

# Moderne Beschichtungsverfahren

*Herausgegeben von  
Fr.-W. Bach, K. Möhwald,  
A. Laarmann, T. Wenz*

**DGM**

Deutsche Gesellschaft  
für Materialkunde e.V.



WILEY-  
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA



## **Moderne Beschichtungsverfahren**

*Herausgegeben von*  
*Fr.-W. Bach, K. Möhwald,*  
*A. Laarmann, T. Wenz*

**DGM**



**WILEY-  
VCH**

Die Beiträge dieses Buches entstammen einer Fortbildungsveranstaltung der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde in Kooperation mit dem Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover und dessen Geschäftsbereich Fortis in Witten

# Moderne Beschichtungsverfahren

*Herausgegeben von  
Fr.-W. Bach, K. Möhwald,  
A. Laarmann, T. Wenz*

**DGM**

Deutsche Gesellschaft  
für Materialkunde e.V.



**WILEY-  
VCH**

**WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA**

## Herausgeber

### **Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach**

Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Schönebecker Allee 2  
30823 Garbsen

### **Dipl.-Ing. Andreas Laarmann**

Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

### **Dr.-Ing. Kai Möhwald**

Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

### **Dipl.-Ing. Thomas Wenz**

Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

## Bildnachweis für Umschlagbild

Bild oben links

### **HVOF-Beschichtungsprozess einer Welle**

*Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover*

Bild oben rechts

### **Kühlkörper mit kaltgasgespritzter Cu-Schicht**

*OBZ Dresel & Grasmann GmbH, Bad Krozingen*

Bild mitte links

### **Sol-Gel-Antireflexschicht aus Glas**

*Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE),  
Freiburg*

Bild mitte rechts

### **Enthalpiesondemessung am 3-Kathodenbrenner „Triplex II“**

*Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover*

Bild unten links

### **PN-PVD Beschichtungsprozess**

*Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover*

Bild unten rechts

### **Schlagmesser mit auftragelöteter Verschleiß- schicht (Brazecoat)**

*Innobraze GmbH, Esslingen*

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

## Bibliografische Information

### **Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

© 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Printed in the Federal Republic of Germany.

**Satz** K+V Fotosatz GmbH, Beersfelden

**Druck** betz-druck GmbH, Darmstadt

**Bindung** J. Schäffer GmbH i.G., Grünstadt

**ISBN** 3-527-30977-2

## Vorwort

Technologische Entwicklungen führen sowohl in der Luft- und Raumfahrt als auch in anderen Hochtechnologiebereichen zu ständig steigenden Anforderungen an die Bauteiloberflächen. Oberflächen, die z. B. tribologischen Beanspruchungen standhalten sollen oder auch spezielle Eigenschaften hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, elektrischer Leitfähigkeit bzw. des optischen Verhaltens aufweisen sollen, sind im Allgemeinen nur mit Hilfe von Beschichtungsverfahren zu realisieren.

Im vorliegenden Buch werden industriell eingesetzte Beschichtungsverfahren aus den Bereichen des Auftragschweißens und -lötens, des Plasma-, Lichtbogen- und Flammgespritzens, der Sol-Gel-Technik sowie der Dünnschichttechnologien Chemical-Vapor-Deposition und Physical-Vapor-Deposition vorgestellt. Besondere Bedeutung wird dabei der Verbindung von Prozess- und Werkstofftechnologie im Hinblick auf das Herstellen anforderungsgerechter Schichten beigemessen.

Neben industriell relevanten Beschichtungsverfahren werden neu entwickelte, an der Schwelle zur industriellen Einführung stehende Beschichtungsverfahren aufgezeigt. Beispielhaft sind hier Verfahren zur Diamantsynthese, das Kaltgas-spritzen oder das Verarbeiten von „nanosized particles“ genannt.

Ziel des Buches ist es, Ingenieure und Techniker aus den Bereichen Entwicklung, Konstruktion und Fertigung in die Lage zu versetzen, das Potential von Oberflächenschutzschichten und den zugehörigen Beschichtungsverfahren für ihren Arbeitsbereich abschätzen zu können, so dass die Beschichtungstechnologie integraler Bestandteil in der Entwicklung, Konstruktion und Fertigung wird.

Die Herausgeber  
Oktober 2004





## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** V

**Autorenverzeichnis** XVII

### **Auswahl von Oberflächenbehandlungsverfahren** 1

*W. Tillmann und E. Vogli*

- 1 Einleitung 1
- 2 Anforderungen an Bauteiloberflächen 2
- 3 Auswahl von Beschichtungs- und Oberflächentechnologien 4
- 4 Verfahren zur Randschichtmodifikation und zum Schichtauftrag 6
- 5 Ökonomische Bewertung von Oberflächenbehandlungsverfahren 9
- 6 Zusammenfassung und Ausblick 12
- 7 Literatur 13

### **Nichtrostende austenitische Stähle –**

#### **Steigerung der Verschleißfestigkeit durch Randschichthärtung** 15

*M. Wägner*

- 1 Einleitung 15
- 2 Grundlagen 15
  - 2.1 Wärmebehandlung 15
    - 2.2.1 Randschichthärteverfahren 17
  - 2.2 Die Werkstoffgruppe der nichtrostenden Stähle 18
    - 2.1.1 Einteilung der nichtrostenden Stähle 18
    - 2.1.2 Nichtrostende austenitische Stähle 20
- 3 Verfahren zum Randschichthärtung von austenitischen nichtrostenden Stählen 22
  - 3.1 Kolsterisieren 23
    - 3.1.1 Einfluss auf das Gefüge 23
    - 3.1.2 Einfluss auf die chemische Zusammensetzung 25
    - 3.1.3 Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften 25
    - 3.1.4 Verschleißbeständigkeit 25
    - 3.1.5 Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit 26
  - 3.2 Kolsterisieren + PVD-Beschichtung 28

3.2.1	Schichthftung	29
3.2.2	Verschleißbeständigkeit	30
3.2.3	Ermüdungsfestigkeit	31
4	Anwendungen	32
5	Ausblick	33
6	Literatur	33

### **Grundlagen der Dünnschichttechnologie** 35

*M. Nicolaus, M. Schäpers*

1	Einleitung	35
2	Einteilung der Dünnschichtverfahren	35
3	Allgemeine Merkmale der Beschichtungsverfahren aus der Dampfphase	36
3.1	PVD – physical vapour deposition	36
3.2	CVD – Chemical Vapour Deposition	40
4	Eigenschaften eines Plasmas	41
4.1	Niederdruckplasmen	41
5	Aufbau der Schichten	42
5.1	Schichtstruktur	42
6	Galvanische und außenstromlose Abscheidungsverfahren	44
6.1	Einleitung	44
6.2	Grundbegriffe	44
6.2.1	Der Elektrolyt	44
6.2.2	Elektrode, Elektrodenreaktion, Elektrodenpotenzial	45
6.2.3	Elektrolyse und Faraday'sche Gesetze	47
6.2.4	Überspannung	48
6.3	Außenstromlose Metallabscheidung	49
6.4	Galvanische Metallabscheidung	51
6.5	Galvanische Metallabscheidung aus nichtwässrigen Lösungsmitteln	52
6.6	Zusammenfassung und Ausblick	54
7	Literatur	55

### **Innovation in der PVD-Technologie für Hochleistungsanwendungen** 57

*E. Lugscheider, K. Bobzin, M. Maes, A. Erdle*

1	Einleitung	57
2	Marktsituation	58
3	Anwendungsbeispiele	59
3.1	Werkzeugbeschichtung für die Zerspanung	60
3.2	Werkzeugbeschichtung für das Urformen	61
3.3	Bauteilbeschichtung – Kunststoffe	64
3.4	Bauteilbeschichtung – Maschinenelemente	65
3.5	Bauteilbeschichtung für Hochtemperaturanwendungen	67
4	Zusammenfassung	68
5	Literatur	69

**Entwicklung und Stand der thermischen CVD-Hartstoffbeschichtung 71***A. Szabo*

- 1 Einleitung 71
- 2 Die Anfänge der CVD-Hartstoffbeschichtung 72
- 3 Grundlagen des Abscheidungsprozesses 72
- 3.1 Chemischer Mechanismus 72
- 3.2 Interdisziplinäre Grundlagen 73
- 3.3 CVD-Anlagen- und Reaktortechnik 73
- 4 Kombinationsschichten 76
- 5 Material- und Schichteigenschaften 80
- 5.1 Physikalische Eigenschaften der Schichtmaterialien 81
- 5.2 Vergleich der Schichtkombinationen 81
- 5.2.1 TiC-TiN klassisch 81
- 5.2.2 TiN-TiC harmonisch 81
- 5.3 Auswirkung der thermischen Dilatation 83
- 5.4 Auswirkung der Härten 83
- 6 Leistung der Hartstoffschicht, Anwendungen 84
- 6.1 Der Verschleißwiderstand 86
- 6.2 Maßhaltige Wärmebehandlung 87
- 7 CVD-Beschichtungen bei niedrigen Temperaturen 87
- 7.1 Moderate Temperatur, MT-CVD 87
- 7.2 Plasmaunterstützte, PA-CVD 89
- 8 Zusammenfassung und Ausblick 90
- 9 Literatur 91

**CVD-Diamant-Dünnschichten nach dem Hot-Filament-Verfahren 95***O. Lemmer, R. Cremer, D. Breidt, M. Frank*

- 1 Einleitung 95
- 2 Abgrenzung der verschiedenen Diamantwerkzeuge 95
- 3 Substratvorbehandlung 96
- 4 Herstellung von CVD-Diamant 98
- 5 Das Hot-Filament-Verfahren 99
- 6 Beeinflussung der Eigenschaften von CVD-Diamant 100
- 7 Industrielle Abscheidung von CVD-Diamant 102
- 8 Nachbehandlung von CVD-Diamant 102
- 9 Anwendungsgebiete diamantbeschichteter Werkzeuge 103
- 10 Zusammenfassung und Ausblick 107
- 11 Literatur 108

**Einführung in die galvanotechnischen Beschichtungsverfahren 111***W. Olberding*

- 1 Einleitung 111
- 2 Die Grundlagen der Galvanotechnik am Beispiel der Nickelabscheidung 111
- 2.1 Die Struktur galvanischer Nickelschichten 114

2.2	Der Abscheidemechanismus	115
2.3	Die Stromdichteverteilung	117
2.4	Die Außenstromlose Beschichtung am Beispiel des Nickels	118
3	Überblick über die Anlagentechnik	120
3.1	Das Trommelgalvanisieren	120
3.2	Das Gestellgalvanisieren	122
3.3	Das Bandgalvanisieren	123
3.4	Das Tampongalvanisieren	125
3.5	Das Glockengalvanisieren	125
4	Überblick über die einzelnen Verfahrensschritte des Galvanisierens	126
4.1	Entfetten	126
4.2	Die Aktivierung oder Dekapierung	126
4.3	Die „Verschleppung“	127
4.4	Beschichten von passiven Materialien wie Edelstahl und Aluminium	127
4.5	Zusammenfassung zur Vorbehandlung	128
5	Mikrostrukturierung und Galvanoforming	128
6	Zusammenfassung	129
7	Literatur	129

### **Grundlagen der thermischen Spritztechnik, Flamm- und Lichtbogenspritzen** 131

*Z. Babiak, T. Wenz*

1	Einleitung	131
2	Grundlagen der thermischen Spritztechnik	131
2.1	Aufbau thermisch gespritzter Schichten	133
2.2	Haftung thermisch gespritzter Schichten	134
3	Flammspritzen	136
3.1	Verfahren des Flammspritzens	136
3.2	Werkstoffe und Anwendungen	137
4	Lichtbogenspritzen	140
4.1	Verfahren des Lichtbogenspritzens	140
4.2	Sonderverfahren des Lichtbogenspritzens	144
4.3	Werkstoffe und Anwendungen	145
5	Zusammenfassung und Ausblick	147
6	Literatur	147

### **Spritzzusatzwerkstoffe** 151

*J. Beczkowiak*

1	Einleitung	151
2	Herstellungsbedingte Eigenschaften von Spritzwerkstoffen	151
2.1	Pulverherstellverfahren	152
3	Werkstoffauswahl in Bezug auf die Anwendung der Beschichtung	157
3.1	Werkstoffe für den Verschleißschutz	157

- 3.2 Werkstoffe zum Korrosionsschutz 158
- 3.3 Werkstoffe für die Bio-Technologie 158
- 3.4 Werkstoffe für Sonderanwendungen 158

### **Hochgeschwindigkeitsflammspritzen 161**

*O. Brandt*

- 1 Einleitung 161
- 2 Charakteristische Merkmale 162
- 2.1 HVOF-Brenner 162
- 2.2 Brennstoffe und Prozessparameter 164
- 2.3 Zusatzwerkstoffe 165
- 3 Technische Randbedingungen 166
- 4 Anwendungen 167
- 5 Prozessüberwachung- und Steuerung 170
- 6 Entwicklungstrends 171
- 6.1 Anwendungstechnik 171
- 6.2 Schichtwerkstoffe 172
- 6.3 Prozesstechnik 173
- 6.4 Verfahrenstechnik 173
- 7 Zusammenfassung 173
- 8 Literatur 174

### **Triplex II – Die Entwicklung eines wirtschaftlichen Hochleistungsplasmaspritzsystems für höchste Qualitätsansprüche selbst unter extremen Produktionsbedingungen 177**

*H. Zimmermann, H.-M. Höhle*

- 1 Einleitung 177
- 2 Grundlagen des Plasmaspritzens 179
- 3 Aufbau konventioneller Plasmabrenner 183
- 4 Entwicklung des Hochleistungs-Dreikathodenplasmabrenners Triplex 187
- 5 Triplex II – eine neue Ära in der Plasmaspritztechnologie 191
- 6 Erfolgsmeldungen aus der industriellen Praxis 194
- 7 Zusammenfassung 198
- 8 Literatur 198

### **Anlagentechnik, Gasversorgung und mögliche Anwendungen beim Kaltgasspritzen 199**

*W. Krömmer, P. Heinrich*

- 1 Einführung 199
- 2 Anlagentechnik Aufbau 199
- 2.1 Druckkammer mit Düse 199
- 2.2 Steuerschrank 200
- 2.3 Touch Screen 201
- 2.4 Gaserhitzer LINSPRAY® 202
- 2.5 Gasversorgung zum Kaltgasspritzen 203
- 2.6 Heliumrückgewinnung 205

3	Applikationen	206
4	Zusammenfassung	209
5	Literatur	209

**Diagnostik an thermischen Beschichtungsverfahren** 211

*J. Prehm*

1	Einleitung	211
2	Einteilung der Diagnoseverfahren	211
3	Methoden zur Partikeldiagnostik	211
3.1	Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	211
3.2	Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA)	214
3.3	Laser-zwei-Focus-Verfahren (L2F)	215
3.4	Particle-Image-Velocimetry (PIV)	215
3.5	In-flight-Partikeldiagnostik	218
4	Methoden zur Plasma/Heißgasdiagnostik	219
4.1	Enthalpiesondenverfahren	219
5	Methoden zur Online-Prozesskontrolle	220
5.1	Particle-Flux-Imaging (PFI)	220
6	Zusammenfassung und Ausblick	222
7	Literatur	223

**Beschichtungen über Sol-Gel Prozesse** 225

*M. Kursawe, R. Anselmann, V. Hilarius, G. Pfaff*

1	Einleitung	225
1.1	Hintergrund und Ursprung der Sol-Gel Chemie	225
1.2	Möglichkeiten zur Materialherstellung über Sol-Gel Techniken	226
2	Schichtausbildung über Sol-Gel am Beispiel $\text{SiO}_2$	227
2.1	Schichten über $\text{SiO}_2$ -Sole aus Salzen der Kieselsäure	227
2.2	Schichten aus $\text{SiO}_2$ -Solen aus Si-Alkoxiden	228
3	Anwendungsbeispiele	230
3.1	Von der Idee zum Produkt: Entwicklung einer Antireflexbeschichtung für Glas	230
3.2	Anwendung der nasschemischen Beschichtungstechniken für eine vielfach genutzte Produktgruppe: Perlglanzpigmente und Effektpigmente	233
3.2.1	Glanz und Farbe	235
3.2.2	Herstellung von Perlglanzpigmenten mit Interferenzfarben	235
3.3	Effektpigmente aus $\text{SiO}_2$ -Flakes	238
3.4	Beschichtung von $\text{SiO}_2$ -Spheres für kosmetische Formulierungen	239
4	Ausblick	240
5	Literatur	241

**Schmelztauchüberzüge 243***W. Bleck, D. Beste*

- 1 Korrosionsschutzmechanismen 243
- 2 Zustandsdiagramme Fe-Zn, Fe-Al, Al-Zn und Fe-Al-Zn 246
- 3 Metallische Überzüge 249
- 4 Anlagentechnik 251
- 4.1 Aufbau einer Feuerbeschichtungsanlage 251
- 4.2 Reaktionspartner in der Zinkschmelze 253
- 4.3 Oberflächennachbehandlung 255
- 5 Qualitätssicherung 256
- 5.1 Prüfung der mechanischen Eigenschaften 256
- 5.2 Prüfung der Korrosionseigenschaften 256
- 6 Zusammenfassung und Ausblick 258
- 7 Literatur 260

**Auftragelötete Verschleißschutzschichten 261***H. Krappitz*

- 1 Einleitung 261
- 2 Löten 261
- 2.1 Grundlagen 261
- 2.2 Reparaturlöten 264
- 2.3 Beschichten durch Auflöten von Sinterhartmetall 265
- 2.4 Löten von Keramik 267
- 2.5 Auflöten von Hartstoffpartikeln 269
- 3 Das BrazeCoat-Verfahren 270
- 3.1 Beschichten mit Lot- und Hartstoff-Matten (BrazeCoat M) 271
- 3.2 Beschichten mit Lot- und Hartstoff-Suspension (BrazeCoat S) 273
- 4 Zusammenfassung 274
- 5 Literatur 275

**Einsatz von Beschichtungsverfahren in der Löttechnik 277***K. Möhwald, U. Holländer, A. Laarmann*

- 1 Einleitung 277
- 2 Lotapplikation mittels thermischen Spritzens 278
- 3 Lotapplikation mittels galvanisch/chemischer Verfahren 282
- 4 Lotapplikation mittels PVD-Verfahren 284
- 5 Zusammenfassung und Ausblick 286
- 6 Literatur 286

**Oberflächenschutz durch Auftragschweißen 287***A. Gebert, B. Bouaifi*

- 1 Einleitung 287
- 2 Verfahrensvarianten 288
- 3 Charakterisierung auftraggeschweißter Beschichtungen 289
- 4 Auftragschweißverfahren 292

4.1	Unterscheidungsmerkmale	292
4.2	Werkstattverfahren (E-Hand, Gasflamme)	294
4.3	Verfahren mit Schlackeabdeckung	295
4.3.1	Elektroschlacke Auftragschweißen (RES)	295
4.3.2	Unterpulver-Auftragschweißen	296
4.4	Schutzgasschweißverfahren	296
4.4.1	Wolfram-Inertgas Auftragschweißen (WIG-Verfahren)	297
4.4.2	Metall-Schutzgas-Verfahren	298
4.4.3	Plasma-Verfahren (PTA-Verfahren)	300
4.4.4	Plasma-MIG-Verfahren	304
4.5	Widerstands-Rollennaht-Verfahren	305
4.6	Laserauftragschweißen	305
5	Auftragschweißwerkstoffe	308
5.1	Korrosionsschutzwerkstoffe	308
5.1.1	Korrosionsbeständige Eisenbasiswerkstoffe	309
5.1.2	Nickellegierungen	310
5.2	Verschleißschutzwerkstoffe	310
5.2.1	Nickelhartlegierungen	312
5.2.2	Eisenhartlegierungen	313
5.2.3	Kobalhartlegierungen	317
5.2.4	Aluminium-Pseudolegierungen	319
6	Zusammenfassung und Ausblick	320
7	Literatur	321

### **Zerstörungsfreie Prüfung und Bewertung von Beschichtungen** 323

*W. Reimche*

1	Einleitung	323
2	Schichtsysteme	323
2.1	Herstellverfahren	323
2.2	Schichteigenschaften	324
2.3	Prüfplanung	325
3	Verfahren zur Ermittlung der Schichtdicke	325
3.1	Geometrische Bauteilvermessung	328
3.2	Differenzgewichtsbestimmung vor und nach der Beschichtung	328
3.3	Schichtdickenbestimmung nach dem Haftkraftverfahren	328
3.4	Schichtdickenbestimmung mit akustischen Verfahren	329
3.5	Schichtdickenbestimmung mit magnetinduktiven Messverfahren	331
3.6	Schichtdickenbestimmung nach dem Wirbelstromverfahren	332
3.7	Schichtdickenanalyse mit dem Röntgenfluoreszenzverfahren	336
3.8	Schichtdickenanalyse mit dem Beta-Rückstreuverfahren	336
4	Eigenspannungen in Schichtsystemen	337
5	Nachweis von Fehlstellen in der Beschichtung	339
5.1	Nachweis offener Fehler in Beschichtungen – Farbeindringverfahren	339



5.2	Nachweis von Schichtablösungen/Delaminationen – Ultraschallverfahren	340
5.3	Nachweis von Schichtablösungen/Delaminationen – Lock-in-Thermographie	341
5.4	Nachweis innerer Schichtfehler – Wirbelstromprüfung	343
5.5	Bestimmung der Schichthaftung mit elektromagnetischen Prüfverfahren	345
6	Zusammenfassung und Ausblick	346
7	Literatur	346

**Autorenregister** 349

**Sachregister** 351



## Autorenverzeichnis

Dr. rer. nat. RALF ANSELMANN  
Merck KgaA  
Pigments Optics Division  
Mainzer Straße 41  
64579 Gernsheim

Dr.-Ing. ZENON BABIAK  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Prof. Dr.-Ing.  
FRIEDRICH-WILHELM BACH  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Schönebecker Allee 2  
30823 Garbsen

Dipl.-Ing. JOACHIM BECZKOWIAK  
Sales and Market Development  
Praxair Services GmbH & Co KG  
Am Mühlbach 13  
87487 Wiggensbach

Dipl.-Ing. DANIEL BESTE  
RWTH Aachen  
Institut für Eisenhüttenkunde  
Intzestraße 1  
52072 Aachen

Prof. Dr.-Ing. WOLFGANG BLECK  
RWTH Aachen  
Institut für Eisenhüttenkunde  
Intzestraße 1  
52072 Aachen

Dr.-Ing. KIRSTEN BOBZIN  
RWTH Aachen  
Lehr- und Forschungsgebiet  
Werkstoffwissenschaften  
Augustinerbach 4–22  
52062 Aachen

Dr.-Ing. BELKACEM BOUAIFI  
VALCO Edelstahl und Schweißtechnik  
GmbH  
Heinrich-Sohnrey-Straße 15  
37520 Osterode

Dr.-Ing. OLIVER BRANDT  
Becon Technologies GmbH  
Feuerwerkerstrasse 39  
3602 Thun  
Schweiz

Dipl.-Ing. DIRK BREIDT  
CemeCon AG  
Research & Development  
Adenauerstr. 20 B 1  
52146 Würselen

Dr. rer. nat. RAINER CREMER  
CemeCon AG  
Research & Development  
Adenauerstr. 20 B 1  
52146 Würselen

Dipl.-Ing. ANJA ERDLÉ  
RWTH Aachen  
Lehr- und Forschungsgebiet  
Werkstoffwissenschaften  
Augustinerbach 4–22  
52062 Aachen

MARTIN FRANK  
CemeCon AG  
Research & Development  
Adenauerstr. 20 B 1  
52146 Würselen

Dipl.-Ing. ANDREAS GEBERT  
CeWOtec gGmbH  
Lassallestraße 14  
09117 Chemnitz

Dipl.-Ing. PETER HEINRICH  
Linde AG  
Geschäftsbereich Linde Gas  
Carl-von-Linde-Straße 25  
85716 Unterschleißheim

Dr. rer. nat. VOLKER HILARIUS  
Merck KgaA  
Pigments Optics Division  
Mainzer Straße 41  
64579 Gernsheim

Dr.-Ing. HANS-MICHAEL HÖHLE  
Sulzer Metco Europe GmbH  
Am Eisernen Steg 18  
65795 Hattersheim

Dr. rer. nat. ULRICH HOLLÄNDER  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Dr.-Ing. HARALD KRAPPITZ  
Innobraze GmbH  
Fritz-Müller-Straße 97  
73730 Esslingen

Dipl.-Ing. WERNER KRÖMMER  
Linde AG  
Geschäftsbereich Linde Gas  
Carl-von-Linde-Straße 25  
85716 Unterschleißheim

Dr. rer. nat. MONIKA KURSAWE  
Merck KgaA  
Pigments Optics Division  
Mainzer Straße 41  
64579 Gernsheim

Dipl.-Ing. ANDREAS LAARMANN  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Dr.-Ing. OLIVER LEMMER  
CemeCon AG  
Research & Development  
Adenauerstr. 20 B 1  
52146 Würselen

Prof. Dr. techn. ERICH LUGSCHEIDER  
RWTH Aachen  
Lehr- und Forschungsgebiet  
Werkstoffwissenschaften  
Augustinerbach 4–22  
52062 Aachen

Dipl.-Ing. MICHAEL MAES  
RWTH Aachen  
Lehr- und Forschungsgebiet  
Werkstoffwissenschaften  
Augustinerbach 4–22  
52062 Aachen

Dr.-Ing. KAI MÖHWALD  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Dr. rer. nat. MARTIN NICOLAUS  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Dr. rer. nat. WERNER OLBERDING  
IGOS Institut für Galvano-  
und Oberflächentechnik GmbH  
Grünewalder Str. 29–31  
42657 Solingen

Dr. rer. nat. GERHARD PFAFF  
Merck KgaA  
Pigments Optics Division  
Mainzer Straße 41  
64579 Gernsheim

Dipl.-Phys. JENS PREHM  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Dr.-Ing. WILFRIED REIMCHE  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Zerstörungsfreie Prüfverfahren  
Lise-Meitner-Straße 1  
30823 Garbsen

Dr. rer. nat. MELANIE SCHÄPERS  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Dr. rer. nat. ANDREAS SZABO  
CeWOTec gGmbH  
Lassallestraße 14  
09117 Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.  
WOLFGANG TILLMANN  
Universität Dortmund  
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie  
Leonhard-Euler-Str. 2  
44227 Dortmund

Dr.-Ing. EVELINA VOGLI  
Universität Dortmund  
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie  
Leonhard-Euler-Str. 2  
44227 Dortmund

Dipl.-Ing. MARTINA WÄGNER  
Bodycote Hardiff BV  
Paramariboweg 45  
7333 PA Apeldoorn  
Niederlande

Dipl.-Ing. THOMAS WENZ  
Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
Geschäftsbereich Fortis  
Stockumer Straße 28  
58453 Witten

Dr.-Ing. HARALD ZIMMERMANN  
Sulzer Metco AG (Switzerland)  
Rigackerstrasse 16  
5610 Wohlen  
Schweiz



## Auswahl von Oberflächenbehandlungsverfahren

W. Tillmann, E. Vogli, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, Universität Dortmund

### 1

#### Einleitung

Moderne Verfahren der Oberflächentechnik sind als fester Bestandteil moderner Produktionsprozesse nicht mehr wegzudenken. Insbesondere führen gestiegene Anforderungen an technische Produkte dazu, dass Verfahren der Oberflächentechnik oftmals als der zentrale Motor zur Realisierung der Produkthanforderungen angesehen werden. Für den Entwicklungsingenieur ergeben sich damit zwei essentielle Fragestellungen: Zum einen müssen Bauteilanforderungen in Eigenschaftsprofile von Werkstoffen und Oberflächen übersetzt werden. Zum anderen muss die gewählte werkstofftechnologische Lösung in eine entsprechende Produktionskette integriert werden. Dabei spielen neben den geforderten Bauteilanforderungen natürlich auch noch Produktionskosten sowie ökologische Aspekte eine maßgebliche Rolle.

Die große Bedeutung der Oberflächentechnik leitet sich dabei nicht nur aus den Produkthanforderungen, sondern auch aus volkswirtschaftlichen Kennzahlen ab. Betrachtet man die beiden wesentlichen Anforderungsfelder der Oberflächentechnik – Tribologie und Korrosion –, so gehen makroökonomische Schätzungen davon aus, dass tribologisch bedingte Schäden ein Volumen von ca. 1% des Brutto sozialprodukts der Bundesrepublik Deutschland ausmachen, korrosiv bedingte Schäden erreichen sogar ein volkswirtschaftliches Schadensvolumen von 3,5–4,2% des BSP. Im Jahr 1992 entsprach dies 100 Mrd DM. Allein vor diesem Hintergrund muss die Oberflächentechnik als eine der Schlüsseltechnologien der Produktionstechnik angesehen werden.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, eine mögliche Methodik zur Auswahl von Verfahren zur Oberflächenveredlung auf Basis bestehender Produkthanforderungen vorzustellen und unterschiedliche Oberflächenbehandlungsverfahren hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten und verfahrensspezifischer Charakteristika gegeneinander abzugrenzen.

## Anforderungen an Bauteiloberflächen

Ausgangspunkt einer systematischen Auswahl von geeigneten Oberflächenbehandlungen ist die Erfassung aller Aufgaben einer Werkstückoberfläche vor dem Hintergrund des angestrebten Bauteileinsatzes. Nach Haefler [3] stellt die Oberfläche den Ort, der für alle Wechselwirkungen mechanischer, thermischer, chemischer und elektrochemischer Art eines Bauteils mit seiner Umgebung verantwortlich ist, dar. Daraus leiten sich die Hauptaufgaben einer technischen Oberfläche ab:

- Korrosionsschutz
- Verschleißschutz
- Definiertes tribologisches Verhalten
- Optisches Verhalten
- Dekoratives Verhalten
- Angepasstes Grenzflächenverhalten (z. B. zur Realisierung von Fügeaufgaben).

Hierzu kommen noch Sonderaufgaben, die insbesondere bei hochspezialisierten Produkten von Bedeutung sein können. So können beispielsweise von den Oberflächen mikrotechnischer Bauteile spezielle elektromagnetische Eigenschaften gefordert werden.

Letztendlich werden die Aufgaben der Bauteiloberflächen durch das jeweilige Beanspruchungsprofil des fertigen Produkts bestimmt. Abb. 1 zeigt die wesentlichen Produktbeanspruchungen unterteilt nach Volumen- und Oberflächenbeanspruchung.

Die wesentlichen Beanspruchungen, die seitens der Oberflächentechnik beherrscht werden müssen, sind im Bereich des Maschinenbaus der Verschleiß und

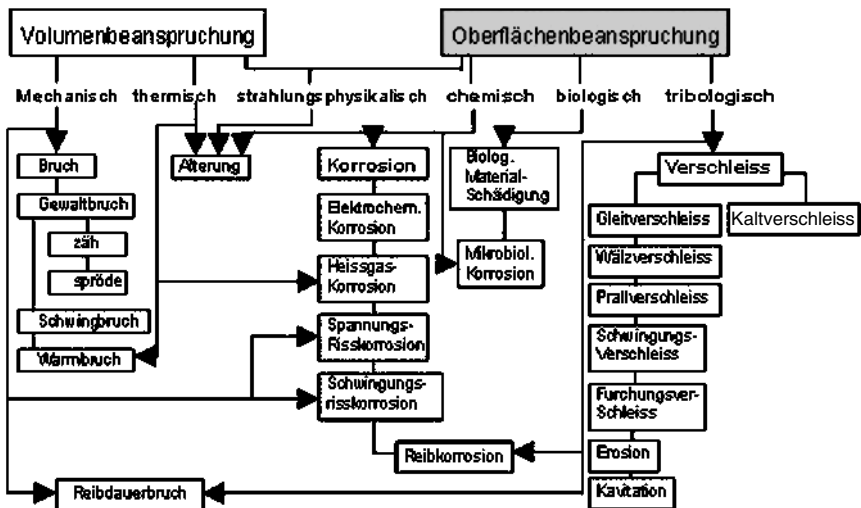


Abb. 1 Wesentliche Volumen- und Oberflächenbeanspruchung von Bauteilen



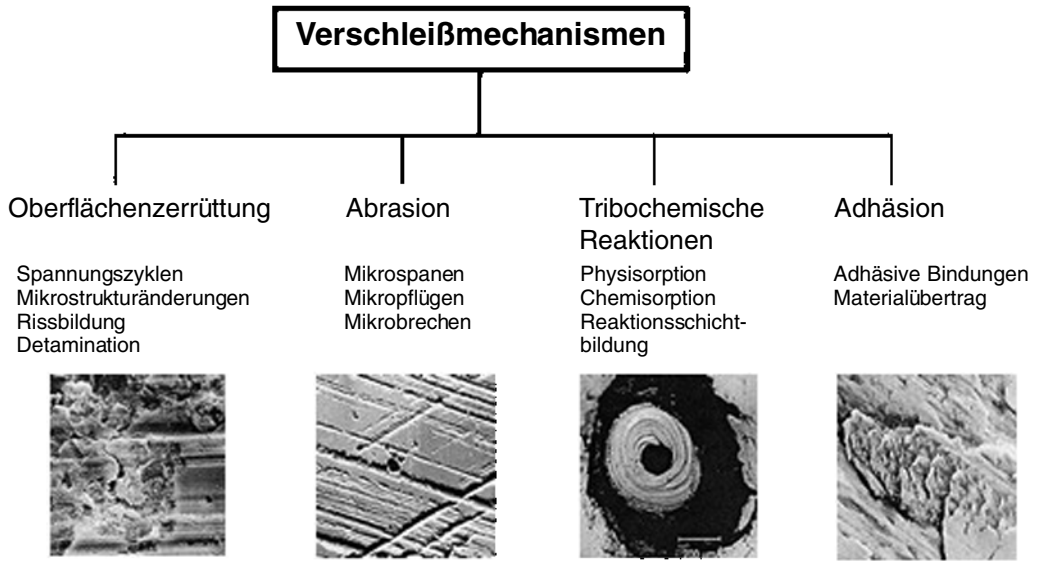


Abb. 2 Verschleißerscheinungen

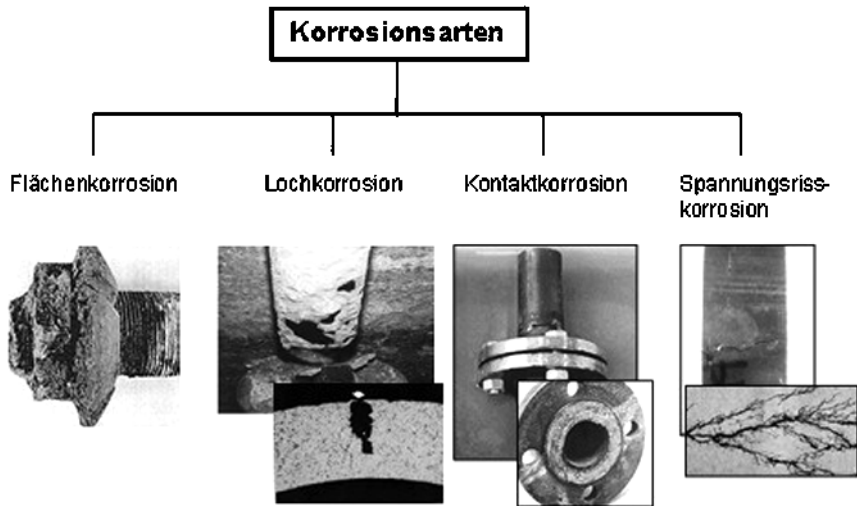


Abb. 3 Korrosionserscheinungen

die Korrosion. Falsche Werkstoffauswahl bzw. falsche oder fehlende Schutzschichten führen dann zu hinlänglichen Schadensbildern, von denen einige ausgewählte in den Abb. 2 und Abb. 3 exemplarisch wiedergegeben sind.

In vielen Fällen kann durch eine geeignete Oberflächentechnik derartigen Schäden vorgebeugt werden bzw. ihr Erscheinen kann zumindest zeitlich verzögert werden. Grundvoraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Eigenschaften der Bauteiloberflächen auf das Beanspruchungsprofil angepasst werden.

#### 4 | Auswahl von Oberflächenbehandlungsverfahren

Ziel der Oberflächentechnik ist es, auf das jeweils vorliegende Beanspruchungsprofil adäquat zu reagieren. Hierzu werden Materialeigenschaften an der Bauteiloberfläche gezielt verändert oder erzeugt. Dies geschieht durch

- einen Schichtauftrag auf ein Werkstück
- die Modifizierung der Randzonen eines Werkstücks.

Zu den erstgenannten Verfahren zählen Beschichtungsverfahren wie CVD, PVD, thermisches Spritzen, Auftragslöten und -schweißen oder Plattier- bzw. Tauchbeschichtungen. Demgegenüber zählen thermochemische Diffusionsverfahren, thermisches Randschichtärten, Implantationsverfahren oder auch mechanische Oberflächenverfestigungstechnologien zu den Verfahren der Randschichtmodifikation.

### 3

#### Auswahl von Beschichtungs- und Oberflächentechnologien

Die Auswahl einer geeigneten Oberflächenbehandlung vor dem Hintergrund eines vorliegenden Beanspruchungsprofils stellt eine außerordentlich anspruchsvolle Aufgabe dar. Dies rührt nicht nur daher, dass die exakte und umfassende Erfassung einer Bauteilbeanspruchung nicht immer einfach ist, sondern liegt auch in der Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffe und werkstofftechnologischer Prozesse. Es wird davon ausgegangen, dass es in der Werkstoffwissenschaft 40–80 Werkstoffe gibt. Ebenso existieren mindestens 1000 unterschiedliche werkstofftechnologische Prozesse, zu denen auch die Verfahren der Oberflächentechnik zu zählen sind. Im Vergleich dazu umfasst der durchschnittliche Wortschatz eines Mitteleuropäers ca. 5000 Worte. Daraus lässt sich leicht ableiten, dass die Auswahl eines geeigneten Beschichtungswerkstoffs oder eines Oberflächenbehandlungsprozesses nur über eine systematische Vorgehensweise erfolgen kann. Dies setzt voraus, dass dieser Auswahlprozess bereits in einer frühen Phase der Produktentwicklung erfolgen muss. So ist es notwendig, dass sich der Entwickler bereits während der Konzeptphase, nachdem Kundenbedürfnis und Marktanforderung fixiert wurden, intensiv mit den Anforderungen an die Bauteiloberfläche auseinandersetzt. Hierzu bietet sich an, vier grundsätzliche Aspekte, ausgehend vom vorliegenden Beanspruchungsprofil, systematisch abzuklären [1, 6]. Dies betrifft die Fragen nach:

##### 1) Funktion:

- Was ist die Funktion der Bauteiloberfläche?
- Welches Anforderungsprofil liegt vor?

##### 2) Zielsetzung:

- Was muss maximiert werden?
- Was muss minimiert werden?

##### 3) Einschränkungen:

- Welche Randbedingungen müssen erfüllt werden?

z. B.:

- aus technischer Sicht
- aus ökonomischer Sicht

Werkstoff/Verfahren	Vorgaben/Restriktionen	erreichbar	Bewertung
<b>Schicht</b>			
Verschleißigenschaften			
Härte/Festigkeit			
Korrosionswiderstand			
Schlagbruchwiderstand			
Schichtdicke			
Adhäsion			
Kohäsion			
Porosität			
Eigenspannungen Struktur- Eigenschaftsbeziehungen			
<b>Prozess</b>			
Bauteilform			
Bauteilgröße			
Abscheiderate			
Beschichtungstemperatur Festigkeitsmindernde Prozesseinflüsse			
Kosten			
Umweltaspekte			

Abb. 4 Muster einer Matrix zur Bewertung von Schichtwerkstoffen und/oder Beschichtungsverfahren vor dem Hintergrund eines angestrebten Eigenschaftsprofils

- vor dem Hintergrund von „Design to cost“-Konzepten
- vor dem Hintergrund von „Design for environment“-Konzepten
- vor dem Hintergrund von „Life cycle costs“

#### 4) Freiheitsgrade:

- Welche Freiheitsgrade existieren?

Im Anschluss an diese Systematik, die im Wesentlichen die aus dem Beanspruchungsprofil abgeleiteten Eckpunkte des Anforderungsprofils der Bauteiloberfläche repräsentieren, müssen einzelne Werkstoffe und Verfahren der Oberflächentechnik vor diesem Hintergrund analysiert und bewertet werden. Auch hier sollte die Suche und Bewertung mit einer geeigneten Systematik hinterlegt werden. Abb. 4 zeigt ein Beispiel für eine derartige Systematik. Einzelne Schichtwerkstoffe und Beschichtungsprozesse lassen sich damit hinsichtlich ausgewählter Eigenschaften im Hinblick auf die gegebenen Vorgaben und Restriktionen bewerten. Die Eigenschaftsauswahl in der Bewertungsmatrix sowie die zugehörigen Vorgaben und Restriktionen stammen aus dem zuvor erstellten Anforderungsprofil.

Die dargestellte Vorgehensweise stellt eine Möglichkeit dar, ein Anforderungsprofil mit möglichen Oberflächentechnologien systematisch zu korrelieren. Allerdings kann sie zwangsläufig nur so gut sein wie das in Phase 1 ermittelte Anforderungsprofil. Ebenso erfordert die Methodik umfassende Kenntnisse hinsichtlich möglicher Werkstoffe und Verfahren, was oftmals aufgrund der oben bereits erwähnten Fülle unterschiedlicher Verfahren und Werkstoffe auch unter Zuhilfenahme von Datenbanken an Grenzen stößt.

## 4

#### Verfahren zur Randschichtmodifikation und zum Schichtauftrag

Eine detaillierte Übersicht zu den unterschiedlichen Verfahren der Randschichtmodifikation und zum Schichtauftrag zu geben, sprengt den Rahmen des vorliegenden Beitrags. Es soll daher an dieser Stelle lediglich ein grober Überblick über die wesentlichen Verfahrensgruppen sowie ihrer Vor- und Nachteile gegeben werden. Verfahren zur Randzonenmodifizierung lassen sich gemäß Abb. 5 systematisieren.

Ausgewählte Verfahren sind in Tab. 1 wiedergegeben bei gleichzeitiger Darstellung ihrer wesentlichen Vor- und Nachteile [5].

Im Unterschied zur Randschichtmodifikation erfolgt beim Beschichten das Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus einem formlosen Stoff auf ein Werkstück. Abb. 6 gibt eine mögliche Systematik hierzu wieder.

Primär entscheidend für die Qualität einer Beschichtung ist ihre Haftfestigkeit auf dem beschichteten Werkstück. Diese makroskopische Eigenschaft hängt ab von:

- den Partnern des Werkstoffverbunds
- dem Typ der Kontaktzone
- der Mikrostruktur und den Herstellungsbedingungen
- der Art und Vorbehandlung des Substrates.

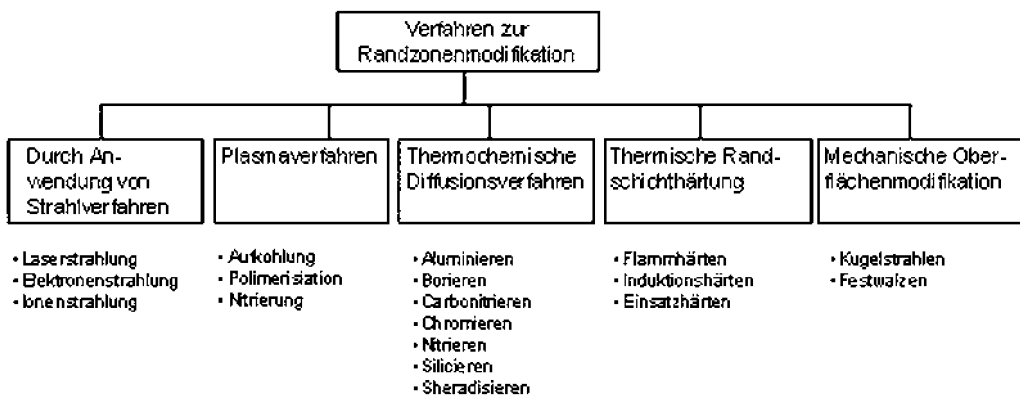


Abb. 5 Verfahrenssystematik – Randzonenmodifikation

Tab. 1 Ausgewählte Verfahren zur Randschichtmodifikation

Vorteile	Verfahren	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kostengünstig</li> <li>+ selektive Behandlung möglich</li> <li>+ Tiefe 1–10 mm</li> </ul>	<p><b>Härten mittels</b>                      Induktion                      Flamme                      Laser, E-Strahl                      WIG</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Beschränkung auf Stähle Co. 3–0,6%</li> <li>– Gefahr des Verzugs</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Anwendbar auf viele Stähle</li> <li>+ Einstellung von speziellen Schichteigenschaften</li> </ul>	<p><b>Aufkohlen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eindiffusion von C (bis 0,8%) mit Härteprozess</li> <li>• verschiedene C-Trägermedien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Verzug</li> <li>– Abkühlrisse</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ im Vergleich zu Härten, Aufkohlen weniger Verzug</li> </ul>	<p><b>Carbonitrierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• s. o., zusätzlich Stickstoff</li> <li>• Durchführung bei niedrigeren Temperaturen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– langsamer Prozess</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ wenig Verzug</li> <li>+ hohe Warmhärte</li> </ul>	<p><b>Nitrierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• N-Diffusion, Bildung von Nitriden an Oberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– langsamer Prozess</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ guter Widerstand gegen Adhäsionsverschleiß</li> <li>+ kann oxidiert werden zum Korrosionsschutz</li> </ul>	<p><b>Nitrocarburierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Nitrierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– dünne beeinflusste Randzone</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Härte</li> </ul>	<p><b>Borieren</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bor-Diffusion zur Bildung von Boriden</li> <li>• anwendbar auch bei Co, N, Ti-Legierungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Verzug (hohe Prozesstemperatur)</li> <li>– spröde</li> <li>– geringer Korrosionswiderstand</li> </ul>

Tab. 1 (Fortsetzung)

Vorteile	Verfahren	Nachteile
+ kostengünstig + guter Korrosionsschutz + Steigerung der Dauerschwingfestigkeit + Steigerung der Beständigkeit gegen Spannungs- und Schwingungsrissskorrosion	<b>Sheradisieren</b> • Zn-Diffusion mit anschließender Chromatierung  <b>Kugelstrahlen</b> zur plastischen Verformung der Bauteilrandschicht	– kein Verschleißschutz – geringer Tiefeneffekt – geringe Härtesteigerung
s. o.	<b>Festwalzen</b> vergleichbar Kugelstrahlen	– teuer
+ hohe Oberflächenhärten möglich + guter Verschleiß- und Korrosionsschutz	<b>Metallisierung</b> (z. B. Cr, V, Nb, Si-haltige Diffusionsschichten) diverse Verfahrensvarianten	– hohe Prozesstemperaturen (Verzug)