, die

- eine EB-Randschichtbehandlung und eine andere Behandlungstechnologie
- mehrere EB-Randschichtbehandlungen

einschließen. Am weitesten entwickelt sind auf diesem Gebiet die Kombinationen EBH + thermochemische Behandlung (TCB) bzw. Hartstoffbeschichtung (HSB) als Duplex-Technologien (Abb. 50).

Abb. 50

Duplex-Technologien mit zwei Randschichtbehandlungsverfahren



Alle Kombinationsverfahren sind zweistufige Prozesse, wobei vor allem die Behandlungsreihenfolge entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat. Es sind Eigenschaftsänderungen möglich, die mit den Einzelverfahren nicht erreichbar sind. Für die dargestellten Verfahrenskombinationen (Abb. 50) kann eine signifikante Verbesserung der Stützwirkung durch die EBH-Schicht im oberflächennahen Bereich des Substratwerkstoffs erzielt und so das Eigenschaftspotenzial harter, dünner Schichten optimal genutzt werden (Abb. 51).

Abb. 51

Funktionsteilung der Randschicht bei kombinierten Randschichttechnologien

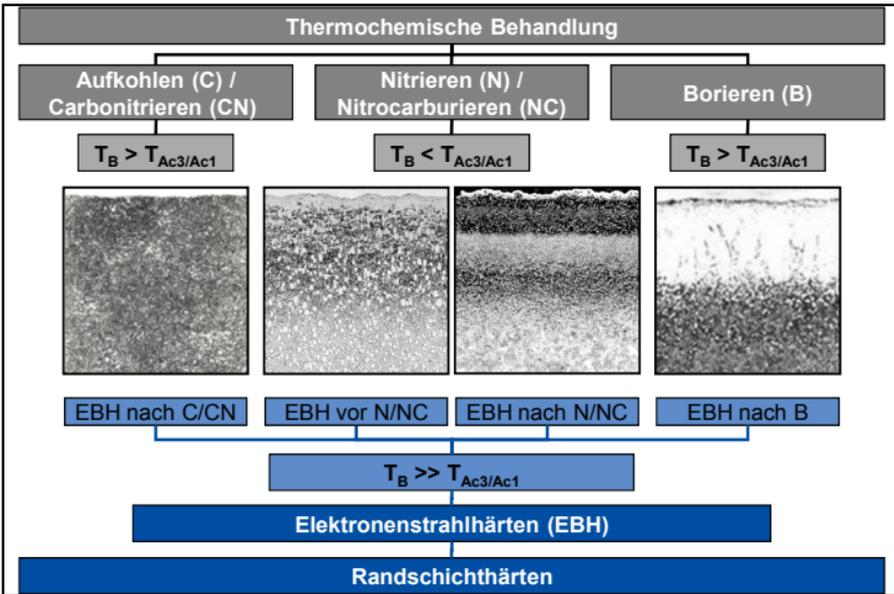


3.3.1 Kombination mit thermochemischen Behandlungen

Zu dieser Verfahrenskombination liegen Ergebnisse in Verbindung mit dem Aufkohlen (C), Borieren (B), Nitrocarburieren (NC), Nitrieren (N) und Carbonitrieren (CN) vor (Abb. 52).

Während das EBH sinnvollerweise wegen der Behandlungstemperatur (T_B) nur **nach** dem Aufkohlen, Borieren und Nitrocarburieren ausgeführt wird, kann das EBH im Fall des Nitrierens und Carbonitrierens sowohl **vor** als auch **nach** der thermochemischen Behandlung als Prozessschritt eingeordnet werden (Abb. 52).

Abb. 52
Behandlungsreihenfolge beim EBH in Verbindung mit einer TCB



Die thermisch stabilere wesentlich „dickere“ Boridschicht (ca. 45 μm) bleibt nach dem Borieren+EBH erhalten. Dagegen wird die dünne Verbindungsschicht (10...20 μm) beim Nitrieren+EBH zumindest teilweise umgewandelt. Nach dem EBH+Nitrieren ist eine dünne, mit einem zusätzlich ausgeprägten Porensaum verbleibende Verbindungsschicht (ca. 5 μm) kennzeichnend. Nach dem C/CN+EBH bildet sich wie nach dem konventionellen Einsatzhär-

ten (CH) ein kontinuierlich abfallender Härtegradient aus (Abb. 53a), allerdings auf einem deutlich höheren Niveau.

Die Härte-Tiefen-Verläufe nach dem EBH+N bzw. B+EBH (Abb. 53b, c) zeigen eine sehr hohe Härte im oberflächennahen Bereich (Ergebnis der thermochemischen Behandlung), die das gute Verschleißverhalten bewirkt. Eine darunter liegende breitere Zone (ca. 0,8 bzw. 1,3 mm) mit erhöhter Härte (Ergebnis des EBH), die die harte Oberflächenschicht stützt, verhindert ein Abplatzen unter Belastung.

Abb. 53

Härte-Tiefen-Verläufe der Kombinationen

a) C/CN + EBH

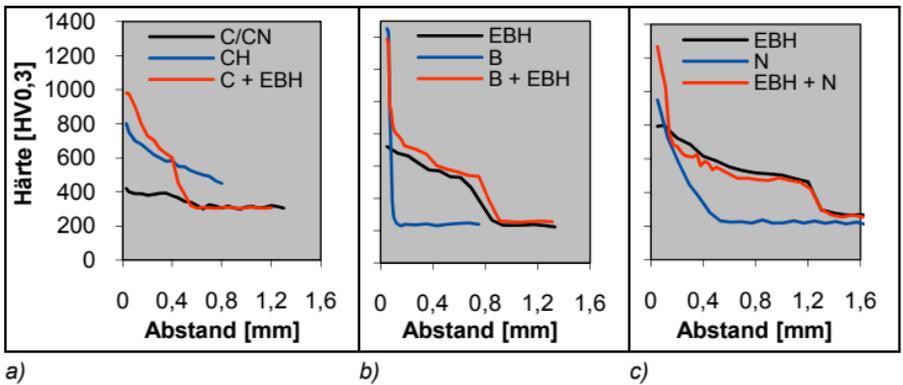
(16MnCr5)

b) B + EBH

(X220CrVMo13-4)

c) EBH + N

(X100CrMoV5-1)



3.3.2 Kombination mit Hartstoffbeschichtungen (PVD, CVD)

Das PVD- und CVD-Beschichten sind etablierte Verfahren mit zahlreichen technischen Anwendungen, u. a. zum Verschleißschutz und zur Reibminderung. Die volle Leistungsfähigkeit derartig dünner (1...4 (6) μm) und extrem harter Beschichtungen (1000...3000HV) kann nur durch eine Optimierung des Schicht-Substrat-Verbundes, d. h. durch Schaffung eines Härtegradienten (Abb. 54) zur Abstützung ausgeschöpft werden.

In Verbindung mit CVD-Schichten, die bei hohen Temperaturen (>850 °C...1000 °C) erzeugt werden, ist das EBH nur als zweiter Verfahrensschritt sinnvoll, da ansonsten die erzielte Härtesteigerung in der EBH-Schicht infolge der hohen Beschichtungstemperaturen verloren geht (Abb. 50).

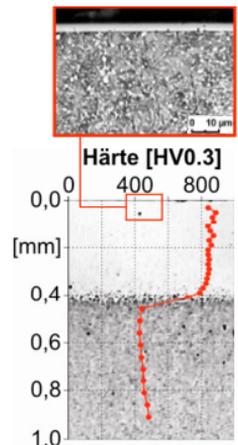


Abb. 54

Härtegradient nach dem PVD + EBH

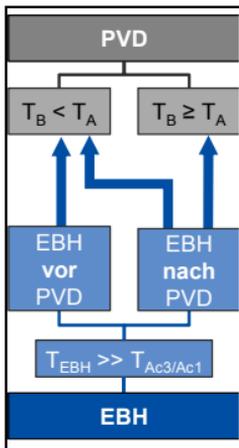


Abb. 55

Verfahrensvarianten
Duplextechnologien
EBH / PVD

Im Zusammenhang mit PVD-Beschichtungen, die bei relativ niedrigen Temperaturen ($120 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$) erzeugt werden, sind prinzipiell beide Behandlungsreihenfolgen möglich (Abb. 55). Entscheidungskriterium für den Erfolg bzw. die Effizienz dieser Duplexbehandlung ist im Fall von Stählen die Anlassbeständigkeit (T_A) der Basiswerkstoffe.

Die Variante **EBH vor PVD** (Abb. 55) kommt für Beschichtungsvarianten zur Anwendung, die bei niedrigen Temperaturen ($T_B < T_A$) erzeugt werden, wie z. B. DLC-Schichten.

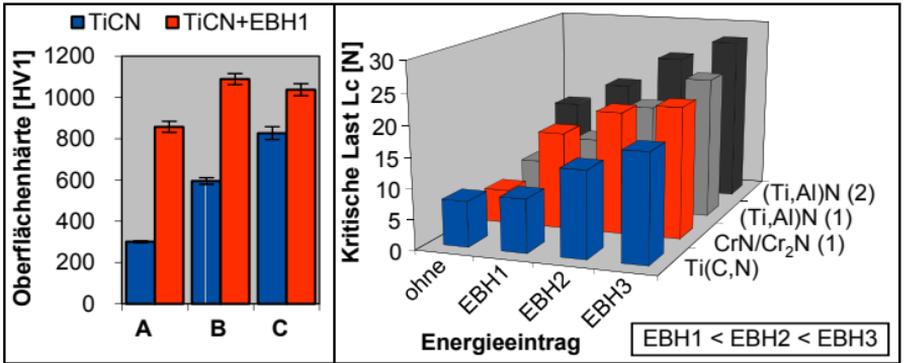
Die Vorteile des EBH gegenüber konventionellen thermischen und thermochemischen Verfahren kommen vor allem bei der Verfahrensvariante **EBH nach PVD** (Abb. 55) zum Tragen.

Das EBH kann auf die am höchsten beanspruchten Funktionsbereiche von Bauteilen bzw. Werkzeugen beschränkt werden, sodass die lokal notwendige Stützwirkung mit einer minimalen thermischen Belastung des Gesamtbauteils einhergeht. Unerwünschte Maß- und Formänderungen werden nahezu eliminiert. Des Weiteren erfolgt der Energieeintrag präzise definiert und kann flexibel (3D-Strahlableitung) an die geometrischen und thermischen Erfordernisse der Schichten, insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung einer Rissbildung, angepasst werden. Durch die prozesstypische „inerte“ Atmosphäre (Vakuum) können umgebungsbedingte Veränderungen der Hartstoffschichten (insbesondere Oxidation) vermieden werden.

Die bessere Abstützung der Hartstoffschicht durch die martensitische Randschicht führt zu einer Steigerung der Oberflächenhärte (Abb. 56a) und der kritischen Last im Ritzversuch (Abb. 56b). Beide Werte lassen sich durch ein der Beschichtung nachfolgendes EBH gegenüber der Beschichtung allein mehr als verdoppeln. Auch das Verschleißverhalten wird deutlich verbessert (Abb. 56c).

Neben der Behandlungsreihenfolge sind sowohl die chemische Zusammensetzung der Schicht als auch der Schichtaufbau (Mono-, Gradienten- und Sandwichschichten), die Schichtdicke sowie in entschei-

Stützwirkung



a)

b)

dendem Maße die thermische Beständigkeit für die erfolgreiche Umsetzung der Kombinationsbehandlung PVD + EBH von Bedeutung. Aus den genannten Einflussfaktoren ergibt sich eine Fülle an Schichtsystemen, deren Eigenschaftspotenziale in Bezug auf die Kombinationsbehandlung heute noch nicht vollständig abschätzbar sind.

Abb. 56

Einfluss des Energieeintrags beim EBH für verschiedene Stähle und PVD-Schichtvarianten

(A...C45; B...100Cr6; C...X153CrMoV12)

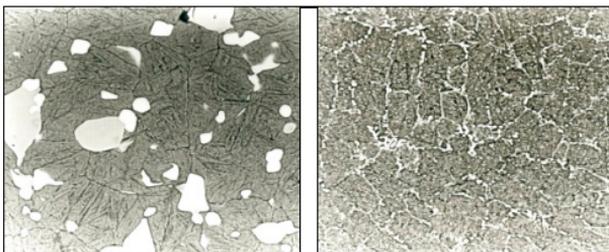
a) Oberflächenhärte

b) kritische Last

3.4 Sonderverfahren

EB-Umschmelzen/EB-Härten

Diese Verfahrenskombination wurde für pulvermetallurgisch hergestellte Schnellarbeitsstähle entwickelt. Sie umfasst ein EB-Umschmelzen mit gleichzeitigem Verdichten und ein nachfolgendes EB-Härten und EB-Anlassen, um der Randschicht die erforderlichen Gebrauchseigenschaften zu verleihen. Das Gefüge wird durch das EBU wesentlich feiner. Die Korngröße nimmt ebenso wie die Karbidgröße deutlich ab (Abb. 57).



a)

b)

Abb. 57

Pulvermetallurgisch erzeugter Schnellarbeitsstahl

a) nach dem konventionellen Härten

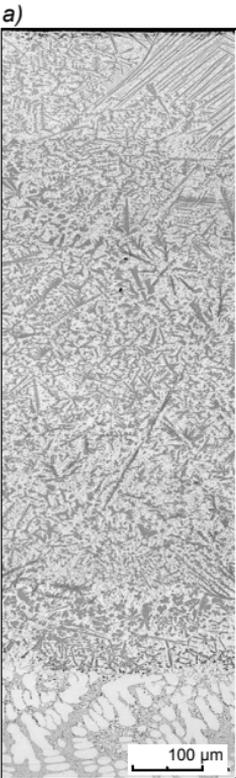
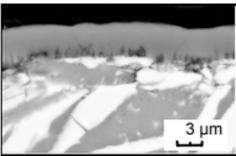
b) nach dem EBU/EBH

Das hat positive Auswirkungen auf das nachfolgende EB-Härtungs- und Anlassergebnis. Die Standzeit wird dadurch verbessert.

Abb. 58

EBUL + Plasmanitrieren (PN) von Al-Guss- und Knetlegierungen

- a) AlN-Schicht
- b) EBUL-Schicht
- c) Verschleißvolumen
- d) Verschleißspuren

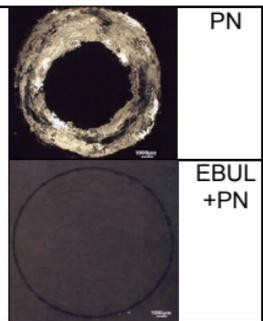
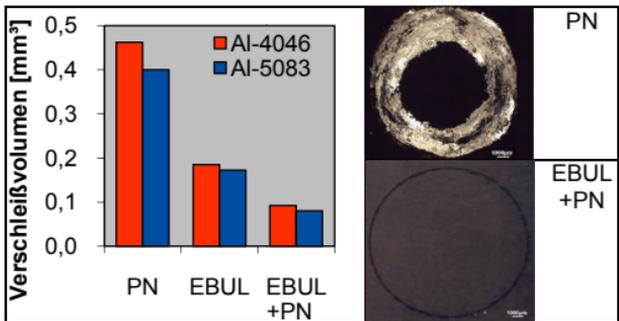


EB-Umschmelzlegieren/Plasmanitrieren

Dünne, harte Verschleißschutzschichten, wie z. B. Nitrier- und Hartstoffschichten sind für relativ weiche Substratwerkstoffe, wie z. B. Al-Legierungen nur nutzbar, wenn es gelingt, eine Abstützung der harten Schicht durch eine Erhöhung der Randschichthärte des Grundwerkstoffs zu realisieren. Eine geeignete Methode stellt insbesondere das EBUL dar.

Zum EBUL kamen Fe-Basis-Zusatzstoffe zur Anwendung, um sowohl harte als auch thermisch stabile Gefügebestandteile in der EBUL-Schicht zu erzeugen (Abb. 58b). Letzteres ist notwendig, da das nachfolgende Plasmanitrieren bei Temperaturen von 450...470 °C stattfindet. Dabei werden auf der EBUL-Schicht 3...6 µm dicke AlN-Schichten erzeugt (Abb. 58a).

Vergleichende Verschleißtests ergaben, dass im Fall der nur nitrierten Al-Legierungen die AlN-Schicht einbricht und ein starker Verschleiß der weichen Al-Matrix eintritt (Verschleißvolumen: > 0,4 mm³, Abb. 58c). Dagegen ist für die Variante EBUL + Plasmanitrieren das Verschleißvolumen mit < 0,1 mm³ um den Faktor 4 geringer (Abb. 58c). Diesen Sachverhalt widerspiegeln die Verschleißspuren ebenfalls deutlich (Abb. 58d).



b)

c)

d)

4 Anwendung

4.1 Anwendungsrichtlinien und Einsatzkriterien

Für die EB-Randschichtbehandlung sind wesentlich weniger Fertigungsdokumente verfügbar als für das EB-Schweißen. Einige Richtlinien für das EB-Schweißen sind allerdings für die EB-Randschichtbehandlung gleichermaßen gültig bzw. liefern im übertragenen Sinne wichtige Hinweise für die Durchführung dieser Technologien.

Die für die Laserbearbeitung geltenden Unterlagen sind zumindest teilweise auf die EB-Behandlung übertragbar. Des Weiteren gelten insbesondere für die Festphasenprozesse (EB-Härten, -Glühen, -Anlassen) die betreffenden allgemeinen Wärmebehandlungsnormen.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Normen und Richtlinien für die EB-Randschichtbehandlung liefert Tab. 5.

*Tab. 5
Normen und
Richtlinien*

Norm, Richtlinie, Merkblatt	Bezeichnung, Titel
DIN ISO 15787	Technische Produktdokumentation - Wärmebehandelte Teile aus Eisenwerkstoffen - Darstellung und Angaben
DIN 17021-1	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen; Werkstoffauswahl, Stahlauswahl aufgrund der Härbarkeit
DIN 17022-5	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen – Verfahren der Wärmebehandlung – Teil 5: Randschichthärten
DIN 17023	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen – Wärmebehandlungsanweisung (WBA)
DIN EN 10328	Eisen und Stahl - Bestimmung der Einhärtungstiefe nach dem Randschichthärten
DIN 30950	Schmelzhärten – Allgemeine Verfahrensbeschreibung
DIN 30960	Schmelzhärten mit Zusatzwerkstoffen – Schmelzhärtungsanweisung (SHA)
DIN 30965	Lasertechnik – Laserstrahl-Härtbarkeitsversuch
DIN 50190-4	Lasertechnik - Härtetiefe wärmebehandelter Teile - Teil 4: Ermittlung der Schmelzhärtetiefe und der Schmelztiefe
DVS 3212	Randschichthärten mit dem Elektronenstrahl
MB Stahl 236	Wärmebehandlung von Stahl - Randschichthärten
VDG N 20	Randschichthärten von Gusseisen mit Kugelgraphit und Temperguss

Einsatzkriterien für EB-Randschichttechnologien

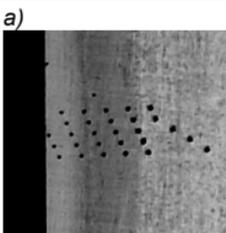
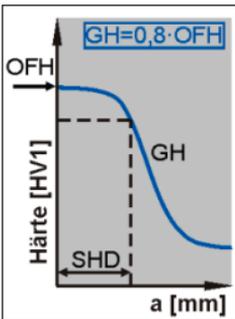
Die Einsatzkriterien für EB-Randschichttechnologien sind in den Abschnitten 2.1 - 2.7 dargelegt. Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig, werden aber durch einige grundlegende Faktoren eingeschränkt:

- Werkstoffspezifisch (Behandelbarkeit)
- Prozesstechnik (EB-Zugänglichkeit)
- Bauteilspezifisch (Bauteilgröße/-geometrie)
- Wirtschaftlichkeit (Kosten)

Der „Einzelfall“ erfordert immer eine kritische Analyse. Erweisen sich ein oder mehrere der o. g. Faktoren als kritisch, dann gibt es oft Möglichkeiten, dem entgegen zu wirken. So kann z. B. ein anderer Werkstoff zum Einsatz kommen oder das Bauteil wird durch konstruktive Änderungen verfahrenstechnisch angepasst. Auch durch entsprechende Vorrichtungs- und Handlingkonzepte (z. B. Bauteil- oder Strahlerzeugerkippung) können Freiheitsgrade für die Anwendung von EB-Technologien hinzugewonnen werden. Die Behandlung von mehreren Teilen gleichzeitig ist i. d. R. ebenfalls ein Mittel, EB-Technologien wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Das Behandlungsergebnis nach dem EB-Randschichthärten wird nach DIN EN 15787 mit der Einhärtungstiefe als Kurzzeichen SHD (= surface hardening depth) charakterisiert. Kurzzeichen nach früheren Normen, wie Rht (DIN 6773; DIN 50190-2) bzw. DS (EN ISO 10328) sind zwar nicht mehr gültig, werden jedoch häufig noch als Zeichnungsangaben verwendet.

Zur Ermittlung der Einhärtungstiefe muss das zu prüfende Teil zerstört und metallographisch so präpariert werden, dass eine Härtemessung im Kleinstbereich fehlerfrei durchgeführt werden kann. Es erfolgt die Aufnahme eines Härteprofils (Abb. 59). Die Vorgehensweise hierzu ist in DIN EN 10328 festgelegt. Anhand des ermittelten Härte-Tiefenverlaufes wird die Einhärtungstiefe SHD als der senkrechte Abstand von der Oberfläche festgelegt, an dem noch eine bestimmte Härte, die Grenzhärte (GH), vorhanden ist. Diese beträgt im Regelfall 80 % der gemessenen Oberflächen-Mindesthärte in HV. In Abhängigkeit von der zu erwartenden Ein-



b)

Abb. 59

Ermittlung der Einhärtungstiefe SHD nach DIN EN 10328

a) schematisch

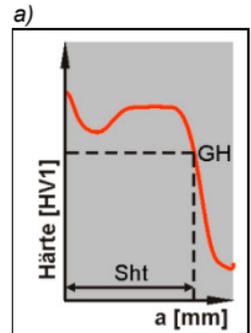
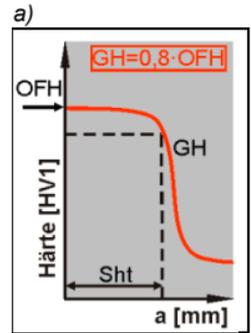
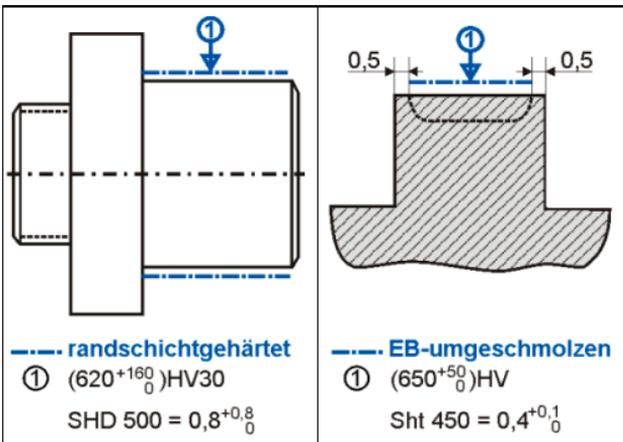
b) EBH-Schicht mit Härteindrücken

härtungstiefe sind die Prüfkräfte für die Ermittlung der Oberflächenhärte nach Rockwell bzw. Vickers abzustimmen (Umrechnungstabellen und Bereiche zur Bestimmung der Grenzhärte in DIN ISO 15787).

Das Behandlungsergebnis nach dem EB-Umschmelzen wird nach DIN 50190-4 ebenfalls anhand eines ermittelten Härte-Tiefen-Verlaufes durch Bestimmung der Schmelzhärtetiefe (Sht) charakterisiert (Abb. 60). Das ist der senkrechte Abstand von der Oberfläche eines umgeschmolzenen Werkstoffs bis zu dem Punkt, an dem die Härte einem zweckentsprechend festgelegten Grenzwert entspricht. Diese Grenzhärte (GH) ist definiert als Härtewert, „bis zu dem eine für die Eigenschaften maßgebliche Beeinflussung der Randschicht“ vorliegt und wird ebenfalls mit 80% der Mindestoberflächenhärte empfohlen.

Für die anderen EB-Flüssigphasen-Prozesse, die mit Zusatzstoff arbeiten (EBUL, EBUD) ist die Bestimmung der Schmelztiefe (St) - senkrechter Abstand von der Oberfläche bis zu dem Punkt, an dem der Werkstoff gerade noch vollständig aufgeschmolzen wurde - anhand eines metallographischen Querschliffs vorgesehen.

Abb. 61 zeigt exemplarisch typische Zeichnungsangaben für das partielle EBH (a) nach DIN 15787 und das EBU (b).



b)

Abb. 60

Ermittlung der Schmelzhärtetiefe (Sht) nach DIN 50190-4 für
 a) nicht härtbare Stähle und NE-Werkstoffe
 b) härtbare Stähle

Abb. 61

Wärmebehandlungsangaben auf Zeichnungen
 a) Bauteil (schematisch)
 b) Detail-Darstellung (Schnitt)

4.2 Anwendungsbeispiele

4.2.1 Festphasenprozesse

EB-Härten von Serien-Bauteilen

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass das EB-Härten in technisch-technologischer Hinsicht und bzgl. der Wirtschaftlichkeit durchaus mit anderen Wärmebehandlungs- und Randschicht-technologien konkurrieren kann. Daraus ergibt sich eine große Palette von Anwendungsbeispielen, die exemplarisch in Tab. 6 nach geometrischen Gesichtspunkten geordnet, zusammengefasst sind.

Tab. 6

Anwendungsbeispiele
für das EBH

Geometrische Grundform	Ausgewählte Beispiele
1. Prismatische Bauteile	Führungsleisten, Aufspannplatten, Walzführungselemente, Maschinenbetten, Führungsnuten an diversen Bauteilen, Fangleisten, Spannbacken, Führungsschienen, Anschlagleisten, Fixierplatten, Greiferschieber, Stege, Mitnehmer
2. Zylindrische Bauteile a) Umfangsflächen eben, konkav oder konvex b) Stirnfläche	Pinolen, Antriebswellen, Walzen, Führungsstangen, Werkzeugkonus, Platinenringe, Drahtziehtrommeln, Stützringe, Ventilinge, Schneckenbuchsen, Gussformen, Drehdurchführungen, Kurbelwellen, Bremsstrommeln, Zugstücke, Gewindinge, Nadelnutringe, Bolzen, Schwenkwellen, Zapfenkranz, Statorwellen, Radmitnehmer, Falzwalzen, Wagenbolzen, Laufrollen, Ankerwellen, Rotoren Druckringe, Führungsleisten, Stirnverzahnungsringe, Lochplatten, Druckbolzen, Kurvensegmente, Laufringe, Führungsringe, Bremscheiben, Bolzen, Kalotten
3. Räumlich gekrümmte Flächen	Kurvenscheiben, Kulissen, Knetblöcke, Schneckenbuchsen, Extruderschnecken, Hubleisten, Schlossteile, Glasformen, Formteile
4. Schneiden (Werkzeuge)	Schnittstempel, Lochplatten, Mahlscheiben, Messerklingen, Abstreifer, Statormesser, Schlegelmesser, Propellermesser, Flügelmesser, Schnitzmesser, Pflugschare, Schlagmesser, Bohrköpfe, Flechterzangen, Mähklingen, Spritzgießwerkzeuge

Im Falle geometrisch einfacher Bauteile bzw. bezüglich der Einstrahlbedingungen unkompliziert zu härtender Flächen kommt die hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit des EB besonders gut zum Tragen. Bei komplizierten Bauteilkonturen wirkt sich die gute strahlführungstechnische Handhabbarkeit

des Elektronenstrahls positiv aus.

Handelt es sich um Präzisionsteile, schlanke oder dünnwandige Bauteile, können die für das EBH typischen geringen Form- und/oder Maßabweichungen über den Einsatz entscheiden.

Durch das Arbeiten im Vakuum und die kurzen Behandlungszyklen lassen sich jegliche Entkohlung und Oxidation vermeiden. Dadurch genügen elektronenstrahlgehärtete Bauteile höchsten Anforderungen an die Oberflächenqualität.

Zusätzliche strahlungstechnische Maßnahmen (z. B. Strahlknickung) ermöglichen die Erweiterung der Einsatzfelder des EBH auch auf Bauteile mit für den Strahl nicht direkt zugänglichen Flächen, selbst die Behandlung von Innenkonturen wird dadurch möglich.

Einige ausgewählte Beispiele für die EBH-Randschichtbehandlung mit allgemeinen, typischen oder ganz besonderen Merkmalen werden nachfolgend exemplarisch vorgestellt.

Die in Abb. 63a gezeigten Ringe können in großer Stückzahl nur dann wirtschaftlich mittels EB gehärtet werden, wenn mehrere Ringe (bis zu 10 Stück, siehe Abb. 62) gleichzeitig behandelt werden. Dafür ausgelegte Vorrichtungen können dickenabhängig bis zu 300 Ringe aufnehmen. Durch die exakt reproduzierbare Härtetiefe und die Art der Aufspannung gelingt es, derart dünnwandige Bauteile verzugsfrei zu härten.

Hohe Maß- und Formstabilität

Keine Entkohlung, keine Oxidation

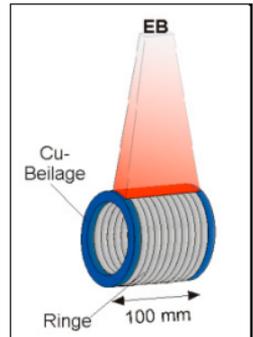


Abb. 62

Prinzip des EBH von Ringen und Kurvenscheiben

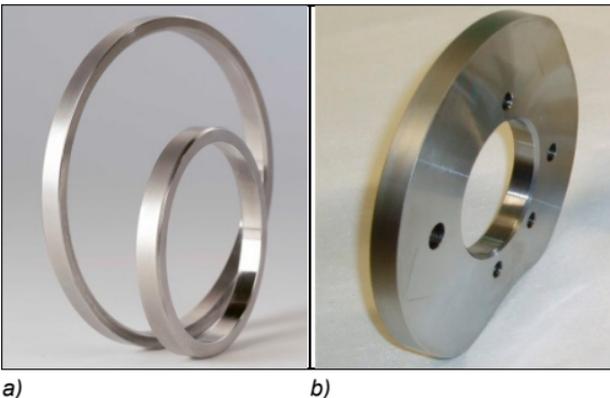


Abb. 63

Bauteile

a) Ringe

b) Kurvenscheiben

Anpassung der Fokusslage

Kurvenscheiben (Abb. 63b) sind z. B. in Druckerei- und Textilmaschinen zur mechanischen Steuerung unerlässlich. Die Außenkontur muss als Kontaktfläche verschleißbeständig sein. Das EBH-Prinzip ist das gleiche wie bei den eben beschriebenen Ringen (Abb. 62). Bei großen Kurvenerhebungen muss der Strahl allerdings zusätzlich noch in z-Richtung (Fokusslage) nachgeführt werden, was für den Elektronenstrahl unkompliziert umsetzbar ist. Auch in diesem Fall werden die große Präzision des Elektronenstrahls in Verbindung mit geringen Maß- und Formänderungen sowie der Fakt genutzt, dass nach dem EBH weder ein Anlassen noch ein Nachschleifen erforderlich ist.

Müssen oder dürfen nur bestimmte Oberflächenbereiche gehärtet werden, gibt es die Möglichkeit, diese Flächen durch eine x-y-Bewegung des Bauteils oder/und eine x-y-Auslenkung des zeitlich und örtlich variablen Energieübertragungsfeldes zu „überstreichen“. Dies ist bei großen und komplizierten Einzelteilen oder bei Kleinserien eine übliche Vorgehensweise.

Bei Mittel- und Großserien ist es kostengünstiger, mit einer Schablone die Bereiche abzudecken, die nicht hart werden dürfen und ein breites Energieübertragungsfeld mit hoher Geschwindigkeit relativ zu den auf Paletten aufgespannten Bauteilen zu bewegen. Beispiele für solche Varianten sind Messer für Mähbalken (selbstabdeckend) oder Spannvorrichtungen (Abb. 64).



a)

b)

Abb. 64

Spannvorrichtung

a) Bauteil

b) Abdeckschablone

Die Kolbenstange in Abb. 66a kann sowohl mit Abdeckung als auch mittels Flaschtechnik EB-gehärtet werden. Entscheidend ist, dass exakt nur die vertieft liegende Stirnfläche gehärtet wird. Die Anlagefläche muss weich bleiben. Welche der beiden Varianten zur Anwendung kommt, hängt vor allem von der Losgröße ab.

Das Regelteil (Abb. 66b) aus X20Cr13 wird an den Anlageflächen (innen, außen) gehärtet. Als strahlungstechnische Variante kommen die Flash-technik (Vgl. Abb. 13) oder das rotierende Feld (Abb. 65) zur Anwendung. Letzteres mit unterbrochenem Energieeintrag (Crackzone) wird für das EBH der Kontaktflächen von Pleuel (Abb. 66c) genutzt, weil der Crack-Bereich nicht thermisch belastet werden darf (Anschmelzgefahr).

Die Nockenwelle aus C55 (Abb. 66d) wird rotierend mit an die Nocken und die Lager angepasstem Energieübertragungsfeld EB-gehärtet. Aufgrund der unterschiedlichen Nockenpositionen und der großen Abstände zwischen den Lagern bzw. gleich orientierten Nocken (> 100 mm) ist der Einsatz einer Mehrfeld-Technik (vgl. Abb. 80) bei dieser Nockenwelle nicht möglich. Das EBH kommt in diesem Falle vor allem wegen seiner exakt definierten EBH-Tiefe (Nocken $0,4 + 0,1$ mm, Lager $0,2 + 0,1$ mm) und der insgesamt minimalen Maßänderungen (innerhalb der Fertigungstoleranzen) zur Anwendung.

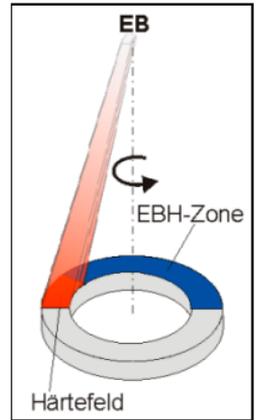


Abb. 65

EBH mit rotierendem Energieübertragungsfeld



a)

b)



c)

d)

Abb. 66

Bauteile nach dem EBH

a) Kolbenstange

b) Regelteil

c) Pleuel

d) Nockenwelle

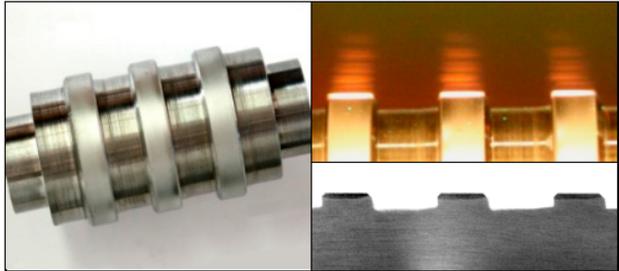
EB-Mehrfeld- technik

Abb. 67

Mehrfeld-EBH einer
Welle

a) Bauteil

b) Prozess (Videostill)
und Härtezone

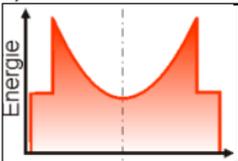


a)

b)



a)



b)



c)

Abb. 68

EBH einer Kalotte
mittels Flashtechnik

a) Bauteil

b) Energieübertra-
gungsfeld

c) Schnitt

Die EBH-Mehrfeldtechnik wird z. B. für die Welle in Abb. 67a angewendet. Alle 3 Stege werden in einem Umlauf über den gesamten Umfang mittels EB gehärtet (Abb. 67b, c), um die Lauffläche vor Verschleiß zu schützen. Da keine hohen Druckbelastungen vorliegen, beträgt die Einhärtungstiefe nur 0,3 mm. Eine Nachbearbeitung ist in diesem Fall nicht erforderlich.

Weitere Applikationen für das EB-Härten sind z. B. die Stirnflächen von Aktuatoren, Injektorgehäusen, Druckbolzen, Ventildfedertellern und Gelenkteilen für die Automobilindustrie oder Armaturen. In diesen Fällen (ebene oder gekrümmte Kontur) kommt, wie auch bei den in Abb. 66 gezeigten Gelenkteilen (Kugelkalotte), vorteilhaft die Flashtechnik (vgl. Kap. 2.7) zur Anwendung.

Das in Abb. 68a gezeigte Bauteil bedarf eines komplexen, an die Kontur angepassten Energieübertragungsfeldes (Abb. 68b). Das Ergebnis am Bauteil ist eine konturgetreue Härtungsschicht, wie das in Abb. 68c im geätzten Querschliff zu sehen ist.

Bei ebenen Stirnflächen, wie exemplarisch gezeigt an einem Injektorgehäuse (Abb. 69a, b), ist das EBH mittels Flashtechnik relativ einfach. Das Bauteil wird entweder mit einem (Abb. 69e) oder mehreren Pulsen (Abb. 69f) bestrahlt. Die Mehrpulsvariante (Abb. 69f) hat den Vorteil, dass trotz der kurzen Einwirkdauer des EB die Energieübertragung „moderat“ erfolgt und dadurch Oberflächenanschmelzungen besser vermeidbar sind, weil zwischen den Pulsen (Energiezufuhr) in den Pulspausen genügend Zeit für die Wärmeabfuhr ist.

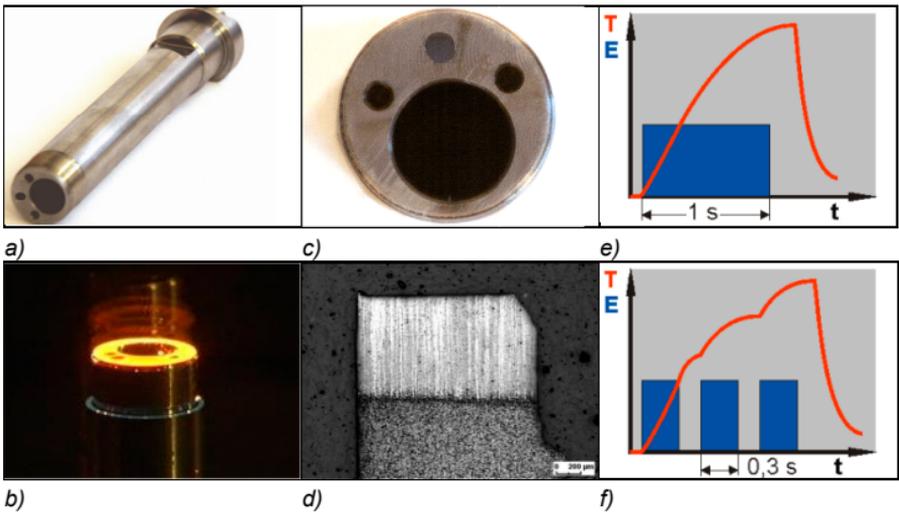


Abb. 69

EBH eines Injektorgehäuses

a) Bauteil

b) Flash-Technik

c) gehärtete Fläche

d) EBH-Schicht

e) T-t- bzw. E-t-Verlauf (1-Puls)

f) T-t- bzw. E-t-Verlauf (3-Pulse)

Die Gesamtdauer des technologischen Zyklus (Erwärmen-Halten-Abkühlen) liegt bei Anwendung der Flaschtechnik zwischen 1...3 s, wobei die Dauer der EBH-Einwirkung davon 0,5...2 s beträgt, was bei geschickter Bauteilzuführung eine große Stückzahl pro Zeiteinheit garantiert.

Weitere Beispiele, bei denen es vor allem auf einen äußerst präzisen lokalen Energieeintrag ankommt, sind z. B. Formen für die Glasindustrie, Fadenführungselemente für die Textilindustrie oder Dorne als Werkzeuge für die Lederindustrie. Bei der Mehrzahl der Beispiele handelt es sich um Massenteile.

EB-Härten von Ventilsitzen

Eine besonders anspruchsvolle Aufgabe, die so „elegant“ und effektiv mit keinem anderen Randschichtbehandlungsverfahren lösbar wäre, ist das EBH von Ventilsitzen in Zylinderköpfen aus Gusseisen (Abb. 70a, c, d).

Das üblicherweise angewandte Induktionshärten hat zur Folge, dass aufgrund

- eines relativ ungenauen, großflächigen Wärmeintrags
- der Änderung der Wärmeflussrichtung beim Erwärmen und Abkühlen (Fremdabkühlung)

Substitution des Induktionshärtens

EBH ohne Anlassen und Nachbearbeitung

Form- und Maßänderungen auftreten, die ein aufwändiges Nachschleifen der Anlageflächen für die Zylinderkopfdichtung erforderlich machen. Zusätzlich muss dem Induktionshärten zwingend ein Anlassenprozess nachgeschaltet werden. Das Anlassen kann ebenso wie das nachfolgende Schleifen bei Anwendung des EBH eingespart werden. Das EBH wird in diesem Falle als Flaschentechnik ausgeführt, d. h. das ringförmige Energieübertragungsfeld und das Bauteil ändern ihre Position während der Energieübertragung zueinander nicht.

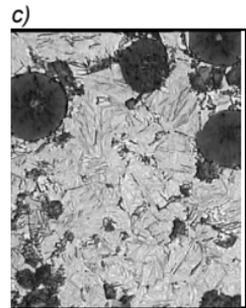
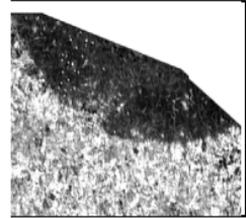
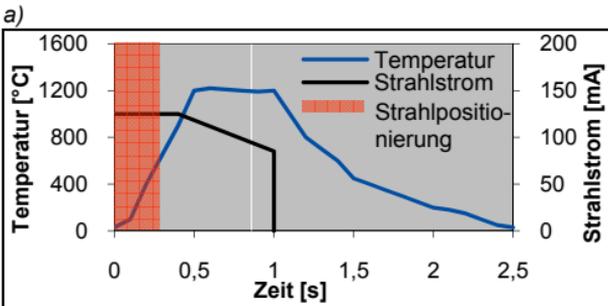


Abb. 70

EBH von Zylinderköpfen

- a) Bauteil
- b) Prozessführung
- c) EBH-Zone
- d) Gefüge

Strahlpositionierung während des Erwärmens

Aufgrund der diffizilen geometrischen Verhältnisse im Ventilsitzbereich muss eine exakte Positionierung des Energieübertragungsrings erfolgen, um nur die tatsächlich beanspruchte Kontaktfläche zu härten (Abb. 70c). Bereits durch Ausschöpfung der zulässigen Fertigungstoleranzen von $\pm 0,1$ mm (Lageabweichung der Bohrungen zueinander) könnte es zu unerwünschten Kantenanschmelzungen kommen. Um dies zu vermeiden, wird eine Selbstpositionierung (vgl. Kap. 2.7) durchgeführt. Die Position des Elektronenstrahls zum Ventilsitz wird im Falle einer Abweichung durch eine Strahl- und/oder Bauteilverschiebung korrigiert. Dies geschieht während der Erwärmungsphase im unkritischen Tempe-

raturbereich unterhalb 700...750 °C in ca. 0,3 s (Abb. 70b). Somit werden durch die Gleichzeitigkeit von verschiedenen Prozessen (Positionieren, Erwärmen), die mit einem Strahl ausgeführt werden, sehr kurze Taktzeiten (z. B. ca. 60 s für einen 6-Zylinder / 4-Ventil-Motor) möglich.

Die Behandlung von Werkzeugen stellt ebenfalls hohe Anforderungen an die Strahlführung. Eine exakte konturgerechte EB-Behandlung von Messern, Umformwerkzeugen, Walz- oder Gravierwerkzeugen ist wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Behandlung mit dem Ziel der Standzeit- oder Standmengenerhöhung. Darüber hinaus wird ebenso (z. B. bei Führungselementen) ausgenutzt, dass das EBH mit geringen Form- und Maßabweichungen realisiert werden kann. Nicht immer gelingt dies ohne zusätzliche Maßnahmen (z. B. Gegenhärtung).

EB-Härten von Extrudierwerkzeugen

Die komplizierte Oberflächenkontur von Extruderschnecken (Abb. 71), d. h. über die Werkzeuglänge variable Steghöhen, -abstände und Steigungswinkel (dadurch unterschiedliche Volumina) sowie eine Vielzahl von Schnecken-Typen mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern aus verschiedenen Werkstoffen erfordern eine äußerst flexible Behandlungstechnologie.

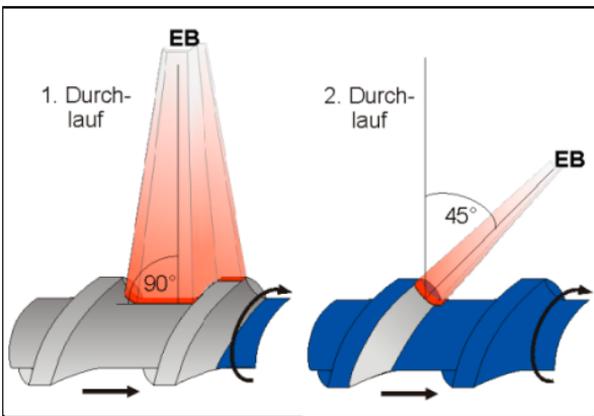
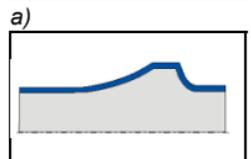
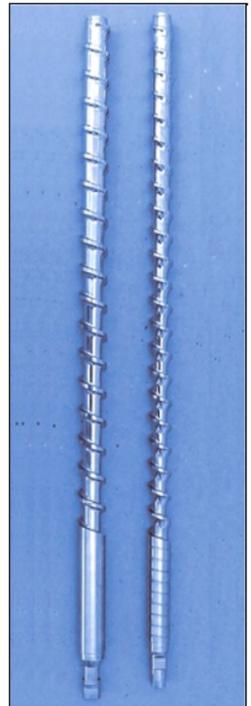
Abb. 71

EBH von Extrudierwerkzeugen

a) Bauteil (Gesamtansicht)

b) Prozessführung

c) EBH-Zone



c)

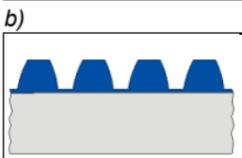
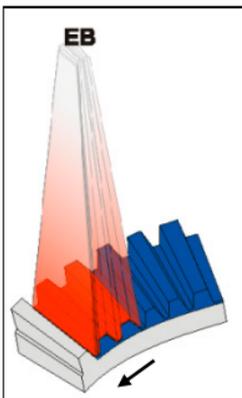
b)

Konturgerechtes 2-Stufen-EBH

Abb. 72

EBH von Stirnverzahnungsringen

- a) Bauteil
- b) Energieübertragungsfeld
- c) Härtebild (schematisch)

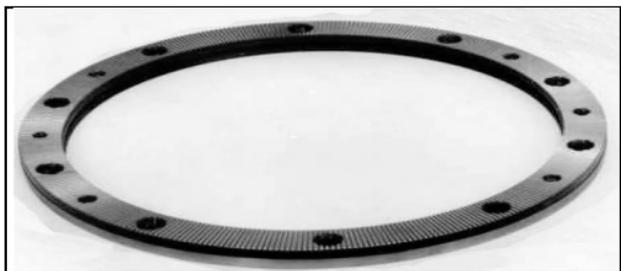


Dieser komplexen Aufgabe kann nur der Elektronenstrahl gerecht werden. Die EBH-Technologie muss in zwei Stufen durchgeführt werden. Der wesentliche Grund hierfür ist zum einen, dass die gesamte Oberflächenkontur hart sein muss, zum anderen aber nicht alle Bereiche unter ein und demselben Einstrahlwinkel zugänglich sind.

Des Weiteren muss relativ viel Energie eingebracht werden, um eine hinreichend tiefe und gleichmäßig dicke EBH-Schicht zu erzeugen. Das Bauteil würde in nur einem Behandlungsschritt zu stark aufgeheizt. Deshalb wird die Energie im ersten Durchlauf in einem Winkel von 90° und nach einer Zwischenkühlung im zweiten Schritt unter 45° übertragen (Abb. 71b). Auf diese Weise ist die EBH-Tiefe über die gesamte Oberflächenkontur nahezu konstant ($0,8 \pm 0,1$ mm, Abb. 71c). Die Überlappungszonen (Anlasszonen) werden an unkritische Stellen gelegt.

EB-Härten von Verzahnungen

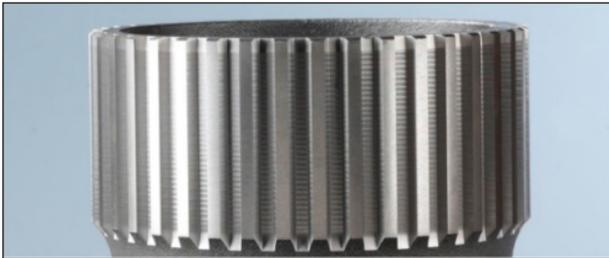
Für die Randschichtbehandlung von Verzahnungen gibt es in der Großserienfertigung ausgereifte und bewährte Lösungen (z. B. Einsatzhärten, Nitrocarburieren, Induktionshärten oder Nitrieren). Dennoch lässt sich das EBH für Sonderanwendungen technisch und wirtschaftlich vorteilhaft einsetzen. Bei Kleinverzahnungen (Zahnhöhe $\leq 1,5 - 2$ mm) kann mittels EB ein Durchhärten der Zähne bis unter den Zahngrund ausgeführt werden. Die Anwendung für diese Technologie bezieht sich vor allem auf stirnverzahnte Bauteile (Verzahnungsringe) mit Durchmesser bis zu 1000 mm (Abb. 72a).



a)

Das Bauteil dreht sich mit Vorschubgeschwindigkeiten von 0,5 - 2,5 (5) cm/s unter dem senkrecht einwirkenden gekrümmten Energieübertragungsfeld (CI-Technik, Abb. 72b), wodurch die Verzahnung in einem Durchlauf komplett EB-gehärtet wird (Abb. 72c). Die Behandlungsdauer liegt in Abhängigkeit vom Durchmesser und von der Vorschubgeschwindigkeit zwischen 20 und 60 s pro Teil. Der Einsatz des EBH ist in diesen Fällen deshalb von Vorteil, weil durch den exakt definierten Wärmeeintrag die Form- und Maßabweichungen im Vergleich zu den anderen o. g. Wärmebehandlungsverfahren minimal sind und allein durch die Montage (Aufschrauben) korrigiert werden können.

Eine andere Anwendung des EBH bezieht sich auf Spezialverzahnungen mit großen Modulen. Hier kommt bei geeigneten Abmessungen (Zahnbreiten bis 100 (120) mm, Zahnhöhe bis 10 (15) mm) vorzugsweise die Flashtechnik als Einzelzahnflanken-Behandlung zur Anwendung (Abb. 73).



a)

Die zum Elektronenstrahl außermittig stehende Drehachse des verzahnten Bauteils gewährleistet einen ungehinderten Zugang des exakt für jeweils eine Zahnflanke dimensionierten Energieübertragungsfeldes (Abb. 73c). Eine Zahnflanke wird in weniger als 0,5 s gehärtet (Abb. 73b).

Für ein Bauteil mit z. B. 50 Zähnen werden insgesamt (inklusive Bauteilbewegung) nicht mehr als 60 s benötigt. Bei genügend großer Zahndicke wird die zuerst gehärtete Flanke durch das EBH der Gegenflanke im zweiten Durchlauf nicht so stark thermisch beeinflusst, dass sie wieder angelassen wird.

CI- und Flash-Technik für Verzahnungen

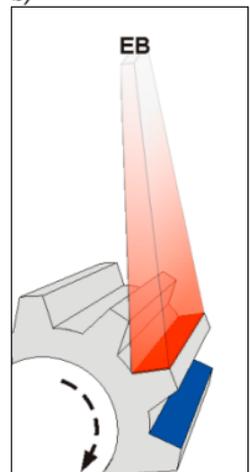
Abb. 73

EBH von Großverzahnungen (Einzelflankenhärtung)

- a) Bauteil
- b) Einzelzahn mit EB-gehärteten Flanken
- c) EBH-Flashtechnik



b)



c)

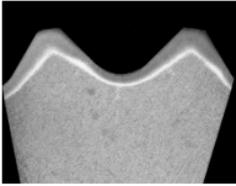


Abb. 74
Kettenradsegment
nach dem EBH

Eine dritte Anwendung des EBH für Verzahnungen sind Sonderverzahnungen mit flachen Flanken (z. B. Kettenräder), die dem Elektronenstrahl gut zugänglich sind. Dennoch erfordern die z. T. großen Höhenunterschiede und die stark variierenden Einstrahlwinkel zusätzliche Maßnahmen.

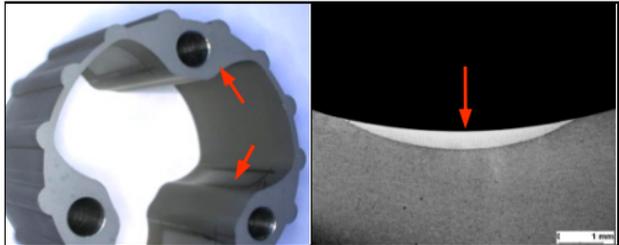
Die in Abb. 74 gezeigte Verzahnung wurde unter Nutzung der temperaturkontrollierten Leistungssteuerung (vgl. Kapitel 2.7) mit feststehendem Energieübertragungsfeld und rotierendem Rad EBgehärtet. Die Gleichmäßigkeit der Einhärtungstiefe ist der Hauptgrund für die Nutzung dieser Technologie.

EBH von Innenkonturen

Das EBH von Innenkonturen ist i. d. R. nicht trivial (vgl. Kap. 2.6). Bei dem in Abb. 75a dargestellten Tripodentopf aus 42CrMo4 (Antriebsstrang eines Rennwagens) können wegen des relativ großen Innendurchmessers die Stege durch Schrägeinstrahlung (Abb. 75c) mittels EB gehärtet werden (Abb. 75b). Diese werden durch eine translatorische (axiale) Bewegung des Gegenkörpers (Ringaußendurchmesser) linienförmig adhäsiv/abrasiv bzw. durch Kontaktermüdung beansprucht.



Abb. 75
EBH eines Tripoden-
topfes
a) Bauteil mit EBH-
Bahnen
b) EBH-Querschliff



a)

b)

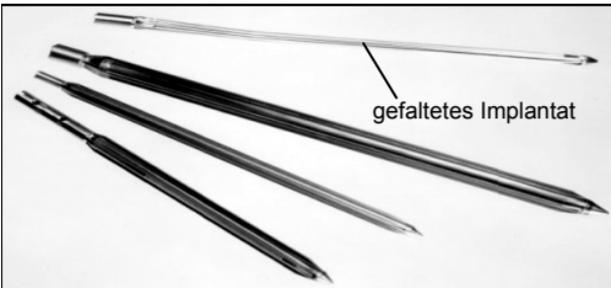
Die EBH-Bahnen werden nacheinander durch eine axiale Bewegung des um 45° gekippten Bauteils zum Energieübertragungsfeld erzeugt. Die 6 linsenförmigen Härtebahnen (Breite: 5 mm) haben mit $\text{SHD} = 0,5 \text{ mm}$ eine hinreichend große Einhärtungstiefe und ertragen auch zusätzliche dynamische Belastungen.

EB-Glühen von Implantaten

Ein industriell erfolgreich angewandtes Verfahren ist das lokale Rekristallisationsglühen von medizinischen Implantaten aus austenitischem Stahl (Abb. 76a) mit dem Ziel, das Umformverhalten in den behandelten Bereichen zu verbessern.

Das EB-Glühen (EBG) mit einem speziellen Energieübertragungsfeld (Abb. 76b) erfolgt nach der spanenden Bearbeitung, d. h. nach dem Herausarbeiten der 150 ... 350 µm dicken Membran zwischen den Stegen. Diese dünnen Bereiche werden so mit Energie beaufschlagt, dass die Oberflächentemperatur im gesamten Einwirkbereich konstant ist und das Material exakt bis an die Übergänge zu den Stegen rekristallisiert und damit entfestigt wird.

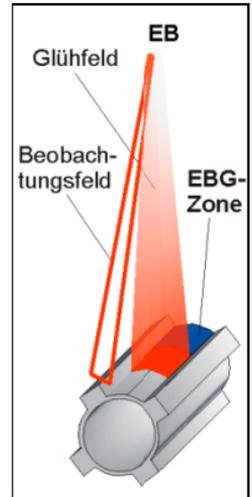
Um diese Forderungen zu erfüllen, wird in diesem Falle sowohl mit der automatischen Positionskontrolle als auch mit der temperaturkontrollierten Leistungsregelung gearbeitet (vgl. Kap. 2.7).



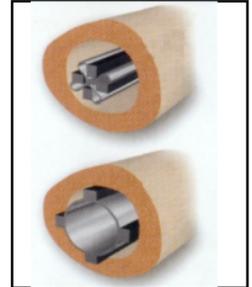
a)

Vor dem Einbringen des medizinischen Nagels in den gebrochenen Knochen werden die Implantate „gefaltet“ (Abb. 76c), dann im Knochen auf ihre ursprüngliche Form „aufgeweitet“ (Abb. 76c) und in ihrer Position fixiert. Nach dem Ausheilen der Knochenfraktur kann das Implantat nach Rückformung wieder aus den Knochen entfernt werden.

Es gibt keine andere Technologie als die EB-Glühbehandlung, die einen derart präzisen und für verschiedenste Implantatgrößen und -geometrien so flexibel anpassbaren Energieeintrag ermöglicht.



b)



c)

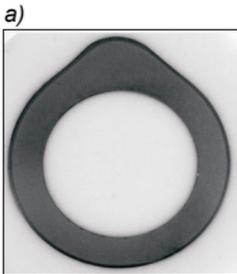
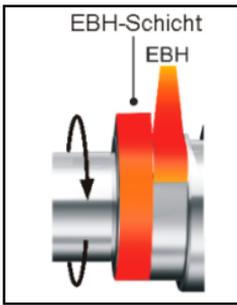
Abb. 76

EBG von medizinischen Implantatnägeln

a) Bauteile

b) Energieübertragungsbedingungen

c) gefaltetes und aufgeweitete Implantat



b)

Abb. 77

Schalt-Nockenwelle
(N+EBH)

- a) EBH-Prozess an
einem Wellensegment
b) EBH-Kontur
(Querschnitt)

Kombination N + EBH von Schalt-Nockenwelle

Eine Schalt-Nockenwelle (Abb. 77a) ist lokal unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Während die Lagerstellen und die Innenkontur der Welle insbesondere adhäsiv/abrasiven Verschleiß mit geringen Flächenbelastungen ertragen müssen, überlagern sich auf den Nockenkonturen bei hohen Pressungen verschiedene dynamische und statische Lastkollektive.

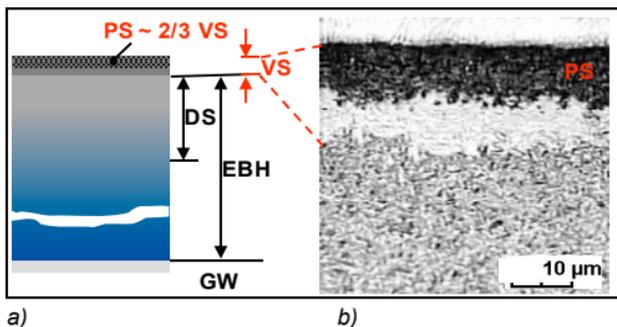
Während den zuerst beschriebenen Belastungen thermochemisch erzeugte Nitrierschichten mit einer 12...15 µm dicken Verbindungsschicht und einer $Nht_{\min} = 0,2$ mm gewachsen sind, müssen die Nocken zusätzlich mittels EB randschichtgehärtet werden (Abb. 77b). Dafür kommt die Kombinationsbehandlung N+EBH zur Anwendung (vgl. Kap. 2.2 und 3.3.1).

Dabei wird die Verbindungsschicht teilweise (max. $\frac{2}{3}$) in eine poröse Einlaufschicht (PS) umgewandelt (Abb. 78). Darunter verbleibt die weitgehend geschlossene verschleiß- und korrosionsbeständige Verbindungsschicht (VS) erhalten. Die Diffusionsschicht (DS) und ein Teil des Grundwerkstoffs (GW) wird bis in eine Tiefe von $SHD_{\min} = 0,4$ mm martensitisch umgewandelt (Abb. 78). Durch die Härtesteigerung im Grundwerkstoff, besonders im Bereich der Diffusionsschicht infolge der zusätzlichen Stickstoffanreicherung und durch den verbesserten Eigenschaftsgradienten, wirkt sich die Kombinationsbehandlung N+EBH sehr positiv bzgl. Verschleißbeständigkeit und Lebensdauer der Schalt-Nockenwelle aus.

Abb. 78

Schichtaufbau auf den
Nocken nach N+EBH

- a) Randschichtaufbau
(schematisch)
b) Randschichtgefüge



a)

b)

Kombination HSB + EBH von Justierschrauben

Die industrielle Anwendung der Kombination HSB+EBH steht erst am Anfang. Exemplarisch hierfür ist in Abb. 79a eine Justierschraube gezeigt, die im 1. Verfahrensschritt mittels PVD mit einer ca. 3 μm dicken TiAlN-Schicht versehen und deren Kappe unter Nutzung der EB-Flash-Technik im 2. Schritt gehärtet wurde (Abb. 79c). Um die Härtekontur gemäß Abb. 79b einzustellen, muss die Energieverteilung rotationssymmetrisch an die Bauteilkontur angepasst werden (Abb. 79c). Unabhängig davon, ob es sich um eine konvexe (Abb. 79a) oder konkave (Abb. 68a) Geometrie handelt, muss in den Randbereichen wegen des ungünstigen Einstrahlwinkels mehr Energie übertragen werden als im Zentrum (vgl. Abb. 68).

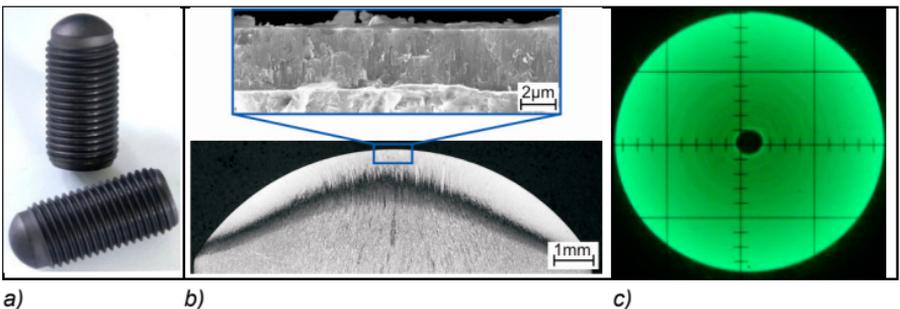
Das alleinige Ziel dieser Duplexbehandlung ist, die Stützwirkung des Matrixmaterials für die extrem harte Schicht (2500 HV_{0,05}) deutlich zu verbessern. Bei härtbaren Werkstoffen gelingt dies, allerdings sind die Hartstoffschichten unterschiedlich gut thermisch beständig. Durch die kurzen T-t-Intervalle bei Anwendung der EB-Flash-Technik ist dieser Aspekt eher unkritisch. Die Oxidationsempfindlichkeit einiger Hartstoffschichten spielt bei EB-Randschichttechnologien ebenfalls eine untergeordnete Rolle, da die EB-Behandlung im Vakuum stattfindet.

Für die Anwendung der Kombination HSB+EBH, insbesondere unter Nutzung von PVD-Beschichtungsprozessen ($T_B \sim 120 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$) auf der Basis von mittel- und hochlegierten Stählen sind weitere Applikationen serienreif vorbereitet.

Analoges Energieübertragungsfeld für konkave und konvexe Bauteilkonturen

Abb. 79

- Justierschraube
(PVD + EBH)
a) Bauteile (100Cr6)
b) EBH-Schicht Kappe
c) programmiertes Energieübertragungsfeld (Oszilloskop)



4.2.2 Flüssigphasenprozesse

Fortschritte bei EB-Flüssigpha- sen-Applikationen

Die Zahl der Anwendungsfälle von EB-Flüssigphasenprozessen, insbesondere derer, die Zusatzstoffe in den Prozess einbeziehen, hat zum gegenwärtigen Zeitpunkt bei weitem nicht die Applikationsbreite wie Festphasenprozesse erreicht. Das liegt vor allem daran, dass noch nicht genügend verallgemeinerungsfähiges Know-how verfügbar ist. Dennoch kann auf erste erfolgreiche Anwendungsbeispiele verwiesen werden.

Gegenüber dem Stand der Erstauflage dieses Buches vom Jahr 2003 ist ein spürbarer Fortschritt zu verzeichnen (siehe Folgeabschnitte). Durch zahlreiche Entwicklungs- und Vorserienarbeiten rücken weitere Applikationen in greifbare Nähe.

EB-Umschmelzhärten von Nockenwellen

Die EBU-Mehrbadtechnik (vgl. Kap. 2.4) wurde ursprünglich für Nockenwellen entwickelt. Die Nockenwelle rotiert und der EB überträgt seine Energie an mehreren Einwirkorten (Schmelzbädern) gleichzeitig auf den Nocken. Die Abstände der Bäder sind so ausgelegt, dass über die beanspruchte Nockenkontur eine geschlossene Umschmelzschicht entsteht (Abb. 80).

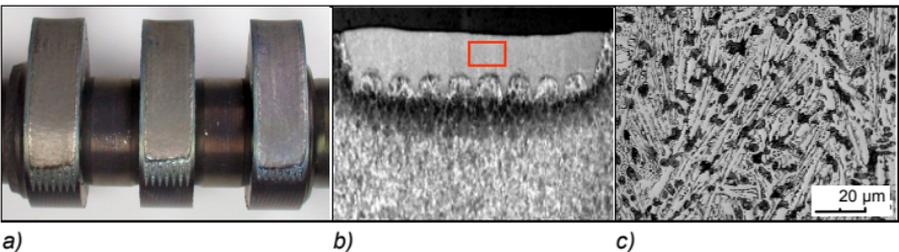
Abb. 80

Nockenwelle aus
Gusseisen nach dem
EBU

- a) Segment mit EBU-Schicht
- b) Querschliff
- c) Gefügausschnitt (Ledeburit)

Die Umschmelztiefe beträgt $0,8 + 0,3$ mm, um nach dem nachfolgend notwendigen Schleifen (Schleifaufmaß 0,3 - 0,4 mm) und Finishing eine genügend dicke, verschleißbeständige Schicht verfügbar zu haben.

Die zahnartige Ausbildung der Grenzfläche der EBU-Schicht zum Grundwerkstoff (Abb. 80b) verbessert die metallurgische Schichtanbindung.



Es ist im Falle gleicher bzw. fast gleicher Nockenkonturen benachbarter Nocken möglich, unter Nutzung der EB-Mehrspot-/Mehrbahn-Technik mehrere Nocken gleichzeitig zu behandeln. Die EB-Behandlungsdauer einer Nockenwelle (6-Zylinder / 4-Ventilmotor) liegt etwa bei 80...90 s. Beim Einsatz von für die Nockenwellenfertigung ausgelegten EB-Systemen (2 EB-Doppelkammer-Anlagen mit entsprechender Prozessperipherie) sind Taktzeiten von 35...45 s pro Nockenwelle realistisch.

Behandlung von mehreren Nocken gleichzeitig

Anzumerken ist, dass beim EBU von Gusseisen aufgrund der bereits in Kap. 3.2.1 beschriebenen Gründe ein Vorwärmen der Nockenwellen auf Temperaturen zwischen 380 °C und 450 °C erforderlich ist.

Die Merkmale des EBU im Vergleich zu Umschmelztechnologien mit anderen Energiequellen (Laser, Plasma) sind:

- hohe Prozesssicherheit
- hohe Prozessgeschwindigkeit
- Flexibilität bzgl. technologischer Umsetzung
- sehr kleine Randabstände der Umschmelzzone ($\leq 0,5$ mm)
- sehr feines Umwandlungsgefüge
- sichere Beherrschung auch komplizierter Nockenkonturen.

Vorteile der EBU-Technologien bei der Nockenwellenfertigung

EB-Umschmelzverdichten von Zylinderköpfen

Durch die extrem hohe thermozyklische Belastung von Zylinderköpfen besteht besonders im dünnen Stegbereich zwischen den Ventilöffnungen eine akute Rissgefahr. Es hat sich gezeigt, dass die Risse im speziellen Fall der Zylinderkopfstege stets von der Oberfläche ausgehen und sich ins Werkstoffinnere ausbreiten. Dies wird u. a. durch gießbedingte Poren und Lunken sowie spröde intermetallische Phasen mit kritischer Morphologie begünstigt.

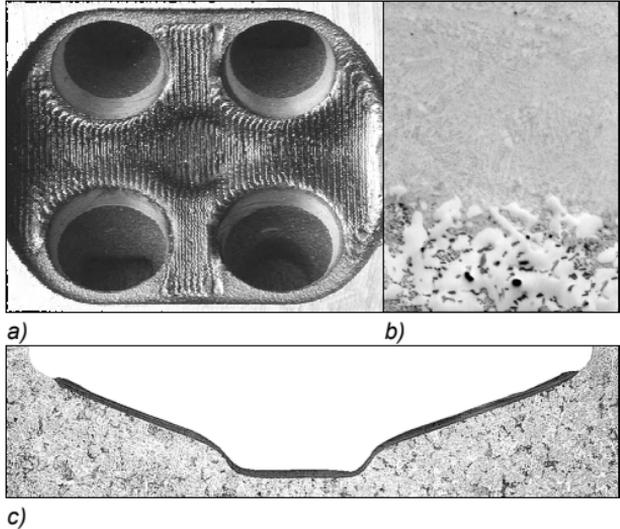
Mit einem EB-Umschmelzverdichten kann dem entgegengewirkt werden (Abb. 81).

Neben dem Verdichten der Randschicht (Beseitigung der o. g. Fehler) trägt ein extrem feinkörniges Gefüge (DAS: 1...8 μm , vgl. Abb. 35) dazu bei, dass sowohl die Rissentstehung als auch die Rissausbreitung deutlich verzögert werden können. Unter diesen Bedingungen liegt der Anrissort an Gussfehlern unterhalb der EBU-Schicht. Die Rissausbreitung erfolgt deutlich langsamer in Richtung Oberfläche durch die verdichtete Schicht hindurch.

Abb. 81

EB-Umschmelzverdichten von Zylinderköpfen aus einer Al-Legierung

- a) EB-umgeschmolzenes Flammdeck
- b) Übergang EBU-Schicht- zum Grundwerkstoffgefüge
- c) Makroschliff



Lebensdauererhöhung durch EB-Umschmelzverdichten

Das spezielle Umschmelzprofil (Abb. 81a) kann bei Verwendung der EB-Mehrbahntechnik mit hoher Geschwindigkeit erzeugt werden ($\leq 60 \text{ s} / 4\text{-Ventil-Zylinderkopf}$). Die Schicht ist bei entsprechender Programmierung der Strahlparameter über die gesamte Oberflächenkontur frei von Poren (Abb. 81b) und nahezu gleichmäßig tief (ca. 1 mm, Abb. 81b). Je nach Anforderung können auch Tiefen bis 8 mm eingestellt werden.

Thermozyklische Tests haben eine 3- bis 5-fach höhere Lebensdauer als herkömmliche Zylinderköpfe ergeben. An derart verdichteten Zylinderköpfen können konstruktive Veränderungen vorgenommen werden, wie z. B. Vergrößerung der Ventilöffnung, die zur Steigerung der Motorleistung beitragen.

EBUL der oberen Ringnut und des Muldenrandes von Kolben

Das EBUL im Bereich der oberen Ringnut von Kolben (Abb. 82a) ist die am längsten industriell genutzte EB-Flüssigphasentechnologie.

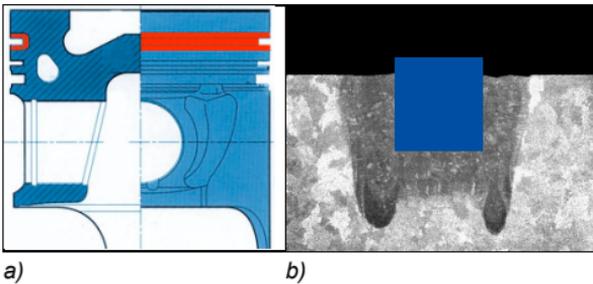


Abb. 82

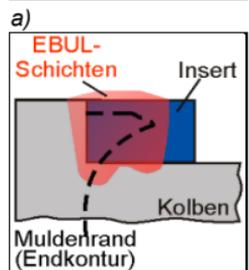
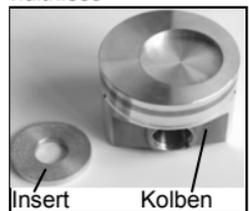
EBUL einer Kolbenringnut (Al-Kolbenlegierung + AlNi-Zusatz)
 a) Kolben EBUL-Zone (schematisch)
 b) EBUL-Zone mit eingelegetem Kolbenring

Der EB wird für diesen Anwendungsfall so abgelenkt, dass ein „2-Spot-Schmelzbad“ mit einer Breite von 5 bis 10 mm entsteht. Durch die Rotationsbewegung des Kolbens wird eine Umschmelzzone mit einem „doppelzahnartigen“ Querschnittsprofil bis in eine Tiefe von 5 bis 10 mm erzeugt (Abb. 82b). Durch ein einfaches EBU lassen sich infolge Gefügefeinerung Härtesteigerungen von ca. 50%, durch ein EBUL, z. B. mit Ni-Basis-Zusatzstoff bis zu 300% höhere Härtewerte im Vergleich zum Basismaterial erreichen. In einem nachfolgenden Prozessschritt wird die obere Ringnut herausgearbeitet, so dass der später eingelegte Ring komplett von verfestigtem Material umgeben ist (Abb. 82b). Diese EB-Behandlung ist eine Möglichkeit, die Lebensdauer von Kolben aus Al-Legierungen beträchtlich zu erhöhen.

Eine andere EB-Flüssigphasen-Randschichttechnologie, die Serienreife erlangt hat, ist das EBUL des Muldenrandes von Dieselmotorkolben aus Al-Werkstoffen. Dieser Bereich hat bei Hochleistungskolben eine in Abb. 83b gekennzeichnete Endkontur. Der Muldenrand ist höchsten mechanischen, tribologischen und thermischen ($\leq 380\text{ °C}$) Beanspruchungen ausgesetzt. Konventionelle Al-Kolbenlegierungen sind bzgl. derartiger Beanspruchungen überfordert. Eine Werkstoffsubstitution für den gesamten Kolben wäre eine sehr kostenintensive und zum

Abb. 83

Kolbenmuldenrand
 a) Kolbenrohling mit Insert
 b) geometrische Verhältnisse



b)

Teil dem Leichtbauprinzip entgegen wirkende Entwicklungsrichtung. Mit dem EBUL wird erreicht, dass die „Werkstoffsubstitution“ bei Beibehaltung der ansonsten üblichen Herstellungstechnologie (Gießen) lokal erfolgt.

Der Kolbenrohling hat auf dem Kolbendach eine kreisrunde Vertiefung, in die passgenau ein Zusatzstoff-Insert aus einem geeigneten thermisch beständigeren Al-Werkstoff eingelegt wird (Abb. 83a). Unter Anwendung einer 2-Bad-EB-Technologie mit versetzten Bädern (Abb. 84a) wird erreicht, dass der Zusatzstoff metallurgisch fehlerfrei mit dem Kolben verbunden wird (Bad 1) und die chemische Zusammensetzung am Muldenrand nahezu der des Inserts entspricht (Bad 2). Es stellen sich ausgehend vom Kolbenwerkstoff in Richtung späterem Muldenrand sowohl ein Härte- als auch ein Si-Konzentrationsgradient mit steigender Tendenz ein. Zusätzlich sind durch die hohen Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeiten die Gefügebestandteile in der EBUL-Schicht ca. 5...7fach feiner ausgebildet als im Kolbenwerkstoff (Abb. 84d).

Abb. 84

EBUL eines Kolbenmuldenrandes

- a) 2-Bad-EBUL
- b) EBUL-Schicht nach der Endbearbeitung
- c) Übergang EBUL-Schichten 1 und 2
- d) Übergang zum Grundwerkstoff

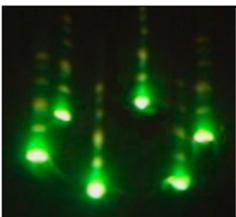
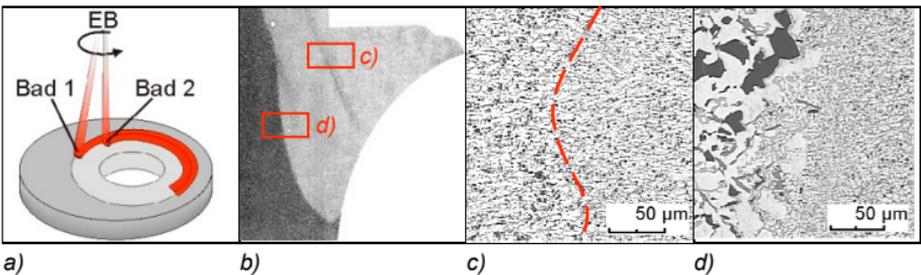


Abb. 85

Zirkularbewegung von Energieübertragungspots (Videostill)

EBUL von Ventilsitzen im Zylinderkopf-Flammdeck und auf Leichtbauventilen

Um dem Anspruch der Entwicklung einer bauteilspezifischen (ganzheitlichen) Behandlungstechnologie durch EBUL gerecht zu werden, müssen technologische Aspekte, wie **Strahlführungstechnik** ↔ **Deponiertechnologie** ↔ **EB-Randschicht-Technologie** optimiert sowie deren technische Umsetzung und wirtschaftliche Effizienz berücksichtigt werden.

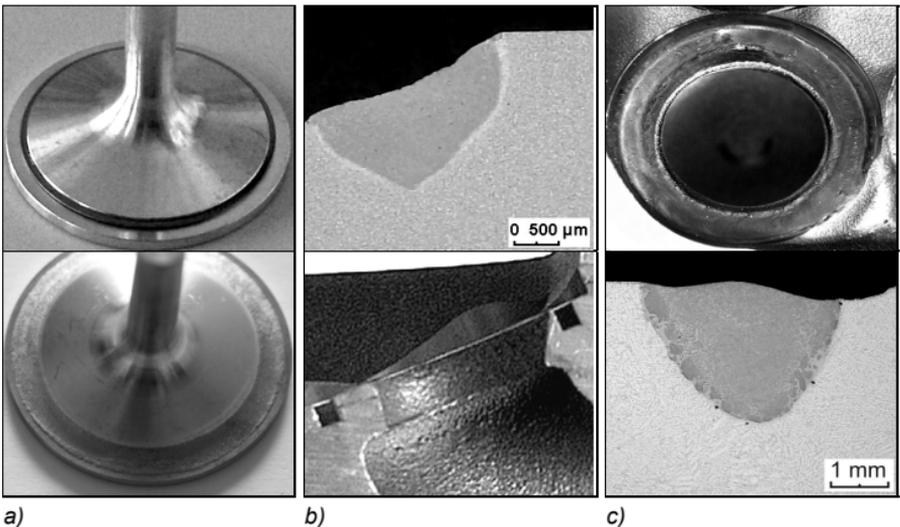
Grundsätzlich erweist sich für beide Komponenten

(Ventilsitz und Leichtbauventil) das EBUL mit rotationsymmetrischer Strahlführung (zirkulare Mehrspot-Technik, Abb. 85) als zielführend. Dabei ist das Bauteil unter dem Strahlaustritt zentrisch feststehend positioniert und die erforderliche rotatorische Bewegung der Energieübertragungssspots wird über die Strahlsteuerung realisiert (vgl. auch Abb. 14). Die Anzahl der Spots (Bäder) richtet sich nach dem Durchmesser der beanspruchten Kontur sowie den technologischen (und wirtschaftlichen) Erfordernissen.

Die Zusatzstoffdeponierung erfolgt beim EBUL von Ventilen bzw. Ventilsitzen nicht wie bei einer vergleichbaren Laserstrahl-Technologie mittels Draht oder Pulver, weil in diesem Falle jeweils nur mit einem Bad (Einbad-Technik) gearbeitet werden kann und somit die Wirtschaftlichkeit des Prozesses von vornherein begrenzt ist. Der gegenwärtige Stand der Technik beim EBUL ist die Verwendung von Sinterringen, die in eine Nut eingelegt (Abb. 85a) und dann zusammen mit dem Grundwerkstoff umschmelzlegiert werden (Abb. 85b, c). Die Ventilsitze müssen nach dem EBUL mechanisch nachbearbeitet werden. Technisch-technologische Herausforderungen sind die geometrischen Verhältnisse im beanspruchten Bereich der Komponenten (z. B. gerin-

Abb. 86

EBUL von kreisförmigen Bahnen auf Leichtbauventil (oben); auf Zylinderkopf-Flammdeck (unten)
 a) Bauteile und Zusatzstoffring
 b) Bauteile nach dem EBUL
 c) EBUL-Schichten (Querschnitt)



ge Dicke des Ventiltellers, unterschiedliche Wandstärken unterhalb des Ventil Sitzes). Dieser Situation kann einerseits durch die Auswahl der EB-Strahlführungstechnik und die sensible Anpassung der EB-Parameter Rechnung getragen werden, andererseits müssen (geringfügige) technologiegerechte konstruktive Änderungen insbesondere am Rohteil vorgenommen werden.

EB-Beschichten von Stempeln und Wellen

Das Auftragsschweißen (Auftragen, Beschichten, Cladding) ist eine technisch seit langem etablierte Technologie, allerdings nicht mittels EB.

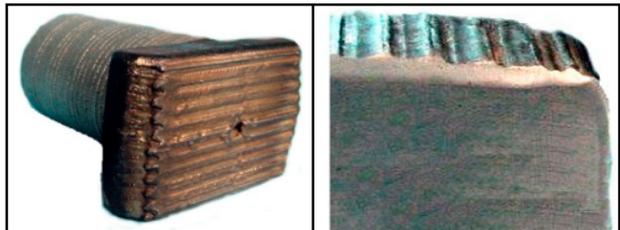
Auf dem in Abb. 87 gezeigten Stempel aus einem Vergütungsstahl ist mittels EB und Zusatzdraht eine Hartstoffschicht aufgetragen. Dieses Bauteil wird für den Einsatz im Bergbau nicht nachbearbeitet. Die deutlich ausgebildeten Auftragsraupen sind in diesem Fall sogar gewollt. Auch der Schaft ist mit einer Beschichtung versehen, die vor dem Einsatz des Bauteils jedoch mechanisch endbearbeitet werden muss.

Abb. 87

Stempel mit EBA-Schicht

a) Bauteil

b) Querschliff



a)

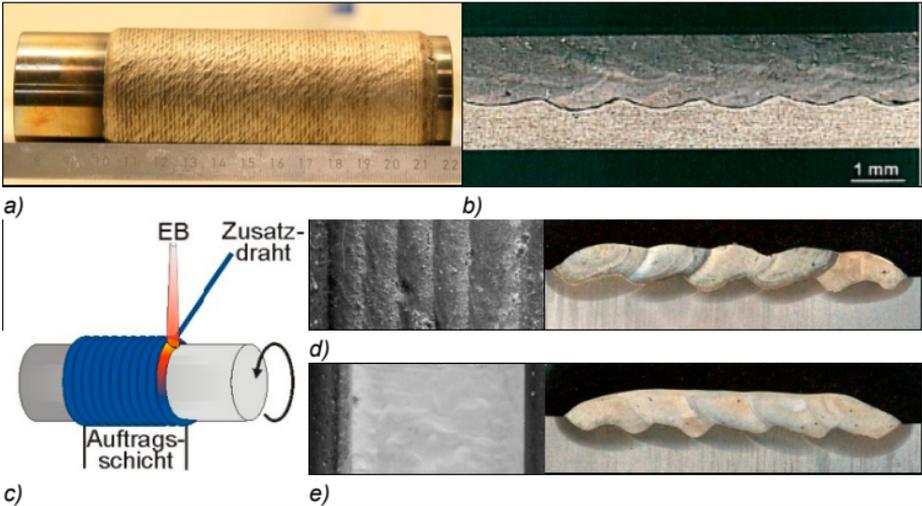
b)

Stark verschleißbeanspruchte Bereiche von Wellen werden bereits vor dem Ersteinsatz bzw. zur Regenerierung mit einer Schutzschicht (z. B. Stellite) versehen (Abb. 88a), die nach dem Auftragen auf Fertigteilmäß bearbeitet werden muss (Abb. 88b).

Derartige Schichten können auch mehrlagig aufgetragen werden. Das Verfahrensprinzip für die Behandlung des Umfangs rotations-symmetrischer Bauteile zeigt Abb. 88c. Die Behandlung von ebenen Flächen erfolgt durch Auftragen von nebenein-

ander liegenden Rauhen (Abb. 88d), die hier in einem zweiten Prozessschritt mittels EBU zusätzlich geglättet wurden (Abb. 88e).

Eine Produktivitätssteigerung dieser Technologie wird durch die Anwendung der EB-Mehrspot-Technik erreicht, entweder in Verbindung mit der Zuführung des Zusatzstoffs als Band oder mittels mehrerer Zusatzdrähte.



Vorteilhaft ist das EB-Auftragen dort einsetzbar, wo

- zusammenhängende Flächen unter Nutzung der Mehrbahntechnologie mit hohem Durchsatz
- Bauteil- bzw. Werkzeugkonturen sehr genau mit möglichst geringer thermischer Belastung der Umgebung
- Präzisionsteile aus Werkstoffen (Matrix- und/oder Zusatzmaterial), die einer inerten Atmosphäre bedürfen

beschichtet werden sollen.

Außer zum Verschleißschutz wird das Auftragen auch bei Bauteilen mit korrosiver Beanspruchung eingesetzt.

Abb. 88

EB-Auftragen

- a) Welle aus S355 mit Auftragsschicht*
- b) EBA-Schicht (Stellit, zweilagig, 1,5 mm)*
- c) Verfahrensprinzip*
- d) Flachprobe mit EBA-Schicht (einlagig, Fe-Basis-Zusatzstoff)*
- e) analog d) mit EB-Glätten*

5 Potenziale

**Wer keine
neuen Wege
beschreitet,
kann nicht zu
neuen Zielen
gelangen.**

Elektronenstrahl-Randschichttechnologien haben - abgesehen von einfach durchführbaren Einzelanwendungen (z. B. mit defokussiertem oder oszillierendem Strahl) - erst mit der Entwicklung der hochfrequenten programmierten Strahlablenkung (High-Speed-Scan-Technik) in den Jahren 1985/86 industrielle Bedeutung erlangt.

Die ständig steigenden Anforderungen der Industrie an Prozesse und Produkte und die rasche wissenschaftlich-technische Entwicklung waren und sind Motivation und Herausforderung für Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Gebiet der EB-Technologien neue Wege zu beschreiten, um mit aktuell verfügbaren und ständig weiterentwickelten Strahlführungstechniken bis dato nicht denkbare innovative Lösungen zu kreieren.

Die Vorzüge des EB beruhen vor allem auf seiner nahezu trägheitslosen Form- und Ablenkbarkeit. Der Fakt, dass Verlustelektronen intelligent zur Prozessoptimierung und Qualitätssicherung einsetzbar sind, ist ein weiteres Alleinstellungsmerkmal dieser Energiequelle. Der Elektronenstrahl kann

- sich selbst beobachten und unter Kontrolle halten (Online-Prozesskontrolle)
 - an mehreren Orten gleichzeitig arbeiten (Mehrspot-/Mehrfeld-/Mehrbad-Technik)
 - mehrere Prozesse gleichzeitig ausführen (Mehrprozess-Technologien)
- und das alles mit hoher Effizienz.

Im Falle von Festphasenprozessen ist die Entwicklung so weit vorangeschritten, dass mehrstufige Kombinationstechnologien bereits erfolgreich industriell genutzt werden (vgl. Kap. 4.2.1). Für Mehrprozess-Technologien liegt erforderliches Know-how (vgl. Kap. 2.4) für die Applikation vor.

Neue Anwendungsfelder werden für die Kombination von EB-Festphasenprozessen mit anderen EB-Technologien gesehen, wie z. B. das EB-Gravier-

härten. Bei dieser technologischen Variante wird ein EB-Oberflächengravieren mit dem EB-Härten entweder als Zwei- (Abb. 89a) oder Einstufen-Prozess (Abb. 89b) realisiert.

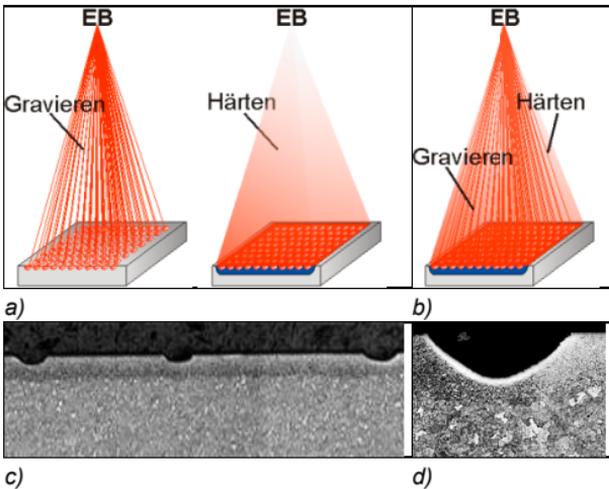


Abb. 89

EB-Gravierhärten

a) zweistufig

b) einstufig

c) Profilquerschnitt

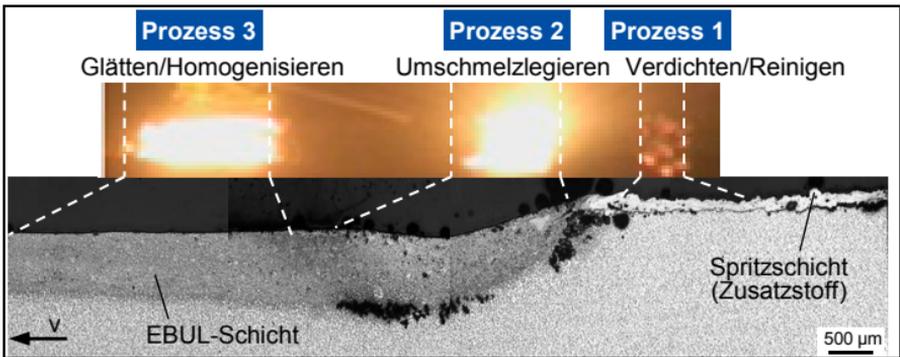
d) Ausschnitt aus c)

Üblicherweise entstehen beim Gravieren Aufwürfe (Abb. 89c), die nachträglich durch Schleifen entfernt werden müssen (Abb. 89d). Diese Verfahrenskombination kann dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn Belastungsbedingungen in bestimmten Situationen sehr unterschiedlich sind (Ein- oder Notlaufbedingungen).

Die Potenziale für EB-Flüssigphasen-Technologien sind auf Grund der wesentlich größeren Werkstoffpalette, für die sie einsetzbar sind, noch vielfältiger.

Es werden neben weiteren Applikationen zu EB-Flüssigphasen-Randschichtbehandlungen (EBUL, EBUD, EBUDL, EBA) zusätzliche Innovationen zu kombinierten und Mehrprozess-Technologien erwartet. Die Kombination EBUL + Nitrieren von Al-Legierungen (vgl. Kap. 3.4) ist dieser Entwicklungsrichtung zuzuordnen. Für mehrstufige Kombinationstechnologien besteht noch ein großer Freiraum.

Exemplarisch für das Innovationspotenzial von Mehrprozess-Technologien steht das Beispiel in Abb. 90. Bei diesem 2-stufigen Prozess wurde im 1. Verfahrensschritt der Zusatzstoff in Form einer



thermischen Spritzschicht (50...300 µm) vordeponiert, die dann im 2. Verfahrensschritt in Folge den drei in Abb. 90 genannten, lokal getrennten, hintereinander angeordneten und gleichzeitig ablaufenden Prozess-Teilschritten unterzogen wird. In den drei EB-Einwirkfeldern werden unterschiedliche Energieanteile auf das Material übertragen, was sich in variablen Einwirktiefen niederschlägt. Das resultiert aus den verschiedenen Zielstellungen, die mit den drei Prozess-Teilschritten verfolgt werden.

Auf Grund der spezifischen Temperatur-Zeit-Zyklen lassen sich bei Mehrprozess-Technologien wesentlich wirtschaftlicher ($< \frac{1}{3}$ der Gesamtbehandlungsdauer) Schichten herstellen, deren Eigenschaftsprofil das von vergleichbaren Schichten, die mittels Einprozess-EBUL erzeugt wurden, noch deutlich übertrifft. So sind mit dieser Technologie heute EBUL-Schichten mit Cu- bzw. Ni-Basis-Zusatzstoffen mit Härtewerten bis zu 600 HV_{0,1} rissfrei darstellbar.

Auch wenn EB-Randschichttechnologien inzwischen in der metallverarbeitenden Industrie etabliert sind, werden ihre technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Potenziale bei weitem noch nicht den Möglichkeiten entsprechend genutzt.

Die Autoren werden mit ihrem EB-Team am IWT der TU Bergakademie Freiberg und in Kooperation mit pro-beam und weiteren Partnern aus der Industrie sowie anderen Forschungseinrichtungen ihren Beitrag zur Weiterentwicklung der thermischen EB-Randschichtbehandlung leisten.

Abb. 90

EB-Mehrprozessstechnologie mit Energieübertragungsfeld (Videostill) und Schichtausbildung nach den jeweiligen Einzelprozessen (Momentaufnahme)



6 Anlagen

Symbolverzeichnis

APS	...	atmosphärisches Plasmaspritzen
AZ	...	Ausgangszustand
B	...	Borieren
C	...	Carburieren
CN	...	Nitrocarburieren
CVD	...	Chemical Vapour Deposition
DAS	...	Dendritenarmabstand
DS	...	Diffusionsschicht (Teil der Nitrierschicht)
E	...	Energie im Energieübertragungsfeld
EB	...	Elektronenstrahl
EBA	...	Elektronenstrahl-Auftragen
EBG	...	Elektronenstrahl-Glühen
EBH	...	Elektronenstrahl-Härten
EBU	...	Elektronenstrahl-Umschmelzen
EBUD	...	Elektronenstrahl-Umschmelzdispersieren
EBUDL	...	Elektronenstrahl-Umschmelzdispersionslegieren
e_F	...	Flächenenergie
GH	...	Grenzhärte
GW	...	Grundwerkstoff
H+A	...	Härten und Anlassen
HSB	...	Hartstoffbeschichtung
I_S	...	Strahlstrom
L_c	...	Kritische Last ermittelt im Ritztest mit steigender Last
N	...	Nitrieren
N	...	Normalglühen
Nht	...	Nitriertiefen
P	...	Perlitisieren
PVD	...	Physivcal Vapour Deposition
SHD	...	Einhärtungstiefe nach dem EBH
Sht	...	Schmelzhärtetiefe nach dem EBU
Sh	...	Schmelztiefe nach dem EBUL, EBUD
t	...	Zeit
T	...	Temperatur
T_A	...	Anlasstemperatur
T_B	...	Beschichtungstemperatur
T_{oU}	...	obere Umwandlungstemperatur
T_S	...	Schmelztemperatur
T_{uU}	...	untere Umwandlungstemperatur
v	...	Vorschubgeschwindigkeit
VS	...	Verbindungsschicht (Teil der Nitrierschicht)
W	...	Weichglühen
WB	...	Wärmebehandlung
WEZ	...	Wärmeeinflusszone
w_R	...	Ritzenergiedichte
ZW	...	Zusatzwerkstoff

Verzeichnis weiterführender Literatur

- [1] Schiller, S.; Panzer, S.: Härten von Oberflächenbahnen mit Elektronenstrahlen. In: HTM 42(1987), 5, S. 293-300
- [2] Panzer, S.; Müller, M.: Härten von Oberflächen mit Elektronenstrahlen. In: HTM 43(1988), 2, S. 103-111
- [3] Zenker, R.: Wärmebehandlung mit dem Elektronenstrahl. In: Härtereitechnische Mitteilungen 45(1990), 4, S. 230-243
- [4] Zenker, R.: Gefüge- und Eigenschaftsgradienten beim Elektronenstrahlhärten. In: Härtereitechnische Mitteilungen 45(1990), 5, S. 307-319
- [5] Nestler, M.-C.: Randschichtumschmelzen und -umschmelzlegieren von Eisenwerkstoffen mit dem Elektronen- bzw. dem Laserstrahl. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 1991
- [6] Nestler, M.-C.; Spies, H.-J.: Erzeugung von Randschichten erhöhter Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit durch Umschmelzlegieren. In: HTM 47(1992), 3, S. 137-146
- [7] Zenker, R.: Electron beam surface modification. Part 1: EB hardening. In: Laser in Engineering (1992), 1, S. 121-144
- [8] Zenker, R.; Frenkler, N.; John, W.; Günther, U.: Flüssigphasen-Randschichtbehandlung mit dem Elektronenstrahl. In: HTM 47(1992), 3, S. 153-159
- [9] Zenker, R.: Härten mit dem Elektronenstrahl. In: Stahl (1992), 2, S. 57-60
- [10] Spies, H.-J.; Zenker, R.; Nestler, M.C.: Electron beam treatment of surface layers. In: Journal of Advanced Science 5(1993), 2; S. 50-60
- [11] John, W.; Zenker, R.: Verschleißschutz durch Elektronenstrahlrandschichtgehärten. In: Schmierungstechnik 21(1994), 4, S. 100-102
- [12] Reinhold, S.; Spies, H.-J.: Untersuchung zum Verschleißverhalten von elektronenstrahlrandschichtumgeschmolzenem Schnellarbeitsstahl. In: Härtereitechnische Mitteilungen 49(1994) 1, S. 5-11
- [13] Zenker, R.; Frenkler, N.; Schammer, S.; Reinhold, S.: Elektronenstrahl-Randschicht-Umschmelzen. In: Stahl (1996), 1, S. 38-41
- [14] Rödel, J.: Beitrag zur Modellierung des Elektronenstrahlhärtens von Stahl. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1996
- [15] Zenker, R.: Electron beam surface treatment. Industrial Application and Prospects. In: Surface Engineering 12(1996), 4, S. 9-12
- [16] Spies, H.-J.: Erhöhung des Verschleißschutzes von Eisenwerkstoffen durch die Duplex-Randschichttechnik. In: Stahl und Eisen 117(1997), 6, S. 45-52
- [17] Spies, H.-J.; Zenker, R.; Bernhard, K.: Duplex-Randschichtbehandlung von metallischen Werkstoffen mit EB-Technologien. In: HTM 53(1998), 4, S. 222-227
- [18] Franke, R.; Haase, I.; Zenker, R.; Hoffmann, K.; Friedel, H.-G.: Zum tribologischen Verhalten der elektronenstrahlbehandelten Al-Legierung AlSi12CuNi. In: Tribologie und Schmierungstechnik 45(1998), 6, S. 36-41
- [19] Reinhold, S.: Randschichtveredlung von gesintertem Schnellarbeitsstahl mit energiereicher Strahlung. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1998
- [20] Zenker, R.; Frenkler, N.; Ptaszek, T.: Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung. In: HTM 54(1999), 3, S. 143-149
- [21] Buchwalder, A.: Beitrag zur Flüssigphasen-Randschichtbehandlung von Bauteilen aus Aluminiumwerkstoffen mittels Elektronenstrahl. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, (2007)

- [22] Zenker, R.; Krug, P.; Buchwalder, A.; Dickmann, T.; Frenkler, N.; Thiemer, S.: Elektronenstrahlschweißen und -profilieren von sprühkompaktierten Zylinderlaufbuchsen aus Al-Si-Werkstoffen. In: VDI-Berichte 1906, S. 259-274
- [23] Zenker, R.: Elektronenstrahl-Mehrspot-Technik - Neue Möglichkeiten und Perspektiven für die Randschichtbehandlung, In: Stahl (2007), 2, S. 26-28
- [24] Zenker, R.; Sacher, G.; Buchwalder, A.; Liebich, J.; Reiter, A.; Häßler, R.: Hybrid technology hard coating – electron beam surface hardening. In: Surface and Coatings Technology, 202(2007), S. 804-808
- [25] Zenker, R.: Surface Treatment using Electron Beam Technologies – Developments, Results and Current State of Application on an Industrial Scale: In: Journal of the Japan Society for Heat Treatment 49(2009), S. 137-140
- [26] Sacher, G.; Zenker, R.; Frenkler, N.; Kimme, T.: Kombinierte Randschichtwärmebehandlung – PVD-Hartstoffbeschichtung in Verbindung mit dem Elektronenstrahl- oder Laserstrahlhärten. In: HTM 64(2009) 1, S. 20-27
- [27] Sacher, G.; Zenker, R.; Spies, H.-J.: Duplex Treatment of Tools and Components: Previous or Subsequent Electron Beam Hardening of Thermochemically-Treated and PVD Hard-Coated Steels for Tools and Components. In: Materials and Manufacturing Processes 24(2009), S. 800-805
- [28] Zenker, R.; Buchwalder, A.; Klemm, M.: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der thermischen Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung von Aluminium-Legierungen. In: HTM 64(2009), 4, S. 208-214
- [29] Dalke, A.; Buchwalder, A.; Zenker, R.; Biermann, H.: Duplex surface layer treatment of Al alloy: electron beam alloying and plasma nitriding. In: International Heat Treatment & Surface Engineering 3(2009), 4, S. 147-152
- [30] Franke, R.; Haase, I.; Klemm, M.; Zenker, R.: Friction and Wear Behaviour of Electron Beam Surface Treated Aluminium Alloys AlSi10Mg(Cu) and AlSi35 (DISPAL S 220). In: Wear 269 (2010)11-12, 2010, S. 921-929

Danksagung

Autoren und Herausgeber danken ganz besonders den Mitarbeitern des EB-Teams am IWT der TU Bergakademie Freiberg – Dipl.-Ing. G. Grumbt, Dipl.-Ing. K. Rührich, Dipl.-Ing. M. Klemm, Dipl.-Ing. M. Mangler, Dipl.-Ing. A. Jung, Dipl.-Ing. A. Dalke, Dipl.-Ing. J. Gleißner – die Ergebnisse aus ihren wissenschaftlichen Arbeiten zur Verfügung gestellt haben und damit dazu beitragen, im vorliegenden Buch den aktuellsten Entwicklungsstand zu präsentieren. Ein großes Dankeschön gilt auch den Entwicklungsingenieuren von pro-beam, insbesondere in Chemnitz/Neukirchen, die unter der früheren Leitung des Autors Prof. Dr.-Ing. habil. R. Zenker maßgeblich an der Erarbeitung einiger Ergebnisse beteiligt waren, sowie Herrn Dr.-Ing. Th. Krüssel (pro-beam technologies) für die Bereitstellung von Ergebnissen zum EB-Auftrag. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Spies sei herzlich dafür gedankt, dass der EB am IWT „Fuß fassen“ und in einer über 20-jährigen intensiven, freundschaftlichen Zusammenarbeit, insbesondere auf dem Gebiet der Kombinationsbehandlungen zahlreiche Beiträge zum wissenschaftlichen Fortschritt entstanden. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. R. Franke und Frau Dr.-Ing. I. Haase der IMA GmbH Dresden verbindet ebenso wie Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Krug der FH Köln eine langjährige und erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Autoren, aus der ebenfalls Resultate ihren Eingang in die Monographie gefunden haben. Nicht zu vergessen sei auch ein Dankeschön an die Mitarbeiter des IWT der TU Bergakademie Freiberg unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Biermann für die Ausführungen vielfältiger analytischer Untersuchungen sowie die für die Realisierung von Forschungsprojekten unerlässlichen Arbeiten. Schließlich sei Frau H. Hoffmann für die vielen unterstützenden Feinarbeiten am Manuskript gedankt.

Der Herausgeber dieses Buches

pro-beam AG & Co. KGaA

Behringstraße 6

82152 Planegg/München

Tel. +49 89 899 233-0

Fax +49 89 899 233-11

e-mail muenchen@pro-beam.com

www.pro-beam.com



Die Firma pro-beam wurde 1974 als Elektronenstrahl (EB)-Lohnbearbeiter mit zwei Mitarbeitern und zwei gebrauchten Maschinen von Dietrich von Dobeneck gegründet. Heute, nach über 35 Jahren kontinuierlichen Wachstums, hat pro-beam den Status eines mittelständischen Unternehmens erreicht und beschäftigt knapp 300 Mitarbeiter an fünf inländischen und zwei ausländischen Standorten. Die Firma betreibt über 30 EB-Schweißmaschinen, fünf EB-Perforationsanlagen, sowie mehrere Laser und PACVD- (Plasma Activated Chemical Vapour Deposition) Beschichtungsanlagen.

Die EB-Anlagen verfügen über Strahlleistungen im Bereich von 1 bis 45 kW und Kammergrößen von 0,05 bis 730 m³. Die Nd:YAG- und CO₂-Laser werden im Leistungsbereich von 150 W bis 12 kW betrieben. Die PACVD-Anlagen mit Kammergrößen von 50 l bis 1m³ arbeiten mit RF-Generatoren (13,56 MHz) im Leistungsbereich von 1,2 bis 5,5 kW.

pro-beam bearbeitet an bis zu sieben Tagen in der Woche Aufträge für seine Kunden, teilweise im Dreischichtbetrieb. Damit ist pro-beam der größte EB-Lohnbearbeiter weltweit und die einzige Firma, die jahrzehntelange Erfahrung in den möglichen Anwendungsgebieten Schweißen, Bohren, Schneiden und Veredelung von Oberflächen durch Härten, Umschmelzen und Auflegieren, sowie Auftragschweißen mittels Laser- und Elektronenstrahl-Technik hat.

Basierend auf den Erfahrungen aus der Vielfalt der Lohnanwendungen der ersten 25 Jahre hat pro-beam verschiedene Anlagentypen auf dem Gebiet der Elektronenstrahltechnik bis zur Serienreife entwickelt und ist seit über 10 Jahren nun auch als Hersteller von EB-Anlagen am Markt. pro-beam verfügt über eine Strahltechnik höchster Qualität und eine optimal leistungsfähige Strahlsteuerungstechnik. Auch qualitative Analysen der Schweißnähte über die Auswertung verschiedener Signale können mit den Strahlerzeugersystemen realisiert werden.

Derzeit entwickelt die pro-beam-Gruppe mit über 50 Ingenieuren und externen Instituten weitere Anlagen und Verfahren, um dem Elektronenstrahl neue Anwendungsfelder zu erschließen. Ziel ist es, die technologische Spitzenstellung des EB-Schweißens, des EB-Bohrens, der EB-Randschichttechnologien sowie die Spitzenstellung als Anlagenlieferant

auszubauen und damit die Marktführerschaft der Firmengruppe zu festigen.

pro-beam ist in den einschlägigen Arbeitskreisen von DVS, IIW und DIN vertreten.

Die Philosophie des Unternehmens ist, die Kunden ausgehend von der verfahrenstechnischen Problemstellung bis zum Ende des Lebenszyklus eines Produktes partnerschaftlich zu begleiten. Zunächst gilt es dabei, den Kunden in Bezug auf Themen der Verfahrenstechnik z. B. im Bereich der Fügetechnik qualifiziert zu beraten. Hierbei liegt der Schwerpunkt der innovativen Lösungen von pro-beam auf dem Einsatz strahltechnischer Verfahren, wobei die hauseigenen Erfahrungen sowohl aus der Laser- als auch aus der Elektronenstrahltechnik im Zentrum der Expertise stehen. Sind die technischen Themen alle entsprechend adressiert, kann der Kunde Probeteile, Prototypen und Erstmuster bei pro-beam fügen lassen. Neben Einzelteilen können dann auch ganze Serien an den Lohnstandorten der Gruppe bearbeitet werden. Der Lieferservice reicht von der Sofort- bis zur Just-in-time-Lieferung, wenn nötig rund um die Uhr.

Wünscht ein Kunde die Übertragung der Lohnfertigung in eine eigene Inhouse Fertigung, so kann pro-beam ihm die entsprechende Anlagentechnik ggf. speziell entwickeln, bauen und liefern. Eine reibungslose Übertragung der Prozessparameter von der Lohnfertigung in die Eigenfertigung ohne entsprechende Qualitätsrisiken ist dabei unmittelbar gewährleistet. Auch eine zeitweise Vermietung von Anlagentechnik an unsere Kunden mit einem kurzzeitig hohen Bedarf an Produktionskapazitäten im eigenen Haus wurde bereits mehrfach realisiert.

Wenn für ein auslaufendes Produkt bei Kunden mit pro-beam EB-Anlagen noch eine entsprechende Versorgung sicher gestellt sein muss, so kann diese wiederum problemlos über unseren Lohnbetrieb streng bedarfsorientiert und kostengünstig abgesichert werden.

pro-beam hat sich mit dem beschriebenen strategischen Ansatz von der reinen Entwicklung technischer Lösungen im Bereich der Strahltechnik hin zu einem Dienstleister für komplexe Produktionsanforderungen mit höchsten Qualitätsansprüchen entwickelt. Zahlreiche Qualitätszertifikate zeugen von der entsprechenden Expertise.

Für die Zukunft geht pro-beam davon aus, dass mit innovativen strahltechnischen Bearbeitungsverfahren noch viele technische Herausforderungen bewältigt werden können. Die Voraussetzungen zu schaffen, um dies zu erreichen sowie dann die einzelnen Themen erfolgreich umzusetzen, das entspricht unserem Anspruch.

Mit diesem Buch hoffen wir, einen Beitrag zum Verständnis und zur Verbreitung der faszinierenden Elektronenstrahl-Technik zu leisten. Sie war und ist die zentrale Kernkompetenz von pro-beam.

Die Autoren dieses Buches

Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Zenker

Zenker Consult
Johann-Sebastian-Bach-Str. 12
09648 Mittweida
Tel. +49 (0)3727 / 61 35 81
Fax +49 (0)3727 / 61 35 73
E-mail contact@zenker-consult.de



Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Zenker war und ist auf verschiedenen Teilgebieten der Werkstofftechnik tätig und hat sich in den letzten 25 Jahren besonders auf die Entwicklung und industrielle Anwendung zunächst von Laser- und Plasma-, dann vor allem von Elektronenstrahl-Technologien konzentriert. Diese Arbeiten haben maßgeblich dazu beigetragen, dass der im vorliegenden Buch zusammengefasste Entwicklungs- und Anwendungsstand der EB-Randschichttechnologien erreicht wurde und so präsentiert werden kann. Der Autor unterstützt und begleitet als Berater Entwicklungsprojekte und den Technologietransfer. Durch seine Lehr- und Forschungstätigkeit auf den Gebieten Randschichttechnik und Strahltechnologien an der TU Bergakademie Freiberg und durch seine Mitarbeit in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien wirkt Prof. Zenker sowohl fachlich als auch strategisch an der Nutzbarmachung des Innovationspotenzials moderner Werkstofftechnologien, insbesondere von Elektronenstrahlverfahren aktiv mit. Zahlreiche Veröffentlichungen, Vorträge und Patente dokumentieren sein Know-how.

Dr.-Ing. Anja Buchwalder

TU Bergakademie Freiberg
Institut für Werkstofftechnik
Gustav-Zeuner-Str. 5
09599 Freiberg
Tel. +49 3731 39-3543
Fax +49 3731 39-13543
E-mail anja.buchwalder@ww.tu-freiberg.de



Dr.-Ing. Anja Buchwalder ist seit mehr als 10 Jahren auf dem Gebiet der EB-Technologien tätig und seit 2007 verantwortlich für den Laborbereich EB-Technik und -Technologien am IWT der TU Bergakademie Freiberg. Neben ihren Forschungsaktivitäten, insbesondere auf dem Gebiet der thermischen und thermochemischen Randschichttechnik ist sie in der studentischen Ausbildung mit der Vorlesung „Wärmebehandlung und Randschichttechnik“ betraut sowie in verschiedenen Seminaren und Praktika tätig. Die Autorin kann auf zahlreiche Publikationen verweisen.

