

Jost, Norbert (Ed.); Klink, Roman (Ed.)

Proceedings

Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2015: 1. Oktober 2015, CongressCentrum Pforzheim

Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 153

Provided in Cooperation with:

Hochschule Pforzheim

Suggested Citation: Jost, Norbert (Ed.); Klink, Roman (Ed.) (2015) : Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2015: 1. Oktober 2015, CongressCentrum Pforzheim, Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 153, Hochschule Pforzheim, Pforzheim, <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:951-opus-1227>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/121469>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

**PFORZHEIMER
WERKSTOFFTAG**

Pforzheimer Werkstofftag 2015

TAGUNGSBAND

1. Oktober 2015
CongressCentrum Pforzheim

www.pforzheimer-werkstofftag.de
www.hochform-pforzheim.de

Unterstützt durch:



HOCHSCHULE PFORZHEIM



Impressum

Herausgeber: Prof. Dr. Ansgar Häfner, Prof. Dr. Norbert Jost, Prof. Dr. Karl-Heinz Rau, Prof. Dr. Roland Scherr,
Prof. Dr. Christa Wehner, Prof. Dr. Hanno Beck (geschäftsführend; hanno.beck@hs-pforzheim.de)

Ausgabe: Oktober 2015

ISSN-Nr.: 0946-3755

**TAGUNGSBAND ZUM PFORZHEIMER
WERKSTOFFTAG 2015
Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)**

Band 153

der Publikationsserie „Focus Werkstoffe“

INHALTSVERZEICHNIS

Zeit- und kosteneffiziente Ermittlung des Ermüdungsverhaltens
sicherheitsrelevanter Werkstoffe und Bauteile

Dr.-Ing. Peter Starke, Universität des Saarlandes
Prof. Dr.-Ing. Frank Walther, Technische Universität Dortmund **5**

Zinn-Silberlegierungen als alternative Kontaktbeschichtung im Automotive-
u. Industriebereich. Etablierte Lösungen und neue Möglichkeiten

Dr.-Ing. Markus Kostron, Enayati GmbH & Co. KG **19**

Vorteile von Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffen bei der Anwendung
in der Elektronik und Elektrotechnik

Joachim Ruhnke, Inovon GmbH & Co. KG **27**

Galvanische Abscheidung von Schichtwerkstoffen für die Steckverbinderindustrie

Thomas Frey, IMO Oberflächentechnik GmbH **39**

Anwendungsbeispiele der PVD-Beschichtung mit Edelmetallen für die
Medizintechnik, Kontakttechnik und Sensorik

Dr. Joachim Ganz, DODUCO GmbH **65**

Lasermaterialbearbeitung in der Oberflächentechnik

Tom Cruz, Hochschule Pforzheim **73**

Nanoschichtsystem Nickel / Nano-Palladium / Nano-Gold als Bondoberfläche;
Labor / Serie / Alternative Anwendungen

Markus Klingenberg, Inovon GmbH & Co. KG **87**

Phasenfeldsimulationen des Benetzungsverhaltens von Flüssigkeiten auf chemisch heterogenen Werkstoffoberflächen

Marouen Ben Said, Karlsruher Institut für Technologie
Katharina Vellguth, Karlsruher Institut für Technologie
Britta Nestler, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft **95**

Ressourceneffiziente Herstellung von Nd-Fe-B Hartmagneten aus Recyclingmaterial

Prof. Dr. Carlo Burkhardt, Ohnmacht & Baumgärtner GmbH & Co. KG **111**

Einsatz von Laser- und Diffusionsschweißen zur Herstellung mikrostrukturierter Apparate

Dr. Thomas Gietzelt, Karlsruher Institut für Technologie
L. Eichhorn, Karlsruher Institut für Technologie
T. Wunsch, Karlsruher Institut für Technologie
V. Toth, Karlsruher Institut für Technologie
A. Hüll, Karlsruher Institut für Technologie **123**

Selektives Laserschmelzen – 3D-Druck in Metall

Dr.-Ing. Sven Donisi, Rosswag GmbH **129**

AlCu – Hybridmaterial, eine Werkstoffkombination mit vielfältigen neuen Anwendungsmöglichkeiten

Uwe Dreißigacker, DODUCO GmbH **141**

Vorwort der Herausgeber

Der Pforzheimer Werkstofftag konnte seit 2012 eine durchweg sehr positive Resonanz verzeichnen. Anlass genug für uns, den Pforzheimer Werkstofftag auch in diesem Jahr fortzuführen – und vor allem inhaltlich fortzuschreiben.

Die eintägige Veranstaltung wird vom Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT) der Hochschule Pforzheim sowie vom städtischen Eigenbetrieb Wirtschaft und Stadtmarketing Pforzheim (WSP) im Rahmen der Cluster-Initiative HOCHFORM organisiert.

Mit dem Pforzheimer Werkstofftag setzen die Initiative HOCHFORM und das IWWT eine Fachveranstaltung um, die inhaltlich aktuelle Themen aus Industrie, Forschung und Entwicklung aufgreift. In diesem Jahr stehen Werkstoffaspekte in der Oberflächentechnik im Fokus der Fachvorträge.

Auch zukünftig soll mit dem Pforzheimer Werkstofftag eine kontinuierliche Schnittstelle zwischen Forschung und Entwicklung, industrieller Anwendung und Lehre geschaffen werden. Wir hoffen, dem interessierten Leser des hier vorliegenden Tagungsbandes auch dieses Jahr wieder ein reizvolles Programm zusammengestellt zu haben, und wünschen bei der Lektüre viele und vielleicht hier und da auch ganz neue Einblicke in das innovative Gebiet der Werkstoffe.

Pforzheim, im Oktober 2015

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost
Roman Klink

**Zeit- und kosteneffiziente Ermittlung
des Ermüdungsverhaltens sicherheitsrelevanter
Werkstoffe und Bauteile**

Dr.-Ing. Peter Starke,
Universität des Saarlandes

Prof. Dr.-Ing. Frank Walther
Technische Universität Dortmund

Abstract

Zur Charakterisierung der während Ermüdungs- und Betriebsbeanspruchungen auftretenden strukturmechanischen Prozesse werden u.a. mechanische Spannungs-Dehnungs-Hysteresis-, Temperatur-, elektrische Widerstands-, magnetische Barkhausen-Rauschen- und Hochfrequenzimpuls-Messverfahren eingesetzt. Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen werden die Potentiale innovativer Kurzzeit- bzw. Abkürzungsverfahren aufgezeigt, die es ermöglichen, umfangreiche Informationen zum Werkstoffverhalten unter Ermüdungs- und Betriebsbeanspruchungen mit einem sehr geringen Versuchsumfang bereitzustellen. Durch die Kombination hochpräziser Messtechnik mit Laststeigerungs- und Einstufenversuchen kann bspw. die Wöhlerlinie und die Ermüdungsfestigkeit für Werkstoffe mit einer sehr guten Übereinstimmung mit konventionell ermittelten Daten abgeschätzt werden. Diese Verfahren führen zu einer deutlichen Reduktion der Versuchszeit und -kosten und sind damit für die industrielle und wissenschaftliche Anwendung von immer größer werdendem Interesse.

Nachfolgend sind für die Kurzzeituntersuchungsmethodik Ergebnisse zum Einfluss der Verbindungstechnologie auf den austenitischen Stahl X5CrNi18-10, des Umgebungsmediums auf die Magnesiumlegierungen Mg-Al4-Ba2-Ca2 (DieMag422) sowie Lebensdauerberechnungen für den Vergütungsstahl 42CrMo4 und den Gusseisenwerkstoff EN-GJV-400 dargestellt.

Einleitung

Eine gewichtsoptimierte Bauteilauslegung sowie die daraus resultierende Abschätzung der Lebensdauer bzw. Einsatzzeit metallischer Werkstoffe, setzen ein umfassendes Verständnis der Ermüdungsvorgänge und die systematische Untersuchung des Ermüdungsverhaltens voraus. Dies wird umso wesentlicher, wenn es sich um die Auslegung hoch beanspruchter, sicherheitsrelevanter Werkstoffe und Bauteile handelt. Solche Bauteile können vielfach schon allein aus Zeit- und Kostengründen weder als Prototypen gebaut, noch als solche unter Betriebsbedingungen geprüft werden. Aus diesen Gründen wurden bereits in den 1960er Jahren strukturmechanische Konzepte entwickelt, die es ermöglichen, an ungekerbten Proben ermittelte Werkstoffdaten auf komplexe Bauteile zu übertragen [1]. Solche Daten, die u.a. auf konventionell ermittelten Wöhlerkurven und Spannungs-Dehnungs-Diagrammen basieren, wurden erstmals in systematischer Weise in den 1980er Jahren publiziert [2]. Dem folgten konsequenterweise bis heute Überlegungen zur Reduzierung des Versuchsaufwandes, woraus in den vergangenen Jahren u.a. die PHYBAL-Methode hervorgegangen ist [3-4]. Die Methode zeigt für unterschiedlichste Konstruktionswerkstoffe eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment und führt dabei zu einer Reduzierung der Versuchszeit und -kosten von bis zu 90 %.

Sie wurde auf unterschiedlichste Werkstoffgruppen, darunter un-, niedrig- und hochlegierte Stähle, Leichtmetalllegierungen, Verbundwerkstoffe und Holz, mit Erfolg angewendet. Zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens unter zyklischer Beanspruchung wird konventionell die Werkstoffantwort in Form mechanischer Spannungs-Dehnungs-Hysteresisschleifen erfasst und die plastische Dehnungsamplitude über der Lastspielzahl in Wechselverformungskurven aufgetragen [5]. Doch gerade bei sehr geringen plastischen Verformungen, ist die Anwendung der Dehnungsmessung limitiert. Einen deutlichen Vorteil bieten hier Verfahren, die nicht erst auf Veränderungen der Geometrie (Messlänge) beruhen, sondern mikrostrukturelle Veränderungen (Versetzungreaktionen, Mikrorisswachstum) detektieren. Diese werkstoffmechanischen Phänomene können bereits in sehr frühen Ermüdungsstadien (ca. 5-10 % der Lebensdauer), in denen noch keine makroskopischen Veränderungen stattfinden, Schädigungsvorgänge und Versagen indizieren. Hierbei haben sich in den letzten Jahren Verfahren bewährt, die üblicherweise der zerstörungsfreien Prüfung (zFP) zugeordnet werden und auf physikalischen Prinzipien der Thermometrie, Resistometrie und Magnetometrie beruhen [6-10].

Methoden der Untersuchungsstrategie

Unter Einsatz der zfP zuzuordnenden Messverfahren werden in Ermüdungs- und Betriebsfestigkeitsversuchen Herstellungs-, Verbindungs- und Umgebungseinflüsse auf die beanspruchungs- und lastspielzahlabhängige Schädigungsentwicklung von Werkstoffen, Verbindungen und Bauteilen ermittelt. Der in stufenförmigen und kontinuierlichen Laststeigerungsversuchen erfasste Verformungs- und Schadensverlauf diente zur Auswahl geeigneter Beanspruchungsparameter für anschließende mikrostrukturkorrelierte Einstufenversuche. Da einige Metalle und Leichtmetalle eine potentiell hohe Korrosionsanfälligkeit aufweisen, wurde unter Einsatz elektrochemischer Prüfverfahren das Korrosionsverhalten charakterisiert, um auch den Einfluss des Korrosionszustandes auf die Ermüdungseigenschaften qualitativ und quantitativ zu bewerten.

Veränderungen im mechanischen Werkstoffverhalten unter Schwingbeanspruchung werden i.d.R. mit Hilfe der plastischen Dehnungsamplitude [5] beschrieben. Zudem wurden in den Untersuchungen die verformungsinduzierte Temperaturänderung [6-7] und die elektrische Widerstandsänderung [8-9] sowie die Änderung der magnetischen Impedanz [10] hochgenau erfasst. Der elektrische Widerstand hängt neben der Geometrie vom spezifischen elektrischen Widerstand ab, der sich bei plastischen Verformungsvorgängen aufgrund zunehmender Defektdichte (Versetzungsdichte und -anordnung, Mikrorisse, Poren) verändert. Die magnetischen Messverfahren sind neben der Orientierung und Stärke des überlagerten Magnetfeldes ebenfalls von der Defektdichte im Werkstoffvolumen abhängig. Eine Magnetfeldänderung entlang der magnetischen Hysterese führt hierbei zu einer Verschiebung von Blochwänden, die über Defekte im Werkstoffvolumen gepinnt sind. Die auf mikrostrukturellen Veränderungen im Werkstoffvolumen beruhenden Messgrößen stehen in einem direkten Zusammenhang zum aktuellen Ermüdungszustand, so dass sich Temperatur-, Widerstands- und magnetische Messverfahren zur betrieblichen Online-Überwachung sowie Widerstands- und magnetische Messverfahren darüber hinaus zur zerstörungsfreien Schädigungsfrüherkennung in Inspektionen eignen [11-12].

Ergebnisse

Lötverbindungen aus austenitischem Stahl X5CrNi18-10 und Lot Ni 620

In Abb. 1a sind für einen stufenförmigen Laststeigerungsversuch mit dem Spannungsverhältnis $R = 0,1$ die beanspruchungs- und lastspielzahlabhängige Entwicklung der plastischen Dehnungsamplitude ($\varepsilon_{a,p}$ -N) und der elektrischen Widerstandsänderung (ΔR -N) für eine X5CrNi18-10 (1.4301)/Ni 620-Lötverbindung ab $N = 0,5 \cdot 10^5$ Lastwechseln dargestellt [13]. Die plastische Dehnungsamplitude $\varepsilon_{a,p}$ wurde mit einem Extensometer, die Temperaturänderung ΔT mit Thermoelementen auf der Lötnaht und die elektrische Widerstandsänderung ΔR am Übergang Probenmessstrecke zum Probenschaft erfasst. Auf der Ordinate ist neben der Spannungsamplitude σ_a die Oberspannung σ_o aufgetragen. Bei dieser Beanspruchung im Zugschwellbereich besteht zwischen Spannungsamplitude, Ober- und Unterspannung der Zusammenhang $\sigma_a = 0,45 \cdot \sigma_o = 4,5 \cdot \sigma_u$. Das Versagen der Lötnaht tritt bei $\sigma_o = 230$ MPa ein, wobei $\varepsilon_{a,p}$ nur in den letzten Zyklen einen Hinweis darauf gibt. Im Gegensatz hierzu kündigt ΔR über einen deutlich längeren Zeitraum ab $\sigma_o = 190$ MPa mit starker Ausprägung die ablaufenden Ermüdungsvorgänge und das bevorstehende Ermüdungsversagen an. Der Widerstand erhöht sich bis zur Laststufe $\sigma_o = 230$ MPa um $2 \mu\Omega$, bevor die finale Makrorissausbreitung zu einem exponentiellen ΔR -N-Anstieg führt. Dies macht den hohen Informationsgewinn durch die Anwendung der Widerstandsmessung zur Bewertung grundlegender Ermüdungsprozesse und zunehmender Ermüdungsschädigung von Lötverbindungen deutlich, wie es nur bei vorgangsorientierter Betrachtung unter Verwendung neuer Mess- und Prüftechnik gewährleistet werden kann.

Die Auftragung der Widerstandsänderung ΔR als Funktion der Temperaturänderung ΔT für Wertepaare der Laststufen eines weiteren Laststeigerungsversuchs verdeutlicht (Abb. 1b), dass nach anfänglichem, annähernd linearem Anstieg die Widerstandsänderung am Versuchsende einem exponentiellen Verlauf folgt und die Schädigung und das Versagen des Lötverbundes am aussagestärksten charakterisiert. Dies liegt darin begründet, dass die Widerstandsänderung mehrere Ermüdungsmechanismen und -defekte integral enthält. Abb. 1c zeigt als Querschliff die Verbindung aus X5CrNi18-10 und Ni 620-Lot, der 30 sec. in einer Kaltbeize für hochlegierte Stähle geätzt wurde. Entlang des Lötspalts kann eine Anreicherung dunkler Bereiche sowie eine Infiltration der Korngrenzen mit Komponenten des Lotmaterials beobachtet werden. In der Mitte des Lötspalts treten keine Sprödphasen auf.

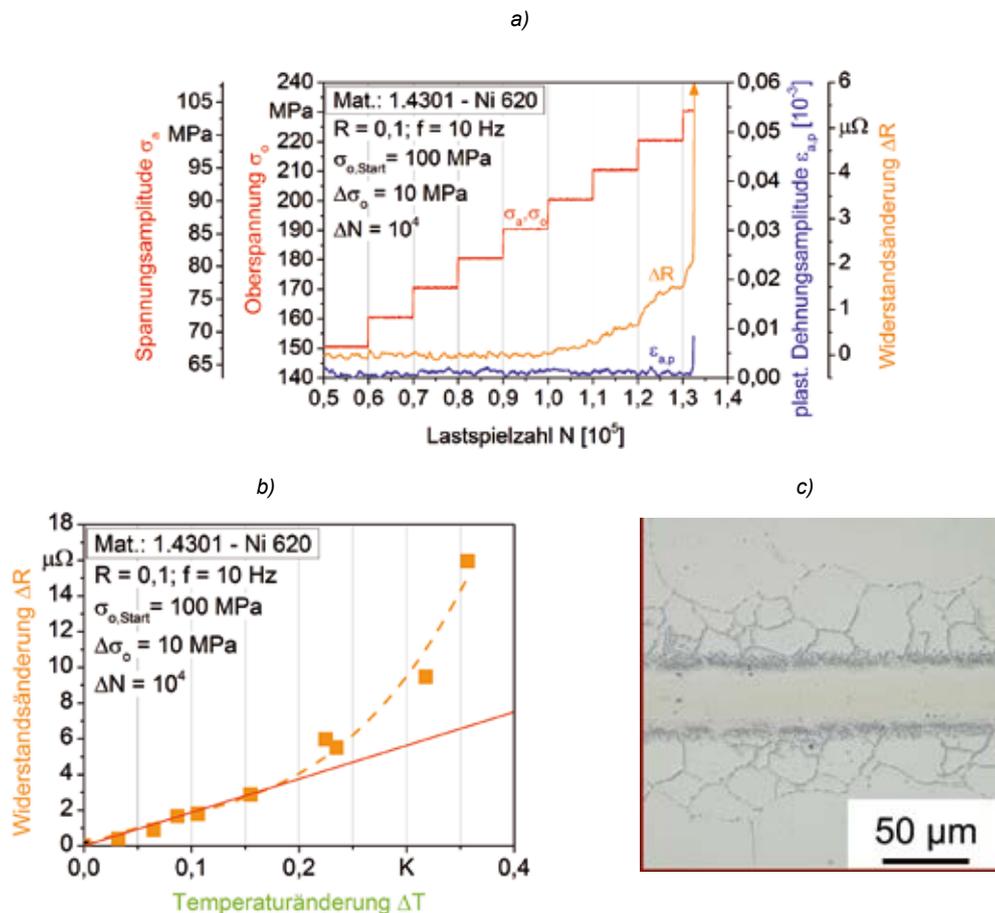


Abb. 1: (a) Laststeigerungsversuch mit Beanspruchungs- und Werkstoffreaktionsgrößen; (b) Korrelation der Widerstands- und Temperaturänderung; (c) Mikrostruktur im Querschliff; 1.4301/Ni 620-Lötverbindung

Neuentwickelte Magnesiumlegierung DieMag422

Die neuentwickelte Magnesiumlegierung DieMag422 (Mg-Al4-Ba2-Ca2) enthält nominell 4 Gew.-% Aluminium, 2 Gew.-% Barium und 2 Gew.-% Calcium. Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen (Abb. 2a, oben) und EDX-Untersuchungen belegen, dass sich an den Korngrenzen der primären α -Mg-Phase eine kompakte Ba-reiche Phase (~ 5 Fl.%) und eine lamellare Ca-reiche Phase ($\sim 10,8$ Fl.%) ausscheiden. Potentiodynamische Polarisationsmessungen zeigen einen selektiven korrosiven Angriff zwischen der α -Mg-Phase und der lamellaren Ca-reichen Phase (Abb. 2a, unten) [14]. In Abb. 2b sind die in kontinuierlichen Laststeigerungsversuchen (LSV), mit $\sigma_{a,Start} = 10$ MPa und $d\sigma_a / dN = 8$ MPa / 10^4 sowie $R = -1$ und $f = 10$ Hz auf der Grundlage der

Werkstoffreaktionsgrößen $\epsilon_{a,p}$, ΔT und ΔR abgeschätzte Ermüdungsfestigkeit $\sigma_{a,D (LSV)}$ für $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechsel (links) und die zum Bruch führende Spannungsamplitude $\sigma_{a,B (LSV)}$ (rechts) für den Ausgangszustand (nicht-korrodiert) und die untersuchten Korrosionszustände dargestellt. Zur Ermüdungsfestigkeitsabschätzung wurde der Verlauf der Werkstoffreaktionsgrößen asymptotisch angenähert (vgl. [11-12]), in Anlehnung an die Bestimmung der Korrosionsstromdichte auf Basis der anodischen und kathodischen Äste mittels Tafelgeraden [14]. Bereits in pH7 sinkt nach 1 Std. (h) die abgeschätzte Ermüdungsfestigkeit $\sigma_{a,D (LSV)}$ von 45 auf 43 MPa. Nach 24 h in 0,1 molarer NaCl-Lösung beträgt sie mit 35 MPa nur noch ca. 78 %. Die zum Bruch führende Spannungsamplitude $\sigma_{a,B (LSV)}$ zeigt eine vergleichbare Tendenz. Mit zunehmendem Korrosionsgrad sinkt diese von 72 MPa in pH7 nach 1 h um ca. 11 % auf 64 MPa und in 0,1 molarer NaCl-Lösung um ca. 26 % auf 53 MPa. Der Quotient zwischen $\sigma_{a,D (LSV)}$ und $\sigma_{a,B (LSV)}$ beträgt etwa 66 % für alle Korrosionszustände.

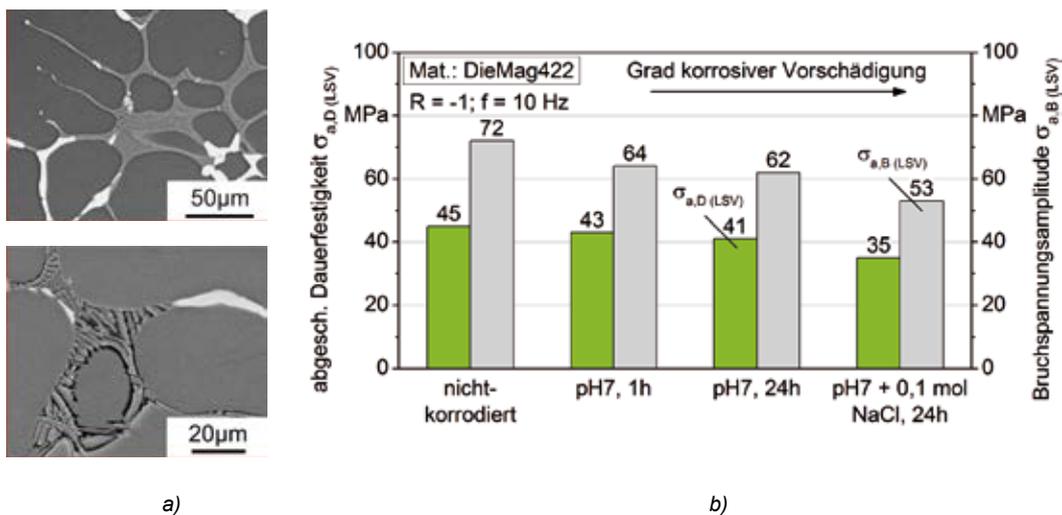


Abb. 2: (a) Mikrostruktur im Ausgangszustand (oben) und nach Korrosionsbeanspruchung (unten); (b) abgeschätzte Ermüdungsfestigkeit und bestimmte Bruchspannungsamplituden im Laststeigerungsversuch als Funktion des Korrosionszustands; DieMag422

Vergütungsstahl 42CrMo4

Für den Vergütungsstahl 42CrMo4 ist die Probenherstellung und die Probengeometrie detailliert in [15] beschrieben. Der Anlieferungszustand wurde vom Hersteller bei 840°C austenitisiert und anschließend bei 550°C für 120 min. angelassen. Abb. 3a zeigt in einer REM-Aufnahme ein typisches Vergütungsgefüge mit fein verteilten Karbiden in einer ferritischen Matrix.

Abb. 3b zeigt für den Vergütungsstahl 42CrMo4 einen Laststeigerungsversuch mit einer Startamplitude $\sigma_{a,Start} = 100$ MPa und einem kontinuierlichen Spannungsamplitudenanstieg von $2,1 \cdot 10^{-3}$ MPa pro Lastwechsel. $\sigma_{a,Start}$ beträgt ca. 10 % der Streckgrenze, einem Bereich in dem keinerlei plastische Verformungen auftreten. Die Werkstoffreaktion wurde auf Basis der plastischen Dehnungsamplitude $\epsilon_{a,p}$ und der elektromagnetischen Impedanz Z_{GMR} erfasst. Hierbei ist zu erkennen, dass es bei $\sigma_{a,D(LSV)} = 470$ ($\epsilon_{a,p}$) bzw. 495 (Z_{GMR}) MPa zu ersten plastischen Verformungen und zum Probenversagen bei $\sigma_{a,B(LSV)} = 687$ MPa kommt. Dieser Wert korreliert, wie bei der zuvor dargestellten Lötverbindung und der Magnesiumlegierung, sehr gut mit der nach dem Treppenstufenverfahren ermittelten Ermüdungsfestigkeit von 492 MPa, wobei hierbei erwartungsgemäß Z_{GMR} die beste Übereinstimmung mit $< 1\%$ Abweichung zeigt.

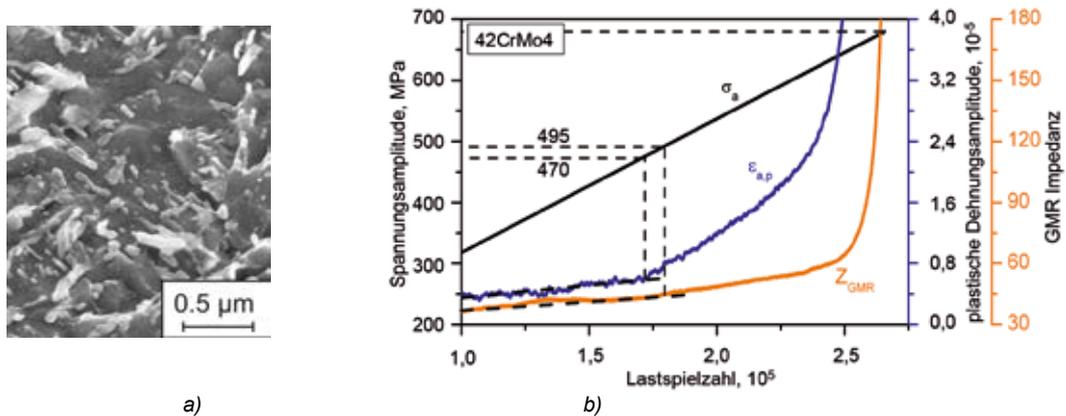


Abb. 3: (a) Mikrostruktur im Ausgangszustand; (b) kontinuierlicher Laststeigerungsversuch mit Beanspruchungs- und Werkstoffreaktionsgrößen; 42CrMo4

Nachfolgend ist die Lebensdauerberechnungsmethode PHYBAL beispielhaft für 42CrMo4 beschrieben. Neben der elektrischen Widerstandsänderung können äquivalente mikrostrukturabhängige Messgrößen genutzt werden.

Abb. 4a zeigt den stufenförmigen Verlauf von σ_a und den Verlauf der elektrischen Widerstandsänderung in einem Laststeigerungsversuch (LSV). Für $\sigma_{a,D(LSV)} = 480$ MPa zeigt der Messwertverlauf eine Änderung im Anstieg (vgl. Abb. 3b), gefolgt vom Probenversagen bei $\sigma_{a,B(LSV)} = 680$ MPa. Basierend auf den Ergebnissen des LSVs werden zwei Einstufenversuche (ESV) mit $\sigma_a = 500$ (knapp oberhalb von $\sigma_{a,D(LSV)}$) und 640 MPa (knapp unterhalb von $\sigma_{a,B(LSV)}$) durchgeführt (Abb. 4b). Die für die Berechnung benötigten Wertepaare aus den ESVs werden bei $N_B/2$ entnommen und sind in der Abb. 4b gekennzeichnet.

Für die in Abb. 5a dargestellte zyklische Spannungs-Widerstands- (ZSR-) Kurve des LSV sind die Laststufen mit $500 \text{ MPa} \leq \sigma_a \leq 640 \text{ MPa}$ als Funktion des jeweiligen Mittelwertes der Widerstandsänderung ΔR (Abb. 4a) dargestellt.

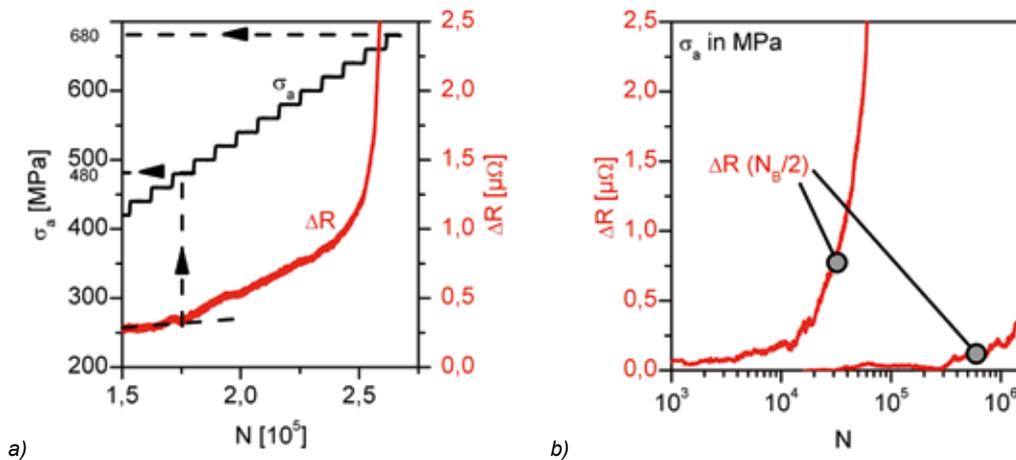


Abb. 4: (a) Laststeigerungsversuch mit Spannungsamplitude und elektrischer Widerstandsänderung; (b) Wechselverformungskurven auf Basis der elektrischen Widerstandsänderung; 42CrMo4

Daneben ist der bei $N = N_B/2$ in ESV für $\sigma_a = 500$ und 640 MPa gemessene σ_a , ΔR -Zusammenhang angegeben, die als Stützpunkte für die Berechnung genutzt werden. Die ZSR-Kurve des LSV kann unter Verwendung dieser Stützpunkte aus den ESVs (vgl. Abb. 4b) auf eine ZSR-Kurve für einstufige Beanspruchungen mit $500 \text{ MPa} < \sigma_a < 640 \text{ MPa}$ umgerechnet werden (Abb. 5a).

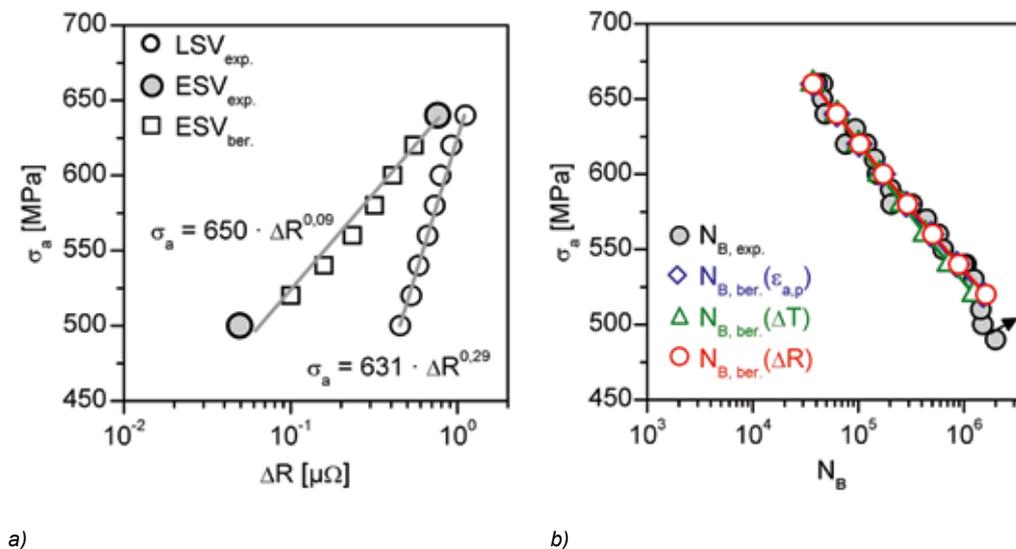
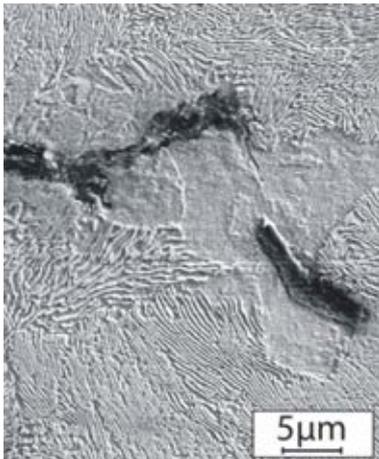


Abb. 5: (a) Spannungsamplitude-Widerstandsänderung-Zusammenhang; (b) Vergleich von berechneten und experimentell ermittelten Wöhlerkurven; 42CrMo4

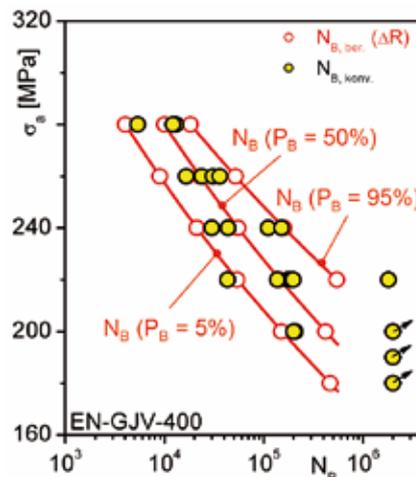
Durch die mathematische Beschreibung der ZSR-Kurve für ESVs können die Morrow-Parameter $K'_{\Delta R} = 650$ und $n'_{\Delta R} = 0,09$ sowie der Basquin-Exponent $b_{\Delta R} = 0,07$ bestimmt, bzw. berechnet werden. Mit der Bruchlastspielzahl des ESVs mit $\sigma_a = 640$ MPa ($N_B = 6,2 \cdot 10^4$) ergibt sich ein Basquin-Koeffizient $\sigma'_{B, \Delta R}$ von 1355. Somit kann die Wöhlerkurve auf der Basis eines LSV und von zwei ESV berechnet werden. Abb. 5b belegt, dass die berechneten Wöhlerkurven auf der Basis von $\epsilon_{a,p}$, ΔT , ΔR bei nur minimaler Streuung zu einer exzellenten Übereinstimmung zu der mit 23 Proben experimentell ermittelten Wöhlerkurve führen.

Gusseisenwerkstoff EN-GJV-400

Die Ermüdungsproben des EN-GJV-400 wurden aus gegossenen Rundstäben mit einem Durchmesser von 36 mm und einer Länge von 500 mm entnommen. Das Gussgefüge ist in Abb. 6a dargestellt und weist ein überwiegend perlitisches Matrixgefüge mit einem Ferritgehalt von $7,4 \pm 0,8$ Fl.-% mit vermicularen Graphitabscheidungen und einem Graphitanteil von $11,5 \pm 1,2$ Fl.-% auf [16]. Die Vorgehensweise der Lebensdauerberechnung unter Berücksichtigung der statistischen Streuung ist für EN-GJV-400 auf Basis der elektrischen Widerstandsänderung erläutert. Die Berechnung erfolgt hierbei analog zu der für den Vergütungsstahl 42CrMo4 beschriebenen Methode.



a)



b)

Abb. 6: (a) Mikrostruktur im Ausgangszustand; (b) Vergleich von berechneten und experimentell ermittelten Wöhlerkurven für verschiedene Bruchwahrscheinlichkeiten; EN-GJV-400

Davon abweichend werden insgesamt 8 ESVs durchgeführt, insgesamt 3 ESVs auf dem oberen und 5 ESVs auf dem unteren Spannungshorizont. Durch die Regression der Messgrößen und eine Kombination mit der $\arcsin\sqrt{P}$ Transformation [17], können so die Streubänder für unterschiedliche Bruch- bzw. Überlebenswahrscheinlichkeiten berechnet werden. Abb. 6b zeigt neben der Wöhlerkurve mit 50 %, auch die Streubänder für 5 % und 95 % Bruchwahrscheinlichkeit. Abb. 6b belegt deutlich die Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten Lebensdauern und den auf der Basis von PHYBAL berechneten Streubändern.

Zusammenfassung

Mechanische, thermische, elektrische und magnetische Messverfahren eignen sich zur systematischen mikrostrukturbasierten Charakterisierung des Ermüdungs- und Betriebsfestigkeitsverhaltens metallischer Werkstoffe und -verbindungen unter ein- und mehrstufiger zyklischer Beanspruchung zur Bewertung des Einflusses von Herstellungsverfahren, Verbindungstechnologien und Umgebungseinflüssen. Die verformungsinduzierte Veränderung der Proben temperatur kann in gleicher Weise zur Charakterisierung des Verformungs- und Schädigungsverhaltens genutzt werden wie die plastische Dehnungsamplitude. Der auf der Zunahme der Defektdichte beruhende Anstieg des elektrischen Widerstandes sowie der magnetischen Impedanz kündigt frühzeitig und aussagekräftig das Versagen an. Messtechnisch instrumentierte stufenförmige und kontinuierliche Laststeigerungsversuche liefern mit sehr geringer Probenanzahl sehr schnell umfangreiche Informationen über die zyklischen Eigenschaften, so dass sich deren Anwendung zur Bewertung von Fertigungseinflüssen auf die Ermüdungsfestigkeit im Rahmen einer zeit- und kosteneffizienten produktionsbegleitenden Qualitätskontrolle anbietet. Daneben können auch magnetische und akustische Sensoren zur Bewertung betrieblicher Beanspruchung im Rahmen eines Condition- bzw. Structural-Health-Monitoring-Konzeptes eingesetzt werden.

LITERATUR

- [1] TH. Topper, R.M. Wetzel, J.D. Morrow, Neuber's rule applied to fatigue of notched specimens; *J. of Materials* 4, 1 (1969) 200-209.
- [2] C. Boller, T. Seeger, Materials data for cyclic loading, *Materials Science Monographs* 42 A-E, Elsevier Science Publ (1984).
- [3] F. Walther, Microstructure-oriented fatigue assessment of construction materials and joints using short-time load increase procedure. *Materials Testing* 56, 7-8 (2014) 519-527.
- [4] P. Starke, F. Walther, D. Eifler, "PHYBAL" a short-time procedure for a reliable fatigue life calculation, *Adv. Eng. Mat.* 12, 4 (2010) 276-282.
- [5] J.D. Morrow, Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. *Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity*, 67th Annual Meeting ASTM, STP 378 (1964) 45-87.
- [6] H. Harig, K. Middeldorf, K. Müller, Überblick über thermometrische Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Stählen. *HTM* 41 (1986) 286-296.
- [7] G. Meneghetti, Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation. *Int. J. Fatigue* 29 (2007) 81-94.
- [8] J.H. Constable, C. Sahay, Electrical resistance as an indicator of fatigue. *IEEE T. Compon. Hybr.* 15, 6 (1992) 1138-1145.
- [9] B. Sun, Y. Guo, High-cycle fatigue damage measurement based on electrical resistance change considering variable electrical resistivity and uneven damage. *Int. J. Fatigue* 26 (2004) 457-462.
- [10] I. Altpeter, R. Tschuncky, K. Hällen, G. Dobmann, C. Boller, M. Smaga, A. Sorich, D. Eifler, Early detection of damage in thermo-cyclically loaded austenitic materials, 16th Int. Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, India, (2011) 130-139.
- [11] F. Walther, D. Eifler, Cyclic deformation behavior of steels and light-metal alloys. *Mat. Sci. Eng. A* 468-470 (2007) 259-266.
- [12] F. Walther, Physikalische Messverfahren zur mikrostrukturbasierten Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens und zur Lebensdauerberechnung metallischer Werkstoffe. Habilitationsschrift, *Werkstoffkundliche Berichte*, Band 19, Hrsg.: Prof. Dr. D. Eifler, ISBN: 3-932066-18-9 (2008).

- [13] M. Manka, L. Wojarski, W. Tillmann, G. Frieling, S. Myslicki, F. Walther, Fatigue behavior of brazed AISI 304 joints using Au-fillers. Loet 2013, 10th Int. Conf. on Brazing, High Temperature Brazing and Diffusion Bonding, Aachen, DVS-Berichte Band 293, ISBN 978-3-87155-611-1 (2013) 232-236.
- [14] P. Wittke, M. Klein, F. Walther, Chemisch-mechanische Charakterisierung der kriechbeständigen bariumhaltigen Mg-Al-Ca-Legierung DieMag422. Materials Testing 56, 1 (2014) 16-23.
- [15] P. Starke, Lebensdauerberechnung bei ein- und mehrstufig beanspruchten Proben aus vergütetem 42CrMo4. Werkstoffkundliche Berichte, Band 20, Hrsg.: Prof. Dr. D. Eifler, ISBN: 3-932066-19-7 (2007).
- [16] H. Germann, P. Starke, D. Eifler, Resistivity based evaluation of the fatigue behaviour of cast irons, Metall. Mater. Trans. A 43 (2012) 2792-2798.
- [17] D. Dengel, Die arc sin \sqrt{P} -Transformation — ein einfaches Verfahren zur grafischen und rechnerischen Auswertung geplanter Wöhlerversuche, Mat.wiss. u. Werkstofftech. 6, 8 (1976) 253-261.

**Zinn-Silberlegierungen als alternative Kontakt-
beschichtung im Automotive- u. Industriebereich**
Etablierte Lösungen und neue Möglichkeiten

Dr.-Ing. Markus Kostron, Enayati GmbH & Co. KG

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund wachsender Herausforderungen an Kontaktbeschichtungen werden Silber und Reinzinnbeschichtungen gegenübergestellt und dabei auf die Whiskerproblematik näher eingegangen. Als alternative Kontaktbeschichtung werden Zinn-Silber-Legierungen kurz vorgestellt und auf ZinnEP® als Beispiel für eine etablierte Lösung näher eingegangen. Abschließend werden neue Möglichkeiten für den Einsatz von Zinn-Silber-Schichten andiskutiert.

Einleitung

Die Verbreitung der Elektronik nimmt in vielen Technologiefeldern stetig zu. Dies gilt insbesondere auch für den Automotive- und den Industriebereich. In heutigen Kraftfahrzeugen werden bereits pro Fahrzeug mehrere tausend Kontakte verbaut. Der Kostendruck durch den weltweiten Wettbewerb, die Entwicklung der Edelmetallpreise und die steigenden Umweltforderungen erhöhen kontinuierlich die Anforderungen an die Kontaktsysteme. Die Oberflächenbeschichtung der Kontakte spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

Kommen bekannte Materialien an ihre Grenzen, können durch Legierungen neue Lösungsmöglichkeiten erschlossen werden. Dies soll hier am Beispiel von Zinn-Silberlegierungen dargestellt werden. Zinn-Silberlegierungen kommen hierbei als Ersatz für klassische Edelmetalloberflächen in Frage oder können die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit von Reinzinnschichten übertreffen.

Im Focus der technologischen Anforderungen an die Schichtsysteme stehen eine möglichst lange Lebensdauer bei konstanten und minimierten Kontaktwiderständen und bestmögliche Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen sowie optimales Reib- und Verschleißverhalten bei den Steckvorgängen.

In diesem Beitrag werden daher einige grundlegende Eigenschaften von Silber- und Reinzinnschichten sowie deren Vor- und Nachteile kurz dargestellt und verglichen. Im Folgenden wird dann am Beispiel der ZinnEP®-Beschichtung eine etablierte Lösung für den Automotivebereich vorgestellt. Den Abschluss bildet ein Ausblick hinsichtlich neuer Möglichkeiten in Bezug auf Zinn-Silberlegierungen.

Silber- und Reinzinnbeschichtungen

Galvanisch beschichtete Silberkontakte finden in den letzten Jahren neben den traditionellen Anwendungen verstärkt ihren Einsatz in Sensoranwendungen im Automotivebereich. Silber hat die höchste thermische und elektrische Leitfähigkeit, womit Kontaktwiderstände im Bereich von 0,1 – 1 m Ω bei Normalkräften von 3 - 100 N und Schichtdicken von 2 – 20 μm erreicht werden können. Bei Niederstromanwendungen liegen die Schichtdicken bei mindestens 2 μm mit einer Unternickelung von wenigstens 1 μm . Der Einsatztemperaturbereich wird von einigen Herstellern mit -40 °C bis 140 °C angegeben.

Zinn ist ein relativ weiches Metall und hat mit ca. 232 °C einen vergleichsweise niedrigen Schmelzpunkt. Entsprechend wird für Zinn der Einsatztemperaturbereich häufig mit -40 °C bis 130 °C angegeben und liegt somit 10 K unter dem von Silber.

Galvanisch abgeschiedene Reinzinnschichten können sowohl glänzend als auch matt abgeschieden werden und eignen sich gut für Lötanwendungen.

Mattzinnschichten haben eine Korngröße von typischerweise 3 - 8 μm , eine hohe Reinheit, einen sehr geringen Kohlenstoffanteil und geringe Eigenspannungen. Sie haben eine gute Lagerfähigkeit und sind gut umschmelzbar.

Glanzzinnschichten sind härter und haben auf Grund der glatten Oberfläche und der in der Schicht eingelagerten Glanzbildner geringere Steckkräfte. Durch die Feinkörnigkeit mit Korngrenzen von unter 1 μm und durch die Glanzbildner selbst können innere Spannungen entstehen. Je nach Anwendungsfall können diese Faktoren bei den Zinnbeschichtungen die Whiskerbildung mehr oder weniger stark begünstigen.

Zinn-Whisker

Zinn-Whisker sind monokristalline Filamente mit Durchmessern von wenigen Mikrometern und können bis zu mehreren Millimetern lang werden. Ihr Auftreten ist nicht vorhersehbar und auch Jahre nach der Beschichtung noch möglich. Die Wachstumsgeschwindigkeiten sind mit 27 μm bis 2,7 mm pro Tag dabei relativ hoch. Als Einkristalle sind Whisker nahezu frei von Gitterbaufehlern und erreichen deshalb wesentlich höhere Festigkeiten als das polykristalline Grundmaterial. Durch den niedrigen Widerstand der Whisker von ca. 50 Ω können bis zum Schmelzen Ströme von bis zu 10 mA fließen [2]. Mit dieser Charakteristik stellen Whisker ein hohes Kurzschlussrisiko für elektronische Baugruppen dar. Dieses Risiko steigt insbesondere bei fortschreitender Miniaturisierung der Bauteile.

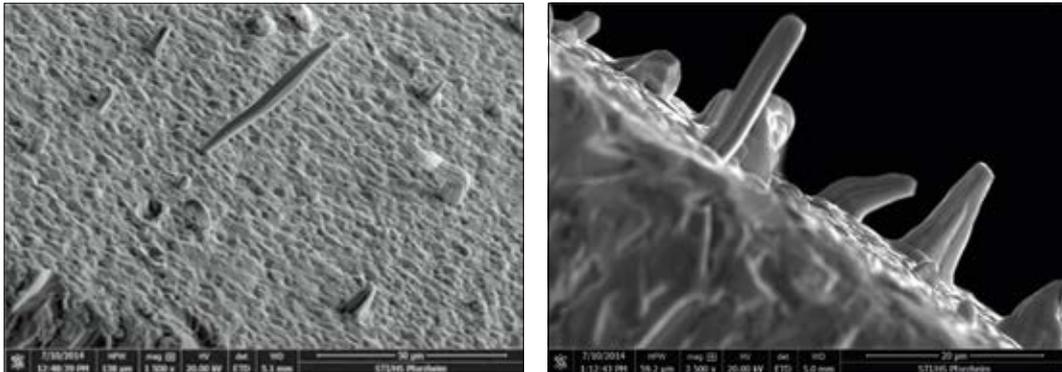


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Zinn Whiskern [3].

Whiskerwachstum ist unter anderem ein Phänomen des Stressabbaus im Material und tritt bevorzugt entlang der Korngrenzen auf. Dieser Stress kann entweder von außen durch Deformation auf die Schicht wirken oder innerhalb der Schicht durch eindiffundieren von Fremdatomen aufgebaut werden.

Durch Aufbringen einer Diffusionssperrschicht unter der Zinnschicht aus ca. 1 - 2,2 μm Nickel wird das Eindiffundieren von Kupferatomen minimiert und damit das Risiko der Whiskerbildung herabgesetzt. Alternativ kann durch Umschmelzen (Re-flow) die Whiskerbildung nahezu vollständig unterbunden werden.

Zinn-Silberlegierungen

Das System Sn-Ag ist durch die Entwicklung von bleifreien Lotlegierungen ein vielfach analysiertes Legierungssystem. In der Zusammensetzung Sn96,5-Ag3,5 bildet sich aus der intermetallischen Phase Ag_3Sn und der Sn-reichen Phase bei 217 °C ein Eutektikum. In der Regel ist dies auch die Zusammensetzung der Lotlegierungen. Die Streckgrenze mit 41,6 MPa und die Scherfestigkeit mit 26,8 MPa sind höher als in eutektischen Sn-Pb-Lotlegierungen [1].

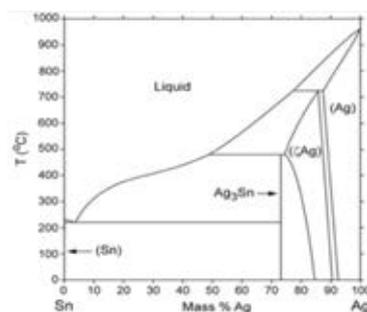


Abb.: 2: Phasendiagramm Sn-Ag-Legierung [4].

Die Kriechbeständigkeit von eutektischem Sn-Ag ist höher als die von eutektischem Sn-Pb, auch kann Sn-Ag bei höheren Temperaturen mehr Dehnung aufnehmen, bevor es zum Versagen des Materials kommt.

Voraussetzung für die gleichzeitige galvanische Abscheidung edler und unedler Metalle ist eine Annäherung der Stromdichte-Potential-Kurven.

Durch die kontrollierte Zugabe geeigneter Komplexbildner zum Elektrolyten können diese Abscheidungspotentiale gezielt variiert werden und durch eine entsprechende Einstellung der passenden Stromdichte somit auf dem Bauteil Legierungen in der gewünschten Zusammensetzung abgeschieden werden.

System	Ag	Sn
Ordnungszahl	47	50
Schmelzpunkt [°C]	961	232
Standardpotential Me/ Me ⁺ [V]	+ 0,8	-
Standardpotential Me/ Me ²⁺ [V]	+ 1,39	-0,14
Standardpotential Me/ Me ⁴⁺ [V]	-	+0,15

Die Legierungszusammensetzung folgt bei der galvanischen Abscheidung dem in Abb. 2 dargestellten Phasendiagramm. Je nach Ag-Anteil im Elektrolyt und Stromdichte besteht die Legierungsschicht aus sehr feinkörnigen Komponenten aus β -Sn, α -Ag sowie ϵ -Ag (Ag_3Sn) mit entsprechend unterschiedlich ausgebildeter Oberflächenmorphologie. Durch die höhere Oxidationsbeständigkeit von Ag und Ag_3Sn erhöht sich insgesamt die Temperaturbeständigkeit der Legierung gegenüber Reinzinn.

Mit am Markt verfügbaren Elektrolyten für die galvanische Zinn-Silber Legierungsbeschichtung können laut Herstellerangaben Silberanteile von ca. 3 Gew.% bei einer Stromdichte von 10 - 20 A/ dm² erreicht werden.

Wichtige Abscheideprozessparameter sind hierbei die Stromdichte, die Badtemperatur, die Anströmung der Bauteile und der Legierungsanteil im Bad.

Einpressverbindungen

Unter dem Begriff Einpresstechnik wird die lötfreie elektrische Verbindungstechnik im Bereich der Leiterplatten verstanden. Bei diesem Verfahren wird ein Einpresspin in die metallbeschichtete Bohrung einer Leiterplatte gepresst, wobei der Pin zumindest in einer Achse Übermaß hat.

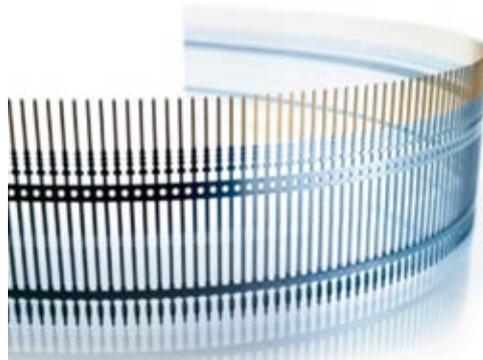


Abb. 3: Stanzband m. Einpresspins [3]

Beim Einpressen kommt es somit zu einer, je nach Ausführung, plastischen oder elastischen Deformation des Pins und der Oberflächenbeschichtungen im Kontaktbereich mit dem Ziel eine gasdichte und korrosionsbeständige elektrische Verbindung herzustellen.

Wichtig für eine sichere Prozessführung sind Einpresskräfte mit einer geringen Streubreite bei gleichzeitig dauerhafter Zuverlässigkeit. Der Reibungskoeffizient wird entscheidend vom Pindesign und den tribologischen Eigenschaften der Oberflächenbeschichtungen von Pin und Bohrung beeinflusst.

Immer noch häufig verwendet werden hierfür bleifreie Rein-Zinnoberflächen die jedoch durch die Deformation in die Schicht eingebrachten Spannungen zur Whiskerbildung neigen, was insbesondere bei den immer kleiner werdenden Pin-Abständen das Kurzschlussrisiko deutlich erhöht. Edelmetallbeschichtungen scheiden neben materialtechnischen Aspekten meist aus Kostengründen aus. Speziell in diesen Fällen bieten Zinn-Silber-Legierungen sehr interessante bleifreie Lösungsalternativen.

ZinnEP® als etablierte Lösung

ZinnEP® ist eine alternative Beschichtung auf Basis einer Zinn-Silber-Legierung für den Einpressbereich (-EP) bzw. mechanisch stark belasteter Bauteile im Elektrik- und Elektronikbereich für die Substitution von Zinnblei- und Reinzinnbeschichtungen. Hierbei handelt es sich um ein speziell für Automotive-Anwendungen qualifiziertes und etabliertes Schichtsystem. Der Schichtaufbau besteht aus einer Nickelzwischenschicht von 1,3 – 2,2 μm und einer Legierungsschicht im Bereich von 0,25 - 0,58 μm . Der Silberanteil in der Legierung liegt je nach Geometrie der

Einpresszone im Bereich von 40 – 73 Gew. %.

Die ZinnEP®- Beschichtung wird mit einem speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten und seit zwei Jahren im Serieneinsatz laufenden selektiven Reel-to-Reel Beschichtungsverfahren aufgebracht.

Im Zusammenspiel mit einem speziellen Zellentyp und definierten Prozessvorgaben können reproduzierbare Beschichtungen unterschiedlicher Einpresszonen-geometrien gewährleistet werden.

Die Qualitätskontrolle in Bezug auf die Schichtdicke und die Legierungsanalyse erfolgt über ein speziell entwickeltes Röntgenfluoreszenz-Verfahren.

Die besonderen Eigenschaften der Schicht sind ihre im Vergleich zu Reinzinn höhere Härte und den ca. 10% geringeren und weniger schwankenden Einpresskräften. Gleichzeitig wird durch die ZinnEP® -Schicht das Whiskerrisiko minimiert und die Temperaturbeständigkeit erhöht.

Neue Möglichkeiten

Neben dem Spezialgebiet der Einpressverbindungen bietet sich auch der Einsatz von Zinn-Silberlegierungen im Bereich von konventionellen Steckverbindingssystemen im Automotive und Industriebereich an, wenn höhere Einsatztemperaturen, niedrigere Steckkräfte, minimales Whiskerrisiko und höheres Verschleißverhalten im Vergleich zu Reinzinnschichten gefordert werden oder wenn Ag-Schichten ersetzt werden sollen. Insbesondere bei der zunehmenden Polanzahl bei den Steckverbindern werden konstante und niedrige Steckkräfte immer wichtiger.

Bei entsprechender Prozesskenntnis und Produktionserfahrung kann die Legierungszusammensetzung in einem größeren Bereich variiert werden. Damit besteht die Möglichkeit die Beschichtung je nach Bauteilgeometrie auf die jeweiligen Bedürfnisse anzupassen. Optional können durch verschiedene Nachbehandlungsverfahren die Schichteigenschaften noch entsprechend beeinflusst werden.

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] Lambracht, P.; Materialwissenschaftliche Aspekte bei der Entwicklung bleifreier Lotlegierungen, Universität Darmstadt, 2002.
- [2] Nasser Kanani, *Galvanotechnik*, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag München 2009.
- [3] Enayati GmbH & Co. KG, Oberflächen- und Anlagentechnik, Birkenfeld.
- [4] Kattner, U.; Phase Diagrams for Lead-Free Solder Alloys, Materials Science and Engineering Laboratory/ National Institute of Standards and Technology, Maryland, USA, 2002.

Vorteile von Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffen bei der Anwendung in der Elektronik und Elektrotechnik

Joachim Ruhnke, Inovon GmbH & Co. KG

Einleitung

Notwendigkeit von Aluminium-Kupfer- Verbundwerkstoffen

Aluminium plattierte Verbundwerkstoffe sind seit vielen Jahren aus der Bondtechnik bekannt. Aus dieser bewährten Anwendung für das Aluminium Dickdrahtbonden sind aufgrund neuer Anforderungen in der Elektronik und Elektrotechnik neue Anwendungsfelder für Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffe entstanden. Auch die weiter fortschreitenden Entwicklungen in Automobilbau und der E-Mobilität erfordern die Verwendung von Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffen. Die wesentlichen Gründe für den Einsatz dieser Werkstoffe sind Optimierung von Prozessabläufen, Gewichtsreduzierung und daraus folgend Kosteneinsparungen. Weiterhin gibt es Aufgabenstellungen, die mit vorhandenen Techniken nur sehr aufwändig oder gar nicht lösbar sind. Hier bieten die plattierten Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffe hervorragende Möglichkeiten, auch schwierige Anwendungsfälle innovativ zu lösen.

Herstellung und Werkstoffe

Herstellverfahren Aluminium-Kupfer- Verbundwerkstoffe

Die Herstellung von Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffen erfolgt durch Kaltwalzplattieren. Bei diesem Verfahren werden die beiden Plattierpartner vor dem Plattiervorgang gereinigt um eine metallisch reine Oberfläche zu erzielen. Hierbei werden sowohl chemische als auch mechanische Verfahren eingesetzt. Die so präparierten Werkstoffe werden dann unter hohem Druck ohne Zuführung von Wärme ineinander gewalzt. Dies kann sowohl selektiv als auch vollflächig geschehen. Es entsteht ein unlösbarer Metallverbund, der in weiteren Prozessschritten wie Walzen oder Längsteilen auf die endgültige Abmessung gebracht wird. Durch

die Folge der Prozessschritte werden auch die erforderlichen mechanischen Werte wie Härte oder Festigkeit des Werkstoffverbundes eingestellt.



Selektiv plattiertes Band



vollplattiertes Band

Werkstoffe

Als Standard-Werkstoffe für diesen Verbund haben sich sauerstofffreies Kupfer Cu-HCP nach DIN EN 13599 und Aluminium EN AW-1050A (Al99,5) bewährt. Der Kupferwerkstoff hat eine Reinheit von min. 99,95%, die Reinheit des Aluminiums beträgt min. 99,5%. Ein Vergleich der Eigenschaften von Kupfer und Aluminium ist in der folgenden Tabelle dargestellt [2]:

Eigenschaft	Al EN AW 1050A	Cu-HCP
elektrische Leitfähigkeit [MS/m]	36	58
thermische Leitfähigkeit [W/mK]	220	385
Dichte [g/cm ³]	2,71	8,94
Schmelzpunkt [°C]	650	1083
E-Modul [GPa]	69	115
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	23,5	16,9

Kostenbetrachtung

Der Kostenfaktor ist ein weiterer wichtiger Aspekt. Die Preise für Aluminium und Kupfer sind – wie andere Metallkurse auch – Schwankungen unterworfen. Im Verlauf der letzten 3 Jahre zeigt sich für Aluminium und Kupfer folgendes Bild [3], [4]:



Aluminium (€/to)



Kupfer (€/to)

In den letzten drei Jahren lag die Preisspanne bei Aluminium im Bereich von 1,20 bis 1,77€/kg, bei Kupfer im Bereich von 4,63 bis 6,45€/kg.

Aufgrund der geringeren Leitfähigkeit muss bei Verwendung von Aluminium als elektrischer Leiter der Leitungsquerschnitt um den Faktor 1,6 erhöht werden. Trotzdem ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Dichte und des deutlich niedrigeren Preises von Aluminium eine bedeutende Einsparung. Dies zeigt die Betrachtung eines Kupferkabels mit 35mm² Querschnitt. Der erforderliche Querschnitt eines Aluminiumkabels beträgt aufgrund der unterschiedlichen Leitfähigkeiten 56 mm². Als Durchschnittspreise der letzten 3 Jahre wurde für Kupfer 5,60€/kg und für Aluminium 1,45€/kg angenommen.

Eigenschaft	Kupfer	Aluminium
Gewicht [kg/m]	0,312	0,151
Metallkosten [€/m]	1,75	0,22

Obwohl ein erheblich größerer Querschnitt des Aluminiumkabels erforderlich ist, betragen die Metallkosten nur ca. 12,5% der Kupfermetallkosten, das Gewicht beträgt nur ca. die Hälfte eines vergleichbaren Kupferkabels.

Vorteile von Kupfer-Aluminium- Verbundwerkstoffen in der Praxis

Anschluss von Aluminiumlitzen an Kabelschuhe

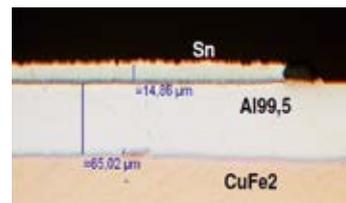
Den Umstand der Gewichtseinsparung macht man sich z.B. bei der Verwendung von Aluminiumkabeln in Kraftfahrzeugen zu Nutze. In einem durchschnittlich ausgestatteten Mittelklassefahrzeug befinden sich 10-15 kg reines Kupfer [1], dieses in erster Linie als Leitermaterial in den Leitungssätzen. Ziel ist es, zuerst bei großen Leitungsquerschnitten Kupfer durch Aluminium zu ersetzen. Üblicherweise werden diese Kabel an Anschlussschuhe aus Kupferwerkstoffen gecrimpt. Hier machen sich bei der Verwendung von Aluminiumlitzen deren geringe Festigkeit, die Relaxationseigenschaften, die Anfälligkeit für elektrochemische Korrosion und die auf dem Aluminium vorhandene Oxidschicht negativ bemerkbar. Als Lösung bietet sich ein mit Aluminium plattiertes Bimetall an. Hier wird die Aluminiumlitze in einem Reibschweißverfahren gleichzeitig kompaktiert und auf die plattierte Aluminiumoberfläche unter Einsatz von Ultraschallenergie geschweißt. Die Oxidschichten der einzelnen Drähte der Litze werden dabei zerstört und die kompaktierte Litze mit dem Kabelschuh verbunden. Die Kabelschuhe werden während ihres Herstellungsprozesses galvanisch verzinkt, damit keine ungeschützten Kupfer/Aluminium-Übergänge vorhanden sind. Die Verzinnung umfaßt auch die Stanzkanten und deckt gleichzeitig auch einen Teil der Aluminiumplattierung ab.



vom Bimetallband zum Kabelschuh



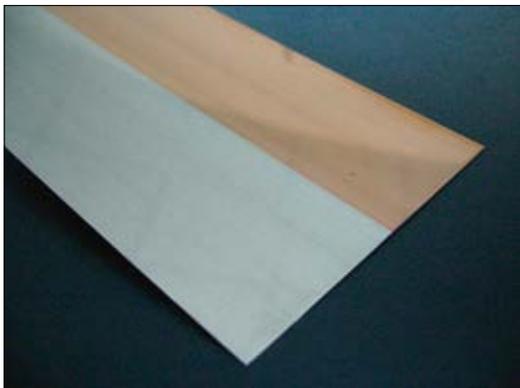
Al-plattiertes Band mit Verzinnung bis über die Al-Schicht



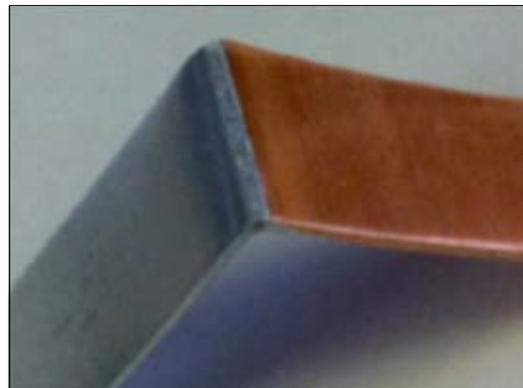
Schliff durch die überlappend verzinnnte Al-Schicht

Zellverbinder

Im Bereich der Elektromobilität werden häufig Li-Ion Batterien eingesetzt. Bei den einzelnen Zellen dieser Batterien besteht ein Pol aus Aluminium, der andere aus Kupfer. Somit entsteht die Forderung, diese Pole stoffgleich zu verbinden um unerwünschte Diffusionseffekte zwischen Aluminium und Kupferlegierungen zu vermeiden. Auch in diesem Fall bieten sich plattierte Werkstoffe an. Allerdings handelt es sich hier nicht um eine einplattierte Aluminiumbahn, sondern um ein Band, welches auf einer Seite aus massivem Kupfer und auf der anderen Seite aus massivem Aluminium besteht. Zwischen den beiden Seiten befindet sich ein Überlappungsbereich von ca. 5 mm Breite. Die Bindezone ist so gut ausgeprägt, dass bei einem Zugversuch, bei dem das Material auf der einen Seite im Kupfer und auf der anderen Seite im Aluminium eingespannt wird, das Aluminium aufgrund der geringeren Zugfestigkeit reißt. Eine Biegung in Übergang Aluminium zu Kupfer mit einem Biegeradius gleich Banddicke kann ebenfalls problemlos durchgeführt werden. Ähnlich wie bei den vorher erwähnten Kabelschuhen ist auch hier eine Verzinnung über die Kanten möglich. Dadurch ist die Verbindung sehr gut gegen elektrochemische Korrosion geschützt. Die nach ISO 9227 [6] durchgeführten Salznebelprüftests bestätigen dies.



Überlappend plattiertes Band



*Biegung 90°, parallel zur Walzrichtung
Biegeradius = Banddicke*



Schliff durch den Übergangsbereich



Nr	a0 mm	b0 mm	Rm MPa	Rp 0,2 MPa
1	0,72	27	139	-
2	0,72	26,6	145	-
3	0,72	27,8	142	-

Zugversuch, Material reißt im Aluminium und nicht im Plattierungsbereich



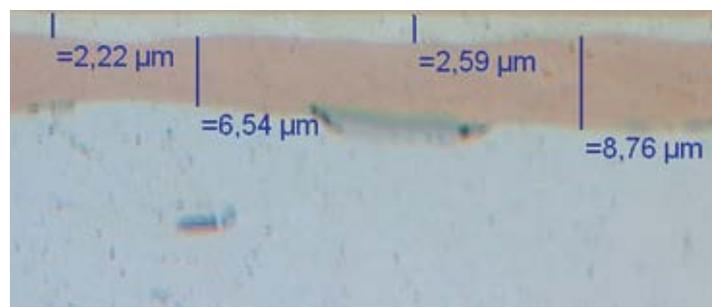
Prüfling mit verzinnter Kante nach Salznebelsprühtest



Schliff durch den Randbereich: kein Angriff auf die Al-Schicht

Anschluss von Solarzellen

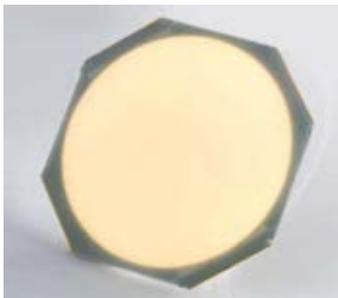
Der Anschluss der Solarzellen an die Stromsammelschienen ("Busbar") wird über eine Steckverbindung hergestellt. Die Forderung war in diesem Fall, eine galvanische Silberschicht auf das Aluminium aufzubringen. Dies ist aufgrund der auf dem Aluminium vorhandenen Oxidschicht nicht ohne weiteres zu realisieren. Deshalb wurde ein kupferplattiertes Aluminiumstreifen eingesetzt. Auf die Kupferseite kann problemlos eine galvanische Beschichtung aufgebracht werden, die als Funktionsschicht verwendet wird.



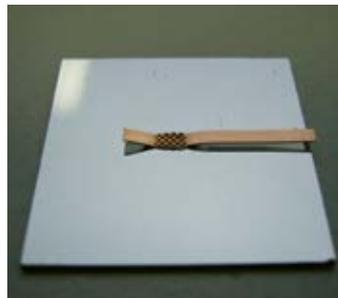
Mit Kupfer vollplattiertes Aluminium-Bändchen, Dicke 0,13 mm, mit aufplattierter Cu-Schicht und ca. 2µm galvanischer Silber Beschichtung

Organische Leuchtdioden (OLED)

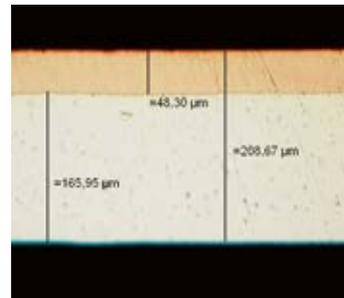
OLEDs (organic light emitting diode) bestehen aus mehreren Schichten. Je nach Aufbau und Verwendungszweck besteht die Rückseite der OLED aus Glas. Durch eine Beschichtung mit entsprechenden Elementen ist diese Glasrückseite elektrisch leitend und wird zur Kontaktierung der OLED verwendet. Es wird deshalb ein Material benötigt, welches auf die Glasseite aufgeschweißt werden kann. Da sich Aluminium sehr gut zum Ultraschallschweißen auf Glas eignet, ist es die erste Wahl bei dieser Verbindung. Der aufgeschweißte Aluminiumwerkstoff muss seinerseits wieder an die Elektronik der OLED angeschlossen werden. Hier kommt dann die mit Kupfer plattierte Seite des Kontaktierungsbandes zum Einsatz und die weitere Kontaktierung erfolgt über die Kupferseite.



OLED



angeschweißte Al-Seite



Aufbau des Anschlußbandes

Generatorwicklung aus Aluminium Draht

Eine weitere Anwendung von Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffen findet sich im Bereich Wicklungen von Elektromotoren oder Generatoren. Die Bandbreite der Endgeräte reicht von Automobilanwendungen bis hin zu Stromerzeugern für den privaten und kommerziellen Einsatz. Auch hier werden zur Herstellung der Wicklungen bereits Aluminium-Drähte verwendet. Diese Drähte müssen dann ihrerseits an den Kommutator angeschlossen werden. Aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten wird hier ein Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoff im Dickenbereich bis ca. 6 mm benötigt. Auf das Aluminiumträgermaterial werden die Enden der Aluminiumwicklung geschweißt, auf der einplattierten Kupferbahn laufen dann die Motor- bzw. Generatorbürsten.



6 mm dickes Aluminium mit Cu-Einlage

Verbindung Al-Gehäuse mit Cu

Bei dieser Aufgabenstellung muss an ein Aluminiumgehäuse ein elektronisches Bauelement mit Kupferanschlussfahne angeschweißt werden. Das Gehäuse besteht aus der Aluminiumlegierung Al6082. Diese Legierung aus der 6000-Reihe enthält geringe Mengen Magnesium und Mangan, handelt es sich um eine aushärtbare Legierung. Plattierversuche haben gezeigt, dass die Legierung beim Plattieren aufgrund der dort erforderlich hohen Umformungen Probleme bereitet und für eine Serienproduktion nicht geeignet ist. Als Lösung wurde ein Trägerwerkstoff aus Al EN 1050A verwendet. In diesem befindet sich ein selektiv einplattierter Kupferstreifen. Aus diesem Band werden Teile gestanzt, die mit der Aluminiumseite auf das Gehäuse geschweißt werden. Auf das einplattierte Kupfer wird dann das elektronische Bauelement geschweißt.

Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassung der Vorteile von Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffen

Aufgabenstellung	Lösung durch Aluminium-Kupfer-Verbundwerkstoff
Aluminium-Litze an Kupfer-Kabelschuh anschweißen	Anschluss der Al-Litze über Al-plattiertes Cu-Bimetall, Al-Litze kann auf plattierte Al-Schicht geschweißt werden, durch überlappende Galvanikschicht Vermeidung von Korrosion
Al- und Cu-Batterieelektroden verbinden	Verwendung von überlappend plattierten Al/Cu-Bimetall, Schweißung auf den Zellpolen erfolgt als Monometallsystem
Al Verbinder an Busbar galvanisch beschichten	Mit Cu plattierte Al-Folie, Cu-Seite kann galvanisch beschichtet werden
Anschluss an Glas schweißen und elektrisch kontaktieren	Mit Al plattierte Cu-Folie, Ultraschallsschweißen auf Glas erfolgt über Al-Seite, weitere elektrische Kontaktierung über Cu-Seite
Wicklung aus Aluminiumdraht an Cu-Kommutator schweißen	Schweißen der Wicklungdrähte auf Al, Kommutator auf Cu, große Dicken sowohl des Bandes als auch der Cu-Einlage möglich
Elektronische Komponente an Al-Gehäuse anschließen	Selektiv mit Cu plattiertes Al-Band, Al-Träger kann an Al-Gehäuse geschweißt werden, Anschluß der elektronischen Komponente erfolgt über Cu Plattierung

Fazit

Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffe eignen sich hervorragend zur Lösung komplexer Anwendungsfälle in der Elektronik und Elektrotechnik. Es sind sowohl Plattierungen mit Kupfer oder Aluminiumträger möglich, als auch überlappende Plattierungen, bei der auf der einen Seite massives Kupfer und auf der anderen Seite massives Aluminium vorliegt. Die Möglichkeit der galvanischen Beschichtung von aufplattierten Cu-Schichten sowie die überlappende Beschichtung der Al-Schicht, ermöglichen eine flexible Auslegung der Bauteile und einen zuverlässigen Einsatz von aus Kupfer-Aluminium-Verbundwerkstoffen gefertigten Teilen in der Elektronik und Elektrotechnik.

QUELLEN

- [1] Seitz, Fink, VDE-Fachbericht, 21. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar, Tagungsband 67 "Kontaktverhalten und Schalten", September 2011, Seite 142 ff
- [2] Fuhrmann, Schlegel, Großmann, VDE-Fachbericht, 22. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar, Tagungsband 69 "Kontaktverhalten und Schalten", Oktober 2013, Seite 56 ff
- [3] <http://www.boerse.de/chart-tool/Aluminium> (10.08.2015)
- [4] <http://www.boerse.de/chart-tool/Kupfer> (10.08.2015)
- [5] Deutsches Kupferinstitut, Berlin, Werkstoff-Datenblatt Cu-HCP
- [6] DIN EN ISO 9227, Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfung (ISO 9227:2006)
- [7] Deißler, Klingenberg, Marto, WOMag 11/2013, www.womag.online.de

Galvanische Abscheidung von Schichtwerkstoffen für die Steckverbinderindustrie

Thomas Frey, IMO Oberflächentechnik GmbH

Kurzfassung

Zur Herstellung eines qualitativ hochwertigen Kontakts tragen, neben der galvanischen Beschichtung, sehr viele Punkte zum Erfolg bei. Unter anderem ist die Qualität der Konstruktion sowie die Grund- und Schichtwerkstoffqualität ein entscheidender Faktor, welcher oft vernachlässigt wird und die Kosten der galvanischen Beschichtung erhöht bzw. die Beschichtung oft unmöglich macht.

Der Artikel beschäftigt sich ausführlich mit den verschiedenen Anforderungen der Schichtwerkstoffe, des Rohmaterials und dessen Konstruktion, zur Erlangung galvanisierfähiger Materialien im Band- als auch Einzelteilbereich. Bei den Schichtwerkstoffen werden die Vor- und Nachteile der Metalle wie Gold, Palladium, Silber, Zinn, Weißbronze, Nickel und Kupfer ausgeführt und allgemeine Regeln der Beschichtung, wie z. B. Auslaufzonen erörtert.

Bei der Rohmaterialkonstruktion werden neben den Eigenschaften der Materialoberfläche auch allgemeinen Eigenschaften von Bändern für die Beschichtung, wie z. B. Rollkrümmung, Säbelkrümmung, Torsion, Breite, Dicke etc. angesprochen. Im Speziellen werden konstruktive Besonderheiten des Rohmaterials in Verbindung mit Selektivwerkzeugen beim Galvanisieren von Bändern und deren Toleranzen diskutiert.

Neben der Bandgalvanik werden auch die Eigenheiten der Schüttgutgalvanik in Beziehung der Rohmaterialeigenschaften abgehandelt.

Qualitätskreis für beschichtete Kontakte

In Bild 1 ist ein Qualitätskreis für einen galvanischen Prozess gezeigt. Jeder Schritt im Gesamtprozess der Herstellung eines qualitativ hochwertigen Produktes in der Galvanotechnik unterliegt Kontrollen und Prozeduren. Jeder Teilprozess bedarf für sich der Optimierung. Dies beginnt bereits bei der Materialwahl der Grund- und Schichtwerkstoffe sowie der Konstruktion. Schon hier sind die Erfahrungen des Galvaniseurs hinsichtlich der Formgebung einzubeziehen. Je später die Einbezie-

hung des Galvaniseurs in den Produktentstehungsprozess erfolgt, desto vielfältiger können die zu lösenden Probleme der folgenden Teilprozesse werden. Dies wirkt wieder weiter in Richtung Produktkosten auf Grund verringerter Ausbeute (Qualitätsmängel) und späterer Produktausfälle (wegen später erforderlicher Kompromisse in der Kette Konstruktion-Werkstoffauswahl-galvanischer Prozess).

Erst die Qualität aus der Summe der Teilprozesse ergibt die Konstanz des Gesamtprozesses und damit der Produkte. Qualität heißt: Ein den Anforderungen des Kunden entsprechendes Produkt, das sich durch eine hohe Produktgüte und zuverlässige Funktionalität über die Produktlebensdauer auszeichnet und kostengünstig hergestellt werden kann, zu liefern [1].

Der folgende Artikel befasst sich mit der Qualität der Konstruktion, der galvanischen Beschichtung sowie der Grund- und Schichtwerkstoffqualität, die einen entscheidenden Faktor zur Kostenreduzierung der galvanischen Beschichtung darstellt bzw. die Beschichtung erst möglich macht.



Bild 1: Qualitätskreis für galvanische Produkte [1]

Theoretische Grundlagen der galvanischen Beschichtung

Der Begriff Galvanotechnik selbst wurde durch die Deutsche Gesellschaft für Galvanotechnik und Oberflächentechnik, wie folgt, definiert:

Die Galvanotechnik umfasst als ein Teilgebiet der industriellen Praxis die

- a. elektrochemische Metallabscheidung und Auflösung mit und ohne äußere Stromquellen
- b. Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Metallen mittels elektrischer, chemischer, thermischer Verfahren,
- c. Abscheidung nichtmetallischer Stoffe (Elektrophoretische Emaillierung und Lackierung),
- d. Herstellung von Formteilen durch Galvanoplastik oder Formteilätzen,
- e. Vorbehandlung durch Schleifen, Beizen, Polieren, Reinigen,
- f. Behandlung von Frisch- und Abwasser,
- g. Rückgewinnung der Wertstoffe.

Die Kurzfassung der Definition lautet:

Chemische und/oder elektrochemische Oberflächenveredelung fester Stoffe zum Korrosionsschutz und/oder zur dekorativen bzw. funktionellen Anwendung [1].

Die elektrolytische Abscheidung hat verschiedene Gesetzmäßigkeiten, welche die Beschichtung positiv und negativ beeinflussen können. Zusätzlich spielen die Badparameter sowie Kathode als auch Anode eine gewichtige Rolle. In Bild 2 ist schematisch eine elektrolytische Nickelabscheidung dargestellt [3].

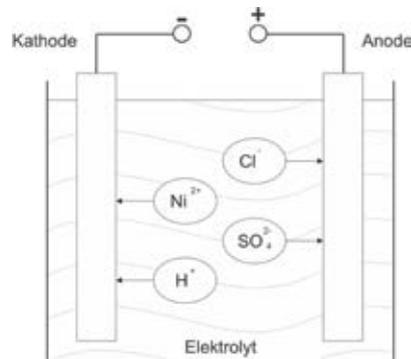


Bild 2: Grundprinzip der elektrolytischen Abscheidung von Nickel [3]

Elektrolyte, die in der Galvanotechnik zur Abscheidung metallischer Schichten eingesetzt werden, sind Metallsalzlösungen in denen die Metallsalze in Form von elektrisch geladenen Ionen vorliegen [4]. Die für den Nickelelektrolyten eingesetzten Salze Nickelsulfat und Nickelchlorid sind daher in Wasser gut löslich und bilden mit weiteren Zusätzen den Elektrolyten. Die Abscheidung des Nickels erfolgt dann durch Anlegen einer äußeren Gleichstromquelle an der Kathode [3]. Gleichzeitig wird die Nickelanode aufgelöst und liefert das an der Kathode verbrauchte Metall im Elektrolyten nach.

Ergänzend wird in der praktischen Galvanotechnik die galvanische Abscheidung von zahlreichen weiteren Parametern beeinflusst. Bei der Zusammensetzung des Elektrolyten ist unter anderem der Metallgehalt, organische Bestandteile, pH-Wert und die richtige Temperatur für eine optimale Abscheidung wichtig.

Die Geschwindigkeit der Abscheidung kann über die Stromdichte geregelt werden. Die dabei erhaltene Spannung ergibt sich aus dem angegebenen Strom und dem elektrischen Gesamtwiderstand des Systems. Die Badumwälzung beeinflusst die Abscheidung, insbesondere die maximale Stromdichte. Durch die Geometrie des Teils ist die Verteilung der Schicht weitgehend vorbestimmt. Die Anordnung von Anode und Kathode wirken sich ebenfalls auf die Schichtverteilung aus [1]. Um eine gute Abscheidung zu erzielen, sollte die Anodenfläche immer größer sein wie die Kathodenfläche.

Grundsätzlich müssen für eine optimale Beschichtung gewisse Verfahrensschritte eingehalten werden:

1. Reinigung / Vorbehandlung
2. Beschichtung
3. Nachbehandlung / Heißwasserspüle
4. Trocknung

Im Folgenden ist die Prozessfolge einer einfachen Vernickelung und Vergoldung dargestellt, die sich aus insgesamt 22 Prozessschritten zusammensetzt (Tabelle 1). Zwischen den einzelnen Prozessschritten muss immer gut mit demineralisiertem Wasser gespült werden, damit eine haftfeste und optisch ansprechende Metallschicht abgeschieden wird [5].

Verfahren / Allgemein	Prozessschritt	Verfahren: Vernickeln und Vergolden Prozess / Medium
Reinigung Vorbehandlung	1	Vorwaschen
	2	Abkochentfettung
	3	Abkochentfettung
	4	Elektrolyt. Entfettung kat.
	5	Sparspüle
	6	Sparspüle
	7	Fließspüle
	8	Dekapierung
	9	Sparspüle
	10	Sparspüle
	11	Fließspüle
Beschichtung	12	Nickelbad
	13	Sparspüle
	14	Sparspüle
	15	Fließspüle
	16	Goldbad
Nachbehandlung Heißwasserspüle	17	Sparspüle
	18	Sparspüle
	19	Sparspüle
	20	Fließspüle
	21	Heißwasserspüle
Trocknung	22	Kondenstrocknung

Tabelle 1: Prozessfolge einer galvanischen Nickel- und Goldbeschichtung [5]

Schichtwerkstoffe mit ihren Schichtkombinationen und deren Anwendungen

Nachstehend werden die gebräuchlichsten Überzugsmetalle dargestellt und kurz beschrieben.

Gold

Wegen der hohen Anlauf- und Korrosionsbeständigkeit, der guten elektrischen Leitfähigkeit und des niedrigen Übergangswiderstandes ist Gold ein ideales Kontaktmaterial. Bei Steckverbindern, die gleichzeitig eine gute Verschleißeigenschaft haben müssen, wird eine Hartgoldschicht aufgebracht (Legierungsanteil Co oder Ni ca. 0,2 bis 0,3 %). Aufgrund der Diffusion von Gold in Kupferwerkstoffe (Gold diffundiert bei Zimmertemperatur in ca. 10 Jahren 1 µm in die Cu-Schicht) unterlegt man die Vergoldung bei Steckverbindern mit einer Zwischenschicht aus Nickel. Diese Schicht bewirkt gleichzeitig eine bessere Abriebfestigkeit. Übliche Beschichtungen für Kontakte sind 1 – 3 µm Nickel unter 0,8 bzw. 1,27 µm Hartgold. Für die Vergoldung von Halbleitern wird Feingold eingesetzt und für bondbare Schichten ultrareines Gold mit einem Goldgehalt von 99,99 % ohne jeglichen Zusatz [1]. Der hohe Goldpreis und die verhältnismäßig hohe Dichte von 19,3 g/cm³ [2] sind nachteilig für den Einsatz, daher sucht die Industrie nach Ersatzlösungen.

Palladium

Durch den in den 80er-Jahren erheblich angestiegenen Goldpreis hat man Ersatzmetalle gesucht, die die Kontakteigenschaften des Goldes zu wesentlich geringeren Kosten erfüllen. Palladium hat auf Grund seiner elektrischen Eigenschaften vor allem als Palladium-Nickellegierung das Gold in vielen Anwendungsfällen ersetzt. Die Eigenschaften von Reinpalladium und Pd/Ni sind im Abriebverhalten jedoch schlechter als Gold. Auf Grund der stärkeren Abrasion wird Palladium und Pd/Ni (80/20) nahezu ausschließlich mit einem zusätzlichen Goldflash (ca. 0.2 µm) eingesetzt. Die Flashvergoldung wirkt dann als Schmiermittel und verhindert den abrasiven Verschleiß. Da Reinpalladiumelektrolyte sehr empfindlich sind und ein hoher Aufwand an Wartung und Prozessüberwachung nötig ist, wird die Pd/Ni-Variante mit zusätzlichem Au-Flash allgemein bevorzugt [1]. Zusätzlich werden die Edelmetallkosten durch die Legierung reduziert. Der Schichtaufbau für Kontakte

besteht aus 1 – 3 µm Ni unter 0,5 – 0,7 µm Pd/Ni (80/20) unter 0,05 – 0,2 µm Hartgold (Au-Flash).

Silber

Auf Grund der sehr guten Leitfähigkeit wäre Silber das ideale Kontaktmaterial. Es wird auch bei sehr vielen Kontakten eingesetzt. Die Problematik der Silberschicht liegt in der Neigung zu Sulfidbildung durch den in der Luft enthaltenen Schwefelwasserstoff. Ungeschützte Silberoberflächen laufen bei längerer Lagerung schwarz an. Der Übergangswiderstand kann nur durch hohe Steckkräfte überbrückt werden, wodurch die dünne Sulfidschicht durchgedrückt wird.

Die Leitfähigkeit und der Übergangswiderstand werden durch Härtungszusätze wie Antimon und Arsen schlechter. Diese durch Dotierungsmetalle erzeugten Hartsilberschichten werden deshalb nur bedingt eingesetzt. Um auch bei weicheren Silberschichten gute Abriebbeständigkeit und niedrige Steckkräfte zu erhalten, wird die Silberschicht bei der Anwendung im Steckverbinderbereich mit einer Passivierung versehen, die einerseits als Schmiermittel dient, andererseits eine Schutzschicht gegenüber dem Schwefelwasserstoff bildet. Diese Passivierung ist auf Thiolbasis aufgebaut und unter verschiedenen Namen im Handel. Weitere Passivierungsmöglichkeiten: Aufbringen einer dünnen Rhodiumschicht von 0,2 – 0,5 µm [1] oder eine metallische Passivierung auf Basis von zweiwertigem Zinn. Die angewandten Schichtdicken liegen bei 1 – 4 µm Ag für Schwachstrom- und bei >5 µm für Starkstromkontakte.

Zinn

Zinn ist eines der am häufigsten eingesetzten Kontaktmetalle. Vor allem im Automobilbereich wird Zinn sehr häufig verwendet. Als Löthilfe werden nahezu alle selektiv beschichteten Bänder im Anschlussbereich mit Zinn belegt. Die Beschichtung mit Zinn erlaubt eine sehr schnelle automatische Lötung, da der Schmelzpunkt der galvanisch abgeschiedenen Schicht nahezu dem Zinnlot entspricht. Die galvanische Vorverzinnung hat den Vorteil, dass das Zinn keine Verunreinigung der Lotbäder verursacht, während dies bei Gold und Silber der Fall ist. Im Steckbereich kann die Zinnschicht nur unter bestimmten Voraussetzungen verwendet werden. Auf Grund der geringen Härte führt das Zinn zu hohen Steckkräften und ist nicht geeignet bei hoher Steckzyklenzahl. Eine Verbesserung wird erzielt durch Anschmelzen der Schicht, wobei eine intermetallische Phase erzeugt wird, die

eine hohe Härte aufweist. Die Zinnschichtstärke wird bei diesen Teilen so dünn aufgebracht, dass fast nur noch die intermetallische Phase existiert. Das Ergebnis ist eine hohe Abriebfestigkeit [1]. Weiterhin finden Zinnschichten in der Einpress-technik ihre Anwendung.

Zinnschichten in den entsprechenden Anwendungsformen:

0,2 – 0,8 μm Sn über 1 – 3 μm Nickel für Einpresszonen

1 – 3 μm Sn für Crimp- und Steckkontakte

4 – 8 μm Sn für Lötkontakte

Weißbronze (IMOlloy)

Weißbronzeüberzüge enthalten etwa 55 % Kupfer, 30 % Zinn und 15 % Zink und besitzen eine sehr gute Abriebbeständigkeit, Anlauf- sowie Korrosionsbeständigkeit und sind diamagnetisch. Daher finden sie neben anderen Anwendungen Einsatz in Steckverbindern der Hochfrequenztechnik und zeigen geringe Intermodulationswerte im Frequenzbereich für den Mobilfunk [6].

Nickel

Nickel wird in der Regel als Korrosionsschutz und Sperrschicht aufgebracht. Die relativ hohe Härte der Ni-Niederschläge wirkt sich außerdem positiv auf die Verschleißseigenschaften aus.

Eine Anwendung direkt als Kontaktmaterial wird nur bei höheren Strömen möglich sein, da das Nickel einen relativ hohen Übergangswiderstand aufweist. Die Problematik der Nickelschichten liegt in der relativ geringen Bruchdehnung. Es ergeben sich oft Probleme mit der Bildung von Rissen bei Schichten, die nachträglich verformt werden. Wenn die Schicht nach der galvanischen Beschichtung verformt wird, sollten ausschließlich Bäder ohne Glanzzusatz eingesetzt werden. Vorteilhaft ist es, die Verformung in den qualitätsrelevanten Zonen (Kontaktbereiche) vor der Galvanik vorzunehmen [1].

Kupfer

Kupfer ist auf Grund seiner guten Leitfähigkeit ein sehr wichtiges Metall für die Elektronik. Galvanisch abgeschiedenes Kupfer wird sehr häufig in der Leiterplattenherstellung für Leiterbahnen und Durchkontaktierungen eingesetzt. Allerdings

überzieht sich das Kupfer sehr schnell mit einer Oxydschicht und wird deshalb im Steckverbinderbereich meistens nur als Zwischenschicht aufgebracht. Kupfer wird als Diffusionssperre benötigt, wenn Bauteile aus zinkhaltigen Grundwerkstoffen bestehen, vor allem wenn bestimmte Anforderungen an die Lötbarkeit gegeben sind. Bei bleihaltigen Drehteilen wird Kupfer ebenfalls häufig als Haftvermittler verwendet [1].

QUALITATIVE VORGABEN AN DEN SCHICHT- UND GRUNDWERKSTOFF FÜR DIE GALVANISCHE BESCHICHTUNG

Galvanisierbare Oberflächen

Bevor man das Galvanisieren beginnt, ist es wichtig, dass das Vormaterial eine Oberflächenbeschaffenheit hat, die das Beschichten grundsätzlich zulässt. Die Oberflächenbeschaffenheit kann entscheidenden Einfluss auf die Galvanisierbarkeit haben und zu späteren Oberflächenfehlern führen. Sie ist durch das Herstell- und Verarbeitungsverfahren des Vormaterials gegeben. Fehler im Herstellprozess können daher zu Inhomogenitäten der Oberfläche führen (Lunker, Materialüberlappungen, Einschlüsse, Kerben), diese werden ergänzt durch Walz- und Oxidhäute, Rückstände von Lötprozessen, Glasstrahlen sowie schwer entfernbare Öle und Fette [1]. Stanzöle sollten daher wässrig entfettbar sein und das Grundmaterial einen geringen Befettungsgrad aufweisen. Zusätzlich sollten die Oberflächen frei von Silizium sein.

Hundeknocheneffekt

Bei der elektrolytischen Metallabscheidung muss grundsätzlich eine Gesetzmäßigkeit beachtet werden. Hierbei handelt es sich um die Niederschlagsdicke der Abscheidung, die nicht gleichmäßig über die Oberfläche des galvanisierten Werkstücks verteilt ist. Allgemein ist die Kathodenstromdichte und somit die Dicke des Niederschlags an Ecken, Kanten und hervorspringenden Flächen oder Punkten höher, in Vertiefungen sowie in mittleren Zonen großer Flächen niedriger als die rechnerisch zu erwartende Schichtstärke [7].

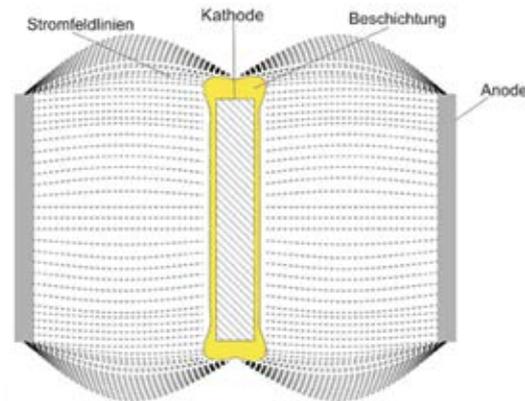


Bild 3: Schematische Darstellung des „Hundeknochen“-Effektes [5]

Bild 3 zeigt schematisch die Verdichtung der Stromfeldlinien und damit die Erhöhung der Stromdichte auf den Ecken eines Werkstücks [8]. Aus dieser höheren Kathodenstromdichte ergibt sich an diesen Stellen eine verstärkte Metallabscheidung, den sogenannten „Hundeknochen“-Effekt [9]. Eine geringe Beschichtung erhält man in engen Winkeln, in Ecken, in Kanten und geschlossenen Röhren. Hierbei spricht man vom Effekt der „Abschirmung“. Diese Effekte spielen speziell beim Design von Messer- und Stiftkontakten, Stanzkanten, gebogenen Teilen, Ecken, Kanten, engen Winkeln sowie bei der Wartung der Stanzwerkzeuge eine wichtige Rolle. Um diese beiden Effekte zu reduzieren und eine gleichmäßigere Abscheidung zu gewährleisten, sollten Kontaktspitzen, Ecken, Kanten und Winkel möglichst abgerundet ausgeführt werden. Auch schlecht gewartete Stanzwerkzeuge können zu ausgeprägten Stanzkanten führen, die den Aufbau von Metallen an diesen Stellen fördern. Zur Vermeidung sollten Stanzwerkzeuge deshalb regelmäßig gewartet werden [8]. In Bild 4 sind einige Beispiele zur Verbesserung der Schichtverteilung aufgezeigt [1].

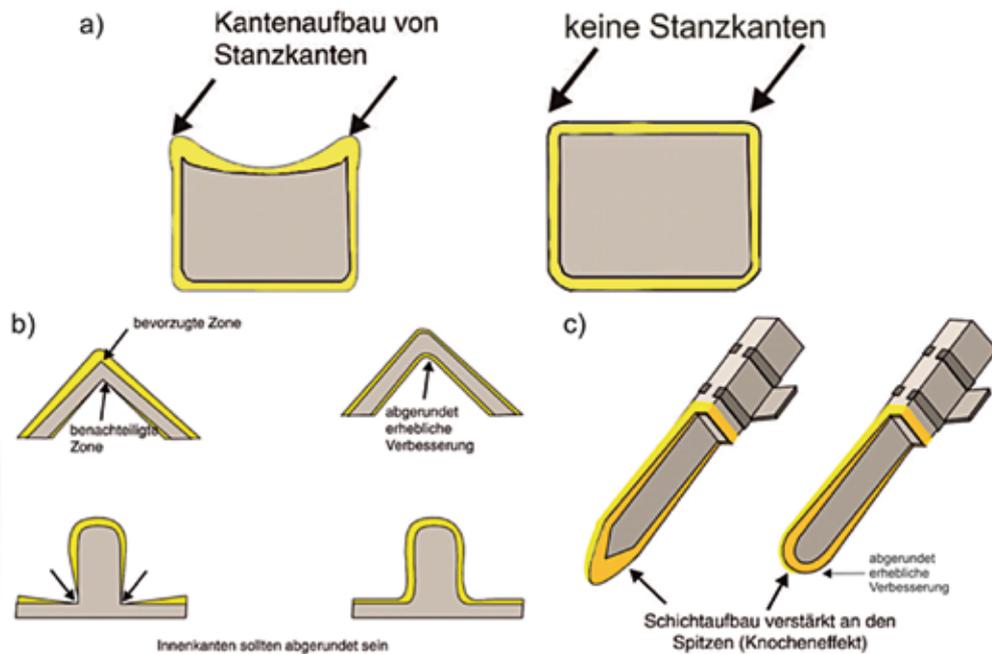


Bild 4: Beispiele zur Verbesserung der Schichtverteilung:
a) Stanzkanten, b) Ecken, Kanten und enge Winkel, c) Kontaktspitze [8]

Verformbarkeit

Viele Bauteile im Bereich der Steckverbinder werden im Rohzustand oder nach der galvanischen Beschichtung verformt. Beispielsweise das Abwinkeln von Anschlusspfosten, Ausbiegen von Kontaktkuppen, Rollen von Kontaktbuchsen und Steckern.

Findet diese Verformung nach der Galvanik statt, z. B. bei der Veredelung von Vollbändern oder vorgestanzten Bändern, kann es durch die unterschiedliche Verformbarkeit der Grund- und Schichtwerkstoffe zur Rissbildung in der Oberfläche kommen. Im Grenzfall kann sogar bei guter Haftung und hoher Festigkeit des Schichtwerkstoffes das Grundmaterial mit einreißen. Es besteht die Gefahr eines Bruches an den Biegestellen, eines Schwingungsrisses und Spannungsrisskorrosion an den Federstellen. Kontaktkorrosion kann auftreten durch den Potentialunterschied Grundwerkstoff – Schichtwerkstoff [1]. Typische Beispiele sind hierbei Nickel-, Hartgold-, Palladium- und Palladium-Nickel-Legierungsschichten, die bei Verformung zur Rissbildung neigen. Bei Einsatz dieser Schichten oder Schichtsysteme ist es sinnvoll das Vorstanzen und Biegen kritischer Stellen vor der Verede-

lung durchzuführen (z. B. Kontaktkuppen, Prägungen, gerollte Buchsen / Stecker etc.). Bild 5 zeigt ein Schliffbild einer gerissenen Nickel-Hartgold-Schicht. Vor der Präparation wird ein Schutzkupfer aufgebracht.

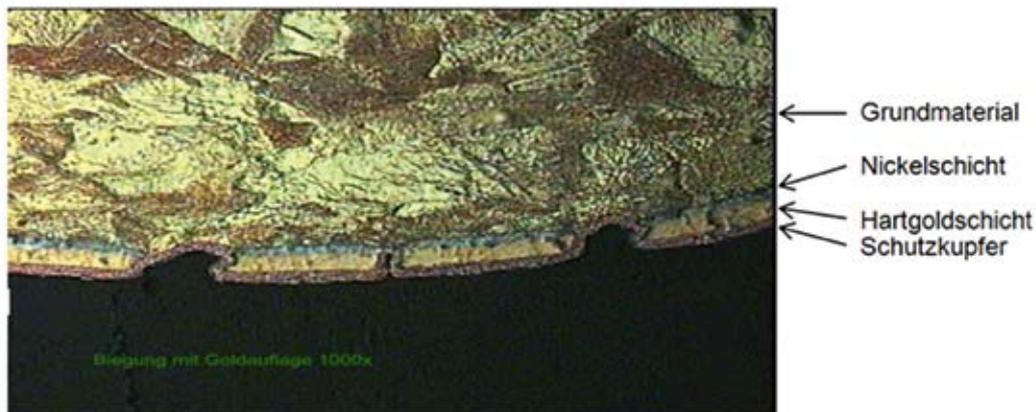


Bild 5: Schliffbild einer gerissenen Nickel-Hartgold-Schicht (1000-fach mit Schutzkupfer)

Bandgalvanik

Geometrische Anforderungen

Bei der Beschichtung von gestanzten Bändern als auch Vollbändern sind allgemein einige spezielle, geometrische Voraussetzungen zu beachten, damit eine Bearbeitung mit den bekannten Selektivtechniken: Tauchen, Brush, Streifen und Spot überhaupt ermöglicht wird. Die maximale Bandbreite beträgt hierbei 150 mm bei einer Banddicke von max. 1,5 mm in bestimmten Fällen bis 2 mm. Die Geometrische Dicke (3D) eines Stanzbandes, wie im Bild 6 dargestellt, darf max. 6 mm betragen, in gewissen Konstruktionen sind bis 10 mm möglich. Weiterhin sollte das Bandmaterial frei von Roll- und Säbelkrümmung sein. Torsion als auch Drehung des Bandes müssen ebenfalls vermieden werden, da sie generell Probleme bei der Bandführung bereiten.

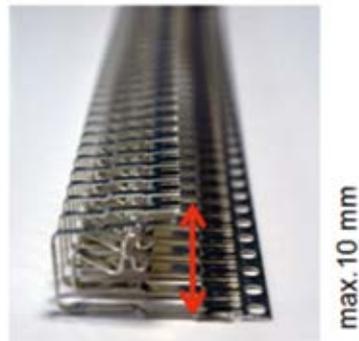


Bild 6: Geometrische Höhe eines Stanzbandes (max. 10 mm)

Um die Spülbarkeit und den Elektrolytaustausch zu ermöglichen sind Spülbohrungen bei Sacklöchern erforderlich, z. B. gerollte Kontakte. Unzugängliche Hohlräume und Faltungen mit Spalt sind zu vermeiden, da sie zu Elektrolytverschleppung und Galvanikrückständen in diesen Hohlräumen führen. Hieraus entstehen Probleme wie Verunreinigung der Galvanikbäder, als auch das Ausblühen der Salze im Bauteil nach einiger Zeit [1]. Was den Ausfall des Bauteils durch Korrosionsprodukte fördert. Sollten die Kontakte im Band schräg angelegt sein, so ist es wichtig, dass die Kontakte nicht gegen die Laufrichtung stehen, da sie sich so leichter in der Anlage verhaken können und verbogen werden. Im schlimmsten Falle verhaken sich die Teile so in der Anlage, dass das Band reißt. Dies führt zu einem Anlagenstillstand mit entsprechendem Schrottanteil. In Bild 7 ist die richtige und falsche Laufrichtung dargestellt.

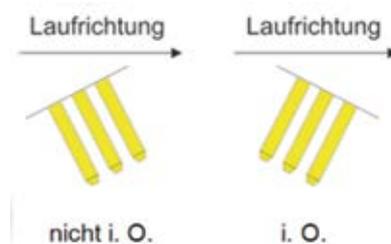


Bild 7: Laufrichtung bei schrägem Kontaktdesign

Verfahrensbedingte Vorgaben

Tauchtechnik

Neben der Rundumbeschichtung stellt das selektive Tauchen der Teile am Band das einfachste Verfahren der Selektivtechniken dar und bietet damit beim Materialeinsatz erste Einsparmöglichkeiten von 50 bis 70 % gegenüber einer Vollbeschichtung [10]. Bild 8 zeigt schematisch den Aufbau und die Wirkungsweise einer solchen Tauchzelle [5].

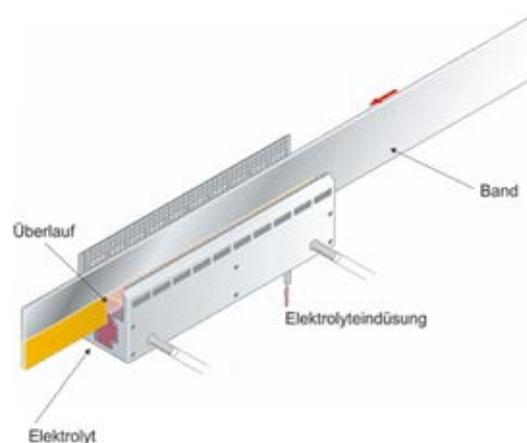


Bild 8: Aufbau und Wirkungsweise einer Tauchzelle [5]

Das Verfahren wird generell in allen Vorbehandlungen, Aktivierungen und für alle Beschichtungsmetalle eingesetzt [1]. Durch Tauchen können Vollbänder und auch gestanzte Bänder rundum oder auch selektiv beschichtet werden. Siehe hierzu auch Bild 9 [8]. Hierbei werden Vorder- und Rückseite sowie Band- bzw. Stanzkanten veredelt. Diese Form der Selektivgalvanisierung ist von den Bearbeitungskosten die günstigste Form, da keine zusätzlichen Werkzeugkosten entstehen. Durch die Auslaufzone ist mit einer Ungenauigkeit zu rechnen, die bedingt durch die Unruhe des Flüssigkeitsspiegels, ca. 2 mm beträgt. Diese Auslaufzone kann bei Gold erheblich zu Buche schlagen. Bei unedlen Metallen ist jedoch die Genauigkeit ausreichend [1]. Eine mögliche Erhöhung der Auslaufzone auf 4 mm kann die Bearbeitung durch eine höhere Geschwindigkeit weiter vergünstigen.

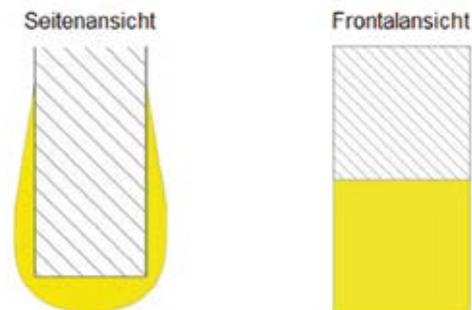


Bild 9: Ergebnis einer Tauchbeschichtung [8]

Edle Beschichtungsmetalle wie Kupfer, Nickel, Zinn und Zinnblei werden hauptsächlich im Tauchverfahren verarbeitet, andere Selektivtechniken für diese Metalle sind eher die Ausnahme. Bei den Materialabmessungen ist eine Breite bis zu 150 mm möglich, die Dicke kann bis 1,5 mm in Ausnahmefällen bis 2 mm betragen.

Brushtechnik

Ein weiteres Verfahren zur Einsparung von Edelmetallen ist die Brushtechnik. Sie ist sehr vielseitig einsetzbar und es können sowohl flache als auch profilierte Kontakte sehr präzise beschichtet werden. Das Verfahren ist bei gestanzten und/oder profilierten Teilen wesentlich genauer als die Streifenbeschichtung. Bild 10 zeigt eine solche Brush-Einheit schematisch [5]. Das Werkzeug selbst besteht aus einem dachförmigen Brushkörper (Anode), einem Brushtuch (Gewebe, Filz) und der Führung. Der in den Brushkörper gepumpte Elektrolyt benetzt das Brushtuch. Das Band wird mittels Führungen (Kathodische Kontaktierung) unter einem bestimmten Anpressdruck über das feuchte Brushtuch gezogen und so einseitig selektiv beschichtet [1+10].

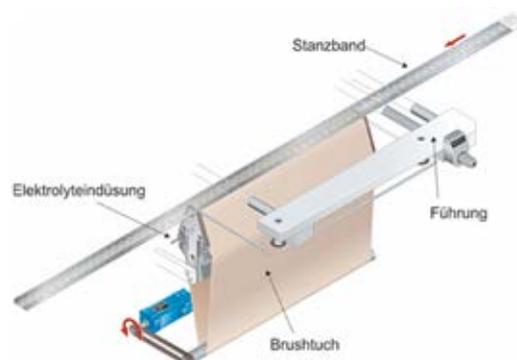


Bild 10: Beschichtung mit der Brushtechnik [5]

Die Brushtechnik wird in der Regel nur für die Abscheidung der Edelmetalle Gold, Palladium und Palladium-Nickel benutzt. Bild 11 zeigt das Beschichtungsergebnis einer Kontaktkuppe in der Seiten- und Frontalansicht [8]. Die in der Technik eingesetzten Brushverfahren haben eine Auslaufzone (Beschichtungstoleranz) von ca. 1 mm je Seite und das Material sollte eine maximale Dicke von 0,6 mm und eine maximale Breite von 70 mm aufweisen.

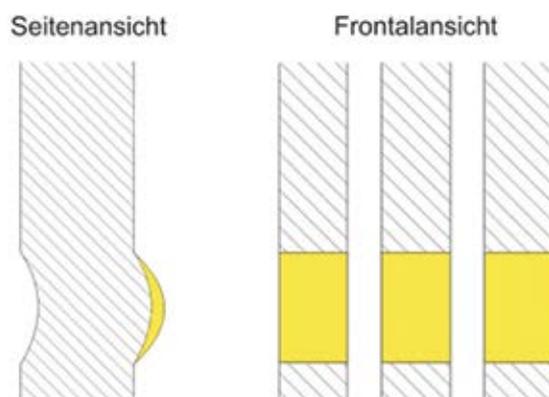


Bild 11: Ergebnis der Beschichtung mit Brushtechnik [8]

Für eine möglichst kostengünstige Beschichtung sollten die zu beschichtenden Kontakte minimum 0,8 mm aus der Bandedebene herausstehen (siehe Bild 12). Damit ist gewährleistet, dass das Edelmetall nur auf dem Kontakt abgeschieden wird und nicht auf Haltestegen oder Seitenstreifen des Bandes.

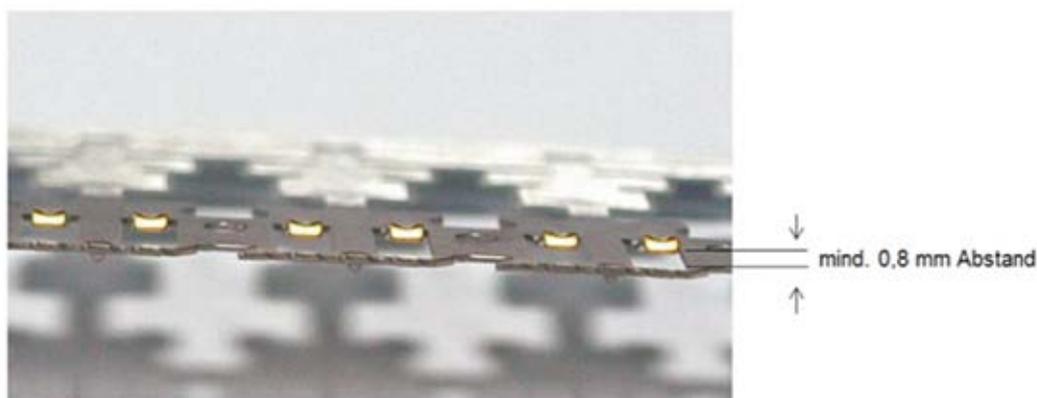


Bild 12: Kontaktabstand

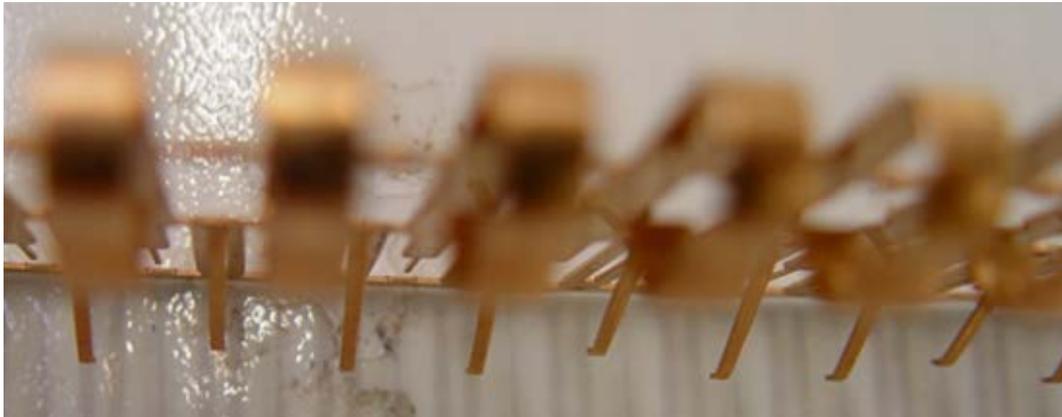


Bild 13: Klaviereffekt

Streifentechnik

Die in den Galvaniken eingesetzten Streifenverfahren werden zur Beschichtung von Streifen auf Vollbändern oder Stanzgittern (offene Kontaktbuchsen, Federn, Messer und Systemträger) mit geringer Profilierung eingesetzt. Die verschiedenen Techniken blenden hierbei die Kantenbeschichtung aus und bringen ein oder mehrere Streifen einseitig bzw. beidseitig auf ein Band auf. Der nicht zu veredelnde Bereich wird mit Abdeckriemen oder -folien maskiert. In Bild 14 ist als Beispiel ein Selektivrad zur Streifenbeschichtung dargestellt.

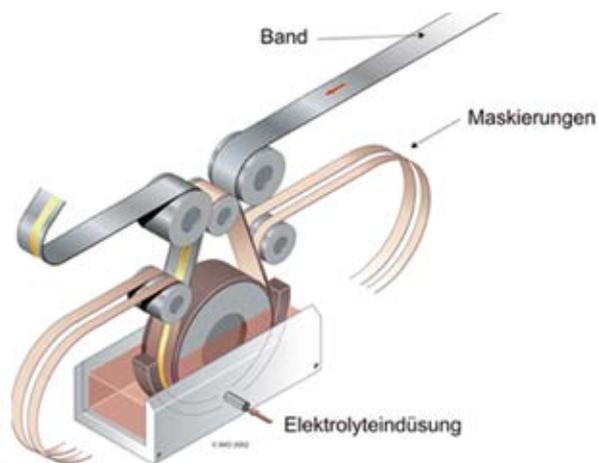


Bild 14: Streifenbeschichtung mit der Radtechnik [5]

Die Verfahren werden aufgrund der höheren Prozesskosten überwiegend für die Streifenbeschichtung mit Edelmetallen wie Gold und Silber eingesetzt und rechnen sich durch die Edelmetalleinsparung, speziell wenn die Beschichtung nur einsei-

tig benötigt wird [5]. Die Ergebnisse der Streifenbeschichtung sind in Bild 15 zu sehen. Klar erkennbar ist die Einsparung von Edelmetall durch die nicht beschichteten Kanten. Wird zusätzlich die Kontaktfläche nur einseitig benötigt, ist eine weitere Reduzierung des Edelmetalleinsatzes möglich [8].

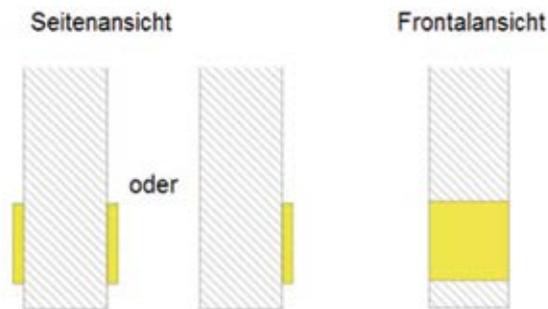


Bild 15: Ergebnis der Streifenbeschichtung [8]

Die Beschichtungstoleranz liegt bei den in der Galvanik gängigen Verfahren bei max. 1 mm Auslaufzone je Streifenseite. Die Bandabmessungen sollten 0,6 mm Dicke und 100 mm Breite möglichst nicht überschreiten.

Klebertechnik

Um auf Bändern Streifen nicht beschichteter Zonen zu erhalten, eignet sich am Besten die Klebertechnik. Hierbei werden Endlosklebebänder mit definierter Breite vor der Beschichtung auf die Vorder- und/oder Rückseite des Bandes aufgebracht. Es können Vollbänder als auch vorgestanzte Bänder beschichtet werden. Im Bereich des Klebebandes sollten die Bänder möglichst vollflächig ungestanzt bleiben. Die Galvanisierung erfolgt dann im Tauchverfahren. Am Ende des Prozesses werden die aufgebrachten Klebebänder wieder endlos entfernt.

Häufig wird dieses Verfahren für walzplattierte AlSi-Einlagen verwendet, um diese vor dem chemischen Angriff der Bänder zu schützen. Bild 16 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Beklebe- und Abzieheinheit mit Beschichtungszelle in der Mitte [5].

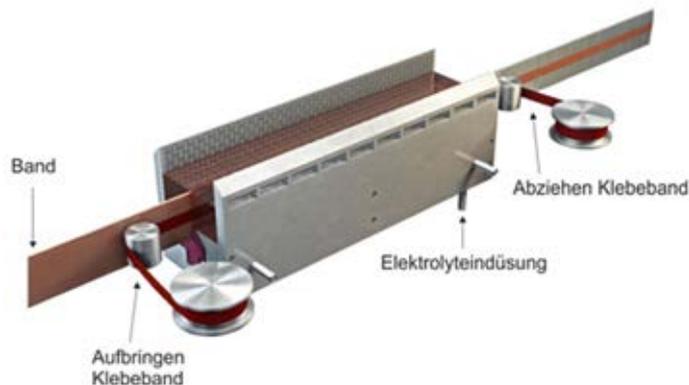


Bild 16: Streifenbeschichtung mit der Klebetechnik [5]

Zum Einsatz kommen alle im Kontaktbereich bekannten Beschichtungsmetalle. Die maximale Abmessung der Bänder beträgt in der Breite 150 mm und in der Dicke 1 mm. In bestimmten Fällen bis 2 mm. Das Klebeband wird mit folgenden Standardmaßen aufgebracht: 10 mm, 12 mm, 15 mm und 23 mm. Die benötigte Klebebandbreite wird durch die Breite des beschichtungsfreien Streifens plus 1 mm je Streifenseite errechnet. Werden Bänder mit AISi-Einlage abgeklebt, sollte der Abstand der AISi-Piste zur nächsten Beschichtungsfläche mindestens 2 mm betragen. Zusätzlich darf bei AISi keine Passivierung für eine Silberbeschichtung eingesetzt werden, da die Bondbarkeit der AISi-Piste dadurch beeinträchtigt werden kann. Zum Stanzen müssen leicht verflüchtigende Öle verwendet werden.

Spottechnik-Familie

Bereits seit vielen Jahren ist die Spottechnik (punktgenaue Beschichtung der Funktionsflächen) erfolgreich in der Bandgalvanik im Einsatz [8]. Dabei gilt sie als das präziseste Selektivbeschichtungsverfahren. Man kann grundsätzlich drei Methoden der Spotbeschichtung unterscheiden:

- Spotbeschichtung mit Maskenwerkzeugen [1]
- Spotbeschichtung mit Lacken oder Bedeckungen [5]
- Spotbeschichtung mit einem der klassischen Verfahren und anschließender Abdeckung der Kontaktzonen und Strippen (Ablösen) des übrigen Bereiches [1]

Voraussetzung für alle Methoden ist ein gestanztes oder vorgestanztes Band, das zur genauen Positionierung der Beschichtungsflächen als Mindestanforderung Positionierungslöcher haben muss [8]. Für die in der Galvanikbranche etablierten

Verfahren Mikro- und Makrospottechnik werden jeweils produktspezifische Werkzeuge benötigt. Dabei werden die nicht zu beschichtenden Flächen mit speziellen Maskierungsmaterialien abgedeckt und die freien Flächen punktgenau auf der Vorder- oder Rückseite galvanisch beschichtet. Der Aufbau und die Anwendung eines solchen Werkzeugs sind in Bild 17 dargestellt [5].

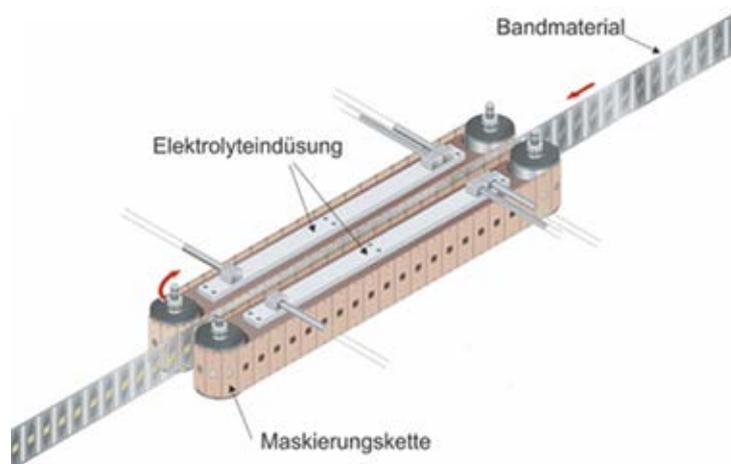


Bild 17: Aufbau und Wirkungsweise eines Spotwerkzeugs [5]

Ein weiteres Verfahren aus der Technik ist das patentierte „MPP-Verfahren“ (Micro Precision Plating), mit dem es sogar möglich ist, ohne hohen Aufwand Edelmetalle an jeder beliebigen Position und in jeglicher Form auf dem Trägermaterial aufzubringen [11]. Im Gegensatz zu den Verfahren mit produktspezifischen Werkzeugen arbeitet die MPP-Technik mit einem Lack, der zuerst komplett auf das Band aufgebracht wird. Danach erfolgt das Freilegen der zu beschichtenden Zonen durch Laserstrukturierung. Die Beschichtung wird dann im Tauchverfahren durchgeführt. Die Maskierung wird nach der Beschichtung chemisch entfernt [5]. Diese in der Technik eingesetzten Verfahren werden in der „Spottechnik-Familie“ zusammengefasst und eignen sich zur Selektivbeschichtung von vorgestanzten Kontaktbändern mit Silber oder Gold [11]. Die Spottechnik-Familie ermöglicht es Beschichtungen mit bis zu 150 mm Breite, 0,8 mm Dicke und einer Spotdimension ab 1 x 1 mm durchzuführen [5].

In Bild 18 wird das Ergebnis einer solchen Spotbeschichtung abgebildet. Hierbei zeigen sich die Vorteile gegenüber den bisherigen dargestellten Beschichtungen, da nun auch flachgestanzte Bänder nur noch an den notwendigen Kontaktflächen kosteneffizient, selektiv beschichtet werden können [8].

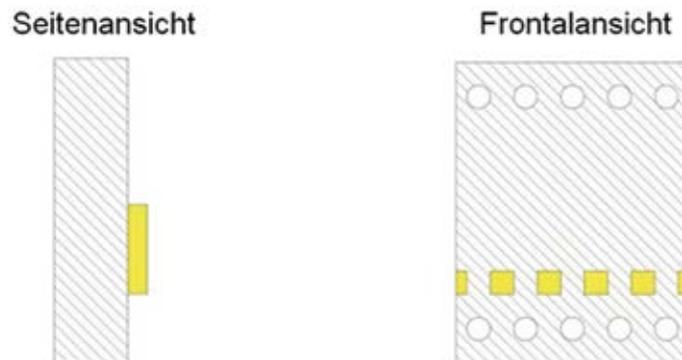


Bild 18: Ergebnis der Spotbeschichtung [8]

Im Folgenden werden die Beschichtungstoleranzen, Spotgrößen und Banddimensionen der verschiedenen Verfahren aufgeführt:

Makrospottechnik

MakroSpot GS:

+ 2 mm Auslauf in jede Richtung

Voraussetzung: Führungslöcher/Öffnungsflächen

Kleinster Spot: 8 x 8 mm

Banddimensionen: 0,8 x 100 mm

MakroSpot R:

+ 0,5 mm Auslauf in jede Richtung

Voraussetzung: Führungslöcher

Kleinster Spot: 3 x 3 mm

Banddimensionen: 0,6 x 80 mm

Mikrospottechnik

+ 0,3 mm Auslauf in jede Richtung

Voraussetzung: Führungslöcher

Kleinster Spot: 2 x 2 mm

Banddimensionen: 0,3 x 80 mm

MPP-Technik

+ 0,3mm Auslauf in jede Richtung

Voraussetzung: Führungslöcher

Kleinster Spot: 1 x 1 mm

Banddimensionen: 0,6 x 150 mm

Einzelteilgalvanik

Verfahren der Einzelteilbeschichtung

In der Einzelteilgalvanik werden die Teile als Schüttware oder auf dem Gestell rundum beschichtet. Hierbei kommen drei Verfahren zum Einsatz:

■ Trommelbearbeitung:

Die einfachste und häufigste Form der Galvanisierung von Schüttgutteilen ist die Galvaniktrommel [1].

■ Gestellbearbeitung:

Teile, die auf Grund ihrer Größe nicht mehr in der Trommel bearbeitet werden können, werden auf Gestellen aufgehängt und beschichtet. Die Kontaktierung erfolgt über die Aufhängungen in Form von Haken oder Klemmen [1].

■ Vibrobot-Verfahren:

Für sehr empfindliche Teile und Teile mit Innenbohrungen wird bevorzugt die Vibrobottechnik eingesetzt. Die Warenbewegung erfolgt durch Vibration [1].

Bild 19 zeigt die drei verschiedenen Verfahren schematisch [12].



Bild 19: Verfahren der Einzelteilgalvanik [12]

Geometrische Anforderungen

Bei allen Verfahren ist auf eine geeignete Teilegeometrie zu achten. Bei ungünstiger Geometrie können sich Teile verhaken, verklumpen, ineinanderstecken und trotz geringem Eigengewicht durch die Hebelwirkung verbiegen [1]. Zusätzlich

ist auf die Stabilität und bei Trommelgalvanik auf die Robustheit für den gewählten Prozess zu achten. Bei Einzelteilen, die auf dem Gestell beschichtet werden, müssen Kontaktierungspunkte und/oder Befestigungsmöglichkeiten angegeben sein, da der Strom durch direkte Kontaktierung auf die Teile übertragen wird. Die Kontaktierungsstelle sollte nicht im Bereich der wesentlichen Fläche liegen, da an diesen Stellen die Schicht zwangsläufig nicht geschlossen ist [1]. Als weiteres Kriterium für Einzelteile gilt die gute Spülbarkeit und der Elektrolytaustausch am Teil. Bei fehlenden Spülbohrungen in Sacklöchern, Faltungen mit Spalt sowie unzugänglichen Hohlräumen kommt es zu Elektrolytverschleppungen und Galvanikrückständen in diesen Hohlräumen. Zusätzlich werden Beschichtungen in den Innenbereichen erschwert bzw. sind unmöglich. Probleme sind die Verunreinigung der Galvanikbänder und das Ausblühen der Salze am Bauteil nach einiger Zeit [1].

LITERATUR

- [1] Knoblauch G.: Steckverbinder Systemkonzepte und Technologien, 2. Neubearbeitete Auflage, Expert Verlag 2002
- [2] Nohse, W.: Tabellenbuch Galvanotechnik, 6. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag 1985
- [3] Gaida B., Aßmann K., Technologie der Galvanotechnik, 1. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag 1996
- [4] John W., Technische Mathematik für die Galvanotechnik, 9. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag 2007
- [5] Tagungsband des 8. Anwenderkongress Steckverbinder Würzburg 2014, 1. Veröffentlichung 2014
- [6] Gebrauchsanweisung Miralloy, Umicore Galvanotechnik GmbH, www.umicoregalvano.com
- [7] Internationale Nickel Deutschland GmbH: Broschüre Galvanisiergerechtes Gestalten von Werkstücken, 2. Auflage 1968
- [8] Tagungsband der GMM-Fachtagung, Elektrische und optische Verbindungstechnik 2013, 4. Symposium Connectors, Lemgo, 1. Veröffentlichung 2013
- [9] Kanani N. Dr. Ing. Dr. habil.: Galvanotechnik Grundlagen, Verfahren, Praxis, 2. erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag 2009

- [10] Kaiser H.: Edelmetallschichten, Abscheidung - Eigenschaften - Anwendungen, 1. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag 2002
- [11] IMO Oberflächentechnik GmbH: Galvanische Oberflächen für höchste Ansprüche, WOMag Band 1, 11/2012, WoTech GbR
- [12] Seminarunterlagen, Technische Akademie Esslingen, Steckverbinder, Systemkonzepte und Technologien, Veranstaltung-Nr. 32772.00.012, Mai 2015

**Anwendungsbeispiele der PVD-Beschichtung mit
Edelmetallen für die Medizintechnik,
Kontakttechnik und Sensorik**

Dr. Joachim Ganz,
DODUCO GmbH

Einleitung

Der Einsatz von PVD-Beschichtungsverfahren (Physical Vapour Deposition: Aufdampfen, Kathodenzerstäuben (Sputtern) oder Ionenplattieren [1,2] bietet den Vorteil, dass sich auch Komponenten, die aus nichtleitenden Substraten wie Kunststoff, Keramik und Glas hergestellt sind, haftfest beschichten lassen. Auch die mit „klassischen“ galvanischen Verfahren kaum metallisierbaren Titan-Basiswerkstoffe können durch PVD-Verfahren beschichtet werden.

Außerdem können Schichten aus Materialien hergestellt werden, die sich galvanisch nicht abscheiden lassen (z.B. W, Ti, Al oder Legierungen aus Metallen und Verbindungen wie TiN). Reaktive Metalle wie Titan, Chrom oder Nickel sind als Haftvermittler hervorragend wirksam, aber nur wenn sie unter Ausschluss von Sauerstoff als dünne Zwischenschicht aufgebracht werden können, was durch den Vakuumbeschichtungsprozess implizit gewährleistet ist.

Im Folgenden wird das Prinzip der Sputtertechnik kurz erläutert und danach werden einige Anwendungsbeispiele aus der Praxis vorgestellt, die die vielfältigen Einsatzgebiete von PVD-Schichten demonstrieren.

Sputtertechnik

Beim Kathodenzerstäuben (Sputtern) treten im Wesentlichen drei physikalische Prozesse auf (Bild 1): In einem Edelgas (typischerweise Argon) wird bei einem Druck von ca. 1 Pa (10^{-2} mbar) eine Gasentladung gezündet, wobei die Argon-Atome durch hochenergetische Elektronen ionisiert werden (Ionisation). Die entstandenen Arlonen werden dann im elektrischen Feld beschleunigt und treffen mit hoher Geschwindigkeit auf die Kathode (Target) aus dem Schichtwerkstoff auf und zerstäuben diesen (Sputtern). Die aus dem Target herausgeschlagenen, Metallatome kondensieren dann auf dem gegenüberliegenden Substrat und bauen dort die gewünschte Schicht auf (Beschichtung). Bei Zugabe entsprechender Gase, die mit den Metallatomen am Substrat reagieren, lassen sich auch Verbindungen (z.B. TiN, TiC, oder TiAlN) abscheiden.

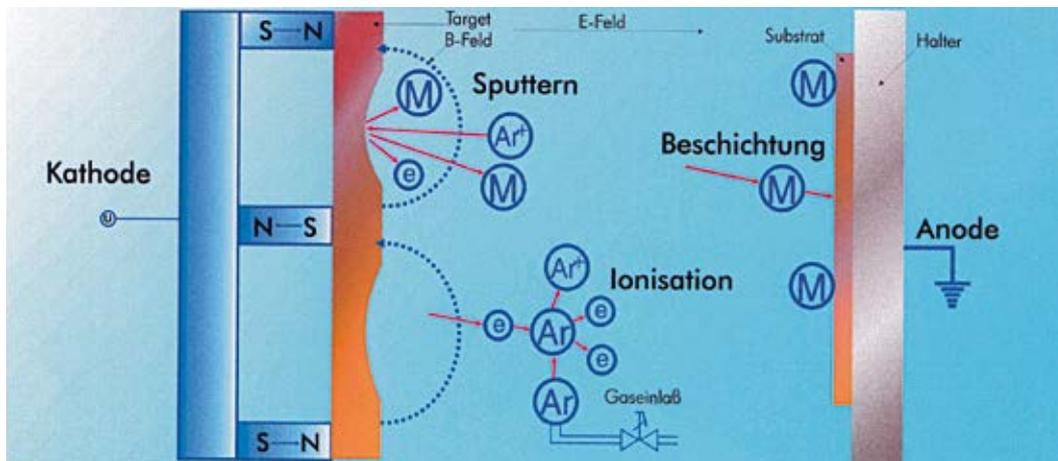


Bild 1: Sputterprinzip

Durch Umkehrung der Polung beim Sputtern (Kathode als Substrat geschaltet) kann durch das sogenannte Sputterätzen eine effektive Reinigung der Substratoberfläche (z.B. von Oxiden) erfolgen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um eine haftfeste Beschichtung zu erzielen. Dabei wird die Oberfläche nur mikroskopisch angegriffen und aktiviert, wodurch auch glatte Oberflächen mit einer haftfesten Beschichtung versehen werden können. Die ursprüngliche Oberflächengestalt (z.B. Rauhtiefe) des Substrats bleibt bei richtiger Prozessführung während des Sputterns erhalten.

Für die Durchführung der Sputterbeschichtung gibt es im Wesentlichen zwei Anlagentypen und zwar eine Einkammeranlage (Batch-Typ), bei der chargenweise beschichtet wird, oder eine Mehrkammeranlage, die im quasi Durchlaufbetrieb unter Aufrechterhaltung des Vakuums in der Sputterkammer beschichten kann. Je nach Substratgeometrie und Menge der zu beschichtenden Bauteile kann die entsprechende Anlage eingesetzt werden. Formteile lassen sich unter Benutzung von Planetenantrieben und entsprechenden Halterungen auch rundum beschichten. Plattenförmige Substrate (z.B. Glasscheiben), Metallbänder oder Kunststofffolien lassen sich vorteilhaft in einer Mehrkammeranlage beschichten. Eine selektive Beschichtung ist aufgrund der notwendigen Bauteilhalterung und der damit integrierbaren Abdeckung problemlos möglich.

Anwendungsbeispiele

Kontakttechnik

Aus der Palette der Edelmetalle kommen Beschichtungen mit Goldlegierungen (z.B. AuCo_x , AuAg_x oder AuNi_x) in verschiedenen Zusammensetzungen, wie z.B. x im Bereich von 0,1 Gew% bis 25 Gew%, insbesondere bei der Herstellung von miniaturisierten Kontaktteilen, sogenannten Mikroprofilen, zum Einsatz (Bild 2). Diese wurden im Zuge der fortschreitenden Miniaturisierung und zur Senkung der Edelmetallkosten für den Einsatz in kleinen Schaltern in der Informationstechnik entwickelt. Die Basis bilden Profile mit Querschnitten kleiner $1 \times 2 \text{ mm}^2$ in unterschiedlichen Formen (Bild 3), die sowohl aus Massiv- als auch aus Mehrschichtmetallen bestehen können, auf denen dann die hoch reinen Kontaktschichten mit sehr guter Schichtdickengleichmäßigkeit abgeschieden werden. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber galvanischen Beschichtungsverfahren besteht in der einseitigen Beschichtung beim Sputtern, die eine Vergoldung der Rückseite weitgehend ausschließt, so dass beim nachfolgenden Aufschweißen keine Haftungsfehler auftreten.

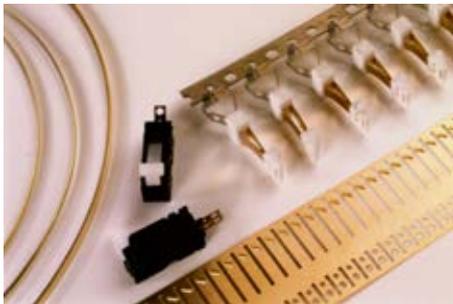


Bild 2: Mikroschalter mit Kontaktprofil

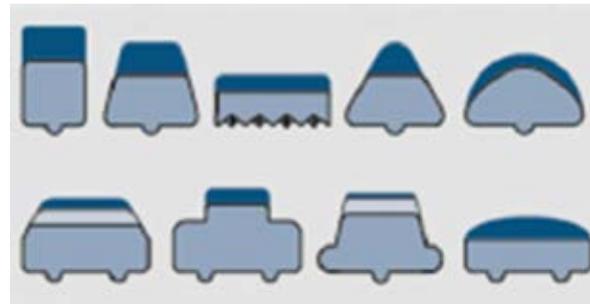


Bild 3: Typische Miniprofilquerschnitte [siehe 2]

Für Hochtemperaturanwendungen, z.B. bis 200°C beim Einsatz in der Automobilindustrie können mit der PVD-Beschichtung Edelmetalloberflächen auf Goldbasis (z.B. AuPt_1) mit niedrigem Kontaktwiderstand (Bild 4) hergestellt werden, die den hohen Umgebungsbelastungen über die gesamte Lebensdauer (z.B. 3.000 Betriebsstunden) Stand halten [3].

Beim Kontaktieren oder Trennen unter Last, z.B. bei 42V Betriebsspannung kann mit einer AgW5-Beschichtung eine zuverlässige Funktion der Kontaktschicht erreicht werden, da nur eine minimale Oberflächenveränderung durch die Lichtbogenbelastung eintritt (Bild 5 nach 20 Schaltungen).

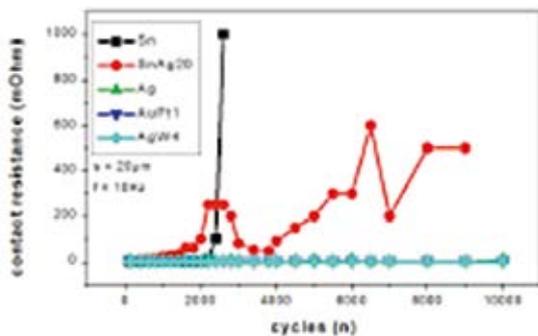


Bild 4: Reibverschleißverhalten gemessen als Kontaktwiderstand gegen Zyklenzahl

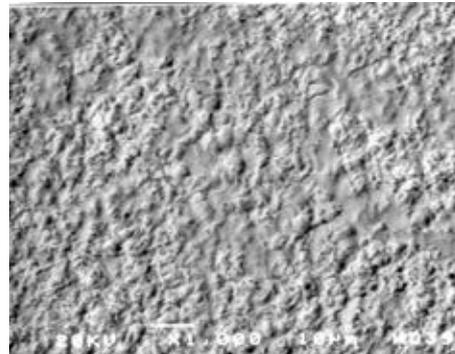


Bild 5: REM-Aufnahme der AgW5-Oberfläche Oberfläche nach 20x trennen unter Last (42V, 1,5A)

Medizintechnik

Aufgrund der antibakteriellen Wirkung ist der Trend zum Einsatz von Silberschichten in der Medizintechnik weiter steigend. Beispiele hierfür sind Urin-Katheter, Titan-Implantate, sowie auch zunehmend Komponenten aus der Medienversorgung in Krankenhäusern, um die steigenden Hygieneanforderungen zu erfüllen.

Urin-Katheter aus künstlichem Silikonkautschuk oder Latex verbleiben im medizinischen Einsatz in einigen Fällen über längere Zeit im Körper des Patienten und verursachen eine hohe Infektionsrate (nach 10 Tagen bei ca. 50% der Patienten). Dieses Infektionsrisiko kann stark reduziert werden, wenn auf die Katheter eine Schicht aus Silber aufgebracht wird (Bild 6), dessen antibakterielle Wirkung seit einigen hundert Jahren bekannt ist. Die Beständigkeit der Beschichtung bei Lagerung im Urin und bei Dampfsterilisation sowie die hohe Flexibilität und Dehnbarkeit des Substrats stellen extreme Anforderungen an die Haftfestigkeit. Mit der Sputtertechnik können nach dem Aktivieren der Silikonoberfläche durch Sputterätzen nacheinander eine Haftschiicht, eine Zwischenschicht und die Silberschicht in der Gesamtdicke von 0,2 – 0,3 μm aufgetragen werden.

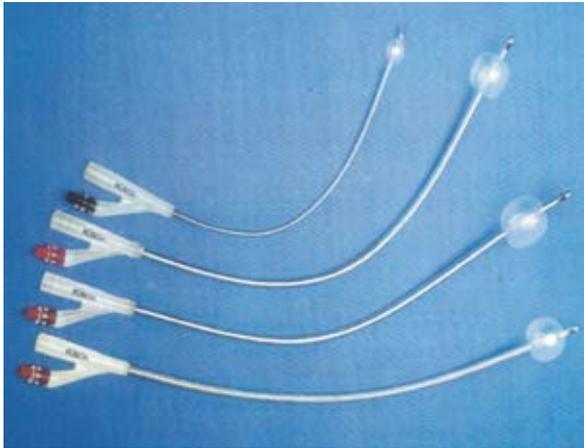


Bild 6: Versilberte Urinkatheter



Bild 7: Versilberte Titan-Implantate

Auch bei Implantaten, wie in Bild 7 dargestellt, sind Silberbeschichtungen als antibakteriell wirksame Oberflächen insbesondere für Tumorpatienten von großer Bedeutung [4]. Die dort verwendeten Titan-Basiswerkstoffe lassen sich aufgrund ihrer chemischen Resistenz jedoch galvanisch nicht zuverlässig beschichten. Nach der nass chemischen Reinigung und Trocknung der mechanisch bearbeiteten Formteile werden diese mit teilespezifischen Halterungen im Planetenantrieb der Vakuumkammer befestigt. Im nachfolgenden Sputterätzprozess wird die Oxidschicht des Titans abgetragen und anschließend die entsprechende Edelmetallschicht in einer Schichtdicke von 0,1 – 0,2 µm aufgesputtert. Je nach gewünschter Endschicht kann danach problemlos eine galvanische Verstärkung z.B. mit Silber erfolgen.

Sensorik

Schichten aus Platin oder Gold werden wegen ihrer hohen chemischen Beständigkeit für Anwendungen in der Sensorik und Messtechnik, z.B. bei Temperatur, Druck oder pH-Messungen, verwendet. Dazu müssen sie meistens auf Substraten aus Glas, Silizium oder Keramik abgeschieden werden (Bild 8, 9). Durch die Abscheidung zusätzlicher dünner Zwischenschichten aus Metall kann die notwendige Haftfestigkeit erzielt werden. Auch eine strukturierte Beschichtung kann durch Abkleben mit geeigneten Klebebändern (Bild 8) oder durch Einsatz von Maskentechnik im PVD-Beschichtungsprozess realisiert werden (Bild 9).

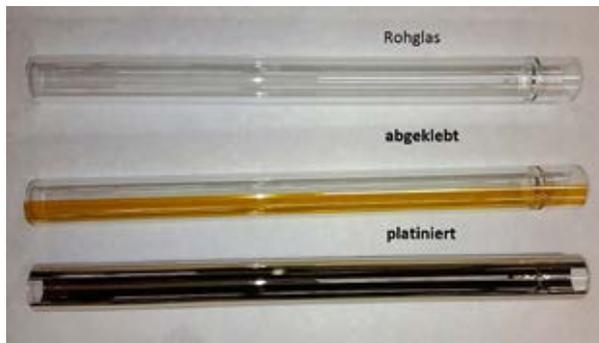


Bild 8: Glasrohr (roh, abgeklebt, platinert)



Bild 9: Platin auf Keramik (selektiv)

Ausblick

Die dargestellten Beispiele zeigen, welche völlig neuartigen Schichtkombinationen und -systeme durch Einsatz von Vakuumbeschichtungstechniken realisiert werden können. Diese sind auch zukünftig in der Lage die steigenden Anforderungen an die Bauteile und deren Oberflächen zu erfüllen. Der Einsatz dieser Verfahren in der Lohnbeschichtung ermöglicht dem Anwender die wirtschaftliche Nutzung solcher Produkte bereits bei kleinen und mittleren Serien. Nicht zuletzt kann mit diesen Verfahren neben einer Verbesserung der Produktqualität auch die Umweltbelastung beim Produktionsprozess verringert werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H. Frey, G. Kienel: Dünnschichttechnologie, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1987
- [2] DODUCO Datenbuch, 3. Auflage, Stieglitz Verlag, Mühlacker, 2012 und www.electrical-contacts-wiki.com
- [3] I. Buresch, J. Ganz, F. Kaspar: PVD-Beschichtung und ihre Anwendungen für Steckverbinder, VDE-Fachbericht 59, 2003, S. 73-80
- [4] siehe z.B. Produktinformation Firma implantcast GmbH: www.implantcast.de

Lasermaterialbearbeitung in der Oberflächentechnik

Tom Cruz, Hochschule Pforzheim

Zusammenfassung

Der Laser ist eine hochpräzise Energiequelle, die innovative Verfahren, wie das Laserpulverauftragschweißen und das Laserhärten, ermöglicht. Durch diese Verfahren ist es möglich eine Funktionsoberfläche partiell zu ändern, um so verschiedensten Anforderungen gerecht zu werden.

Beim Laserpulverauftragschweißen wird eine aufgeschweißte Dickschicht (Schichten $>100\mu\text{m}$) auf ein Bauteil appliziert, wodurch ein Bauteil an definierten Stellen gegen Verschleiß geschützt wird. Bisherige solcher monolithischen Schichten sind vom Aufbau ähnlich zu gesintertem Hartmetall und bestehen oft aus einem metallischen Binder mit darin eingebundenen Karbiden. Neueste Forschungen gehen dazu über, Mehrschichtsysteme nach biologischen Grundlagen zu erzeugen, die so designt sind, dass sie ähnliche Verschleißkennwerte aufweisen aber weniger rissanfällig sind.

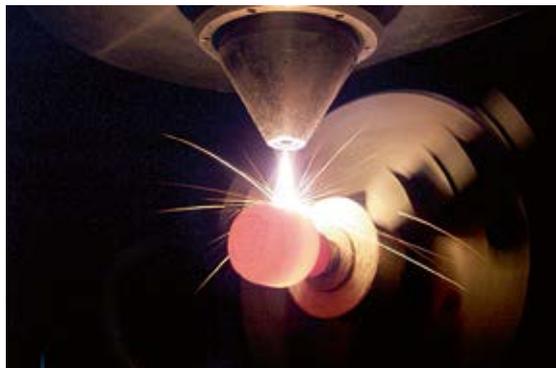


Abbildung 1: Laserpulverauftragschweißen an rotationssymmetrischem Bauteil

Das Laserhärten, genauer das martensitische Umwandlungslaserhärten, basiert auf dem Prinzip der sogenannten Selbstabschreckung eines Materials. Es ist eines der verzugsärmsten Härteverfahren. Durch moderne hochdynamische Temperaturregelungen können filigrane Geometrien mit unterschiedlichsten Topographien und anschmelzungsgefährdeten Zonen anschmelzungsfrei zu härten.

Beide Verfahren eröffnen neue Wege der Konstruktion und der Bauteilauslegung. Dies bildet die Grundlage mechanisch hochbeanspruchte Bauteile noch leichter, kompakter und verschleißbeständiger zu gestalten.



Abbildung 2: Laserhärten an einer scharfkantigen Geometrie

Einleitung

In der heutigen Zeit der Ressourceneffizienz spielen Themen wie der „Leichtbau“ und damit einhergehend die „Funktionsintegration“ eine immer größere Rolle. Mechanische Bauteile werden immer kompakter und filigraner und besitzen eine Vielzahl an unterschiedlichen integrierten Funktionen. Dies stellt verschiedenste Anforderungen an die Funktionsoberflächen. Um solche Bauteile vor Verschleiß zu schützen, reichen die konventionellen Methoden oft nicht mehr aus. Daher muss das Augenmerk auf neue innovative Verfahren gerichtet werden, die unterschiedlichste Anforderungen abdecken und sehr präzise eingesetzt und geregelt werden können. Die Energiequelle Laser bietet hier eine Vielzahl an Möglichkeiten die Funktionsoberflächen eines Bauteils zu verändern, so dass sie den gesteigerten Ansprüchen an Verschleißbeständigkeit genügen.

Seit 2003 wird an der Hochschule Pforzheim intensiv an diesen Themen der Verfahrensentwicklung in der Lasermaterialbearbeitung in der Oberflächentechnik geforscht. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf den Verfahren „Laserauftragschweißen“ und „Laserhärten“, die im Nachfolgenden näher betrachtet werden.

Lasermaterialbearbeitung im Überblick

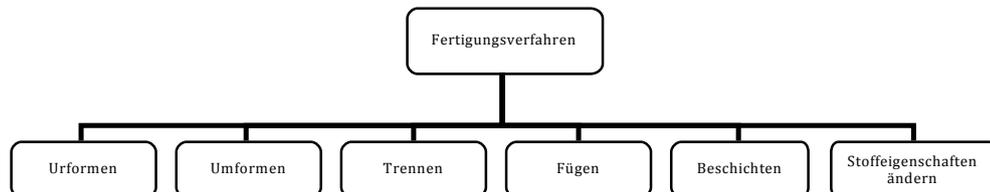


Abbildung 3: Einordnung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [5]

Die Laserverfahren, die in der Oberflächentechnik eingesetzt werden, lassen sich den Fertigungsverfahren nach DIN 8580 zuordnen.

Urformen:

- Lasergenerieren
- Selektives Laserschmelzen (SLS oder SLM)
- Laserpulverauftragschweißen

Umformen:

- Laserrichten
- Lasergestütztes Biegen

Trennen:

- Laserschneiden
- Laserabtragen /-strukturieren
- Laserbohren

Fügen:

- Laserlöten
- Laserschweißen
- Wärmeleitungsschweißen
- Tiefschweißen

Beschichten:

- *Laserauftragschweißen*
- *Mit Pulver*
- *Mit Draht oder Band*

Ändern der Stoffeigenschaften:

- *Laserhärten*
- *Laserlegieren*
- *Laserdispergieren*

Diese unterschiedlichen Laserstrahlverfahren unterscheiden sich hauptsächlich in der Intensität der Energieeinbringung, dem zeitlichen Verlauf der Bestrahlung und dem Temperaturverlauf im Material. Alle haben gemeinsam, dass sie Energie berührungslos mittels Licht (elektromagnetische Wellen gleicher Wellenlänge) in ein Werkstück einbringen. [5]

Im Folgenden werden die Verfahren Laserhärten und Laserauftragschweißen genauer beleuchtet.

Das Laserauftragschweißen und dessen Potenziale

Das Laserauftragschweißen ist, gemessen am Entwicklungsstand, noch ein relativ junges aber hochflexibles Beschichtungsverfahren, bei dem ein Zusatzwerkstoff mit Hilfe von Laserstrahlung auf ein Substrat aufgetragen wird. Das Laserauftragschweißen ist im technischen Sprachgebrauch unter mehreren Bezeichnungen bekannt.

Weitere Bezeichnungen für das Laserauftragschweißen sind:

- *Laserbeschichten*
- *Laser deposition welding (engl.)*
- *Lasercladding (engl.)*

Dabei ist darauf zu achten, dass dieses Verfahren nicht mit dem Selektiven Lasersintern / Laserschmelzen (SLM oder SLS) oder Laserspritzen verwechselt wird,

welche zu anderen Gruppen der Laserstrahlverfahren gehören und auf anderen Verfahrensprinzipien basieren.

Das Laserauftragschweißen gehört zur Gruppe der Auftragschweißverfahren. Diese Verfahrensgruppe ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Zusatzwerkstoff mittels einer Energiequelle aufgeschmolzen und auf ein Substrat aufgetragen wird, auf welches durch die Quelle ebenfalls Energie eingebracht wird. Im Gegensatz zu den Thermischen Spritzverfahren entsteht bei den Auftragschweißverfahren eine schweißmetallurgische Verbindung zwischen Substrat und Auftragswerkstoff, wodurch die Haftfestigkeit auftraggeschweißter Schichten sehr hoch ist.

Das Laserauftragschweißen zählt zu den „Schmelz-Auftragschweißverfahren mit Strahlungsenergie“. Im Laufe der Zeit wurden zahlreiche Varianten des Laserauftragschweißens entwickelt, die sich in erster Linie in Art und Zuführung des Zusatzwerkstoffs unterscheiden.

So gibt es, neben der bekanntesten Verfahrensvariante, dem Laser-Pulver-Auftragschweißen, auch das Laserauftragschweißen mit band-, draht- oder pastenförmigen Zusatzwerkstoffen.

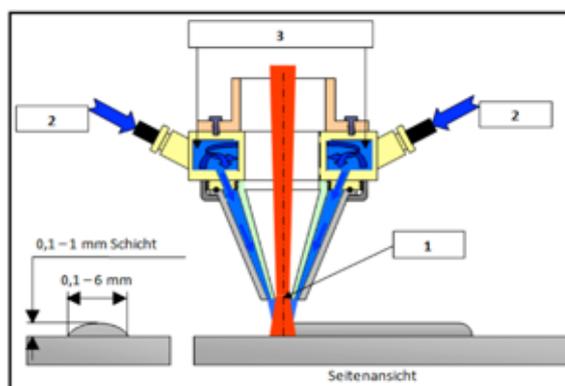


Abbildung 4: Grundprinzip Laserpulverauftragschweißen [2]

In weit über 90% der aktuellen industriellen Anwendungen hat sich das Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) aus zwei Gründen etabliert. Zum einen sind die Marktpreise für Pulverwerkstoffe durch einen großen Bedarf dank der Thermischen Spritzverfahren auf einem akzeptablen Niveau, zum anderen bietet die Verarbeitung pulverförmiger Zusatzwerkstoffe ein großes Spektrum verfügbarer Werkstoffe sowie eine einfache Herstellung von Legierungen und Verbundwerkstoffen durch Mischen.

Das Verfahrensprinzip wird am Beispiel einer so genannten Ringspalt-Koaxialdüse erklärt. Der Laserstrahl tritt aus der zentralen Öffnung (1) des inneren Düsentheils aus und trifft mit einem definierten Strahldurchmesser senkrecht auf die Werk-

stückoberfläche auf.

Durch denselben Düsenaustritt (1) wird ein konstanter Strom eines inerten Gases, meist Argon, auf das Werkstück geleitet. Dieser dient zur Schutzgasabdeckung des Prozesses, um unerwünschte Oxidation zu vermeiden. Zeitgleich wird der Zusatzwerkstoff in Form eines Pulver-Gasstroms (meist ein Gemisch aus Pulver und Argon), der von einer Förderanlage dosiert und bereitgestellt wird, über vier am Umfang der Pulverdüse angebrachte Eingänge (2) in eine Homogenisierungskammer (3) eingeblasen. Dieses homogenisierte Pulver-Gas-Gemisch wird nun durch den Ringspalt zwischen dem inneren und dem äußeren Düsenteil in Form eines Hohlkegels koaxial zum Laserstrahl auf das Werkstück gerichtet.

Diese Art der Werkstoffzuführung ermöglicht es, einen definierten Pulverstrahldurchmesser im Bereich zwischen 2,5 mm bis hin zu mehreren Millimetern auf der Werkstückoberfläche stufenlos zu realisieren. Neuere Düsenentwicklungen tendieren sogar zu noch kleineren Pulverstrahldurchmessern von unter 1 mm. Der Pulverwerkstoff wird sowohl im Flug in einem so genannten Pulverschmelzkegel (engl.: pre-melting-zone), als auch auf der Werkstückoberfläche aufgeschmolzen. Auch das Substrat selbst wird abhängig vom gewählten Parameterensemble an der Oberfläche in den schmelzflüssigen Zustand überführt. Dadurch entsteht eine dichte, schweißmetallurgische Verbindung zwischen dem Substrat und dem Zusatzwerkstoff. Typische Aufmischungsgrade liegen zwischen 1 % und 10 %. Durch eine Bewegung der Laseroptik, an welcher die Pulverdüse montiert ist, entsteht eine im Querschnitt halb elliptische Auftragspur, die je nach Parametereinstellung eine Höhe zwischen 0,1 mm und 3 mm und eine Breite zwischen 0,1 mm und 6 mm aufweist. Durch mehrfach nebeneinander gelegte Auftragspuren lassen sich abhängig von der gewählten Überlappung relativ ebene, flächige Beschichtungen erzeugen. Durch weitere Schichten in der dritten Dimension können beliebige dreidimensionale Körper erzeugt werden. [2][4]



Abbildung 5: Koaxiale Ringspaltdüse

Obwohl das Laser-Pulver-Auftragschweißen gegenüber anderen Laserverfahren noch viel Potenzial für weitere Einsatzgebiete besitzt, sind bereits einige industrielle Anwendungen erschlossen, bei denen sich die hervorragenden Schichteigenschaften laserauftraggeschweißter Schichten gegenüber Schichten anderer Auftragschweißverfahren (z.B. Plasmaauftragschweißen) bewähren. Die häufigsten Anwendungen finden sich derzeit im Bereich des Verschleißschutzes und hier insbesondere bei abrasiven Verschleißbeanspruchungen.

Alle diese bereits erschlossenen Anwendungen haben jedoch gemein, dass keine Schichtsysteme, sondern ausschließlich homogene Schichten aus einem Werkstoff oder Werkstoffsystem (z.B. Verbundwerkstoffe) zum Einsatz kommen. Die potenziell mögliche Erzeugung von Schichtsystemen war bisher nicht Gegenstand systematischer Forschungsarbeiten.



Abbildung 6: Applizierte Verschleißschutzschicht mit WC

In aktuellen Forschungen sollen Ansätze verfolgt werden, Mehrschichtsysteme nach bionischen Grundlagen zu generieren. Dies ermöglicht es, neben den Zielsetzungen der Dünnschichtsysteme (Reibungsminderung, Verringerung von abrasivem und adhäsivem Verschleiß) zeitgleich Optimierungen weiterer Werkstoffeigenschaften umzusetzen, die aktuell der Sandwichbauweise vorbehalten sind. Hierzu zählt die Verbesserung der Duktilität, die Erzeugung lokaler Zonen mit unterschiedlichen Eigenschaften, die Verbesserung der Rissfortschrittseigenschaften, etc.

Der Einsatz des Laser-Pulver-Auftragschweißens stellt optimale Prozesseigenschaften hierfür bereit. So stellt sich die Problematik der Wahl des Fügeverfahrens an dieser Stelle nicht, da das LPA selbst ein Füge- und Beschichtungsverfahren ist, mit dem ein sehr breites Werkstoffspektrum gefügt bzw. beschichtet werden kann. Dabei können sowohl dichte als auch poröse Schichten mit schweißmetallurgischer Schichtanbindung an das Substrat bzw. die darunter liegende Schicht hergestellt werden. Die orts aufgelöste und exakt regelbare Energieeinbringung

der Laserstrahlung ermöglicht die Erzeugung sehr dünner Schichten mit Wärmeinfluss- und Diffusionszonen im mikroskopischen Maßstab, so dass die spezifischen Werkstoffeigenschaften der jeweiligen Schichtwerkstoffe weitgehend erhalten bleiben. Gleichzeitig eignet sich das Verfahren jedoch auch zur Erzeugung von Dickschichten mit homogenem oder auch gradiertem Gefügebau. Während Kraftverläufe und Flächenpressungen beim Einsatz von Dünnschichtsystemen über deren Schichtdicke relativ konstant und somit nicht maßgeblich beeinflussbar sind, ermöglicht eine entsprechende Auslegung und ggf. Strukturierung eines solchen Dickschichtsystems - abhängig von dessen Geometrie - eine gezielte Beeinflussung von Kraftverläufen und Flächenpressungen.

Hieraus ergibt sich für das Bauteil, welches in diesem Konzept das Substrat für die Beschichtung darstellt, eine geringere Belastung. Als Folge ist die Verwendung eines kostengünstigeren Werkstoffs mit geringerer Festigkeit möglich, wodurch ein zusätzlicher Beitrag zum ressourcenschonenden Umgang hochwertiger Werkstoffe geleistet wird, da diese nur lokal in den entsprechend hochbelasteten Zonen aufgetragen werden.

Das Laserhärten und dessen Potenziale

Das Laserhärten ist der Hauptgruppe 6 „Stoffeigenschaften ändern“ der Fertigungsgruppen nach DIN 8580 zuzuordnen. Es zählt zu den Randschichthärteverfahren. Drei in ihrer Funktionsweise unterschiedliche Laserhärtungen werden differenziert.

- Martensitisches Umwandlungshärten
- Schockhärten
- Umschmelzen / Glasieren

Beim Schockhärten und Umschmelzen / Glasieren wird im Prozess die Schmelztemperatur des zu härtenden Werkstoffes kurzzeitig überschritten. Beim martensitischen Härten, auf das sich die folgenden Erläuterungen beziehen, sollte dies vermieden werden. [3]



Abbildung 7: Laserhärtung an dünnwandigem Bauteil

Ziel ist es, die Randschicht bzw. die Oberfläche eines Werkstückes in ein härteres martensitisches Gefüge umzuwandeln ohne dessen Funktionsoberfläche aufzuschmelzen. Die Prozessstufen ergeben sich analog zum konventionellen Härten im Ofen. Das Material wird auf eine Temperatur über der Umwandlungstemperatur erhitzt. Diese wird gehalten und um den Gefügestand einzufrieren anschließend abgeschreckt. Allerdings erfolgt dies beim Laserhärten als kontinuierlicher einstufiger Prozess mit sehr kurzer Prozesszeit.

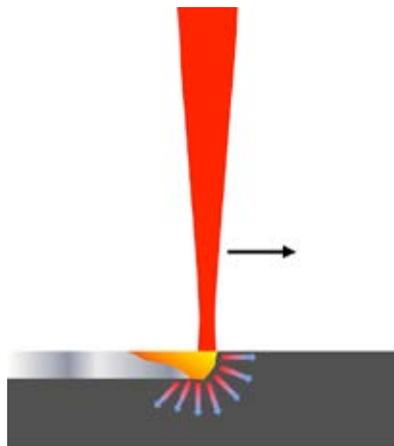


Abbildung 8: Grundprinzip Laserhärten

Durch die Laserstrahlung wird die zur Umwandlung benötigte Energie lokal eng begrenzt eingebracht. Dadurch entstehen sehr hohe Aufheiz- ($>10^2$ K/s) und Abkühlraten (ca. 10^4 K/s). Diese präzise Energieeinbringung ermöglicht eine sogenannte Selbstabschreckung des Materials durch Wärmeleitung. Eine zusätzliche externe Kühlung mit Kühlmedien ist daher nicht notwendig.

Durch diese hohen Abkühlraten können z.T. höhere Härten erzielt werden als bei konventionellen Härtemethoden. Ebenso erfahren auch unlegierte und niedriglegierte Stähle ($<0,3\%$ C) eine Steigerung der Härte. Das Laserhärten ist, wie auch

das Laserauftragschweißen, eine Möglichkeit Funktionsoberflächen von Bauteilen partiell zu härten bzw. zu panzern, um so an den relevanten Stellen den Verschleiß zu mindern. Durch den Laser als Energiequelle gehört das Laserhärten zu den verzugsärmsten Härtemöglichkeiten. Dadurch kann auch die Nacharbeit minimiert werden, in manchen Fällen sogar gänzlich entfallen. Ebenso ist es ein Laserstrahlverfahren, das eine gute Reproduzierbarkeit aufweist und sehr gut gesteuert und geregelt werden kann. Durch moderne dynamische ortsbezogene Temperaturregelungen ist es auch möglich, filigranste Bauteile oder komplexe Geometrien mit problematischen anschmelzungsaffinen Kanten und variierenden Wandstärken zu härten.

Laserhärten eignet sich besonders bei Anwendungen mit folgenden Eigenschaften bzw. Anforderungen:

- *Einhärtetiefen von wenigen 1/10 mm bis 2,6 mm*
- *Partielle Härtung komplexer Geometrien*
- *Härtung filigraner Bauteile mit kritischen, zu Anschmelzungen neigenden Zonen*
- *Bei variierenden Wandstärken*
- *Bei dünnwandigen Bauteilen (ohne Durchhärtung)*
- *Keine / minimierte Nacharbeit erwünscht*
- *Geringer Verzug / thermische Belastung zulässig*

Bei Gegenüberstellung zu potentiellen Alternativverfahren sollte das Induktionshärten und das Elektronenstrahlhärten betrachtet werden. Beim Induktionshärten sind höhere Eindhärtetiefen als beim Laserhärten möglich. Allerdings ist dies mit einem höheren divergenten Energieeintrag verbunden, welcher höhere, thermisch bedingte Verzüge verursacht. Ebenso schmelzen dadurch kritische Stellen an und dünnwandige Bauteilzonen härten durch. Ein Einsatz von Kühlmittel ist beim Induktionshärten zwingend notwendig.

Was ebenfalls einen hohen Kostenfaktor darstellt ist, dass die Induktoren bauteilspezifisch angefertigt werden müssen und wenig Flexibilität zulassen.

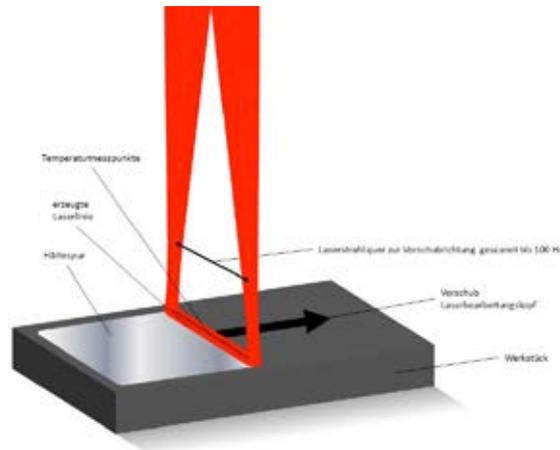


Abbildung 9: Grundprinzip gescannter Laserstrahl mit Temperaturerfassung

Das Elektronenstrahlhärten hingegen ist, wie auch das Laserhärten, ein berührungsloses Verfahren und von der Strahlführung an der Bauteilgeometrie flexibel. Es weist auch die geringsten Verzüge dieser drei Verfahren auf. Allerdings ist für die Elektronenstrahlführung und -formung ein Vakuum zwingend nötig. Dies erschwert die Flexibilität und zusätzliche Kühlmedien können nicht eingesetzt werden. Es sind beim Elektronenstrahlhärten nur geringe Einhärtetiefen möglich.

Das Laserhärten hat sich in den letzten Jahren in der Forschung und Industrie stark weiterentwickelt. Bisherige industrielle Anwendungen bezogen sich auf einfache Bauteil- bzw. Härtegeometrien die auch schon seit Jahren in der Großserie eingesetzt werden. Bei diesen Anwendungen handelt es sich um Applikationen, bei denen ein runder Strahlfleck mit hoher Geschwindigkeit über die Bauteiloberfläche bewegt wird. Vereinzelt werden auch geformte Strahlflecken, bspw. eine schmale Rechtecklinie eingesetzt, um eine breitere Härtespur zu erzeugen. Viele Beispiele sind in der Literatur aus dem Gebiet der Umformwerkzeuge zu finden. Vereinfachte Temperaturregelungen sind ebenfalls in einzelnen Anwendungen zum Einsatz gekommen.

Neueste Lasertechnologien und weiter entwickelte dynamische Temperaturregelungen ermöglichen heute eine Härtung komplexer Bauteilstrukturen. Ein schönes Beispiel hierfür, welches mit dem Lohn-Preis 2014 prämiert wurde, ist das Kooperationsprojekt des Steinbeis Transferzentrum Laserbearbeitung und innovative Fertigung – Pforzheim mit der Daimler AG. Es handelt sich hierbei um eine Verfahrensentwicklung der Laserhärtung von Camtronic-Nockenwellen der Firma Daimler, welche bis hin zur Großserie umgesetzt wurde. Bei diesem neuartigen Nockenwellen-System sind die Bauteile von höchster Funktionsintegration mit unterschiedlichsten Härteanforderungen auf komplexen, wandstärkevariierenden

Bauteilsektionen mit anschmelzungsaffinen Bauteilkanten. Diese Bauteile waren mit anderen Härtemethoden nicht oder nur mit erhöhtem Kostenaufwand umsetzbar.

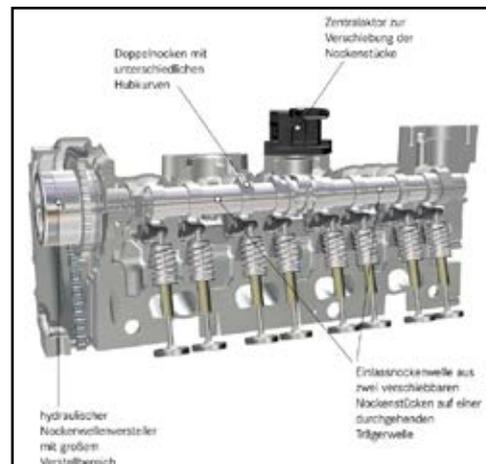


Abbildung 10: Camtronic-Nockenwelle im Motor [7]

Versuche haben gezeigt, dass eine wie oben beschriebene Temperaturregelung auch über sogenannte Umlenkspiegel möglich ist. Dies eröffnet in Zukunft die Möglichkeit auch in schwer zugänglichen Stellen wie bspw. Bohrungen und deren Wandungen zu härten.



Abbildung 11: Oxidfrei lasergehärtetes Bauteil

Ein großes Thema wird auch das oxidfreie Laserhärten komplexer Geometrien werden. Bereits mit einem Restsauerstoffanteil von 200 ppm können harte Randschichten erzeugt werden, die absolut blank sind und somit völlig frei von Nacharbeit.

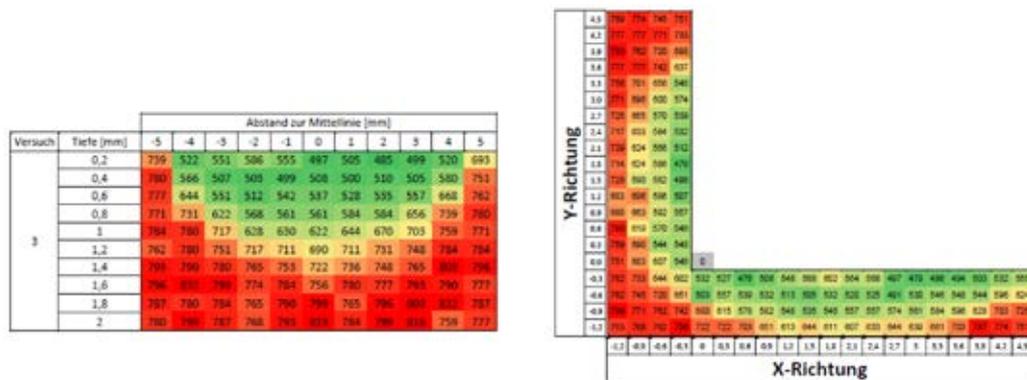


Abbildung 12: Darstellung Härteverlauf nach Laserenthärtung (links: flaches Bauteil / rechts: Bauteil mit Kante)

Neuste Forschungen zeigen, dass es möglich ist, bei bereits konventionell gehärteten Bauteilen partiell die Härte zu verringern. Dies ist ein sogenanntes Laserenthärten. Dies ist sinnvoll, wenn Bauteile nachträglich an bestimmten Stellen spanend bearbeitet werden müssen oder wenn auf Grund von Festigkeitsanforderungen rissanfällige Kanten duktiler sein sollen.

Quellenverzeichnis

-
- [1] SCHREIBER, F.: *Wolfram Schmelzkarbid im Verschleißschutz: Besonderheiten bei der schweißtechnischen Verarbeitung und Qualitätssicherung*. Technologieinformation, Durum Verschleißschutz GmbH, Willich, 2008.
- [2] CRUZ, T.: *Charakterisierung der Verschleißigenschaften von laserauftragsgeschweißten Schichten mit eingebundenen Karbiden*. Hochschule Pforzheim, Diplomarbeit, 2009.
- [3] HÜGEL, H. u. GRAF, T.: *Laser in der Fertigung – Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*. 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [4] WAHL, R.: *Grundlagenwissen zur Lasertechnologie und zum Lasereinsatz in der Materialbearbeitung*. Seminarskript, 2002.
- [5] BEYER, E. u. WISSENBACH, K.: *Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung*. Springer Verlag, Berlin, 1998.
- [6] Nachtigall, W.: *Bionik Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006, S.57-66
- [7] <http://media.daimler.com/dcmmedia/0-921-1457194-49-1489837-1-0-0-1489946-0-0-11702-1549054-0-1-0-0-0-0.html>

**Nanoschichtsystem Nickel / Nano-Palladium /
Nano-Gold als Bondoberfläche; Labor / Serie /
Alternative Anwendungen**

Markus Klingenberg,
Inovan GmbH & Co. KG

Einleitung

INOVAN ist ein führender Anbieter von kundenspezifischen Problemlösungen für die Kontakttechnik. Die Produktionspalette reicht dabei von veredelten Stanzgittern bis hin zu kundenspezifischen Mechatronikbaugruppen. Die Fertigung dieser Präzisionsteile richtet sich nach kundenspezifischen Anforderungen. Bei Bedarf liefert INOVAN die Entwicklung bis hin zur Realisierung maßgeschneiderter Lösungen für Großserien. Als einer der Technologieführer mit den Bereichen, Stanz- und Montagetechnik, galvanische Oberflächen und Kontaktwerkstoffe werden Kunden auf der ganzen Welt beliefert.

Der Einsatz von Palladium ist in der Leiterplattentechnik eine eingeführte und bewährte Oberfläche. Je nach Anwendung noch mit einer dünnen Goldschicht versehen, wird diese Oberfläche für Bond-, Klebe-, und Lötanwendungen eingesetzt. Im Bereich von Leadframes und Stanzgittern hat sich diese Schicht noch nicht auf breiter Front durchsetzen können. Die Schichtkombination birgt ein großes Potenzial in vielerlei Hinsicht. Bei INOVAN wurde ein solches Ni/Pd/Au-Nanoschichtsystem unter folgenden Gesichtspunkten mit Priorität auf Wire-Bonding entwickelt:

- Edelmetalleinsparung
- Breites Anwendungsspektrum
- Hohe Prozesssicherheit, großes „Bondfenster“
- Eingeführte Werkstoffe für Bondanwendungen
- Bekannte Prozesse der galvanischen Oberflächenveredelung
- Integration in bewährten In-House-Prozess „Bondgoldoberfläche“ möglich
- Geringe Korrosionsneigung
- Hohe Temperaturbeständigkeit (geringe Diffusion)

„Bondfähige Oberfläche“ ist ein weitgefasser Begriff und so galt es, Grenzen und Parameter dieses Ni/Pd/Au-System detailliert zu untersuchen, um es in seinen Eigenschaften verstehen und beeinflussen zu können.

Diese umfangreiche Entwicklungsarbeit konnte erfolgreich abgeschlossen werden [1]. Somit war der Weg frei, das Schichtsystem Kunden vorzustellen und Produkte damit auszustatten [1, 2].

Umsetzung und Stand des Schichtsystems bei INOVAN

Der Trend hin zu diesem kostengünstigen Schichtsystem wurde richtig erkannt. Umfangreiche Tests mit zehntausenden von Bondungen zur Sicherstellung von Serieneignung, Zuverlässigkeit etc. sind in Zusammenarbeit mit potenziellen Kunden abgeschlossen. Sowohl bei internen als auch bei externen Prüfungen zeigt das Schichtsystem keine nennenswerten Einschränkungen.

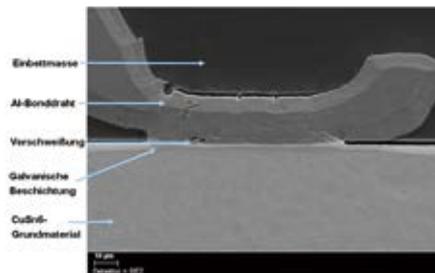


Abb. 1 Bondfuß 38µm-Draht, Querschliff, REM

Namhafte Automotive-Zulieferer haben zwischenzeitlich Produkte mit dieser Beschichtung im Feld, mit steigender Tendenz.

Die Umsetzung der Labor- / Handmusterfertigung zu Serienprozessen wurde durch einen umfangreichen Umbau einer bestehenden Galvaniklinie realisiert.

Die hauptsächliche Verwendung von Alu-Dünndraht für die Nanoschicht stellt höhere Ansprüche an Bondprozessparametrierung und Labor-Equipment, wie beispielsweise Prozessfensterermittlung, Bondtestklemmungen etc. Auch hier wurden im Rahmen der Versuche neue Erkenntnisse gewonnen und für Serienfertigung umgesetzt.

Somit wird sich Nanotechnologie als Bondoberfläche im rauen Feld des automobilen Einsatzes weiterhin bewähren müssen.

Abwandlung und weitere Anwendungen

Nano-Palladium als Endoberfläche

Auf Grund der Weiterverarbeitungstechnik eines Kunden, musste auf die Goldschicht verzichtet werden. Es entstand eine Abwandlung der Oberfläche. Obwohl die Goldschicht im Schnitt nur 10 nm dick ist, ca. 100 Atomlagen, verändert dies die Bondfähigkeit entscheidend. Nach mehreren Musterbearbeitungen und enger Zusammenarbeit mit Kunden und Bondmaschinenhersteller musste postuliert werden, dass diese Oberfläche nicht mehr mit einfachen Laborbondgeräten bondbar ist. Auch das sogenannte Bond-(Prozess)-fenster ist kleiner als bei der Verwendung von Gold.

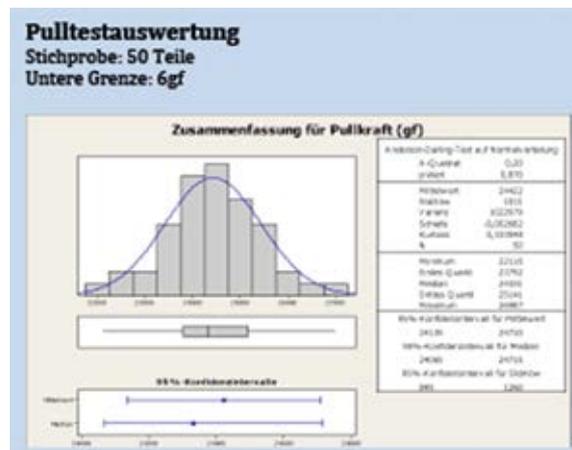


Abb 2 Verteilung der Pullkraft bei Verwendung Vollautomatbonders

Somit war die Anschaffung eines sogenannten Vollautomatbonders als Prüfegerät von Nöten.

Diese wesentlich komplexeren Geräte werden normalerweise 1:1 in den automatisierten Fertigungen verwendet. Sie bieten mehr Einstellmöglichkeiten, dynamische Parameterverläufe während des Bondvorgangs sowie umfangreiche Dokumentation der IST-Werte während des Bondvorganges.

Weitere Anwendungen

Erste Muster für dieses erweiterte Anwendungsspektrum wurden für Testzwecke an Kunden ausgeliefert und erbringen bis dato positive Versuchsergebnisse. Diese Anwendungen sind in den Bereichen Oberflächenschutz und Bauteilminiatürisierung zu suchen, z.B. Kombination Bond- und Lötfläche.

Löten

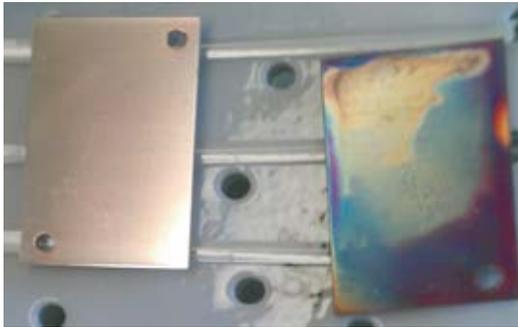
Das Nanoschichtsystem Nickel / Nano-Pd / Nano-Au kann wie schon erwähnt noch mehr als nur als Bondoberfläche dienen, deshalb sind auch hier weiterführende Untersuchungsreihen angesetzt bzw. in Planung. Z.B. könnten Kombinationen der eingangs genannten Eigenschaften wie Lötbarkeit [3] etc. bei der Miniaturisierung von komplexen Bauteilen eine entscheidende Rolle spielen, indem Oberflächen eingesetzt werden, die mehrere Aufbau- und Verbindungstechniken erlauben.



Abb. 3 Dip-and-Look-Löttest -> Ohne Entnetzungen

Oxidationsschutz

Neue Funktionen und Anschlusstechniken erfordern oxidarme, blanke Kupferoberflächen, aber auch bewährte Verfahren wie Widerstandsschweißen verlangen eine definierte Oberflächengüte. Kleben und Kupferdrahtbonden sind zwei solcher Techniken [4]. Nur dieses „Oxidfreihalten“ des Kupfers gestaltet sich äußerst schwierig und aufwändig, da Kupfer stark zum Anlaufen / Oxidieren neigt. Ein Zusatzaufwand für Anlaufschutz darf den Kostenvorteil z.B. durch den Verzicht einer Edelmetallschicht nicht schmälern, aber auch nachfolgende Prozesse keinesfalls stören. Aus der Leiterplattentechnik bekannte organische Anlaufschutzsysteme (OSP) sind nicht zielführend, da diese meist störend wären und durch vorgeschaltete Reinigungsprozesse entfernt werden müssen, d.h. Kosten durch Mehraufwand. Die Applikation einer Nanoschicht während eines ohnehin für Stanzteile dieser Anwendungskategorie meist notwendigen galvanischen Beschichtungsprozesses wäre ein Ansatz. Fertigung, Weiterverarbeitung und Lagerung dieser Oberflächen wären deutlich vereinfacht und dadurch bedingter Aufwand minimiert [5].



*Abb. 4 Vergleich CuSn6 beschichtet /unbeschichtet
24h in oxidativer Umgebung*



*Abb. 5 Schweißbereich
-nanobeschichtet-
nach mehreren Wochen trockener Lagerung*

*-unbeschichtet-
Oberfläche bräunlich / rötlich oxidiert*

Zusammenfassung / Ausblick

Die schon seit Jahren aus dem Leiterplattenbereich bekannte Nanoschichtkombination Nickel / Nano-Palladium / Nano-Gold hat bei umfassenden Untersuchungen die hohen Ansprüche an eine Bondverbindung erfüllt. Bei umfangreichen Testreihen und abgeprüften Eigenschaften zeigten sich keine nennenswerten Nachteile gegenüber den hochwertigen konventionellen Beschichtungen wie Feingold oder AlSi.

Die Nanobondoberfläche ist von mehreren Automotive-Zulieferern qualifiziert und wird schon seit wenigen Jahren bei Produkten erfolgreich im Feld eingesetzt.

Die Dünndrahtbondung wie auch die Nano-Palladiumschicht als Endoberfläche stellten nochmals neue Herausforderungen auf dem ohnehin diffizilen Gebiet der galvanischen Bondoberflächen dar.

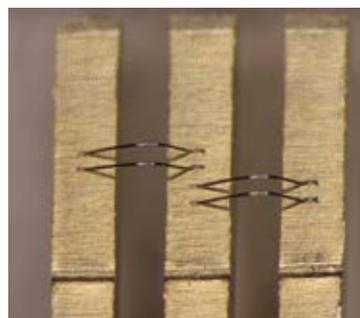


Abb 6: 38 µm- Draht Testbonds

Diskutierte alternative Anwendungen kommen bei entsprechenden Produkten teilweise schon zur Anwendung.

Bezüglich Oxidationsschutz für Kupferbondoberflächen sind zwar Versuche gemacht, aber der Durchbruch im Sinne eines Serieneinsatzes steht noch aus, verwunderlich angesichts positiver Grundagentests. Abhilfe könnte ein entsprechender Kooperationspartner aus dem Umfeld der „Tier 1“ schaffen.

Kontakt

www.inovan.de markus.klingenberg@inovan.de

LITERATUR

- [1] Markus Klingenberg u. Arno Marto: Nickel-Palladium-Gold-Nanoschichtsysteme als alternative Bondoberfläche, Fachzeitschrift PLUS, Ausgabe 11/2010
- [2] George Harman: Wire Bonding in Microelectronics; McGraw-Hill Companies, 1989
- [3] Douglas Romm, Bernhard Lange, Donald Abbott: Evaluation of Nickel / Palladium / Gold-Finished Surface-mount Integrated Surfaces; Texas Instrument 2001
- [4] productronic 10-2004 Bonden mit Kupferdraht
- [5] Horst Clauberg, Petra Backus, Bob Chylak: Nickel-Palladium Bond Pads for Copper Wire Bonding, Microelectronics Reliability 2010

Phasenfeldsimulationen des Benetzungsverhaltens von Flüssigkeiten auf chemisch heterogenen Werkstoffoberflächen

Marouen Ben Said, Karlsruher Institut für Technologie
Katharina Vellguth, Karlsruher Institut für Technologie
Britta Nestler, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Zusammenfassung

Basierend auf einem Allen-Cahn-Phasenfeldmodell mit geeigneter Benetzungsrandbedingung wird in dieser Arbeit das Benetzungsverhalten eines Tropfens auf chemisch heterogenen Oberflächen untersucht. Die Oberflächen weisen unterschiedliche Verhältnisse von Struktur- zu Tropfengröße auf, wodurch unterschiedliche Benetzungsverhalten beobachtet werden. Die auf dem Phasenfeldmodell basierten Simulationen werden mit theoretischen, experimentellen und numerischen Ergebnissen aus der Literatur verglichen.

1 Einleitung

Das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf festen Werkstoffoberflächen ist für viele industrielle Anwendungen von großer Bedeutung. Die Fragestellungen kommen u.a. aus der Beschichtungsindustrie, Textilherstellung bis hin zur Biologie, Medizin, Diagnostik und Mikrofluidik. Dank modernster Rechnerarchitekturen und Speicherkapazitäten ist es heutzutage möglich eine Vielzahl dieser Fragestellungen, neben experimentellen Untersuchungen, mittels numerischer Simulationen effizient und präzise zu beantworten. Daher sind computergestützte Simulationen bei der Entwicklung und Untersuchung neuer Werkstoffe, die komplexen Anforderungen genügen, nicht mehr wegzudenken.

Trifft ein Tropfen auf eine feste Oberfläche, strebt dieser, nach dem Prinzip der freien Energieminimierung, die Form mit der geringsten Oberfläche anzunehmen. Welche Gleichgewichtform er annimmt ist von mehreren Faktoren abhängig. Darunter zählen die im System involvierten Oberflächenspannungen, die geometrische und chemische Beschaffenheit der festen Oberfläche, der Umgebungsdruck, die Umgebungstemperatur sowie externe Kräfte (z.B Gravitation). Charakteristisch für die Beschreibung der Benetzungseigenschaft eines Flüssig/Fest/Gas-Systems ist der statische Kontaktwinkel θ , der sich im Gleichgewichtszustand etabliert. Dieser wird an einem Dreiphasenpunkt entlang der Kontaktlinie, an der sich Flüssig-, Fest- und Gasphase treffen, gemessen. Vor mehr als 200 Jahren formulierte Thomas Young, in seiner berühmten Arbeit [You05], den Zusammenhang zwischen dem statischen Kontaktwinkel θ , auf einer ideal glatten Oberfläche, und die im System involvierten Oberflächenspannungen gemäß

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sl} - \gamma_{sf}}{\gamma_{fl}} \quad (1)$$

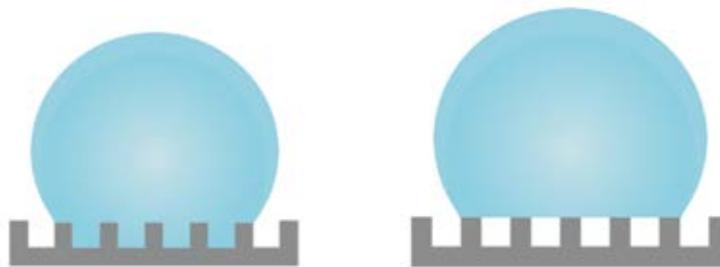
Dabei sind γ_{sl} , γ_{sf} und γ_{fl} die Oberflächenspannungen zwischen Substrat/Luft, Substrat/Flüssigkeit und Flüssigkeit/Luft, respektive.

Als ideal glatte Oberfläche wird eine Oberfläche bezeichnet, die sowohl glatt, als auch chemisch homogen und nicht reaktiv ist.

Ist der Kontaktwinkel kleiner (resp. größer) als 90° , so liegt ein hydrophiles (resp. hydrophobes) System vor. Als superhydrophob, werden Oberflächen bezeichnet, die einen Kontaktwinkel θ in 150° , 180° aufweisen.

Inspiziert durch den Lotuseffekt, wird bei der Herstellung von (super)hydrophoben Materialien die Werkstoffoberfläche gezielt strukturiert, um eine wasserabweisende Eigenschaft zu erhalten.

Bei der Benetzung strukturierter Oberflächen kommt es entweder zu einer homogenen Benetzung (Wenzel-Regime), oder zu einer heterogenen Benetzung (Cassie-Baxter-Regime). Bei homogener Benetzung dringt die Flüssigkeit zwischen den Oberflächenstrukturen ein und benetzt den Untergrund, wie in Abbildung 1a schematisch dargestellt. Im Cassie-Baxter-Regime hingegen, bilden sich Lufteinschlüsse zwischen den Oberflächenstrukturen, sodass die Flüssigkeit auf eine Grundfläche bestehend aus Festkörper und Gas¹ ruht.



(a) Wenzel-Regime

(b) Cassie-Baxter-Regime

Abbildung 1: Benetzungsregime auf strukturierten Oberflächen

Wenzel beschreibt in seiner Arbeit [Wen36] den Kontaktwinkel θ_w auf einer strukturierten Oberfläche wie folgt [Wen36].

¹ In dieser Arbeit steht Luft für die Gasphase

$$\cos \theta_{\omega} = r \cos \theta. \quad (2)$$

Dabei ist θ der Winkel der durch (1) bestimmt werden kann und r ein Rauheitsfaktor, der das Verhältnis zwischen Benetzter und projizierter Oberfläche beschreibt. Cassie und Baxter stellten in [Cas44] ein weiteres Gesetz für die Ausprägung des Benetzungsverhaltens auf.

In Falle einer heterogenen Benetzung, wie in 1b dargestellt, ist der Kontaktwinkel θ_{cb} durch

$$\cos \theta_{cb} = f_{sf}(\cos \theta + 1) - 1 \quad (3)$$

gegeben. Die Gesetze für Benetzungswinkel zwischen Flüssigkeiten und festen Oberflächen, die durch Young und Wenzel aufgestellt wurden, stützen sich alle auf die Prämisse der chemischen Homogenität des Substrats. In vielen Anwendungsbereichen sind Oberflächen jedoch chemisch inhomogen. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz von Tintenstrahldruckern. Oft schmiert die Farbe, die mit bis zu acht Metern pro Sekunde auf das Papier aufgebracht wird. Genauere Untersuchungen in [Leo03, Dup04] ergaben, dass die Tinte, je nach Position des Auftreffens, auf der Struktur des Papiers unterschiedliche Tropfenformen ausbildet. Grund dafür ist die chemische Struktur, also die chemische Inhomogenität des Papiers.

Für jeden einzelnen Teilbereich mit Flächenanteil f_i , in dem die Oberflächenspannungswerte gleich sind, stellt sich nach dem Young'schen Gesetz (1) ein Kontaktwinkel θ_i ein. Nach Cassie-Baxter [Cas44] gilt

$$\cos \theta_{cb} = \sum_i f_i \cos \theta_i \quad (4)$$

Basierend auf (4) sollte sich also ein Kontaktwinkel ausbilden, der sich aus den Flächenanteilen mit unterschiedlichen Oberflächenspannungswerten und aus den Young'schen Kontaktwinkeln zusammensetzt, die sich unter den Grenzflächenspannungswerten der einzelnen Komponenten ergeben. In [Mar09] wird deutlich, dass dies jedoch nur der Fall ist, wenn die Größenordnung des Tropfens die der Strukturauflösung um ein Vielfaches übersteigt. Dann bilden sich weiterhin runde Tropfen aus, die nach Cassie-Baxters Gesetz einen einheitlichen Kontaktwinkel zur Oberfläche besitzen.

Wenn jedoch die chemische Struktur ähnlich groß ist, wie die des Tropfens selbst, so bilden sich keine runden Tropfen mehr. Nun ist die Form abhängig von der Position der Tropfen auf der Oberfläche, wie in Abbildung 2 zu erkennen ist.

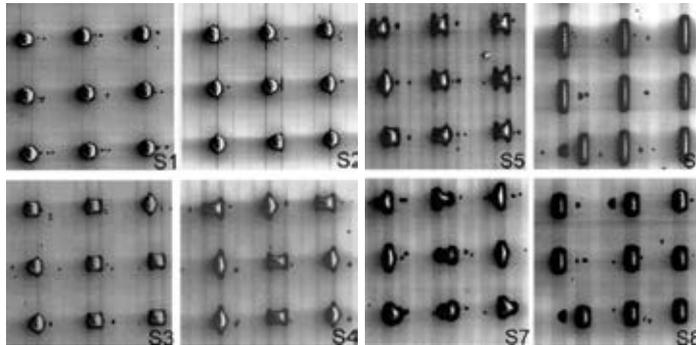


Abbildung 2: Versuchsergebnisse von [Leo03] zur Benetzung auf heterogenen Oberflächen. Die sichtbare Fläche ist $750\mu\text{m}$ breit.

Neben theoretischen und experimentellen Arbeiten wurden Benetzungsvorgänge auch numerisch untersucht. Dabei hat sich in den letzten Jahren die Phasenfeldmethode als das Werkzeug der Wahl bei der Simulation von Benetzungsprozessen etabliert.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut. Im nächsten Kapitel wird die Phasenfeldmethode, auf der die Simulationsergebnisse basieren, vorgestellt. In Kapitel 3 werden numerische Ergebnisse zur Benetzung auf chemisch heterogenen Oberflächen vorgestellt und diskutiert. Abschließend werden im letzten Kapitel die wichtigsten Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

2 Phasenfeldmethode und Benetzungsrandbedingung

Benetzungsprobleme können mathematisch als freie Randwertprobleme interpretiert werden. Die Oberfläche eines Tropfens evolviert in der Zeit und im Raum in Richtung des energetisch günstigsten Zustandes. Basierend auf den Arbeiten [Cah77, Jac99, Nes08] haben wir die freie Energie eines Benetzungssystems in der Form eines Ginzburg-Landau-Energiedichtefunktional formuliert

$$\mathcal{F}(\phi) = \int_{\Omega} \left(\epsilon \gamma_{fl} |\nabla \phi|^2 + \frac{16\gamma_{fl}}{\pi^2 \epsilon} \phi(1 - \phi) + g(\phi) \right) d\Omega + \int_{\partial s\Omega} (\gamma_{sf} - \gamma_{sl}) \phi + \gamma_{sl} dS. \quad (5)$$

Dabei beschreibt der Ordnungsparameter $\phi(x, t) := \phi \in [0, 1]$ den Zustand der flüssigen Phase und ist zeit- und ortsabhängig.

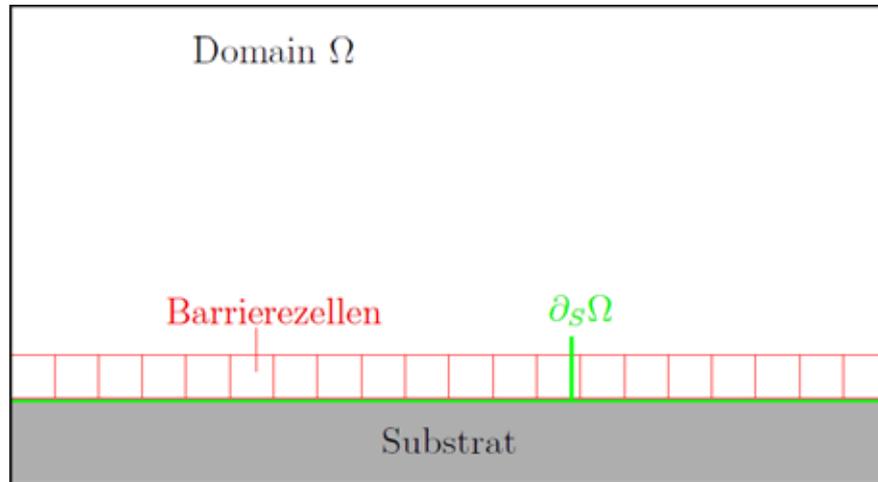


Abbildung 3: Barrierezellen auf dem Substratrand. Hier sind die Substrateigenschaften gültig.

Das erste Integral ist ein Volumenintegral, welches die Interaktion zwischen der Luft und der flüssigen Phase beschreibt. Es besteht aus einer Gradientenenergiedichte (erster Summand), einem „double well“ Potential und einem weiteren Beitrag $g(\phi)$, der die Volumenerhaltung der Tropfen garantiert. Dieser wird ausführlich in [Nes08] beschrieben. Das zweite Integral ist ein Oberflächenintegral und reflektiert die Interaktion der festen Phase mit den restlichen Phasen im System. Eine detaillierte Herleitung der Phasenfeldmethode und der Benetzungsrandbedingung findet der Leser in [Ben14] und den darin zitierten Referenzen.

Der Gleichgewichtszustand des betrachteten Systems stellt sich ein, sobald die totale freie Energie ihr Minimum erreicht hat. Um dieses Minimum zu bestimmen, wird das Funktional variationell abgeleitet und zu Null gesetzt. Daraus folgt die Evolutionsgleichung

$$\tau \in \partial_t \phi = 2 \epsilon \gamma_{fl} \nabla \phi - \frac{16 \gamma_{fl}}{\pi^2 \epsilon} (1 - 2\phi) - \frac{\partial g(\phi)}{\partial \phi} \quad \text{in } \Omega \quad (6)$$

Im Gebiet Ω und die Benetzungsrandbedingung (7)

$$0 = 2 \epsilon \gamma_{fl} \nabla \phi \cdot n + (\gamma_{sf} - \gamma_{sl}) \quad \text{auf dem Rand } \partial_s \Omega \quad (8)$$

nach der sich der Kontaktwinkel im Gleichgewichtszustand einstellt. Eine schematische Darstellung des Simulationsgebietes ist Abbildung 3 zu entnehmen. Im Gegensatz zu der Luft- und der flüssigen Phase, wird die feste Phase (Substrat) als zeitlich invariant und mit scharfer Grenzfläche zu den restlichen Phasen implementiert. Die Gleichungen (7) und (8) werden auf äquidistanten Gittern mit Finite-Differenzen-Verfahren räumlich diskretisiert. Ein explizites Euler-Verfahren wird für die zeitliche Diskretisierung verwendet. In der Arbeit [Ben14] findet der Leser eine detaillierte Beschreibung der Diskretisierung.

3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden Simulationen zum Benetzungsverhalten von Wassertropfen auf chemisch heterogenen Oberflächen vorgestellt und mit den Ergebnissen der Arbeiten [Dup04, Leo03, Mar09a] verglichen.

Zum einen wird der Einfluss der Größenordnung der Strukturierung gegenüber der Tropfengröße untersucht, zum anderen wird der Einfluss der initialen Position eines Tropfens auf der chemischen Struktur auf seine Gleichgewichtsform analysiert.

3.1 Untersuchung zur Variation der Strukturbreite

Das Verhältnis Strukturfeinheit/Tropfengröße beeinflusst das Benetzungsverhalten eines Tropfens auf einer chemisch heterogenen Oberfläche.

Sind die Größenordnungen annähernd gleich, dann hängt die Gleichgewichtsform hauptsächlich von der initialen Position ab, an der der Tropfen auf das Substrat gesetzt wird [Dup04]. Übersteigt die Größe der Tropfen die der Struktur deutlich, so bilden sich eher runde Tropfen aus, wie auf chemisch homogenen Oberflächen. Man spricht hier auch von Homogenisierung [Mar09a].

Um diesen Homogenisierungseffekt nun auch mit dem Phasenfeldmodell zu verdeutlichen, und um die These zu untermauern, dass neben dem Flächenanteil der heterogenen Flächen auch die Auflösung dieser für das Ergebnis eine entscheidende Rolle spielt, wurden Simulationen von Tropfen auf verschiedenen hoch aufgelösten chemisch heterogenen Substraten mit einem Tropfen auf homogenem Substrat verglichen. Es soll gezeigt werden, dass sowohl die Form, als auch die Genauigkeit der Kontaktwinkel für Tropfen auf heterogenen Substraten umso näher an den Werten der Simulation auf homogenen Substraten liegen, je feiner

die Strukturierung ist. Die Struktur des heterogenen Substrats liegt hier in Streifen vor und variiert in der Breite. Das Flüssigkeitsvolumen der Tropfen ist bei allen in Abbildung 4 gezeigten Simulationen identisch.

Auf den dunkelgrau (resp. hellgrau) eingefärbten Bereichen weist der Tropfen einen Kontaktwinkel $\theta_1 = 100^\circ$ (resp. $\theta_2 = 50^\circ$) auf.

Nach der Gleichung von Cassie-Baxter (4) stellt sich bei der Benetzung von Flüssigkeiten auf chemisch heterogenen Oberflächen ein Kontaktwinkel ein, der abhängig von den Flächenanteilen der verschiedenen Gebiete, sowie deren Young'schen Kontaktwinkel ist. Es wurden Oberflächen mit gleichgroßen Anteilen hydrophober und hydrophiler Flächen, das heißt $f_1 = f_2 = 0.5$. In (4) ergibt das

$$\cos \theta_{cb} = 0.5 \cdot \cos 50^\circ + 0.5 \cdot \cos 100^\circ = 0.23457. \quad (9)$$

Daraus folgt, dass sich der Kontaktwinkel $\theta_{cb} = 76,43^\circ$ im Gleichgewicht einstellt. Die Notation der Kontaktwinkel ist wie folgt: Young'sche Kontaktwinkel werden mit θ , theoretisch berechnete Kontaktwinkel mit θ_{cb} , mikroskopisch gemessene

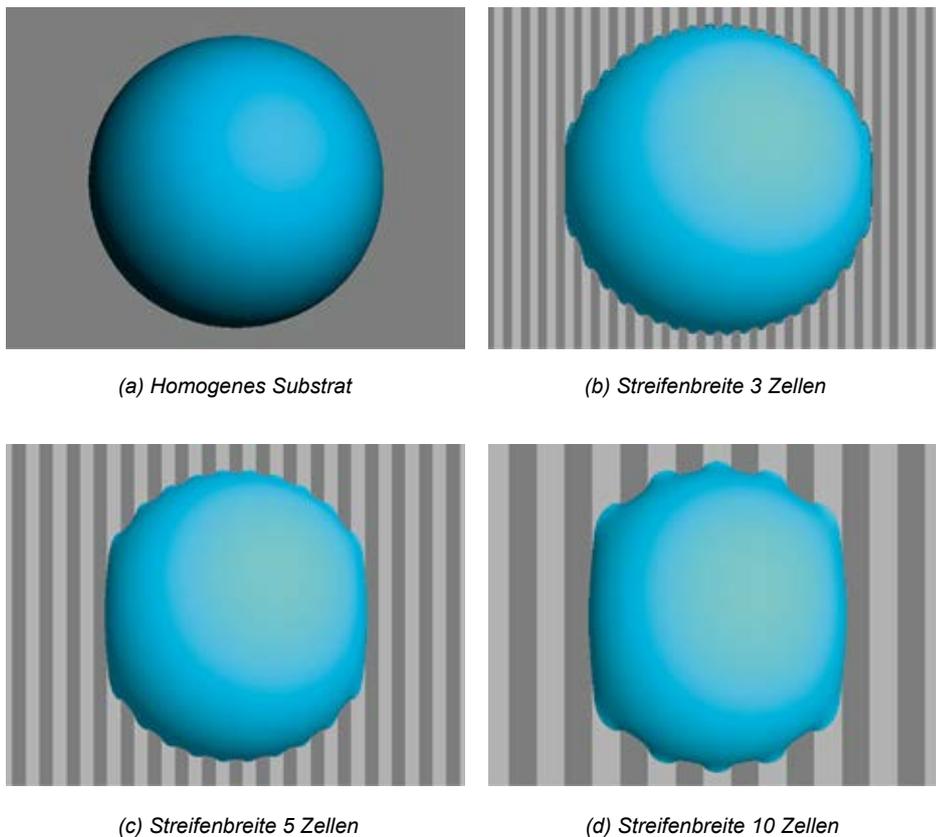


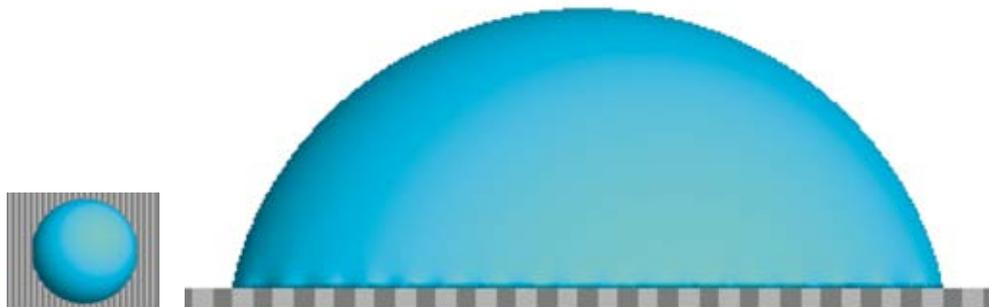
Abbildung 4: Tropfen mit einem Volumen von 50^3 Zellen auf: homogenem Substrat (a), heterogenem Substrat mit einer Streifenbreite von 3 Zellen (b), heterogenem Substrat mit einer Streifenbreite von 5 Zellen (c), heterogenem Substrat mit einer Streifenbreite von 10 Zellen (d). Ansicht von oben im Gleichgewichtszustand.

Kontaktwinkel mit θ_{mi}^* und makroskopisch gemessene Kontaktwinkel mit θ_{ma}^* bezeichnet. Zwischen mikroskopischem und makroskopischem Winkel wird deswegen unterschieden, weil sich die Winkel auf dem Substratrand durch die Randbedingung (8) nur in Abhängigkeit der Oberflächenspannungswerte ausbilden. Der makroskopische Winkel hängt zusätzlich von der Form des Flüssigkeitsvolumens ab und wird fünf Zellen oberhalb der Kontaktlinie gemessen.

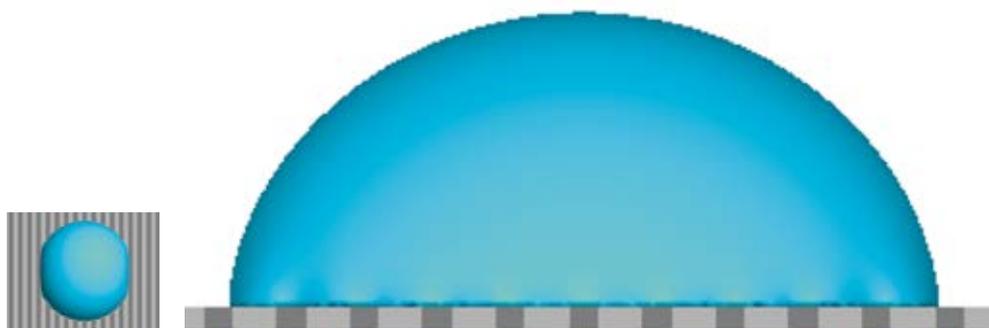
Die Vergleichbarkeit zu der Benetzung auf homogenem Substrat wird möglich, indem für die Simulation des Tropfens auf homogenem Substrat der theoretische Wert ($\theta_{cb} = 76.43^\circ$) auf dem heterogenen Substrat als Young'scher Kontaktwinkel gewählt wird.

Abbildung 4 zeigt in einer Ansicht von oben vier Simulationen mit den eben genannten Einstellungen. Während in Abbildung 4a die Simulation eines Tropfens auf homogenem Substrat dargestellt ist, sieht man in den Abbildungen 4b – 4d Tropfen auf heterogenem Substrat mit einer Breite von drei, fünf und zehn Zellen. Die Form des Tropfens auf Streifen mit drei Zellen Breite ist annähernd die gleiche, wie die des Tropfens auf homogenem Substrat, wohingegen die Tropfen auf dem gröber strukturierten Substrat deutliche Abweichungen von dieser Form zeigen. Damit bestätigt sich die Annahme einer Homogenisierung bei ausreichend hoher Auflösung der Struktur gegenüber dem Tropfenvolumen und wird durch diese Darstellungsweise qualitativ abgebildet. Die Ergebnisse entsprechen denen aus [Leo03, Dup04, Mar09a]. Betrachtet man selbige Simulationen aus der Sicht parallel zu den Streifen und misst die Kontaktwinkel, so bestätigt sich, dass die Genauigkeit der Übereinstimmung von gemessenem und erwartetem Kontaktwinkel von der Streifenbreite abhängt.

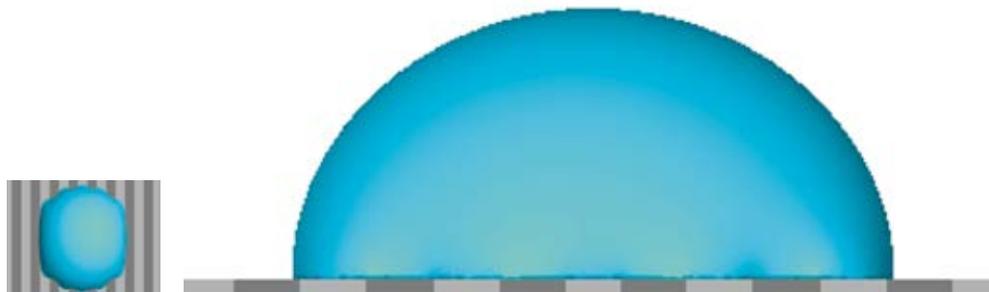
In Abbildung 5a wurden die Kontaktwinkel $\theta_{ma}^* = \theta_{mi}^* = 75.69^\circ$ gemessen. Dies entspricht einer Abweichung von knapp einem Prozent. Bereits bei einer Streifenbreite von fünf Zellen erkennt man deutliche Abweichungen.



(a) Streifenbreite 3 Zellen; $\theta_{mi}^* = \theta_{ma}^* = 75.69^\circ$



(b) Streifenbreite 5 Zellen; $\theta_{mi}^* = 90^\circ$; $\theta_{ma}^* = 83.83^\circ$



(c) Streifenbreite 10 Zellen; $\theta_{mi}^* = 90^\circ$; $\theta_{ma}^* = 86.87^\circ$

Abbildung 5: Gebietsgröße: 80x250x250. Tropfenvolumen: 50³ Zellen; Ansicht parallel zur Streifenrichtung.
Theoretischer Winkel: $\theta_{cb} = 76.43^\circ$

Während der Tropfen mikroskopisch betrachtet vor einem hydrophoben Streifen „hängen bleibt“ und einen Winkel von $\theta_{mi}^* = 90^\circ$ ausbildet, stellt sich makroskopisch ein Winkel von $\theta_{ma}^* = 83.83^\circ$ ein (Abbildung 5b). Ähnlich verhält es sich bei einer Streifenbreite von 10 Zellen mit $\theta_{mi}^* = 90^\circ$ und $\theta_{ma}^* = 86.87^\circ$. Demnach liegt die Tendenz der Kontaktwinkel bei geringerer Auflösung der chemischen Struk-

turierung und Blickrichtung in Streifenrichtung bei zu großen Werten. Abbildung 6 zeigt die Tropfen in der Ansicht orthogonal zu den Streifen. Hier entwickelt sich mit größerer Auflösung eine zunehmende Abweichung vom theoretischen Wert. Die Winkel sind kleiner als erwartet. Hier sind schon für die feinste Struktur mit der Breite von drei Zellen Abweichungen im mikroskopischen Winkel ($\theta_{mi}^* = 61.78^\circ$) zu erkennen. Das liegt an den kleinen „Zungen,“ die sich auf den hydrophilen Streifen bilden. Für den makroskopischen Winkel mit $\theta_{ma}^* = 74.97^\circ$ ist dagegen, genau wie in Abbildung 5a, ein sehr genaues Ergebnis abzulesen.

Der mikroskopische Winkel nähert sich für die größeren Strukturen mit $\theta_{mi}^* = 51.12^\circ$ in 6b und $\theta_{mi}^* = 46.20^\circ$ in 6c dem Young'schen Kontaktwinkel, der sich durch die Oberflächenspannungswerte des hydrophilen Substrats ergibt. Auch die makroskopischen Winkel liegen für die Streifenbreiten von fünf mit $\theta_{ma}^* = 66.84^\circ$ und für die Breite von zehn Zellen mit $\theta_{ma}^* = 64.29^\circ$ deutlich unter dem Erwartungswert.



(a) Streifenbreite 3 Zellen; $\theta_{mi}^* = 61.78^\circ$; $\theta_{ma}^* = 74.97^\circ$



(b) Streifenbreite 5 Zellen; $\theta_{mi}^* = 51.12^\circ$; $\theta_{ma}^* = 66.84^\circ$



(c) Streifenbreite 10 Zellen; $\theta_{mi}^* = 46.20^\circ$; $\theta_{ma}^* = 64.29^\circ$

3.2 Einfluss der initialen Position der Tropfen bei ähnlichen Größenverhältnissen von Streifenbreite zu Tropfengröße

In diesem Abschnitt wird untersucht, welchen Einfluss die Anfangsposition des Tropfens auf einer groben Struktur auf seine Gleichgewichtsform hat. Die Breite der Struktur orientiert sich an den Simulationen aus [Dup04].

Zunächst wurden die Tropfen mit einem Initialvolumen von 40^3 Zellen jeweils mittig auf einen hydrophilen bzw. einen hydrophoben Streifen gesetzt (siehe Abbildung 7). Mit zunehmender Simulationszeit bilden sich symmetrische Formen aus, welche davon abhängen, auf welchen Flächen sich der äußere und der mittlere Bereich des Tropfens befindet. Mikroskopisch betrachtet entstehen Kontaktwinkel, passend zu den aktuellen Substrateigenschaften. In der letzten Abbildung 7d ist der Gleichgewichtszustand gezeigt.

In Abbildung 8 ist der Tropfen zu ca. 70% auf dem hydrophoben Substrat positioniert. Die Oberflächenspannungswerte sind dabei identisch mit denen, die im Abschnitt 3.1 angegeben wurden. Trotz des deutlich größeren Flächenanteils der dunkelgrauen – also hydrophoben – Fläche, breitet sich der Tropfen im Laufe der Simulation auf die hydrophile Fläche aus. Dargestellt sind Isolinien der diffusen Grenzfläche auf dem Substratrand zu unterschiedlichen Simulationszeiten vom Ausgangspunkt bis zum stationären Zustand.

Dagegen ist bei einem anfänglichen Flächenanteil von 85% auf der hydrophoben Fläche eine andere Entwicklung zu erkennen, wie Abbildung 9 zu entnehmen ist. Hier bildet sich ein Zustand analog zu dem in Abbildung 7d links aus, bei dem sich die Flüssigkeit über einen hydrophoben Streifen hinweg auf den angrenzenden hydrophilen Flächen ausbreitet.

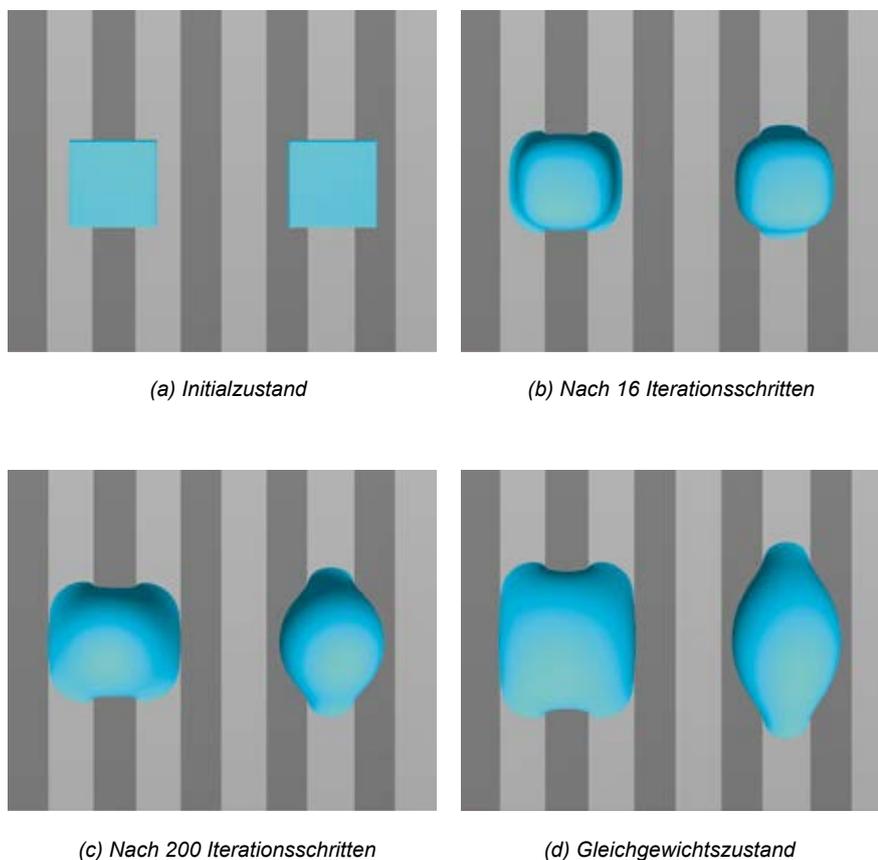


Abbildung 7: Zwei Tropfen mit einem Volumen von 40^3 Zellen. Der linke ist mittig auf einem hydrophoben Streifen platziert und der rechte mittig auf einem hydrophilen Streifen. Die Breite der Streifen beträgt jeweils 15 Zellen. (d) zeigt den Gleichgewichtszustand.

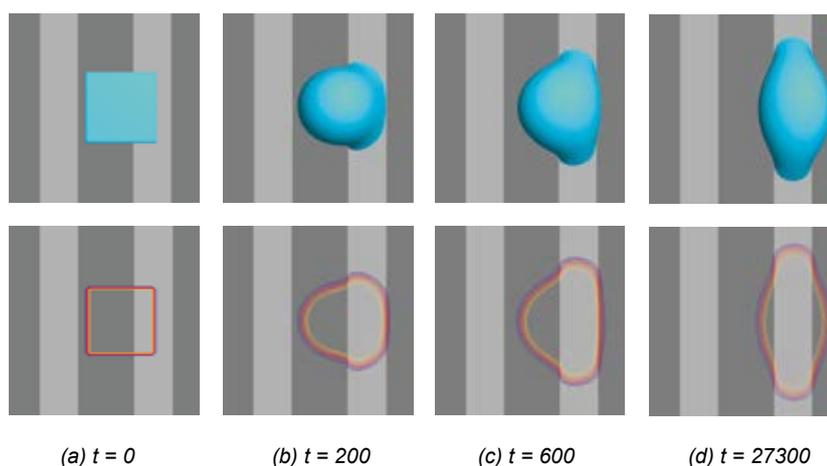


Abbildung 8: Positionierung zu 70% auf hydrophober und zu 30% auf hydrophiler Oberfläche. Das Tropfenvolumen beträgt 40^3 Zellen. Das Verhältnis der Streifenbreite orientiert sich an den Strukturen aus [Dup04] und beträgt 26 Zellen für die hydrophilen Streifen (hellgrau) und 38 Zellen für die hydrophoben Streifen (dunkelgrau). (d) ist der Gleichgewichtszustand. Die Zeit t ist in Iterationsschritten angegeben.

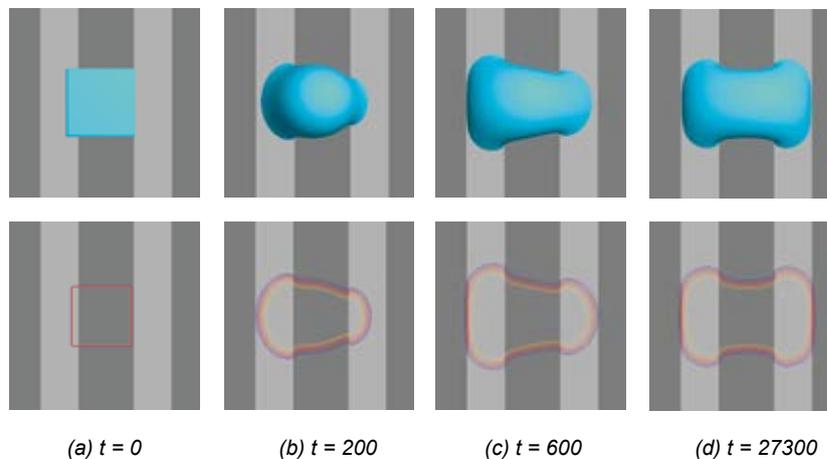


Abbildung 9: Positionierung zu 85% auf hydrophober und zu 15% auf hydrophiler Oberfläche. Das Tropfenvolumen beträgt 40^3 Zellen. Das Verhältnis der Streifenbreite orientiert sich an den Strukturen aus [Dup04] und beträgt 26 Zellen für die hydrophilen Streifen (hellgrau) und 38 Zellen für die hydrophoben Streifen (dunkelgrau). (d) ist der Gleichgewichtszustand. Die Zeit t ist in Iterationsschritten angegeben.

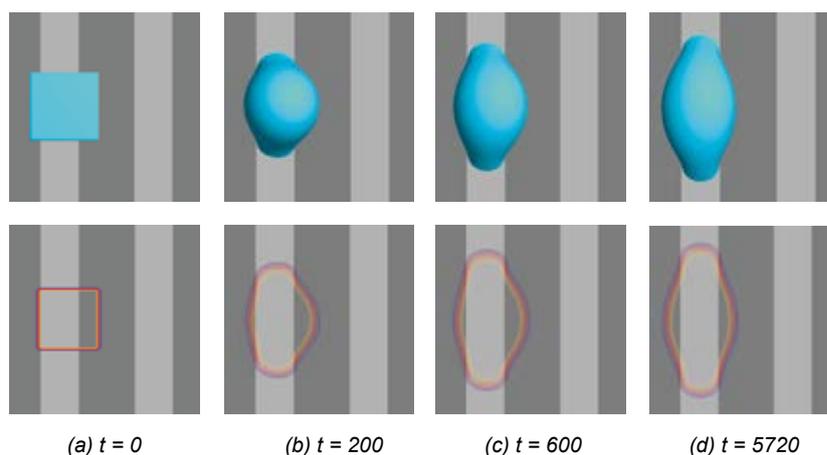


Abbildung 10: Positionierung zu 40% auf hydrophober und zu 60% auf hydrophiler Oberfläche. Das Tropfenvolumen beträgt 40^3 Zellen. Das Verhältnis der Streifenbreite orientiert sich an den Strukturen aus [Dup04] und beträgt 26 Zellen für die hydrophilen Streifen (hellgrau) und 38 Zellen für die hydrophoben Streifen (dunkelgrau). (d) ist der Gleichgewichtszustand. Die Zeit t ist in Iterationsschritten angegeben.

Abbildung 10 zeigt ebenfalls das gleiche Initialvolumen mit ca. 60% Auflagefläche auf dem hydrophilen Substrat. Wie erwartet, benetzt der Tropfen im stationären Zustand maßgeblich die hellgraue Fläche. Die Gleichgewichtszustände der beiden Simulationen aus Abbildung 8 und 10 sind trotz der unterschiedlichen Positionierung zu Beginn der Simulation identisch. Offensichtlich gibt es nur zwei energetisch optimale Zustände in Abhängigkeit der Anfangsposition, wobei eine größere Affinität zum hydrophilen Substrat hin herrscht. Diese Ergebnisse stimmen ebenfalls mit denen aus [Dup04, Leo03] überein.

4 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte Phasenfeldmodell mit zugehöriger Benetzungsrandbedingung das Benetzungsverhalten von Wassertropfen auf chemisch strukturierten Oberflächen sehr gut reflektieren kann. Der Homogenisierungseffekt, der von A. Marmur [Mar09a] beobachtet wurde, konnte anhand der Phasenfeldsimulationen auch erzielt werden. Darüber hinaus wurde das Benetzungsverhalten von Tropfen, die in etwa die gleiche Größenordnung der chemischen Struktur aufweisen, analysiert. Die erzielten Ergebnisse haben eine sehr gute Übereinstimmung mit den Resultaten anderer Arbeiten geliefert. Als nächstes ist es von großem Interesse sowohl die Verdampfung als auch die Kondensation von Tropfen auf chemisch heterogenen Oberflächen zu untersuchen. Dafür wird das Phasenfeldmodell um einen weiteren Beitrag erweitert, der diesen Prozess reflektiert. Da die Kontaktwinkelhysterese bei dem Vorgang eine wichtige Rolle spielt, wird diese in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt.

LITERATUR

- [1] [BS14] Ben Said, M., Selzer, M., Braun, D., Greiner, C., Nestler, B., and Garcke, H. A Phase-Field Approach for Wetting Phenomena of Multiphase Droplets on Solid Surfaces. *Langmuir*, 30(14):4033{4039, 2014.
- [2] [Cah77] Cahn, J. W. Critical Point Wetting. *Journal of Chemical Physics*, 66, 1977.
- [3] [Cas44] Cassie, A. B. D. and Baxter, S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, (40):546, 1944.
- [4] [Dup04] Dupuis, A. and Yeomans, J. M. Lattice Boltzmann modelling of droplets on chemically heterogeneous surfaces. *Future Generation Computer Systems*, (20):993{1001, 2004.
- [5] [Jac99] Jacqmin, D. Calculation of Two-Phase Navier{Stokes Flows Using Phase-Field Modeling. *Journal of Computational Physics*, (1):96{127, 1999+.
- [6] [Leo03] Leopoldes, J., Dupuis, A., Bucknall, D. G., and Yeomans, J. M. Jetting Micron-Scale Droplets onto Chemically Heterogeneous Surfaces. *Langmuir*, (19):9818{9822, 2003.

- [7] [Mar09a] Marmur, A. Solid-Surfaceby Wetting Characterization. Annual Review of Materials Research, 2009.
- [8] [Mar09b] Marmur, A. and Bittoun, E. When Wenzel and Cassie Are Right: Reconciling Local and Global Considerations. Langmuir, (25):1277 {1281, 2009.
- [9] [Nes08] Nestler, B., Wendler, F., Selzer, M., Stinner, B., and Garcke, H. Phase-eld model for multiphase systems with preserved volume fractions. Physical Review E, (78):011604, 2008.
- [10] [Wen36] Wenzel, R. N. Resistanve of Solid Surfaces to Wetting by Water. Industrial and Engineering Chemistry, 28(8):988{994, 1936.
- [11] [You05] Young, T. An Essay on the Cohesions of Fluids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, page 95, 1805.

Ressourceneffiziente Herstellung von Nd-Fe-B Hartmagneten aus Recyclingmaterial

Prof. Dr. Carlo Burkhardt,
Ohnmacht & Baumgärtner GmbH & Co. KG

„Der Nahe Osten hat sein Öl, China hat seine Seltenen Erden“, so der ehemalige chinesische Staatsführer und Wirtschaftsreformer Deng Xiaoping. Die politische Führung der Volksrepublik (VR) kam schon Ende der 1980er Jahre zu der Erkenntnis, dass diese sogenannten Seltenen Erden (SE) von strategischer Bedeutung sein könnten. Heute kommt tatsächlich kaum ein Wirtschaftszweig mehr ohne die als „Gold der Zukunft“ gehandelten Metalle aus und mit jedem High-Tech-Produkt, das weltweit neu auf den Markt kommt, steigt auch der Bedarf. Aus industriellen Fertigungsprozessen der Gegenwart und Zukunft sind die Rohstoffe damit ebenso wenig wegzudenken wie aus grünen Technologien.

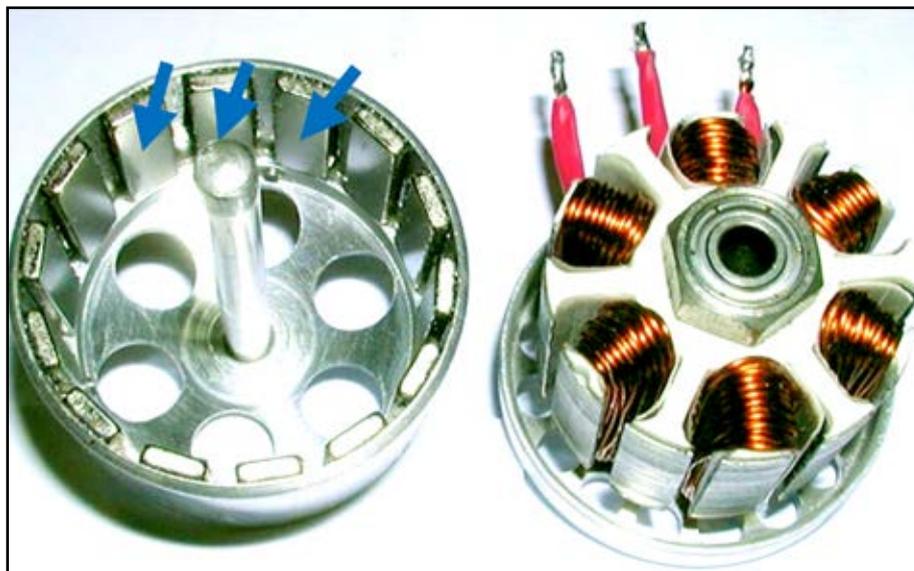


Abb. 1: Elektromotor mit Hartmagneten (Nd-Fe-B)¹ aus Seltenen Erden (blaue Pfeile)

Die Seltenen Erden spielen dabei nicht nur eine Schlüsselrolle für Deutschlands nationale Ziele hinsichtlich der Elektromobilität und einer erneuerbaren Energieversorgung; die gesamte europäische High-Tech-Industrie ist stark abhängig von der Rohstoffversorgung aus dem Reich der Mitte, das zur Zeit über 90% der Weltförderung übernimmt.

¹ Nd-Fe-B: Neodym-Eisen-Bor-Magnete, benannt nach ihren Hauptlegierungselementen

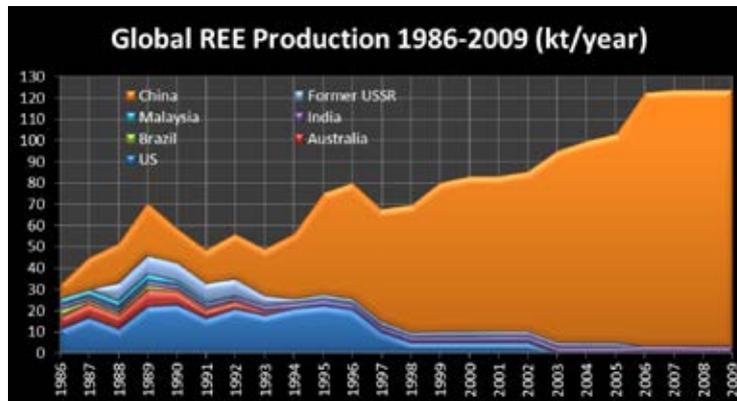


Abb. 2: Entwicklung der Produktion von Seltenen Erden² weltweit von 1986 bis 2009³

Der Markt für Seltene Erden war dabei in den vergangenen Jahren einzigartig turbulent. Insgesamt betrachtet sind die Preise der meisten der strategischen Metalle seit ihrem bisherigen Maximum in 2011 zwar deutlich zurückgegangen, doch erwarten z.B. amerikanische Marktanalysten durch ein Anwachsen des Markts für Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie alternative Energien, dass in zehn Jahren nur noch 40-60% des Bedarfs an Neodym gedeckt werden können, was mit hohen Preissteigerungen verbunden sein dürfte.⁴

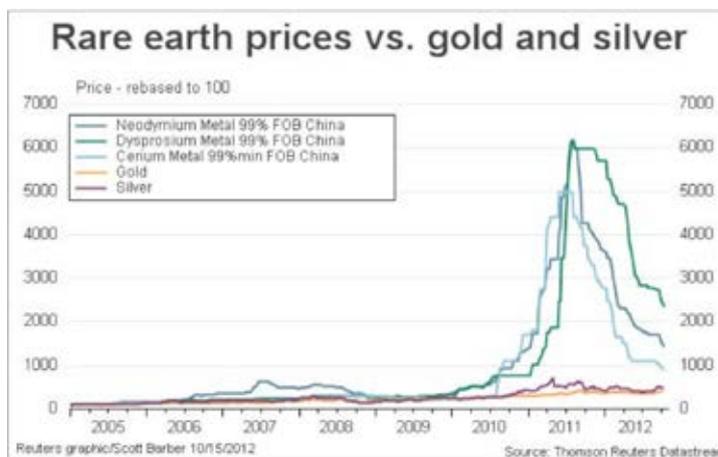


Abb. 3: Preisentwicklung von u.a. Neodym und Dysprosium von 2005 bis 2012 (bezogen auf einen Ausgangswert von 100% im Jahr 2005)⁵

² REE = Rare Earth Elements = Seltene Erden

³ <https://macromon.wordpress.com/2010/09/27/rare-earth-day/>

⁴ Alonso, E. et al.; *Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies*; Environmental science and technology (2013), **46**, 3406-3414.

⁵ Thomson Reuters Datastream; <http://alphanow.thomsonreuters.com>

Dazu kommt, dass die chinesische Regierung aus umweltpolitischen Gründen den Export der Seltenen Erden drosselt: Ihr Herauslösen aus den Erzen erfordert nicht nur aggressive und teils giftige Laugen- bzw. Säurebehandlungen, darüber hinaus liegen die Seltenerdmetalle im Erz in der Regel auch neben radioaktiven Elementen, wie Uran und Thorium, vor. Die Weiterverarbeitung, die mehrere Monate und über 1.000 chemische Behandlungen erfordern kann, produziert zudem toxischen Schlamm, der zum Eintrag von Schwermetallen, Sulfiden, Arsen und Fluoriden ins Grundwasser führt.

Mit der eingeschränkten Ausfuhr aus China und der weiteren Zunahme der weltweiten Nachfrage nach Seltenen Erden steht deshalb die Industrie unter Zugzwang, Möglichkeiten ausfindig zu machen, um Rohstoffengpässe zu vermeiden, da sich sonst in Europa bis 2030 der Bedarf nicht mehr decken lässt. Dabei ist die Suche nach Ersatzstoffen bislang wenig von Erfolg gekrönt: Die amerikanische Yale Universität kam in einer Studie Ende 2013 zu dem Schluss, dass durch Ersatzwerkstoffe meist nicht die gleichen Eigenschaften und eine vergleichbare Leistung erbracht werden können, wie mit dem Originalrohstoff⁶. Darüber hinaus seien die substituierten Stoffe kommerziell und wirtschaftlich nicht im gleichen Maßstab vertretbar wie ihre Vorgänger.



Abb. 4: Moderne, getriebelose Windturbinen benötigen ca. 600 kg/MW Magnete auf Basis Seltener Erden

Neue Hoffnung wird daher auf die Erschließung weiterer Vorkommen und die Wiedereröffnung ehemaliger, noch nicht gänzlich ausgebeuteter Minen gesetzt. Dies wird jedoch ebenfalls kritisch betrachtet, könnten doch die derzeit geringeren Rohstoffpreise im Vergleich zu 2011 in einem kontrollierten Markt auch ein strategisches Mittel sein, um einen wirtschaftlichen Erfolg dieser Anstrengungen zu unterbinden. Aus diesem Grund richtet sich der Blick auch immer stärker auf innovative Recyclingverfahren.

⁶ **Graedel, T.E. et al**; *On the materials basis of modern society*; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America; vol. 112 no. 20 (2013)

DAS PROJEKT REProMag

100% abfallfreie Herstellung von komplex geformten Seltene-Erd-Magneten (Nd-Fe-B) in einem geschlossenen Materialkreislauf

Bei einer weltweit stark steigenden Nachfrage nach Seltenen Erden ist die Verringerung der heute vorhandenen Rohstoffabhängigkeit, die die europäische Wettbewerbsfähigkeit z.B. in der Elektromobilität oder Energieerzeugung gefährden kann, eine der Schlüsselstrategien der Europäischen Union.

Ein möglicher Ansatzpunkt ist dabei das sogenannte „Urban Mining“, das sich zum Ziel gesetzt hat, „anthropogene“ (also menschengemachte) Lagerstätten wie z.B. Elektroaltgeräte auf ihren Rohstoffgehalt zu bewerten, auf ihre Verwertungstauglichkeit zu untersuchen und die darin enthaltenen Sekundärrohstoffe ggf. wieder dem Materialkreislauf zuzuführen.

Bezüglich der für Permanentmagnete relevanten Seltenen Erden könnten heute schon bei entsprechend vorhandenen wirtschaftlichen Methoden erhebliche Mengen wiederverwertet werden: Allein in Deutschland sind in Kraftfahrzeugen, Computern und Industrieelektromotoren mehr als 500 Tonnen Nd-Fe-B Magnetmaterial verfügbar⁷, mit der Verbreitung von Hybridfahrzeugen und getriebelosen Windkraftanlagen werden diese Mengen weiter zunehmen und könnten am Lebensende dieser Produkte ebenfalls einem Recyclingkreislauf zur Verfügung stehen.



Abb. 5: Magnetabfall aus Computerfestplatten

⁷ Prof. Dr. Ralf Wehrspohn; *Kritikalität Seltener Erden*; Fraunhofer Industrieworkshop „Magnetwerkstoffe“; Bremen, (2015), F. Meyer; *Recycling von Nd aus Nd-Fe-B Magneten in Elektroaltgeräten*; Bachelorarbeit HS Hamburg (2012) M. Buchert; *Untersuchungen zu seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg* (2013)

Ausgehend von dieser Situation entwickelt das REProMag⁸-Konsortium, das aus 14 Partnern 5 europäischer Länder besteht und zu 100% vom Europäischen Forschungsprogramm HORIZON 2020 gefördert wird, einen neuen Herstellungsprozess, der auf recyceltem Nd-Fe-B aus z.B. Computerfestplatten oder ausgedienten Elektromotoren basiert und der es ermöglichen soll, Hochleistungsmagnete selbst in komplizierten Geometrien in einem geschlossenen Materialkreislauf völlig abfallfrei herzustellen.

DAS SDS-VERFAHREN

Dieses SDS Verfahren (englisch für *Shaping, Debinding and Sintering*) basiert in Grundzügen auf dem Metallpulverspritzgussprozess⁹, bei dem Metallpulver mit einer organischen Binderrezeptur versetzt wird und so in hohen Stückzahlen weitestgehend automatisiert im Spritzgussverfahren zu komplexen Geometrien verarbeitet werden kann. Die so entstandenen Formteile (Grünlinge) werden anschließend wieder von ihren Binderkomponenten befreit und in einem Sinterprozess in ein nahezu dichtes, metallisches Formteil überführt.

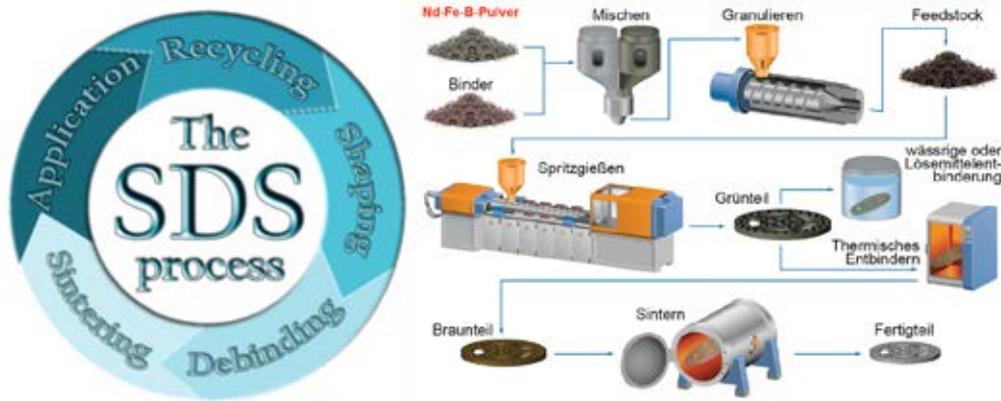


Abb. 6: Der SDS Prozess (schematisch)

Der im REProMag-Projekt entwickelte Prozess benutzt allerdings zu 100% recyceltes Pulver und zusätzlich zum Spritzgussverfahren ist für kleinere Stückzahlen und Prototypen die Möglichkeit der additiven Fertigung¹⁰ von Grünlingsbauteilen als Formgebungsverfahren mit berücksichtigt.

⁸ REProMag = Resource Efficient Production of Magnets = ressourceneffiziente Herstellung von Magneten

⁹ C. Burkhardt; *Metallpulverspritzguss*; Die Bibliothek der Technik, Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München (2013), ISBN 978-3-86236-056-7

¹⁰ auch „generative Fertigung“ oder „3D-Druck“ genannt

Pulverherstellung/Magnetrecycling

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Seltene Erden wie z.B. Neodym (Nd) zu recyceln. Methoden wie Elektroslag-Refining, die Saguchi-Methode oder das Schmelzspinnen sind allerdings nur für Produktionsabfälle geeignet, die direkt bei der Magnetherstellung anfallen. Die Extraktion durch flüssige Metalle oder eine selektive Chlorierung sowie andere chemische Verfahren erzielen zwar hochreine Recyclingprodukte, sind aber teuer und deshalb, wo überhaupt großserientechnisch umsetzbar, derzeit nicht wirtschaftlich. Das innovative SDS Verfahren basiert jedoch nicht auf der Wiederverwendung von separiertem Neodym, sondern setzt auf der Verwertung des ungetrennten Magnetpulvers auf, das in erster Linie aus den Bestandteilen Neodym, Eisen und Bor besteht.

Grundlage hierfür ist die hohe Reaktivität von Neodym mit Wasserstoff (H₂).

Nd-Fe-B Magnete metallurgisch betrachtet aus 3 Hauptphasen: Einer Nd₂Fe₁₄B Phase („hartmagnetische Phase“), die für die hohe Sättigungsmagnetisierung und Remanenz des Werkstoffs verantwortlich ist, einer Nd_{1+ε}Fe₄B₄ Phase, die verhindert, dass freies Eisen im Werkstoff die magnetischen Eigenschaften verschlechtert, sowie einer Nd-reichen Phase, die sich während des Sinterprozesses als Flüssigphase an den Korngrenzen anlagert und sowohl für eine hohe Sinterdichte sorgt als auch Korngrößenwachstum verhindert und somit für die herausragenden magnetischen Eigenschaften von Nd-Fe-B-Magneten sorgt. Eine Auslagerung von Nd-Fe-B Magneten in Wasserstoff wiederum sorgt dafür, dass sich die Nd-reiche Phase zersetzt und ein Nd-Hydrid bildet, wie in Abb. 7 schematisch dargestellt.

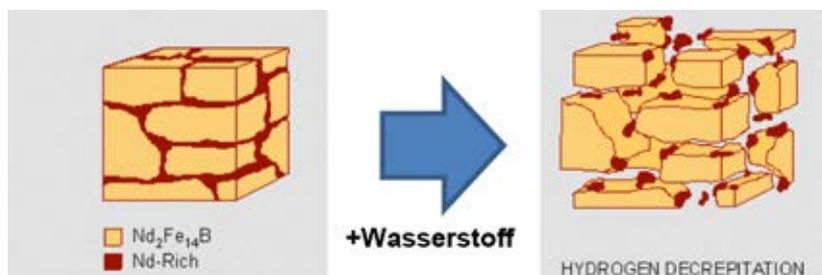


Abb. 7: Zersetzung von Nd-Fe-B Magneten in Wasserstoffatmosphäre (schematisch)¹¹

¹¹ A.J. Williams; *PhD Thesis*; Dept. of Met. And Mat., The University of Birmingham (1994)

Ist dieser Effekt im Betrieb des Magneten unerwünscht, da er zu dessen Zerstörung führt, so wird Wasserstoff allerdings zum Grobmahlen des Nd-Fe-B-Pulvers im Rahmen der Magnetherstellung schon seit langer Zeit benutzt (HD- oder Hydrogen Decrepitation Process). Beim SDS Verfahren erleichtert die hohe Reaktivität von Nd in Bezug auf Wasserstoff das Recycling von Nd-Fe-B Magneten ebenfalls auf fast magische Weise: Setzt man z.B. eine Computerfestplatte in einem geschlossenen Reaktor einer Wasserstoffatmosphäre aus und bewegt diese dabei beispielsweise in einer sich langsam drehenden Trommel, so kann nach kurzer Zeit das Nd-Fe-B Pulver in hydridierter Form, am Reaktorboden aufgefangen und - nach Abpumpen des Wasserstoffs - entnommen werden, wie in Abb. 8 illustriert.



Abb. 8 links: Computerfestplatte mit Nd-Fe-B-Magnet (roter Kreis),
rechts: Magnet nach Wasserstoffbehandlung

Nachdem etwaige Korrosionsbeschichtungen wie z.B. galvanisch aufgebraachte Nickelschichten mechanisch abgesiebt wurden, kann das so gewonnene Pulver direkt für den SDS Prozess verwendet werden.

Feedstockherstellung/Formgebung

Um das recycelte Magnetpulver nun im SDS Prozess verarbeiten zu können, wird daraus ein Feedstock hergestellt. Hierzu wird das Pulver in der hydridierten Form mit einer Mischung aus Polymeren und Additiven z.B. in einem Knetmischer gemischt, siehe Abbildung 9.



Abb. 9 links: zur Illustration geöffneter Knetmischer, rechts: Endprodukt

Je nach Formgebungsmethode (Additive Fertigung oder Spritzguss) handelt es sich dabei um unterschiedliche Rezepturen, die auf das jeweilige Fertigungsverfahren abgestimmt sind.

Der große Vorteil des SDS Prozesses liegt darin, dass auf diese Weise kompliziert geformte Geometrien (z.B. mit Gewinden, Bohrungen, Kühlkanälen) oder komplizierte magnetische Ausrichtungen (z.B. Hallbach Arrays) ohne aufwendige Nacharbeit des extrem schwer zu zerspanenden Werkstoffs endkonturgetreu dargestellt werden können, wie dies heute nur von kunststoffgebundenen Magneten bekannt ist, die aber aufgrund ihres geringeren Magnetpulveranteils deutlich geringere Energieprodukte aufweisen.

Entbindern/Sintern

Zur Herstellung von rein metallischen Nd-Fe-B Magneten mit hoher magnetischer Leistung/hohem Energieprodukt werden im nächsten Prozessschritt die Binderkomponenten aus den Grünlingen entfernt. Dies geschieht bei der im SDS verwendeten Rezeptur in einer Kombination aus organischem Lösemittel (Hauptbinder) sowie einer thermischen Entbinderung (Restbinder/Backbone). Aufgrund der hohen Reaktivität des Neodyms, die sich nicht nur auf den bereits beschriebenen Wasserstoff, sondern ebenso auf die im Binder enthaltenen Kohlenstoff- und Sauerstoffbestandteile bezieht, ist die Auswahl eines geeigneten Restbinders sowie die Prozessführung während der Entbinderung ein wichtiger Schlüssel zu einer erfolgreichen Herstellung von SDS Magneten, da die Bildung von Nd-Oxiden bzw. Nd-Carbiden die magnetischen Eigenschaften von Nd-Fe-B Magneten signifikant verschlechtern.

Das Sintern der erfolgreich entbinderten Grünlinge ist vergleichbar zu heute bereits großserientechnisch hergestellten Presssintermagneten und stellt keine

besondere prozesstechnische Herausforderung dar.

Abb. 10 zeigt SDS Magnete aus Recyclingmaterial, deren Formgebung mittels Spritzgießen erfolgte. Derzeit werden im Projekt die Entbinderungs- und Sinterverfahren sowie die dazugehörigen Prozessparameter für die Fertigung isotroper und anisotroper Magnete entwickelt.



Abb. 10: Nd-Fe-B Magnete aus Recyclingmaterial, hergestellt im SDS Verfahren

DAS REProMag KONSORTIUM

Das für das REProMag Projekt zusammengestellte Konsortium besteht aus 14 Partnern aus 5 europäischen Ländern, davon sind 5 Partner Universitäten/Forschungseinrichtungen, 5 Partner KMU¹², 3 Partner sind Großunternehmen und 1 Partner ist Forschungsdienstleister. Das Konsortium wird geführt von der OBE Ohnmacht & Baumgärtner GmbH & Co. KG in Ispringen und ist so zusammengestellt, dass die gesamte Prozesskette des SDS Prozesses von der Gewinnung des Recyclingpulvers bis zur Herstellung von Demonstratorbauteilen abgebildet ist. Zum Nachweis der Ressourceneffizienz wird im Rahmen des Projekts außerdem ein Life-Cycle-Assessment (LCA) durchgeführt, das durch einen darauf spezialisierten Projektpartner durchgeführt wird.

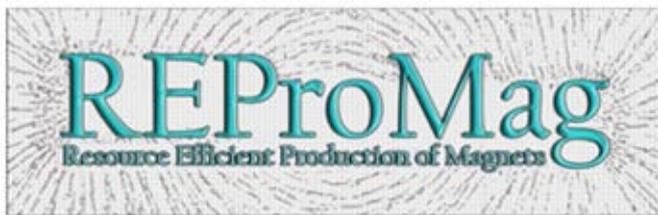
Die Projektpartner und ihre Rolle im Projekt sind in Abb. 11 dargestellt:

¹² KMU = Klein- und mittelständische Unternehmen

Recyclingprozess von NdFeB	UNIVERSITY OF BIRMINGHAM	TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology	dBe Präzision	IJS Ljubljana Slovenia
Feedstock-technologie	UNIVERSITY OF BIRMINGHAM	PT+A	fotec	dBe Präzision
Formgebung der Magnete	dBe Präzision	fotec	LITHOZ Manufacture the future	HVGE
Entbindern, Sintern, Prozesstechnik	dBe Präzision	UNIVERSITY OF BIRMINGHAM	fotec	PT+A
Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften	UNIVERSITY OF BIRMINGHAM	IJS Ljubljana Slovenia	NPL National Physical Laboratory	
Demonstrator-bauteile	SIEMENS	SENNHEISER The Pursuit of Perfect Sound	dBe Präzision	fotec
Life Cycle Assessment, ökologischer Fußabdruck	TEKS	dBe Präzision	STEINBEIS-EUROPA-ZENTRUM	European Energy Network

Abb. 11: REProMag Projektpartner

Das Projekt wird im Rahmen des Calls „Factory of the Future FoF02-2014- Manufacturing processes for complex structures and geometries with efficient use of material“ der Forschungsförderung HORIZON 2020 der Europäischen Kommission unter der Grant Agreement Nummer 636881 mit 5,7 Millionen Euro gefördert und hat eine Laufzeit vom 01.01.2015 bis zum 31.12.2017.



Weitere Infos finden sie auf der REProMag-Webseite unter www.repromag-project.eu

Einsatz von Laser- und Diffusionsschweißen zur Herstellung mikrostrukturierter Apparate

Dr. Thomas Gietzelt, Karlsruher Institut für Technologie
L. Eichhorn, Karlsruher Institut für Technologie
T. Wunsch, Karlsruher Institut für Technologie
V. Toth, Karlsruher Institut für Technologie
A. Hüll, Karlsruher Institut für Technologie

Mikroverfahrenstechnische Apparate werden aus Lagen mikrostrukturierter Bleche aufgebaut. Die Strukturierung erfolgt mittels Mikrozerspanung wie Fräsen oder Sägen oder in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe durch einen Lithografieprozess und chemisches Ätzen.

Die Lagen werden gestapelt und können entweder durch Laser- oder Diffusionschweißen verbunden werden. Während das Laserschweißen inzwischen weite Verbreitung in der Industrie gefunden hat, führt das Diffusionsschweißen ein Nischendasein: Aufgrund des hohen apparativen Aufwandes, des geringen Durchsatzes und der damit verbundenen hohen Kosten wird es nur für Spezialanwendungen eingesetzt. Die Verbindungsbildung findet meist ohne schmelzflüssige Phase bei ca. 80% der Schmelztemperatur des Werkstoffes unter Hochvakuum statt. Dabei müssen für jeden Werkstoff die Parameter Temperatur, Flächenpressung und Schweißdauer optimiert werden, um einerseits eine stoffschlüssige Verbindung, andererseits aber auch akzeptable Verformungswerte sicherzustellen. Im Idealfall entsteht ein monolithisches Bauteil bei dem die ehemalige Lagenstruktur nicht mehr erkennbar ist (Abb. 1) und dessen mechanische Werkstoffkennwerte dem Grundwerkstoff mit gleicher Wärmebehandlung entsprechen.

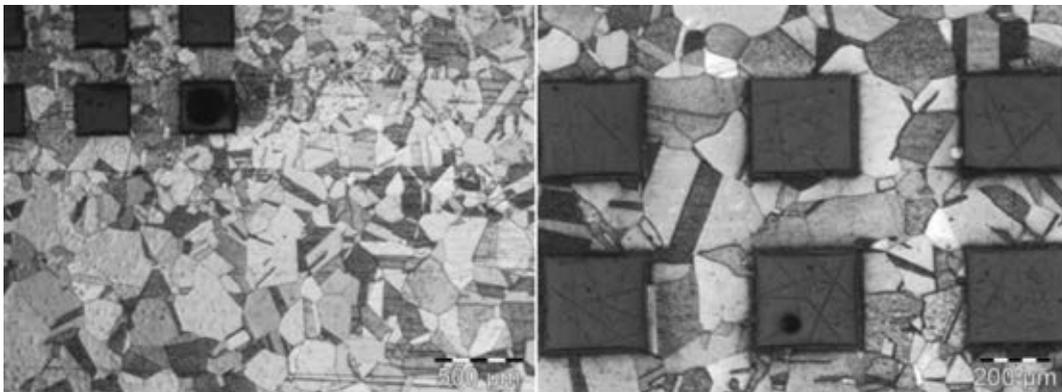


Abb. 1: Diffusionsgeschweißter mikroverfahrenstechnischer Apparat aus Kupfer

Ein unschätzbare Vorteil ist die Erzeugung vollflächiger Verbindungen auch innenliegender Strukturen. Damit wird die Passagentrennung, z.B. für Kühlzwecke, in mikroverfahrenstechnischen Apparaten möglich.

Beim cw-Laserschweißen entsteht ab einer Energiedichte von etwa 1 MW/cm^2 ein Metaldampfplasma, welches zum sogenannten Tiefschweißeffekt führt. Die Nahtgeometrie kann durch die Wahl der Parameter Leistung, Geschwindigkeit und

Fokuslage in weiten Grenzen variiert und so jedem Anwendungsfall angepasst werden. Bei Festkörperlasern ist das Ergebnis zudem abhängig vom Durchmesser des Lichtleitkabels: Für kleine Durchmesser und kurze Brennweiten ist der Einfluss des technologischen Parameters Fokuslage sehr stark.

Für das gepulste Laserschweißen sind die Auswahlmöglichkeiten an verschiedenen Parametern noch deutlich umfangreicher. Durch Anpassung des strecken-, aber auch des zeitabhängigen Energieeintrags kann die Nahtgeometrie sowie die thermische Belastung von Bauteilen gesteuert werden. Besonders filigrane Gehäusestrukturen werden vorzugsweise gepulst geschweißt.

Mittlerweile sind flexible und leistungsstarke Festkörperlaser verfügbar, die Aspektverhältnisse der Naht erzielen, die bisher dem Elektronenstrahlschweißen vorbehalten war, ohne den Nachteil des dafür erforderlichen Vakuums zu besitzen (Abb. 2).

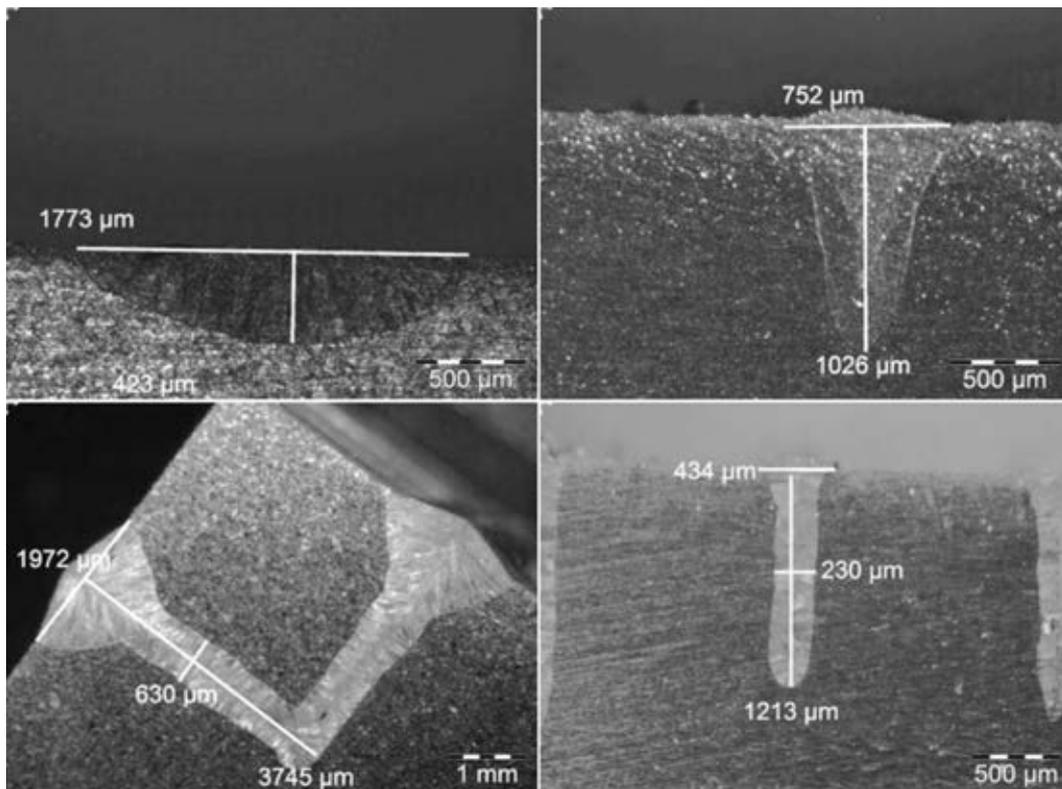


Abb. 2: Oben links: sehr flache und breite Naht. Oben rechts: Dreieckiger Nahtquerschnitt. Unten links: Tiefe und schmale Naht, Aufweitung an der Oberfläche durch beginnende Wärmeleitung aufgrund geringer Schweißgeschwindigkeit. Rechts unten: Sehr schmale Naht mit rechteckigem Querschnitt.

Mit der verwendeten Anlagenkonfiguration einer TruLaser Cell 3010 und einem TruDisk 3001 können bei 3 kW Leistung mit einem 100µm-Lichtleitkabel in Edelstahl Einschweißiefen von mehr als 5 mm bei einer Geschwindigkeit von 1 m/min erzielt werden. Für sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten bis zu einigen zehn Metern pro Minute geht der Einfluss der Wärmeleitung auf die Nahtgeometrie verloren und es entstehen auch an der Oberfläche sehr schmale Nähte.

Mit dem Laser können sehr feine Nähte mit eng begrenzter Wärmeeinflusszone erzeugt werden. So wurde in Abb. 3 ein Multilagenstapel aus mehreren hundert dünnen Blechen in drei Teilstapeln am Umfang verschweißt. Für den Erfolg ist auch die Abfolge der Schweißungen bedeutsam, da durch einen gewissen Nahtaufwurf an anderer Stelle Spalten zwischen den Einzelblechen durch die Schwindung entstehen.

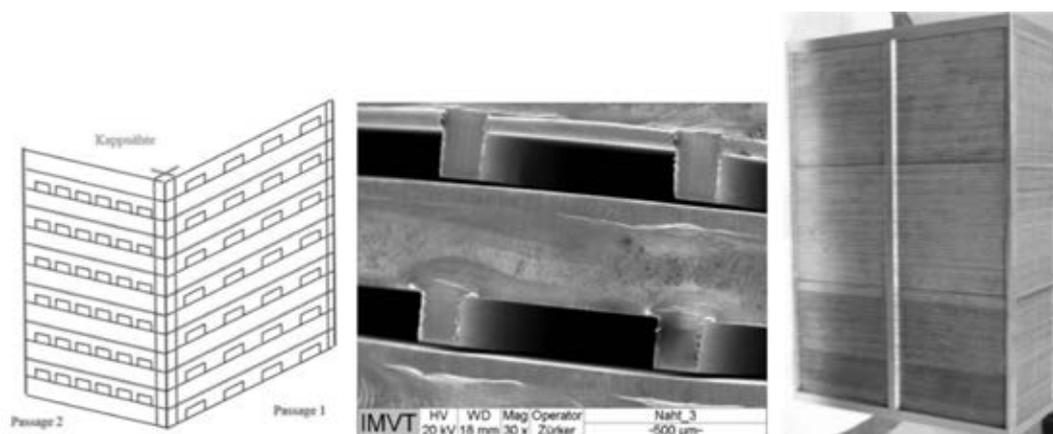


Abb. 3: Links: Prinzipieller Aufbau der Schweißungen. Mitte: Detail. Rechts: Lasergeschweißter Multilagenstapel, Blechdicken 0,63 bzw. 1mm (Reaktions- bzw. Kühlpassage, Restbodendicke je 0,5 mm, ca. 300 Bleche.

Generell ist die Spaltüberbrückbarkeit beim Laserschweißen schlecht, weshalb eine hohe Passgenauigkeit der Teile erforderlich ist. Beim Durchschweißen mehrerer Lagen muss großer Wert auf entsprechende Spannmittel gelegt werden, da Luftspalte den Wärmeübergang erheblich beeinträchtigen können (Abb. 4).

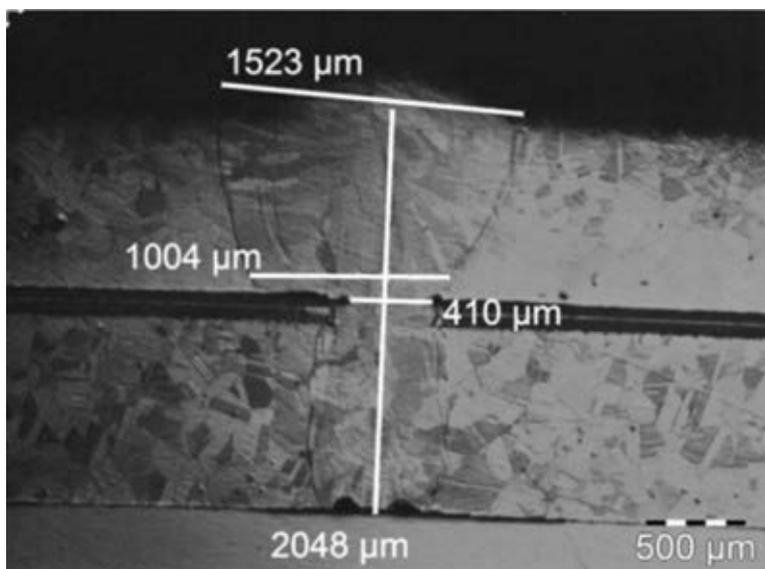


Abb. 4: Thermische Isolation bei der Durchschweißung mehrerer Lagen aufgrund von Spalt.

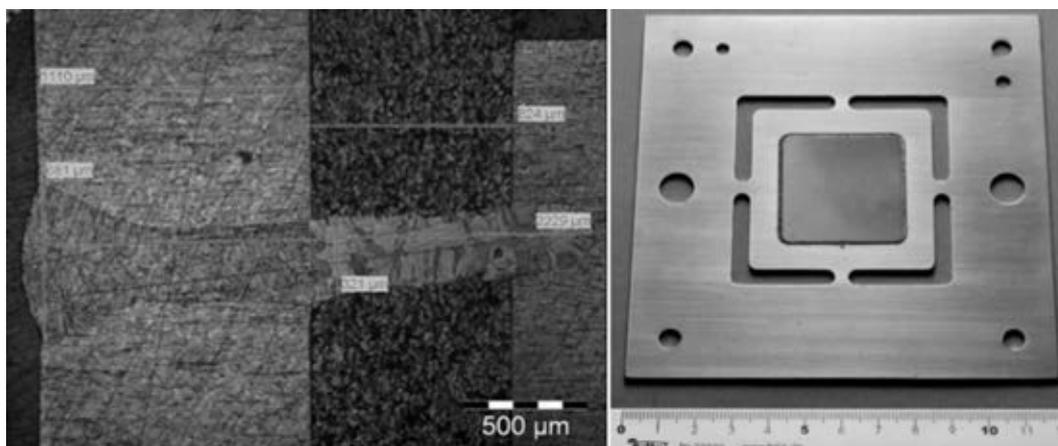


Abb. 5: Links: Integration poröser Sintermetallfritten mittels Durchschweißung. Rechts: Integration einer porösen Sintermetallfritte mit I-Stoß.

Auch Sintermetalle, die z. B. als Membranträger zur Gastrennung dienen, können gut integriert werden (Abb. 5). Zur Integration dünner Sintermetallfritten in Rahmenstrukturen mittels I-Stoß werden hingegen sehr breite aber flache Nahtquerschnitte benötigt.

Bei guter Anlage können aber auch sehr dünne metallische Membranen integriert werden (Abb. 5). In der linken Abbildung wurden ferritische und austenitische Edelstähle gemischt verwendet, was zu Rissbildung führte und die Anbindung der

Pd-Membran komplett verhindert. Rechts wurde ein vollständig austenitischer Aufbau verwendet. Die Pd-Membran wird gut angebunden und die Schweißnaht ist rissfrei.

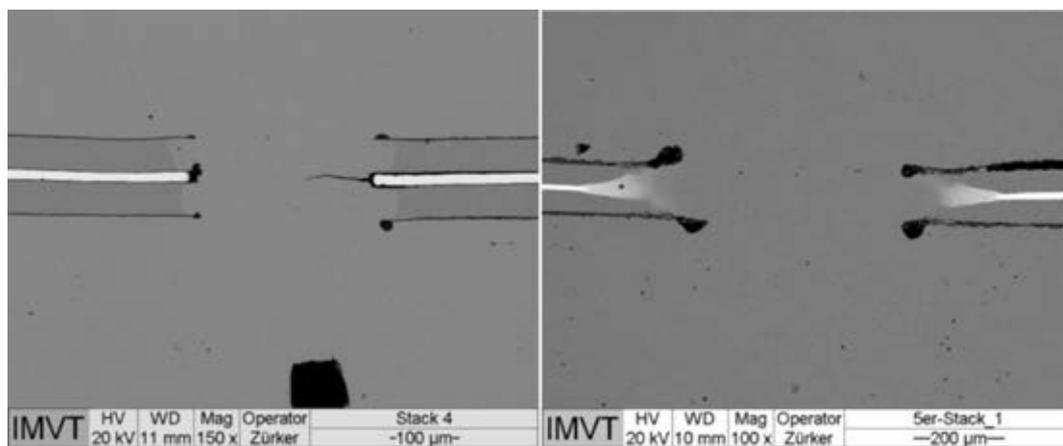


Abb. 6: Integration einer dünnen Palladiummembran mit Stützsieben.

Selektives Laserschmelzen – 3D-Druck in Metall

Dr.-Ing. Sven Donisi, Rosswag GmbH

Zusammenfassung

Die Öffentlichkeit wird weltweit immer mehr mit dem Begriff 3D-Druck konfrontiert. Gemeint ist hierbei meist die Herstellung von Anschauungsmodellen und Prototypen aus Kunststoff. Doch abseits dieses Teilbereichs der *Generativen Fertigung*, ist das *Selektive Laserschmelzen* als eines der innovativsten Fertigungsverfahren zu nennen. Hierbei entstehen mithilfe eines Lasers und Metallpulver Bauteile, welche sich durch komplexe, endkonturnahe Geometrien und gute Materialeigenschaften auszeichnen. Typische Anwendungsfelder für diese Bauteile sind im *Rapid Prototyping*, *Rapid Tooling* und *Rapid Manufacturing*, bei der Herstellung von Einzelteilen und Kleinserien, zu nennen.

Bei der Anwendung des generativen Fertigungsverfahrens *Selektives Laserschmelzen* ist jedoch die ganzheitliche Prozesskette zu beachten. Zu beginnen ist hierbei schon mit der Konstruktionsanpassung bestehender Bauteile bezüglich generativen Designrichtlinien oder Neukonstruktion von topologie-, leichtbau- und kühlungsoptimierten Bauteilen. Weiterhin sind auch konventionelle Prozessschritte, wie Wärmebehandlungen und spanende Fertigungsverfahren, bei der Planung der Fertigungskette generativer Bauteile zu berücksichtigen. Abschließend sind zum Teil neuartige Mess- und Prüfverfahren zur Sicherstellung der Bauteilqualität zu verwenden.

Die Betrachtung der gesamten Prozesskette – von der Metallpulverqualifizierung bis hin zur Bauteilerprobung – ist ein notwendiger Bestandteil bei der Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile in Serienqualität mittels des generativen Fertigungsverfahrens *Selektives Laserschmelzen*.

Generative Fertigung

Die Besonderheit der generativen Fertigungsverfahren liegt in dem *Schichtbauprinzip*, wobei das dreidimensionale CAD-Modell des zu erzeugenden Bauteils im Vorfeld des eigentlichen Fertigungsprozesses in fiktive, zweidimensionale Schichten zerlegt wird. Durch den automatisierten, schichtweisen Aufbau entsteht anschließend der gewünschte Körper. Die dabei entstehenden Stufen sind abhängig

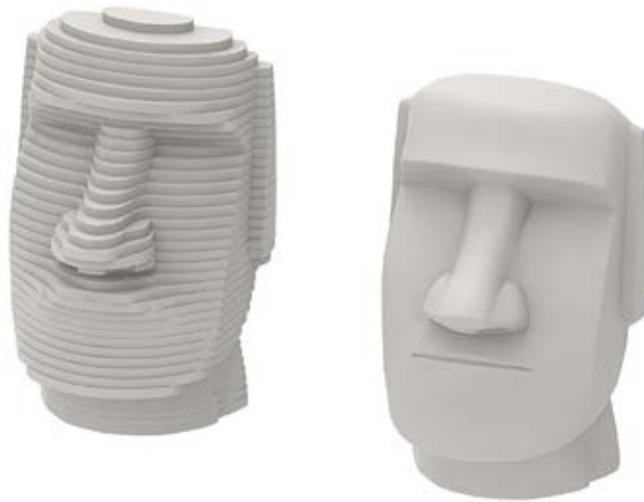


Abbildung 1 - Stark abstrahierte Darstellung der Schichtbauweise

von der Schichtdicke, die meist verfahrensbedingt vorgegeben ist. Diese Schichtbauweise unterscheidet die generativen von den konventionellen Fertigungsverfahren, bei welchen das Bauteil durch die Zerspanung von Halbzeugen (Drehen, Fräsen), das Umformen von Volumen (Schmieden, Tiefziehen) oder das Verwenden von Formen (Gießen, Sintern) hergestellt wird.

Bei der Schichtbauweise entfällt die Herstellung von Formen und Werkzeugen für den Fertigungsprozess nahezu vollständig. Zusätzlich sind mit den generativen Fertigungsverfahren nur sehr geringe Aufmaße auf die Fertigteilkontur für eine eventuelle, nachfolgende Bearbeitung notwendig, was eine verbesserte Rohstoffausnutzung zur Folge hat.

Die Anfänge der generativen Fertigungsverfahren basieren auf der Herstellung von Kunststoffprototypen, beispielsweise mithilfe der *Stereolithographie*. Diese bilden zwar die geometrischen Eigenschaften des Fertigteils ab, jedoch erreichen sie materialbedingt nicht die benötigten Festigkeitswerte. Der Vorteil besteht hierbei in der schnellen und kostengünstigen Produktion von Konzept- oder Designmodellen direkt nach der Ideenphase des Produktentstehungsprozesses. Aus dem sogenannten *Rapid Prototyping* entwickelte sich das *Rapid Manufacturing* und *Rapid Tooling*, wobei Bauteile und Werkzeuge aus metallischen Werkstoffen direkt oder nach geringfügiger Nacharbeit für ihren Einsatzzweck geeignet sind. Damit können nun Einzelteile und kleine Serien direkt nach der Konstruktionsphase produziert werden. Die Planung der Fertigung entfällt dadurch nahezu vollständig und

der Produktenstehungsprozess wird stark verkürzt. Speziell bei komplexen Geometrien können die generativen Fertigungsverfahren ihr wirtschaftliches und technisches Potenzial nutzen und durch den minimalen Materialeinsatz konventionelle Fertigungsverfahren verdrängen.

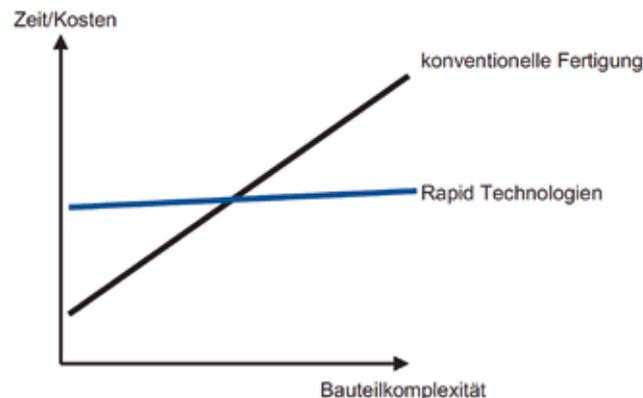


Abbildung 2 - Abhängigkeit des Fertigungsaufwands von der Bauteilkomplexität
Quelle: Zäh, Michael: *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien: Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. Hanser Verlag München, 2006

Selektives Laserschmelzen

Grundlagen

Das *Selektive Laserschmelzen* ist auch unter der Bezeichnung *Laserstrahlschmelzen* (englisch *Selective Laser Melting (SLM)*) bekannt, welche von den Entwicklern dieser generativen Technologie bereits Ende des 20. Jahrhunderts geprägt wurde. Die von den Firmen *SLM Solutions* und *Realizer* hergestellten Anlagen basieren auf der Grundlagenforschung von Dr. Matthias Fockele und Dr. Dieter Schwarze in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) in Aachen. Daneben werden die für das Fertigungsverfahren geeigneten Maschinen auch unter der Technologiebezeichnung *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* von dem derzeitigen Marktführer *EOS* sowie *LaserCUSING* von der Firma *Concept Laser* vertrieben.

Anlagenaufbau

Anlagen für das *Selektive Laserschmelzen* sind, wie in Abbildung 3 zu sehen, in zwei Hauptbestandteile zu unterteilen. Es handelt sich zum einen um die Belichtungseinheit und zum anderen um das Beschichtungssystem zur schichtweisen Befüllung des Bauraums mit Pulvermaterial. In diesem Bauraum werden die entstehenden Bauteile generativ aufgebaut.

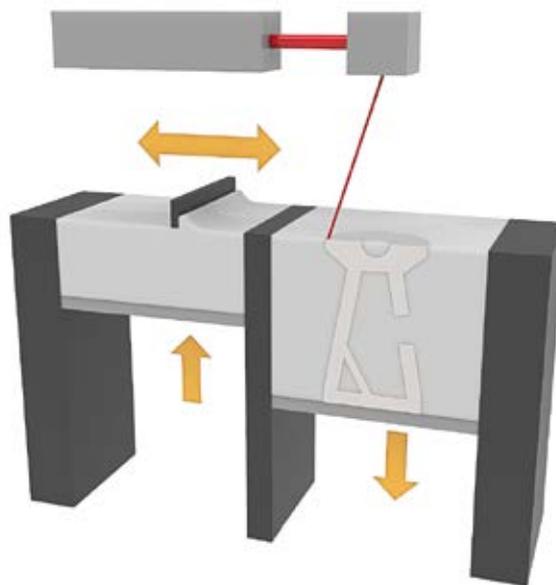


Abbildung 3 - Generalisierter Aufbau einer Anlage für das Selektive Laserschmelzen

Während des Herstellungsprozesses sind diese beiden Komponenten wechselseitig im Einsatz, wobei die Belichtungseinheit zur lokalen Aufschmelzung des Pulverbetts und der Beschichter zum Aufbringen einer neuen Pulverschicht dient. Im Bauraum der Anlage wird durch ein Spannsystem eine Bauplatte aus Stahl fixiert, welche den Nullpunkt der z-Achse definiert. Mit dieser Bauplatte werden zu Beginn des Prozesses die ersten Schichten des zu erstellenden Bauteils durch Mikroschweißprozesse verbunden. Die Bauplatte wird nach jeder Belichtungsphase in der gewünschten Schichtstärke abgesenkt (i.d.R. 20 bis 100 μm), um mithilfe des Beschichters eine neue Pulverschicht aufzubringen und zu nivellieren. Auf diese Weise findet der Schmelzprozess immer in der gleichen Ebene statt, wodurch das Belichtungssystem an einer definierten Position starr befestigt werden kann. Dadurch wird eine hohe Wiederholgenauigkeit während des Schmelzprozesses gewährleistet. Um das Pulverbett im Bauraum stetig mit einer konstanten Menge Pulvermaterial zu versorgen, wird der pulvergefüllte Vorratsbehälter nach jedem

Prozessschritt angehoben. Das somit zur Verfügung gestellte Pulver wird mithilfe des Beschichters zum Bauraum transportiert. Dabei wird generell eine Überdosierung des Pulvermaterials vorgenommen, um eine geschlossene und gleichmäßige Pulverschicht gewährleisten zu können. Überschüssiges Pulver wird durch den Beschichter abgestreift und in einem Überlaufbehälter gesammelt. Dieses Pulver kann nach einem Siebprozess annähernd zu 100% wiederverwendet werden.

Der Laserschmelzprozess

Dem generativen Aufbau von Bauteilen durch Mikroschweißverfahren liegt ein Prozess zugrunde, bei welchem die Energie des Laserstrahls in das Pulvermaterial eingekoppelt und damit der Schmelzprozess eingeleitet wird. Um eine kontrollierte und definierte Energieeinkopplung zu gewährleisten ist es wichtig, die Wechselwirkungsprozesse zwischen Laserstrahlung und Werkstoff hinreichend zu beherrschen. Eine zu niedrige Laserintensität und zu geringe Einwirkzeit führt lediglich zur Erwärmung und partiellen Verschweißung des Metallpulvers, während eine hohe Intensität und zu lange Einwirkzeit zur Plasmabildung und zum Verdampfen des Materials führen können. Die Parameter, die durch den materialspezifischen Energieabsorptionsgrad, die Wärmeleitfähigkeit und die Schmelztemperatur des Metallpulvers definiert werden, sind deshalb in einem sehr schmalen Bereich festzulegen. Durch die darauf abgestimmte Geschwindigkeit, mit welcher der Laserstrahl über das Pulverbett gelenkt wird, entsteht ein geschlossenes Schmelzbad der Pulverpartikel. In der Folge kann eine physikalische Bauteildichte von annähernd 100 % realisiert werden. Dabei bleibt die Masse des Pulvermaterials im Verlauf des Schmelzprozesses erhalten. In Abbildung 4 werden die verschiedenen Phasen des Schmelz- und Erstarrungsprozesses dargestellt.

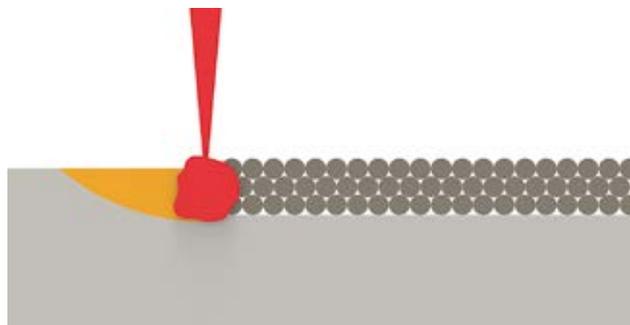


Abbildung 4 - Phasen des Schmelzprozesses

Verwendbare Werkstoffe

Für das *Selektive Laserschmelzen* eignen sich durch das angewendete Prinzip der Mikroschweißprozesse prinzipiell alle schweißbaren metallischen Werkstoffe. Folgende Werkstoffe werden hauptsächlich zur generativen Fertigung von metallischen Bauteilen im industriellen Einsatz verwendet:

- Edelstahl
- Werkzeugstahl
- Aluminium und Aluminiumlegierungen
- Titan und Titanlegierungen
- Bronzelegierungen
- Edelmetalllegierungen
- Nickelbasislegierungen
- Kupferlegierungen

Für den Einsatz beim *Selektiven Laserschmelzen* muss das zu verwendende Material zwingend im pulverförmigen Zustand mit einer gleichmäßigen Körnung je nach Materialtyp in einer Größenordnung von 10 bis 63 µm vorliegen. Nur so ist die Erzeugung der dünnen Schichten und die lokale Aufschmelzung hinreichend genau zu beherrschen. Um den metallischen Grundwerkstoff nun in diese Form zu bekommen, wird ein Verfahren angewendet, bei welchem das Material zuerst aufgeschmolzen wird, um es anschließend durch das Verdüsen mit Inertgas zu pulverisieren.

Konstruktive Restriktionen

Einige der in den vorherigen Abschnitten genannten Aspekte führen zu Restriktionen, die bei der Konstruktion und Materialauswahl der Bauteile und der Planung des generativen Fertigungsprozesses beachtet werden müssen. Zunächst beschränkt die Größe der Bauplatte beziehungsweise der zur Verfügung stehende Bauraum die maximale Bauteilgröße, wobei mehrere identische oder verschiedene kleinere Bauteile auf einer Bauplatte angeordnet werden können. Desweiteren müssen die Bauteile fest mit der Bauplatte verbunden sein, damit die entstehenden Eigenspannungen nicht zur Verformung des Bauteils führen. Ein weiteres Kriterium ist das Pulverbett, welches keine ausreichende Stabilität bietet, um die

thermischen Belastungen und Kräfte, die durch Aufschmelzen der Pulverpartikel entstehen, in einer geeigneten Form aufnehmen zu können. Maßabweichungen und Verformungen sowie unerwünschte Pulveranhaftungen außerhalb des tolerierbaren Bereichs bei dem zu fertigenden Bauteil wären die Konsequenz. Um Bauteile mit einer kleinen Auflagefläche auf der Bauplattform mithilfe des Selektiven Laserschmelzens fertigen zu können, wird auf die Verwendung von Stützstrukturen zurückgegriffen (siehe Abbildung 5). Dabei werden parallel zum eigentlichen Bauteil filigrane, wabenförmige Strukturen aufgebaut, welche die darüberliegenden Pulverschichten während des Schmelzprozesses stabilisieren. Diese Stützstrukturen verwendet man außerdem, um querschnittsvergrößernde Überhänge ab etwa 45° Baurichtung zu fertigen, die durch den Stufeneffekt und die mangelhafte Stützwirkung des Pulverbetts im Randbereich zu einem fehlerhaften Aufbau neigen. Die während des Laserstrahlschmelzprozesses entstandenen Stützstrukturen sind über feine Gittermuster partiell mit dem zu fertigenden Bauteil verbunden und werden im Rahmen einer mechanischen Nacharbeit von diesem abgetrennt.

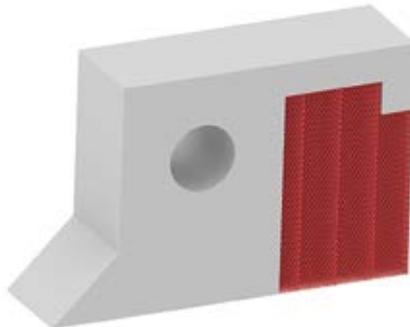


Abbildung 5 - Bauteil mit Stützstruktur

Prozesskette Selektives Laserschmelzen

Die Prozesskette *Selektives Laserschmelzen* startet bei der digitalen CAD-Konstruktion der zu fertigenden Bauteile und dem Export im STL-Format. Hierbei sollten die Möglichkeiten und Einschränkungen des generativen Fertigungsverfahrens beachtet werden. Anschließend werden mittels einer dafür geeigneten Software die Bauteile in die einzelnen Schichten (engl. Slices) zerlegt, um die benötigten Geometriedaten für den Bauprozess bereitzustellen. Die vorrangig dafür genutzte Software ist *Magics* von der Firma *Materialise*, welche mithilfe zusätzlicher Plug-ins für alle gängigen Anlagen die CAD-Daten aufbereiten kann. Diese Software lässt sich auch mit weiteren Modulen erweitern, um das Bauteil beispielsweise mit den

notwendigen Stützstrukturen auszustatten. Im Vorfeld des Bauprozesses könnten die entstehenden Geometriedaten zusätzlich mithilfe einer geeigneten Softwarelösung auf Bauteilablösungen aufgrund von thermisch induzierten Eigenspannungen untersucht werden. Basierend auf dem so entstehenden Schichtdatensatz wird der automatisierte Fertigungsprozess gestartet, der je nach Bauteilgröße und Anzahl der zu fertigenden Bauteile mehrere Stunden in Anspruch nimmt. Die Baurate für den Materialauftrag der Bauteile beträgt dabei je nach verwendeten Prozessparametern und Werkstoffen bei aktuellen Anlagen zwischen 8 und 35 cm³/h. Im Anschluss daran werden die Bauteile aus dem Pulverbett entpackt und das überschüssige Metallpulver wird in einer Siebanlage für die nachfolgenden Bauprozesse aufbereitet. Nachfolgende Prozessschritte dienen der Optimierung der generativ gefertigten Bauteile, wobei beispielsweise durch Wärmebehandlungen die mechanisch-technologischen Eigenschaften verbessert und Eigenspannungen abgebaut werden können. Während des Wärmebehandlungsprozesses verbleiben die Bauteile aufgrund der Eigenspannungen in der Regel auf der Bauplatte. Mittels einer Bandsäge oder einer Drahterodiermaschine sind die entstandenen Bauteile in der Folge von der Bauplatte abzutrennen. Die anschließende Nachbearbeitung von Funktions- und Oberflächen wird oftmals mittels spanender Fertigungsverfahren durchgeführt, um geforderte Toleranzwerte einhalten zu können. Um die Oberflächenqualität möglichst effizient zu verbessern werden unbehandelte Oberflächen in der Regel durch Sand- oder Glasperlenstrahlen von den anhaftenden und teilweise versinterten Metallpulverpartikeln gereinigt. Abschließende Qualitätssicherungsmaßnahmen wie Bauteilvermessungen dienen hauptsächlich dem Abgleich mit den Kundenanforderungen. Eine während des Laserstrahlschmelzprozesses durchgeführte Schmelzbadüberwachung kann zusätzlich zur Qualitätssicherung einbezogen werden.

Anwendungsbeispiele

Die Möglichkeit der Herstellung von Kühlkanal- oder Leichtbaustrukturen, welche innerhalb des Bauteils liegen und mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht realisierbar sind, charakterisiert ein Alleinstellungsmerkmal der generativen Fertigung von Metallbauteilen. Dieser Vorteil führte zu einer raschen Entwicklung der generativen Technologien, um beispielsweise die Zykluszeiten bei Druckgusswerkzeugen durch konturnahe Kühlkanalstrukturen zu verringern. Dadurch bieten sich auch in anderen Industriezweigen Konstrukteuren und Entwicklern neue Möglich-

keiten zur Problemlösung. Einige auf dem Markt etablierte Produkte weisen inzwischen basierend auf der generativen Fertigung ein Optimierungspotenzial durch Anpassungs- und Neukonstruktionen auf. Die geringeren Fertigungsrestriktionen begünstigen auch die kreative Neuentwicklung innovativer Produkte mit funktionsoptimierter Gestalt. Diese zeichnen sich insbesondere durch topologieoptimierte und bionische Strukturen aus. Es können weiterhin auch komplexe Baugruppen durch einzelne, generativ gefertigte Bauteile ersetzt werden, womit nachfolgende Fügeoperationen eingespart werden können. Die Integration von zusätzlichen Funktionen in Bauteile, beispielsweise mithilfe von dämpfenden und porösen Strukturen, können einen zusätzlichen Mehrwert bieten.



Abbildung 6 – Bauteil mit topologieoptimierter Leichtbaustruktur (li) und kühlungsoptimiertes Spritzgusswerkzeug (re)



Abbildung 7 - Impeller mit integrierter Strömungsabsaugung



Abbildung 8 - Leichtbauoptimierter Abgaskrümmung

AlCu – Hybridmaterial, eine Werkstoffkombination mit vielfältigen neuen Anwendungsmöglichkeiten

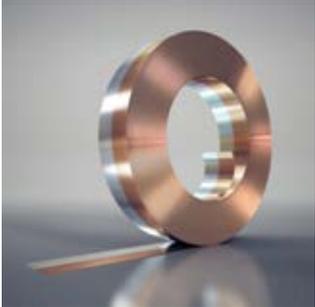
Uwe Dreißigacker
DODUCO GmbH

Aktuelle Markttrends, wie die konsequente Leichtbauweise im Automotive-Bereich oder stetig steigende Anforderungen an die Kühlung in der Leistungselektronik, verlangen von allen am Produktionsprozess beteiligten Unternehmen eine innovative Ausrichtung. DODUCO hat diesen Trend frühzeitig aufgegriffen und sich zur Aufgabe gemacht, einen Verbundwerkstoff aus den Metallen Kupfer und Aluminium zu entwickeln, welche durch Kaltwalzplattierung fest miteinander verbunden werden. Mittlerweile befinden wir uns in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium und suchen nach Kooperationspartnern, um das Bimetall AlCunnect weiterhin erfolgreich am Markt zu etablieren.



Varianten des Bimetalls AlCunnect

DODUCO bietet zwei unterschiedliche Varianten des Werkstoffverbundes AlCunnect an, um den individuellen Bedürfnissen nachkommen zu können. Die Herstellverfahren für den entwickelten Hybridverbund sind zum einen das überlappende Plattieren und zum anderen das vollflächige Plattieren, welche die zuverlässige Verbindung der Kupfer – und Aluminiumwelt ermöglichen.

Überlappend plattiert	Vollflächig plattiert
 <p>Der sogenannte Überlapp-Verbund AlCunnect setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, wobei der eine Teil aus Kupfer und der andere aus Aluminium besteht. Das überlappend plattierte Bandmaterial kann mit einer Gesamtbreite von maximal 100 Millimetern und einer Dicke von bis zu 2 Millimetern hergestellt werden. Dabei beträgt die Breite des überlappenden Bereichs der Aluminium- und Kupferbänder ungefähr 5 mm. Das Breitenverhältnis der Aluminium- und Kupferbänder ist dabei individuell wählbar. Der Überlapp-Verbund ist auf Wunsch als Coilware erhältlich.</p>	 <p>Bei der vollflächig plattierten Variante des Bimetalls AlCunnect sind die Aluminium- und Kupferplatten über ihre Gesamtfläche miteinander verbunden. Diese Aluminium-Kupfer-Butzen sind in einer Breite bis zu ca. 200 Millimetern und Gesamtdicke bis zu 10 Millimetern erhältlich. Das Verhältnis der Aluminium- und Kupferdicke der Metall-Halbzeuge ist dabei weitestgehend frei wählbar.</p>

Überblick Maße:			
Gesamtbreite	Bis ca. 100 mm / 4"	Breite	Bis ca. 200 mm / 8"
Dicken	Bis ca. 2 mm / 0.08"	Dickenverhältnisse Al/Cu	Weitestgehend frei wählbar
Breite der Überlappzone	Ca. 5 mm / 0.2"	Gesamtdicken	Bis ca. 10 mm / 0.4"
Breitenverhältnisse Al/Cu	Weitestgehend frei wählbar		

Nutzenvorteile und Eigenschaften des Bimetalls AlCunnect

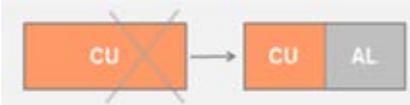
Durch die mögliche Werkstoffkombination und individuellen Schichtdickenverhältnisse ergeben sich relevante Nutzenvorteile und Eigenschaften des Verbundwerkstoffs AlCunnect.

Kupfer ist bekannt für eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit. Jedoch leidet es in den letzten Jahren an einer merklichen Preiserhöhung und hat sich dadurch zu einem teuren Rohstoff entwickelt.

Das Materialduo aus Kupfer und Aluminium mit seinem hochstabilen und elektrisch gut leitfähigen Verbund ermöglicht so auf einfache Weise eine Verbindung der Aluminiumwelt mit der Kupferwelt. Hierdurch können Kosteneinsparmöglichkeiten erschlossen werden, die heute noch unzugänglich sind.

Aluminium weist die viertbeste elektrische und thermische Leitfähigkeit aller Metalle auf. Nur Silber, Kupfer und Gold sind besser. Zwar übertrifft Aluminium in dieser Hinsicht nicht das Leistungsvermögen von Kupfer, ist aber wesentlich leichter und preiswerter. Bei identischem Leitwert von Kupfer und Aluminium ist der Querschnitt von Aluminium 1,6-fach größer als Kupfer, wiegt dennoch nur die Hälfte. Positive Aspekte durch den Einsatz des Hybridmaterials AlCunnect ist neben der Kosteneffizienz eine deutliche Gewichtsersparnis, was insbesondere im Automotive-Bereich eine entscheidende Rolle spielt.

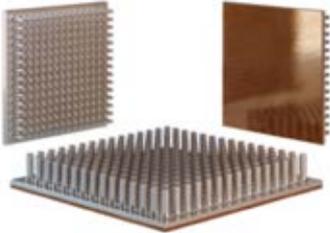
Gleichzeitig bringt das plattierte Bimetall aus Aluminium und Kupfer eine Temperaturbeständigkeit von bis zu 200 °C mit sich und zeichnet sich durch eine hervorragende mechanische Haftung aus.

Eigenschaften	Nutzenvorteile
<ul style="list-style-type: none"> ■ Formschlüssige Verbindung von Kupfer und Aluminium ■ Gute elektrische Leitfähigkeit ■ Temperaturbeständigkeit bis 200 °C ■ Metallurgische Verbindung mit hervorragender mechanischer Haftung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kupfer – und Aluminiumwelt verbinden ■ Kostensenkung durch Ersatz vom teuren Kupfer durch günstiges Aluminium ■ Gewichtsreduktion ■ Individuell anpassbar ■ Ressourcenschonung & Nachhaltigkeit 

Anwendungsbeispiele für AlCunnect

Die neue Technologie bietet eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungs- und Kombinationsmöglichkeiten des plattierten Bimetalls AlCunnect.

AlCunnect als idealer Zellverbinder für Lithium-Ionen-Batterien	
Anwendungsbereich:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Elektrofahrzeuge ■ Hybridfahrzeuge
<p>Das Aluminium-Kupfer Materialduo wird in der Elektromobilität verwendet, um einzelne Lithium-Ionen Zellen zu einem Batteriesystem zu verbinden. Die Herausforderung beim Konfektionieren dieser Batterien ist es, eine optimale Stromübertragung zu erreichen. An der Stelle eignet sich das Bimetall AlCunnect aufgrund der Materialkombination ideal als Zellverbinder, da bei Lithium-Ionen-Batterien stets die Anode aus Kupfer und die Kathode aus Aluminium realisiert sind.</p>	
	

AlCunnect zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von fließgepressten Kühlkörpern	
Anwendungsbereich:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Leistungselektronik ■ Fahrzeuge
<p>Kühlkörper für die Leistungselektronik werden heute fast ausschließlich aus massivem Aluminium hergestellt. Mit den vollflächig plattierten Aluminium-Kupfer-Butzen aus AlCunnect lassen sich fließgepresste Kühlkörper mit höherer Wärmeleitfähigkeit herstellen, welche auf der Halbleiterseite eine dicke Kupferschicht aufweisen. Durch die höhere Wärmeleitfähigkeit von Kupfer sowie dessen höhere Wärmekapazität können so Kühlleistungen erreicht werden, die mit Aluminium alleine nicht erreicht werden können. Der Verbundwerkstoff aus Kupfer und Aluminium AlCunnect erzielt außerdem Vorteile beim Einsatz von Wasserkühlungen.</p>	
	

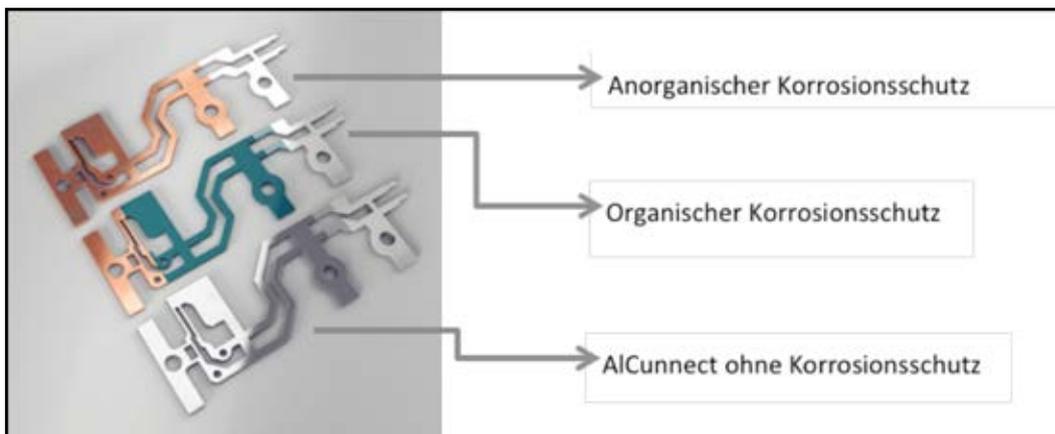
AlCunnect als Lösung für Wiring Accessories		
Anwendungsbereich:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Steckverbinder/ Kabelschuhe am Aluminium- Kabelbaum in Fahrzeugen ■ Hausinstallationen 	
<p>Bereits heute werden in neu entwickelten Fahrzeugen Aluminiumkabel zur Stromübertragung genutzt. Da Aluminium vergleichsweise weich ist und bei mechanischer Beanspruchung kriecht, können sich nach einer gewissen Dauer Schrauben oder Crimpverbindungen lösen. Das erfordert eine verlässliche Verbindung zwischen der Kupfer- und der Aluminiumwelt. Das überlappende Verbundmaterial AlCunnect findet zum Beispiel Verwendung als Steckverbinder bzw. Kabelschuh aus Aluminium und Kupfer. Diese dienen beispielsweise zur Anbindung von Aluminium-Kabelbäumen an die Kupferwelt in Fahrzeugen.</p>		

AlCunnect Anwendung in elektromagnetischen Spulen aus Aluminium		
Anwendungsbereich:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Transformatoren ■ Relais ■ Elektromotoren ■ Generatoren ■ Elektromagneten 	
<p>Das Aluminium-Kupfer Hybridmaterial AlCunnect findet überall Anwendung, wo elektromagnetische Spulen aus Aluminium zum Einsatz kommen. Man ersetzt bereits heute vereinzelt die Kupferwicklung durch Aluminium, um weitgehende Vorteile der geringeren Materialkosten und Gewichtsreduzierung in neue Produktentwicklungen einfließen zu lassen. Elektromagnetische Spulen werden beispielsweise in Transformatoren, Relais, Elektromotoren, Generatoren sowie Elektromagneten verwendet.</p>		

Korrosionsschutz für das Metallduo AlCunnect

Wenn sich Kupfer und Aluminium in unmittelbarer Nähe zueinander befinden, kann schon etwas Feuchtigkeit genügen, um einen Korrosionsprozess in Gang zu setzen. Speziell hierfür entwickelte Doduco Verfahren, die den Korrosionsschutz sicherstellen. Dabei kann der Werkstoffverbund AlCunnect durch einen anorganischen als auch einen organischen Korrosionsschutz gegen Umwelteinflüsse versiegelt werden.

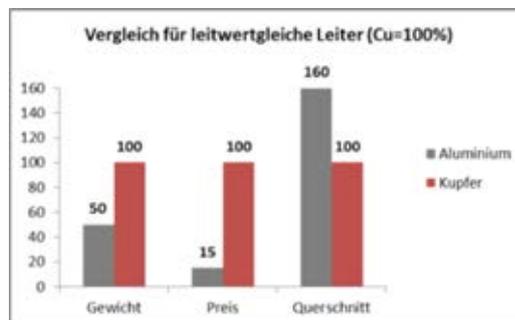
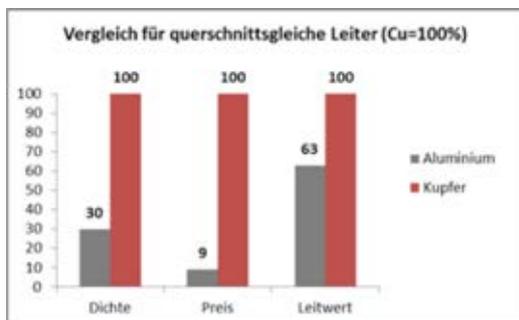
Anorganischer Korrosionsschutz	Organischer Korrosionsschutz
Eine weitere Variante der Korrosion entgegenzuwirken stellt die galvanische Beschichtung von AlCunnect dar. Dabei wird der Aluminium-Kupfer Hybridverbund vollflächig oder selektiv in Reel-to-Reel-Anlagen beschichtet. Hierbei hat sich Zinn als Oberfläche zielführend und prozesssicher erwiesen.	Die Beschichtung mit einem isolierenden Lacksystem stellt eine Variante für das Bimetall AlCunnect dar. Der speziell dafür entwickelte Lack kann in einem „Spray-Coating“ Prozess vollflächig oder selektiv in Reel-to-Reel Beschichtungstechnik auf das Hybridmaterial aufgebracht werden. Die kurze Aushärtezeit sowie der Einsatz in einem weiten Temperaturbereich stellt eine Besonderheit dieses Korrosionsschutzes dar.



Sowohl die galvanische als auch die isolierende Beschichtung wurde in Kooperation mit führenden Zulieferern der Automotive-Branche durch DIN-Salzsprühnebeltests qualifiziert.

Werkstoffeigenschaften von Aluminium und Kupfer im Detail

	Aluminium (Al)	Kupfer (Cu)
Preis	Ø 1.600 USD/Tonne	Ø 5.350 USD/Tonne
Elektrische Leitfähigkeit	37,7 [MS/m]	59,9 [MS/m]
Dichte	2,7 g/cm ³	8,92 g/cm ³
Wärmeleitfähigkeit	237 [W/mK]	401 [W/mK]
Schmelzpunkt	660 [°C] / 1220 [°F]	1084 [°C] / 1983 [°F]
E-Modul	65 [GPa]	115 [GPa]
Wärmeausdehnung (20 °C)	23,6 [10 ⁻⁶ /K]	16,5 [10 ⁻⁶ /K]
Standardwerkstoff	EN AW-1050A (Al99,5)	SE-Cu58 (Cu-PHC)
Chemische Zusammensetzung	nach DIN EN 573-3	nach DIN EN 13599
Mechanische Eigenschaften	nach DIN EN 485-2	nach DIN EN 13599
	Vergleichszahlen (Cu=100%) für querschnittsgleiche Leiter	
Dichte	30	100
Preis	9	100
Leitwert	63	100
	Vergleichszahlen (Cu=100%) für leitwertgleiche Leiter	
Gewicht	50	100
Preis	15	100
Querschnitt	160	100



Links über AlCunnect

[1] Leichtbau BW

<http://www.leichtbau-bw.de/leichtbau/thinking-neu/detailansicht-thinking/article/leichtes-und-leitungsfahiges-materialduo-thinking-april-stellt-innovatives-hybridmaterial-aus-a.html>

[2] Aluminium Praxis

<http://www.alu-web.de/nc/home/branche/news-detail/news/6/1429215540innovatives-hybridmaterial-aus-aluminium-und-kupfer/>

VERZEICHNIS DER BISHER ERSCHIENENEN BEITRÄGE DER HOCHSCHULE PFORZHEIM

- | | |
|--|--|
| <p>52. Werner Pepels Aug. 1990
Integrierte Kommunikation</p> <p>53. Martin Dettinger-Klemm Aug. 1990
Grenzen der Wissenschaftsfreiheit. Überlegungen zum Thema: Freiheit und Verantwortung des Wissenschaftlers</p> <p>54. Werner Pepels Sept. 1990
Mediaplanung – Über den Einsatz von Werbegeldern in Medien</p> <p>55. Dieter Pflaum Sept. 1990
Werbeausbildung und Werbemöglichkeiten in der DDR</p> <p>56. Rudi Kurz (Hrsg.) Nov. 1990
Ökologische Unternehmensführung – Herausforderung und Chance</p> <p>57. Werner Pepels Jan. 1991
Verkaufsförderung – Versuch einer Systematisierung</p> <p>58. Rupert Huth, Ulrich Wagner (Hrsg.) Aug. 1991
Volks- und betriebswirtschaftliche Abhandlungen. Prof. Dr. Dr. h. c. Tibor Karpati (Universität Osijek in Kroatien) zum siebzigsten Geburtstag. Mit einem Vorwort von R. Huth und Beiträgen von H.-J. Hof, H. Löffler, D. Pflaum, B. Runzheimer und U. Wagner</p> <p>59. Hartmut Eisenmann Okt. 1991
Dokumentation über die Tätigkeit einer Industrie und Handelskammer – Dargestellt am Beispiel der IHK Nordschwarzwald</p> <p>60. Ursula Hoffmann-Lange Dez. 1991
Eliten und Demokratie: Unvereinbarkeit oder notwendiges Spannungsverhältnis?</p> <p>61. Werner Pepels Dez. 1991
Elemente der Verkaufsgesprächsführung</p> <p>62. Wolfgang Berger Dez. 1991
Qualifikationen und Kompetenzen eines Europamanagers</p> <p>63. Günter Staub Jan. 1992
Der Begriff „Made in Germany“ – Seine Beurteilungskriterien</p> <p>64. Martin W. Knöll, Hieronymus M. Lorenz Mai 1992
Gegenstandsbereich und Instrumente der Organisationsdiagnose im Rahmen von Organisationsentwicklungs (OE)-Maßnahmen</p> <p>65. Werner Lachmann Juni 1992
Ethikversagen – Marktversagen</p> | <p>66. Paul Banfield Juni 1993
Observations On The Use Of Science As A Source Of Legitimation In Personnel Management</p> <p>67. Bernd Noll Aug. 1993
Gemeinwohl und Eigennutz. Wirtschaftliches Handeln in Verantwortung für die Zukunft – Anmerkungen zur gleichnamigen Denkschrift der Evangelischen Kirche in Deutschland aus dem Jahre 1991</p> <p>68. Siegfried Kreutzer, Regina Moczadlo Aug. 1993
Die Entdeckung der Wirklichkeit – Integrierte Projektstudien in der Hochschulausbildung</p> <p>69. Sybil Gräfin Schönfeldt Aug. 1993
Von Menschen und Manieren. Über den Wandel des sozialen Verhaltens in unserer Zeit. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1992/93</p> <p>70. Hartmut Löffler Dez. 1993
Geld- und währungspolitische Grundsatzüberlegungen für ein Land auf dem Weg zur Marktwirtschaft. Das Beispiel Kroatien</p> <p>71. Hans-Georg Köglmayr, Kurt H. Porkert Nov. 1994
Festlegen und Ausführen von Geschäftsprozessen mit Hilfe von SAP-Software</p> <p>72. Alexa Mohl Febr. 1995
NLP-Methode zwischen Zauberei und Wissenschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1994/95</p> <p>73. Bernd Noll Mai 1995
Marktwirtschaft und Gerechtigkeit: Anmerkungen zu einer langen Debatte</p> <p>74. Rudi Kurz, Rolf-Werner Weber Nov. 1995
Ökobilanz der Hochschule Pforzheim.
2. Geänderte Auflage, Jan. 1996</p> <p>75. Hans Lenk Mai 1996
Fairness in Sport und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1995/96</p> <p>76. Barbara Burkhardt-Reich, Hans-Joachim Hof, Bernd Noll Juni 1996
Herausforderungen an die Sozialstaatlichkeit der Bundesrepublik</p> <p>77. Helmut Wienert März 1997
Perspektiven der Weltstahlindustrie und einige Konsequenzen für den Anlagenbau</p> |
|--|--|

**Pforzheimer
Werkstofftag
2015**

78. **Norbert Jost** Mai 1997
Innovative Ingenieur-Werkstoffe
79. **Rudi Kurz,
Christoph Hubig,
Ortwin Renn,**
Hans Diefenbacher Sept. 1997
Ansprüche in der Gegenwart zu Lasten der Lebens-
chancen zukünftiger Generationen
80. **Björn Engholm** Okt. 1997
Ökonomie und Ästhetik. Vortrag gehalten im Rahmen
des Studium Generale der Hochschule Pforzheim,
Wintersemester 1996/97.
2. Geänderte Auflage. Jan. 1998
81. **Lutz Goertz** Sept. 1998
Multimedia quo vadis? – Wirkungen, Chancen, Ge-
fahren. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium
Generale der Fachhochschule Pforzheim, Winterse-
mester 1996/97
82. **Eckhard Keßler** Nov. 1998
Der Humanismus und die Entstehung der modernen
Wissenschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Stu-
dium Generale der Hochschule Pforzheim, Winterse-
mester 1996/97
83. **Heinrich Hornef** Febr. 1998
Aufbau Ost – Eine Herausforderung für Politik und
Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium
Generale der Fachhochschule Pforzheim, Winterse-
mester 1997/98
84. **Helmut Wienert** Juli 1998
50 Jahre Soziale Marktwirtschaft – Auslaufmodell
oder Zukunftskonzept? Vortrag gehalten im Rahmen
des Studium Generale der Hochschule Pforzheim,
Sommersemester 1998
85. **Bernd Noll** Sept. 1998
Die Gesetzliche Rentenversicherung in der Krise
86. **Hartmut Löffler** Jan. 1999
Geldpolitische Konzeptionen – Alternativen für die
Europäische Zentralbank und für die Kroatische Na-
tionalbank
87. **Erich Hoppmann** Juni 1999
Globalisierung. Vortrag gehalten im Rahmen des Stu-
dium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommer-
semester 1999
88. **Helmut Wienert (Hrsg.)** Dez. 1999
Wettbewerbspolitische und strukturpolitische Konse-
quenzen der Globalisierung. Mit Beiträgen von Hart-
mut Löffler und Bernd Noll.
89. **Ansgar Häfner u. a. (Hrsg.)** Jan. 2000
Konsequenzen der Globalisierung für das internatio-
nale Marketing. Mit Beiträgen von Dieter Pflaum und
Klaus-Peter Reuthal.
90. **Ulrich Wagner** Febr. 2000
Reform des Tarifvertragsrechts und Änderung der
Verhaltensweisen der Tarifpartner als Voraussetzungen
für eine wirksame Bekämpfung der Arbeitslosigkeit
91. **Helmut Wienert** April 2000
Probleme des sektoralen und regionalen Wandels
am Beispiel des Ruhrgebiets
92. **Barbara Burkhardt-Reich** Nov. 2000
Der Blick über den Tellerrand – Zur Konzeption und
Durchführung eines „Studium Generale“ an Fach-
hochschulen
93. **Helmut Wienert** Dez. 2000
Konjunktur in Deutschland – Zur Einschätzung der
Lage durch den Sachverständigenrat im Jahresgut-
achten 2000/2001
94. **Jürgen Wertheimer** Febr. 2001
Geklonte Dummheit: Der infantile Menschenpark.
Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale
der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 2000/01
95. **Konrad Zerr** März 2001
Erscheinungsformen des Online-Research – Klassifi-
kation und kritische Betrachtung
96. **Daniela Kirchner** April 2001
Theorie und praktische Umsetzung eines Risikoma-
nagementsystems nach KontraG am Beispiel einer
mittelständischen Versicherung
97. **Bernd Noll** Mai 2001
Die EU-Kommission als Hüterin des Wettbewerbs
und Kontrolleur von sektoralen und regionalen Beihil-
fen
Peter Frankenfeld
EU Regionalpolitik und Konsequenzen der Osterwei-
terung
98. **Hans Joachim Grupp** Juni 2001
Prozessurale Probleme bei Beschlussmängelstreitig-
keiten in Personengesellschaften
99. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juli 2001
Technik Forum 2000: Prozessinnovationen bei der
Herstellung kaltgewalzter Drähte. Mit Beiträgen von
Peter Kern, Wilhelm Bauer, Rolf Ilg; Heiko Dreyer;
Johannes Wößner und Rainer Menge.
100. **Urban Bacher,
Mikolaj Specht** Dez. 2001
Optionen – Grundlagen, Funktionsweisen und deren
professioneller Einsatz im Bankgeschäft
101. **Constanze Oberle** Okt. 2001
Chancen, Risiken und Grenzen des M-Commerce
102. **Ulrich Wagner** Jan. 2002
Beschäftigungshemmende Reformstaus und wie
man sie auflösen könnte
Jürgen Volkert
Flexibilisierung durch Kombi-Einkommen? Die Per-
spektive der Neuen Politischen Ökonomie
103. **Mario Schmidt,
René Keil** März 2002
Stoffstromnetze und ihre Nutzung für mehr Kosten-
transparenz sowie die Analyse der Umweltwirkung
betrieblicher Stoffströme

Pforzheimer Werkstofftag 2015

104. **Kurt Porkert** Mai 2002
Web-Services – mehr als eine neue Illusion?
105. **Helmut Wienert** Juni 2002
Der internationale Warenhandel im Spiegel von Handelsmatrizen
106. **Robert Wessolly,**
Helmut Wienert Aug. 2002
Die argentinische Währungskrise
107. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2002
Technik-Forum 2001: Weiterentwicklungen an Umformwerkzeugen und Walzdrähten. Mit Beiträgen von Roland Wahl, Thomas Dolny u. a., Heiko Pinkawa, Rainer Menge und Helmut Wienert.
108. **Thomas Gulden** April 2003
Risikoberichterstattung in den Geschäftsberichten der deutschen Automobilindustrie
109. **Günter Altner** Mai 2003
Lasset uns Menschen machen – Der biotechnische Fortschritt zwischen Manipulation und Therapie. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003
110. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2003
Technik-Forum 2002: Innovative Verfahren zur Materialoptimierung. Mit Beiträgen von Norbert Jost, Sascha Kunz, Rainer Menge/Ursula Christian und Berthold Leibinger.
111. **Christoph Wüterich** Feb. 2004
Professionalisierung und Doping im Sport. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003
112. **Sabine Schmidt** Mai 2004
Korruption in Unternehmen – Typologie und Prävention
113. **Helmut Wienert** Aug. 2004
Lohn, Zins, Preise und Beschäftigung – Eine empirische Analyse gesamtwirtschaftlicher Zusammenhänge in Deutschland
114. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2004
Technik-Forum 2003: Materialentwicklung für die Kaltumformtechnik. Mit Beiträgen von Andreas Baum, Ursula Christian, Steffen Nowotny, Norbert Jost, Rainer Menge und Hans-Eberhard Koch.
115. **Dirk Wenzel** Nov. 2004
The European Legislation on the New Media: An Appropriate Framework for the Information Economy?
116. **Frank Morelli,**
Alexander Mekyska,
Stefan Mühlberger Dez. 2004
Produkt- und prozessorientiertes Controlling als Instrument eines erfolgreichen Informationstechnologie-Managements
117. **Stephan Thesmann,**
Martin Frick,
Dominik Konrad Dez. 2004
E-Learning an der Hochschule Pforzheim
118. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2005
Technik-Forum 2004: Innovative Werkstoffaspekte und Laserbehandlungstechnologien für Werkzeuge der Umformtechnik
119. **Rainer Gildeggen** Juni 2005
Internationale Produkthaftung
120. **Helmut Wienert** Okt. 2005
Qualifikationsspezifische Einkommensunterschiede in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Universitäts- und Fachhochschulabsolventen
121. **Andreas Beisswenger,**
Bernd Noll Nov. 2005
Ethik in der Unternehmensberatung – ein vermintes Gelände?
122. **Helmut Wienert** Juli 2006
Wie lohnend ist Lernen? Ertragsraten und Kapitalendwerte von unterschiedlichen Bildungswegen
123. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2006
Technik-Forum 2005: Umformwerkzeuge – Anforderungen und neue Anwendungen. Mit Beiträgen von Edmund Böhm, Eckhard Meiners, Andreas Baum, Ursula Christian und Jörg Menno Harms.
124. **Mario Schmidt** Dez. 2006
Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement
125. **Norbert Jost (Hrsg.)** Okt. 2007
Technik-Forum 2006: Innovative neue Techniken für Werkzeuge der Kaltverformung. Mit Beiträgen von Franz Wendl, Horst Bürkle, Rainer Menge, Michael Schiller, Andreas Baum, Ursula Christian, Manfred Moik und Erwin Staudt.
126. **Roland Wahl (Hrsg.)** Okt. 2008
Technik-Forum 2007: Fortschrittsberichte und Umfeldbetrachtungen zur Entwicklung verschleißreduzierter Umformwerkzeuge. Mit Beiträgen von Klaus Löffler, Andreas Zilly, Andreas Baum und Paul Kirchhoff.
127. **Julia Tokai,**
Christa Wehner Okt. 2008
Konzept und Resultate einer Online Befragung von Marketing-Professoren an deutschen Fachhochschulen zum Bologna-Prozess
128. **Thomas Cleff, Lisa Luppold,**
Gabriele Naderer,
Jürgen Volkert Dez. 2008
Tätermotivation in der Wirtschaftskriminalität
129. **Frank Thuselt** Juni 2009 Das
Arbeiten mit Numerik-Programmen. MAT-LAB, Scilab und Octave in der Anwendung.
130. **Helmut Wienert** Aug. 2009
Wachstumsmotor Industrie? Zur Bedeutung des verarbeitenden Gewerbes für die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts
131. **Sebastian Schulz** Sept. 2009
Nutzung thermodynamischer Datensätze zur Simulation von Werkstoffgefügen (aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg. Norbert Jost).

Pforzheimer Werkstofftag 2015

132. **Hanno Beck;**
Kirsten Wüst Sept. 2009
Gescheiterte Diäten, Wucherzinsen und Wartepremien: Die neue ökonomische Theorie der Zeit.
133. **Helmut Wienert** Sept. 2009
Was riet der Rat? Eine kommentierte Zusammenstellung von Aussagen des Sachverständigenrats zur Regulierung der Finanzmärkte und zugleich eine Chronik der Entstehung der Krise
134. **Norbert Jost (Hrsg.)** Nov. 2010
Technik-Forum 2008: Werkstoffe und Technologien zur Kaltverformung
135. **Frank Morelli** Jan. 2010
Geschäftsprozessmodellierung ist tot – lang lebe die Geschäftsprozessmodellierung!
136. **T. Cleff,**
L. Fischer,
C. Sepúlveda,
N. Walter Jan. 2010
How global are global brands? An empirical brand equity analysis
137. **Kim Neuer** Juni 2010
Achieving Lisbon – The EU's R&D Challenge The role of the public sector and implications of US best practice on regional policymaking in Europe
138. **Bernd Noll** Sept. 2010
Zehn Thesen zur Corporate Governance
139. **Pforzheim University** März 2011
Communication on progress. PRME Report 2008
140. **Rainer Maurer** März 2011
Unternehmensverantwortung für soziale und ökologische Nachhaltigkeit – darf man auch anderer Meinung sein? Einige kritische Anmerkungen zum PRME-Report der Hochschule
141. **Barbara Reeb,**
Malte Krome Okt. 2011
Arm trotz Arbeit? Zum Für und Wider von Mindestlöhnen
142. **B. Eng. Daniel Wyn Müller** Mai 2012
Titanschäume als Knochenimplantat. Aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg.: N. Jost
143. **Alexander Martin Matz,**
Norbert Jost Mai 2012
Fouling an offenporigen zellulären Werkstoffen auf Al-Basis unter beheizten wässrigen Bedingungen; Aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg.: N. Jost
144. **Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)** Sept. 2012
Tagungsband zum 1. Pforzheimer Werkstofftag (12.09.2012), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost.
145. **Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)** Sept. 2013
Tagungsband zum 2. Pforzheimer Werkstofftag (26.09.2013), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost.
146. **Helmut Wienert** Feb. 2014
Zur Entwicklung der Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (Fachhochschulen) in Deutschland.
147. **Jürgen Antony** April 2014
Technical Change and the Elasticity of Factor Substitution, Hrsg.: N. Jost, K-H. Rau, R. Scherr, C. Wehner, H. Beck.
148. **Stephanie Görlach** April 2014
Ressourceneffizienz in Deutschland, Hrsg.: N. Jost, K-H. Rau, R. Scherr, C. Wehner, H. Beck.
149. **Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)** Sept. 2014
Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2014 (25.09.2014), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost.
150. **Bernd Noll** August 2014
Unternehmenskulturen – entscheidender Ansatzpunkt für wirtschaftsethisches Handeln?
151. **Human Resources**
Competence Center April 2015
50 Jahre Personalmanagement an der Hochschule – Jubiläumsband
152. **Rainer Maurer** Mai 2015
Auf dem Weg zur weltanschaulichen Bekenntnisschule: Das wirtschaftspolitische Leitbild der Hochschule Pforzheim
153. **Norbert Jost, Roman Klink (Hrsg.)** Okt. 2015
Tagungsband zum Pforzheimer Werkstofftag 2015 (01.10.2015), aus der Reihe „Focus Werkstoffe“ der Pforzheimer Hochschulberichte, Hrsg.: N. Jost.

Veranstalter

HOCHSCHULE PFORZHEIM 



Hochschule Pforzheim
Fakultät für Technik

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost
Leiter des Instituts für Werkstoffe und Werkstofftechnologien (IWWT)

Telefon +49 (0)7231 28-6581 oder -6552
norbert.jost@hs-pforzheim.de
www.hs-pforzheim.de/iwwt

Wirtschaft und Stadtmarketing Pforzheim (WSP)
Geschäftsbereich Wirtschaftsförderung und
Kommunale Statistik

Reiner Müller
Leiter Wirtschaftsförderung

Telefon +49 (0)7231 39-1857
reiner.mueller@ws-pforzheim.de
www.ws-pforzheim.de

PFORZHEIMER WERKSTOFFTAG

Kooperationspartner:

