

WAW

Wissenschaftlicher
Arbeitskreis e.V.
der Universitäts-
Professoren der
Werkstofftechnik



Jahresmagazin **Werkstofftechnik**

**Ingenieur
wissenschaften
2018**

ISSN 1618-8357
EUR 9,80

Herausgegeben vom Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen





ZVO-OBERFLÄCHENTAGE

LEIPZIG

19.-21.09.2018

Kongress für Galvano- und Oberflächentechnik



ZVO-Oberflächentage: Das führende Kongressforum der Branche!

- Salzsprühtest und mögliche Alternativen: Quo vadis?
- Über 10 Jahre REACH: Folgen und Ergebnisse
- Beschichtungen auf Basis Chromtrioxid nach dem Sunset-Date: Status der Autorisierungen und Beschichtungsalternativen
- Innovative Oberflächentechnik im Leichtbau
- Oberflächentechnik für Energiespeicher und Energieumwandlung

Der Fachkongress für Oberflächentechnik.

Für mehr Informationen rund um das Thema Oberflächentage scannen Sie bitte folgenden QR-Code oder kontaktieren Sie uns direkt .



Direktkontakt

Tel.: 02103 - 25 56 10

Fax: 02103 - 25 56 15

service@zvo.org

<http://oberflaechentage.zvo.org>

Liebe Leserinnen und Leser,

mit dem vorliegenden Heft gibt Ihnen der Wissenschaftliche Arbeitskreis Werkstofftechnik e.V. (WAW), in dem sich seit 1993 die Leiterinnen und Leiter der führenden deutschen universitären Werkstofftechnik-Institute zusammengeschlossen haben, in einer zweiten Ausgabe (2017: „Wettbewerb der Werkstoffe“) einen Einblick in aktuelle Forschungsarbeiten und werkstofftechnische Schwerpunkte unter dem Titel: „Werkstoffe – Basis für Produktionsinnovationen“.

Werkstoffe, ihre Verarbeitung und ihre funktionale Weiterentwicklung, haben den menschlichen Fortschritt von jeher bestimmt und geprägt. Wachstum in den zentralen Technologie-Sektoren aber auch im sozio-kulturellen Bereich hing und hängt in starkem Maße von der Bereitstellung geeigneter Werkstoffe ab. Dieser Anspruch erfährt aktuell noch eine deutliche Steigerung. Ressourcen-Verknappung, Klimawandel, Verkehrstechnik, Individualisierung von Produkten wie auch Industrie 4.0 erfordern massive Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, um die notwendigen Konstruktionswerkstoffe anforderungsgerecht bereitzustellen.

Damit nimmt die Werkstofftechnik auch im Kontext aktueller technologischer und sozio-kultureller Entwicklungen eine Schlüsselrolle im Spannungsfeld zwischen „Science-Push“ und „Market-Pull“ ein. Werkstofftechnologische Lösungen stellen dabei oftmals den „enabling factor“ dar, durch die neue Technologien erst zur Untersuchung gelangen. Beispiele hierfür sind die kundenindividuelle Fertigung mittels neuer Fertigungsprozesse und der adaptierten Werkstoffe, biokompatible Werkstoffe oder Funktionswerkstoffe für die Energiewandlung. Diese Betrachtungsweise ist charakteristisch für den menschlichen Fortschritt über die letzten Jahrhunderte. Neue Werkstoffe haben zum Teil traditionelle substituiert und gleichzeitig haben innovative Produkte mit gestiegenen Anforderungen und angepasste Fertigungsprozesse neuartige werkstofftechnologische Lösungen erforderlich gemacht. Gerade in jüngster Zeit ist eine zentrale Anforderung an die werkstofftechnische Forschung und Entwicklung

hinzugekommen. Dies betrifft die Innovation von Produkten und Prozessen unter besonderer Berücksichtigung des Lebenszyklus der eingesetzten Werkstoffe. Diese Innovationsentwicklung ist damit automatisch eng verknüpft mit Fragestellungen im Zusammenhang zur Entwicklung der Industrie 4.0, wie z.B. dem digitalen Zwilling.

Mit dem vorliegenden zweiten Heft möchte der WAW e.V. Ihnen einen Überblick zu aktuellen werkstofftechnischen Forschungsschwerpunkten, unter dem thematischen Leitgedanken „Werkstoffe – Basis für Produktinnovationen“, liefern. Die dargestellten Forschungsarbeiten werden dabei oftmals im Verbund mehrerer Forschungseinrichtungen durchgeführt und bedienen sowohl grundlegende wissenschaftliche Fragestellungen wie auch anwendungsnahe Probleme und leisten somit einen wichtigen Beitrag für die Spitzenforschung im Bereich der Werkstofftechnik in Deutschland.

Der WAW e.V. ist dabei besonders stolz darauf, dass sich neben dem wissenschaftlichen Arbeitskreis der Universitätsprofessoren auch eine korrespondierende Organisation der Nachwuchswissenschaftler (Junior WAW) formiert hat, die aktiv und mit hohem Engagement wichtige Ideen und Konzepte für werkstofftechnische Forschungsprojekte generieren und frühzeitig eine eigenständige Forschung anstreben.

Der WAW e.V. unterstützt dabei diese Aktivitäten des Junior-WAW ausdrücklich. An dieser Stelle sei auf den entsprechenden Beitrag „Womit beschäftigt sich der deutsche Nachwuchs der Werkstofftechnik?“ in diesem Heft hingewiesen.

Gerne stehen Ihnen die Mitarbeiter des WAW e.V. und speziell die Beitragenden des vorliegenden Heftes für Diskussionen und einen tiefergehenden fachlichen Austausch zur Verfügung. Im Namen des WAW e.V. wünsche ich Ihnen beim Lesen des vorliegenden Heftes somit viel Vergnügen und zahlreiche neue Erkenntnisse.



Mit besten Grüßen,

Ihr
**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing.
Wolfgang Tillmann**
Vorsitzender des WAW e.V.

»» Institute ««

- 1 »»Vorwort««**
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann
Vorsitzender des WAW e.V.
- 14 »»Womit beschäftigt sich der deutsche Nachwuchs der Werkstofftechnik?««**
Dr.-Ing. Ingor Baumann, Lukas Wojarski, Christopher Schaak und die Mitglieder des Junior WAW
Junior WAW
- 24 »»Vielfalt und Vielseitigkeit – Werkstofftechnik als Querschnittstechnologie am Institut für Kunststoffverarbeitung««**
Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann
RWTH Aachen University • Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)
- 38 »»RWTH Aachen University – Institut für Oberflächentechnik
Oberflächentechnik als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts««**
Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin, Dr.-Ing. Tobias Brögelmann, Dr.-Ing. Mehmet Öte, Christian Kalscheuer, Martin Knoch, Tim Königstein, Nathan Kruppe, Xifang Liao, Stefanie Wiesner, Wolfgang Wietheger
RWTH Aachen University • Institut für Oberflächentechnik (IOT)
- 52 »»Die plasmalektrolytische anodische Oxidation von Aluminium – erweiterte Einsatzmöglichkeiten durch kombinierte Oberflächentechnik««**
Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lampke
Technische Universität Chemnitz • Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik,
Professur Werkstoff- und Oberflächentechnik
- 80 »»Thermisch gespritzte, konturnahe WC-12Co Beschichtungen für den Verschleißschutz von Umformwerkzeugen««**
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann, Dr.-Ing. Ingor Baumann, Christopher Schaak, Dr.-Ing. Peter Hollingsworth, Lukas Wojarski
Technische Universität Dortmund • Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

95 »Erweiterte Funktionalitäten durch hybride Werkstoffe mit Kunststoffen«

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer
Universität Erlangen-Nürnberg • Lehrstuhl für Kunststofftechnik

114 »Material- und Elektrodenentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien«

Dr.-Ing. Werner Bauer, Dr. rer. nat. Joachim Binder, Dr. rer. nat. Marcus Müller, Prof. Dr. M.J. Hoffmann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) • Institut für Angewandte Materialien – Keramische Werkstoffe und Technologien

126 »Fügetechnik: Schlüsseltechnologie für ressourceneffiziente Hochleistungsverbundsysteme«

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut, Florian Augenthaler, Michael Ditz, Dipl.-Ing. Michael Gerrens,
Heinrich Günter, Christopher Schmal, Julian Vorderbrüggen
Universität Paderborn • Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF®)

140 »Einsatzgrenzen erweitern – der Schlüssel zum Erfolg«

Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe, Dr.-Ing. Andreas Klenk, Dipl.-Ing. Martin Werz, Dipl.-Ing. Stefan Zickler
Universität Stuttgart • Materialprüfungsanstalt MPA, Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre

22 »Impressum«

»» Kunststoffverarbeitung in Perfektion ««

Wie Spritzgießen I4.0-fähig und damit hochgradig optimierbar wird

Mit dem Prozessüberwachungssystem ComoNeo von Kistler steht Spritzgießfertigung eine Vielfalt an Optionen zur Optimierung der Produktion zur Verfügung – von der Voraussage der Bauteilqualität über individualisierbare Überwachungs- und Regelungsfunktionen bis hin zu dezidierten Assistenzsystemen. Die neuen Features der Version ComoNeo 2.0 erhöhen zudem den Automatisierungsgrad und stellen eine durchgängige Datenkommunikation mit übergeordneten Systemen wie MES und ERP her.

Die Vision von Industrie 4.0 sieht eine autonome, vernetzte und nicht zuletzt individualisierte Fertigung vor. Erreicht werden soll dieser Evolutionsschritt durch die Digitalisierung der gesamten Wertschöpfungskette in einer intelligenten Fabrik, die von der Produktionsplanung bis zur Logistik als ein abgestimmtes und interagierendes System funktioniert. Bei der Anwendung dieses Ansatzes auf einzelne Branchen ergeben sich jedoch spezifische Herausforderungen, die Schritt für Schritt gelöst werden müssen.

Als Partner der Kunststoffbranche arbeitet Kistler kontinuierlich daran, Spritzgießprozesse zu optimieren und zu digitalisieren, um deren Qualität und Effizienz zu steigern. Mit dem weiterentwickelten Prozessregelungs- und -überwachungssystem ComoNeo wird eine neue Stufe der Optimierbarkeit, intuitiven Bedienung und Reproduzierbarkeit erreicht. So können etwa mit dem Wiederanfahr-Assistenten bewährte Prozesskonfigurationen gespeichert und – auch standortübergreifend – auf andere Maschinen übertragen werden.

Werkzeuginnendruck als Qualitätsindikator

Die Basis für eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Qualität der Prozesse bildet die Messung des Innendruckes im Spritzgießwerkzeug. Dieser Wert wird mittels in das Werkzeug integrierter Sensoren überwacht und erlaubt eindeutige Rückschlüsse auf die Qualität der Fertigung. Somit wird eine konkrete Aussage darüber möglich, ob Gut- oder Schlechteile produziert werden – der Bedie-

ner kann die Maschinenparameter selbst anpassen oder sich dabei von den in ComoNeo integrierten Systemen unterstützen lassen. Die Kombination aus hochentwickelter Sensorik und intelligentem Monitoring erlaubt eine Digitalisierung des Spritzgießprozesses auf Basis der Überwachung des Werkzeuginnendruckes sowie den entsprechenden Druck- und Temperaturverläufen.

Um den Spritzgießprozess trotz zahlreicher Störgrößen dauerhaft unter Kontrolle zu halten, stehen dem Anwender mit ComoNeo drei integrierte Verfahren zur Auswahl: Zunächst hat er mit **ComoNeo-GUARD** die Möglichkeit, manuell EOs (Evaluation Objects) zu definieren, die als Qualitätsmerkmale für den Druckverlauf über die Zeit dienen. Anhand dieser Bewertungskriterien entscheidet das Kistler System darüber, ob ein Vorgang wie gewünscht verlaufen ist – z.B. lässt eine Maximum-EO darauf schließen, ob die Kavität vollständig gefüllt wurde oder nicht. Anwender ohne spezifisches Know-how haben zusätzlich die Möglichkeit, die Aufgabe der Festlegung von

Qualitätsmerkmalen mit Hilfe von ComoNeo-GUARD zu lösen. Dabei werden sie schrittweise durch den Einrichtungsprozess geführt und kommen so auf Basis eines bestehenden Prozesses mit Gutteilen zu präziseren Bewertungsgrenzen. Diese systematische Vorgehensweise reduziert vor allem vermeintlichen Ausschuss, den so genannten Pseudoscrap. Durch Iteration kann die Einrichtung solange verbessert werden, bis sie den Ansprüchen des Bedieners genügt.

Prozessoptimierung je nach Anwender-Know-how

Seit ComoNeo 2.0 besteht zusätzlich die Möglichkeit einer modellbasierten Prognose der Bauteilqualität – mit der Funktion **ComoNeoPREDICT**: Hierzu hat Kistler die Software Stasa QC integriert, die auf der Basis von Messwerten wie dem Werkzeuginnendruck die Qualität der gefertigten Bauteile vorausrechnet und innerhalb der Toleranzgrenzen bewertet. Damit wird nicht nur eine lückenlose Dokumentation der Fertigung möglich – die geschaffene Transparenz des Prozesses mehr auch das Know-how des Anwenders. Diese fortschrittliche Art der Prozessüberwachung ist vor allem für Hersteller hochwertiger Bauteile interessant, die etwa im sicherheitskritischen oder medizintechnischen Bereich operieren.

Sind die optimalen Maschinenparameter erst einmal festgelegt, erlaubt der Wiederanfahr-Assistent (**ComoNeoRECOVER**) die identische Reproduktion des Spritzgießprozesses auf einer anderen Maschine. In wenigen einfachen



Abb. 1: ComoNeo ist das Prozessüberwachungs- und -regelungssystem für grösstmögliche Effizienz beim Spritzgießen.

Schritten wird der Benutzer durch die Optimierung geführt: Der Assistent stellt Abweichungen zum Referenzprozess fest und macht Vorschläge zur Anpassung der Einstellungen. Doch damit nicht genug: Mit der MultiFlow-Regelung ist es Kistler gelungen, einen weiteren Baustein zur Optimierung des Spritzgießprozesses in ComoNeo zu integrieren: **ComoNeoMUL-TIFLOW** balanciert den Heißkanal so, dass bei Mehrfach-Werkzeugen sämtliche Kavitäten synchron gefüllt werden. Möglich wird dies durch die Anbindung von ComoNeo an die Maschine über OPC-UA, was für eine besonders schnelle und sichere Maschinenkommunikation sorgt.

Ein weiteres System zur automatisierten Prozessführung ist die integrierte Umschaltautomatik **ComoNeoSWITCH**, die abhängig vom Werkinnendruck den optimalen Umschaltzeitpunkt wählt. Der erfahrene Anwender hat jedoch weiterhin die Möglichkeit zur manuellen Konfiguration. Beide Umschaltoptionen – manuell über einen Schwellwert oder vollautomatisch – tragen dazu bei, Werkzeugschäden zu vermeiden.

Hier noch einmal die zuvor beschriebenen Funktionen zur Prozessoptimierung mit ComoNeo in der Übersicht:

- **ComoNeoGUARD** unterstützt den Anwender dabei, Überwachungsfenster zu definieren, die schrittweise eine genaue Separierung von Gut- und Schlechteilen ermöglichen.

- **ComoNeoPREDICT** erlaubt eine modellbasierte Voraussage der spezifizierten Bauteilqualität auf Grundlage des Werkzeuginnendruck- und Temperaturverlaufs.

- **ComoNeoRECOVER** ermöglicht die identische Reproduktion eines bewährten Spritzgießprozesses auf einer anderen Maschine.

- **ComoNeoMULTIFLOW** sorgt bei Mehrkavitätenwerkzeugen für eine optimale Ausbalancierung des Heißkanals durch individuelle Nachregelung der Düsentemperatur.

- **ComoNeoSWITCH** ermöglicht ein automatisches Umschalten von der Einspritzphase zur Nachdruckphase zum optimalen Zeitpunkt.

Transparente Vernetzung von Prozessdaten

Wie steht es jedoch um die für Industrie 4.0 geforderte Datendurchgängigkeit und Vernetzung? Hier bietet Kistlers ComoDataCenter (CDC) die Möglichkeit, alle Prozessdaten in einer Datenbank zusammenzuführen – und somit eine effektive Vernetzung der Fertigung. Besonderer Wert wurde auf Abwärtskompatibilität gelegt: Daten früherer ComoNeo-Versionen können ebenso gespeichert und analysiert werden wie die aus dem Vorgängersystem CoMo Injection. Somit lassen sich nicht nur Werkzeugeinstellungen nahezu beliebig auf andere Anlagen übertragen; die Anbindung mittels OPC-UA an übergeordnete Systeme wie ein MES ermöglicht zudem einen

zentralen Überblick über die gesamte Spritzgießfertigung und eine schnelle Detektion von Prozessschwankungen.

Um ihre Marktposition als ganzheitlicher Lösungsanbieter sowie die Kompetenz im Bereich Industrie 4.0 weiter auszubauen, hat die Kistler Gruppe im Sommer 2017 die Aachener IOS GmbH, einen erfolgreichen Anbieter von MES-Systemen, übernommen. Kistler rückt damit dem Ziel, der Kunststoffbranche eine durchgängige Systemlösung (vom Sensor bis zum ERP) zur Qualitätsüberwachung und Prozessoptimierung aus einer Hand zu bieten, immer näher – für maximale Wirtschaftlichkeit und Transparenz der Fertigung im Zeitalter von Industrie 4.0.

KONTAKT

Kistler Gruppe

Simone Koch

Divisional Marketing Manager IPC

Phone +41 (0)52 2241 802

E-Mail: simone.koch@kistler.com

www.kistler.com

«Ungefähr» genügt nicht allen



statt



Auf die Präzision kommt es an: Dank der genauen, zeitgleichen Erfassung und transparenten Darstellung von Produktionsdaten erkennen und eliminieren Sie Ausschuss dort, wo er entsteht. Dies erspart aufwändige Nachkontrollen, was der Produktionssteigerung zugute kommt. Wo auch immer Sie produzieren: Wir bieten Ihnen Komplettlösungen nach Maß und unterstützen Sie weltweit mit unserer umfassenden Servicekompetenz.

» Unternehmen «

76	» ATM GmbH «	www.atm-m.com
124	» Auerhammer Metallwerk GmbH «	www.auerhammer.com
138	» Buehler ITW Test & Measurement GmbH «	www.buehler.com
110	» Carl Zeiss Microscopy GmbH «	www.zeiss.com/geminisem
44	» CemeCon AG «	www.cemecon.de
131	» DataPhysics Instruments GmbH «	www.dataphysics.de
78	» Elementar Analysensysteme GmbH «	www.elementar.de
122	» FRIATEC AG «	www.friatec.de
72	» Heraeus Holding GmbH «	www.heraeus.com
36	» HORIBA Scientific «	www.horiba.com
48	» Innobraze GmbH «	www.innobraze.de
60	» JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH «	www.joanneum.at/materials
4	» Kistler Gruppe «	www.kistler.com
68	» Kompetenzzentrum Holz GmbH «	www.wood-kplus.at
34	» LAMILUX Composites GmbH «	www.lamilux.de
7	» Leuze & Co Kunststoffbeschichtungen GmbH & CO. KG «	www.leuze-co.de



Leuze & Co Kunststoffbeschichtungen GmbH & CO. KG
Höchste Kundenzufriedenheit durch Qualitätslösungen



Für jeden Einsatzfall die richtige Beschichtung

Ob Korrosionsschutz, Optik oder Funktionen:

Gemeinsam mit Ihnen wählen wir die für Ihren Anwendungsfall optimale Beschichtung aus unserem Sortiment aus. Dieses umfasst viele gängige Verfahren der Kunststoffbeschichtung:

- Vorbereitung (Reinigen, Sandstrahlen, u.v.w.)
- Wirbelsinterverfahren
- Minicoatverfahren
- Spritzen/Lackieren

Weiterhin erfüllen unsere Kunststoffbeschichtungen höchste Qualitätsanforderung, was auch durch ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem gewährleistet wird.

Wir beschichten Teile aus den Bereichen:

- Fahrzeugbau
- Maschinenbau
- Möbelindustrie
- Außenbereich
- Medizintechnik
- Befestigungstechnik
- Normteile

Fordern Sie uns! Gerne erstellen wir Ihnen auf Anfrage ein Musterangebot.

Adresse:

Leuze & Co Kunststoffbeschichtungen GmbH & CO. KG
Industriestraße 7
71272 Renningen

Tel.: 07159 / 6981
Fax: 07159 / 17271
E-Mail: leuze@leuze-co.de
Internet: www.leuze-co.de



Leuze & Co Kunststoffbeschichtungen GmbH & CO. KG

Höchste Kundenzufriedenheit durch Qualitätslösungen

Leuze & Co steht für das unablässige Streben innovative und ökonomisch optimale Lösungen zu erarbeiten, die den Kundennutzen im Fokus haben. Wenn es erforderlich ist, wird im Dialog mit dem Kunden eine spezielle Sondermaschine bzw. ein neues Verfahren entwickelt.

Leistungsfähiger Technologiepartner seit über 40 Jahren

Qualität

Selbstverständlich spielt bei allen Aktivitäten unseres Hauses die Qualität eine sehr wichtige Rolle. Dies wird durch ein zertifiziertes Qualitätsmanagement-System gewährleistet.

Vorbereitung

Alle vorbereitenden Arbeiten (Reinigen, Sandstrahlen, u.v.w.) werden im eigenen Hause durchgeführt.

Wirbelsintern

Im Wirbelsinternverfahren werden bei uns Polyamid- und Polyäthylenbeschichtungen hergestellt. Zu unserem Teilspektrum gehören Einzel- und Serienteile, Zeichnungsteile und Sonderteile.

Minicoatverfahren

Das Minicoatverfahren findet Anwendung beim Polyamidbeschichten von Kleinteilen in Großserien- bzw. Massenfertigung.

Spritzen/Lackieren

Das Nassspritzen/Lackieren wird in unserem Haus zum Herstellen von FEP- und PTFE-Beschichtungen verwendet.

Eigenfertigung

Seit einigen Jahren werden in unserem Hause auch eigene Produkte hergestellt und beschichtet.

Sie haben Interesse?

Dann besuchen Sie unsere Website und schauen sich detailliertere Informationen über uns und unsere Dienstleistungen an:

www.leuze-co.de

» Unternehmen «

62	» LumaSense Technologies GmbH «	www.lumasenseinc.com
104	» Menzolit GmbH «	www.menzolit.com
58	» Metzka GmbH «	www.metzka.de
91	» MTU Aero Engines «	www.mtu.de
112	» Nabaltec AG «	www.nabaltec.de
19	» Oerlikon CH Wohlen «	www.oerlikon.com/metco
46	» PLASUS GmbH «	www.plasus.de
30	» PROTIQ «	www.protiq.com
23	» Proto Labs Germany «	www.protolabs.de
12	» Retsch GmbH «	www.retsch.de
102	» RUMUL Russenberger Prüfmaschinen AG «	www.rumul.ch
134	» Shimadzu Deutschland GmbH «	www.shimadzu.de
29	» SLF Oberflächentechnik GmbH «	www.slf.eu
U 4 147	» VON ARDENNE GmbH «	www.vonardenne.biz
50	» YXLON International GmbH «	www.yxlon.com
64	» Zwick GmbH & Co. KG «	www.zwick.de

»» Messen ««

- 106** » **mtex+ und LiMA** « www.mtex-lima.de
29. – 30. Mai 2018
7. Internationale Messe für Technische Textilien | Die Leichtbaumesse
Messe Chemnitz
- 108** » **5. Technologietag Hybrider Leichtbau** « www.leichtbau-technologietag.de
25. – 26. Juni 2018
ICS International Congress Center Stuttgart
- 66** » **AMB** « www.amb-messe.de
18. – 22. September 2018
Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung
Messe Stuttgart
- U 2** » **ZVO-Oberflächentage** « <http://oberflaechentage.zvo.org>
19. – 21. September 2018
Kongress für Galvano- und Oberflächentechnik
Leipzig
- 32** » **Aluminium 2018** « www.aluminium-messe.com
09. – 11. Oktober 2018
12. Weltmesse & Kongress
Messe Düsseldorf
- 93** » **eMove360° 2018** « www.emove360.com
16. – 18. Oktober 2018
3. Internationale Fachmesse für die Mobilität 4.0 – elektrisch – vernetzt – autonom
Messe München
- 74** » **EuroBLECH 2018** « www.euroblech.de
23. – 26. Oktober 2018
25. Internationale Technologiemesse für Blechbearbeitung
Hannover

- 136** » **Leichtbau in Guss** « www.hanser-tagungen.de/guss
 06. – 07. November 2018
 Bad Gögging
- 132** » **COMPOSITES EUROPE** « www.composites-europe.com
 06. – 08. November 2018
 13. Europäische Fachmesse und Forum für Verbundwerkstoffe, Technologie und Anwendungen
 Messe Stuttgart
- 70** » **Schleiftagung** « www.schleiftagung.de
 20. – 21. Februar 2019
 Stuttgart-Fellbach
- U 3** » **Werkstoffwoche** « www.werkstoffwoche.de
 18. – 20. September 2019
 Kongress und Fachausstellung für Innovative Werkstoffe, Verfahren und Anwendungen
 Messe Dresden

» RETSCH setzt Maßstäbe in der Probenzerkleinerung – seit über 100 Jahren «

Eine zuverlässige und genaue chemische oder physikalische Analyse kann nur durch eine reproduzierbare Probenvorbereitung gewährleistet werden und ist die Voraussetzung für innovative Technologien wie Neue Materialien, Additive Fertigung, 3-D Druck, Kunststofftechnik, Direct Manufacturing oder Nanotechnologien. Eine Laborprobe muss derart aufbereitet werden, dass daraus eine repräsentative und homogene Einzelprobe von zum Teil nur wenigen Gramm entsteht. RETSCH bietet für diese Aufgabenstellung ein umfangreiches Programm modernster Mühlen und Brecher für die materialgerechte Grob-, Fein-, und Feinstzerkleinerung bis in den Nanometerbereich < 100 nm an. Diese erlauben, den notwendigen Schritt der Probenvorbereitung, z. B. zur Analyse neuer Werkstoffe, in sehr kurzer Zeit einfach und reproduzierbar durchzuführen. Die große Auswahl an Mahlwerkzeugen und Zubehör ermöglicht nicht nur eine kontaminationsneutrale Aufbereitung vieler Materialien, sondern auch die Anpassung an individuelle Anforderungen für so unterschiedliche Materialien wie Kunststoffe, Baustoffe, Metalllegierungen, Keramiken, Glass, Verbundstoffe, Mineralien etc.

Für die Vorzerkleinerung harter, spröder Probenmaterialien wie Metalllegierungen bietet RETSCH acht Backenbrecher-Modelle an, während zähe, faserige oder weiche Proben, wie z. B. Kunststoffe, hervorragend mit der Schneidmühlen-Serie vorzerkleinert werden.

Emax: Beste Ergebnisse in der Feinstvermahlung bis < 100 nm sowie beim mechanischen Legieren

Das Highlight in der Retsch Produktfamilie der Kugelmühlen ist die Hochleistungs-Kugelmühle Emax für Trocken- und Nassvermahlungen bis in den Nanometerbereich. Die einzigartige Kombination aus Reibung und Prall erlaubt die Produktion extrem feiner Partikel in kürzester Zeit. Der hohe Energieeintrag resultiert aus der in einer Kugelmühle bislang unerreichten Drehzahl von 2.000 min⁻¹

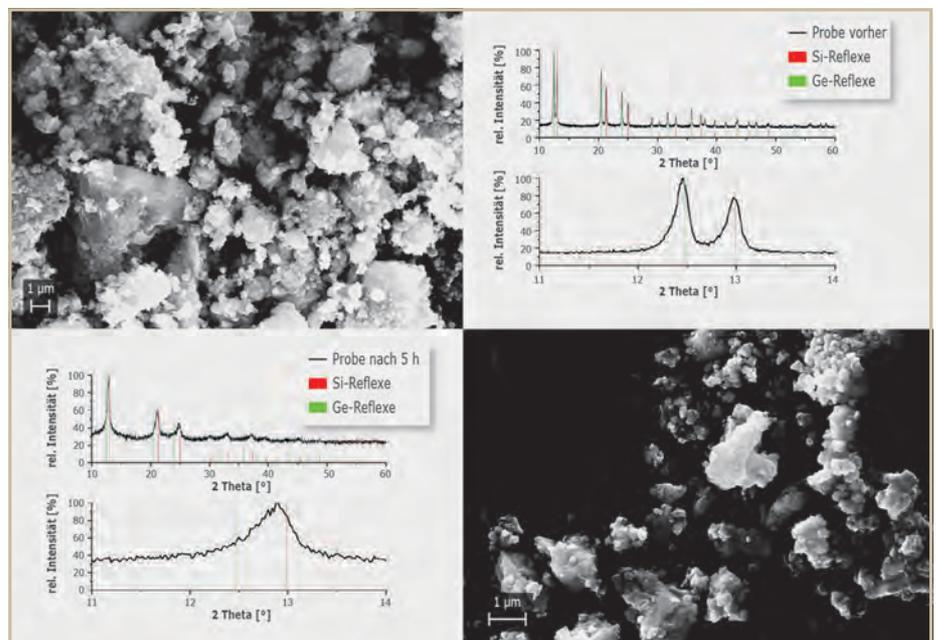


Abb. 1: Mechanisches Legieren von Germanium mit Silizium in der Hochleistungskugelmühle Emax zeigt bereits nach 5 h sehr gute Transformationsraten.

sowie aus dem neuartigen Mahlbecherdesign. Dank der innovativen Wasserkühlung kann der hohe Energieeintrag effektiv im Mahlprozess ausgenutzt werden, ohne dass die Probe überhitzt. Die spezielle Mahlbechergeometrie ermöglicht außerdem eine enge Partikelgrößenverteilung, da die Probe besonders gut durchmischt wird. Auch die schonende Probenvorbereitung temperaturempfindlicher Materialien ist mit dieser Mühle möglich. Es kann beispielsweise die maximal erlaubte Temperatur programmiert werden, so dass

sichergestellt ist, dass die Proben bei der Vermahlung nicht zu warm werden.

Der Emax eignet sich zudem hervorragend zum mechanischen Legieren, also zur Erzeugung neuartiger Materialien und Werkstoffe. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass der Prozess des mechanischen Legierens von Silizium mit Germanium im Vergleich zur Planeten-Kugelmühle drastisch von 16 h auf ca. 9 h verkürzt werden konnte, bei besserer Transformationsrate.

Effiziente Zerkleinerung unter kontinuierlicher Versprödung mit Flüssigstickstoff bei -196 °C

Das Portfolio von RETSCH umfasst außerdem Schwingmühlen, welche optimal für schnelles Vermahlen, Mischen, Homogenisieren kleiner Probenmengen geeignet sind. Die CryoMill, speziell zur Vermahlung unter kryogenen Bedingungen konzipiert, erlaubt die effiziente Zerkleinerung von elastischen Materialien und Kunststoffen wie Polyurethan, Kautschuk, PP, PE, PET.



Abb. 2: 2 g Silikon vor und nach der Vermahlung in der CryoMill, überwiegend < 250 µm nach 10 min



Abb. 3: 10 g Polyurethan wurden in ca. 60 sec in der ZM 200 auf <math>< 400 \mu\text{m}</math> vermahlen, nachdem die Vorzerkleinerung in der Schneidmühle SM 300 vorgenommen worden war.



Abb. 4: RETSCH bietet eine breite Palette von Labormühlen für die Feinzerkleinerung unterschiedlichster Werkstoffe

Größere Mengen dieser Materialien werden am besten in der Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 mit bis zu 18.000 min^{-1} homogenisiert. Durch Trockeneis oder flüssigen Stickstoff versprödete Kunststoffe und Verbundmaterialien können hier problemlos aufgearbeitet werden.

Suchen Sie nach einer passenden Labormühle für Ihre Anwendung? Dann schicken Sie uns Ihre Probe für eine kostenlose, unverbindliche Testvermahlung durch unser Laborteam. Sie erhalten einen ausführlichen Testbericht, der alle Mahlparameter sowie eine Empfehlung für die geeignete Mühle enthält. Weitere Informationen finden Sie auf unserer Webseite: www.retsch.de/labor.



KONTAKT

Retsch GmbH

Retsch-Allee 1-5
D-42781 Haan
Tel.: +49 (0)2104 2333-100
Fax: +49 (0)2104 2333-199
info@retsch.de
www.retsch.de



HOCH-LEISTUNGS-KUGELMÜHLE E_{max}
Innovatives Wasserkühlsystem und maximale Drehzahl bis 2.000 min^{-1}

Die Nr. 1 für Labormühlen

RETSCH Labormühlen - führend im Einsatz für die schnelle und reproduzierbare Probenzerkleinerung von Feststoffen in Forschung und Entwicklung.

- Hochleistungs-Kugelmühle Emax
- CryoMill für die Kryogenvermahlung
- Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200
- Schneidmühle SM 300

»» Womit beschäftigt sich der deutsche Nachwuchs der Werkstofftechnik? ««

Der Junior WAW ist ein Zusammenschluss der Nachwuchswissenschaftler aus den Forschungsgruppen der vereinsangehörigen Mitglieder (Professoren) und wurde vom WAW e.V. zur Förderung des deutschen Nachwuchses in der Werkstofftechnik ins Leben gerufen. Gemeinsam sind die WAW e.V. Mitglieder und die Nachwuchswissenschaftler des Junior WAW bestrebt, die wissenschaftliche Entwicklung der Werkstofftechnik in Deutschland wie auch weltweit mitzugestalten bzw. aktiv mit voranzutreiben. Im Folgenden stellt sich der Junior WAW mit seinen Zielen, aktuellen Forschungsaktivitäten, aber auch mit seinen Wünschen an neue Nachwuchsförderungsprogramme vor.

Der Junior WAW stellt sich vor

Neben dem Vorantreiben der Forschung und Entwicklung zählt die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses in der deutschen Werkstofftechnik zu einer der wichtigsten Aufgaben des Vereins „Wissenschaftlicher Arbeitskreis Werkstofftechnik e.V. (WAW)“. Zu diesem Zweck wurde vor einigen Jahren der „Junior WAW“ ins Leben gerufen, der einen Zusammenschluss der Nachwuchswissenschaftler (d. h. Juniorprofessoren, Oberingenieure, Gruppenleiter etc.) aus den Forschungsgruppen der vereinsangehörigen Mitglieder (Professoren) darstellt. Neben unterschiedlichen Forschungs- und Arbeitsschwerpunkten hat sich der Junior WAW als zentrales Leitthema zur Aufgabe gemacht, „Neue und innovative hybride Ansätze für die Werkstofftechnik der Zukunft“ zu entwickeln. Ziel des Junior WAW ist es, die Forschung in der deutschen Werkstofftechnik aktiv mitzugestalten und gleichzeitig die Spitzenposition der deutschen Werkstoffinstitute für die Zukunft zu sichern und weiter auszubauen. Um dies zu ermöglichen, streben die Nachwuchswissenschaftler des Junior WAW die Einrichtung eines eigenen, koordinierten Projektvorhabens an. Ein besonderer Wunsch an die Regierung bzw. an die großen Förderungsinstitutionen besteht daher in der Einrichtung neuer, geeigneterer Nachwuchsförderprogramme, welche auf die Bedürfnisse des Nachwuchswissenschaftlerkonsortiums des Junior WAW besser zugeschnitten sind. Dies soll es den Nachwuchswissenschaftlern bereits in frühen

Jahren ihrer Karriere ermöglichen, sich der Leitung und Koordination von komplexen, interdisziplinären Forschungsfragestellungen in großen Projektverbänden widmen zu können, ihre Forschungsideen selbstständig voranzutreiben und sich eine Zukunftsperspektive in der Wissenschaft zu erarbeiten.

Innovative Werkstoffe bilden nicht nur die Grundlage für bedeutende Produktentwicklungen, sondern eröffnen zudem auch völlig neue Möglichkeiten – ganz gleich, ob es sich dabei um industrielle Hightech-Bauteile oder um Alltagsgegenstände handelt, die aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken sind. Als Wegbereiter für die Umsetzung neuer Ideen in Technologien und Produkten

von morgen wird der Werkstoffforschung daher eine hohe Bedeutung beigemessen. Die Entwicklung im Bereich der Werkstoffwissenschaft ist derzeit nicht nur darauf ausgerichtet, Hochleistungswerkstoffe her vorzubringen, sondern zugleich auch deren Energie- und Materialeffizienz weiter auszu schöpfen. Um jedoch die stetig wachsenden Anforderungen an die Funktions- und Struktureigenschaften nachhaltig erfüllen zu können, bedarf es neuer, vor allem multidisziplinärer Ansätze in der Werkstofftechnik. Gleichzeitig spielt die Betrachtung der gesamten Prozesskette – von der Materialentwicklung über die Bauteilfertigung und seiner Anwendung bis hin zur Produkt- (PCA) bzw. Lebenszyklusanalyse (LCA) – eine zunehmend



Abbildung 1: Treffen der Junior WAW Mitglieder am 21.-22.09.2017 an der Universität Kassel.

wichtige Rolle. Vor allem diesen anspruchsvollen Aufgaben widmen sich die Mitglieder des „Wissenschaftlichen Arbeitskreis Werkstofftechnik e.V. (WAW)“, der derzeit aus 35 Universitätsprofessoren besteht.

Nachwuchsförderung sichert Spitzenforschung in Deutschland

Neben den fachlich-wissenschaftlichen Tätigkeiten liegt ein besonderer Schwerpunkt des Vereins in der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Zu diesem Zweck wurde bereits vor einigen Jahren der Junior WAW, bestehend aus Nachwuchswissenschaftlern der beteiligten Forschungseinrichtungen, ins Leben gerufen. Die frühzeitige Einbindung der „Junioren“ fördert nicht nur deren persönliche Entwicklung, sondern sichert langfristig auch die werkstofftechnische Spitzenforschung in Deutschland. Anders jedoch, als die dem Verein dauerhaft angehörigen Professoren, den „Senioren“, unterliegt der Junior WAW immer wieder personellen Veränderungen, da die Nachwuchswissenschaftler vielfach aufgrund mangelnder dauerhafter Perspektiven

an den Forschungseinrichtungen in der Regel mittelfristig eine Anstellung in der freien Marktwirtschaft anstreben oder in selteneren Fällen einem Ruf auf eine Professorenstelle nachgehen.

Wie auch die Professoren tauschen sich die Nachwuchswissenschaftler in regelmäßigen Treffen über neuste Entwicklungen im Bereich der Werkstofftechnik, über aktuell laufende, gemeinsame Forschungsaktivitäten und über zukünftig geplante Projektvorhaben aus. **Abb. 1** zeigt die Mitglieder des Junior WAW beim letzten Treffen vom 21.-22.09.2017 an der Universität Kassel.

Eine besondere Stärke des Junior WAW liegt in der Vielfalt der von den Nachwuchswissenschaftlern behandelten und eingebrachten Forschungsgebiete, die eine ganzheitliche und interdisziplinäre Bearbeitung von komplexen Themenschwerpunkten und Projektvorhaben ermöglicht. Zu den allgemeinen Schwerpunkten, welche die Nachwuchswissenschaftler üblicherweise zusammen mit

den vereinsangehörigen Mitgliedern bearbeiten, zählen unter anderem: Produktionstechnik, Werkstoffsynthese, Oberflächen- und Beschichtungstechnik, Fügetechnik, zerstörende und zerstörungsfreie Werkstoffcharakterisierung und -analytik, skalenübergreifende Werkstoff- und Prozesssimulation, Datenmanagement sowie die Entwicklung von (In-situ-) Mess- und Prüfverfahren.

Neue und innovative hybride Ansätze für die Werkstofftechnik der Zukunft

Zur Fokussierung der Forschungsarbeiten und mit dem langfristigen Ziel der Initiierung eines gemeinsamen, koordinierten Projektvorhabens, konzentriert sich der Junior WAW zurzeit auf das Leitthema „Neue und innovative hybride Ansätze für die Werkstofftechnik der Zukunft“. Dieses Leitthema geht nicht nur in direkter Weise aus den Kompetenzen der Nachwuchswissenschaftler selbst hervor, sondern bildet zugleich ein technologisch besonders relevantes und innovatives Trendthemenfeld in Industrie und Forschung.

Additive Fertigung

Additive Fertigungsverfahren (engl.: AM = additive manufacturing) können grundlegend nach der Art der Ausgangswerkstoffe (Metalle, Keramik, Kunststoffe etc.) und der vorliegenden Arbeitsgrundsätze des Prozesses (z. B. Photopolymerisation im Bad, Werkstoffextrusion oder pulverbettbasiertes Schmelzen) unterschieden werden. Unabhängig von Werkstoff, Arbeitsgrundsatz und der Stufenanzahl des Prozesses, zeichnen sich die additiven Fertigungsverfahren durch eine schichtweise, werkzeuglose Fertigung basierend auf 3D-CAD-Daten aus. Die Vielseitigkeit der existierenden Anlagensysteme in Kombination mit einem breiten Spektrum an theoretisch verarbeitbaren Ausgangswerkstoffen verleiht den AM-Verfahren ein breites Einsatzspektrum. Insbesondere die nahezu grenzenlose gestalterische Freiheit der Bauteilgeometrien erlaubt eine noch nie dagewesene konstruktive Flexibilität. Diese Flexibilität geht weit über die Grenzen der klassischen Fertigungsverfahren hinaus. Das englische Schlagwort „*Complexity for free*“ bezeichnet den Zusammenhang punktgenau. Insbesondere hochkomplexe Komponenten und Bauteile können mittels additiver Fertigung wirtschaftlich in Kleinserie oder Einzelteilerfertigung hergestellt werden. Diesem Vorteil gegenüber stehen die langen Prozess- bzw. Bauzeiten und zum Teil hohen Ausgangswerkstoffkosten.

Trotz des rasanten Fortschritts bei der Weiterentwicklung der AM-Verfahren sowie der eingesetzten Ausgangswerkstoffe, besteht weiterhin ein großer Bedarf an Grundlagenforschung und ein unüber-

sehbares Optimierungspotential. Dies betrifft die gesamte Wertschöpfungskette von der Herstellung der Ausgangswerkstoffe, die Anlagentechnik, die Prozessüberwachung, die Baustrategien bzw. die Prozessparameter bis hin zur Nachbearbeitung der erzeugten Komponenten und dem Recycling der Werkstoffe. Die offensichtlichsten Herausforderungen sind die zum Teil verbesserungswürdigen Oberflächen- und Struktureigenschaften der gefertigten Bauteile. Maßhaltigkeit, Porosität, Oberflächenrauheit und Eigenspannungen im Ausgangszustand sind in vielen Fällen noch nicht auf dem Niveau konventionell erzeugter, vergleichbarer Komponenten. Ein weiteres großes Themengebiet betrifft die Applikation geeigneter in-situ Prozessüberwachung und Analysetechniken. Zum einen zur online Prozessüberwachung „condition monitoring“, um Fehlteile frühzeitig zu identifizieren. Zum anderen um den additiven Fertigungsprozess durch die Erfassung umfangreicher Sensordaten besser abbilden, verstehen, kontrollieren und beherrschen zu können. Dies steigert nicht nur die Prozesseffizienz und minimiert Ausschuss, sondern verhilft gleichzeitig zur Optimierung der Werkstoff- und Bauteileigenschaften. Die Klärung offener wissenschaftlicher Fragestellungen und die Notwendigkeit von geeigneten Messmethoden in diesen Bereichen impliziert bereits einen großen Forschungsbedarf.

Eine Prozesskategorie der additiven Fertigungsverfahren ist das pulverbettbasierte Schmelzen (auch: Pulverbettbasiertes Schmelzen oder Pulverbettverfahren). Energiequellen sind primär Laser- oder Elek-

tronenstrahlen. Bei diesen Verfahren führt das lokale Aufschmelzen und Erstarren oder Sintern von Pulverpartikeln zum Stoffschluss und zur Kontur der Einzelschicht einer Komponente. Nach erneutem Pulverauftrag wird dieser Vorgang wiederholt, bis die vollständige Komponentenhöhe sukzessiv, schichtweise erreicht ist. Eine Vielzahl von einzelnen verschweißten bzw. gesinterten Partikeln und Schichten führt somit zur Komponente. Typische Ausgangswerkstoffe sind thermoplastische Polymere, reine Metalle oder Metalllegierungen, Struktur- oder Industriekeramiken. Die Prozessparameter hängen signifikant von den Ausgangswerkstoffen und deren Qualitätsmerkmalen (d. h. chem. Zusammensetzung, Feuchtigkeit, Morphologie, Partikelfraktion) ab. Verschiedenste Randbedingungen können, neben falschen Prozessparametern, die Bildung von Imperfektionen (wie z. B. Poren, Verunreinigungen, Rauheit) im Gefüge begünstigen und sich somit negativ auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der fertigen Komponente auswirken. Aus diesen Gründen spielen eine gute Konditionierung der Pulver bzw. des Pulverauftrags sowie die sensitive Steuerung und Überwachung des Fertigungsprozesses eine entscheidende Rolle. Einer der bekanntesten Prozessvertreter der Pulverbettverfahren ist der LBM Prozess („laser beam melting“) mit metallischen Pulvern. Dieser Prozess ist weitläufig als SLM® („selective laser melting“ – ein Markenname) bekannt.

Trotz kontinuierlich vertieftem Prozessverständnis, optimierter Prozessführung und hohen Qualitätsanforderungen an die eingesetzten Ausgangsmaterialien, werden weder die Oberflächenrauheit, inhärente Eigenspannungen noch ein gewisses Restmaß an Poren vollständig vermeidbar sein. Zur anwendungsgerechten Anpassung der Oberflächen- und Gefügeeigenschaften der Bauteile ist generell eine Nachbehandlung mittels konventioneller Fertigungsverfahren nötig. Dabei variiert die Komplexität der Nachbehandlung mit dem anvisierten Anwendungsgebiet. Für einfache Anwendungen und Geometrien sind simple Glättprozesse (z. B. Gleitschleifen) zur Verbesserung der Oberflächenstruktur und zum Einstellen des Endmaßes bzw. der Toleranzen das Mittel der Wahl. Jedoch verhindert die oftmals komplexe Geometrie der additiv gefertigten Komponenten den Einsatz solcher Glättprozesse. Insbesondere unzugängliche Innenflächen stellen die größte Herausforderung dar. In solchen Fällen entsteht der Bedarf nach neuen bzw. angepassten Nachbehandlungsprozessen (z. B. Laserglätten oder chemische Methoden).

Neben der Oberflächenstruktur ist der Umgang mit der Restporosität eine weitere Herausforderung. Insbesondere bei High-Tech-Anwendungen mit zyklischer Belastung sollte die von Poren ausgehende Kerbwirkung weitestgehend ausgeschlossen werden. Dabei wird zur Evaluation der Porosität mittels zerstörungsfreier Prüfung in der Regel die Computertomographie herangezogen. Ergänzend zu prozesstechnischen Maßnahmen zur Verringerung der Porosität, wie z. B. eine Optimierung der Prozessparameter, sind ggf. aufwendigere Maßnahmen, wie Nachverdichten mittels heißisostatischen Pressens (HIP), notwendig.

Des Weiteren wird durch die sukzessive lokale Wärmeeinbringung bzw. Abkühlung der Bauteile ein Temperaturgradient induziert, der zu örtlich variierenden Spannungszuständen oder Kristallstrukturen und folglich zu inhomogenen Werkstoffeigenschaften im Bauteil führen kann. Die anisotropen mechanischen Eigenschaften zeigen sich insbesondere anhand der in der Regel in Baurichtung geringeren mechanischen Festigkeit der Komponenten. Durch einfache Methoden, wie z. B. der Platzierung und Rotation der zu bauenden Komponente im Bauraum, kann bereits Einfluss auf das anisotrope Verhalten genommen werden. Zumindest kann die Komponente so ausgerichtet werden, dass die Belastung während der Anwendung in einer Richtung mit hohen Festigkeitswerten erfolgt. Bei größeren bzw. größervolumigen Bauteilen ist oft eine abschließende Wärmebehandlung (z. B. Spannungsarmglühen) erforderlich. Ein zentrales Forschungsthema liegt folglich darin, die Einflüsse des Temperaturgradienten und damit die resultierenden Kristallstrukturen und Gefüge sowie die finalen Werkstoffeigenschaften vorherzusagen oder günstig zu beeinflussen. Beispielsweise kann durch Variation der Laserleistung oder ein zeitweises Defokussieren des Lasers beim LBM-Verfahren eine prozessintegrierte Wärmebehandlung realisiert werden.

Aus Gründen der Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit stellt neben der eigentlichen Komponentenherstellung vor allem die Wiederverwertung der im Fertigungsprozess verwendeten Ausgangswerkstoffe einen wichtigen Forschungsschwerpunkt dar. Dies betrifft besonders die Pulverbettverfahren, da nicht belichtetes Pulver, ob Keramik, Metall oder Kunststoff, theoretisch wiederverwendet werden kann. Restriktionen entstehen durch die Wärmeableitung in das Pulverbett, welche zum partiellen Sintern und Agglomeration einzelner Partikel führen kann. Zudem führt vielfaches Handling der Ausgangswerkstoffe, z. B. beim Pulverwechsel, zu langen Atmosphärenexpositionszeiten, wodurch das Pulver einer Verunreinigungsgefahr ausgesetzt ist. Neben anorganischen und organischen Verschmutzungen, können Oxidationsvorgänge oder die Aufnahme von Luftfeuchtigkeit stattfinden. Solche verunreinigten Pulver führen, aufgrund veränderter physikalischer Eigenschaften, zu Prozessabweichungen während des Belichtungsprozesses und in Folge dessen zur Qualitätsminderung der Endprodukte. Um die partiell agglomerierten und gegebenenfalls verunreinigten Partikel wieder in den Wertschöpfungskreislauf zurückzuführen, bedarf es zum Teil sehr aufwendiger und kostenintensiver Aufbereitungsprozesse.

Im Rahmen dieses Leitthemas werden die werkstofftechnischen Konzepte und Vorteile additiv und konventionell gefertigter Komponenten miteinander verbunden. Dies betrifft gleichermaßen alle damit verbundenen Prozesse wie die Konditionierung, Modellierung und Simulation sowie die Analyse und Charakterisierung der Ausgangswerkstoffe und der gefertigten Komponenten. Die Produkte der additiven Fertigung reichen von Prototypen bis hin zu voll funktionstüchtigen Endprodukten, wodurch verschiedenste Anwender von den erzielten Ergebnissen partizipieren und profitieren können.

Die Nachwuchswissenschaftler des Junior WAW widmen sich gemeinschaftlich den wissenschaftlichen Herausforderungen im Bereich der additiven Fertigung unter Einsatz hybrider werkstofftechnischer Ansätze. Dabei spielt sowohl die Kombination des AM („Additive Manufacturing“) mit konventionellen Fertigungsverfahren (z. B. zur Vor- oder Nachbehandlung) als auch die Integration von Sensor- und Analysesystemen in den AM-Prozess eine übergeordnete Rolle. Da die AM-Verfahren immer häufiger für die Erzeugung von besonders komplexen Bauteilgeometrien mit vergleichsweise geringen Bauteilgrößen eingesetzt werden, die konventionellen Verfahren (wie z. B. das Schleifen) jedoch überwiegend für einfache Oberflächen Anwendung finden, ergeben sich hier folglich viele neue Forschungsschwerpunkte. Hinsichtlich der internationalen Positionierung und Vorreiterrolle Deutschlands auf diesem Gebiet, kommt diesen Forschungsschwerpunkten eine besondere Relevanz zu. Dabei besteht ein wesentlicher Aspekt in der Erarbeitung von Strategien zur Verbindung von additiv und konventionell gefertigten Bauteilen, um dadurch effiziente und ressourcenschonende Fertigungsprozesse zu etablieren. Darüber hinaus bedarf es oftmals nachgeschalteter Verfahren zur Funktionalisierung der Bauteiloberflächen, wobei die Oberflächeneigenschaften hinsichtlich ihrer Topographie, Geometrie sowie Funktionalität adaptiert werden.

Höher, schneller, weiter – die Forschungsthemen des deutschen Nachwuchses sind vielschichtig und multidisziplinär

Neben dem Leitthema „Neue und innovative hybride Ansätze für die Werkstofftechnik der Zukunft“ beschäftigen sich die Nachwuchs-

wissenschaftler des Junior WAW zusammen mit den Institutsleitern mit vielschichtigen, komplexen und in der Regel multidisziplinären Forschungsthemen. Einen zentralen Aspekt bildet dabei die Erforschung neuer Funktionswerkstoffe (sog. „smart materials“), Werkstoffe der Energietechnik sowie energieeffizienter Materialien. Die Forschung im Bereich der Funktionswerkstoffe zielt dabei auf die Entwicklung, Modellierung und Analyse neuartiger Materialien mit besonderen bzw. maßgeschneiderten elektrischen, mechanischen, magnetischen, akustischen, optischen oder biologisch-chemischen Eigenschaften ab. Durch die gezielte Einstellung oder Beeinflussung dieser Eigenschaften sollen die Materialien für neue Anwendungen zugänglich gemacht werden. Beispiele der im Junior WAW behandelten Funktionsmaterialien sind Halbleiterwerkstoffe, Formgedächtnislegierungen, biokompatible Materialien, Nanowerkstoffe, selbstheilende Schichten und bionische Strukturen. Werkstoffe der Energietechnik werden überall dort eingesetzt, wo es um die Erzeugung, Umwandlung und Speicherung von unterschiedlichen Energieformen (wie Wärme, Druck, Strom) geht. Dabei sind die Materialien oft hohen und zum Teil sehr komplexen Beanspruchungsprofilen (wie z. B. hohen oder stark wechselnden Temperaturen bei gleichzeitig aggressiv/korrosiv wirkenden Umgebungen oder überlagerter mechanischer Belastung) ausgesetzt, welche ihre Lebensdauer und damit ihre Effizienz erheblich begrenzen können. Der Junior WAW beschäftigt sich hierzu mit der Erforschung neuer hochfester Keramiken, Verbundwerkstoffe und Hochleistungslegierungen, die diesem Beanspruchungskollektiv widerstehen können. Energieeffiziente Materialien besitzen aufgrund von besonderen physikalischen Effekten das Potential, die Aktivierungsenergie für bestimmte Umwandlungsvorgänge zu senken und diese dadurch ggf. erst zu ermöglichen oder deren Reaktionskinetik zu erhöhen. Dies birgt große Potentiale, um Synthese- und Fertigungsprozesse energieeffizienter zu gestalten. Zu diesem Zweck beschäftigen sich die Junioren des WAW beispielsweise mit schmelzpunktniedrigen Loten, katalytischen Oberflächen oder reaktiven Multilagenschichten.

Aus Sicht des Junior WAW stellt die methodische Vorhersage des Prozessverhaltens und der Materialeigenschaften (Quantification and

prediction in materials design) ein weiteres Thema von zunehmender Bedeutung dar. Ziel hierbei ist es, durch den Einsatz von Modellierungs- und Simulationsverfahren mögliche Potentiale und Schwachstellen bei der Entwicklung von neuen Materialien und Bauteilen bereits vor der eigentlichen Erzeugung bestmöglich abschätzen zu können, um so deren Effizienz zu steigern und trägt damit zur Umsetzung von Industrie 4.0 bei. Dabei spielen methodengestützte Ansätze in der Fertigung eine immer größere Rolle. Eine besondere Herausforderung liegt derzeit darin, nicht nur einzelne Teilschritte, sondern ganze Prozessketten mittels simulativer bzw. modellbasierter oder numerischer Methoden durchgängig und umfassend miteinander zu verknüpfen. Dies stellt jedoch hohe Anforderungen nicht nur an die zugrundeliegenden modellhaften Ansätze und deren Algorithmen, sondern vor allem an das Schnittstellenmanagement, wo die verschiedenen Simulationsdaten übergeben werden.

Weitere Themenkomplexe des Junior WAW bilden die Erforschung von „Recyclingkreisläufen von Materialien“ oder die „online Prozessüberwachung und -steuerung mittels integrierter Sensoren“, die insbesondere bei dem gewählten Leitthema eine wichtige Rolle spielen. Letzteres soll jedoch nicht nur zur Prozess- und Bauteilverbesserung beitragen, sondern zugleich wichtige aktuelle Fragestellungen der digitalen Produktion (Industrie 4.0), des „Internets der Dinge“ und der Logistik 4.0 flankieren bzw. hier zum Fortschritt des Standes der Technik beitragen.

Darüber hinaus widmet sich der Junior WAW natürlich auch vielen klassischen bzw. bereits etablierten Forschungsthemen wie der Entwicklung von Hochleistungsmaterialien und Materialverbänden (zum Schutz gegen Verschleiß, Korrosion und Wärme), der Analyse von Mikrostruktureffekten und -defekten sowie der zerstörenden und zerstörungsfreien Werkstoffcharakterisierung und Werkstoffanalytik im statischen und dynamischen Umfeld. Die Verbesserung und Weiterentwicklung der existierenden Mess- bzw. Prüfsysteme stellt ein besonders innovatives Forschungsgebiet dar. Einen zentralen Schwerpunkt bildet dabei die Übertragung und Normung der Systeme auf andere Werkstoffklassen und vor allem auf andere Skalen wie z.B. den Nanowerkstoffen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Nachwuchswissenschaftler zusammen mit den WAW-Mitgliedern in großer thematischer Breite und Tiefe die internationale Entwicklung im Bereich der Werkstofftechnik mit vorantreiben. Dabei liegt die grundlegende und übergeordnete Vision des Vereins darin, Werkstoffe, Bauteile und die damit verbundenen Fertigungs-, Analyse- und Simulationsprozesse stetig besser, (energie-)effizienter und beherrschbarer zu machen. Auf diese Weise sollen Werkstoffe und -verbünde mit neuartigen bzw. verbesserten Funktions- und Struktureigenschaften hervorgebracht werden. Die Kombination neuer, hochinnovativer Technologien (sog. Future Emerging Technologies) mit konventionellen Ansätzen soll dazu verhelfen, die Potentiale in der Werkstofftechnik weiter auszuschöpfen.

Bedarf an neuen und geeigneten Förderprogrammen für die Nachwuchswissenschaftler

Die Nachwuchswissenschaftler des Junior WAW sind nicht nur davon überzeugt, dass das von ihnen gewählte Leitthema „Neue und innovative hybride Ansätze für die Werkstofftechnik der Zukunft“ einen besonders innovativen und zukunftsrelevanten Charakter besitzt, sondern dass dieses, auf den Expertisen der Nachwuchswissenschaftler basierende Thema, zugleich ein hervorragendes Fundament für die langfristige Zusammenarbeit im gesamten Verein bildet. Offen verbleibt die Frage nach geeigneten, koordinierten Förderprogrammen, die sich speziell an Nachwuchswissenschaftler richten, ihnen dazu verhelfen, selbstständig Forschungsideen voranzutreiben und ihnen gegebenenfalls eine Zukunftsperspektive in der Wissenschaft bieten.

Nachwuchsförderprogramme zur Personalförderung mit Investitions- und Sachmittelzulage werden seit Jahren von verschiedenen Förderinstitutionen in Deutschland und in der EU angeboten. Während einige Programme mit spezifischen Forschungsthematiken direkt ausgeschrieben werden (z. B. vom Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF), sind für andere Programme (wie z. B. von der Deutschen Forschungsgemeinschaft - DFG) Initiativbewerbungen mit eigenen Forschungsthemen vorgesehen. Allen Programmen ist dabei gemein, dass die Förderung darauf basiert, einem Nachwuchswissenschaftler die Möglichkeit zu gewähren, ein spezifisches

Forschungsthema unter Leitung einer Nachwuchsgruppe zu bearbeiten. Dabei bieten einige der Programme den Nachwuchsgruppenleitern in Abstimmung mit der Hochschule sogar eine „Tenure-Track“ Option.

Leider eignen sich diese Programme weder hinsichtlich ihres Förderungszwecks, Forschungsumfangs noch Projektbudgets als koordinierte Programme für die explizite Förderung eines ganzen Konsortiums aus Nachwuchswissenschaftlern. Im Rahmen der bestehenden Förderprogramme großer deutscher Förderungsinstitutionen, wie z. B. der DFG, besteht zwar die Möglichkeit für die Nachwuchswissenschaftler eigene Teilprojekte einzuwerben. Jedoch hängt die Art und Weise, in der die Nachwuchswissenschaftler in die Projekte eingebunden werden können, in hohem Maß von ihrem Beschäftigungsverhältnis ab. Während drittmittelfinanzierte Nachwuchswissenschaftler das eingeworbene Projekt im Rahmen einer Eigenfinanzierung selbst bearbeiten können, besteht die Möglichkeit das Projekt in leitender Position zu betreuen lediglich bei einer Haushaltsfinanzierung. Letzteres ist zwar von den Fördergebern explizit gewünscht, in der Realität jedoch selten umsetzbar. Dies schafft Barrieren und macht es für die Nachwuchswissenschaftler oft schwer, sich bereits in den frühen Jahren ihrer Karriere von komplexen, interdisziplinären Forschungsfragestellungen in großen Projektverbänden widmen und dabei Forschungsnetzwerke bilden zu können. Abgesehen davon sehen diese Programme die Förderung eines heterogenen Verbunds aus Nachwuchswissenschaftlern wie dem Junior WAW mit seinen weit gefächerten Forschungsthematiken nicht vor. Ein weiteres Manko sind fehlende Tenure-Track Optionen. Viele Nachwuchswissenschaftler wünschen sich nach dem Abschluss der Promotion, ihre akademische Laufbahn mit einer festen Zukunftsperspektive im akademischen Mittelbau oder als Professor weiter fortführen zu können. In den meisten Fällen fehlt es hierzu jedoch an einer entsprechenden Anschlussfinanzierung an den Hochschulen. Daneben steigen mit der Erfahrungsstufe der Nachwuchswissenschaftler gleichzeitig auch die Personalkosten an, wodurch die Finanzierung weiter erschwert wird. Daher ist es wenig verwunderlich, dass viele hervorragend ausgebildete Wissenschaftler keine andere Möglichkeit sehen, als Deutschland

zu verlassen, um ihre Forschungsarbeiten und damit ihre Karriere woanders weiterzuführen. Denn viele Länder sind hinsichtlich der Nachwuchsförderung bzw. der Überführung der Wissenschaftler in eine Daueranstellung deutlich fortschrittlicher als Deutschland. Ein weiterer Aspekt, der bei den existierenden koordinierten Forschungsprogrammen zu bemängeln ist, ist der oft hohe zeitliche und koordinative Aufwand für die Projektinitiation, der sich durchaus über mehrere Jahre erstrecken kann und für die Nachwuchswissenschaftler eine Ungewissheit bei der Finanzierung darstellt. In vielen Fällen haben sich die Nachwuchswissenschaftler in der Zwischenzeit schon für eine alternative Laufbahn in der freien Marktwirtschaft entschieden.

Daher besteht der Wunsch an die Regierung bzw. an die großen Förderungsinstitutionen nach der Einrichtung neuer, geeigneterer, koordinierter Nachwuchsförderprogramme, welche die Bedürfnisse und Wünsche der Nachwuchswissenschaftler viel stärker in Betracht ziehen und berücksichtigen. Dabei sollten derartige Programme einerseits in der Lage sein, einen heterogenen Verbund aus Nachwuchswissenschaftlern umfassend fördern zu können. Andererseits sollten diese Programme auch die Beschäftigungsverhältnisse an den Universitäten berücksichtigen bzw. aus deren Sicht umsetzbar sein. Nicht zuletzt müssen die Hürden bei der Antragstellung der bisherigen Qualifikationsdauer der Nachwuchswissenschaftler entsprechen, d. h. die geforderten wissenschaftlichen Reputationen sowie die langen Vorlaufzeiten für die Beantragung, gesenkt werden.

***Autoren: Dr.-Ing. Ingor Baumann, Lukas Wojarski, Christopher Schaak und die Mitglieder des Junior WAW
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Technische Universität Dortmund***

KONTAKT

Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Dr.-Ing. Ingor Baumann
Leonhard-Euler-Straße 2
D-44227 Dortmund
Tel.: +49 (0)231 755-5318
Fax: +49 (0)231 755-4079
ingor.baumann@tu-dortmund.de
http://www.lwt.mb.tu-dortmund.de/



Surface and Material Challenges ... SOLVED!

Whatever your industry, application or process, Oerlikon Metco knows that solving your toughest challenges starts with the right material choice. Benefit from our deep understanding of your industry and processing needs, our strong technical competencies, and our commitment towards continuous innovation to provide you with outstanding reliability and performance.

Talk to us about your material challenges for

Thermal Spray ■ Laser Cladding ■ PTA ■ Brazing ■ Conductive Fillers ■ MIM ■ HIP ■ Weld Hardfacing

The right materials for your application and process!



www.oerlikon.com/metco

oerlikon
metco

» Ganz schön schlau: SMART MATERIALS « Selbstheilend, kommunizierend und bald noch mehr?

Materialien werden immer schlauer – und sie werden die Grenzen der Technik neu definieren. Gleichzeitig verändern sie schon heute die Industrie, und nicht zuletzt die Materialwissenschaft selbst. Professor Jochen Schneider lehrt und forscht am Lehrstuhl für Werkstoffchemie der RWTH Aachen, einer der renommiertesten Technischen Universitäten Deutschlands. Für uns wagt er einen Blick in die Zukunft.

Professor Schneider, Sie beschäftigen sich mit smart materials, also „schlauem Materialien“. Was versteht man darunter?

Schlaue oder „intelligente“ Materialien sind ein sehr breites Feld und eng verknüpft mit den ganz großen Fragestellungen unserer Zeit – Umwelt, Energie, Mobilität und Gesundheit. Generell versteht man darunter Materialien, die auf veränderte Bedingungen reagieren, ohne dass der Mensch eingreifen muss. Ich selbst beschäftige mich mit den sogenannten Self-Reporting Materials – Materialien, die kommunizieren.

Kommunizierende Materialien – was kann man sich darunter vorstellen?

Da gibt es ein gutes Beispiel: Wenn Sie zum Arzt gehen, misst der verschiedene Vitalfunktionen Ihres Körpers – Herzschlag, Blutdruck, und so weiter. Anhand dieser Messungen

erkennt er, wie es Ihrem Körper geht. Ähnlich funktionieren die Self-Reporting Materials. In Zukunft können Werkstoffe und sogar ganze Maschinen „berichten“, wie es ihnen geht.

Die Grundlage unserer Forschung sind die sogenannten selbstheilenden Materialien. Eines der Grundprobleme von technischen Konstruktionen ist die Materialermüdung. Nehmen wir beispielsweise eine Flugzeugturbine: Die Komponenten der Turbine werden durch Sand und andere Partikel in der Luft stark in Mitleidenschaft gezogen, und mit der Zeit entstehen Risse in der Oberfläche. Wird nun in die Oberflächenbeschichtung ein sogenannter „healing agent“ eingebracht, reagiert dieser, sobald sich ein Riss öffnet und der „healing agent“ auf Sauerstoff trifft. Durch diese chemische Reaktion wird der Riss selbstständig geschlossen und damit geheilt.

Sofern dieser „Heilungsprozess“ eine Eigenschaftsänderung bewirkt, die sich messen lässt, ist es dann nur noch ein relativ kleiner Schritt hin zu kommunizierenden Materialien.

Wie kommunizieren diese Materialien denn?

Hier gelang uns ein erster Durchbruch 2003, als wir ein Material synthetisieren konnten, das durch chemische Modifikation magnetisch wird. Die Magnetisierung, das heißt die Stärke des magnetischen Signals, liefert uns dann sozusagen einen Bericht zu den Vitalfunktionen: Je weiter der „Heilungsprozess“ fortgeschritten ist, umso weniger magnetisch ist es (vorausgesetzt, die Heilungsprodukte tragen nicht zum magnetischen Signal bei). Das Prinzip ist ähnlich wie bei einem altmodischen Kassettenrekorder, der Informationen auf den magnetischen Kassettenbändern in Musik umwandelte.

Was bedeutet das für die Industrie?

Selbstheilende und kommunizierende Materialien stellen für die Maschinenkonstruktion einen Paradigmenwechsel dar. Wenn sich Werkstoffe selbst heilen und Materialien und ganze Maschinen über ihren Zustand berichten, können die Konstrukteure härter „ans Limit“ gehen. Reserven, die heute nötig sind, müssen kaum oder überhaupt nicht mehr einberechnet werden. Konkret heißt das, dass Komponenten und Maschinen leichter werden, entsprechend muss beispielsweise bei einem Auto oder einem Flugzeug weniger Masse bewegt werden, und das führt zu deutlichen Einsparungen, etwa bei Treibstoffen.



Ich denke aber auch an andere Möglichkeiten, wenn Maschinen oder Geräte aktiv kommunizieren können. Ein Bohrer, zum Beispiel, könnte Bescheid geben, bevor seine Standzeit abläuft – idealerweise direkt beim Beschichtungsunternehmen, und nicht nur beim Anwender. Oder eine Windenergieanlage meldet dem Ingenieur auf sein Mobiltelefon, dass sie gewartet werden muss; der Mechaniker muss also erst dann in Aktion treten, wenn es wirklich nötig ist – bei seinem relativ exponierten Arbeitsort liegt der Vorteil auf der Hand. Kommunizierende Materialien bedeuten also auch, dass die heute üblichen periodischen Wartungsintervalle entfallen können – der Mensch muss erst dann eingreifen, wenn es wirklich nötig ist.

Wird diese Zukunft auch das Berufsbild des Materialwissenschaftlers beeinflussen?

Und ob! Wir sprechen ja heute schon von der „Industrie 4.0“, bei der alles miteinander kommuniziert, alles miteinander vernetzt ist. Es werden Unmengen von Daten erhoben, und in Zukunft wird die Industrie dank dieser Daten noch viel präziser arbeiten als heute, alles wird „nach Plan“ laufen, und die Ressourceneffizienz maximiert. Das birgt für die Industrie ein enormes Potential. Aber bereits heute sehen wir, dass diese Datenmengen nicht immer optimal genutzt werden. Das heißt, wir müssen die Daten nicht nur erheben, sondern die relevanten Daten auch kritisch durchleuchten, damit Prozesse und Werkstoffe optimiert werden können. In der Verbindung von Materialwissenschaften und Daten – sowohl Material als auch Produktions- und Performancedaten – wird ein neuer Berufszweig entstehen, ein neues Profil für den Materialwissenschaftler: Es wird nicht mehr reichen, das Material zu kennen, Simulation und Datenanalyse werden immer wichtiger werden. Eine große Herausforderung ist sicher die Datenanalyse und das Herausfiltern derjenigen Daten, die performance-definierend sind.

Das klingt jetzt aber ziemlich trocken...

(lacht) Nun ja, zugegeben: In den letzten Jahrzehnten wurde in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik mehr und mehr gerechnet. Das ist anspruchsvoll und oft nicht einfach zu vermitteln. Trotzdem haben wir keine Nachwuchssorgen! Allein in diesem Jahr haben sich fast 250 Erstsemester in Aachen in ei-

nem Studiengang im Bereich Werkstofftechnik eingeschrieben. Unsere Doktoranden werden teilweise noch vor ihrer Promotion von Unternehmen unter Vertrag genommen.

Die Universitäten im deutschsprachigen Raum praktizieren die Einheit von Forschung und Lehre. Das ist ein unschätzbare Vorteil, wenn es darum geht, dicht an neuen Entwicklungen und den Bedürfnissen der Industrie zu sein. In Aachen werden Lehrende berufen, die sich mit neuen Themen befassen, und diese so an die Studenten weitergeben – der Kreislauf schließt sich. Und das ist auch beim Thema Smart Materials so.

Und wie sieht die Zukunft der Materialwissenschaften aus – sagen wir im Jahr 2040?

Natürlich kann ich nicht in die Zukunft blicken – aber es gibt da ein Thema, das unglaublich spannend ist, allerdings auch sehr wenig vorhersagbar. Und es wird uns alle beschäftigen: die breite Thematik der Werkstoffe in Verbindung mit Gesundheit und Medizin.

Vor kurzem habe ich einer Prüfung beigewohnt, in der der Doktorand einige Thesen zur Herstellung von menschlichen Organen mittels 3D-Druck aufgestellt hat. Spinnt man diese Idee weiter, gelangen wir bald zu einem Punkt, wo sich der Mensch seine „Ersatzteile“ selbst druckt – eine Niere hier, ein Auge dort – und so eventuell 150 Jahre alt werden kann, oder sogar mehr. Von da zum Cyborg ist es dann nicht mehr weit.

Natürlich ist das noch weit in der Zukunft. Doch bereits jetzt arbeiten Materialwissenschaftler an Oberflächenlösungen für Implantate, die im menschlichen Gehirn eingebaut werden können. Dort messen sie Hirnströme, mit denen ein Roboter gesteuert werden kann – oder mit Hilfe derer ein Tetraplegiker, der weder Arme noch Beine bewegen kann, seinen Rollstuhl bedienen könnte. Wie „Cyber Engineering“ die menschliche Entwicklung verändern wird, ist nicht vorhersehbar. Wie gesagt, das sind Zukunftsszenarien, die wir alle wohl nicht mehr erleben werden. Aber es sind Fragen, mit denen sich die Materialwissenschaft bereits heute auseinander setzen muss – auch in ihrer moralischen Implikation.

Professor Schneider, wir danken für das Gespräch!



Prof. Jochen Schneider

Prof. Jochen M. Schneider, Jahrgang 1969, studierte Ingenieurwissenschaften in Deutschland, England und den USA und wurde 1998 promoviert. Bis 2002 war er unter anderem Gastwissenschaftler am Lawrence Berkeley National Laboratory in Berkeley, Kalifornien (USA) und Assistenzprofessor und Dozent an der Linköping Universität in Schweden. Seit 2002 ist er Professor am Lehrstuhl für Werkstoffchemie der RWTH Aachen. Sein Forschungsschwerpunkt ist das quantenmechanisch geführte Werkstoffdesign. Er wurde 2001 vom Präsidenten der Alexander von Humboldt-Stiftung mit dem Sofja Kovalevskaja-Preis in Würdigung herausragender Leistungen in der Forschung ausgezeichnet. 2013 wurde Schneider zum Fellow der American Vacuum Society (AVS) ernannt, seit 2015 ist er Max Planck Fellow des Düsseldorfer Max-Planck-Instituts für Eisenforschung, wo er eine Arbeitsgruppe zum Thema Self-Reporting Materials leitet. Prof. Schneider ist auch Standortsprecher des Sonderforschungsbereich/Transregio 87: „Gepulste Hochleistungsplasmen zur Synthese Nanostrukturierter Funktionsschichten“.

*Weiterführende Informationen: Lehrstuhl für Werkstoffchemie, RWTH Aachen und Max-Planck-Fellow-Gruppe: „Kommunizierende“ Materialien:
www.mch.rwth-aachen.de*

KONTAKT

Oerlikon Metco AG
Rigackerstrasse 16
CH-5610 Wohlen
Switzerland
Tel.: +41 (0)56 618 81-81
Fax: +41 (0)56 618 81-00
info@oerlikon.com
www.oerlikon.com/metco



Jahresmagazin Werkstofftechnik

Lampertheim, Mai 2018

© ALPHA Informationsgesellschaft mbH und die Autoren für ihre Beiträge

ISSN: 1618-8357

Idee, Konzeption und redaktionelle Koordination

Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)



Projektleitung

Miriam Knab

Redaktionelle Mitarbeit

Dr.-Ing. Ingor Baumann

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Tillmann

Titelseite

Christian Seipp

Bildquellen: WAK (Hauptmotiv); Technische Universität Dortmund,

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (Blickfang und Einblendung)

Anzeigenverwaltung und Herstellung

ALPHA Informationsgesellschaft mbH

Finkenstraße 10, 68623 Lampertheim

Tel.: 06206 939-0, Fax: 06206 939-232

info@alphapublic.de, www.alphapublic.de

Die Informationen in diesem Magazin sind sorgfältig geprüft worden, dennoch kann keine Garantie übernommen werden. Eine Haftung für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

Die einzelnen Bildquellen sind über das Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV) zu erfragen. Die Auskunft ist kostenfrei und kann per E-Mail erfragt werden. Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, des Vortrags, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten. Eine Vervielfältigung des Werkes oder von Teilen des Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechts der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

Ingenieur
wissenschaften
2018

Projekt-Nr. 96-519

» Die richtige Materialwahl für ein optimales Ergebnis «

Die Auswahl des richtigen Materials bei der Produktion ist entscheidend für das Endergebnis. Doch die Auswahl gestaltet sich oft schwierig, denn in Werkstoffdatenbanken sind mehr als 85.000 kommerzielle Möglichkeiten für Kunststoffe aufgeführt. Bei der Wahl des richtigen Werkstoffs, müssen Informationen aus einer Reihe unvollständiger Quellen zusammengeführt werden. Die maximale kurzzeitige Gebrauchstemperatur ist einer der wichtigsten Parameter. Traditionell versteht man darunter die Formbeständigkeit bei Wärme (DTUL). Ein weiterer verwandter Parameter ist die Vicat-Erweichungstemperatur. Mit der DTUL wird die mechanische Formbeständigkeit gemessen, der Vicat-Punkt liegt näher am tatsächlichen Schmelz- und Erweichungspunkt des Polymers. Bei einem Werkstoff wie dem glasfaserverstärktem PBT, einem teilkristallinen Werkstoff, liegen diese Werte sehr nahe am Kristallitschmelzpunkt des Polymers von 223°C. Bei höheren Temperaturen kommt dieses Polymer somit nicht in Frage.

Streckgrenze und Zugfestigkeit

Zu den langfristigen Leistungseigenschaften eines Werkstoffes unter ständiger Spannung zählt auch die sogenannte „Kriechfestigkeit“. Der Zusammenhang zwischen Spannung, Zeit und Temperatur ist komplex und die Daten stehen häufig nicht zur Verfügung. Bei duktilen Werkstoffen ist die Streckgrenze des Werkstoffs und bei spröden Materialien die Spannung die Obergrenze. Beide Werte definieren den Punkt, bei dem der Werkstoff katastrophal versagt. Wird diese Grenze überschritten, kommt der Werkstoff nicht in Betracht. Abgesehen von diesem einfachen Filter, müssen langfristige Temperatureinflüsse berücksichtigt werden.

Je nach den thermischen und mechanischen Eigenschaften des spezifischen Materials nimmt das zulässige Spannungs-

niveau ab. Der Zusammenhang zwischen kurz- und langfristiger Leistung hat gezeigt, dass die langfristigen Arbeitsspannungsniveaus bei einem Thermoplast zwischen 20 und 40 Prozent der kurzfristigen Streckfestigkeit oder Bruchfestigkeit liegt.

Zusammenhang zwischen Temperatur und Alterung

Alle Polymere reagieren empfindlich auf Sauerstoff und diese Empfindlichkeit steigt bei höheren Temperaturen. Die mit der Alterung einhergehende Zersetzung wird von der Eigenschaft „relativer Temperaturindex“ (RTI) erfasst. Der RTI-Test beginnt mit der Messung der wichtigsten Basiseigenschaften wie Zugfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit und Lichtbogenfestigkeit. Anschließend werden Proben bei unterschiedlichen Temperaturen gealtert und die Basiseigenschaften überwacht, bis sie auf 50 Prozent der Ausgangswerte abfallen. Die zum Erreichen einer 50-prozentigen Leistung benötigte Zeit wird „Zeit bis zum Ausfall“ genannt.

Die RTI-Werte können zur Vorhersage der langfristigen Leistung herangezogen werden, bei der die Alterung das Hauptproblem ist. Der Alterungsprozess folgt einer empirischen Regel, die Zersetzung und Temperatur in Beziehung setzt. Die Abbaugeschwindigkeit verdoppelt sich mit jedem Temperaturanstieg um 10°C.

Bei spezifischen Anwendungen können neben den thermischen und mechanischen Eigenschaften noch einige andere Eigenschaften wichtig sein. Ein Berater spricht in der Regel keine Werkstoffempfehlung aus, ohne die komplette Anwendungsanforderung für das Teil verstanden zu haben. Manchmal kann es kostspielig sein, ein Teil zuerst vollständig zu entwickeln, um danach eine Werkstoffauswahl zu treffen. Aus diesem Grund sollte man immer einen qualifizierten Berater zur Seite haben oder selbst über ausreichend Fachwissen verfügen.

**3D-DRUCK,
CNC-BEARBEITUNG,
KUNSTSTOFF-
SPRITZGUSS:
WIR HABEN DIE
SKALIERBARE
TECHNOLOGIE**

**Versand von 3D-Druck,
CNC-bearbeiteten
und Spritzguss-Teilen
schon ab 1 Tag.**

Wir verstehen, wie wichtig der Schritt von der Konzeption zur Umsetzung ist. Daher bieten wir Ihnen belastbare, langlebige Metall und Kunststoffteile zur Prüfung der Passform und Funktionstests in einer auf Sie abgestimmten Zeit. Innerhalb kürzester Zeit halten Sie **3D-gedruckte, CNC-bearbeitete oder Kunststoff-Spritzgussteile** in den Händen.

 **PROTOLABS**
Manufacturing. Accelerated.

protolabs.de
+49 (0) 89 90500222
customerservice@protolabs.de

Interaktives Angebot inkl.
Designanalyse



» Vielfalt und Vielseitigkeit – Werkstofftechnik als Querschnittstechnologie am Institut für Kunststoffverarbeitung «

Produkte aus Kunststoff gibt es einfach überall. Egal, ob sie im Haushalt, für Spielwaren, in Fahrzeugen, als Verpackung, in Elektronik-Komponenten, in der Baubranche oder für medizinische Anwendungen genutzt werden, die Anforderungen sind genauso spezifisch wie vielfältig. Leichtigkeit, Schutzfunktion, hohe Barrierewirkung, Dämmeigenschaft, spezielle mechanische Kenndaten oder auch Kälte- und Hitzebeständigkeit lassen sich nur durch die Wahl des passenden Werkstoffs oder die optimale Werkstoffkombination erzielen. Werkstoffkenntnisse sind also essentiell.

Deshalb gehört die Werkstofftechnik genauso zu den Forschungsschwerpunkten des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen wie die verschiedenen Verarbeitungsverfahren und alle damit verbundenen Technologien. Europaweit ist das IKV das führende Forschungs- und Ausbildungsinstitut auf dem Gebiet der Kunststofftechnik. Mehr als 300 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beantworten hier Fragestellungen rund um Kunststoff und Kautschuk. In allen Fachabteilungen, von der Extrusion und Kautschuktechnologie über faserverstärkte Kunststoffe und Polyurethane bis hin zu Formteilauslegung und Spritzgießen, spielt die Werkstofftechnik eine große Rolle und wird in nahezu jedes Forschungsprojekt mit einbezogen. Gebündeltes Know-how ist im Zentrum für Kunststoffanalyse und -prüfung (KAP) des IKV angesiedelt. Hier stehen nicht nur sämtliche Prüfverfahren, wie Mikroskopie, Spektroskopie, mechanische Prüfmaschinen sowie thermische, rheologische und physikalische Verfahren bereit, sondern auch erfahrene Mitarbeiter, die die Ergebnisse zu analysieren und zu interpretieren wissen. Physiker, Chemiker, Ingenieure, Techniker und Werkstoffprüfer bilden im KAP ein interdisziplinäres Team, das der Vielseitigkeit der Problemstellungen sowohl in der Breite als auch in der Tiefe gerecht wird. Nur so lassen sich optimierte Werkstoffe für individuelle Anwendungen finden. Das KAP begleitet aber nicht nur die internen Forschungsprojekte, es bietet auch Unternehmen aus der Branche einen umfassenden Service im Bereich Kunststoffanalytik und -prüfung an.

Im Folgenden stellen einige Beispiele aus dem Forschungsalltag des IKV die Verknüpfung von Kunststoff- und Werkstoffwissen unter Beweis.

Elektrische Leitfähigkeit direkt einarbeiten

Kunststoffe sind von sich aus nicht elektrisch leitfähig, lassen sich jedoch durch eine entsprechende Additivierung leitfähig ausrüsten, was für viele Anwendungen sehr interessant ist. Ein Beispiel sind flexible Leiterplatten auf Basis zweischichtiger Folien mit lokal abhängigen anisotrop und isotrop leitfähigen Eigenschaften, die das IKV in einem Forschungsvorhaben in Zusammenarbeit mit dem Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und

Entwicklung von Mikrosystemen der RWTH (KEmikro) entwickelt. Die eine Schicht des Verbunds zeichnet sich hier durch einen sehr hohen Füllstoffgehalt aus, der aufgrund der hohen Dichte eine isotrope Leitfähigkeit ermöglicht. Die zweite Schicht weist einen niedrigeren Füllstoffgehalt auf, wodurch sie zunächst nicht leitfähig ist und erst durch die Weiterverarbeitung mittels Ultraschallheißprägen funktionalisiert wird. Als elektrisch leitfähige Füllstoffe wurden Kohlenstofffasern, CNT und Ruß betrachtet.

Wie die Ergebnisse in **Abb. 1** am Beispiel einer PP-Folie mit 10 Gew.-% Kohlenstofffasern zeigen, ist die Leitfähigkeit in Dickenrichtung (z-Richtung) deutlich geringer als die Ober-

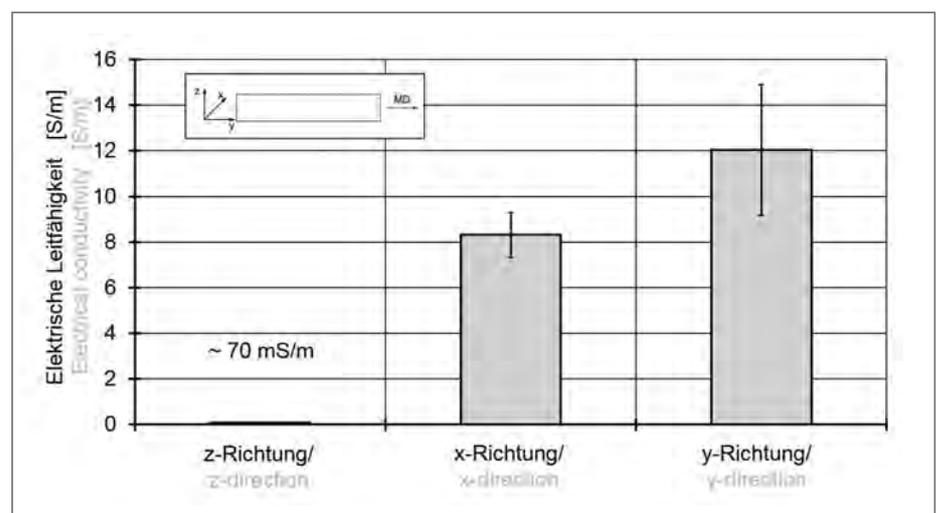


Abbildung 1: Richtungsabhängige elektrische Leitfähigkeiten von PP-Folien mit 10 Gew.-% Kohlenstofffasern

flächenleitfähigkeit in x- und y-Richtung. Grund hierfür sind prozessbedingt entstehende füllstoffarme Randschichten, die die Eignung der Folie für elektrische Kontakte einschränken. Um die Durchgangsleitfähigkeit zu erhöhen, untersucht das IKV derzeit ein anderes Herstellungsverfahren.

Auch elektrisch leitfähige Elastomer-Hybridmaterialien sind ein vielversprechender Werkstoff, insbesondere für die Automobilbranche. Bisher ist die Herstellung beheizbarer Fluidleitungen vergleichsweise kompliziert, da neben der Extrusion des Schlauches auch Wickelverfahren nötig sind. Gelingt es hingegen, das Elastomer elektrisch leitfähig auszurüsten, so ist die direkte Extrusion beheizbarer Leitungen möglich (Abb. 2). Um eine ausreichend hohe elektrische Leitfähigkeit zu erzielen, werden verschiedenste Füllstoffe verwendet, auch lassen sich Füllstoffe unterschiedlicher Geometrie wie zum Beispiel Fasern und Pulver kombinieren, um Synergieeffekte zu erzielen.

Erste Untersuchungen mit metallischen und kohlenstoffhaltigen Füllstoffen in einem EPDM-Compound zeigen, dass es für eine vollständige Füllstoffinkorporation von entscheidender Bedeutung ist, den Mischprozess an die verwendeten Füllstoffe anzupassen. Bei hohen Füllstoffgehalten kommt es neben der Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit zu einem Viskositätsanstieg, was wiederum einen signifikanten Einfluss auf die Füllstoffinkorporation hat. Daher untersucht das IKV im weiteren Projektverlauf die Weiterverarbeitung im Extrusionsprozess näher und analysiert die

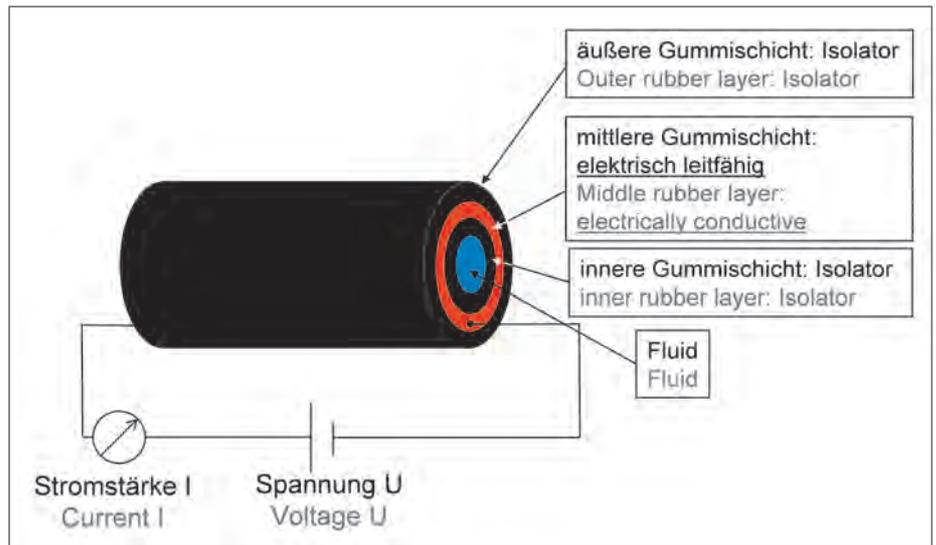


Abbildung 2: Beheizbare Fluidleitung, herstellbar im Extrusionsprozess

Schädigung der Füllstoffe durch Verarbeitungsprozesse. Letztlich sind, neben der Verarbeitbarkeit in konventionellen Anlagen, die elektrische Leitfähigkeit, aber auch die elastischen Eigenschaften der Elastomere von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung elastomerer Hybridmaterialien.

Entwicklung hybrider Werkstoffverbunde für Ultraleichtbauanwendungen

Die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe, wie beispielsweise Metalle und Kunststoffe, ist seit langem ein Ansatzpunkt für die Herstellung leichter und gleichzeitig hochbelastbarer Strukturbauteile. Als Metallkomponente derartiger Kunststoff-Metall-Hybride gewinnt

das Nichteisenmetall Magnesium aufgrund seiner geringen Dichte (ein Viertel der Dichte von Stahl) an Relevanz, um zusätzliches Gewicht einzusparen. In dem Kooperationsprojekt KuMag beschäftigen sich Forscher mit der Charakterisierung des Werkstoffverbundes sowie seiner Verarbeitung in einem kombinierten Tiefzieh- und Hinterspritzprozess. Dazu muss das am IKV vorhandene Werkzeug auf die Randbedingungen der Umformung von Magnesium angepasst werden. Neben der Anpassung der Prüfkörpergeometrie, beispielsweise des Stempelradius, stellt die Umformtemperatur von mehr als 225 °C die größte Herausforderung dar. Die Erwärmung der Magnesiumhalbzeuge außerhalb des Spritzgießwerkzeuges (Abb. 3) ermöglicht

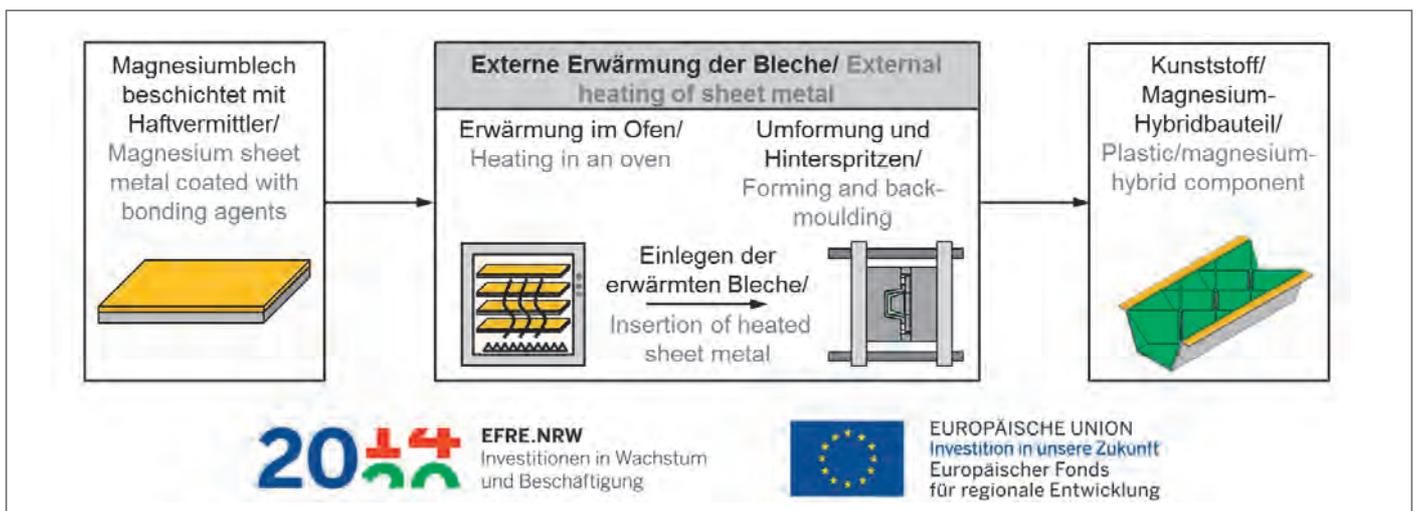


Abbildung 3: Prozessroute bei der externen Erwärmung von Magnesiumhalbzeugen

in Versuchen keine genaue Einstellung der Halbzeugtemperatur. Daher wird derzeit ein hochdynamisches Temperierkonzept entwickelt, mit welchem die Halbzeugtemperatur im Kombinationswerkzeug gezielt einstellbar ist.

Für die flächige Verbindung von Magnesium und Kunststoff im kombinierten Prozess wird wiederum ein bestimmter Werkstoff benötigt, in diesem Falle ein Haftvermittlersystem auf Basis einer Konversionsbehandlung von Magnesium. Durch die gezielte Modifikation der Vorbehandlung kann die Verbundfestigkeit bei der Untersuchung mittels hybrider Überlapp-Zug-Scherprüfkörper in den Bereich kommerziell erhältlicher Systeme gesteigert werden.

Schaumspritzgießen mit Duroplasten

Ebenfalls zur Gewichtsreduktion werden häufig Kunststoffkomponenten aus geschäumten Polymeren hergestellt, da diese bei geringem Gewicht hohe Festigkeiten aufweisen. In der Thermoplastverarbeitung ist das Schaumspritzgießen als Verfahren längst etabliert. Aber gerade in der Automobilindustrie, in der das Gewicht der Bauteile eine große Rolle spielt, reicht das Eigenschaftsprofil der Thermoplaste häufig nicht aus. Die hohe Temperatur- und Medienbeständigkeit sowie die geringe Kriechneigung und das geringe Schwindungsverhalten der Duroplaste entsprechen den Einsatzbedingungen im Motorraum deutlich besser.

Deshalb untersucht ein erst kürzlich angelaufenes Forschungsprojekt am IKV die Übertragbarkeit des chemischen und physikalischen Schaumspritzgießens auf die Duroplastverarbeitung. Erste Ergebnisse zeigen, dass insbesondere das chemische Schäumen das Potential hat, auch im Duroplastspritzgießen eingesetzt zu werden. Dazu wird ein pulverförmiges chemisches Treibmittel in die rieselfähige Formmasse eingemischt und im bekannten Duroplastspritzgießverfahren verarbeitet. In Versuchsreihen wurden mit diesem Verfahren (Abb. 4) bereits Gewichtsreduktionen von bis zu 20 Prozent erzielt. Als wesentliche Herausforderung bei der Prozessführung hat sich dabei die Abstimmung der Reaktionstemperatur des chemischen Treibmittels und des Duroplasten erwiesen.

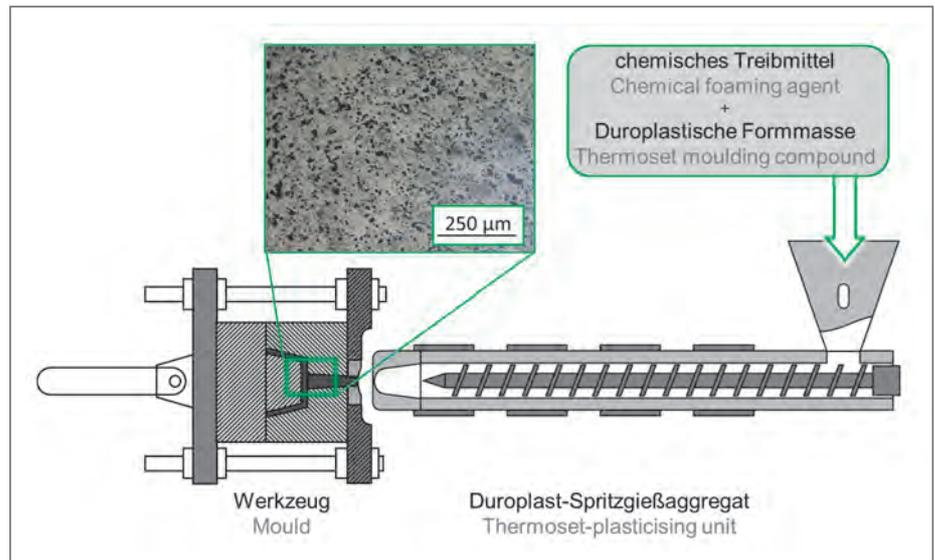


Abbildung 4: Chemisches Schäumen von Duroplasten

Flammgeschütztes Celluloseacetat für Schäumenwendungen

Werkstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe, sogenannte Biokunststoffe, stellen eine ressourcenschonende Alternative zu erdölbasierten Kunststoffen dar und sind in der gesamten Kunststoffbranche ein viel diskutiertes Thema. Biokunststoffe können ein mit herkömmlichen Kunststoffen vergleichbares mechanisches Eigenschaftsprofil erreichen. So weist beispielsweise Celluloseacetat (CA) ähnliche Eigenschaften wie Polystyrol auf. Für den Einsatz von CA in technischen Anwendungen ist es jedoch nötig, den Werkstoff mit einem Flammschutz auszurüsten.

Aufgrund der für die thermoplastische Verarbeitung von CA notwendigen hohen Weichmacheranteile ist der Einsatz zusätzlicher Additive zur FlammSchutzrüstung jedoch nicht sinnvoll.

Ziel eines aktuellen Verbundprojektes ist daher die Bereitstellung von flammgeschütztem, geschäumtem Celluloseacetat mithilfe von neuartigen FlammSchutzmitteln. Das flammgeschützte CA wird dabei speziell für Schaumextrusions- und Schaumspritzgießenanwendungen entwickelt. Erste Ergebnisse zeigen bereits Erfolge hinsichtlich der Schaumstruktur und der FlammSchutzwirkung. So konnten Bauteile

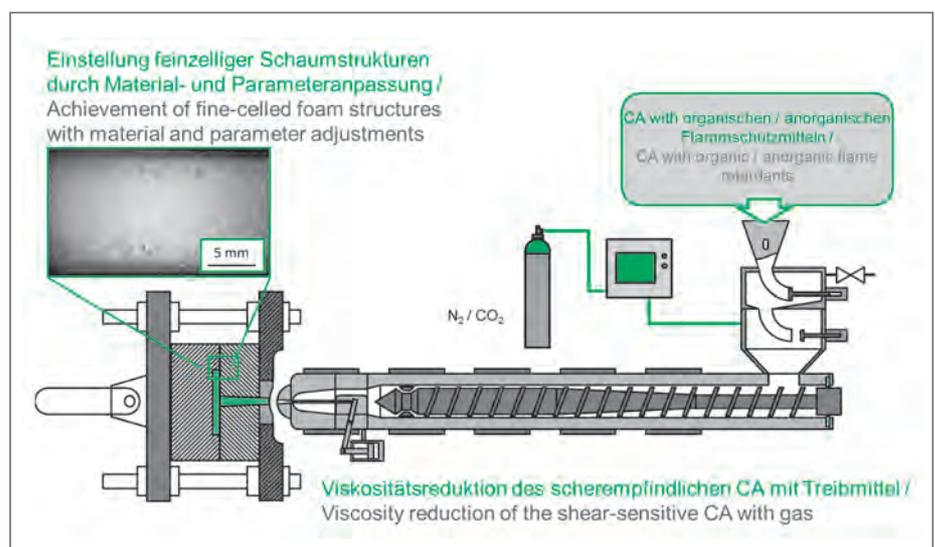


Abbildung 5: Entwicklung von flammgeschütztem Celluloseacetat für Schäumenwendungen

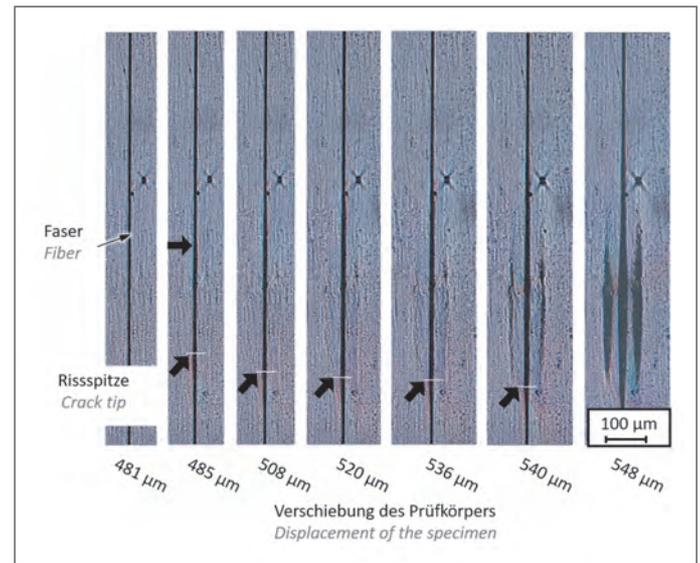
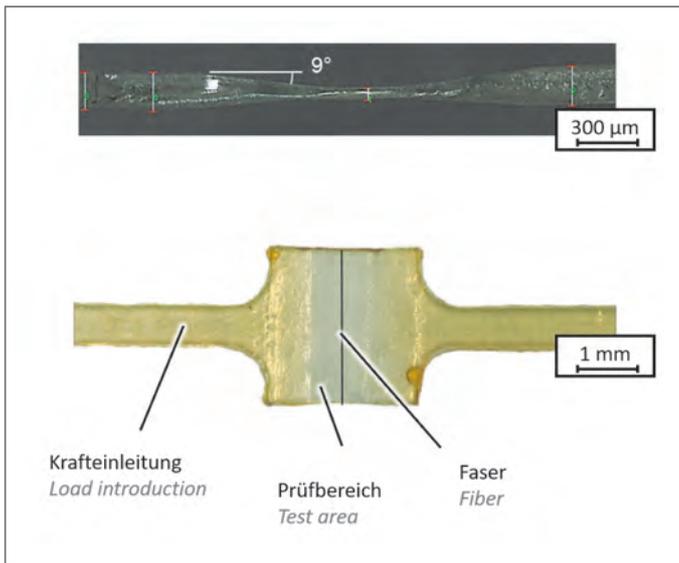


Abbildung 6: Prüfkörpergeometrie

Abbildung 7: Rissinitiation und Risswachstum

mit feiner, homogener Schaumstruktur und Dichtereduktionen von bis zu 60 Prozent hergestellt werden, die eine verbesserte Flamm- schutzwirkung aufweisen (Abb. 5). Die verwendeten physikalischen Treibmittel bewirken zudem eine drastische Senkung der Viskosität, sodass sich mit dem Schaumspritzgießen auch komplexe Bauteile mit hoher Gestaltungs-freiheit herstellen lassen.

Mechanische Charakterisierung des Faser/Matrix-Interfaces von FVK

Ebenfalls interessante und häufig eingesetzte Werkstoffe in der Kunststoffverarbeitung sind faserverstärkte Kunststoffe,

da diese Leichtigkeit mit Festigkeit vereinigen. Sehr wichtig für ihren Einsatz ist eine optimale Bindung zwischen Faser und Matrix. Aktuell herrscht die Annahme, dass sowohl bei statischer als auch bei zyklischer Querbelastung ein Anriss des Interfaces das Versagen der Faser-Matrix-Bindung initiiert. Zum besseren Verständnis der Schädigungsvorgänge und des Risswachstums ist die Kenntnis der mechanischen Parameter an der Grenzfläche notwendig. Hierfür entwickelte das IKV eine Prüfmethode, mit der es möglich ist, die Interfaceeigenschaften an Einzelfaserprüfkörpern zu bestimmen.

Zunächst optimierten die Forscher die Prüfkörpergeometrie (Abb. 6) durch FE-Simulation, damit ein Versagen ausschließlich im Prüfbereich am Faser/Matrix-Interface entsteht. Zur Herstellung der Prüfkörper diente ein eigens entwickeltes Gießwerkzeug inklusive einer Vorrichtung zur Vorspannung der Kohlenstofffasern.

Während der durchgeführten statischen Zugprüfungen quer zur Faserrichtung wurden die Initiierung des Interfaceversagens unter fasersenkrechter Zugspannung sowie die Rissausbreitung mit einer angepassten Aufnahme-technik unter dem Durchlichtmikroskop erfolgreich beobachtet. Abb. 7 visualisiert den Schädigungsprozess, welcher unter Zuhilfenahme der digitalen Bildverarbeitung mit dem globalen Kraft/Weg-Zustand des Prüfkörpers synchronisiert werden kann. Da die mechanischen Kennwerte des Interfaces nicht direkt messbar sind, erfolgte die Berechnung durch mikromechanische FE-Simulationen. Abb. 8 zeigt sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten globalen Zuständen des Prüfkörpers. Der lokale Spannungs- und Dehnungszustand am Interface stammt aus der Simulation und ist mit dem experimentell beobachteten Schädigungsprozess synchronisiert. Spannung und Dehnung zum Zeitpunkt der Schädigungsinitiierung entsprechen somit der normalen Festigkeit und Bruchdehnung des Interfaces.

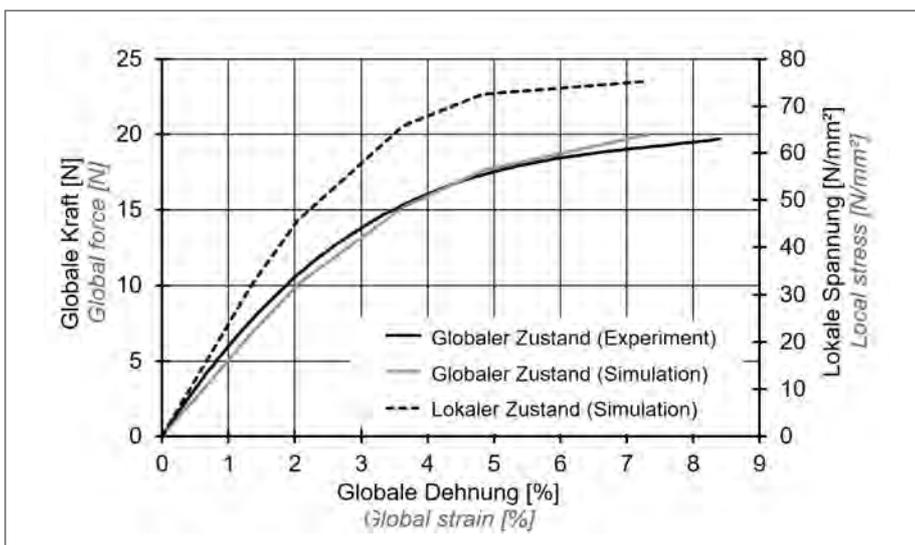


Abbildung 8: Vergleich zwischen Simulation und Experiment

Das erworbene Wissen der mechanischen Kennwerte des Interfaces soll im nächsten Schritt genutzt werden, um das Versagensverhalten von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) zu modellieren. Darüber hinaus bietet die neue Messmethode die Möglichkeit, die Kompatibilität weiterer Faser/Matrix Kombinationen hinsichtlich der Interfacefestigkeit quantitativ zu bewerten.

Vorhersage der Alterung von Kunststoffen durch Molekulardynamik-Simulationen

Die Werkstoffeigenschaften von Kunststoffbauteilen ändern sich über die Gebrauchsdauer aufgrund äußerer Einflüsse. Dies kann im schlimmsten Falle zu einem Versagen führen, daher ist es wichtig, die Einflussgrößen bestimmen und Lebensdauerabschätzungen vornehmen zu können, um beispielsweise rechtzeitig Instandsetzungsmaßnahmen zu ergreifen. Deshalb beschäftigt sich das IKV sehr intensiv mit dieser Thematik und nutzt hier zum einen das Werkstoffwissen und zum anderen, wie im oben beschriebenen Projekt, Simulationstools, um Vorhersagen treffen zu können.

Kommt es zu einem Ausfall eines Kunststoffbauteils, so liegt dies meist an einer umgebungsbedingten Spannungsrissbildung, einem physikalischen Alterungseffekt. Der zugrundeliegende Mechanismus ist auf die Diffusion des Umgebungsmediums in den Kunststoff zurückzuführen: Das Medium stört die Wechselwirkungen zwischen den Makromolekülen, was zur Versprödung des Materials und damit zu Rissen führt. Hieraus resultieren Risse im Bauteil, die auch durch fertigungsbedingte Eigenspannungen hervorgerufen werden können. Um eine bestimmte Medium/Kunststoff-Kombination auf das Risiko der umgebungsbedingten Spannungsrissbildung zu untersuchen, sind in der industriellen Praxis eine Vielzahl langwieriger Tests notwendig.

Im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ wurde daher zusammen mit dem israelischen Wissenschaftler Dr. Alperstein ein Simulationsansatz entwickelt, der die Bildung der genannten Spannungsrisse mithilfe von Molekulardynamik-Simulationen abschätzen kann.

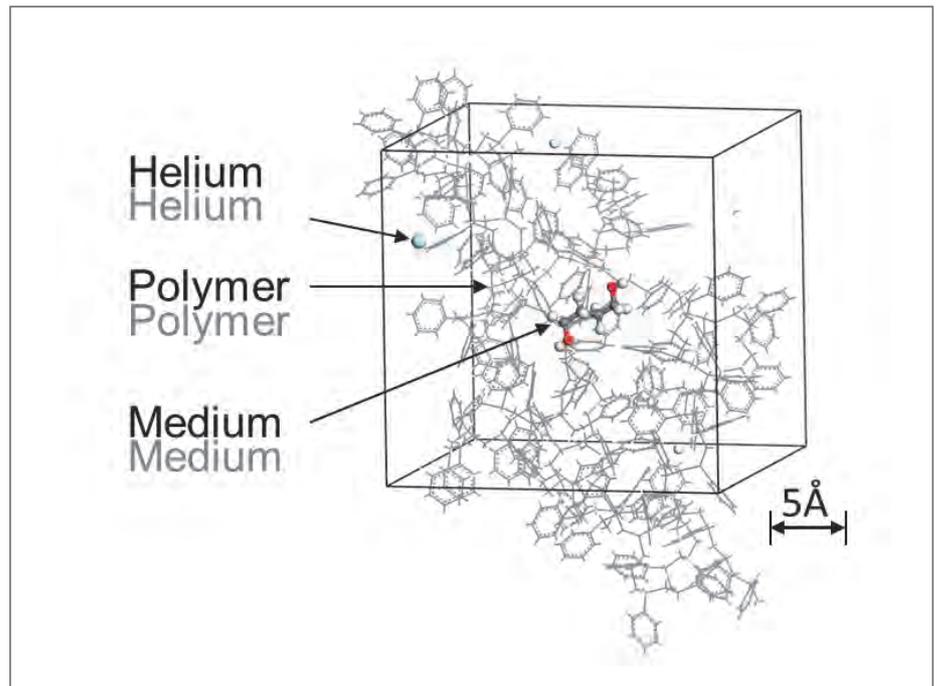


Abbildung 9: Beispielhaftes atomistisches Modell von Polystyrol unter Hinzugabe eines Diol-Moleküls

Die Molekulardynamik-Simulation ist eine Simulationsform, die die Wechselwirkungen zwischen Atomen eines Moleküls simuliert, woraus sich entsprechende Eigenschaften des modellierten Systems ableiten lassen. Durch den Aufbau eines atomistischen Modells, welches die Makromoleküle des Kunststoffes in Kombination mit verschiedenen Gewichtsanteilen des zu untersuchenden Mediums beschreibt, lässt sich durch Berechnung der Kohäsionsenergiedichte als Kennwert für die Bindungsenergie des Systems, das Risiko der Spannungsrissbildung verschiedener Kunststoff/Medium-Kombinationen vorher-sagen. Untersucht wurden die drei amorphen Thermoplaste Polycarbonat (PC), Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polystyrol (PS). In **Abb. 9** ist der Einfluss eines Diols auf Polystyrol dargestellt.

Mithilfe der Simulation entwickelte das IKV, ebenfalls im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“, die Software SphäroSim, mit der sich die Gefügestruktur spritzgegossener teilkristalliner Thermoplastbauteile während der Erstarrung unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen simulieren lässt. Die Vor-

hersage dieser Gefügestrukturen kann künftig in kommerziellen Simulationstools eingesetzt werden und somit zu einer genauen Beschreibung des Bauteilverhaltens beitragen.

KONTAKT

RWTH Aachen University
 Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)
 in Industrie und Handwerk
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann
 Seffenter Weg 201
 D-52074 Aachen
 Tel.: +49 241 80-93806
 zentrale@ikv.rwth-aachen.de
 www.ikv-aachen.de

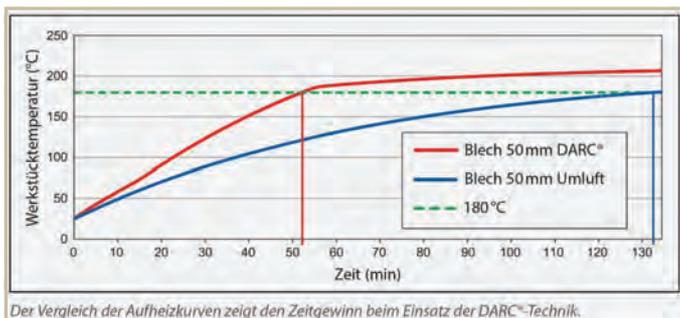
» DARC®-Technologie – Energiesparend und schnell «

Die von SLF entwickelte DARC®-Technologie verbindet zum Aufheizen von Werkstücken und Trocken von Beschichtungen in einem Einbrennofen zwei Techniken: Infrarotstrahlung, die sogenannte Dunkelstrahlung, und Konvektion (Umluft). Dabei steht DARC® für Dark Radiation and Convection.

Das Verfahren ist besonders geeignet für Teile mit unterschiedlich starken Wänden oder für besonders dickwandige Teile und kann sowohl bei Nass- als auch bei Pulverbeschichtung und für KTL-Lacke eingesetzt werden. Der DARC®-Ofen ist ebenfalls als Haftwassertrockner, zum Tempern von Bauteilen und als Booster vor einem bestehenden Ofen verwendbar.

Großer Vorteil der Methode ist ihre Wirtschaftlichkeit: sie spart Zeit, Energie und Platz. Dies wird durch eine höhere Energieübertragung als bei reinem Umluftbetrieb erzielt. Werkstücke heizen schneller auf, es werden weniger Stellplätze benötigt, die Energieverluste sind niedriger, die Ausschussquote ist geringer. Zudem können zur gleichen Zeit unterschiedliche Farbtöne getrocknet oder eingebrannt werden.

Im Einbrennofen dienen die Wände und der Boden als Strahlfläche. Nach einer festgelegten Zeit wird zur Infrarotstrahlung die Konvektion dazu geschaltet. Insbesondere für die Trocknung von Wasserlacken ist es auch möglich, Konvektion und Dunkelstrahlung von Anfang an gleichzeitig zu aktivieren. Es können verschiedene Programme in der Steuerung hinterlegt werden, um z.B. die Angelierphase nur mit Strahlung und anschließend die Haltephase mit überlagerter Konvektion zu fahren. Von der Effizienz des Verfahrens können sich Interessenten bei Versuchen mit den eigenen Bauteilen in unserem DARC®-Ofen überzeugen.



KONTAKT

SLF Oberflächentechnik GmbH
 Gutenbergstraße 10
 D-48282 Emsdetten
 Tel.: +49 2572 1537-0
 Fax: +49 2572 1537-169
 info@slf.eu | www.slf.eu



STRAHL-, LACKIER- UND FÖRDERTECHNIK VOM SPEZIALISTEN



EINBRENNEN

Seit 1990 entwickeln wir individuell auf den jeweiligen Bedarf zugeschnittene Anlagen zur idealen Oberflächenbearbeitung.



STRAHLEN

Mit Innovationen wie dem „DARC“-Ofen reduzieren wir die Betriebskosten unserer Kunden und erhöhen dabei zeitgleich die Flexibilität – und das bei stets gleichbleibend hoher Prozesssicherheit!

Produktprogramm:

- Strahlanlagen
- Lackieranlagen
- Fördertechnik
- Hubarbeitsbühnen
- Einbrennöfen „DARC“
- Service und Ersatzteile



LACKIEREN



FÖRDERN

SLF Oberflächentechnik GmbH
 Gutenbergstr. 10
 D-48282 Emsdetten
 Tel.: +49(0)2572 1537-0
 Fax: +49(0)2572 1537-169
 info@slf.eu • www.slf.eu

138-03/18-4c

»» **Willkommen auf dem PROTIQ Marketplace** ««

Angefangen hat die PROTIQ GmbH als 3D-Druck-Anbieter mit eigenem Online-Konfigurator und e-Shop. Heute erreichen wir mit unserem Marketplace Kunden auf der ganzen Welt.

Innerhalb weniger Jahre hat sich die additive Fertigung zu einem branchenübergreifenden Innovationsmotor entwickelt, der sich einer zunehmend stärkeren Nachfrage erfreut. Im November 2017 geht PROTIQ deshalb einen großen Schritt in Richtung Zukunft: Aus dem bestehenden e-Shop des Tochterunternehmens der Phoenix Contact-Gruppe wird ein Online-Marktplatz, auf dem nun auch andere 3D-Druck-Anbieter unter www.protiq.com ihre Leistungen anbieten können.

Mit dem Launch des Marketplace reagiert PROTIQ als einer der ersten 3D-Druck-Dienstleister auf das rasante Wachstum der Branche und den sich daraus ergebenden neuen Herausforderungen: Wachsende Bedarfe an additiv gefertigten Bauteilen rufen innovative 3D-Druck-Technologien in vielen Bereichen hervor



und sorgen für immer vielfältigere Kundenwünsche, auf die es flexibel zu reagieren gilt.

Gemeinsam mit unseren Partnern setzen wir neue Maßstäbe in Sachen Flexibilität in der Auftragsabwicklung: Wir ermöglichen sowohl kundenindividuelle Einzelfertigungen als auch

die Herstellung größerer Produktserien für die unterschiedlichsten Branchen. Wählen Sie aus einem breiten Leistungsspektrum und nutzen Sie die vielseitigen Konfigurationsmöglichkeiten zur Gestaltung Ihres 3D-Objekts.

Seit kurzem glänzt der PROTIQ Marketplace nun in einem neuen Design. Klare Strukturen, ein übersichtlicher Navigationsbereich und intuitive Funktionen sorgen für ein optimiertes Nutzererlebnis. Der Relaunch der Online-Plattform ist für den PROTIQ Marketplace bislang eine der umfangreichsten Veränderungen. Für Dr. Ralf Gärtner, Geschäftsführer von PROTIQ, gehört stetiger Wandel ganz klar zum Geschäftsmodell dazu: „Wir wollen dem Markt nicht hinterherlaufen, sondern tatkräftig voranschreiten. Die neue Website erleichtert unseren Kunden den Weg in die Industrie 4.0.“



KONTAKT

PROTIQ GmbH

Flachmarktstraße 54

D-32825 Blomberg

Tel.: +49 (0)5235 3-43800

Fax: +49 (0)5235 3-441154

service@protiq.com

www.protiq.com



Ihr Anbieter für
industriellen 3D-Druck



1 Sie konfigurieren
Ihr 3D-Objekt



2 Wir drucken Ihr
3D-Modell



3 Sie erhalten
Ihr Produkt

3D-Druck von PROTIQ. Präzise. Schnell. Zuverlässig. | www.protiq.com



» ALUMINIUM 2018 – mit neuen Themen Richtung Zukunft «

Die globale Produktion von Aluminium hat ein neues Rekordhoch erreicht, der Energiewandel und der Transportsektor treiben die Nachfrage nach Leichtmetallen. Auch wenn die Entwicklung in einzelnen Ländern unterschiedlich verläuft: Weltweit richtet sich die Industrie mit neuen Investitionen auf eine anhaltend gute Konjunktur ein. Die positive Stimmung spürt auch die ALUMINIUM Weltmesse.

Vom 9. bis 11. Oktober 2018 wird das Messegelände am Rhein für drei Tage erneut zum globalen Handelsplatz der Aluminiumbranche. In sechs Messehallen zeigen Branchenriesen, Spezialisten und junge innovative Unternehmen die ganze Bandbreite der Industrie – von der Aluminiumproduktion über Maschinen und Anlagen für die Bearbeitung und die Endprodukte bis zum Recycling.

Auf 80.000 qm wächst die Ausstellungsfläche, mehr als 80 Prozent der Fläche sind bereits gebucht. „Ein deutliches Anzeichen für die derzeitige Dynamik in der Aluminiumindustrie“, so Olaf Freier, Event Director der ALUMINIUM. „Wir sind optimistisch, die 1.000-Aussteller-Marke zur kommenden Veranstaltung zu knacken.“

Neue Themen: Digitalisierung und Umweltschutz

Sonderflächen wie die Innovation-Areas und geführte Themen-Touren sollen Besuchern aus den Anwendungsbereichen wie dem Automobilbau, dem Maschinenbau, der Luftfahrt oder dem Bausektor eine bessere Orientierung bieten. Auch die bekannten Themenpavillons werden als Anlaufpunkte die Besucher wieder durch die strukturierten Messehallen leiten.

Auf der neuen Sonderfläche „Digital Manufacturing“ erfahren die Besucher, was Industrie 4.0 für die Aluminiumbranche bedeutet und welche Produktivitätsvorteile bereits heute durch leistungsfähige IT-Lösungen in der Produktion erreicht werden können.

Neu ist auch die Ausstellungsfläche „Environmental Engineering“, die sich den Themen Wasseraufbereitung, Luftfilteranlagen und Öl- bzw. Ölnebelabsauganlagen widmen soll – und zeigt, wie die Aluminiumindustrie bei den Zukunftsthemen Energie- und Ressourcenschonung innerhalb der eigenen Produktionskette mit gutem Beispiel vorangeht.

Industrie- und Wissenschafts-Know-How im Fachprogramm

In der ALUMINIUM 2018 Conference und dem ALUMINIUM Forum referieren Experten aus Industrie und Wissenschaft über Trends und Innovationen in der Aluminium-Industrie. Die Zukunftschancen des Werkstoffs stehen im Mittelpunkt der ALUMINIUM 2018 Conference, die vom GDA, dem Gesamtverband der Aluminiumindustrie organisiert wird. Im ALUMINIUM Forum stellen die Aussteller ihre neuesten Lösungen und Technologien vor, u.a. zu den Bereichen Lightweight Technologies, E-mobility und additive Fertigung.

Alle Wege führen nach Düsseldorf

Mehr als 27.000 Fachbesucher aus 100 Ländern werden zur ALUMINIUM 2018 erwartet. Bei den Besuchern belegt die ALUMINIUM mit einem Internationalitätsgrad von fast 60 Prozent einen Spitzenwert unter den großen internationalen Industriemessen. Bemerkenswert hoch war zuletzt mit 20 Prozent der Anteil der Auslandsbesucher, die aus Übersee kommen – ein Maßstab für die weltweite Relevanz der ALUMINIUM.

Messe Düsseldorf

Hallen 9-14

Stockumer Kirchstr. 61, 40474 Düsseldorf

Informationen und Registrierung:

www.aluminium-messe.com





ALUMINIUM 2018

12. Weltmesse & Kongress

09. – 11. Oktober 2018

Messe Düsseldorf

www.aluminium-messe.com

Organised by



Partner



LAMILUX X-treme Produkte: Minimales Gewicht, maximale Stärke!

» Auf der Überholspur im Leichtbau «

Extrem leicht sollen sie sein, dennoch sehr stabil, schlagfest und wärmeunempfindlich, gleichzeitig aber auch zugfest und steif bei schweren Belastungen: Die Seitenwände, Dächer und Böden von Nutzfahrzeugen, Caravans, Bussen und Co. Mit den bewährten LAMILUX X-treme Produkten aus carbon- oder glasfaserverstärkten Kunststoffen ist das nicht nur möglich, sondern Standard. Auch Sportartikel wie Snowboards entfalten mit dem Verbundmaterial besondere Potentiale.

LAMILUX X-treme überzeugt mit hervorragenden Konstruktionseigenschaften, extremer Robustheit und geringem Gewicht – und das ganz auf ihre jeweilige Anwendung abgestimmt. Die verstärkenden Glas- beziehungsweise Carbonfasern im Material werden bedarfsgerecht ausgerichtet: uni-, bi- oder multiaxial. Dieses Vorgehen bestimmt die Festigkeit des Materials und perfektioniert es für jede Anforderungssituation.

Zudem kann durch diesen enormen Festigkeitsgewinn deutlich bei der Materialstärke gespart werden. Denn weniger ist hier tatsächlich mehr – nämlich leichter. Sowohl im Fahrzeugbau als auch für Sportgeräte ist dieser Faktor entscheidend für die Performance: Jeder möchte Energie sparen, keiner möchte langsam sein.

Hochfest und wärmeunempfindlich

Beim großflächigen Einsatz in Seitenwänden, Dächern und Böden absorbieren **LAMILUX X-treme** und **LAMILUX X-treme Carbon** die auf die Sandwichelemente einwirkenden Last-



und Spannkraften. Das macht den gesamten Aufbau sehr torsionssteif. Deutlich wird dies im Vergleich des carbonfaserverstärkten Kunststoffs mit anderen als Sandwichdeckschicht eingesetzten Werkstoffen. Im Vergleich zu Stahl oder Aluminium hat es bei einem bis zu 50 Prozent geringeren Gewicht die dreibis viermal höhere Zugfestigkeit.

Die geringe thermische Ausdehnung des Verbundmaterials macht es außerdem möglich, große Bauteile zu realisieren – ohne dass langfristig Verwerfungen und Blasen entstehen. Zudem ist in Kühltransportern die geringe Wärmeleitfähigkeit der Produkte und damit die optimierte Isolation des Kühlaufbaus ein schlagkräftiges Argument.

Hohe Schlagfestigkeit

Gerade im Nutzfahrzeugbereich nützen all diese Eigenschaften jedoch nichts, wenn das Material keine mechanischen Belastungen durch Schläge oder Stöße verträgt. Die X-treme Produkte halten diesen jedoch nicht nur Stand, sondern sind in den meisten Fällen derart resistent, dass hohe Schadensfälle und Ausfallzeiten durch Reparaturen gänzlich vermieden werden können. Auch Hagelschlag und widrigen Wetterbedingungen trotzt das Material, welches deshalb im Innen- als auch Außenbereich von Fahrzeugaufbauten überzeugt.

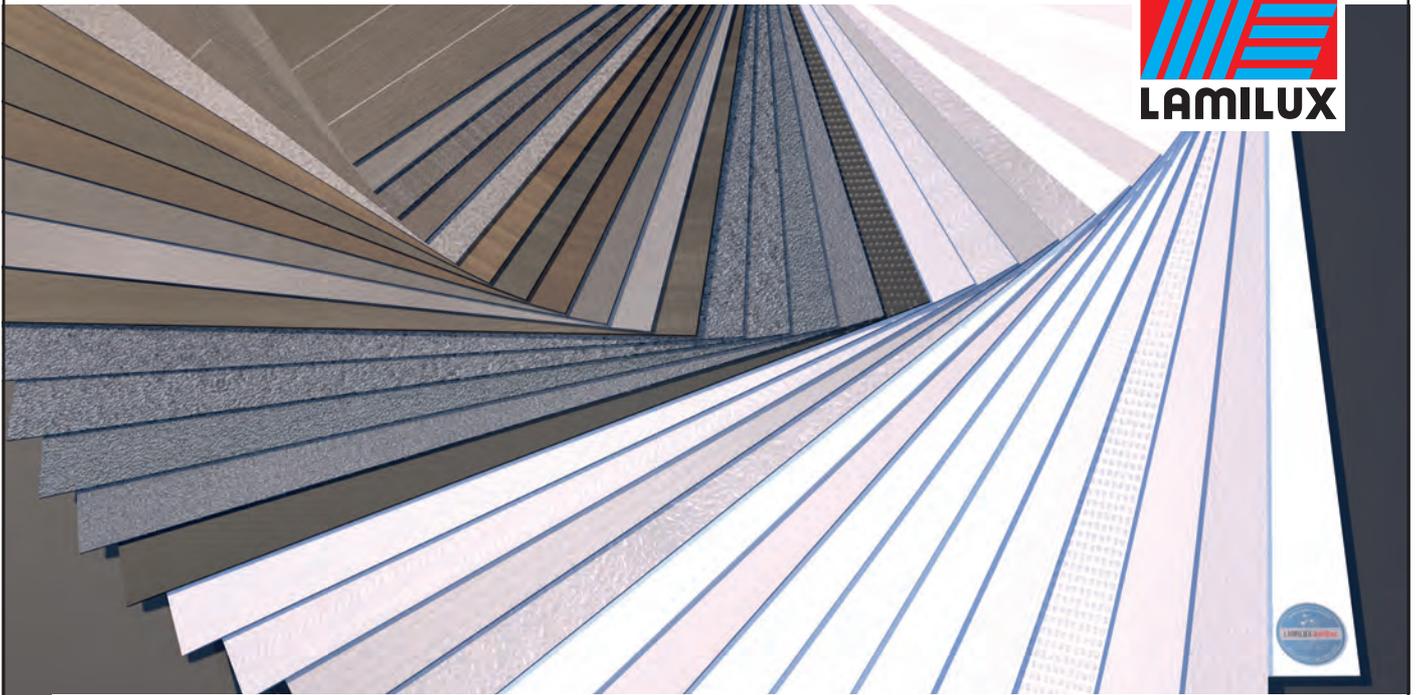
Hergestellt werden die faserverstärkten Kunststoffe von LAMILUX in einem kontinuierlichen, automatisierten Fertigungsverfahren. Die voneinander unabhängigen Produktionsanlagen garantieren kürzeste Lieferzeiten bei gleichbleibend hoher und stets reproduzierbarer Qualität. Die X-treme Produktreihe kann in einer Breite von bis zu drei Metern gefertigt werden. Dabei richtet sich die Länge der Platten- oder Rollenware nach dem Kundenwunsch.

KONTAKT

LAMILUX Composites GmbH

Sascha Oswald
Produktmanager
Zehstraße 2
D-95111 Rehau
Tel.: +49 (0)9283 595-1617
Fax: +49 (0)9283 595-290
sascha.oswald@lamilux.de
www.lamilux.de





Nutzfahrzeug-
industrie



Caravan-
industrie



Kühlräume
Kühlzellen



Bau-
industrie



Sport-
industrie

LAMILUX COMPOSITES – HIGH-TECH-WERKSTOFFE FÜR DIE MÄRKTE DER ZUKUNFT

LAMILUX ist der europaweit führende Hersteller faserverstärkter Kunststoffe. Die hohe Qualität der Composites aus Glas- und Carbonfasern ist unerreicht – dank eines einzigartigen, kontinuierlichen Produktionsverfahrens.

- **Stabilität** – herausragende Impact-Eigenschaften
- **Leichtigkeit** – geringes Gewicht
- **Langlebigkeit** – hohe UV-, Korrosions- und Witterungsbeständigkeit
- **Optik** – edle, hochglänzende Oberflächen und direkt eingearbeitete Farbgebung in allen RAL-, NCS- und individuellen Farbtönen
- **Verarbeitungskomfort** – einfache Verklebung, problemlose nachträgliche Lackierung, Materialbreiten bis zu 3,20 Meter
- **Anwendungsvorteile** – höchste Robustheit bei geringem Gewicht, geringe Wärmeausdehnung, große mechanische Belastbarkeit und chemische Resistenz, einfache Reparatur und Reinigung

TÜV-ZERTIFIZIERTE QUALITÄTSSICHERUNG

Der Name LAMILUX steht für höchste zertifizierte Qualität! Als weltweit erster Hersteller faserverstärkter Kunststoffe erfüllen wir selbstverpflichtend höchste Standards bei der Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung.



TÜV SÜD
certified quality

LAMILUX COMPOSITES GMBH | Zehstraße 2 | 95111 Rehau
Tel.: +49 92 83/5 95-0 | information@lamilux.de | www.lamilux.de

» Analyse von dünnen und dicken Schichten mit gepulster Glimmentladungsspektroskopie «

Die Glimmentladungsspektroskopie (GD-OES – Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) ist eine bewährte Analysenmethode, mit der schnell und direkt simultane und quantitative Elementbestimmungen mittels Tiefenprofilierung durchgeführt werden. Zwei neue patentierte Techniken erweitern den Anwendungsbereich und erleichtern die Schichtdickenbestimmung: „UFS – Ultra-Fast Sputtering“ von Polymeren und „DiP – Differential Interferometry Profiling“.

Die qualitative und quantitative Schichtzusammensetzung sowie deren Dickenbestimmung sind entscheidende Parameter für die Funktionalität eines Werkstoffes mit komplexen Zusammensetzungen und Beschichtungen. Das ist das Hauptanwendungsgebiet der GD-OES Technik: sekundenschnelle, direkte und simultane Analyse industrieller

Erzeugnisse wie Halbleiter, LEDs, Li-Ionen-Batterien sowie die Überwachung von Oberflächentechnologien wie Carbonitrierung, PVD- oder CVD-Beschichtung. Aufgrund gepulster Hochfrequenzanregung und damit der Fähigkeit zur Analyse von Nichtleitern werden aber auch zunehmend neue Anwendungsgebiete erschlossen, so beispielsweise im Korrosionsschutz (Lacke, Haftvermittler, Plastikbeschichtungen, kathodische und Eloxal-Schichten, Emaljen) sowie Keramiken und Gläser. Eine wichtige Anwendung ist die Kontrolle von Abscheidungs- und Ätzprozessen bei der Wafer-Fertigung. So können auch alle Elemente des Periodensystems außer den Edelgasen gemessen werden, wie auch die leichten Elemente H, C, N, O, Cl und sogar Deuterium.

Messung möglich. Mühsame und zeitaufwändige Berechnungen mittels Vergleichsmaterialien oder Messungen mit einem Profilometer sind nicht mehr notwendig.

Anhand der kontinuierlichen Ermittlung der Kratertiefe während des Sputterprozesses ist konsequenterweise auch die jeweilige Sputterrate direkt zugänglich. Diese Entwicklung ist ein technologischer Durchbruch für Tiefenprofilierung mittels GD-OES.

Ein Laserstrahl wird in zwei separate Strahlen aufgespalten, wobei ein Strahl von der intakten Oberfläche reflektiert wird. Der andere Strahl wird mittig im GD Krater reflektiert. Die Interferenz der beiden reflektierten Strahlen wird während des Sputterprozesses kontinuierlich gemessen und darüber die Kratertiefe zu jedem Zeitpunkt exakt ermittelt. Die Stärke der Laserinterferometrischen Bestimmung der Kratertiefe liegt dabei in der hohen Tiefenauflösung im Nanometerbereich und dies über den gesamten Sputterprozess.

Seine besondere Stärke erweist DiP beim Einsatz an nichttransparenten Schichtsystemen, bei denen die Ellipsometrie nicht verwendet werden kann. Daher zeigt sich GD in Verbindung mit DiP als ein hervorragendes Analysewerkzeug, um Abscheidungsprozesse intransparenter Materialien exakt zu kontrollieren.

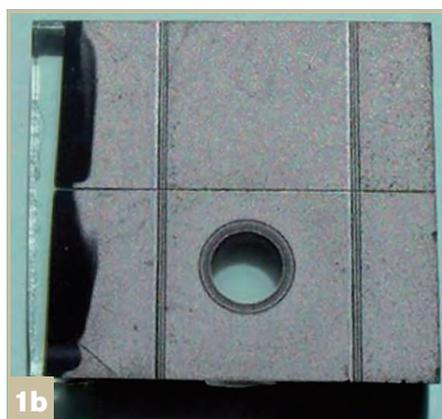
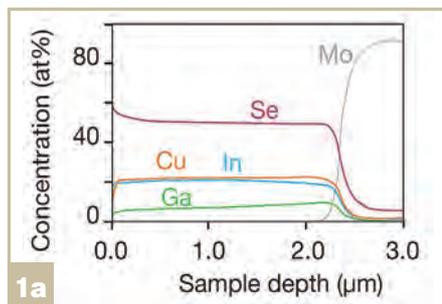


Abb. 1a + 1b: Tiefenprofilanalyse einer Solarzelle

GD-OES zur Tiefenprofilanalyse (Oberflächen- und Schichtanalyse) ermöglicht die schichtweise Analyse der Probe mit einem Tiefenaufhebungsvermögen im Nanometer Bereich bis zu einer Tiefe von etwa 200 Mikrometern.

Präzise Schichtzusammensetzung und Sputtertiefe schnell ermittelt durch DiP

Die Technik der Tiefenprofilanalyse mittels Glimmentladung wurde um eine neue, patentierte Innovation, der direkten Bestimmung der Kratertiefe mittels differentieller Interferometrie (DiP) erweitert. Durch die neue, innovative Möglichkeit in der Tiefenprofilanalyse ist die simultane Bestimmung der Tiefe und der elementaren Zusammensetzung in einer einzigen

Ultra Fast Sputtering (UFS) von Materialien mit Polymerschichten.

Das Sputtern von Werkstoffen mit Polymerschichten stellte bisher eine besondere Herausforderung dar, da selbst bei gepulstem Betrieb unter sanften Sputterbedingungen eine unkontrollierte Zerstörung der Polymere nicht auszuschließen war. Dies machte die Tiefenprofilierung von polymeren Werkstoffen oftmals unmöglich, oder bedingte sehr lange Analysezeiten und oft schlechte Resultate mit ungleichmäßigen Kraterformen. Um ein Beispiel aus der Automobilindustrie zu nennen: lackierte Karosserien mussten fast eine Stunde lang gesputtert werden, bis die metallischen Schichten unter dem Lack erreicht wurden, während anorganische Multischichten in Minutenschnelle analysiert werden können. Das patentierte "UFS" bietet eine absolut attraktive Lösung für solche Materialien.

Das UFS wird durch Plasmagaswechsel ermöglicht. Das somit optimierte Plasma begünstigt die Kettenspaltung von polymeren Materialien. Viele Polymere, sind mit einem solchen Plasmagaswechsel sehr gut zugänglich. Die Analysegeschwindigkeit mit UFS ist extrem erhöht und damit das Signal-Rausch-Verhältnis optimiert. Hintergrund ist die mit dem Plasmagaswechsel erhöhte Sputtergeschwindigkeit. Bei einer langsamen Erosionsrate (was oft der Fall ist, wenn sanfte Sputterbedingungen verwen-

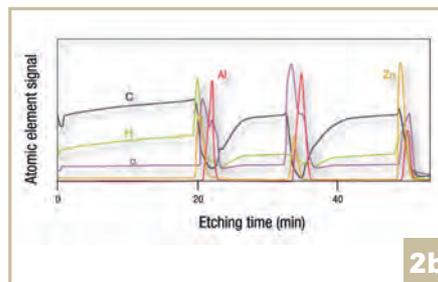
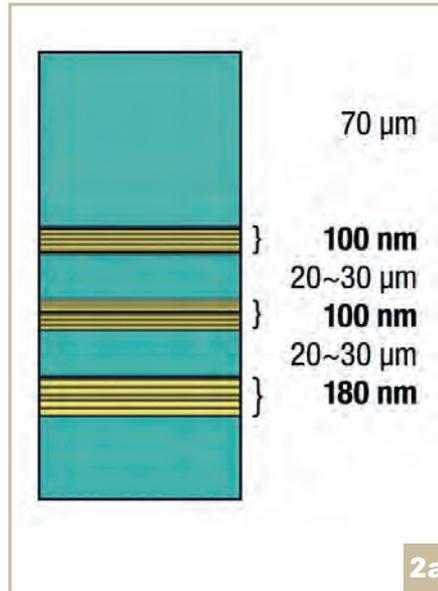


Abb. 2a + 2b: DVD mit Schichten von 100nm, die sehr gut unter einer 70µm dicken Polymerschicht analysiert werden können.

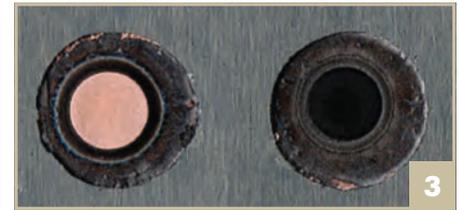


Abb. 3: Kathode einer Li-Batterie. Links: Mit UFS werden 70µm in 10 Minuten gesputtert und das Cu-Substrat ist erreicht. Rechts: Ohne UFS werden nur 11µm in 1 Stunde gesputtert.

det werden müssen, um das Material nicht zu verändern), gelangt nur wenig Material ins Plasma pro Zeiteinheit. Damit verringert sich der Lichtfluss und das S/R-Verhältnis wird schlechter. Mit UFS ist es möglich, das gleiche Material mit den gleichen sanften Bedingungen wesentlich schneller zu messen (40-mal im gezeigten Beispiel). Und darüber hinaus erlaubt es auch die einfache Messung von dünnen eingebetteten Schichten mit ausgezeichneter Tiefenauflösung.

KONTAKT

HORIBA Scientific
 Dr. Bernd Bleisteiner
 Neuhofstr. 9
 D-64625 Bensheim
 Tel.: +49 (0)6251 8475-22
 bernd.bleisteiner@horiba.com
 www.horiba.com

HORIBA
Scientific

Fully Explore Innovative Materials with Dedicated Solutions

With our proven expertise in **Raman Spectroscopy**, **Spectroscopic Ellipsometry** and **Glow Discharge Spectroscopy** we will help you take up the challenge of characterizing the materials of the future, extracting key chemical, dimensional and structural information with outstanding results.

www.horiba.com/scientific

HORIBA Jobin Yvon GmbH
 info-sci.de@horiba.com
 Tel.: +49 (0) 6251-8475-0



» RWTH Aachen University – Institut für Oberflächentechnik «

„Oberflächentechnik als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts“

Laut Prof. Dr.-Ing. H. Voggenreiter, Vorstand des VDI-GME, sind über 60 % aller Produktionsinnovationen auf neue oder verbesserte Werkstoffe bzw. neue Herstell- und Bearbeitungsverfahren zurückzuführen. Durch die Verfahren der Oberflächentechnik kann die Oberfläche eines Bauteils, unabhängig von dessen Volumen, entsprechend spezifischer Anforderungen ausgelegt und optimiert werden. Damit stellt die Oberflächentechnik eine relevante Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts dar, durch die auch komplexe Anforderungsprofile von Bauteilen und Werkzeugen aus herausfordernden, innovativen Bereichen wie Energie-, Verkehrs- und Produktionstechnik ermöglicht werden können.

Das Institut für Oberflächentechnik ist Teil der Fakultät für Maschinenwesen an der RWTH Aachen University und forscht auf den Gebieten der Physical/Chemical Vapour Deposition-Technologie (PVD/CVD), des Thermischen Spritzens, dem Hart- und Auftraglöten sowie der Simulation dieser Prozesse. Die Erarbeitung werkstoffwissenschaftlicher Grundlagen zu den einzelnen Technologien sowie die Umsetzung verschiedener werkstofftechnologischer Ansätze von der Projektidee über komplette Systemlösungen bis hin zur Nullserienfertigung gehört zu den Schwerpunkten des Instituts. Die am Institut durchgeführten Projekte, die die Werkstoff-, Prozess- und Verfahrensentwicklung umfassen, werden meist durch öffentliche Institutionen wie AiF, DFG sowie Programme von verschiedenen Bundesministerien wie dem BMWi und BMBF gefördert. Anwendungsnahe und zukunftsorientierte Fragestellungen werden zudem auch in bilateraler Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Industrieunternehmen erfolgreich adressiert. Durch die zahlreichen am Institut vorhandenen Technologievarianten sowie umfangreichen werkstofftechnischen Kenntnisse können maßgeschneiderte Prozesse und Beschichtungen für ein breites Spektrum an Anwendungen entwickelt werden. Die dabei einge-

setzten Schichtwerkstoffe umfassen neben Metalllegierungen und verschiedensten Hartstoffen, wie Hartmetalle, Keramiken sowie Cermets, auch Polymere. Durch die aktive Mitarbeit in Verbänden, Arbeitskreisen und Normungsausschüssen ist das Institut stets über aktuelle Herausforderungen und Themen informiert.

Löttechnologie: Optimierung der Eigenschaften gelöteter Fügeverbunde

Die Einsatzbereiche der Löttechnologie sind vielseitig, da sie das Fügen unterschiedlichster Werkstoffe möglich macht. Das Auftraglöten als Beschichtungsverfahren ermöglicht zudem eine deutliche Steigerung der Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit von Oberflächen sowie die Reparatur komplexer, hochbelasteter Bauteile wie z. B. von Triebwerkskomponenten.

Die Reparatur von defekten bzw. verschlissenen Turbinenschaufeln ist aufgrund der kostenintensiven Neubauteile seit Jahrzehnten ein relevantes Forschungsthema. Das Institut für Oberflächentechnik hat im Lauf der Jahre u. a. zu der Entwicklung neuer Lotsysteme, bestehend aus Lot und nicht schmelzenden Additiven auf Basis der Grundwerkstoffe, für das Reparaturlöten beigetragen. Durch kontinu-

ierliche Forschung zu dem Thema konnte den steigenden Anforderungen sowie Entwicklungen auf der Grundwerkstoffseite, z. B. hinsichtlich des Einsatzes von einkristallinen Turbinenkomponenten, Rechnung getragen und weiterhin zuverlässige Reparaturlötungen mit Neubauteilqualität erreicht werden. Ein Beispiel für reparaturgelötete Turbinenschaufeln ist in **Abb. 1 a)** dargestellt. Aktuelle Projekte am Institut beschäftigen sich mit dem Einsatz von innovativen Green Tapes zu Reparaturzwecken aber auch zur Steigerung des kombinierten Korrosions- und Erosionsschutzes von Turbinenkomponenten. Vorteil des Einsatzes von Tapes zum Verschleißschutz sind die hohen erreichbaren Schichtdicken von bis zu $t = 3 \text{ mm}$, wie in **Abb. 1 b)** dargestellt, sowie die hohen Hartstoffanteile bis über 70 %. Der Querschliff einer am IOT entwickelten innovativen Ni-Basis-Auftraglöt-schicht mit Carbiden zur Steigerung der Beständigkeit gegen Wassertropfenerosion in Dampfturbinen ist in **Abb. 1 c)** gezeigt.

Schwerpunkt liegt hierbei auf den Auswirkungen der Eigenschaften der eingesetzten Green Tapes auf das Lötergebnis. Für die Reparaturlötungen wird der Einfluss der Korngrößenverteilungen von Lot- und Additivpartikeln auf das Schmelzverhalten untersucht, mit dem

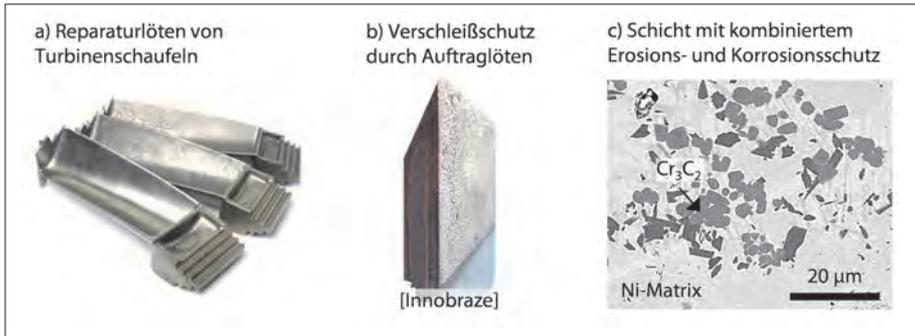


Abbildung 1: Beispiele für den Einsatz der Löttechnik a) Reparaturlötung von Turbinenschaufeln; b) Verschleißschutz durch Auftraglöten; c) Querschliff einer innovativen, mit Hartstoffen verstärkten Ni-Basis-Auftraglötschicht für kombinierten Schutz gegen Wassertropfenerosion und Korrosion in Dampfturbinen.

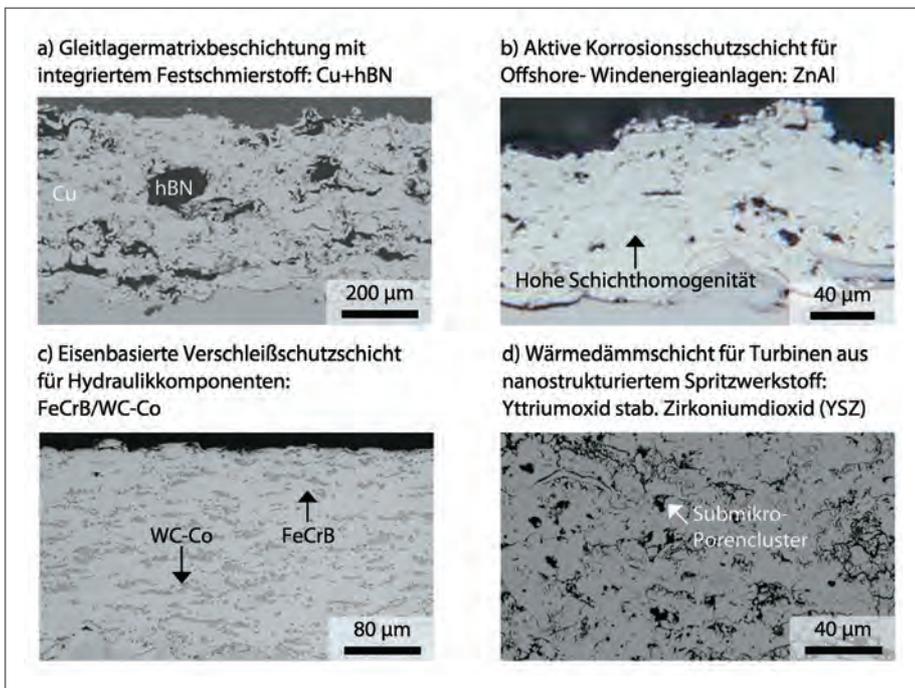


Abbildung 2: Beispiele von am IOT entwickelten thermisch gespritzten Schichten.

Ziel, Fehlstellenbildung in Reparaturlötungen zu vermeiden. Eine Gradierung des Hartstoffanteils in den Tapes wird zur Steigerung der Beständigkeit gegen Korrosion und Verschleiß angestrebt. In beiden Fällen ist zudem eine Anpassung der Lötprozessführung nötig, die aufgrund der am Institut vorhandenen Hochvakuumlötöfen industrienah entwickelt werden können. Zur Analyse des Schmelz- und Einsatzverhaltens der neu entwickelten Lotsysteme kommen verschiedene Verfahren der Thermoanalytik zum Einsatz. Da diese unter den gleichen Bedingungen wie der tatsächliche Lötprozess im Hochvakuum durchgeführt werden, können so zuverlässig geeignete Lötprozessparameter für hochqualitative Reparaturlötungen abgeleitet werden.

Im Fokus des Sonderforschungsbereichs SFB 1120 „Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktions-

prozessen“ steht die Entwicklung einer prä-diktiven Prozessführung für schmelzebasierte Fertigungsprozessen mit dem Ziel präzisere Bauteile zu erzeugen. Übertragen auf das Löten werden neben der geometrischen Präzision des Fügeverbundes vor allem die Reproduzierbarkeit der Prozesszone, d.h. die Phasenzusammensetzung, thermische und mechanische Eigenschaften, betrachtet. Als kritische Einflussparameter wurden die Lotapplikation sowie die Parameter des Lötprozess identifiziert.

Durch schnelle Erstarrung in einer Melt-Spin-Anlage konnten auch aus Legierungen, die zur konventionellen Folienherstellung ungeeignet sind, dünne, flexible Lotbänder hergestellt werden. Durch thermoanalytische Untersuchungen sowie ergänzende Lötprozesse im Großkammer-REM konnte das Schmelz- und Benetzungsverhalten der Lote im Detail un-

tersucht werden. Durch die aus diesen Analysen gewonnenen optimierten Lötparameter konnte die Phasenbildung im Lötverbund so gesteuert werden, dass sich diffusionshemmende Schichten an der Grenzfläche zum Grundwerkstoff bildeten. Diese verhindern ein Auflösen des Grundwerkstoffes sowie die unkontrollierte Bildung intermetallischer Phasen in der Mitte der Lötnaht, wodurch die Festigkeit des Verbundes gesteigert werden kann.

Thermisches Spritzen: Von Kunststoff bis Keramik und noch viel mehr – TS macht’s möglich

Unter den verschiedenen Beschichtungsverfahren nimmt das thermische Spritzen eine Sonderstellung ein. Kein weiteres Verfahren ermöglicht die Verwendung eines vergleichbaren Spektrums an Beschichtungswerkstoffen, das sich von Keramiken über Metalllegierungen bis hin zu Polymeren erstreckt. Auf diese Weise lassen sich unterschiedlichste Schichtsysteme maßgeschneidert herstellen, während die Bauteile im Beschichtungsprozess eine sehr geringe Temperaturbeanspruchung erfahren. Ein Beispiel sind Metallmatrix-Werkstoffe, bei denen Hartstoffe zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit oder Trockenschmierstoffe zur Reduzierung der Reibung in eine Metallmatrix eingebracht werden. Möglich ist auch der Einsatz von Kunststoffen als Füll-element, was das Anwendungsspektrum der Schichtsysteme weiter erhöht.

Schwerpunkt am Institut für Oberflächentechnik ist die Prozess- und Werkstoffentwicklung für das thermische Spritzen, insbesondere in Hinblick auf Anwendungen der Schichten für

den Verschleiß- und Korrosionsschutz. Beispiele für am Institut entwickelte Schichten sind in **Abb. 2 a)** und **b)** dargestellt. Mit den am Institut vorhandenen Produktionsanlagen, die sowohl Prototypen als auch Industriestandards umfassen, können industriennahe, aber auch hochinnovative Prozess- und Werkstofflösungen erarbeitet werden. Zusätzlich steht eine Vielzahl von erprobten tribologischen und korrosiven Prüfmethode am Institut zur Verfügung, um die so entwickelten Schichtsysteme anwendungsnah zu prüfen.

Im Fokus für kostengünstige Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten stehen aktuell verstärkt eisenbasierte Spritzzusatzwerkstoffe, die besonders für den Großmaschinenbau erhebliches Einsparpotenzial im Vergleich zu konventionellen Schichtsystemen versprechen. In der anwendungsnahen Forschung werden hierzu aktuell Papierrollen, Hydraulikzylinder und Pumpen betrachtet, während grundlagenorientierte Forschung auch auf dem Gebiet der Wärmedämmung durchgeführt wird.

Ein vielversprechender Prozess speziell für die Herstellung endkonturnaher, dünner und gasdichter Beschichtungen mit geringem Oxidanteil ist hierbei das thermische Spritzen mittels HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Das Institut für Oberflächentechnik ist eine der wenigen Forschungsstellen, die für diese innovative Verfahrensvariante Prozessentwicklung betreiben. Bei dem Verfahren wird ein Brennstoff mit Druckluft in einer Brennkammer verbrannt und in einer Lavaldüse auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt und in Richtung des zu beschichtenden Bauteils beschleunigt. Ein Beispiel für eine Fe-Basis-Schicht mit Hartmetall zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit von Hydraulikkomponenten ist in **Abb. 2 c)** dargestellt. Um die Beständigkeit der neu entwickelten Schichten zu überprüfen, kann u.a. das am Institut vorhandene Stift-Scheibe-Tribometer eingesetzt werden, das die modellhafte Untersuchung und Simulation von Reibungs- und Verschleißvorgängen bei tribologischen Systemen ermöglicht. Ein Vergleich der Verschleißraten einer HVOF-Fe-Basis-Schicht mit einer etablierten Hartstoffschicht sowie einem konventionellen, unbeschichteten Baustahl, wie in **Abb. 3** gezeigt, verdeutlicht die Effektivität der Werkstoff- und Prozessentwicklung.

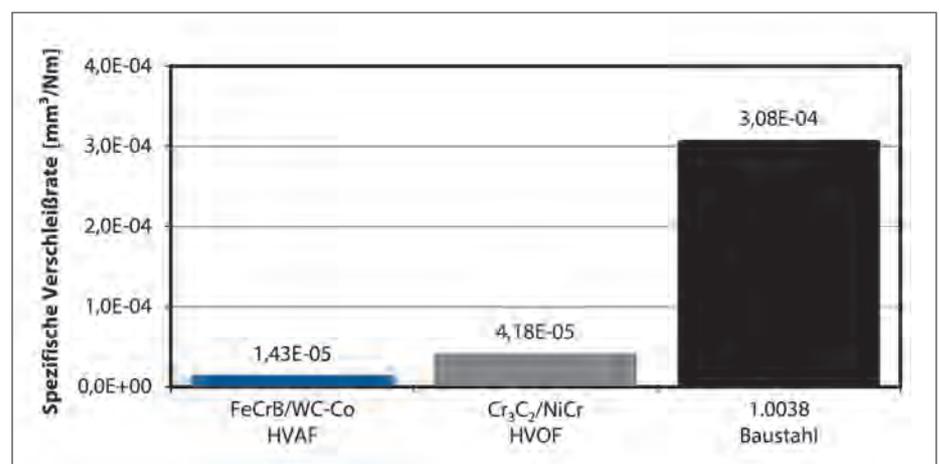
Der Einsatz von keramischen Schichtsystemen im Turbinenbau ist aufgrund ihrer hohen Temperaturbeständigkeit sowie Wärmedämmung weit verbreitet ist. Am IOT wurden die Dämmeigenschaften keramischer Schichten durch den Einsatz nanostrukturierter Spritzzusatzwerkstoffe, wie in **Abb. 2 d)** gezeigt, weiter gesteigert werden. Zusätzlich wird am IOT an der Möglichkeit geforscht, über mehrlagige keramische Schichtsysteme eine effiziente und flexible Temperierungen von Oberflächen zu realisieren. Möglich ist dies, da einige Keramiken elektrisch leitend sind. Aktuell wird im Bereich der keramischen Heizleiterschicht ein Werkstoffsystem aus TiO_2/Cr_2O_3 zur gezielten Temperierung erprobt, wobei das Bauteil und die Umgebung durch zusätzliche Schichten aus Al_2O_3 elektrisch isoliert und vor Verschleiß geschützt werden können. Anwendungen finden sich beispielsweise bei Werkzeugen in der Kunststoffverarbeitung, die über die Heizschichten direkt an der Werkzeugoberfläche aktiv temperiert werden können und so die Kunststoffverarbeitung optimieren.

Unterstützt werden die Forschungsarbeiten beim thermischen Spritzen verstärkt durch Modellierung und Simulation. Aufgrund der am Institut gelebten, engen Verknüpfung von Theorie und Praxis umfassen viele Forschungsprojekte Aspekte aus beiden Bereichen. Häufig liefern die praktischen Arbeitspakete die Eingangsgrößen, die für eine prozessnahe Simulation benötigt werden, und dienen zusätzlich zur Validierung der entwickelten Modelle. Neben selbstentwickelten Softwarepaketen kommen kommerzielle Programme zur Strömungs-, Werkstoff- und Struktursimulation zum Einsatz.

Ein Schwerpunkt der simulativen Arbeiten liegt zurzeit auf dem umfassenden Verständnis des thermischen Spritzprozesses und seiner Auswirkungen auf die Schichteigenschaften. Dazu müssen alle Teilprozesse des Prozesses, von Gasströmung innerhalb des Brenners bis hin zu dem Partikelauflauf auf das Substrat, betrachtet werden. Aufgrund der harschen Prozessbedingungen bzw. der kurzen Prozesszeiten ist eine experimentelle Erfassung aller relevanten Prozesseigenschaften nicht möglich. Durch den Einsatz unterschiedlicher numerischer Simulationsmethoden können zunächst die Teilprozesse einzeln betrachtet und verstanden werden. Im Anschluss können die einzelnen Simulationen zu einer gesamten Prozesskette verknüpft werden.

Im Fall des atmosphärischen Plasmaspritzens werden partikelförmige Spritzzusatzwerkstoffe in ein Plasma injiziert und dort geschmolzen. Die vollständig bzw. zum Teil geschmolzenen Partikel werden durch die Gasströmung in die Richtung des Substrats beschleunigt. Nach Aufprall und Erstarrung der Partikel auf der Substratoberfläche entsteht eine Beschichtung. Der gesamte Prozess lässt sich, aufgeteilt in Teilprozesse, mittels der numerischen Strömungssimulation (englisch: Computational Fluid Dynamics, CFD) abbilden und untersuchen, vgl. **Abb. 4**.

Abbildung 3: Spezifische Verschleißrate einer am IOT entwickelten HVOF-Fe-Basis-Schicht, einer etablierten Hartstoffschicht sowie einem unbeschichteten Baustahl nach Prüfung im Stift-Scheibe-Tribometer.



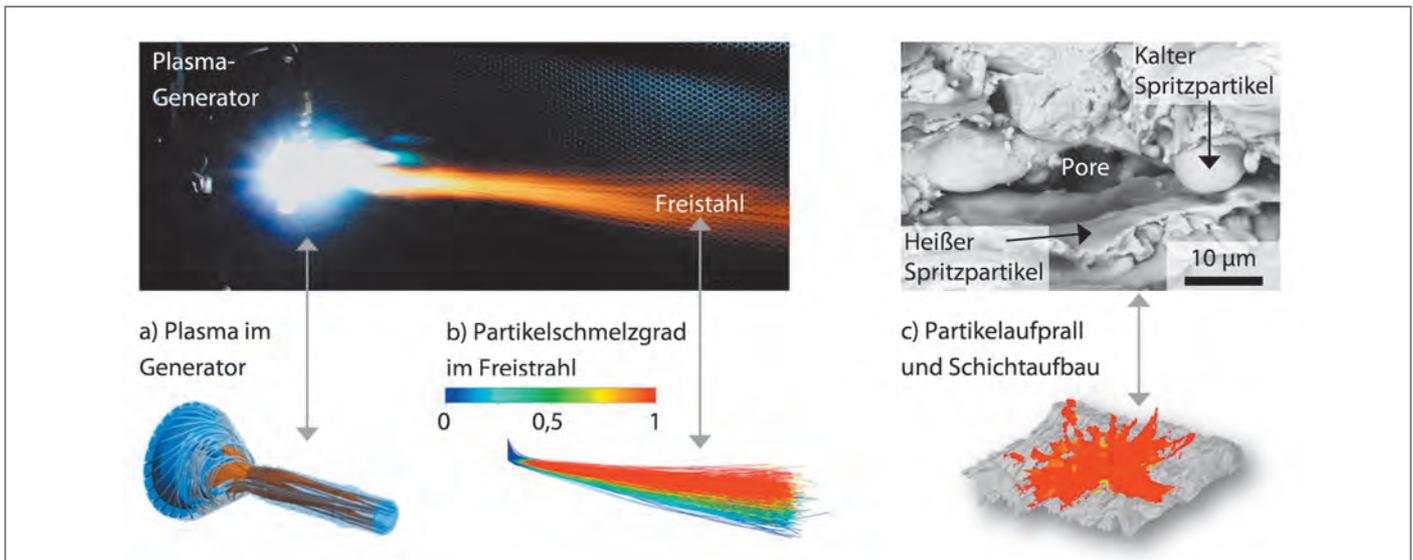


Abbildung 4: CFD-Simulation der Teilprozesse beim atmosphärischen Plasmaspritzen: a) Plasma im Generator; b) Partikel im Freistrah; c) Partikelauflauf auf dem Substrat.

Durch die CFD-Simulation kann die Gasströmung bzw. das Plasma schon innerhalb des Brenners, der i.d.R. messtechnisch schwer zugänglich ist, analysiert werden. Auch der Partikelschmelzgrad während des Flugs im Freistrah lässt sich mittels eines speziell entwickelten Modells berücksichtigen. Die Simulation des Partikelauflaufs, der entscheidend für die Mikrostruktur der Beschichtung ist, ist ebenfalls realitätsnah möglich. Durch eine Verknüpfung der einzelnen Teilsimulationen lässt sich so der gesamte Prozess des atmosphärischen Plasmaspritzens abdecken.

Zur Simulation des Kaltgasspritzens findet hingegen die Finite-Elemente-Methode (FEM) ihren Einsatz. Bei dieser TS-Prozessvariante werden die Partikel nicht geschmolzen, sondern nur aufgeheizt, und prallen mit hoher Geschwindigkeit auf das Substrat. Dies führt zu einer starken plastischen Verformung der festen Partikel, wodurch die Verbindungsbildung und der Schichtaufbau ermöglicht wird. Durch die FEM-Simulation kann die Verformung des Materials unter verschiedenen Randbedingungen, wie z. B. bei unterschiedlichen Partikelgeschwindigkeiten, analysiert werden. Diese Analysen erweitern einerseits das Prozessverständnis sowie ermöglichen andererseits die effiziente Anpassung der Schichteigenschaften entsprechend den Anforderungen der Anwendung.

PVD: Tribologische Beschichtungen für Mobilitätsanwendungen und wissensbasierte Entwicklung industrierelevanter Beschichtungsprozesse

Ein zunehmendes gesellschaftliches und politisches Umweltbewusstsein führen zur Forderung nach reduzierter Emission klimaschädlicher Gase. Hiervon sind maßgeblich die Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen und die konventionelle, auf Verbrennungskraftmaschinen basierende, Mobilität betroffen. Im automobilen Sektor spiegeln sich diese Forderungen beispielsweise in der steigenden Restriktion der zulässigen CO₂-Emission pro gefahrenem Kilometer für neuzugelassene PKW und Nutzfahrzeuge wider. Über den Fahrzeugsektor hinaus werden über das EU-Klimapaket auch andere Branchen in die Verantwortung einer effizienten und nachhaltigen Energienutzung und nach reduzierten Emissionen klimaschädlicher Gase gezogen. Effizienzsteigerungen und die damit verbundenen Emissionseinsparungen stellen daher eine zentrale Zielgröße der industriellen Entwicklungsaktivitäten in der EU und, infolge internationaler Klimaschutzabkommen, auch weltweit dar. Im Bereich der Verkehrs- und Energietechnik können somit Reibungs- und Verschleißreduktion als zentrale Entwicklungsziele abgeleitet werden. Zudem können in Turbinenanwendungen Effizienzsteigerungen durch erhöhte Verbrennungstemperaturen und Leichtbauwerkstoffe erreicht werden.

Im Fokus der Forschung zu PVD-Bauteilbeschichtungen stehen am Institut für Oberflä-

chentechnik daher sowohl Beschichtungen zur Reibungs- und Verschleißreduktion als auch zur Erhöhung der Einsatztemperatur innovativer Grundwerkstoffe in Hochtemperaturanwendungen. Die Bandbreite der technischen Anwendungen reicht dabei von Komponenten aus Verbrennungskraftmotoren wie Kolbenbolzen und Lagerschalen über Verzahnungen bis hin zu Turbinenschaufeln.

Zur Reibungs- und Verschleißreduktion in tribologischen Anwendungen werden am IOT diamantähnliche Kohlenstoffschichten (Diamond-like Carbon; kurz DLC) sowie nitridische Hartstoffschichten mit triboaktiven Eigenschaften (Cr,Al)N+X erforscht. Von zentraler Bedeutung sind hierbei Wechselwirkungen zwischen den Beschichtungen und Schmierstoffen. Am Institut für Oberflächentechnik wurde das triboaktive Schichtsystem (Cr,Al)N+X entwickelt, wobei Mo und W als triboaktive Elementte X eingesetzt wurden. Unter tribologischer Beanspruchung konnten tribochemische Reaktionen zwischen den triboaktiven Elementen und additiven, mineralölbasierten Schmierstoffen nachgewiesen werden. Im Vergleich zu unbeschichtetem Stahl konnten durch die sich bildenden Reaktionsschichten Reibung und Verschleiß deutlich reduziert werden. In laufenden Forschungsvorhaben werden diese Wechselwirkungen unter Minimalmengenschmierung für den Einsatz auf Verzahnungen und Antriebsketten anwendungsnah untersucht, mit dem Ziel die triboaktiven Beschichtungen für die Anwendung in der Praxis zu optimieren.

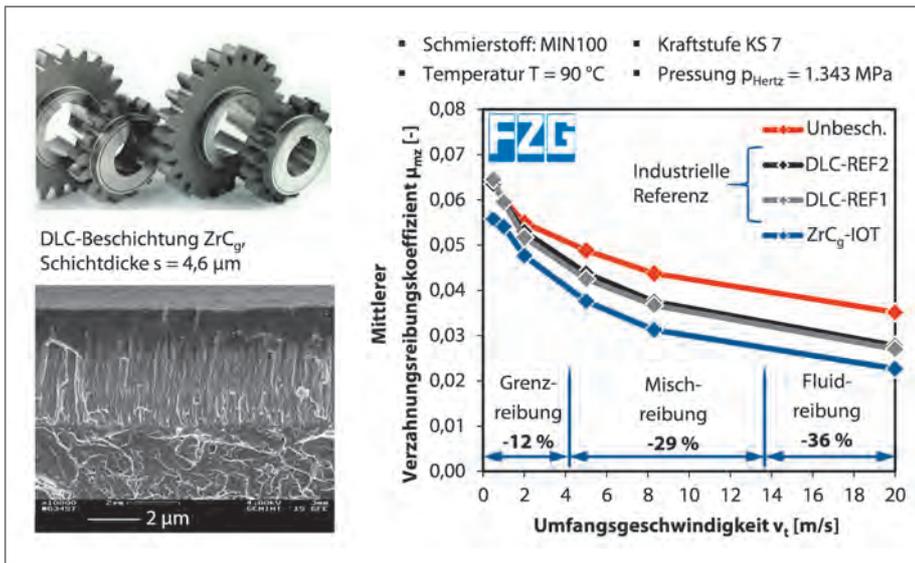


Abbildung 5: Reduktion des Verzahnungskoeffizienten durch gradierte DLC-Beschichtungen für Zahnräder im geschmierten Kontakt.

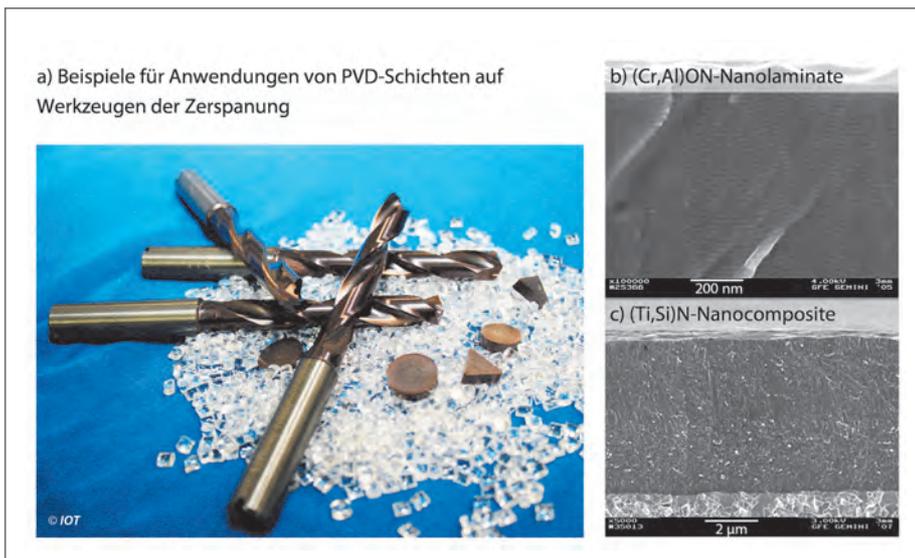


Abbildung 6: a) Anwendungsbeispiele für PVD-Werkzeugbeschichtungen aus der Zerspänung; Beispiele für PVD-Schichtarchitekturen: b) Nanolaminare; c) Nanocomposite.

Im Bereich der DLC-Beschichtungen zeigte sich, dass die geringe Wärmeleitfähigkeit von DLC-Beschichtungen im Vergleich zu unbeschichtetem Stahl unter elastohydrodynamischer Schmierung auf Verzahnungen zu deutlicher Reibungsreduktion führen kann. **Abb. 5** zeigt einen Querbruch einer gradierten DLC-Beschichtung und die positiven Auswirkungen solcher Beschichtungen auf den Verzahnungskoeffizient von Zahnrädern im geschmierten Kontakt. Es konnte erstmals belegt werden, dass die thermische Isolationswirkung der Beschichtungen zu einer Abnahme der Schmierstoffviskosität im tribologischen Kontakt führt, wodurch diese signifikanten Reibungsreduktionen erzielt werden. In zurzeit

am IOT laufenden Vorhaben werden die Wechselwirkungen zwischen DLC-Beschichtungen und additivierten Schmierstoffen unter elastohydrodynamischer Schmierung umfangreich untersucht. Mit dem vermehrten Einsatz niedrigviskoser und synthetischer Schmierstoffe ist auch zukünftig ein hoher Forschungsbedarf im Bereich der Wechselwirkungen zwischen PVD-Beschichtungen und Schmierstoffen zu erwarten.

Im Bereich der Hochtemperaturanwendungen werden am IOT neben Wärmedämmschichten Beschichtungen zum Oxidationschutz von γ -Titanaluminiden (γ -TiAl) entwickelt. Um γ -TiAl auch bei Temperaturen oberhalb von $T = 850 \text{ °C}$

in sauerstoffhaltigen Atmosphären einsetzen zu können, werden zurzeit XAlON-Beschichtungen ($X = \text{Cr}, \text{Si}$) erforscht. Zur Schichtapplikation steht am Institut für Oberflächentechnik eine innovative High Speed-Physical Vapour Deposition-Anlage zur Verfügung. Diese ermöglicht die effiziente Herstellung von PVD-Beschichtungen mit Schichtdicken bis zu $d = 50 \text{ μm}$ bei Depositionsraten von bis zu $s = 50 \text{ μm/h}$.

Weiterhin beschäftigt sich das Institut für Oberflächentechnik mit der Werkstoff- und Beschichtungsentwicklung für Werkzeugapplikationen in der Ur- und Umform- sowie in der Zerspantechnik. Geforscht wird hier-

bei an konventionellen Beschichtungstechnologien wie dem Magnetron Sputtering sowie innovativen Beschichtungsprozessen auf Basis gepulster Hochleistungsplasmen wie dem High Power Pulsed Magnetron Sputtering. Neben mehreren PVD-Anlagen im Labormaßstab verfügt das Institut über die industrielle Beschichtungsanlage CC800/9 der CemeCon AG, Würselen, die mit sechs Kathoden und unterschiedlichen Leistungsversorgungen ausgestattet ist. Diese ermöglicht es, den Bogen zwischen Grundlagenforschung und industrierelevanten Beschichtungsprozessen zu spannen. Die Bandbreite der technischen Anwendungen reicht dabei von Bohrern oder Wendeschneidplatten für die zerspanende Bearbeitung, **Abb. 6 a)**, bis zu Werkzeugen für die Kunststoffverarbeitung. Durch die große Bandbreite von Beschichtungswerkstoffen sowie von Schichtarchitekturen, wie in **Abb. 6 b)** und **c)** gezeigt, können die Eigenschaften der Oberflächen gezielt an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendung angepasst werden.

Im Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ beispielsweise forscht das IOT in Kooperation mit weiteren Instituten der RWTH Aachen University an der Entwicklung einer durchgängigen Prozesskette zur Herstellung strukturierter, optisch funktionaler Kunststoffbauteile. Durch Beschichtung des im Mikro- oder Nanometerbereich laserstrukturierter Werkzeuges mittels PVD konnte etwa eine Reduktion des Verschleißes und der Adhäsionskraft zwischen der Werkzeugoberfläche und den verarbeiteten Kunststoffen erreicht werden. Die Abformqualität wurde, abhängig vom Strukturtyp, um 20 bis 30 % verbessert.

Im Sonderforschungsbereich SFB-TR 87 „Gepulste Hochleistungsplasmen zur Synthese nanostrukturierter Funktionsschichten“ ist das Institut für Oberflächentechnik zentral vertreten. Ein Schwerpunkt der Arbeiten liegt in der wissenschaftlichen Auslegung von PVD-Prozessen und der Entwicklung von Beschichtungen für geometrisch komplexe Komponenten aus Stahl für die Extrusion von Kunststoffen. Ziel ist es, das bisher übliche empirische Vorgehen bei der Prozessauslegung von Hochleistungs-Plasmaprozessen zu überwinden. Zur verbesserten Prozesskontrolle wurde dazu im Rahmen des SFB ein neuartiges

Messsystem zur in situ-Erfassung der Substrattemperatur in der industriellen 6-Kathoden-Anlage CC800/9 entwickelt. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Untersuchung des elastischen und plastischen Verformungsverhalten der wenige Mikrometer dicken, (oxi-)nitridischen Hartstoffschichten mittels einer innovativen Nanoscratch-Analytik. Ergänzt werden die Arbeiten durch die substratseitige Erforschung der Plasmaeigenschaften im PVD-Prozess. Die Ergebnisse dieser Analysen können erstmalig unter Verwendung künstlicher neuronaler Netzwerke etwa mit den Prozessparametern oder dem Verformungsverhalten der Hartstoffschichten korreliert werden.

Im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1676 „Nachhaltige Produktion durch Trockenbearbeitung in der Umformtechnik“ werden zudem am Institut für Oberflächentechnik maßgeschneiderte PVD-Schichten für den Einsatz in der trockenen Kaltmassivumformung von Stahl entwickelt. Hierbei werden extern zugeführte Schmierstoffe durch den Einsatz selbstschmierender Hartstoffschichten substituiert. Diese kombinieren die Verschleißbeständigkeit einer (Cr,Al)N-Hartstoffschicht mit den reibungsreduzierenden Eigenschaften von Metalldisulfiden, um die Umformwerkzeuge vor Schäden durch das anspruchsvolle Beanspruchungskollektiv in der Kaltmassivumformung zu schützen.

Technologieübergreifend forscht das Institut für Oberflächentechnik an Lösungen für die komplexen Anforderungsprofile der Anwendungen des 21. Jahrhunderts aus innovativen Bereichen wie der Energie-, Verkehrs- und Produktionstechnik. Durch die enge Verknüpfung von Simulation und Experiment, die ausgewogene Ausstattung mit Produktionsanlagen im Labor- und im Industriemaßstab sowie die umfassende Analytik am Institut ist die umfassende Bearbeitung der herausfordernden Fragestellungen möglich. Die enge, interdisziplinäre Verknüpfung des Instituts mit relevanten Forschungsstellen wird durch die Beteiligung an Großprojekten deutlich. Das Engagement in nationalen und internationalen Verbänden ermöglicht den stetigen Austausch über aktuelle Trends in Forschung und Industrie, was in der anwendungsnahen und wissenschaftlich fundierten Forschung des Instituts der Oberflächentechnik resultiert.

Autoren:

*Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin,
Dr.-Ing. Tobias Brögelmann,
Dr.-Ing. Mehmet Öte,
Christian Kalscheuer, Martin Knoch,
Tim Königstein, Nathan Kruppe,
Xifang Liao, Stefanie Wiesner,
Wolfgang Wietheger*

KONTAKT

RWTH Aachen University

Institut für Oberflächentechnik (IOT)

Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin

Kackerstraße 15

Tel.: +49 (0)241 80-95327

Fax: +49 (0)241 80-92264

info@iot.rwth-aachen.de

www.iot.rwth-aachen.de

» CemeCon: Premiumbeschichtungen und mehr – Anlagen- und Beschichtungsproduktion eng verzahnt «

Beschichtungen sind eines der wichtigsten Mittel, um die Leistungsfähigkeit von Werkzeugen zu erhöhen und erfordern daher höchste Qualität. CemeCon ist bekannt für seine leistungsstarken, extrem glatten Beschichtungen. Basis dafür sind die bewährten, hochinnovativen Beschichtungsanlagen, die das Unternehmen seit 30 Jahren entwickelt und produziert. Mit ihnen verschiebt CemeCon die Referenzlinien der Werkzeugbeschichtung nach oben.

Würselen. – Seit über 30 Jahren steht CemeCon für Hochleistungsbeschichtungen auf Präzisionswerkzeugen – von extrem harten Diamantbeschichtungen für die Bearbeitung von CFK und Graphit bis hin zu leistungsstarken und extrem glatten PVD-Beschichtungen in Stahl, Guss und Aluminium. In Würselen betreibt CemeCon eines der weltweit größten Beschichtungszentren. Dort werden täglich bis zu 80.000 Präzisionswerkzeuge mit hochwertigen Premiumbeschichtungen veredelt. Dabei konstruiert und produziert CemeCon die Beschichtungsanlagen selbst und entwickelt sie stetig weiter.

Bei der Entwicklung und Fertigung der Beschichtungsanlagen kann CemeCon auf einen einzigartigen Erfahrungsschatz zurückgreifen: Weit über 350 Anlagen hat CemeCon bereits weltweit in die jeweiligen Kundenproduktionen integriert. Die Kunden sind Werkzeughersteller, Lohnbeschichter sowie Universitäten und Forschungseinrichtungen. Sie suchen kompetente Partner für ihre Inhouse-Beschichtung – von Einzelanlagen bis hin zu schlüsselfertigen Turnkey-Lösungen. „Die Anlagen liefern wir weltweit an unsere Kunden und setzen sie gleichzeitig in unserer eigenen Fertigung in der Lohnbeschichtung ein“, so Bernd Hermeler, CMO der CemeCon AG. Darin sieht er einen unschlagbaren Vorteil gegenüber anderen Beschichtern. „Wir kennen unsere Maschinen in- und auswendig: Zum einen, weil wir sie selbst mit all unserer Erfahrung gebaut haben, zum anderen, weil wir ihre Leistung tagtäglich in der Praxis sehen. Dieses Know-how fließt in neue Ideen und

Konzepte zur Weiterentwicklung unserer Technologie ein. Davon profitieren sowohl wir selbst als auch unsere Kunden durch steigende Produktivität, Ergonomie, Verarbeitungsqualität und Wirtschaftlichkeit“, so Dr. rer. nat Werner Kölker, Head of R&D, CemeCon AG. Das Handling konnte so beispielsweise über Jahre hinweg optimiert werden, so dass die Beschichtungsanlagen sehr gut an die Bedürfnisse des Bedieners angepasst sind und ohne unnötige Handgriffe intuitiv bedient werden können. Die enge fachliche Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen und anderen führenden Universitäten trägt erheblich dazu bei, dass CemeCon mit großer Dynamik seine technologische Spitzenposition immer weiter ausbauen kann. In vielfältigen Forschungsprojekten der hauseigenen F&E-Abteilung zusammen mit Instituten und Indust-

riepartnern erschließt CemeCon immer neue Wege in der Beschichtungstechnologie.

Neuste Anlagengeneration: CC800® HiPIMS

Das neueste Ergebnis dieser einzigartigen Kombination aus Erfahrung und Know-how ist die CC800® HiPIMS: Sie vereint alle Vorteile der Sputtertechnik mit den Möglichkeiten der technologisch führenden HiPIMS-Technologie.

„Die Anlage besitzt insgesamt sechs Sputterkathoden, die individuell geschaltet werden können. Vier der Kathoden arbeiten wahlweise im DC, aber auch im reinen HiPIMS-Modus. So können erstmals reine HiPIMS-Schichten wirtschaftlich abgeschieden werden“, erläutert Dr.-Ing. Christoph Schiffers, Sales Equipment bei der CemeCon AG. „Um komplexere



Seit 30 Jahren entwickelt und produziert CemeCon die Beschichtungsanlagen selbst und schafft so die Basis für erstklassige Premiumbeschichtungen.

Beschichtungen herzustellen, Farb- und Deckschichten abzuscheiden oder die Beschichtungsrate zu erhöhen, lassen sich die beiden anderen DC-Kathoden beliebig zuschalten.“ Die HIPIMS-Technologie ermöglicht eine bisher nicht gekannte Vielfalt an hochqualitativen Schichtwerkstoffen. So ist die CC800® HiPIMS in der Lage, praktisch jedes Material zu zerstäuben. Die erzeugten Beschichtungen sind glatt, dropletfrei und spannungsarm. Und das Verfahren kann noch mehr: Die hohe Metallionisation von nahezu 100 Prozent sorgt für eine ausgezeichnete Haftung und lässt dichte, kompakte Beschichtungen „wachsen“, die gleichzeitig sehr hart und zäh sind. Das homogene Plasma führt zu einer gleichmäßigen Schichtdickenverteilung auf den teils hoch komplexen Werkzeuggeometrien – auch bei kleinsten Abmessungen. Schneidkantengeometrien von Mikrowerkzeugen werden nicht beeinflusst oder gar unerwünscht verrundet.

Wirtschaftlich und bedienerfreundlich
Höchste Beschichtungsqualität vereint sich bei der CC800® HiPIMS mit enormer Wirt-

schaftlichkeit: Sie scheidet reine HiPIMS-Schichten – also mit den vier Sputterkathoden im HiPIMS-Modus – mit einer Rate von 2 µm/h ab. Dazu Dr.-Ing. Christoph Schiffers: „Damit erreicht sie hervorragende Prozesszeiten pro Charge von zirka vier bis fünf Stunden sowohl für Schaftwerkzeuge als auch für Wendeschneidplatten. Dies bedeutet: bis zu 1.800 Schaftwerkzeuge oder 5.000 Wendeschneidplatten pro Charge, also bis zu 9.000 Schaftwerkzeuge oder 20.000 Wendeschneidplatten pro Tag.“ Trotz der herausragenden Eigenschaften und höchster Produktivität ist die CC800® HiPIMS einfach in der Handhabung und perfekt für den Produktionsalltag, aber auch gleichermaßen zur Entwicklung anwendungsspezifischer Prozesse. Die kundenfreundliche Bedieneroberfläche „DataView“ und das integrierte Planungstool „DataPlan“ ermöglichen die Entwicklung eigener Schichtwerkstoffe. Die intuitive Touch-Bedienung unterstützt die Anlagensteuerung hervorragend. Auch die übersichtliche Software zur Fernwartung mittels PC, der wartungsfreundliche Aufbau, die automatische Türschließer und der Schnell-

wechseltisch zeigen, dass bei der Konstruktion der CC800® HiPIMS einfaches Handling oberstes Gebot war.

Fazit

„Mit der innovativen CC800® HiPIMS haben wir eine herausragende Beschichtungsanlage für die Produktion und Entwicklung modernster Hochleistungsbeschichtungen konstruiert. Das konnte in diesem Maß nur durch unseren praktischen Erfahrungsschatz in Europas größtem Beschichtungszentrum und das jahrzehntelange Know-how im Anlagenbau sowie die intensive Forschungsarbeit mit zahlreichen Partnern realisiert werden“, so Bernd Hermeler.

KONTAKT

CemeCon AG

Dr.-Ing. Christoph Schiffers

Adenauerstr. 20 A4

D-52146 Würselen

coatingtechnology@cemecon.de

www.cemecon.de

HiPIMS

DIE STEIGERUNG VON PREMIUM

» Gesteigerte Produktionseffizienz durch integrierte und smarte Prozesskontrolle «

Plasmaprozesse werden bereits seit vielen Jahren für die Funktionalisierung von Oberflächen eingesetzt. Eine durchgängig hohe Produktionsqualität auch für anspruchsvolle Anwendungen bei gleichzeitig langen Anlagenlaufzeiten wird in der Produktion nur durch eine intelligente Plasmaprozesskontrolle gewährleistet.

Einführung

DLC Schichten, Hartstoffschichten und dekorative Schichten werden häufig mittels Plasmaprozessen in einer Vakuumkammer aufgebracht. Je nach Anwendungsbereich werden unterschiedliche Plasmaverfahren eingesetzt: PECVD, reaktives Magnetronspütern, Arc-Verdampfen, HIPIMS, etc.. Alle diese Verfahren erzeugen in der Vakuumkammer Atome und Moleküle, die auf dem Werkstück die gewünschte Schicht erzeugen. Während der Schichtbildung ist es wichtig, die Plasmaprozessbedingungen konstant zu halten bzw. bewusst zeitlich zu ändern, um die gewünschten Schichteigenschaften zu erzielen.

Eine zuverlässige Schichtherstellung in der automatisierten Produktion ist dabei nur mit einer integrierten und smarten Prozessüberwachung des Plasmaprozesses möglich. Damit werden Abweichungen vom Arbeitspunkt in Echtzeit erkannt und ausgeregelt bzw. bei einem Anlagenfehler der Prozess abgebrochen. Dieses sichert die Produktionsqualität und erhöht die effektiven Produktionszeiten und führt zu einer höheren Anlagenproduktivität. Die Investition in die Anschaffung einer Prozesskontrolle wird in kurzer Zeit amortisiert sein.

PLASUS bietet seit mehr als 20 Jahren Prozesskontrollsysteme für Plasmaverfahren an und hat sich dabei auf die Integration in Produktionslinien spezialisiert. Zusammen mit seinen Technologiepartnern **robeko GmbH & Co. KG** und **Magpuls GmbH** erarbeitet die **PLASUS GmbH** intelligente und vernetzte Kundenlösungen.

Intelligente Plasmaprozesskontrolle

Für einen dauerhaften und zuverlässigen Einsatz in der modernen Produktion muss ein Prozesskontrollsystem für Plasmaanwendun-

gen wichtige Voraussetzungen und Eigenschaften mitbringen:

- berührungslose Messung
- Vakuumsensoren mit langen Standzeiten
- kontinuierliche Echtzeitmessung (≤ 25 ms)
- Verknüpfung versch. Prozessparameter
- Industrieschnittstellen für die Anlagenintegration (Profibus/-net, EtherCAT, ...)
- Datenschnittstelle für Clouddienste für Industrie 4.0 (OPC UA, Modbus, LAN, ...)



Das Plasmamonitor- und Prozesskontrollsystem **EMICON SA** von PLASUS erfüllt diese Anforderungen, in dem es spektroskopische Messungen des Plasmaprozesses mit Messungen von elektrischen Prozessgrößen wie z.B. der Targetspannung, dem Plasmapotential oder dem Pulsstrom verknüpft. Diese neuartige und bislang einmalige Kombination von Datenerfassung und Datenauswertung im EMICON SA System eröffnet neue Möglichkeiten für die Prozesskontrolle und Prozessführung und erlaubt eine umfassende Kontrolle des Plasmaprozesses. Das EMICON SA System ist zudem modular aufgebaut, so dass für jede Anwendung die optimale Kombination von Messsensoren eingesetzt werden kann.

Einsatzbereiche

Das EMICON SA System kann in nahezu jeder Plasmaanwendung eingesetzt werden unabhängig von der Anregungsart, dem Arbeitsdruck und der eingesetzten Gase und Materialien.

Plasmatypen:

- Magnetronspütern und Arc-Verdampfung
- Mikrowelle, RF, DC
- atmosphärische Plasmen (Corona, DBD, Jet)

Anwendungsgebiete:

- Beschichten (Werkzeuge, Bauteile, Glas)
- Ätzen und Reinigen (Werkstück, Kammer)
- Vorbehandeln und Aktivieren

Produktbereiche :

- DLC- und Hartstoffschichten
- dekorative Schichten
- Architekturglasbeschichtungen
- Solarzellenherstellung

Anwendungsbeispiele

Das reaktive Sputtern von Al_2O_3 Schichten ist nur mit einer aktiven Regelung des Sauerstoffflusses möglich, um den Arbeitspunkt für die gewünschten Schichteigenschaften bei gleichzeitig hoher Abscheiderate konstant zu halten. Der Gasfluss des Sauerstoffs wird dabei über das spektrale Verhältnis der Aluminiumlinie zu einer Argonlinie geregelt. In einer Durchlaufanlage kommt es in den Lücken zwischen den Werkstücken zu Abweichungen vom Arbeitspunkt. Diese Abweichungen sollten möglichst gering gehalten werden, damit der Arbeitspunkt zu Beginn des neuen Werkstücks schnellstmöglich wieder erreicht wird. Durch die aktive Verknüpfung der spektralen Gasflussregelung mit der Targetspannung der Magnetronkathode

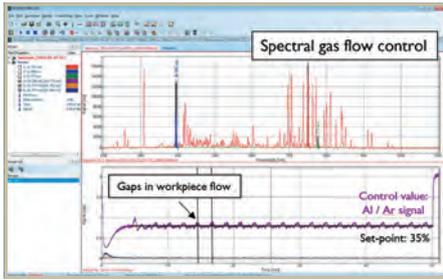


Abb. 1: Aktive Ausregelung von Störgrößen im reaktiven Al₂O₃ Sputterprozess

im EMICON SA System kann dieses erfolgreich umgesetzt werden und somit wird der Produktionsausschuss durch inhomogene Randbeschichtungen sehr gering gehalten.

Beim PECVD Beschichten mit Precursorgasen z.B. in mikrowellenangeregten Plasmen wird nicht nur das Werkstück sondern die gesamte Kammerwand beschichtet. Zum Reinigen der Beschichtungskammer ist es aktuell üblich, einen Ätzprozess eine bestimmte vordefinierte Zeit laufen zu lassen.

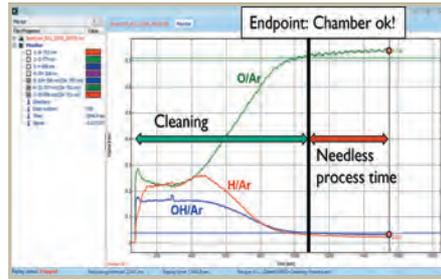


Abb. 2: Reduzierung der Servicezeit durch Endpunkterkennung bei der Kammerreinigung

Eine Überwachung, ob und wann die Beschichtungskammer gereinigt ist, erfolgt meistens nicht. Mit den spektralen Messgrößen und den Messgrößen der eingebrachten bzw. reflektierten Mikrowellenleistung bestimmt das EMICON SA System den richtigen und optimalen Zeitpunkt für das Erreichen des Endpunktes der Kammerreinigung. Dadurch wird zum einen die Servicezeit für die Kammerreinigung reduziert und zum anderen befindet sich die Kammer nach der Reinigung immer wieder im gleichen Zustand

wie vor der Wiederaufnahme der Produktion.

Fazit

Eine smarte und integrierte Prozesskontrolle in Plasmaproduktionsanlagen kann die Produktionseffizienz erheblich steigern sowohl hinsichtlich Produktqualität als auch Anlagenlaufzeit und somit Produktions- und Anlagenkosten senken. Mit dem EMICON SA System steht eine leistungsfähige, zuverlässige und intelligente Lösung zur Verfügung, die problemlos in die Gesamtanlage integriert werden kann und für alle Aufgaben einer vernetzten Industrie 4.0 Produktion vorbereitet ist.

KONTAKT

PLASUS GmbH

Lechstraße 9
D-86415 Mering
Tel.: +49 (0)8233 735378-0
service@plasus.de
www.plasus.de

EMICON SA

PLASMA MONITOR AND
PROCESS CONTROL SYSTEM



**STAND-ALONE PLASMA PROCESS CONTROL SYSTEM
FOR INDUSTRIAL PRODUCTION LINES**

PLASUS
Spectroscopic plasma monitor and
process control systems

Applications:

- DLC and tool coating
- decorative coating
- PVD, PECVD, arc
- reactive sputtering, HIPIMS

Benefits:

- quality control and fault detection
- process optimization
- chamber health monitoring
- higher production yield
- less maintenance time

» InnoTape – Lotmatten für das Reparaturlöten von Gasturbinen «

Harald Krappitz, Minhaz Uddin,
Innobraze GmbH, Esslingen

Gasturbinen werden hauptsächlich zur Stromerzeugung sowie als Antrieb für Luftfahrzeuge eingesetzt. Der Wirkungsgrad solcher Turbomaschinen steigt mit steigender Turbineneintrittstemperatur, was zur Entwicklung von Hochtemperaturwerkstoffen führte, welche die Anforderungen an steigende Prozesstemperaturen erfüllen. Der Aufwand in Werkstoffkosten und Fertigung ist dabei jedoch stetig gestiegen und es werden heute wertvolle Bauteile eingesetzt, bei denen nach Ende der Betriebsdauer eine Aufarbeitung aus Kostengründen angestrebt wird. Zu diesem Zweck wurden Reparaturverfahren entwickelt, die es ermöglichen, aufgearbeitete Komponenten erneut einzusetzen. Das Diffusionslöten nimmt dabei eine dominante Position ein.

1. Superlegierungen

Superlegierungen sind Hochleistungswerkstoffe, welche neben ausgezeichneten Festigkeitseigenschaften bei hohen Temperaturen einen hohen Widerstand gegen Kriechen und thermische Ermüdung sowie eine hohe Beständigkeit gegen Korrosion und Oxidation aufweisen. Die günstigen Hochtemperatureigenschaften werden durch Mischkristallverfestigung oder Ausscheidungsverfestigung erreicht. Bei der Ausscheidungsverfestigung wird durch eine gezielte Wärmebehandlung eine intermetallische γ' -Phase $Ni_3(Al,Ti)$ feinverteilt in der γ -Matrix der Legierung ausgeschieden, wodurch die Wanderung von Versetzungen blockiert wird. Legierungselemente wie Cr, Al oder Y bewirken außerdem eine hohe Beständigkeit gegen Oxidation und Korrosion.

Fortschritte in der Gießtechnik von Turbinenschaufeln haben zunächst zu gerichtet erstarrten Schaufeln geführt, bei denen die Korngrenzen so zur Beanspruchungsrichtung orientiert sind, dass ein Gleiten der Korngrenzen unterdrückt werden kann. Weitere Fortschritte wurden erzielt, indem heute solche Bauteile als Einkristalle gefertigt werden. Durch einen genau

geführten Erstarrungsprozess und die Verwendung hochreiner Einsatzstoffe kann die Bildung von Korngrenzen vermieden werden, was die Zeitstandfestigkeit der Bauteile verbessert und eine höhere Betriebstemperatur ermöglicht.

2. Gasturbinen

Gasturbinen sind im Betrieb einer Überlagerung von hohen thermischen und mechanischen Wechselbeanspruchungen sowie einem chemisch korrosiven Angriff ausgesetzt, welche Schädigungen unterschiedlicher Art an den Bauteilen verursachen. Der hierdurch verursachte Materialabtrag an den Oberflächen führt zunächst zu einer Verringerung des Wirkungsgrades der Turbine und bei weiterem Fortschreiten der Schädigung droht ein vollständiger Ausfall. Ein Austausch verschlissener Teile durch Neuteile würde hohe Kosten verursachen, weshalb Reparaturprozessen für diese wertvollen Teile entwickelt wurden. Einige der Schäden an verschlissenen Komponenten einer Gasturbine können durch einen Diffusionslötprozess repariert werden, wobei zu diesem Zweck polymergebundene "grüne" Tapes oder auch vorgesinterte Formteile aus Lotpulvern kombiniert mit Grundwerkstoffpulvern auf Nickel- oder Kobaltbasis-Superlegierungen als Zusatzwerkstoffe eingesetzt werden. Auf diese Weise können Risse und Oberflächendefekte geheilt werden und die wertvollen Komponenten einer Gasturbine stehen nach der Reparatur für einen weiteren Einsatzzyklus zur Verfügung. Die reparaturgelöteten Komponenten weisen Eigenschaften auf, welche nahezu denen von Neuteilen entsprechen.

3. Reparaturlöten

Löten ist in erster Linie bekannt als Fügeverfahren, es hat jedoch sein hohes Potenzial als Verfahren zum Beschichten von Oberflächen gegen Verschleiß und Korrosion in zahlreichen Anwendungen erfolgreich unter Beweis gestellt. Das Auftraglöten ermöglicht auch den Wiederaufbau von verschlissenen Oberflächen. Dabei werden

die Flächen wiederhergestellt, indem konturgenaue Formstücke dem zu reparierenden Bauteil angepasst werden. Durch die hohe Maßhaltigkeit aufgelöteter Formstücke kann die erforderliche Nacharbeit gering gehalten werden. Der Grundwerkstoff wird durch den Lötprozess nicht aufgeschmolzen, wodurch sich auch rissempfindliche Legierungen löten lassen, die durch einen alternativen Schweißprozess nicht verarbeitet werden könnten. Für das sogenannte Diffusionslöten wird dabei ein Lot mit einem Grundwerkstoffpulver gemischt. Durch Zusätze, welche den Schmelzbereich absenken, wie z.B. Bor oder Silizium schmilzt das Lot im Prozess auf und benetzt das höher schmelzende Grundwerkstoffpulver sowie die Bauteiloberfläche. Bedingt durch Diffusionsvorgänge findet anschließend ein Konzentrationsausgleich der schmelzpunktsenkenden Elemente statt. Die durch das Diffusionslöten gefertigten Schichten auf Nickel- oder Kobaltbasis erzielen eine hohe Wiederaufschmelztemperatur und weisen nach der Reparatur grundwerkstoffähnliche Eigenschaften auf.



Abb.1: Flexible InnoTape-Matten für das Reparaturlöten von Turbinenschaufeln

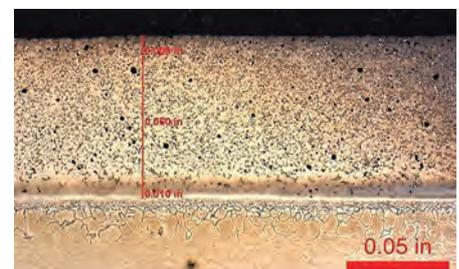


Abb.2: Mikrostruktur einer 3-lagigen InnoTape-Beschichtung nach dem Löten

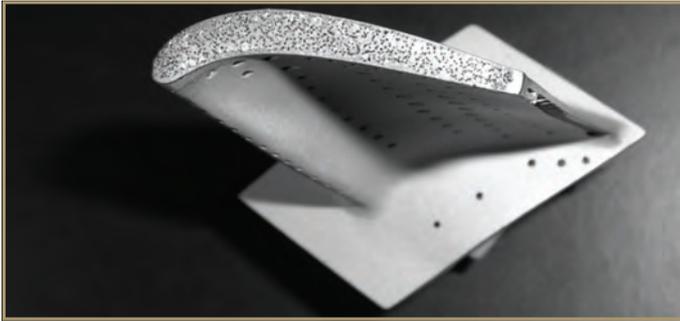


Abb. 3: Auflöten von MCrAlY/CBN Tape auf eine Schaufelspitze Quelle: MTU München

4. InnoTape Reparaturtapes

Innobraze bietet flexible Matten (InnoTape) und Formstücke für die Reparatur von Turbinenkomponenten an, die aus Gemischen geeigneter Superlegierungspulver und hierzu passenden Nickel- oder Kobaltbasisloten bestehen. Die Pulver sind durch geringe Mengen von Polymeren gebunden. **Abb. 1** zeigt ein flexibles Tape, wie es zur Reparatur von Turbinenschaufeln eingesetzt wird. Der Anteil des Polymerbinders kann dabei auf 1,5 - 2 Gew.-% begrenzt werden, wodurch keine nachteiligen Einflüsse auf den Lötprozess durch das thermisch zersetzende Polymer auftreten. Es entstehen hochflexible Tapes mit optimierter Packungsdichte, die eine nahezu porenfreie Schicht ermöglichen.

Abb. 2 zeigt die Mikrostruktur eines 3-lagigen gelöteten Tapes. Die Beschichtung ist etwa 2mm dick und wurde beidseitig mit 250 µm dicken Lagen aus Lot plattiert. InnoTapes können durch einfache Schneide- oder Stanzoperationen in die gewünschte Form gebracht werden. Die so erzeugten Formteile können auch auf gekrümmte Oberflächen aufgetragen werden, da sie sich der Krümmung anschmiegen. Ein speziell für diese Tapes entwickelter Haftvermittler wird verwendet, um flexible Tapes oder Formstücke vor dem Löten auf der Oberfläche der Bauteile zu fixieren. Tapes können auch als Mehrfachlagen unterschiedlicher Zusammensetzung eingesetzt werden. Auf diese Weise können selbst gradierte Schichten erzeugt werden, die einen Beitrag zum Spannungsabbau leisten können, wenn Werkstoffe unterschiedlichen thermischen Ausdehnungsverhaltens miteinander kombiniert werden sollen. Darüber hinaus können Tapes auch mit Hartstoffen gefüllt sein. **Abb. 3** zeigt die Spitze einer Turbinenschaufel, die mit einer Schicht aus MCrAlY geschützt wurde, in die Partikel aus kubischem Bornitrid eingebracht wurden (Quelle: MTU München).

Weitere Produkte der Innobraze GmbH für den Reparaturbereich von Gasturbinen betreffen Lotpasten, Lotschnüre (InnoRope) sowie Lotformteile aus Ni-Loten.

Innobraze bietet auch pulvermetallurgisch hergestellte vorgesinterte Formteile an, die frei von organischen Bindern sind. Diese Formteile werden in endabmessungsnaher Kontur hergestellt und vor dem Lötprozess durch Punktschweißung auf der Bauteiloberfläche befestigt. Fehlerfreie Beschichtungen niedrigster Porosität (<1%) und mit geringer Schwindung können so erzielt werden.

KONTAKT

Innobraze GmbH
 Dr. Harald Krappitz
 Fritz-Müller-Straße 97
 D-73730 Esslingen
 harald.krappitz@innobraze.de

LOTE - DOSIERTECHNIK - BERATUNG

Systemlösungen für das Ofenlöten

INNOBRAZE GmbH
 für Löt- und Verschleißtechnik

Fritz-Müller-Straße 97 ■ 73730 Esslingen
 Tel.: 0711 / 315 476 - 0 ■ Fax: 0711 / 315 476 - 29
 info@innobraze.de

www.innobraze.de

» Qualitätsanalyse mit Computertomografie (CT) – Neue Maßstäbe bei der Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität «

YXLON International, ein Unternehmen der Schweizer Comet Gruppe, ist der führende Anbieter von Röntgen- und CT-Systemen für die zerstörungsfreie Prüfung von Komponenten und Materialien.

Mit der Einführung des neuen CT-Prüfsystems FF85 CT setzt YXLON neue Maßstäbe in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität bei der zerstörungsfreien Materialprüfung und Analyse mittels Computertomografie. Durch den Einsatz unterschiedlicher Röhren sowie des hochpräzisen Granitmanipulators ist das FF85 CT ein Allround-CT-System für die Prüfung von kleinen bis großen Teilen und Materialien unterschiedlicher Dichte.

Computertomografie übertrifft die übliche röntgenbasierte 2D-Bildgebung um Lichtjahre, denn die dreidimensionalen Volumen liefern detaillierte Informationen über die inneren Strukturen eines Prüfteils inklusive Lufteinschlüssen, Porositäten und unterschiedlichen Materialdichten. CT hat sich zu



einem der wichtigsten und leistungsstärksten NDT-Verfahren (NDT: non-destructive testing – zerstörungsfreie Prüfung) entwickelt – ein Erfolg, der auf den fortwährenden Verbesserungen der Scan- und Rekonstruktionsmethoden ebenso wie auf den intelligenten und innovativen Bedienkonzepten beruht. Mit einfacher Handhabung verlässliche Ergebnisse höchster Qualität erzeugen ist der Anspruch heutiger Anwender.

Nach dem YXLON FF20 CT und FF35 CT und ihren Metrologie-Versionen steht nun mit dem FF85 CT ein weiteres Familienmitglied der neuen CT-Generation zur Verfügung, das dem Anwender maximale Flexibilität und höchsten Bedienkomfort bietet.

Mit der Softwareplattform Gemini hat YXLON völlig neue Wege beschritten: intuitive Smart-Touch-Bedienung, Remote Monitoring, Push Messages und unterschiedliche Nutzerprofile ermöglichen die Bedienung der Systeme ohne spezielle Vorkenntnisse. Die intuitive Systemsteuerung erfolgt über zwei Touch-Monitore mit leichtverständlichen Grafiken.

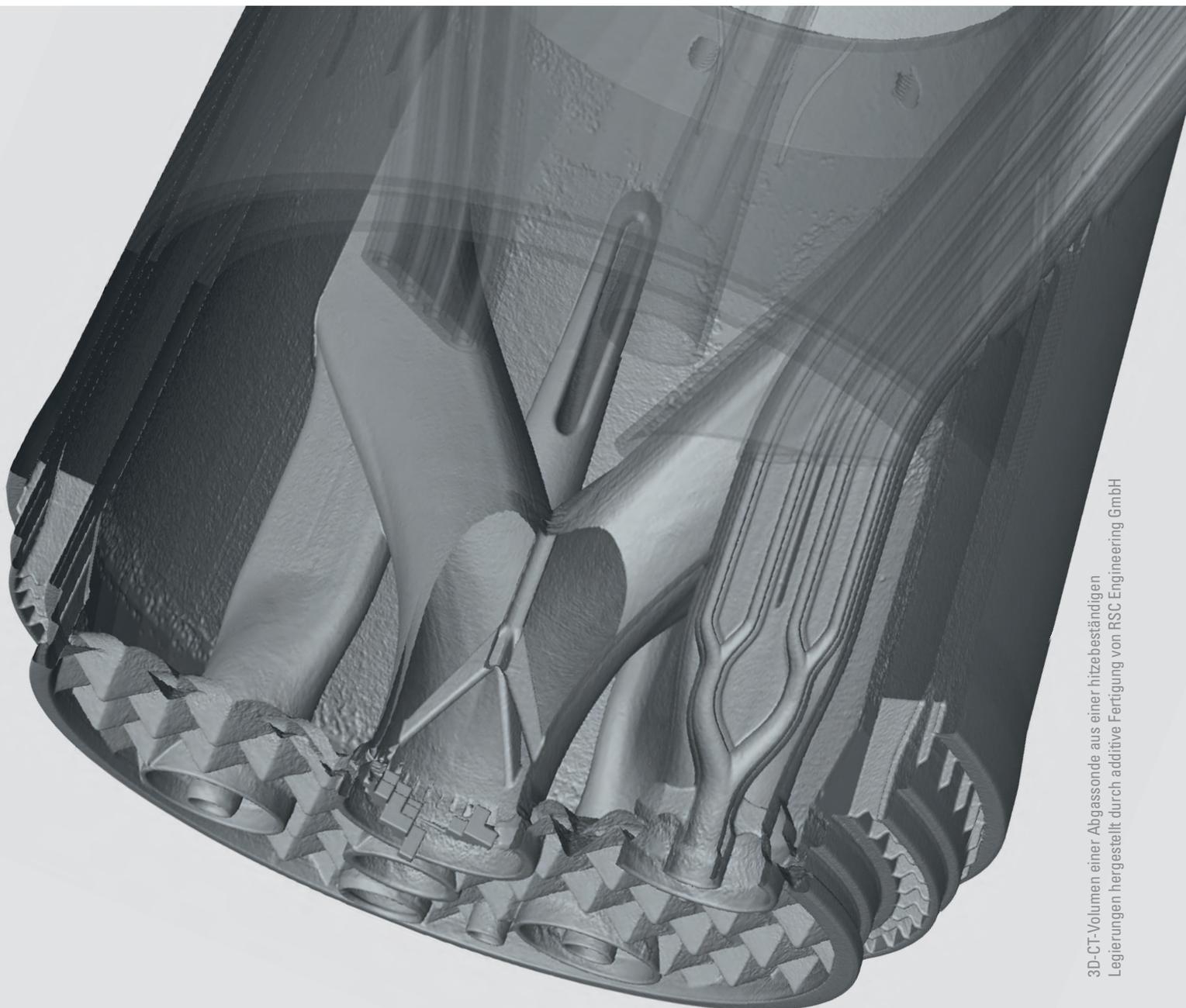


Nahezu jeder Industriebereich wie Automobil, Luft- und Raumfahrt, Elektronik und Materialwissenschaften nutzt NDT-Technologien. Dabei wird CT in den verschiedenen Bereichen sämtlicher Industrien, in der wissenschaftlichen Forschung, in Entwicklungsprojekten oder für die Produktionskontrolle eingesetzt. Doch neben den Einsatzgebieten steigt auch die Bandbreite an unterschiedlichen Teilegrößen und Materialien. Um all diesen Anforderungen gerecht zu werden, hat YXLON das flexible FF85

KONTAKT

YXLON International GmbH

Essener Bogen 15
D-22419 Hamburg
T +49 (0)40 52729 0
F +49 (0)40 52729 170
yxlon@hbg.yxlon.com
www.yxlon.com



3D-CT-Volumen einer Abgassonde aus einer hitzebeständigen Legierungen hergestellt durch additive Fertigung von RSC Engineering GmbH

YXLON FF85 CT – Discover New Dimensions in Flexibility

YXLON FF85 CT – das Hochleistungs-CT-Prüfsystem mit 225 kV Mikrofokus- und 450 kV Minifokusröhre für höchste Auflösung und grandiose Ergebnisse in

- Forschung & Entwicklung
- Fehleranalyse
- Erstmusterprüfung
- Defekt- und Materialanalyse
- Dimensionelles Messen
- Bauteilprüfungen
- Kleinserienprüfung



» Die plasmaelektrolytische anodische Oxidation von Aluminium – erweiterte Einsatzmöglichkeiten durch kombinierte Oberflächentechnik «

Lichtemittierende Entladungerscheinungen auf der Anodenoberfläche durch Anlegen einer hohen Zellspannung wurden Ende des 19. Jahrhundert erstmalig von russischen Forschern beobachtet. Heute lassen sich durch dieses Verfahrensprinzip hochverschleißfeste und thermoschockbeständige oxidische Schutzschichten auf Aluminiumbauteilen erzeugen.

Aluminium und Aluminiumlegierungen finden in nahezu allen Industriezweigen Anwendung und sind nach Stahl die am häufigsten eingesetzten metallischen Konstruktionswerkstoffe im Maschinen-, Anlagen-, Automobil- und Flugzeugbau. Die Einsatzbreite begründet sich einerseits durch die günstigen Be- und Verarbeitungseigenschaften (gieß-, umform-, span- und schweißbar), andererseits besitzt Aluminium eine hohe spezifische Festigkeit, eine hohe elektrische und Wärmeleitfähigkeit und ist durch den selbstpassivierenden Charakter relativ korrosionsbeständig. So bildet sich in oxidativen Medien spontan eine dünne, festhaftende natürliche Oxidschicht aus, deren Eigenschaften jedoch für technische Belange meist unzureichend sind. Daher erfordert der technische Einsatz von Aluminiumlegierungen eine deutlich erhöhte Korrosions- und Verschleißbeständigkeit der Aluminiumoberfläche, was eine den Einsatzbedingungen angepasste Oberflächenbehandlung notwendig macht.

In der Regel kommen neben metallischen Beschichtungen (z. B. chemisch/galvanisch abgeschiedene Nickel- bzw. Nickeldispersions-schichten, Chrom- und Zinkbeschichtungen) und organischen Schichten vor allem durch *elektrolytische* oder *plasmaelektrolytische* anodische Oxidation hergestellte Aluminiumoxidschichten auf Aluminiumsubstraten zum Einsatz. Beide Verfahren basieren auf der anodischen Konversion des Grundmaterials in einem wässrigen Elektrolyten und verleihen dem Aluminiumbauteil eine ver-

gleichsweise hohe Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Verfahrensseitige Unterschiede bestehen hinsichtlich der Prozessparameter und des Schichtbildungsmechanismus, wodurch auch die Mikrostruktur, die funktionalen Eigenschaften und somit die jeweiligen Anwendungsmöglichkeiten dieser Aluminiumoxidschichten variieren.

Die plasmaelektrolytische anodische Oxidation (PAO) findet im Vergleich zur konventionellen Anodisation in der industriellen Praxis jedoch deutlich weniger Anwendung, was einerseits auf die komplexeren Zusammenhänge zwischen den eigenschaftsbestimmenden Prozessparametern und dem damit notwendigen Know-how, den vergleichsweise hohen Investitions- und Betriebskosten, aber auch auf patentrechtliche Beschränkungen zurückzuführen ist. Das Eigenschaftsprofil von aluminiumbasierten PAO-Schichten ist jedoch für eine Vielzahl technischer Anwendungen äußerst interessant. So verleihen die hohe Härte (bis

zu 2000 HV) und die dichte Mikrostruktur den Oberflächen höchsten Widerstand gegen abrasive Beanspruchung. Die Beständigkeit gegen aggressive Medien bietet Einsatzmöglichkeiten in der chemischen bzw. petrochemischen Industrie bspw. zum Oberflächenschutz in schwefelwasserstoffhaltiger Umgebung. Durch die ausgezeichnete Thermoschock- und Abriebbeständigkeit ist bspw. auch die Applikation auf Zylinderlaufbahnen von Verbrennungsmotoren möglich [Sch09]. Das Verfahren wird zudem zur dekorativen und funktionalen Veredelung von Gehäuseteilen für z.B. Smartphones eingesetzt. Weitere Einsatzmöglichkeiten bieten sich im optischen Gerätebau als lichtabsorbierende Oberfläche, in der Weltraumtechnik als Oberflächen mit geringer Ausgasung oder in der Medizintechnik als bioinerte Oberflächen auf Implantaten [Sch 12]. Zudem besitzen die Schichten ein sehr hohes elektrisches und thermisches Isolationsvermögen. Typische aluminiumbasierte PAO-Schichten erreichen eine Dicke von 50 - 200 µm.

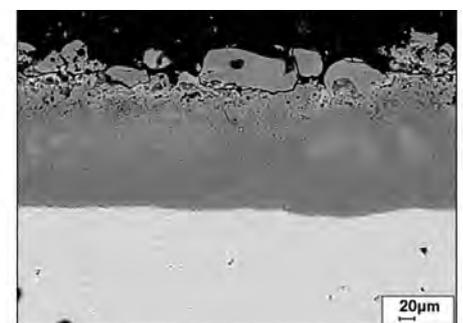
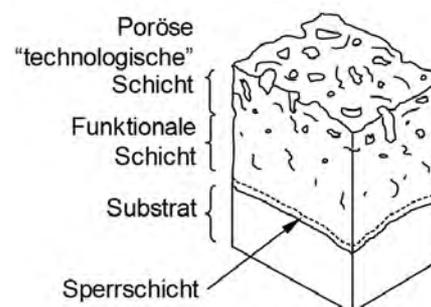


Abbildung 1: Modell zum Aufbau sowie eine REM-Aufnahme einer plasmaelektrolytisch hergestellten Aluminiumoxidschicht.

2. Schicht- und Prozesscharakteristik

PAO-Schichten auf Aluminium besitzen allgemein einen zweischichtigen Aufbau. Danach schließt sich einer inneren, dicken und kompakten (Funktions-) Schicht eine äußere poröse (technologische) Schicht an, **Abb. 1**. Das Dickenverhältnis dieser primär kristallinen Bereiche hängt dabei maßgeblich von der Aluminiumlegierung und den Prozessparametern (z.B. Stromdichte und Elektrolytzusammensetzung) ab. In der Fachliteratur wird zudem vereinzelt von einer dritten, dünnen amorphen Sperr- bzw. Übergangsschicht im Schicht-Substrat-Interface berichtet (**s.Abb.1**). [Yer99]

Diese charakteristische Mikrostruktur ist das Ergebnis von stochastisch verteilten Funkenentladungen auf der Anodenoberfläche, in deren Plasma einerseits die Oxidbildungsreaktion stattfindet, die andererseits das bereits gebildete Oxid lokal periodisch auf- und umschmilzt (Temperaturspitzen von bis zu 10⁴ K in den Entladungen). Dadurch wird die prozessbedingte Porosität anfangs äußerer Schichtbereiche (z. B. durch Entladungskanäle oder ungleichmäßig erstarrendes Oxid, **s. Abb. 2**) mit fortschreitender Konversion in tieferen Schichtbereichen weitestgehend eli-

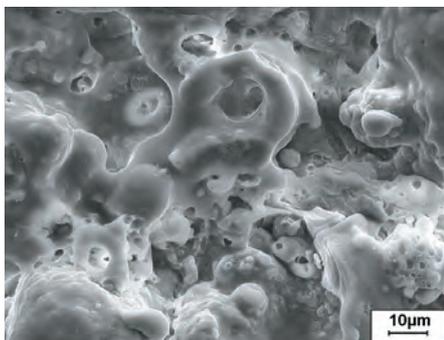


Abbildung 2: Poröse Oberflächenmorphologie einer PAO-Schicht auf Aluminium.

miniert und eine zunehmend kompaktere Mikrostruktur bildet sich aus. Voraussetzungen für die Ausbildung von Funkenentladungen zur Oberflächenkeramisierung sind eine geeignete Metall/Elektrolyt-Paarung sowie Anodenpotentiale von mehr als 100 V. Dabei gelangen mit jeder Entladung kurzzeitig schmelzflüssige Bestandteile der Anode sowie dissoziierte und ionisierte Elektrolytkomponenten (vorrangig Sauer- und Wasserstoff) in den Entladungskanal. Dort reagieren diese zu schmelzflüssigem Al₂O₃, das im Entladungskanal selbst und auf der Anodenoberfläche erstarrt. Die ablaufende Festkörper-Gas-Anodenreaktion unter Plasmabedingungen im Entladungskanal lässt sich wie folgt vereinfacht darstellen: $2Al_{(L)} + 3O_{(G)} \rightarrow Al_2O_{3(L)} \rightarrow Al_2O_{3(S)}$

Je nach Metall/Elektrolytpaarung erfolgt die Bedeckung der Anode mit Entladungen (sog. Funkenbild) entweder durch eine gleichmäßige stochastische Verteilung oder lawinenartig als Funkenfront, bei der umliegende Regionen fortlaufend thermisch aktiviert werden. Ein partialanodischer Zustand stellt sich ein, da die Schichtbildungsreaktion in beiden Fällen jeweils örtlich diskontinuierlich bzw. diskret erfolgt. **Abb. 3** zeigt das über die Prozessdauer veränderliche charakteristische Funkenbild während der plasmaelektrolytischen anodischen Oxidation einer Aluminiumlegierung.

3. Al₂O₃-Phasenmodifikationen und -transformation

Das durch die ablaufende Anodenreaktion (s. Abschnitt 2) gebildete und erstarrte Aluminiumoxid hat vorrangig kristallinen Charakter und tritt hauptsächlich in den Phasenmodifikationen α-Al₂O₃ (Korund, trigonal) und γ-Al₂O₃ (kubisch) auf. Hinzu kommen geringere Anteile an amorphem Al₂O₃, δ-Al₂O₃ so-

wie weitere u.a. silikatische Verbindungen zwischen Aluminium, den Legierungselementen und den anionischen Komponenten des Elektrolyten. [Hus10]

Die Abkühlgeschwindigkeit des schmelzflüssigen Al₂O₃ entscheidet dabei über die Ausbildung der jeweiligen Phasenmodifikation. So erfolgt an der vergleichsweise kalten Schichtoberfläche eine rasche Abkühlung bzw. Erstarrung, was die Bildung von metastabilem γ-Al₂O₃ sowie amorphen Phasenteilen begünstigt. Im kompakten Schichtinneren (funktionale Schicht, vgl. **Abb. 1**) führen geringere Abkühlraten zur Bildung von thermodynamisch stabilem α-Al₂O₃ bzw. die hohen Prozesstemperaturen zur Phasentransformation des γ-Al₂O₃ in α-Al₂O₃. Dadurch steigt der α-Al₂O₃-Anteil i.d.R. in Richtung Substrat an, was im Zusammenspiel mit der zunehmend kompakteren Mikrostruktur mit einem deutlichen Härteanstieg in gleicher Richtung einhergeht (Randbereich 500...1000 HV; funktionale Schicht 900...2000 HV). [Sie14]

4. Schichteigenschaften und Einflussgrößen

Während des PAO-Prozesses üben die Elektrolytzusammensetzung, der/die anliegende Strom/Spannung, deren Charakteristik, die Zusammensetzung des Substratwerkstoffes sowie die Anodisdauer den größten Einfluss auf Mikrostruktur und Eigenschaften der Oxidschichten aus, wobei die Wahl der geeigneten Prozessparameter von den angestrebten Schichteigenschaften (z. B. Anwendung für Thermal-, Verschleiß- und/oder Korrosionsschutz) bestimmt wird.

4.1 Elektrolytzusammensetzung

Die heutzutage überwiegend bei Aluminium angewandten PAO-Elektrolyte sind bis auf wenige Ausnahmen alkalischer Natur und

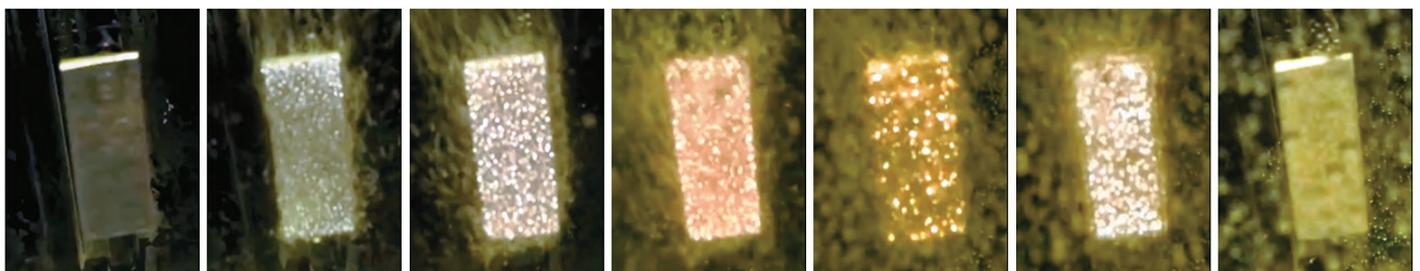


Abbildung 3: Beispielhafte Fotostrecke für den PAO-Prozess auf einer Aluminiumlegierung über insgesamt 50 Minuten Prozessdauer.

setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen. Zugesezte Alkalimetallhydroxide (NaOH, KOH) bestimmen den gewünschten pH-Wert und steigern beispielsweise die Leitfähigkeit des Elektrolyten, wirken jedoch auch oxidauflösend. Höhere Konzentrationen führen deshalb zu geringen Schichtdicken, aber auch zu einer geglätteten und porenarmen technologischen Schicht. Ebenso sinkt mit steigender Hydroxidkonzentration der $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Anteil in der Schicht, was die Härte und die Verschleißbeständigkeit minimiert. Dem Elektrolyt zugesetztes Natriumsilikat steigert hingegen die Schichtwachstumsrate, da hochvolumiges Siliziumoxid bzw. Mischverbindungen davon (z. B. Mullit) in die Schicht eingebaut werden. Dadurch entstehen dicke Schichten mit einer dichten Funktionsschicht. Andererseits löst Natriumsilikat das gebildete Aluminiumoxid chemisch kaum, so dass keine Glättung der Oberfläche stattfindet. Dies führt zu einer deutlich poröseren technologischen Schicht und zu einer höheren Oberflächenrauheit. Neben silikatbasierten kommen auch phosphat- bzw. aluminathaltige Elektrolyte zur Anwendung. Werden jedoch mehrere dieser Komponenten in einem Elektrolyten zusammengeführt, gestaltet sich die Abschätzung der Auswirkungen auf Prozess und Schichteigenschaften zunehmend schwierig, da die Komponenten auf komplexe Weise interagieren.

Der Prozess wird hinsichtlich der Elektrolyttemperatur bei ca. 20-30 °C betrieben. Eine höhere Elektrolyttemperatur steigert die chemische Rücklösung des Oxids im Elektrolyt, wodurch sich primär die effektive Schichtbildungsrate verringert.

4.2 Strom-/Spannungsregime

Die plasmalektrolytische anodische Oxidation kann prinzipiell unter galvanostatischen oder potentiostatischen Regime durchgeführt werden. In der Regel erfolgt die Beschichtung jedoch unter stromgeführten Bedingungen, wobei die Anwendung von Gleich-, Wechsel- und/oder uni- bzw. bipolaren Pulsstrom möglich ist.

Die Anwendung von Wechsel- und Pulsstrom bietet gegenüber ungepulstem Gleichstrom den Vorteil, dass die anodischen Entladungen über die anliegende Frequenz zeitlich begrenzt sind. Dadurch entstehen keine langanhaltenden Entladungen, durch deren hohen lokalen Energieeintrag die gebildete Oxidschicht wie-

der zerstört würde. Dies minimiert die Porosität bzw. Fehlstellendichte und ermöglicht höhere Schichtdicken, höhere $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Anteile und damit eine höhere Härte und Verschleißbeständigkeit. Die angelegten Frequenzen reichen hierbei von 50 Hz bis hin zu 10 kHz.

Im Falle der negativen Polarisierung des Werkstücks durch Wechselstrom und bipolaren Pulsstrom entstehen ebenso Funkenentladungen auf der Werkstückoberfläche. Diese sind weniger energieintensiv, führen aber lokal zu einer thermischen Aktivierung des Oxids, so dass in der nachfolgenden anodischen Polarisationsphase bevorzugt an diesen aktivierten Stellen Funkenentladungen auftreten. Dies hat einen positiven Einfluss auf Mikrostruktur, Oberflächenrauheit und Dicke der Oxidschichten. Allgemein ermöglichen PAO-Verfahren mit Wechsel- und bipolarem Pulsstromregime eine bessere Prozesskontrolle und sind dadurch den Gleichstromverfahren insbesondere im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften der Oxidschichten überlegen.

4.3 Stromdichte

Die Stromdichte ist unter galvanostatischen PAO-Prozessen mit der Elektrolyt- und Substratkomposition die wichtigste Stellgröße, da deren Höhe über die Anzahl und Intensität der Funkenentladungen entscheidet. Davon hängt wiederum das Verhältnis zwischen Schichtbildung, Oxidrücklösung und Schichtzerstörung und folglich die sich einstellende Mikrostruktur ab. Prinzipiell steigt mit der Stromdichte der Stoffumsatz pro Zeiteinheit linear und damit die sich einstellende Oxidschichtdicke, **Abb. 4**. Ebenso steigen die Dicke und die Dichte der inneren Funktions-

schicht, wodurch ein höherer $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Anteil entsteht, was sich positiv auf die mechanischen Schichteigenschaften auswirkt. Zu hohe Stromdichten bewirken jedoch eine zu hohe Entladungsintensität und dadurch eine erhöhte Porosität bzw. Fehlstellendichte in der Oxidschicht. Die üblicherweise angewandten Stromdichten variieren bei Aluminiumwerkstoffen zwischen 5 und 50 A/dm². Zur Vermeidung langanhaltender und schichtzerstörender Entladungen sind insbesondere hohe Stromdichten mit einem Wechsel- oder Pulsstromregime zu kombinieren.

4.4 Grundwerkstoff

Die Schichtbildungskinetik und die Schichteigenschaften werden maßgeblich von dem im Grundwerkstoff enthaltenen Legierungselementen beeinflusst. So ist das thermodynamische Verhalten einer Legierung während der plasmalektrolytischen anodischen Oxidation prinzipiell abhängig von:

- der Höhe der jeweiligen freien Bildungsenthalpie (ΔG_{Me}) der Metalloxide,
- dem elektronischem Charakter der Metalloxide (Halbleiter oder Isolator),
- dem Pilling-Bedworth-Verhältnis (z.B. $PBV_{\text{Si}} \gg PBV_{\text{Me}}$) sowie
- dem Schmelzverhalten der Ausscheidungen im Grundwerkstoff.

Ein hoher Siliziumgehalt beispielsweise hemmt durch den elektrochemisch passiven Charakter das Oxidwachstum zu Prozessbeginn. Zudem steigt die Porosität und bewirkt im Zusammenspiel mit dem zunehmenden Mullitanteil in der Schicht eine Verringerung der Härte sowie der abrasiven Verschleißbeständigkeit.

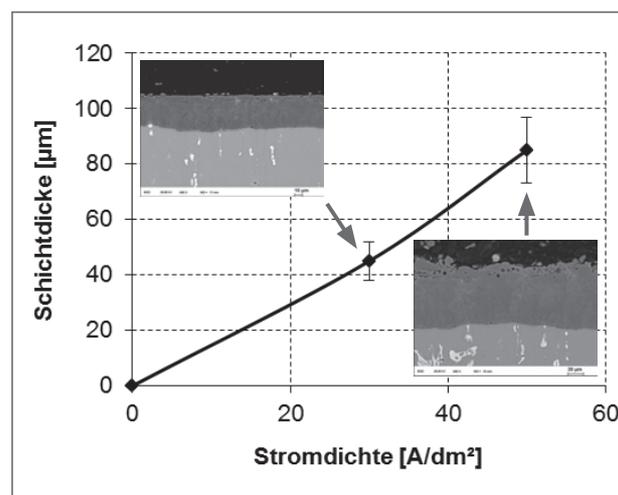


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Stromdichte und Oxidschichtdicke am Beispiel der Aluminiumlegierung AlCu4Mg1 bei einer Prozessdauer von 60 min.

Gruppe	Beispiele	Eignung
1XXX (-)	Al99,5	mäßig
2XXX (Cu)	AlCu4Mg1	sehr gut
3XXX (Mn)	AlMn1/AlMn0,5Mg0,5	gut
4XXX (Si)	AlSi1,5Mn	mäßig
5XXX (Mg)	AlMg3/AlMg4,5Mn0,7	gut
6XXX (Mg, Si)	AlMg1SiCu/AlSi1MgMn	sehr gut
7XXX (Zn)	AlZn4,5Mg1	gut

Tabelle 1: Ausgewählte Aluminiumknetlegierungen und deren Eignung für die plasmalektrolytische anodische Oxidation.

Ein steigender Kupfergehalt im Grundwerkstoff führt hingegen zu einem höheren α -Al₂O₃-Anteil in den Schichten und dadurch zu verbesserten mechanischen Eigenschaften. Bei der ablaufenden Anodenreaktion wird dabei ein geringer Teil des vorhandenen Kupfers im schmelzflüssigen Aluminiumoxid gelöst und erstarrt als Kupfer-Aluminium-Spinell (CuAl₂O₄). Der Großteil des Kupfers lagert sich jedoch aufgrund der deutlich höheren freien Bildungsenthalpie des Kupferoxids ($\Delta G_{\text{O}}_{\text{Cu}}$) im Vergleich zu jener des Aluminiumoxids ($\Delta G_{\text{O}}_{\text{Al}}$) entweder in elementarer Form im Oxid bzw. an dessen Korngrenzen an oder wird im amorphen Oxidanteil zwangs-

gelöst. Dadurch erhöht sich die Leitfähigkeit der Oxidschicht, wodurch Funkenentladungen leichter tiefere bzw. substratnahe Schichtbereiche erreichen und zur Phasentransformation beitragen. Daher lassen sich Legierungen der 2000-Reihe mit Kupfer als Hauptlegierungselement sehr gut mittels PAO keramisieren.

Magnesium im Aluminium bewirkt eine Zunahme der Schichtdicke, was jedoch mit einer erhöhten Porosität einhergeht. Der α -Al₂O₃-Anteil und die Schichthärte nehmen mit steigendem Magnesiumgehalt tendenziell ab.

Insbesondere bei mehreren Legierungselementen ergeben sich komplizierte Wechselwirkungen während der Oxidation, deren Komplexität durch z.B. Mehrkomponentenelektrolyte noch potenziert wird. In diesem Fall sind allgemeingültige Aussagen zum Einfluss der Legierungselemente auf die Schichtbildungskinetik äußerst schwierig abzuleiten.

Der Gefüge- bzw. Wärmebehandlungszustand der Aluminiumlegierung nimmt aufgrund der auf- und umschmelzenden Prozesskinetik eine untergeordnete Stellung ein. **Tab. 1** gibt einen Überblick über die Eignung von technisch relevanten Aluminiumknetlegierungen für die plasmalektrolytische anodische Oxidation.

5. Kombinierte Oberflächentechnik

Durch den innovativen Einsatz oberflächentechnischer Verfahren z.B. in hybriden Prozessen ergeben sich erhebliche Potentiale bezüglich neuer Werkstoffkombinationen und verbesserter Oberflächeneigenschaften. Folglich sind Alternativen zu gegenwärtigen Oberflächenverfahren vorhanden und hieraus auch neue technische Anwendungen möglich. Insbesondere durch die Nutzung thermischer Spritzverfahren entstehen neuartige Prozessrouten, die die Applikation von plasmalektrolytisch hergestellten Aluminiumoxidschichten auf Konstruktionswerkstoffen wie beispielsweise Titan, Magnesium oder Stahl ermöglichen. Zwar kann das PAO-Verfahren mit angepassten Prozessparametern grundsätzlich auch direkt auf z.B. Magnesium- und Titanoberflächen appliziert werden, Ti- und Mg-basierte PAO-Schichten besitzen jedoch meist eine porösere Mikrostruktur (**Abb. 5**) und sind den aluminiumbasierten hinsichtlich Schichtdicke, Härte und abrasiver Verschleißbeständigkeit nach heutigem Stand deutlich unterlegen.

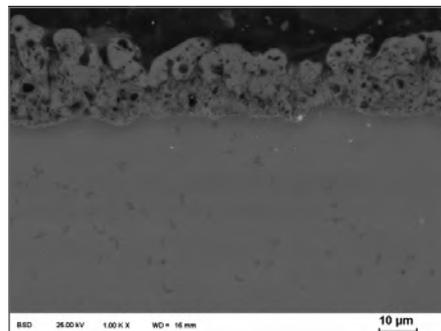
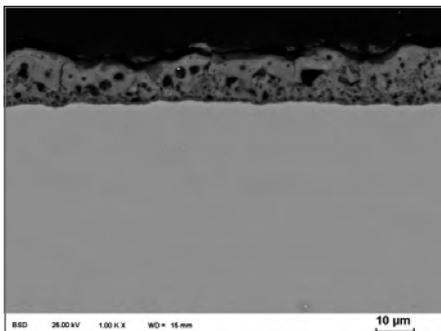


Abbildung 5: Repräsentative PAO-Schichten auf Reintitan (links) und AZ31.

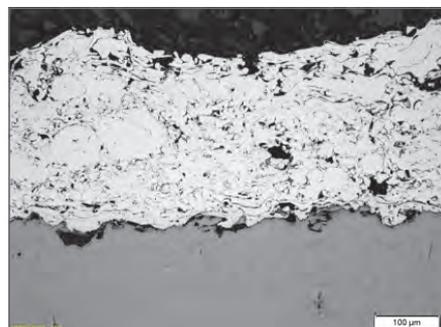
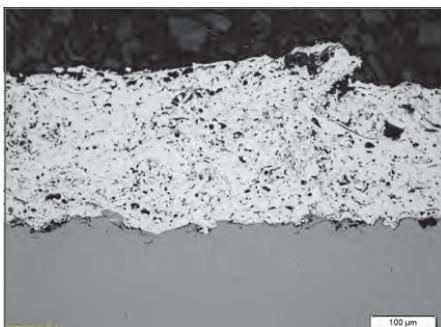


Abbildung 6: Lichtbogen- (links) und flammgespritzte AlCu4Mg1-Schicht auf Stahlsubstrat.

In der neuartigen Prozesskombination können durch Lichtbogen- und/oder Flammgespritzen artfremde Substratwerkstoffe mit Aluminium beschichtet werden (**Abb. 6**). Im zweiten Schritt erfolgt die plasmalektrolytische anodische Oxidation der Spritzschichten, wodurch Oxidschichten mit vergleichbaren Eigenschaften zu jenen auf Bulk-Aluminium entstehen

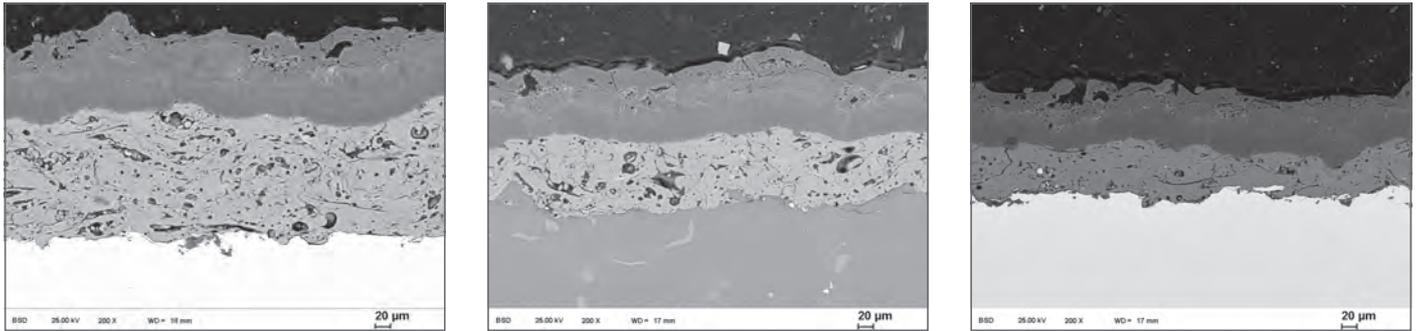


Abbildung 7: Lichtbogengespritzte und anschließend plasmalektrolytisch anodisierte AlCu4Mg1-Schichten auf Stahl (links), AZ91 (mittig) sowie auf Ti6Al4V.

[Lam11], siehe Abb. 7. Als Nebeneffekt erhöht sich die Schichtbildungsrate während der Oxidation, da die offene Porosität der Spritzschichten zu einer guten Elektrolytpenetration und so zu einer über die gesamte Oberfläche effektiveren Anodenreaktion führt. Verfahrensseitige Unterschiede zwischen den thermischen Spritzverfahren sind vor allem der höhere Oxidgehalt in den lichtbogengespritzten Aluminiumschichten. Dies trägt zu einem höheren Korundanteil (ca. 60 %) in den PAO-Schichten bei, was sich positiv auf deren Härte und Abrasionsbeständigkeit auswirkt. Allgemein werden der charakteristische Schichtaufbau und die mechanischen Eigenschaften dieser PAO-Schichten ebenso maßgeblich von der chemischen Zusammensetzung der thermisch gespritzten Al-Schichten bestimmt (vgl. Tab. 1).

5. Zusammenfassung

Aluminiumbasierte PAO-Schichten zeichnen sich durch hervorragende mechanische Eigenschaften aus und stehen für vielfältigste technische Anwendungen bereit. Die Komplexität des Beschichtungsprozesses sowie die hohen Investitions- und Betriebskosten bleiben aber ständige Herausforderungen und behindern eine stärkere Marktdurchdringung des Verfahrens. Insbesondere bei technischen Spezialanwendungen unter extremen Einsatzbedingungen ist jedoch zukünftig eine weiter wachsende Bedeutung zu erwarten, da die isotrope Mikrostruktur der Schichten sowie die geringe thermische Substratbelastung während des Beschichtungsprozesses mit alternativen Beschichtungsprozessen wie bspw. dem atmosphärischen Plasmaspitzen nicht zu erzielen ist.

Autoren:

Dr. Daniel Meyer, Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V., Hilden
Prof. Dr. Thomas Lampke, Professur Werkstoff- und Oberflächentechnik, TU Chemnitz

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes LA 1274/37-1.

Literatur

- [Hus10] Hussein, R.O.; Nie, X.; Northwood, D. O.; Yerokhin, A.; Matthews, A.: Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process. *Journal of Physics D: Applied Physics* 43 (2010), Article number 105203
- [Lam11] T. Lampke, D. Meyer, G. Alisch, D. Nickel, I. Scharf, L. Wagner, U. Raab: Alumina Coatings Obtained by Thermal Spraying and Plasma Anodising – a Comparison, *Surface and Coatings Technology* 206 (2011), pp. 2012-2016.
- [Sch09] Schattauer, A.: Prozessentwicklung und Charakterisierung einer anodisch-keramisierten Al-Zylinderlaufbahn unter tribologischen Aspekten zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. Technische Universität Dresden, Dissertationsschrift, 2009
- [Sch12] Schmidt, J.; Schrader, C.; Tzschach, M.: Die plasmachemische Oxidation von Leichtmetallen für optische und medizinische Anwendungen. *Galvanotechnik* 11 (2012), S. 2416-2427.
- [Sie14] Sieber, M.; Mehner, T.; Dietrich, D.; Alisch, G.; Nickel, D.; Meyer, D.; Scharf, I.; Lampke, T.: Wear-resistant coatings on aluminium produced by plasma anodising – a correlation of wear properties, microstructure, phase composition and distribution. *Surface and Coatings Technology* 240 (2014), pp. 96-102.
- [Yer99] Yerokhin, A.L.; Nie, X.; Leyland, A.; Matthews, A.; Dowey, S.J.: Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology* 122 (1999), pp. 73-93.

KONTAKT

Technische Universität Chemnitz
Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik
Professur Werkstoff- und Oberflächentechnik
Prof. Dr. Thomas Lampke
D-09107 Chemnitz
homas.lampke@b.tu-chemnitz.de
www.tu-chemnitz.de/mb/iww

dIALOG

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Analyse



Beratung

Produktlösungen

Arbeitskreise

Fachausschüsse

Fortbildungen

Tagungen



Die Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. vertritt die Interessen ihrer Mitglieder – als Garant für eine kontinuierlich inhaltliche, strukturelle und personelle Weiterentwicklung des Fachgebiets der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.

DGM

ISSN 2193-3383

IM WINTER 2018 ERSCHEINT DIE NEUE AUSGABE!

Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren richten Sie bitte an

Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)

→ Finkenstraße 10 · D-68623 Lampertheim
www.institut-wv.de

Miriam Knab

→ Telefon 06206 939-352 · miriam.knab@alphapublic.de

» METZKA – einfach glänzend gemacht «

Know-how wächst durch Erfahrung – Erfolg durch Qualität. Ein kompetentes Team von Mitarbeitern verwirklicht bei METZKA jeden Tag diese beiden Grundsätze. METZKA ist Ihr Spezialist für hochqualitative Galvanoanlagen.

Die Ansprüche der Kunden sind der Maßstab bei METZKA. Haltbarkeit, Zuverlässigkeit, Service und ein ansprechendes Design stellen für METZKA keinen Widerspruch dar, sondern sind Ausdruck 100%iger Qualität in Verbindung mit ganz speziellen Wünschen für die Kundenanlagen. Das Leistungsspektrum ist breit angelegt und lässt insbesondere im Galvanikbereich keine Wünsche offen.

Das Paket ist umfassend: METZKA bietet Komplettlösungen im Anlagenbau bis hin zur fachgerechten Montage und Long-life-Service. Als Systemlieferant ist METZKA ideenreich, leistungsstark und höchst flexibel. METZKA präsentiert sich als innovatives Technologieunternehmen der Anlagenherstellung im Galvanobereich. Entwicklung, Herstellung und Vertrieb zukunftsfähiger Oberflächenanlagen gehören ebenso zu den Leistungen wie individuelle Beratung und kompetente, aussagekräftige Angebote.

Der Dienstleistungsgedanke wird bei METZKA auch bei den zusätzlichen Serviceleistungen großgeschrieben. Seemäßig verpackt werden

komplette Anlagen und einzelne Module zum Überseehafen oder europaweit direkt zur Baustelle transportiert. Für den sicheren Transport sorgen zuverlässige Partner, mit denen seit Jahren vertrauensvoll zusammengearbeitet wird. Neben einem professionellen Versand bietet METZKA seinen Kunden auch die komplette Baustellenmontage sowie die Montageüberwachung und -leitung durch firmeneigene Montage- und Serviceteams. Eine kompetente und motivierte Mannschaft ist für METZKA, ein seit über 35 Jahren inhabergeführtes Unternehmen der Schlüssel zum Erfolg. Die Mitarbeiter werden laufend geschult und weitergebildet.

METZKA bietet mit seiner Produktpalette eine endlose Vielfalt an Anwendungen. Umso wichtiger ist es für den Kunden und METZKA, dass in intensiven Beratungsgesprächen ermittelt wird, wie exakt die Kundenanforderungen aussehen. Langjährige Spezialisten analysieren gemeinsam mit den Kunden die Einsatzbereiche und die Leistungsansprüche der Anlage. Der Kunde darf mit einer maßgeschneiderten, perfekt zugeschnittenen Lösung rechnen. Und das Beste ist: METZKA kennt

sich nicht nur mit der Anlagenherstellung perfekt aus, sondern verfügt auch über die Gesamtkompetenz im Galvanobereich. Bei METZKA erhält der Kunde alles aus einer Hand, von der Planung, Konstruktion, über die Montage bis hin zum kompletten Service. Dabei spielt auch die hohe Inhousefertigung bei Metzka eine große Rolle. So werden die Behälter, Verrohrungen, Schaltschränke und Transportsysteme komplett bei METZKA gefertigt.

METZKA versteht sich als kompetenter Dienstleister in Sachen Anlagenbau und freut sich auf ein Wiedersehen in Schwanstetten, denn: *„Zusammenkommen ist ein Beginn, Zusammenbleiben ist ein Fortschritt, Zusammenarbeiten ist ein Erfolg.“*
Henry Ford

Vielfalt nach Kundenmaß

Die Metzka GmbH bietet ihnen ein breit gefächertes Leistungsspektrum. Unsere Produkt- und Servicevielfalt ist immer so umfassend wie ihr konkreter Bedarf. Als erfahrene Spezialisten für den Behälter- und Apparatebau fertigen wir Kunststoffbehälter aus PP, PE, PVC und PVDF als maßgeschneiderte Lösungen



Abbildung 1: Die bereits zweite Anlage für einen Automobilzulieferer.

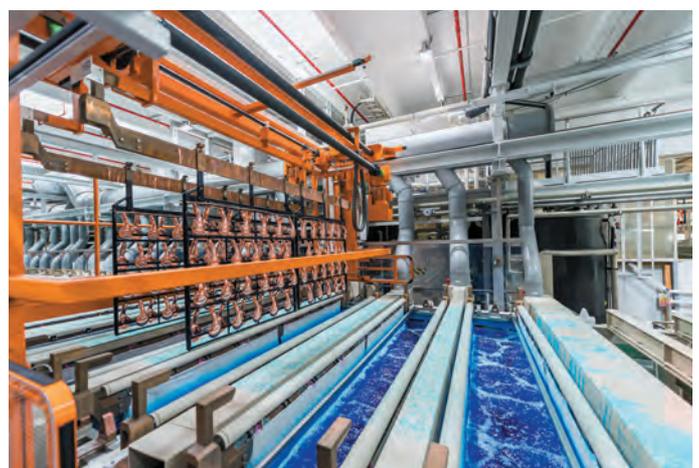


Abbildung 2: Blick auf die Galvanik-Bäder der erweiterten Anlage.

für Ihre Anforderungen. Das Leistungsspektrum geht dabei von der Handanlage, über Automaten für unterschiedlichste Anwendungen, wie Gestellanlagen, Trommelanlagen, Korbanlagen etc. bis hin zu Automaten mit Roboterbeladungen.

Für folgende Verfahren ist Metzka Ihr Lieferpartner:

- Kunststoffbeschichtungen (POP)
- Anlagen für die Leiterplattenindustrie (chemische und galvanische Verfahren)
- Brünieranlagen
- Phosphatieranlagen
- Elektropolieranlagen
- Oberflächenbehandlungsanlagen für chemisch Nickel und Gold
- Oberflächenbehandlungsanlagen für galvanisch Nickel und Gold
- Eloxalanlagen
- Verzinkungsanlagen
- Reinigungs- und Ätzanlagen u.a. auch für Waferfertigung
- Tränkanlagen
- Chrom- und Hartchromanlagen
- Spezialanlagen für Klein- und Kleinstteile in Vibrosettechnik

KONTAKT

Metzka GmbH

Galvano- und Industrieanlagen
Allersberger Straße 42
D-90596 Schwanstetten
Tel.: +49 (0)9170 288-0
Fax: +49 (0)9170 1030
info@metzka.de
www.metzka.de



Wir sind für
unsere Kunden
die erste
Wahl
im
Anlagenbau.

•Einfach•
•Fair•
•Kompetent•



Allersberger Straße 42
D-90596 Schwanstetten

Fon: +49 9170-288-0 · Fax: +49 9170-1030
e-mail: info@metzka.de · www.metzka.de

» Atmosphärendruckplasmen: Maßgeschneiderte Funktionalisierung Ihrer 3D-gedruckten Werkstücke «

Plasmen, bekannt als der vierte Aggregatzustand der Materie, haben sich dank ihrer Fähigkeit, reaktive Teilchen zu erzeugen, als nützliche Werkzeuge in der Oberflächenbearbeitung etabliert. Neben den (Hoch-)Vakuumtechniken setzt JOANNEUM RESEARCH in jüngster Zeit auf die sogenannten Atmosphärendruck-Plasmajets, um neue und kosteneffiziente Verfahren zur Aktivierung, Strukturierung und Beschichtung von Festkörperoberflächen zu entwickeln.

Stellen Sie sich vor, der Frühling erwacht und Sie schwingen sich in den Sattel Ihres neu erstandenen Fahrrads, um die Natur zu genießen oder Ihrer sportlichen Leidenschaft zu fröhnen. Unbekümmert zischen sie an Sträuchern und Büschen vorbei, selbst dann noch, wenn kleine Äste Ihre Wade kitzeln: Sie fürchten keine Kratzer mehr, denn Sie wissen um die Festigkeit der Schicht, die den Rahmen Ihres Leichtbau-Rosses schützt, die sich selbst regeneriert, die das Rad vor Korrosion bewahrt, die ihm einen angenehmen Schimmer verleiht in Ihrer Lieblingsfarbe, und die immer glänzt, da Schmutz nicht haftet und Wasser abperlt.

In der Werkstofftechnik werden Plasmen seit mehreren Dekaden eingesetzt, um solche multifunktionalen Schichten von einer Atomlage bis wenige Mikrometer Dicke auf Bauteilen und Werkstücken abzuscheiden und diesen so neue Eigenschaften zu verleihen. Je nach Anforderung reicht die Palette der erzielbaren Eigenschaften von Kratzfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit über Biokompatibilität und spezielles elektromagnetisches Verhalten bis hin zu rein dekorativen Effekten wie z.B. metallischer Glanz oder Regenbogenschillern.

Im Gegensatz zu konventionellen Plasmaprozessen, die in räumlich begrenzten Vakuumkammern stattfinden, setzt die aktuelle Forschung und Entwicklung auf Atmosphärendruck-Plasmadüsen. Diese erzeugen sogenannte Plasma-Jets (siehe **Abbildung 1**), die Gasflammen ähneln, allerdings dank der deutlich hö-

heren Energien sehr viele geladene und reaktive Teilchen wie Ionen und Radikale enthalten. Neben den thermischen Plasmen, die heißer als die Sonnenoberfläche brennen, können sogenannte Kaltplasmen gefahrlos mit den Fingerkuppen berührt werden, was es erlaubt, auch die hitzeempfindlichsten Werkstoffe zu bearbeiten.

Gemeinsam mit der Firma INOCON Technologie GmbH, die ihre patentierten Plasmadüsen bereitstellt, forscht JOANNEUM RESEARCH an neuen Möglichkeiten, diese Technologie industriell nutzbar zu machen. Der erste Schritt hin zu besserer Wirtschaftlichkeit war bereits der Weg heraus aus dem Vakuum in die Atmosphäre: Jetzt können Werkstücke beinahe beliebiger Größe und Form am Plasma-Jet vorbeibewegt werden,

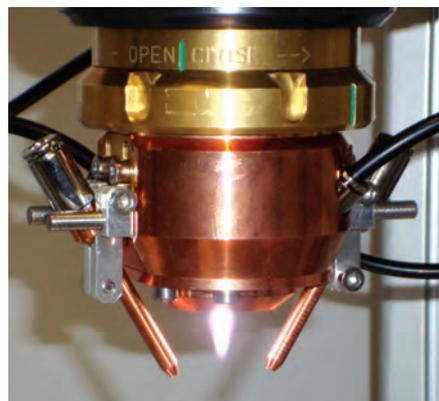


Abbildung 1: Atmosphärendruck-Plasmadüse mit externer Einspeisung und gezündetem Plasma-Jet.

oder die Düse, befestigt an einem Roboterarm, rastert die Oberfläche einfach selbstständig ab. Je nach Aufbau lassen sich so sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Objekte in Serie bearbeiten, mit einer oder mehreren Düsen.

Die eigentliche Stärke des Plasma-Jet-Verfahrens liegt in seiner Vielfältigkeit:

- Die reaktiven Plasmateilchen, deren Natur sich durch den Einsatz verschiedener Gase und Gemische verändern lässt, können die Haftfähigkeit des Werkstoffs verbessern, seine Oberfläche, so zu sagen, aktivieren.
- Indem Ausgangsstoffe von Polymeren oder Metallpulver in den Plasma-Jet geleitet werden, lassen sich keramische oder metallische Schichten auf den Werkstücken abscheiden, auch gedruckte Leiterbahnen z.B. aus Kupfer sind realisierbar.
- Schichten können im Plasma nachbehandelt werden, um sie entweder thermisch oder in der intensiven UV-Strahlung auszuhärten.
- Abseits der Oberflächenbehandlungen lassen sich im Plasma auch Nanopartikel herstellen, indem die Ausgangsstoffe (etwa Zink) im Plasma-Jet geschmolzen und verdampft werden, um nach Gasphasenreaktion als nanopartikulärer Staub zu kondensieren (siehe **Abbildung 2**).

Multifunktionale Schichtsysteme wie jenes an unserem eingangs erwähnten Fahrrad sind das Ergebnis der schier unendlichen

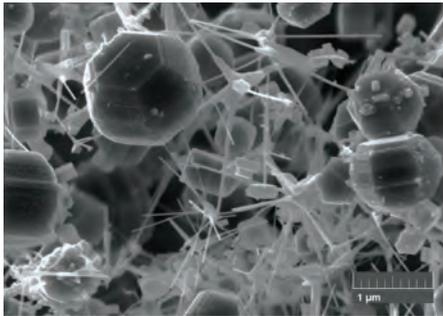


Abbildung 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Zinkpartikeln und nanopartikulären Zinkoxid-Geflechtes, die mit dem Plasma-Jet hergestellt wurden.

Kombinationsmöglichkeiten von schichtbildenden Komponenten und Zusatzstoffen: Als Aerosole können alle möglichen Salze und metallischen oder keramischen Nanopartikel in den Plasma-Jet zerstäubt werden, so dass Schichten z.B. mit aktivem Korrosionsschutz oder antibakterieller Wirkung entstehen. Metallpulver in Reinform können genauso verwendet werden wie solche, die mit Spezialelementen dotiert wurden. Dank der hohen Auftragsraten (1 bis 10 $\mu\text{m}/\text{s} \cdot \text{cm}^2$) werden in kurzer Zeit rissfreie Schichten mit Schichtdicken erzielt, wie sie kein Vakuumprozess erreicht ($> 10 \mu\text{m}$).

Da der Plasma-Jet eine geringe Ausdehnung besitzt (die Standardlinienbreite liegt bei 2 bis 4 mm, aktuell werden Düsen entwickelt, die Linien $< 0,5 \text{ mm}$ erreichen), eignet er sich

besonders gut dafür, komplexe dreidimensionale Objekte punktgenau zu behandeln. In Kombination mit den modernen additiven Fertigungstechniken, also dem 3D-Druck von Kunststoffen und Metallen, eröffnet sich hier ein großer Anwendungsspielraum. Besonders 3D-gedruckte Metalle benötigen oft eine Nachbehandlung: Da der 3D-Metalldruck mit einem Mikroschweißprozess vergleichbar ist, entstehen je nach Schmelzbadgröße raue Oberflächen, die das Bauteil anfällig für Korrosion machen.

Während sich eine Forschungsgruppe innerhalb von JOANNEUM RESEARCH dem Optimieren der Prozessparameter beim 3D-Metalldruck widmet, steht die Funktionalisierung der 3D-gedruckten Bauteile mit dem Plasma-Jet im Fokus enger Kooperationen mit Partnern aus der Industrie. Geforscht wird unter anderem an smarten Oberflächen mit in Schichten integrierter Sensorik, die nicht nur die Lebensdauer eines Bauteils erhöht, sondern auch Verschleiß und Schäden erkennt und das Wartungspersonal selbstständig informiert. In zukünftigen Projekten sollen 3D-gedruckte Bauteile mit geeigneten Sensoren und RFID-Chips ausgestattet werden, integriert entweder in eine funktionale Schicht oder direkt ins Bauteil, wodurch zusätzliche Informationen wie Standort und Bewegung oder mechanische Belastungszustände an die Umgebung gesendet werden könnten.

Das Plasma-Jet-Verfahren unter Atmosphärendruck ermöglicht es, komplexe, multifunktionale Schichtsysteme auf dreidimensionalen Werkstoffen in kurzer Zeit rissfrei zu erzeugen. Die Eigenschaften dieser Schichtsysteme sind so vielfältig wie die Materialien, die dabei kombiniert werden. Da der Fantasie hier kaum Grenzen gesetzt sind, könnte sich der Plasma-Jet in den nächsten Jahren zur Schlüsseltechnologie gerade für die Funktionalisierung 3D-gedruckter Werkstoffe entwickeln.

Und, wer weiß, vielleicht werden wir bald von unserem Smartphone informiert, wenn ein Fahrradservice nötig wird oder unsere Rad ohne uns auf Reisen geht.

KONTAKT

JOANNEUM RESEARCH

Forschungsgesellschaft mbH

MATERIALS – Institut für
Oberflächentechnologien und Photonik

Forschungsgruppe Laser- und
Plasma-Technologien

Dr. Dr. Jürgen M. Lackner

Mag. Dr. Alexander M. Schwan

Leobner Straße 94

A-8712 Niklasdorf

Tel.: +43 (0)316 876 3304

Fax: +43 (0)316 876 3310

MATERIALS Niklasdorf-Sek@joanneum.at

www.joanneum.at/materials



Laser- und Plasmatechnologien

Von der Idee bis zur Serienproduktion



- Laserschweißen
- Laserauftragsschweißen (2D-3D)
- Laserlegieren
- Additive Fertigung (3D Metalldruck)
- Atomic Layer Deposition (ALD)
- Physical Vapour Deposition (PVD)
- Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition (PACVD)
- Atmosphärendruckplasma-Beschichtung

» Warmumformungs-Prozesse erfordern eine exakte Temperaturüberwachung «

In der Automobilindustrie werden sehr hohe Ansprüche an Werkstoffe und Prozesse gestellt. Dies trifft besonders bei der Herstellung von Karosserieteilen zu, da hier Gewichtsreduzierungen durch Materialeinsparungen erzielt werden sollen, die jedoch keinesfalls zu Lasten der Qualität und Haltbarkeit einzelner Bauteile gehen dürfen. Infrarot-Temperaturmesslösungen beim Presshärten von LumaSense Technologies dienen hierbei zur Prozessüberwachung und ermöglichen die Einhaltung kritischer Qualitätssicherungsnormen.

Bei der Warmumformung von Metallen gewährleistet nur die Einhaltung der zulässigen Umform- und Vergütungstemperaturen das Erreichen der gewünschten Eigenschaften des Werkstücks. Neben der präzisen Temperaturmessung ist zudem eine Prozesssteuerung und eine Dokumentation der Messwerte erforderlich.

Zur oben genannten Gewichtsreduktion an Fahrzeugteilen wird bei der Karosserieproduktion das sogenannte Presshärten durchgeführt. Dies ermöglicht eine Verringerung der Materialstärke bei gleichzeitigem Erreichen von hohen Festigkeitswerten. An den Bauteilen kann ein Erwärmungsbereich genau definiert werden, so dass ein gehärteter sowie ein nicht gehärteter Bereich entsteht.

Dies bedeutet, dass ein einzelnes Bauteil mit unterschiedlichen Festigkeitswerten gefertigt werden kann, was z.B. für Knautschzone und Fahrgastzelle unabdingbar ist. Die Einhaltung

engster Temperaturtoleranzen ist hierbei ein essenzieller Parameter zur Qualitätssicherung, um eine abgestufte, örtlich definierte Erwärmungszone zu gewährleisten.

Gerade bei Warmumformungs-Prozessen (z.B. Pressen, Schmieden, Biegen sowie Presshärten) ist eine homogene Temperaturverteilung über das gesamte Werkstück erforderlich, zur Erzielung eines gleichbleibenden Härtegrads des Bauteils.

Der Einsatz einer Wärmebildkamera im nahen Infrarotbereich ermöglicht die Ermittlung einer genauen Temperaturverteilung. Die mittels Wärmebildkamera gemessenen Temperaturdaten erlauben eine exakte Prozess-Steuerung, zusätzlich können diese Messwerte auch noch dokumentiert werden.

Zur Minimierung von Messfehlern, die durch äußere Einflüsse (beispielsweise Oberflächen-



Abb 2: Wärmebildkamera MCS640-HD im wassergekühlten Schutzgehäuse

Variationen, Reflexionen) hervorgerufen werden können, ist die Auswahl einer geeigneten Wärmebildkamera dringend erforderlich, um die Metalloberfläche mit einem stabilen Emissionsfaktor zu messen.

Die von LumaSense Technologies entwickelte Wärmebildkamera MCS640 bietet optimale Eigenschaften für Messungen an metallischen Oberflächen. Mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixeln können über 34.000 Messpunkte am Bauteil definiert werden.

Durch eine schnelle Erfassungszeit, kann ein Wärmebild beim Einlegen des Werkstücks in die Presse erfasst und über die Software ausgewertet werden. Aufgrund der kompakten Bauform der MCS640 mit Luft/Wasserkühlgehäuse kann die Kamera optimal seitlich an der Presse platziert werden.

Die Wärmebildkamera wird mittels Fast Ethernet und fester IP-Adresse an einen Windows-basierten Industrie PC angeschlossen. Über eine speziell entwickelte Software wird das

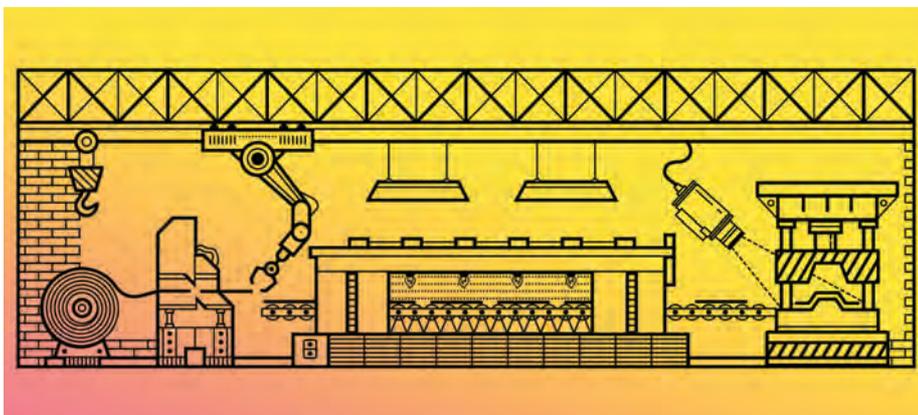


Abb. 1: Prozessschema beim Presshärten

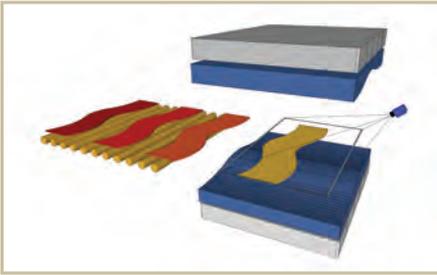


Abb 3: Messung mit kurzwelliger Wärmebildkamera MC640-HD (40° Optik)

Wärmebild in Echtzeit dargestellt. Die Temperaturüberwachung erfolgt mittels der vordefinierten ROI's (Regions of Interest).

Der Anwender bestimmt hiermit mehrere Flächen mit Min-, Max- und Differenzwerten zur Überwachung der Temperaturverteilung am Bauteil. Die Anzahl der definierten ROI's ist unbegrenzt. Sie können in einer Datei gespeichert werden, somit kann je nach Bauteil das entsprechende ROI-Programm aktiviert werden. Zusätzlich kann die Lage des Bauteils in der Presse vor dem Pressvorgang mittels der positionierten ROI's überwacht werden. Des Weiteren kann auch frühzeitig eine Doppelbelegung der Presse erkannt werden.

Die Ausgangswerte der Mess-ROI's können mitgeschrieben und dokumentiert werden. Die Ausgabe erfolgt über TCP/IP oder direkt über ein Feld-Bus-Modul zur Übertragung z. B auf Profi-Bus oder Profi-Net Basis, weitere Protokolle stehen auf Anfrage ebenfalls zur Verfügung. Durch Anbindung an Feld-Bus

Systeme für jeden ROI Messwert, kann bei Über- oder Unterschreiten der eingestellten Toleranzwerte das Signal zum Ausschleusen des Bauteils generiert werden. Hiermit kann die Anlage in ihren festgelegten Härte- toleranzwerten gehalten werden.

Speziell in der Automobil-Zulieferindustrie ist es erforderlich, die Kriterien der **Qualitäts- sicherungsnorm CQI-9** zu erfüllen.

Gemäß CQI-9 ist es nämlich erforderlich, die Temperaturverteilung beim Härten zu erfassen, speziell bei der Produktion von Fahrzeug- teilen. Dies ist mit einer Punktmessung mittels Pyrometer nicht gegeben.

Mit der Wärmebildkamera MCS640 ist es mög- lich, den gesamten Pressvorgang zu überwachen und zu dokumentieren und zwar mit der erfor- derlichen und notwendigen Genauigkeit.

Nach dem Pressvorgang ist es sinnvoll, die Bauteil-Temperatur mit einer mittelwelligen

Kamera zu überwachen, zur Sicherstellung, dass der Abkühlprozess an jeder Stelle Tem- peraturwerte unter 150°C erreicht hat.

Vorteile des Einsatzes der Wärmebild- kamera MCS640 beim Presshärten:

- Hochgenaue und schnelle Temperaturmessung in Echtzeit
- Kontinuierliche Prozesstemperatur- überwachung des gesamten Bauteils vor dem Pressen sowie nach dem Pressen
- Überwachung der Presswerkzeug- temperatur, sowie der Bauteiltem- peratur mittels vordefinierter, konfigurierbarer ROIs
- Erfassung und Dokumentation sämtlicher Prozessdaten
- Übermittlung der Messsignale mittels aller möglichen bzw. existenten Feldbus-Systeme

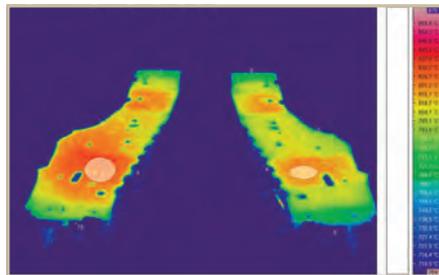
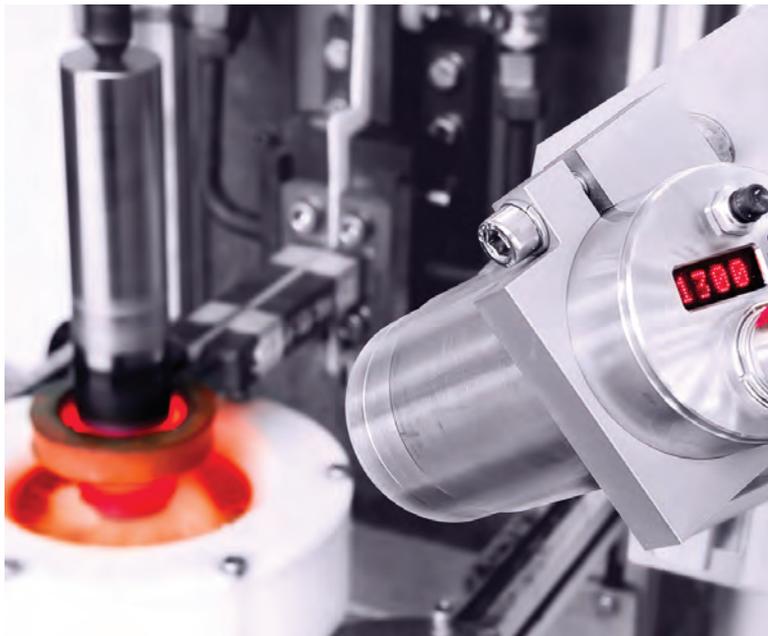


Abb 4: Wärmebild von Bauteilen an der Presse

KONTAKT

LumaSense Technologies GmbH

Kleyerstr. 90
D-60326 Frankfurt/M.
Tel: +49 69 973 73-0
Fax +49 69 973 73-167
info@lumasenseinc.com
www.lumasenseinc.com



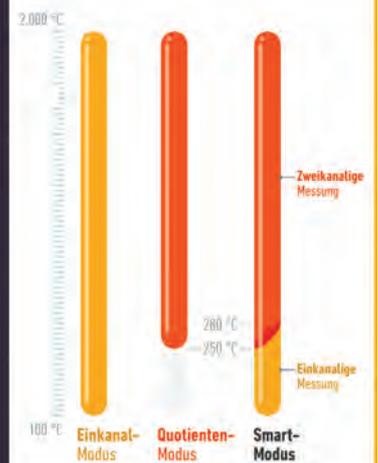
IGAR 6 ADVANCED

Pyrometer mit unterschied- lichen Betriebsmodi

Digitales Pyrometer mit möglicher Kombination aus Einkanal- und Quotientenmessung zur berührungslosen Temperaturmessung in Bereichen zwischen 100 und 2000 °C.



info@lumasenseinc.com
www.lumasenseinc.com



» Prüfung des Risswachstums bei thermoplastischen Rohren «

Eine der häufigsten Ausfallursachen bei thermoplastischen Rohren ist das langsame Risswachstum. Um dies prüfen und beurteilen zu können, ist bislang eine Vielzahl von meist aufwändigen Untersuchungen nötig. Neueste Verfahren wie Strain Hardening Modulus ermöglichen im Vergleich dazu schon nach sehr kurzer Prüfdauer eine gute Abschätzung. Die Voraussetzung für effiziente, präzise und reproduzierbare Messungen ist ein bestimmtes Equipment seitens der Hard- und Software.

Thermoplastische Rohre aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) oder vernetztes Polyethylen (PEX) werden in unterschiedlichen Bauformen hergestellt. Sie zeichnen sich durch besondere mechanische Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, geringes Gewicht, Beständigkeit gegenüber Chemikalien, Flexibilität, ausreichende Ringsteifigkeit und eine geringe Oberflächenrauheit aus. Durch die Kombination verschiedener Werkstoffe können Eigenschaften gezielt erzeugt werden. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von der Automobilindustrie über den Maschinen- und Schiffbau bis hin zur Abwasser- und Kanalrohranwendung. Um die jeweiligen Sicherheitskriterien zu erfüllen, unterliegen sie hohen Qualitätsanforderungen.

Entsprechend den Einsatzbereichen und den Materialien gibt es für die Prüfung von Kunststoffrohren eine große Anzahl nationaler und internationaler Normen. Hierbei werden sowohl die Werkstoffeigenschaften des verwendeten Kunststoffs als auch die Gebrauchseigenschaften des fertigen Rohres geprüft. Dazu gehören beispielsweise die Bestimmung der Ringsteifigkeit unter einer radialen externen mechanischen Beanspruchung und die Ringflexibilität, also die Fähigkeit des Rohres, eine Verformung ohne strukturelle Beschädigung zu überstehen. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Langzeitbeurteilung mechanischer Eigenschaften betreffen die Empfindlichkeit auf langsames Risswachstum und das Kriechverhalten unter konstanter Druckbelastung, was für die Sicherheit von enormer Bedeutung

ist. Das Risswachstum ist eine der häufigsten Ausfallursachen sowohl bei Rohren, als auch bei Folien, Dichtungsbahnen und PET-Flaschen.

Charakterisierung des langsamen Rissfortschritts

Rohre aus Polyethylen wie PE80, PE100 oder dem verbesserten PE100-RC (Resistance to crack) zeigen eine unterschiedlich ausgeprägte Empfindlichkeit auf langsames Risswachstum. In der Rissfront zeigen sich dabei sogenannte Fibrillen, die unter Belastung nach und nach versagen. Zur Beschreibung dieses Verhaltens wird der Begriff des Environmental Stress Cracking (ESC) oder Slow Crack Growth (SCG) verwendet. Die Untersuchung dieser Eigenschaft ist deshalb so bedeutend, da das Risswachstum bereits bei vergleichsweise niedrigen

Spannungen und weit unterhalb der so genannten Streckspannung stattfindet. Diese definiert den ersten Wert, bei dem die Dehnung auch dann fortschreitet, wenn die Spannung nicht weiter erhöht wird. Um den Mechanismus genauer zu charakterisieren, wurde im Laufe der Jahre eine Reihe von Werkstoffprüfungen entwickelt. Dazu zählen vor allem der Full Notch Creep Test (FNCT) und der Notched Constant Tensile Load Test (NCTL). Da die Untersuchungen relative lang dauern, ist es üblich die Prüfung mit scharfer Anfangskerbe, erhöhter Temperatur sowie einer beschleunigend wirkenden Flüssigkeit (Tenside) durchzuführen.

Neuere Forschungen ermöglichen jetzt Prüfverfahren, die bereits nach sehr kurzer Prüfdauer eine gute Abschätzung des Risswachstums erlauben und ohne Flüssigkeiten auskommen. Für die Anwender bedeutet das eine erhebliche Reduzierung des Aufwands und damit schnell verfügbare Messergebnisse. Diese Verfahren sind ISO 18488 (Determination of Strain Hardening Modulus in relation to slow crack growth) und ISO 18489 (Determination of resistance to slow crack growth under cyclic loading – Cracked Round Bar (CRB)).

Bestimmung des Strain Hardening Modulus

Die Bestimmung des Strain Hardening Modulus setzt ein bestimmtes Equipment seitens der Hard- und Software voraus. Das Unternehmen Zwick Roell bietet mit der elektromechanischen Materialprüfmaschinenreihe AllroundLine die notwendigen Voraussetzungen für effiziente, präzise und reproduzierbare Messungen. Die AllroundLine ist für Prüfkräfte von 5 bis



Abbildung 1: Ermittlung der Ringsteifigkeit von Kunststoffrohren

250 kN, Prüfraumhöhen von 1030 bis 2560 mm und Prüfgeschwindigkeiten von 0,00005 bis zu 3000 mm/min erhältlich (abhängig vom Typ). Der hohe Prüfgeschwindigkeitsbereich, unabhängig von der Prüfkraft, kann ohne Einschränkungen genutzt werden. Zur weiteren Ausstattung gehören eine Temperierkammer, die eine Zugsbewegung der Klemmen von mindestens 360 mm erlaubt, ein mechanisches oder optisches Längenänderungsmesssystem wie der videoXtens sowie parallel spannende Probenhalter.

Für die Prüfung nach ISO 18488 wird ein kleiner Stab mit relativ breiter Schulter unter Zug beansprucht. Die Eckdaten bei PE sind 80 °C und ein Verformungsverhältnis $\lambda = L/L_0$ zwischen 8 und 12 statt. Dies entspricht einem Bereich, in dem das Polymer bereits so weit verstreckt ist, dass das Verformungsverhalten der Fibrillen messbar wird. Ab einer bestimmten Zugspannung ist das Verhältnis zwischen Spannung (Kraft/Querschnitt) und Dehnung aber nicht mehr linear, da sich

die Querschnittsfläche durch die Einschnürung verringert und die Spannung auf die „wahre“ Spannung ansteigt. Eine Möglichkeit, die Zugprüfung trotzdem für eine präzise Auswertung zu nutzen, bietet das Neo-Hookesche Stoffgesetz. Das Resultat ist die wahre Spannung über der Neo-Hookschen Dehnung mit einem nahezu linearen Verlauf. Für das genannte λ zwischen 8 und 12 ergibt sich daraus ein reproduzierbarer Wert, der für PE mit anderen Prüfmethode gut korreliert – und das in deutlich kürzerer Prüfzeit. Die Auswertung erfolgt mit der firmeneigenen Software testXpert III. Sie erlaubt die Prüfung nach ISO 18488 mit Angabe der wahren Spannung, wahlweise über der Neo-Hookscher Dehnung oder dem Verformungsverhältnis λ , sowie die Berechnung der Steigung im linearen Verlauf und die Kontrolle des Regressionskoeffizienten.

Zyklische Beanspruchung

Ergänzende Aussagen zur Rissbeständigkeit bei der Bestimmung der Dauerfestigkeitswerte

und der Lebensdauervorhersage nach ISO 18489 gewinnt man durch eine zyklische Beanspruchung. Hierzu werden meist Hochfrequenzpulsatoren oder servohydraulische Prüfmaschinen eingesetzt. Die neueste Entwicklung von Zwick Roell für dynamische Prüfungen ist die Linear Testing Maschine (LTM): Eine dynamische Prüfmaschinenreihe, deren Antrieb auf der Linearmotortechnologie basiert. Sie können dank des großen Geschwindigkeitsbereichs sowohl für dynamische Ermüdungsprüfungen als auch für statische Werkstoffprüfungen eingesetzt werden.

KONTAKT

Zwick GmbH & Co. KG

August-Nagel-Str. 11

D-89079 Ulm

Tel.: +49 (0) 7305 10-0

Fax: +49 7305 10 -11200

info@zwick.de, www.zwick.de

Unsere Leidenschaft ist Kundenorientierung. Prüfen mit Verstand.

www.zwick.de

Besuchen Sie uns auf
YouTube™
ZwickRoell.tv
 Prüfen mit Verstand

Zwick / Roell
 Prüfsysteme

»» Das Herz der Metallbearbeitung schlägt in Stuttgart ««

Die AMB wird vom 18. bis 22. September bereits zum 19. Mal zum Treffpunkt für Experten der spanabhebenden Metallbearbeitung. Mehr als 1.500 Aussteller, werden ihre Entwicklungen und Innovationen auf einer Bruttoausstellungsfläche von mehr als 120.000 Quadratmetern präsentieren. Die Zeichen stehen gut, dass die AMB 2018 die größte AMB aller Zeit werden wird. „Mit der neuen Paul Horn Halle (Halle 10), der Sonderschau AMB Digital Way und dem dazugehörigen Kongress haben wir die besten Voraussetzungen geschaffen, um die AMB 2018 noch größer und besser aufzustellen“, erläutert Ulrich Kromer von Baerle, Sprecher der Geschäftsführung Messe Stuttgart.



Mehr Fläche, mehr Innovationen, mehr Erfolg

Die AMB hat in den letzten Jahren sämtliche Kapazitäten des Messegeländes ausgereizt und wird auch 2018 trotz Flächenzuwachs wieder komplett ausgebucht sein. „Mit der neuen Paul Horn Halle (Halle 10) stehen 15.000 Bruttoquadratmeter mehr zur Verfügung, um der Nachfrage auf Seiten der Aussteller gerecht zu werden und die Attraktivität für AMB-Besucher durch noch mehr Produkte und Innovationen zu steigern“, erklärt Gunnar Mey, Abteilungsleiter Industrie bei der Messe Stuttgart. Darüber hinaus ermöglicht der Flächenzuwachs eine optimierte Verteilung der bestehenden Ausstellungsbereiche. Die AMB 2018 wird thematisch neu gegliedert: Im L-Bank Forum (Halle 1) und Halle 3 finden sich Bearbeitungswerkzeuge und Spannzeuge.

In Halle 4 und der Oskar Lapp Halle (Halle 6) liegt der Schwerpunkt auf Drehmaschinen und -automaten. Halle 5 zeigt Schleif- und Werkzeugschleifmaschinen und alles was dazu gehört. Die Alfred Kärcher Halle (Halle 8) stellt die Neuerungen bei Säge- und Trennschleifmaschinen, Oberflächentechnik, Markiersysteme, Härte-, Erwärmungsmaschinen, Schmierung und Kühlung sowie Sicherheits- und Umwelttechnik vor. Die Hallen 7, 9 und die neue Paul Horn Halle (Halle 10) runden das Programm mit Fräsmaschinen, abtragenden Werkzeugmaschinen, Messtechnik und Qualitätssicherung sowie flexiblen Fertigungszellen/-systemen, Bearbeitungszentren und Verzahn- bzw. Bohrmaschinen ab. Die Anbieter für Steuerungs- und Antriebstechnik und für CAD/CAM/CAE sowie Fertigungssoftware finden sich ab sofort direkt am Eingangsbereich Ost und der Halle 2 am Zutritt zum Messegelände.

Im Herbst der geraden Jahre präsentieren die Hersteller Ihre Innovation für Nordamerika in Chicago, für Asien in Tokio und für Europa auf der AMB in Stuttgart. In Stuttgart sind auch dieses Jahr wieder alle Weltmarktführer der Zerspanung vor Ort und können die Besucher hunderte Maschinen „unter Span“ live erleben.

AMB Sonderschau und Kongress Digital Way

Mit der erstmals stattfindenden Sonderschau „Digital Way“ und dem angeschlossenen Kongress zeigt die AMB Wege auf, wie Industrieunternehmen mithilfe aktueller Informationstechnologie die Potenziale der Digitalisierung heben können. Ziel ist es, mit der AMB als Plattform für Anbieter und Anwender, Orientierung zu geben, wie die Forderungen nach mehr Umsatzwachstum sowie Kostenersparnis insbesondere durch eine erhöhte Produktivität der Mitarbeiter und eine Effizienzsteigerung der Maschinen erfüllt werden können. Gunnar Mey konkretisiert: „Unternehmen wollen wis-

sen, wie Industrie 4.0 und die Digitalisierung in der Fertigung umgesetzt werden können. Welche Anbieter haben bereits erfolgreich Projekte realisiert? Welche Anwendungen bzw. Modelle gibt es und welche sind für das jeweilige Unternehmen relevant? Mit dem Digital Way zur AMB 2018 bringen wir lösungsorientierte Angebote und Nachfrage zusammen.“

Boomphase setzt sich 2018 fort

Die Absatzmärkte in Teilen von Europa befinden sich aktuell in einer Boomphase. Wirtschaftsexperten prognostizieren für 2018 einen Zuwachs des Bruttoinlandsprodukts in Deutschland von 2,2 Prozent und für den Euroraum von 2,3 Prozent. „Die Aussteller bestätigen uns, die Kapazitäten in der Industrie sind derzeit so stark ausgelastet, wie seit 2008 nicht mehr. Jetzt wäre der richtige Zeitpunkt notwendige Investitionen zu tätigen. Die AMB bietet dafür eine einzigartige Plattform, denn hier zeigen Aussteller den aktuellen Stand der Technik und was in Sachen Digitalisierung in der Produktion Stand heute möglich ist“, erklärt Gunnar Mey, Abteilungsleiter Industrie bei der Messe Stuttgart.

AMB Iran: Interesse bleibt stabil

Das Interesse an der dritten Auflage der AMB Iran (26. bis 29. Juni 2018) bleibt stabil, viele Aussteller sind vom Potential des Iran weiterhin überzeugt. Zum dritten Mal stellen unter anderem Branchengrößen wie AMF Andreas Maier GmbH, Gühring KG, Kapp GmbH & Co. KG, Klingelnberg GmbH, Paul Horn GmbH, Schwäbische Werkzeugmaschinen GmbH und Samputensili Cutting Tools S.r.l. aus.

www.amb-messe.de





Das Herz der Metallbearbeitung schlägt in Stuttgart!



Internationale Ausstellung
für Metallbearbeitung

18. - 22.09.2018
Messe Stuttgart

NEU:

**DIGITAL
— WAY**



AMB Sonderschau
„Digitale Wege in der Produktion“

amb-messe.de

» Biobasierte Composite – Materialien / Prozesse / Oberflächen«

Biobasierte Verbundwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sowie Hybridverbundwerkstoffe mit thermoplastischen und duromeren Kunststoffen stehen im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten der Geschäftsbereiche „Biobasierte Composite & Prozesse“ und „Holz- und Papieroberflächentechnologie“ innerhalb der Kompetenzzentrum Holz GmbH.

Im Bereich Biobasierte Composite & Prozesse stehen Composite aus nachwachsenden Rohstoffen (WPC – Wood Polymer Composite / NFC – Natural Fibre Composite) im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten. Diese basieren auf thermoplastischen oder duromeren Kunststoffen als Matrix. Als Verstärkungsmaterialien kommen sowohl Naturfasern und Holz, als auch anorganische und synthetische Fasern bzw. Füllstoffe zum Einsatz. Mit Verfahren wie Extrusion, Spritzguss oder 3D-FLM-Druck (Fused Layer Modeling) sind die Materialien zu unterschiedlichsten Produkten verarbeitbar. Neben der Vielfalt bei der Formgebung zeichnen sich diese Werkstoffe durch gezielt einstellbare Eigenschaftsprofile aus. Unser einzigartiges Know-how ermöglicht es, sogar Hochleistungs-Keramik (SiC Keramik) aus biogenen Rohstoffen zu komplexen Teilen zu verarbeiten. Zudem wird an der Entwicklung von biobasierten Carbonfasern und porösen Kohlenstoffmaterialien geforscht.

Forschungsthemen:

- Optimierung der Materialperformance durch Rezepturenentwicklung
- Einsatz von Biopolymeren, Recyclingmaterialien sowie unterschiedlicher Naturfasern
- Entwicklung von Hybridmaterialien
- Prozessoptimierung bei der Compoundierung, der Profilextrusion (auch Schäumen und Coextrusion), beim Spritzguss, der Herstellung von Filamenten für den 3D-FLM-Druck
- Komplexe 3D-Keramikwerkstoffe auf Basis von biobasierten Rohstoffen
- Carbonfasern und -werkstoffe aus biobasierten Rohstoffen.

Der Bereich Holz- und Papieroberflächentechnologie beschäftigt sich mit Untersuchungen zum Thema Oberflächentechnologie von Holzwerkstoffen und Verbundwerkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Im Speziellen sind damit Fragestellungen rund um die Ober-

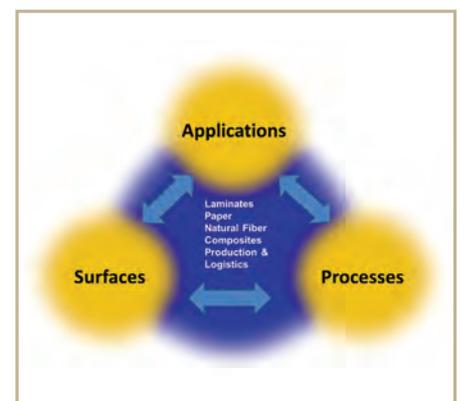


Abb. 2: Gesamtheitlicher Zugang zur wissenschaftsbasierenden Problemlösung im Bereich Oberflächentechnologie und Logistik

flächen von Papier, Laminaten, Kompositen, Naturfasern und Naturfaserverbunden verknüpft. Die Expertise erarbeiten unsere Mitarbeiter und Forscherinnen in unterschiedlichen Projekten mit internationalen Industrie- und wissenschaftlichen Partnern.

Abb. 1: v.l.n.r.: Co-Extrusionslinie/Compoundierung, CF-Herstellung, biogene Keramiken



Forschungsthemen:

- Charakterisierung von Oberflächen
- Untersuchung von Ursachen-Wechselwirkungsbeziehungen technologischer Eigenschaften und optischem Aussehen von Oberflächen
- Prozessbetrachtungen, die diese Oberflächeneigenschaften beeinflussen
- Untersuchung von (Produktions-)Prozessen zu deren effizienteren Gestaltung
- Methodenentwicklung der Oberflächencharakterisierung

Ausstattung und Methoden der beiden Bereiche:

- Compoundieren (Stranggranulierung, Heißabschlag, Unterwassergranulierung)
- Extrusionslinie Cincinnati Fiberex K 38 mit 6-fach gravimetrischem Dosiersystem; Scaling up mit Kooperationspartner

- Spritzgussmaschine für Thermoplast- und Duromercompounds
- RTM Anlage
- 3D-FLM Drucker und Filamentanlage (inkl. Faserverstärkung)
- Presse für Lamine (Kurztakt und Rückkühlen, im Labormaßstab)
- Künstliche Bewitterung mittels Xenon-Bewitterungskammern; Freibewitterung
- Universalprüfmaschinen, Mikroskopische Bildanalyse (UV-VIS, REM, IR)
- Spektroskopie (NIR, IR, UV-VIS)
- Fasergeometrieanalyse (FASEP)
- Tensiometer, Kontaktwinkelanalyse
- Spezifische Oberflächen und Porenanalysen Messstation
- Chemische und analytische Labors

Für die Bearbeitung dieser Fragen kann darüber hinaus die Infrastruktur der gesamten Kompetenzzentrum Holz GmbH genutzt werden.

KONTAKT

Kompetenzzentrum Holz GmbH

Altenberger Straße 69

A-4040 Linz

Telefon: +43 732 2468 6750

zentrale@kplus-wood.at

www.wood-kplus.at

Die Kompetenzzentrum Holz GmbH (Wood K plus) ist eine führende Forschungseinrichtung für Holz und verwandte nachwachsende Rohstoffe in Europa.

Ihre Kernkompetenzen liegen in der Materialforschung und Prozesstechnologie entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von den Rohmaterialien bis zum fertigen Produkt. Dabei erarbeiten über 120 hochqualifizierte Forscherinnen und Forscher Methoden sowie Grundlagen und betreiben angewandte Forschung an der Nahtstelle Wirtschaft und Wissenschaft.

In längerfristigen Forschungsprojekten und Programmen erarbeiten die Experten und Expertinnen von Wood K plus innovative Lösungen für Unternehmen. Dabei können wissenschaftliche Partner ihr Know-how und langjährige Erfahrung einbringen. Im Rahmen von Dienstleistungsaufträgen werden für Unternehmen Prüfungen, Machbarkeitsstudien, Expertisen oder Beratungen realisiert. Wood K plus analysiert gemeinsam mit den Industriepartnern den Innovationsbedarf, strukturiert diesen Bedarf in technologische Fragestellungen und identifiziert vielversprechende Lösungsansätze, die innerhalb konkreter Forschungsprojekte umgesetzt werden können.



Kontakt **Kompetenzzentrum Holz GmbH**
Altenberger Straße 69, A-4040 Linz

Telefon: +43 732 2468 6750
zentrale@kplus-wood.at

www.wood-kplus.at

» SCHLEIFTAGUNG «

Innovative Trends und Techniken, praxisorientierte Vorträge, aktuelle Forschungsergebnisse sowie intensiver Branchentreff:

Die 16. Schleiftagung findet am 20. und 21. Februar 2019 in Stuttgart-Fellbach statt – erstmals mit deutsch-englischer Simultanübersetzung

Nach dem Tagungsjubiläum 2018, zu dem der etablierte Branchentreff mit 155 Teilnehmern einen Rekord verzeichnete, lädt der Carl Hanser Verlag auch 2019 wieder nach Stuttgart-Fellbach zur 16. Auflage der Schleiftagung.

In den 16 Jahren seit Bestehen hat sich die Fachtagung zu einer der führenden Informations- und Diskussionsplattformen für Schleifexperten, Brancheninsidern sowie für alle, die es werden wollen, entwickelt. Teilnehmer schätzen neben den praxisnahen und zukunftsgerichteten Vorträgen v.a. auch die guten Networking-Möglichkeiten. *"Ausgezeichneter Informationsgehalt und Branchentreff mit sehr guten Möglichkeiten zum Netzwerken"* urteilt z.B. Oliver Hildebrandt von Supfina Grieshaber GmbH & Co. KG über die Fachtagung 2018. Und Markus Graf von Reishauer AG empfiehlt *"Haben Sie Probleme im Alltag mit Schleifen aller Art? Dann besuchen Sie die Schleiftagung in Stuttgart-Fellbach. Da lernen Sie Teilnehmer kennen, die mit ähnlichen alltäglichen Problemen kämpfen und mit denen Sie sich austauschen können."*

Die Fellbacher Schleiftagung bietet Gelegenheit, Verfahren, Innovationen und Ergebnisse der Schleiftechnik kennen zu lernen, und diese mit führenden Experten aus Industrie und Anwendungsforschung, mit Herstellern und Anwendern zu diskutieren.

Als Bearbeitungsverfahren, das bei der Fertigung präziser Bauteile mit hohen Oberflächengüten am Ende einer langen und teuren Prozesskette steht, kommt der Schleiftechnik eine Schlüsselrolle zu. 2019 soll die Fachtagung auch Treffpunkt für internationale Teilnehmer werden.

Die Vorträge werden erstmals mit deutsch-englischer Simultanübersetzung angeboten. Ansonsten ändert sich am Erfolgskonzept der nach wie vor deutschsprachigen Veranstaltung nichts:

Das Programm 2019 – mit Themen entlang der Prozesskette und dem Bereich Flach-, Profil- und Werkzeugschleifen – wird wieder von Tagungsleiter Dr. Dirk Friedrich (Grindaix GmbH) und dem Fachbeirat, bestehend aus Helmut Damm (Chefredakteur Werkstatt + Betrieb), Tobias

Engenhart (KNOLL Maschinenbau GmbH), Georg Güntert (Güntert Präzisionstechnik GmbH), Dr. Markus Helpertz (Brinkmann Pumpen GmbH & Co.KG), Dr. Dirk Hessel (Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG), Arne Hoffmann (BLOHM JUNG GmbH) und Roland Schmitz (EMAG Maschinenfabrik GmbH) zusammengestellt. Neu im Gremium dabei ist **Prof. Dr.-Ing. Wilfried Saxler**, Direktor des Instituts für Werkzeug- und Fertigungstechnik iWFT, Rheinische Fachhochschule Köln und Geschäftsführer des FDPW e.V.

Auch Jungwissenschaftler, die im Rahmen der Postersession ihre neuesten Forschungsergebnisse vorstellen, haben erneut ihren festen Platz im Programm.

Ferner bietet die begleitende Fachausstellung teilnehmenden Firmen die Möglichkeit, ihre aktuellen Produkte und Dienstleistungen dem Fachpublikum zu präsentieren.

Weitere Informationen im Internet unter: www.schleiftagung.de



Die SCHLEIFTAGUNG stellt Zukunfts- und Trendthemen der Branche in den Mittelpunkt – Teilnehmerrekord beim Tagungsjubiläum 2018!

© Hanser Verlag

VERANSTALTUNGORT

Schwabenlandhalle
Tainer Str. 7-9
D-70734 Fellbach
www.schwabenlandhalle.de

KONTAKT

Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
Sabine Schuster
Kolbergerstraße 22
D-81679 München
T +49 (0)89 99830-674
F +49 (0)89 99830-157
sabine.schuster@hanser.de
www.hanser-tagungen.de



SCHLEIFTAGUNG

20. und 21. Februar 2019 in Stuttgart-Fellbach

Der Branchentreff rund ums Schleifen:



Praxisnahes Wissensupdate

Erhalten Sie in ausgewählten Fachvorträgen einen kompakten Überblick zu aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen in der Schleiftechnik!

»Interessante Veranstaltung, die auch einen Ausblick auf zukünftige Trends in unserer Branche gibt.«

Dorothea Widmann › Daimler AG



Neue Impulse

Erhalten Sie Anregungen aus Anwenderbeiträgen und neuesten Forschungserkenntnissen!



Schleiftagung-Community

Werden Sie Teil der Community und nutzen Sie die hervorragende Möglichkeit zum Netzwerken über die gesamte Prozesskette hinweg!

»Ausgezeichneter Informationsgehalt und Branchentreff mit sehr guten Möglichkeiten zum Netzwerken.«

Oliver Hildebrandt › Supfina Grieshaber GmbH & Co. KG



Best-Practice-Austausch

Lernen Sie von Best-Practice-Beispielen und dem Erfahrungsaustausch mit Ihren Kollegen!

Veranstalter

WB Werkstatt + Betrieb
Zeitschrift für spanende Fertigung

» Heraeus Amorphous Metals: Pushing Limits of Material Performance «

Amorphe Metalle sind metallische Gläser und ähneln in ihren Eigenschaften eingefrorenen Flüssigkeiten. Sie werden so schnell aus der Schmelze herabgekühlt, dass sich keine geordneten Strukturen im Festkörper ausbilden können, d. h. sie werden amorph, also erstarren chaotisch, ähnlich einem Glas. Die innovative Materialklasse zeigt daher eine Vielzahl von bisher unvereinbaren Eigenschaften und macht sie für zahlreiche Hightech-Anwendungen interessant.

Sie sind schockabsorbierend, korrosionsbeständig, biokompatibel, kratzfest und haben auch noch sehr gute Federeigenschaften – interessant zum Beispiel für langzeitstabile Membranen bei Einspritzdüsen, bruch sichere und leichtere Gehäuse für Smartphones oder scharfe, langlebige Skalpelle und minimalinvasive Instrumente. Mit dem Start-up „Amorphe Metalle“ baut der Technologiekonzern Heraeus seine Kompetenzen bei der Verarbeitung und Anwendung dieser hochinteressanten Materialklasse weiter aus. Die Motivation: Der Markt schreitet nach neuen Materialien mit neuen Materialeigenschaften.

Die Anforderungen an moderne Materialien und High-Tech-Anwendungen steigen. Produkte sollen eine verbesserte Leistungsfähigkeit und längere Lebensdauer durch verbesserte Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit bieten sowie eine Miniaturisierung durch leicht zu

verarbeitende hochfeste Materialien mit guter Duktilität ermöglichen. Dies ist oft ein Konflikt, den aber amorphe Metalle lösen können.

Mit einem jungen Team von Werkstoffwissenschaftlern und Materialexperten sowie umfassenden technischen Equipment kann Heraeus amorphe Metalle schmelzen und verformen als auch spritzgießen oder additiv fertigen. Heraeus ist damit der einzige Anbieter weltweit, der amorphe Metalle mit drei verschiedenen Methoden verarbeiten kann. Vor allem durch die additive Fertigung werden erstmals massive metallische Gläser („bulk metallic glasses“) endformnah für hochfeste Bauteile einem Massenmarkt zugänglich – nicht nur für den lang erhofften Einsatz als Strukturmaterial, sondern ebenso für Komponenten mit komplexen Geometrien und anspruchsvollen Designs. Feine, komplexe Bauteile aus amorphen Metallen mit speziell-

len Federeigenschaften werden bereits in der Uhrenindustrie eingesetzt.

Heraeus sichert sich Verwertungsrechte an schwefelhaltigen amorphen Metallen

In Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern aus der Industrie und Forschung entwickelt Heraeus weitere neue amorphe Legierungen und erschließt neue Anwendungsfelder. Einen Meilenstein konnte das Start-up jüngst in einer Kooperation mit der Universität des Saarlandes erreichen. Forscher der Universität des Saarlandes haben 2017 mit Unterstützung von Heraeus eine neue Klasse amorpher Metalle entwickelt.

Das Forscherteam am Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe an der Universität des Saarlands hat nach hunderten Versuchen und mehreren Jahren Forschung Titan-Legierungen



Abb. 1: Die innovative Materialklasse der amorphen Metalle zeigt eine Vielzahl von bisher unvereinbaren Eigenschaften und macht sie für zahlreiche Hightech-Anwendungen interessant. (Grafik: Heraeus)



Abb. 2: Feine, komplexe Bauteile aus amorphen Metallen mit speziellen Federeigenschaften werden bereits in der Uhrenindustrie eingesetzt. (Foto: Heraeus)

entwickelt, die eine sehr hohe Festigkeit besitzen und gleichzeitig sehr leicht sind.

Das Besondere: die neuen metallischen Gläser enthalten als entscheidenden nichtmetallischen Zusatz etwas Schwefel und zeigen eine hohe Festigkeit, ohne dabei spröde und brüchig zu werden. Zuerst wurde mit Palladium, Nickel und Schwefel eine funktionierende Legierung gefunden, die gute Eigenschaften hatte, dann ging es weiter mit Titan.

Nach ungefähr 250 Experimenten fanden die Forscher schließlich die richtige Abstimmung in der Zusammensetzung aus Titan und Schwefel. Die von ihnen entwickelten Legierungen sind fast doppelt so fest wie gängige Metalle auf Titanbasis derselben Dichte, also desselben Gewichts. Sie eignen sich hervorragend beispielsweise für Leichtbauteile in der Luft- und Raumfahrt.

Hier zählt jedes Gramm eingespartes Gewicht, und die Stabilität und Festigkeit des Materials sind entscheidend. Heraeus hat sich für den größten Teil der zum Patent angemeldeten, neuen Legierungen die Verwertungsrechte gesichert.

Amorphe Metalle bieten eine einzigartige Kombination von Eigenschaften, die in konventionellen Materialien unvereinbar sind.

Mechanische Eigenschaften

- Hohe Streckgrenze kombiniert mit ausgezeichneter Duktilität (2-mal höher als Stahl)
- Hohe Bruchzähigkeit
- Hohe Härte, gute Verschleiß- und Abriebfestigkeit (ähnlich wie Keramik)
- Isotropes Verhalten

Elektrische und magnetische Eigenschaften

- Hohe magnetische Permeabilität
- Elektrischer Widerstand ist nahezu temperaturunabhängig
- Leicht zu magnetisieren und zu entmagnetisieren

Chemische und medizinische Eigenschaften

- Hohe Korrosionsbeständigkeit wegen fehlender Korn- und Phasengrenzen
- Biokompatibilität einiger Legierungen



Abb. 3: Mit umfassenden technischen Equipment kann Heraeus amorphe Metalle schmelzen, walzen und additiv fertigen. (Foto: Heraeus)

Heraeus

KONTAKT

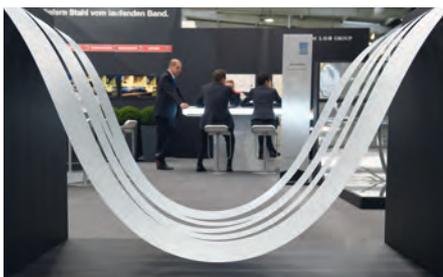
Heraeus Holding GmbH
 Heraeusstraße 12-14
 D-63450 Hanau
 Tel.: +49 (0)6181 35-0
 Amorphous-metals@heraeus.com
 www.heraeus.com

» EuroBLECH 2018 «

Die weltweit größte Messe rund um den Werkstoff Blech findet im Oktober statt

Vom 23.-26. Oktober 2018 trifft sich die blechbearbeitende Industrie wieder in Hannover zu ihrer weltweit größten Technologiefachmesse, der EuroBLECH. Als Schaufenster für Innovationen und Konjunkturbarometer der Branche gibt die Veranstaltung in acht Messehallen einen umfassenden Überblick über neue Technologien und Trends in der Blechbearbeitung. 1.505 Aussteller aus 41 Ländern und 60.636 Besucher aus 102 Ländern nahmen an der EuroBLECH 2016 teil, die 87.800 Quadratmeter Nettoausstellungsfläche belegte.

Die Aussteller zeigen auf der EuroBLECH 2018 die gesamte Wertschöpfungskette der Blechbearbeitung. Das Messeprofil umfasst u.a. Halbzeuge, Zulieferteile, Umformtechnologie, flexible Blechbearbeitung, Trenntechnologie, Fügetechnologie, CAD/CAM/CIM-Anwendungen sowie Technologie zur Verarbeitung hybrider Strukturen und Oberflächentechnologie. Neben den Ausstellerfirmen sind auch zahlreiche Forschungseinrichtungen auf der EuroBLECH vertreten, die mit ihren aktuellen Forschungsergebnissen die Grundlagen für Innovationen in der Blechbearbeitungstechnologie stellen.



Hybride Werkstoffe vermehrt im Einsatz

Das breite Spektrum des Werkstoffs Blech spielt bei innovativen Anwendungen eine zentrale Rolle, vor allem in Bereichen wie dem Automobilbau, einem der wesentlichen Innovationstreiber in der Blechbearbeitungstechnologie. Leichter und damit energieeffizienter, aber auch immer sicherer soll das Automobil der Zukunft sein. Dem richtigen Materialeinsatz gilt deshalb ein besonderes Augenmerk. Auch wenn im Karosseriebau nach wie vor hauptsächlich Stahlwerkstoffe verwendet werden, kommen intelligente Leichtbaustrukturen und hybride Werkstoffe vermehrt zum Tragen und entsprechend müssen die Fertigungsprozesse in der Blechbearbeitung hochflexibel angepasst werden. Bei jeder Neuerung im Bereich Werkstoffe und Werkstoffkombinationen stellt sich die Frage nach der passenden Verarbeitungstechnologie beim Trennen, Fügen und Umformen von Bauteilen und Komponenten. Die Forderung nach immer höherer Festigkeit und immer dünneren Blechen stellt eine Herausforderung an die Materialforschung.

Schwerpunkt smarte Produktion

Für die nächste Veranstaltung steht neben dem Leichtbau, hybriden Fertigungsprozessen, der additiven Fertigung und vielen weiteren aktuellen Themen die vernetzte Fertigung im Mittelpunkt. Steigerung von Effizienz, Leistungsverbesserung von Maschinen und Anlagen, Vernetzung von Komponenten und vorbeugende Wartung zur Reduktion von Stillstand-

zeiten – dies sind zentrale Punkte von Industrie 4.0. Um diesen Trend in der realen Produktion umsetzen zu können, bedarf es nicht nur qualitativ hochwertiger Anlagen sondern auch innovativer Software und Komplettsystemen. Die Fabrik der Zukunft erfordert vor allem auch erhöhte Datensicherheit und unternehmensübergreifend entwickelte Lösungen.

Für Spezialisten der Blechbearbeitung

Die EuroBLECH wendet sich an alle Spezialisten der Blechbearbeitung. Besucher der Messe sind u.a. Konstrukteure, Produktions- und Fertigungsleiter, Qualitätsmanager, Einkäufer sowie Experten aus der Forschung & Entwicklung. Wichtige Industriezweige, an die sich die Messe richtet, sind Maschinenbau, Herstellung von Blechprodukten, Zulieferteilen und Baugruppen, Stahl- und Leichtmetallbau, Automobilindustrie und Zulieferer, Elektrotechnik, Medizintechnik, Feinmechanik, Luft- und Raumfahrt sowie Walzwerke, Eisen- und Stahl-Grundindustrien und NE-Produktion.

Informationen zur EuroBLECH sind auf der Webseite www.euroblech.de erhältlich.

KONTAKT

Mack Brooks Exhibitions Ltd.

EuroBLECH 2018
Romeland House, Romeland Hill
St Albans AL3 4ET
Großbritannien
info@euroblech.com

EuroBLECH 2018 – Qualität und Innovation

25. INTERNATIONALE TECHNOLOGIEMESSE FÜR BLECHBEARBEITUNG

Blech, Rohr, Profile • Handling • Umformen • Fertigprodukte,
Zulieferteile, Baugruppen • Trennen, Schneiden • Fügen,
Schweißen • Flexible Blechbearbeitung • Maschinenelemente •
Rohr- / Profilmbearbeitung • Verbundwerkstoffe •
Oberflächentechnik • Werkzeuge • Sicherheit am
Arbeitsplatz • Prozesskontrolle, Qualitätssicherung • F&E •
Betriebs- / Lagereinrichtungen • CAD/CAM/CIM-Systeme /
Datenverarbeitung • Umweltschutz, Recycling

23. – 26. OKTOBER 2018
HANNOVER



**EURO
BLECH**

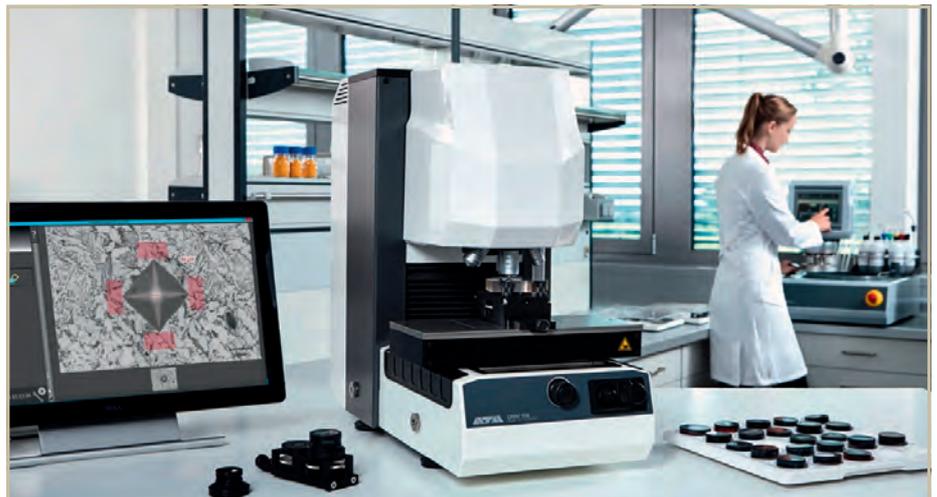
www.euroblech.de

» Carat Prüfgeräteserie von ATM Härteprüfung trifft metallographische Gefügeauswertung «

Die ATM GmbH als Hersteller von Geräten zur Materialographie ist seit 2014 mit dem Härteprüfgerät Carat 930 auf dem internationalen Markt für automatisierte Prüfungen von Werkstoffproben vertreten. Das Modell Carat 950 erleichtert die Planung von Härteprüfungen durch eine zusätzliche Übersichtsoptik und kann normgerechte Härteprüfungen nach Vickers als auch Knoop durchführen.

Seit Herbst 2017 enthält die Software der gesamten Carat-Serie außerdem mehrere Module zur normgerechten und automatisierten Bewertung von metallographischen Gefügen – ein einzigartiges Merkmal unter den bestehenden Härteprüfsystemen. Serienmäßig sind die Carat-Prüfgeräte mit hochwertigen Leica Objektiven individuell bestückbar. Zu den weiteren optischen Merkmalen zählen eine Köhlersche LED Beleuchtung und eine in der Software justierbare Aperturblende. In Kombination mit den automatischen Tisch- und Fokusachsen sind hochaufgelöste Probenscans mittels 2D Stitching und eine Erhöhung der Tiefenschärfe bei unebenen Proben mittels Z-Stacking möglich. Somit ist das Prüfgerät mit hochwertigen optischen Komponenten eines automatischen Auflichtmikroskops ausgestattet und daher ebenso für klassische Mikroskopieaufgaben wie beispielsweise Gefügebeurteilung geeignet.

In der aktuellen Version der Carat Software sind Module für die normgerechte Ermittlung von Phasenanteilen, Schichtdicken und Korngrößen integriert und individuell lizenzierbar. Der Anwender hat somit die Möglichkeit, eigene Bildverarbeitungsfilter zu Verarbeitungsprogrammen zusammenzuführen und für die Wiederverwendung zu speichern. Aufgabenspezifische Statistiken, Graphen und zugeschnittene Export- und Reportmöglichkeiten runden die einzelnen Module ab. Die Kombination von Härteprüfung und Gefügeanalyse erlaubt nun die Durchführung und Dokumentation mehrerer materialographischer Prüfaufgaben an einem Gerät und mit nur einer Software. Das bedeutet eine Ersparnis an Kosten,



Zeit und Laborraum, denn üblicherweise finden sich im klassischen Materialographielabor individuelle Härteprüfer und Mikroskope mit ihren jeweils eigenen Softwarelösungen.

Das volle Potenzial des Prüfgeräts kommt bei Werkstoffproben zum Tragen, die sowohl eine Härte- als auch Gefügebeurteilung erfordern. Dies gilt sowohl für Prüfungen an gesinterten, nitrierten oder beschichteten Bauteilen, als auch für Schweißproben. Für den Werkstoffprüfer besteht hierbei die Möglichkeit, probenbezogene Prüfungen durchzuführen, wie beispielsweise die Bestimmung der Porosität mittels Phasenanalyse, die Ermittlung der Dicke von Randschichten und die Ausführung spezifischer Härteprüfungen mit den etablierten, vollautomatischen Härteprüfprogrammen. Sämtliche Prüfergebnisse werden für die Dokumentation in Form von Datenbausteinen bereitgehalten, welche der Anwender beliebig zusammensetzen

und als Vorlage für die Wiederverwendung ablegen kann. Ein definierter automatischer Export der kombinierten Prüfergebnisse in ein QS-Managementsystem (z.B. QDAS oder AMS) oder eine Datenbank integrieren das Carat Prüfsystem nahtlos in den individuellen Prüfprozess des Unternehmens. Der gesamte Prüfprozess einer Probe wird durch einen hohen Grad an Automatisierung vereinfacht und profitiert gleichzeitig von Geschwindigkeitssteigerung und erhöhter Prozesssicherheit.

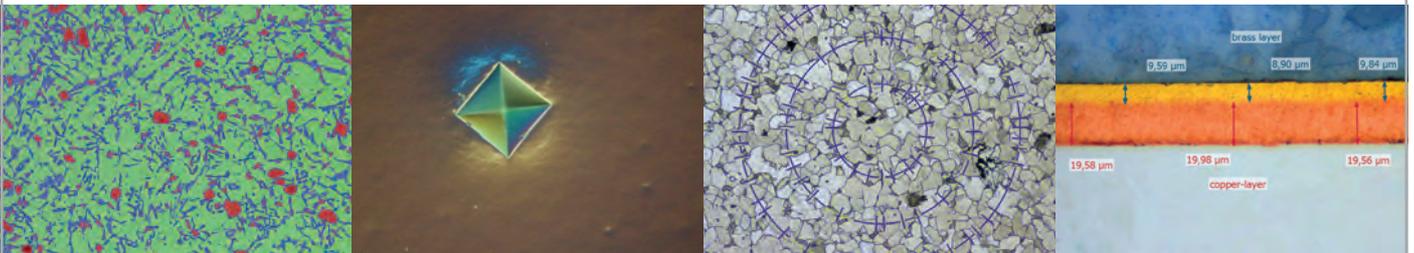
KONTAKT

ATM GmbH

Emil-Reinert-Str. 2
57636 Mammelzen
Germany
Tel.: +49 2681 9539-0
info@atm-m.com
www.atm-m.com

carat 950

- Das Multitalent für die Härteprüfung



Neueste Technologien und intuitive Anwendung machen das Härteprüfgerät **CARAT 950** zu einem außergewöhnlichen Produkt für die Mikrohartprüfung und optische Auswertung.

Messaufgaben werden hochpräzise, zuverlässig, reproduzierbar und weitestgehend automatisiert ausgeführt.

Das Basisgerät kann mit unseren eigenen Softwaremodulen und dem CARAT-Probenspannsystem optimal an Ihre Bedürfnisse angepasst werden.



NEU Carat 950
Härteprüfer mit Übersichtskamera

www.atm-m.com

part of **VERDER**
scientific

»» Höchste Datenqualität und längste Betriebsbereitschaft dank sauberer Verbrennung««

Die Eigenschaften anorganischer Werkstoffe (Metalle, Keramiken, Zement) werden durch die Wahl der Ausgangsmaterialien und Legierungselemente stark beeinflusst. So können z.B. mechanische Eigenschaften wie Zugfestigkeit oder Härte von Stahl durch die Anpassung der Kohlenstoffkonzentration im Produktionsprozess gezielt beeinflusst werden. Aus diesem Grund ist die genaue Analyse der Konzentration der enthaltenen Legierungselemente wie z.B. Kohlenstoff, Schwefel, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff in diesen Werkstoffen von großer Bedeutung. Mit der inductar® Serie von Elementar gelingt dies mit höchster Datenqualität bei längster Betriebsbereitschaft.

Um die Kohlenstoff- und Schwefelkonzentrationen in anorganischen Materialien zu bestimmen, ist die Verbrennungsmethode das Mittel der Wahl. Diese Methode der Hochtemperaturverbrennung basiert auf der Umwandlung von Kohlenstoff und Schwefel in Anwesenheit von Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Schwefeldioxid und der anschließenden Messung der Gasmenge mit Hilfe von Infrarot-Detektoren. Hierfür sind Temperaturen von um 2000 °C erforderlich, welche durch induktives Heizen und das Hinzu-fügen von Zuschlagstoffen wie Wolfram oder Eisen erreicht werden. In konventionellen CS-Analysatoren stellt die Bildung von Staub

und Schmutz während des Verbrennungsvorgangs ein großes Problem dar. Wenn Partikel der Schmelze über den Probenbehälter spritzen und sich an der Oberfläche des Verbrennungsrohres ablagern, entstehen starke Verunreinigungen im Inneren des Analysators. Hinzu kommt, dass sich durch die exotherme Reaktion von Wolfram ein Staub aus Wolframoxid bildet, der den Gasfluss und somit auch die Datenqualität negativ beeinflussen kann. Aus diesem Grund fallen bei herkömmlichen anorganischen CS-Elementaranalysatoren sehr häufig Reinigungsarbeiten an, welche die Betriebsbereitschaft des Gerätes erheblich verringern.

Saubere und hochgenaue CS-Analysen für anorganische Materialien

Mit der inductar® Serie von Elementar gehören diese häufigen Reinigungsarbeiten der Vergangenheit an. Dank der intelligenten Konstruktion und des innovativen Designs der inductar® Analysatoren läuft vor allem die Bestimmung der Elemente C und S extrem sauber ab. Dies wird unter anderem durch die einzigartige Geometrie der verwendeten Tiegel erzielt: die höhere und schlankere Form der Tiegel verglichen mit Produkten des Wettbewerbs verhindert beim inductar® CS cube das Herausspritzen von Schmelzetropfen, so dass die Oberfläche des Verbrennungsrohres stets sauber bleibt. Dies verlängert gleichzeitig die Lebensdauer des Verbrennungsrohres. Ein weiterer Grund für die minimierte Staub- und Schmutzentwicklung im inductar® CS cube liegt im nach unten gerichteten Gasfluss im Verbrennungsrohr: durch diese einzigartige Konstruktion wird der bei der Verbrennung entstehende Staub in die Keramiktiegel hineingedrückt und durch den nach unten strömenden Sauerstoff wird ein Mantelgasstrom erzeugt, der Ablagerungen am Verbrennungsrohr minimiert. Der Großteil an Staub und Schmutz bleibt somit im Probenbehälter und der restliche ins Verbrennungsrohr abgegebene Staub wird im Nachgang in einem innovativen Staubfilter gefangen. Somit reduzieren sich



die bei herkömmlichen Analysatoren häufigen und langwierigen Reinigungsarbeiten bei der inductar® Serie immens.

Erwiesene Langzeitstabilität dank sauberer Verbrennung

Im Experiment konnte die Langzeitstabilität des inductar® CS cube von Elementar für die Bestimmung von Kohlenstoff und Schwefel in anorganischen Materialien nachgewiesen werden. Dazu wurden mehr als 200 Proben hintereinander ohne Unterbrechung mit dem inductar® CS cube analysiert. Die Proben mit einem Gewicht von 0,5 g wurden in Keramiktiegel eingewogen und ein W/Sn Zuschlagstoff (2 g) hinzugegeben. Der automatische Probengeber mit 89 Probenpositionen ermöglicht generell den unbeaufsichtigten Betrieb des Gerätes rund um die Uhr, kann aber auch im laufenden Betrieb mit neuen Proben bestückt werden. Durch die automatisierte Analyse können bis zu 289 Proben an einem Tag bei minimalem Wartungsaufwand analysiert werden.

Mit Hilfe der integrierten Kamera zur Überwachung des Verbrennungsvorgangs wurde zunächst qualitativ kontrolliert, ob und wieviel Staub und Schmutz aus den Keramiktiegeln nach 0, 10 und 200 Analysen in das Verbrennungsrohr gelangte. Die optische Auswertung zeigt eindeutig, dass sich keine Spritzer und nur minimale Mengen an Staub im Verbrennungsrohr abgelagert haben. Dies wird auch durch die Auswertung der Analyseergebnisse bestätigt, die eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Kohlenstoff- und Schwefelwerte aufweisen. Diese hervorragende Datenqualität hätte bei Anwesenheit von Staub und Schmutzpartikeln nicht erreicht werden können, da die Ablagerungen zu einer Adsorption der gasförmigen Schwefeldioxidmoleküle an der Oberfläche von feinen Metalloxidpartikeln geführt hätten. Somit wäre die messbare Schwefelkonzentration mit zunehmender Analysenzahl geringer geworden. Da ein solcher Trend im Langzeittest mit dem inductar® CS cube nicht zu erkennen ist, bestätigen die bestens reproduzierbaren Messergebnisse den stabilen und verlässlichen Verbrennungsprozess über einen langen Zeitraum.

Innovative Ideen für höchsten Anwenderkomfort

Dank des intelligenten Designs der inductar® Serie von Elementar stehen dem Anwender innovative CS- und ONH-Analysatoren mit der längsten Betriebsbereitschaft für die Analyse anorganischer Materialien wie Metalle, Keramiken und Zement zur Verfügung. Das staubminimierte System sorgt für den geringsten Reinigungsaufwand und Langzeitstabilität des Systems. Dabei stehen die hohe und verlässliche Datenqualität sowie die einfache Bedienbarkeit und der Anwenderkomfort im Vordergrund.

KONTAKT

Elementar Analysensysteme GmbH

Elementar-Straße 1
D-63505 Langenselbold
Tel.: +49 (0)6184 9393-0
Fax: +49 (0)6184 9393-400
info@elementar.de
www.elementar.de

STAHL MIT QUALITÄTSSIEGEL.

inductar  Cubed Technology to Certify Metals.

Erleben Sie den weltweit ersten 5-Elemente-Analysator für die Analyse von Metallen & anorganischen Materialien: **inductar® EL cube.**

CSONH-Analyse von Metallen und anorganischen Materialien.

Einfache Bedienbarkeit dank intuitiver Software und werkzeugfreier Wartung.

Verlässliche Messergebnisse durch den langlebigen solid-state Hochtemperatur-Induktionsofen und Hochleistungsdetektor.

 **elementar**
EXCELLENCE IN ELEMENTS

Elementar Analysensysteme GmbH
www.elementar.de | info@elementar.de
+49 (0)6184 9393-0

» Thermisch gespritzte, konturnahe WC-12Co Beschichtungen für den Verschleißschutz von Umformwerkzeugen «

Der zunehmende Einsatz hochfester Blechwerkstoffe in der Umformtechnik führt zu steigenden Ansprüchen an den Verschleißschutz von Werkzeugsystemen. Der Einsatz thermischer Spritzverfahren sowie feiner und nanostrukturierter WC-12Co Ausgangspulver repräsentiert einen neuen und zugleich innovativen Ansatz zur Standzeiterhöhung. Auf diese Weise und unter Zuhilfenahme einer geeigneten Prozessführung lassen sich die Werkzeugoberflächen konturnah beschichten und in sehr effizienter Weise vor Verschleiß schützen.

Die Umformtechnik zählt zu den am häufigsten eingesetzten Verfahren, wenn es um die Herstellung von Bauteilen aus Blechwerkstoffen für die Klein-, Mittel- und Großserie geht. In den letzten Jahren sind die Anforderungen an Umformwerkzeuge hinsichtlich ihrer Performance, Größe, geometrischer Komplexität sowie ihrer Formgenauigkeit deutlich gestiegen [1]. Der Einsatz hochfester Stahlblechwerkstoffe bzw. Mehrphasen-Stähle (wie z. B. TRIP-/TWIP-Stähle sowie Dual-Phasen-, Komplex-Phasen oder Martensit-Phasen Stähle) mit Zugfestigkeiten weit oberhalb von 500 MPa [2] eröffnet neue Möglichkeiten, Leichtbauteile mit verbesserten Struktureigenschaften (wie z. B. einer hohen Steifigkeit) für die Luftfahrt- und Automobilindustrie herzustellen [3]. Die Verarbeitung derartiger Blechwerkstoffe stellt aufgrund der komplexen Gefügestruktur, den spezifischen Verformungsmechanismen und der daraus resultierenden erschwerten Umformbarkeit sowie den hohen erforderlichen Prozesskräften jedoch eine Herausforderung dar [4]. Das sich hieraus ergebende, komplexe mechanisch-tribologische Beanspruchungsprofil hat einen steigenden Verschleiß der Umformwerkzeuge und eine Herabsetzung ihrer Lebensdauer zur Folge. Daneben wirkt sich die zunehmende verschleißbedingte Abnutzung der Werkzeuge negativ auf das Fertigungsergebnis, d. h. auf die Qualität der geformten Teile aus.

Verschleißschutz von Umformwerkzeugen durch thermochemische Verfahren und Dünnschichtverfahren

Um hohe Festigkeiten und lange Standzeiten zu gewährleisten, werden Umformwerkzeuge generell aus teuren, hochfesten und hochlegierten Grundwerkstoffen gefertigt. Dies allein reicht jedoch oft nicht aus, um dem komplexen Beanspruchungsprofil zu genügen. Daher bedarf es hier in der Regel zusätzlicher, geeigneter Verfahren zum Schutz der Werkzeugoberflächen. Die Behandlung der Umformwerkzeuge mittels unterschiedlicher thermochemischer Prozesse bzw. Diffusionsverfahren (wie z. B. Härten, Nitrieren, Karbonitrieren, Nitrokarburieren) oder die Beschichtung unter Einsatz verschiedener Dünnschichtverfahren wie dem PVD- (Physical Vapor Deposition) oder dem CVD-Verfahren (Chemical Vapor Deposition) zählt hier zum Stand der Technik [5]. All diesen Verfahren ist gemein, dass sie für den Prozessablauf einen Rezipienten benötigen. Die Größe dieses Rezipienten sowie in der Regel auch die Prozessdauer werden maßgeblich von den Abmessungen der Werkzeuge bestimmt. Für sehr große und geometrisch komplexe Umformwerkzeuge ist eine Behandlung bzw. Beschichtung mit diesen Verfahren nicht nur sehr kostspielig, sondern zum Teil gar nicht mehr möglich. Weitere Nachteile ergeben sich bei diesen Verfahren (außer beim PVD-Verfahren) durch die vergleichsweise hohen Prozesstemperaturen, die zu Verzunderungen an der Oberfläche oder zum thermischen Verzug der Werkzeugkonturen führen können. Mittels

der Dünnschichtverfahren lassen sich gleichmäßige Verschleißschutzschichten in der Größenordnung von einigen Mikrometern erzeugen, die eine sehr gute Haftfestigkeit, hohe Mikrohärtigkeit und ebenfalls hohe Homogenität der Mikrostruktur besitzen [3]. Die Beschichtung besitzt aufgrund der geringen Dicke jedoch nur eine vergleichsweise geringe Tragfähigkeit für den Verschleißschutz. Hinzu kommt, dass diese Schichten im Falle einer lokalen Beschädigung nicht reparierbar sind und komplett ersetzt werden müssen. Aufgrund der gerichteten Materialabscheidung stellt die konturnahe Beschichtung geometrisch komplexer Bauteile beim PVD-Verfahren zudem eine Herausforderung dar. Um dies zu ermöglichen, bedarf es hochionisierender Verfahren wie dem Hochleistungsimpuls-magnetronspütern (HiPIMS), die sich neben dem Vermögen komplexe Bauteile zu beschichten vor allem auch durch härtere und verschleißbeständigere Schichten gegenüber konventioneller PVD-Schichten auszeichnen [6].

Potentiale der thermischen Spritztechnik

Gegenüber den genannten und seit vielen Jahren etablierten Verfahren bietet das thermische Spritzen eine innovative und zugleich wirtschaftliche Alternative, die Oberfläche von Umformwerkzeugen zu beschichten und sie dadurch in sehr effizienter Weise vor Verschleiß und Reibung zu schützen. So können Leistungsfähigkeit und Einsatzdauer der Werkzeuge zum Teil erheblich verbessert werden. Die Oberflächenfunktionalisierung ermöglicht

zudem die Verwendung kostengünstigerer und besser bearbeitbarer Grundwerkstoffe anstelle hochfester und hochlegierter Werkzeugwerkstoffe.

Thermische Spritzverfahren werden seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt, um Oberflächen vor Verschleiß und Korrosion zu schützen sowie sie gegen Wärme und elektrischen Strom zu isolieren [7]. Beim thermischen Spritzen handelt es sich generell um eine Gruppe von verschiedenen Beschichtungsverfahren, bei denen ein Spritzzusatzwerkstoff innerhalb oder außerhalb eines Brenners an-, auf- oder abgeschmolzen und auf eine zuvor vorbereitete Oberfläche schichtbildend aufgetragen wird [8]. Die verschiedenen thermischen Spritzverfahren unterscheiden sich nach Art des Spritzzusatzes, nach Art der Fertigung sowie nach Art des Energieträgers. Zu den gängigsten Verfahren zählen das Flammsspritzen, das Lichtbogen-drahtspritzen, das Plasmaspritzen (atmosphärisch oder im Vakuum), das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen mit Sauerstoff (HVOF-Verfahren, engl.: High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying) und Luft (HVOF-Verfahren, engl.: High Velocity Air Flame spraying), das Kaltgasspritzen sowie neuere Varianten wie das Warmspray-Verfahren, das Suspensionsspritzen und das Solution-Precursor-Spritzen. Die Art der Energiequelle ist nicht nur charakteristisch für das verwendete Verfahren, sondern bestimmt in entscheidender Weise auch über die Verarbeitbarkeit von Spritzzusatzwerkstoffen, über die sich ergebenden Schichteigenschaften und somit auch über deren Anwendung [9]. Die verschiedenen Verfahren stehen dabei jedoch nicht untereinander in Konkurrenz, sondern empfehlen sich mehr oder weniger für einen bestimmten Anwendungsfall [10]. Wichtige technologische Verfahrenseigenschaften des thermischen Spritzens bilden hohe Auftragsraten des Beschichtungsmaterials, kurze Prozesszeiten, eine geringe thermische Belastung des Grundwerkstoffs sowie die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Beschichtung großflächiger Bauteile [9].

Während des Schichtauftrags kommt es nicht zu einer schmelzflüssigen Verbindung zwischen dem Grund- und Schichtwerkstoff, wie z. B. beim Auftragsschweißen. Vielmehr wird die Haftung durch eine Kombination verschiedenartiger Grenzflächeneffekte bestimmt.

Dazu zählen in erster Linie die mechanische Verklammerung und Adhäsion der Spritzpartikel auf der Oberfläche, welche durch weitere Wechselwirkungen wie elektrostatische Kräfte, Diffusionsvorgänge, der Bildung von intermetallischen Phasen und zu einem geringeren Maß auch durch örtliche (Mikro-) Schweißungen begleitet werden [11].

Gegenüber anderen Beschichtungstechniken zählt das thermische Spritzen zu den Verfahren mit der größten Breite an Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten. Dies lässt sich zum einen auf die Vielfalt der verfügbaren Verfahrensvarianten in Kombination mit einer großen und stetig wachsenden Anzahl an Zusatz- bzw. Schichtwerkstoffen zurückführen. Zum anderen lassen sich nahezu alle Grundwerkstoffe beschichten, die eine feste Form aufweisen und entsprechend vorbehandelt werden können. Für thermisch sensible Oberflächen (z. B. Kunststoffe) bedarf es einer ausreichenden Kühlung. Des Weiteren zeichnet sich das thermische Spritzen durch eine gute Automatisierbarkeit und eine hohe Flexibilität, z. B. durch mobil einsetzbare vor-Ort Systeme für Baustellen, Kraftwerke oder Bohrseln, aus [11]. Ein weiterer Vorteil der thermischen Spritzverfahren gegenüber anderen Beschichtungstechniken, wie z. B. den Dünnschichtverfahren (PVD und CVD), liegt in der Möglichkeit, bei vielen Schichtmaterialien lokal abgenutzte bzw. beschädigte Teile der Beschichtung durch einen erneuten Schichtauftrag zu erneuern und damit zu reparieren. Hier bedarf es jedoch sowohl einer entsprechenden Vorbehandlung der Schichtoberfläche vor der Beschichtung (in der Regel durch Druckluftstrahlen mit festem Strahlmittel), als auch einer abschließenden Nachbearbeitung durch spanende Verfahren (meistens durch Schleifen) zur Anpassung der Form und der Maßeigenschaften. Übliche Dicken für thermisch gespritzte Verschleißschichten liegen im Bereich von 100 - 500 µm, aber auch dickere Schichten und Mehrlagenschichtsysteme bis zu mehreren Millimetern sind bei einigen Materialien grundsätzlich realisierbar [9].

Spritzzusatzwerkstoffe für den Verschleißschutz

Im Bereich der thermischen Spritztechnik haben sich für den Verschleißschutz vor allem Cermet-Schichten (d. h. Schichten aus Hartverbundwerkstoffen, mit „Cer“ = Ceramic und

„Met“ = Metallic) aus WC-Co oder Cr₃C₂-NiCr bewährt [9]. Der Grund hierfür liegt in den hervorragenden Eigenschaften dieser Materialien, die eine hohe Härte (bereitgestellt durch die Karbide) mit einer guten Bruchzähigkeit (bereitgestellt durch den Matrixwerkstoff) vereinen. Cermet-Schichten besitzen im Vergleich zu metallischen Schichten eine deutlich höhere Härte bzw. Verschleißbeständigkeit und weisen gegenüber keramischen Schichten eine höhere Bruchzähigkeit und folglich eine bessere Beständigkeit bei schlagartiger Beanspruchung auf. Aus diesem Grund haben sie sich seit Jahren für eine Vielzahl an Verschleißapplikationen bewährt und werden hier gleichsam auch am häufigsten eingesetzt.

Bei Einsatztemperaturen bis ca. 400 °C werden die WC-Co Schichten wegen ihrer höheren Härte und höheren Verschleißbeständigkeit gegenüber den Cr₃C₂-NiCr Schichten bevorzugt eingesetzt. Oberhalb dieser Temperaturen (d. h. im Bereich von 400 bis 950 °C) kommen aufgrund der höheren thermischen Stabilität ausschließlich Cr₃C₂-NiCr oder Cr₃C₂-NiCoCrAlY als Cermet-Schichten oder alternativ keramische Schichten z. B. aus Al₂O₃-TiO₂ zum Einsatz [12]. Ein weiterer Vorteil der Cr₃C₂-NiCr und Cr₃C₂-NiCoCrAlY Schichten im Vergleich zu den WC-Co Schichten liegt in ihrer höheren Beständigkeit gegenüber aggressiven, korrosiven Medien sowie Heißgaskorrosion. Um die Korrosionseigenschaften von WC-Co Schichten zu verbessern, wird Cr als weiteres Legierungselement vielfach hinzugefügt [13].

Die spritztechnische Verarbeitung der zumeist thermisch sensitiven Cermet-Zusatzwerkstoffe erfolgt am häufigsten mittels des Hochgeschwindigkeitsflammspritzverfahrens [14]. In einigen Fällen, jedoch deutlich seltener, kommt hierfür auch das atmosphärische Plasmaspritzen zum Einsatz. Das HVOF-Verfahren zählt zu den hochkinetischen Spritzverfahren, bei denen die kontinuierliche Verbrennung von Sauerstoff und gasförmigem oder flüssigem Brennstoff in einer Brennkammer unter Druck als thermokinetische Energiequelle dient. Der Spritzzusatzwerkstoff wird dem Brenner in Pulverform zugeführt. Gegenüber anderen thermischen Spritzverfahren zeichnet sich das HVOF-Verfahren vor allem durch seine hohe Prozessgasgeschwindigkeit bei gleichzeitig moderater Flammtemperatur aus. Da-

durch lassen sich fest haftende Schichten mit hoher Kohäsionsfestigkeit, geringer Porosität und einem geringen Anteil an unerwünschten Phasenreaktionen erzeugen.

Bei der Herstellung von HVOF-gespritzten WC-Co Schichten kommen üblicherweise sphärische, agglomeriert-gesinterte Ausgangspulver zum Einsatz [15]. Gründe hierfür liegen im besseren Fließverhalten runder Partikel bei der Pulverförderung, der Verhinderung von Separierungen der Phasen WC und Co im agglomerierten Zustand sowie der Verminderung der Oberflächenenergie der Partikel. Letzteres führt zusammen mit einer homogenen Aufwärmung gleichförmiger, runder Partikel zur Reduzierung unerwünschter Überhitzungs- und Phasenreaktionen. Bei den konventionellen Ausgangspulvern liegt die Größe der Agglomerate typischerweise zwischen 15 und 60 µm und die Größe der hierin enthaltenen WC- und Co-Partikel etwa zwischen 1 und 5 µm [16, 17].

Einsatz feiner und nanostrukturierter WC-12Co Pulver beim HVOF-Verfahren

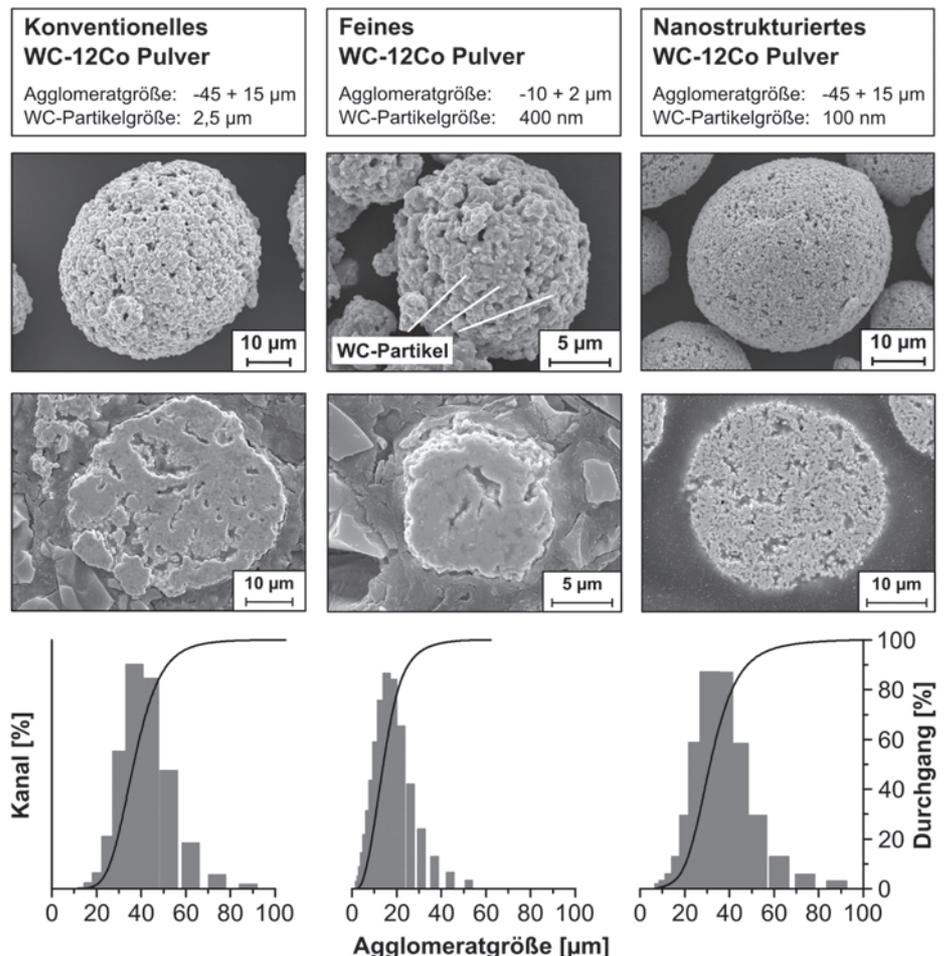
Das thermische Spritzen bietet ein großes Potential für die Erzeugung neuartiger verschleißbeständiger Oberflächen für Werkzeuge der Umformtechnik. Um den hohen Anforderungen an die Verschleißbeständigkeit und vor allem an die Maß- und Formgenauigkeit der zunehmend komplexeren Werkzeuggeometrien gerecht zu werden, bedarf es auch in der thermischen Spritztechnik leistungsfähiger Schichtkonzepte wie auch optimierter Strategien für die Prozessführung beim Beschichten. So soll das Schichtmaterial möglichst dünn und gleichmäßig auf die Werkzeugoberfläche aufgetragen werden, um einerseits die Konturen so gut wie möglich nachzubilden bzw. zu erhalten und um andererseits Schichten mit geringer Rauheit und homogenen Eigenschaften auch an geometrisch komplexen Zonen (z. B. an engen Radien und spitzen Winkeln) zu gewährleisten. Dadurch lässt sich der zeit- und kostenintensive Nachbearbeitungsaufwand für hochharte Schichten (z. B. durch Schleifen) deutlich reduzieren. Darüber hinaus sollten die Schichten möglichst defektfrei (insbesondere porrenfrei) und zudem zugspannungsarm appliziert werden, damit eine gute Haftung auf dem Grundwerkstoff sichergestellt und graduelle spannungsbedingte Delaminationen

beim Einsatz der beschichteten Werkzeuge vermieden werden. Konventionelle thermisch gespritzte WC-Co Schichten mit einem mikrostrukturierten Gefüge eignen sich für derartige Anwendungen nicht, da sie die oben genannten Anforderungen kaum erfüllen können.

Ein vielversprechender und zugleich innovativer Ansatz zur Erzeugung hochverschleißfester, konturnahe WC-Co Schichten, der am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT) der Technischen Universität Dortmund erforscht wird und ursprünglich aus dem bereits beendet Sonderforschungsbereich (SFB) 708 entstanden ist, liegt in der Verwendung feiner und nanostrukturierter Ausgangswerkstoffe beim thermischen Spritzen. Dabei handelt es sich um Ausgangspulver mit reduzierter Agglomeratgröße (< 15 µm) bei gleichzeitig stark verringerter Größe der einzelnen WC- und Co-Partikel in den submikroskopischen (100 - 500 nm) oder nanoskopischen (<100 nm) Bereichen. **Abb. 1** zeigt rasterelektronenmikroskopische Bilder und Agglomerat-

größenverteilungen der am LWT für das thermische Spritzen eingesetzten drei WC-12Co Ausgangspulverarten (konventionell, fein und nanostrukturiert). Der Einsatz derartiger Ausgangspulver eröffnet neue Möglichkeiten bei der Schichtherstellung und -applikation mittels des Hochgeschwindigkeitsflammspritzens. Gegenüber dem Einsatz konventioneller Pulver lassen sich so dünne fein- und nanostrukturierte Cermetschichten mit hoher Oberflächengüte und nahezu dichter Gefügestruktur erzeugen, welche bereits bei geringer Schichtdicke höchste Anforderungen an den Verschleißschutz erfüllen können [18, 19]. Aufgrund dieses Eigenschaftsprofils eignen sich diese Schichten vor allem für das endkonturnahe Beschichten von Umformwerkzeugen mit komplexer Oberfläche.

Abbildung 1: Am LWT eingesetztes konventionelles, feines und nanostrukturiertes Ausgangspulver zum thermischen Spritzen. Dargestellt sind jeweils die äußere Form der Agglomerate (oben), die innere Struktur im Querschnitt (mittig) sowie die Verteilung der Häufigkeitsklassen für die Agglomeratgrößen bestimmt mittels statischer Laserlichtbeugung (unten).



Neben dem werkstofflichen Ansatz spielt die Prozessführung beim HVOF-Spritzen eine entscheidende Rolle, um einerseits einen gleichmäßigen Schichtauftrag mit konstanten Eigenschaften (wie Härte, Porosität und Oberflächengüte) über die gesamte Werkzeugoberfläche zu realisieren. Andererseits soll dadurch gleichzeitig der Wärmeeintrag während der Beschichtung minimiert werden, da dieser zum thermischen Verzug der Konturen oder zu spannungsbedingten Schichtablösungen führen kann. Im Bereich des thermischen Spritzens werden üblicherweise mehrachsige Bewegungssysteme (typischerweise ein Industrieroboter in Kombination mit einem Dreh-Kipptisch) eingesetzt, um den Spritzbrenner über die zu beschichtende Oberfläche zu führen und die Beschichtung zu realisieren. Ein konturnahes und thermisch kontrolliertes Beschichten von Umformwerkzeugen mit komplexer Geometrie stellt in der thermischen Spritztechnik eine Herausforderung dar. Um dies zu ermöglichen, bedarf es nicht nur effizienter offline-programmierter Bahnen, sondern auch optimierter Bewegungsvorgänge durch das Robotersystem.

Herausforderungen dieses Ansatzes und Realisierungskonzept am LWT

Die Verarbeitung von feinen und nanostrukturierten Pulvern beim HVOF-Verfahren stellt eine Herausforderung dar. Aufgrund ihres großen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses und der damit verbundenen Oberflächenkräfte tendieren vor allem die feinen Pulver dazu, zu agglomerieren bzw. zu verklumpen [20]. Um die Fließfähigkeit feiner Pulver zu erhöhen und zugleich eine ununterbrochene, gleichmäßige Förderung bzw. Eindüsung dieser in die HVOF-Flamme zu ermöglichen, bedarf es besonderer Strategien. Des Weiteren muss bei der Verarbeitung feiner und nanostrukturierter WC-12Co Pulver die aus dem großen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis resultierende hohe thermochemische Reaktionsfähigkeit berücksichtigt werden. Diese Gefahr ist bei den nanostrukturierten Pulvern aufgrund der kleineren WC- und Co-Phasen stärker ausgeprägt als bei der feinen Variante. Durch diesen Effekt kann es zum Überhitzen der Ausgangswerkstoffe beim Durchgang durch die heiße HVOF-Flamme kommen, was wiederum zu unerwünschten Versinterungs- und Phasenreaktionen führen kann und folglich die Potentiale, die sich durch den Einsatz feiner Pulver ergeben, zu-

nichte macht. Ein weiterer Aspekt stellt die damit verbundene, größere Wärmeeinbringung in die zu beschichtende Werkzeugoberfläche dar, die thermische Spannungen oder thermischen Verzug nach sich ziehen kann.

Um den genannten Effekten Rechnung zu tragen bzw. feine und nanostrukturierte WC-12Co Pulver prozesssicher und zielführend mittels thermischer Spritzverfahren verarbeiten zu können, bedarf es entsprechendem Know-how sowie „optimierter Beschichtungsbedingungen“. Zielführend bedeutet in diesem Zusammenhang die Applikation dünner, konturnaher und glatter Schichten auf Umformwerkzeugen mit herausragenden mechanisch-tribologischen Eigenschaften, die auch bei höchster Beanspruchung ein gutes Umformergebnis sicherstellen und eine lange Lebensdauer der Werkzeuge gewährleisten. Zu den optimierten Beschichtungsbedingungen zählen:

- a) geeignete Anlagentechnik zur Pulverförderung und zum thermischen Spritzen,
- b) optimierte Ausgangswerkstoffe und Beschichtungsparameter,
- c) effiziente Bahnstrategien und Bewegungen des Robotersystems sowie
- d) entsprechende Strategien zur Kühlung der Bauteile während der Beschichtung.

Für die Verarbeitung der genannten WC-12Co Pulver nutzt der LWT eine Thermico C-CJS HVOF Anlage, bestehend aus einem CPF-2-Twin Pulverförderer sowie einem CJS HVOF Brenner mit K5.2 Brennkammertechnologie und dual-radialer Pulverinjektion. Dabei handelt es sich um ein Beschichtungssystem, welches besonders für den Einsatz von feinen Pulverfraktionen mit Partikelgrößen $< 15 \mu\text{m}$ optimiert wurde. Dieses HVOF-System arbeitet mit einer wasserstoffstabilisierten Flüssigbrennstoff-Sauerstoffflamme als thermokinetische Energiequelle. Der CPF2-Twin Pulverförderer ist mit zwei schwingungsfähigen Pulverbehältern ausgestattet. Durch eine mechanische Anregung kann das feine WC-12Co Pulver regelrecht fluidisiert und so eine nahezu unterbrechungsfreie Förderung in den HVOF-Brenner sichergestellt werden [21, 22]. Um das Risiko von Agglomerationen zu minimieren, werden beide Pulverbehälter konstant auf 60°C erwärmt. Zusätzlich wird eine zyklische Evakuierung der Pulverbehälter und eine anschließende Spülung mit heißem Pulvergas durchgeführt, um die Gefahr von Pulveragglomerationen weiter zu senken.

Aufgrund der hohen thermochemischen Reaktivität ist die Verarbeitung feiner und nanostrukturierter WC-12Co Pulver nur in engen Prozessfenstern möglich. Um diese sowohl prozesssicher zu verarbeiten, als auch Verschleißschutzschichten mit den anvisierten Eigenschaften konturnah auf Umformwerkzeugen applizieren zu können, spielt neben geeigneter Anlagentechnik zum thermischen Spritzen und zur Durchführung der Bewegungsoperationen der Einsatz optimierter Parameter-einstellungen für den gesamten Beschichtungsprozess eine wichtige Rolle. Dies umfasst Parameter für die Pulverförderung, für das thermische Spritzen, für die Bahnplanung und die Bewegungsvorgänge des Robotersystems sowie für die Bauteilkühlung. Für die systematische Ermittlung, Analyse und Optimierung der genannten Parametereinstellungen kommt am LWT die Methode der statistischen Versuchsplanung zum Einsatz. Diese Methode bietet sich nicht nur an, um funktionale Zusammenhänge zwischen den Beschichtungsparametern und den Prozess- und Schichteigenschaften darzustellen, sondern zugleich Prozesseinstellungen für optimale Beschichtungsbedingungen bei einer deutlich reduzierten Anzahl von Experimenten zu ermitteln. Des Weiteren erlaubt diese modellgestützte Methode eine Vorhersage und Bewertung der Prozess- und Schichteigenschaften für verschiedene Einstellungen der Beschichtungsparameter vorzunehmen.

Zur Durchführung der Bewegungsoperationen zum Beschichten kommt am LWT ein Sechsenachsen-Industrieroboter zum Einsatz. Für das konturnahe Beschichten komplexer Oberflächen spielen die Entwicklung effizienter, offline programmierter 3D-Bahnen und deren Umsetzung in geeignete Roboterbewegungen eine wichtige Rolle. Hierfür wurde im Rahmen des SFB 708 von einem interdisziplinären Team aus Informatikern, Mathematikern und Ingenieuren ein neuartiges 3D-Beschichtungskonzept erforscht. Die konturnahe Beschichtung von segmentierten Umformwerkzeugen am LWT, unter Einsatz feiner WC-12Co Pulver beim HVOF-Verfahren mittels eines Industrieroboters, zeigt **Abb 2**.

Schichtstruktur und Schichteigenschaften – Potentiale von feinstrukturierten und nanostrukturierten WC-12Co Beschichtungen

Abb. 3 zeigt licht- und rasterelektronenmikroskopische Querschliffe der konventionellen,

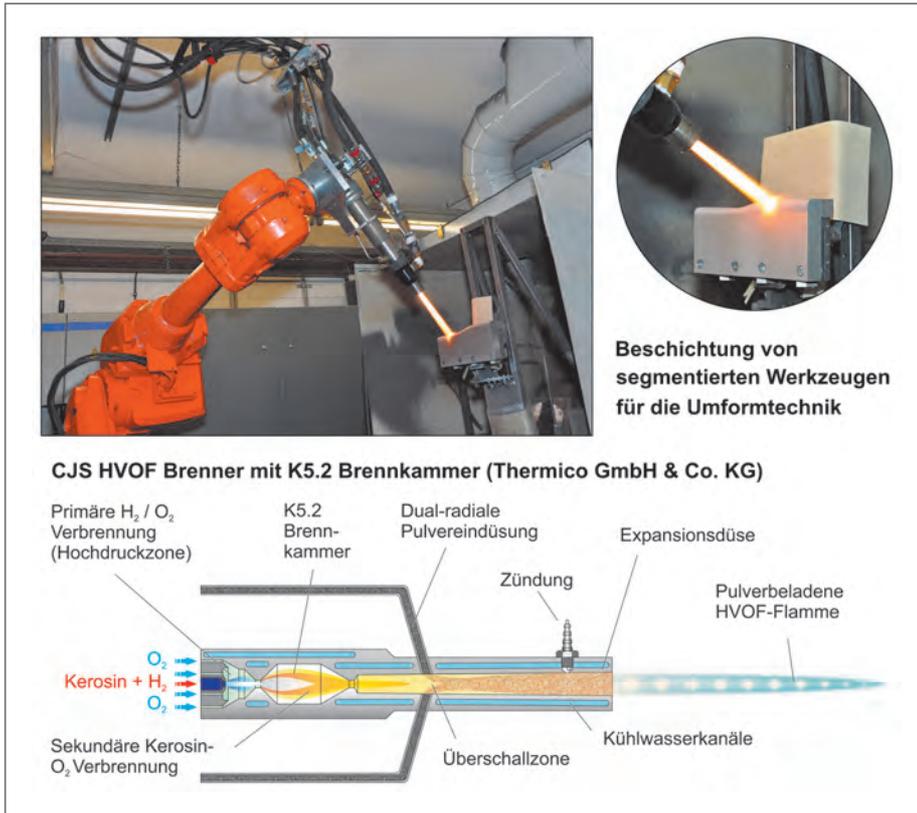


Abbildung 2: Hochgeschwindigkeitsflammspritzten von feinen WC-12Co Pulvern mittels des Thermico CJS HVOF Brenners mit K5.2 Brennkammertechnologie zur konturnahen Beschichtung von segmentierten Umformwerkzeugen für den Verschleißschutz am LWT im Rahmen des SFB 708.

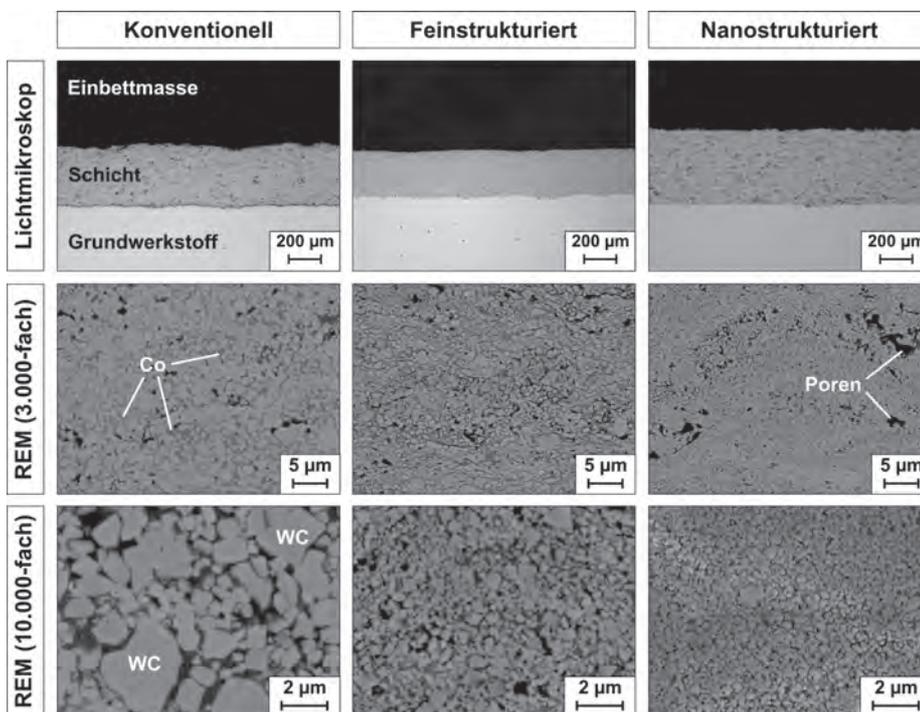


Abbildung 3: Lichtmikroskopische Querschliffaufnahmen der drei am LWT entwickelten und optimierten WC-12Co Verschleißschutzschichten sowie rasterelektronenmikroskopische Querschliffaufnahmen ihrer Gefügestrukturen.

fein- und nanostrukturierten Schichten, die jeweils mit ihren optimierten Spritzparametereinstellungen hergestellt wurden. Alle Schichten weisen ein Netzwerk charakteristischer Lamellenstrukturen auf. Die lichtmikroskopischen Bilder lassen erkennen, dass in allen drei Fällen eine homogene Schichtstruktur sowie eine gute Grenzflächenbindung der Beschichtungen an das Substratmaterial erzielt wird. Unterschiede ergeben sich jedoch hinsichtlich der Schichtdicke und der Porosität. Qualitativ kann ein ähnliches Porositätsniveau in den konventionellen und nanostrukturierten Beschichtungen festgestellt werden, während die feinstrukturierten Beschichtungen nahezu dicht erscheinen.

Anhand der rasterelektronenmikroskopischen Querschliffbilder sind Unterschiede in der Morphologie und der Größe der jeweiligen Karbid-Matrix-Strukturen deutlich erkennbar. Dies zeigt, dass die im Spritzprozess eingesetzten Ausgangspulver einen entscheidenden Einfluss auf die Schichtstruktur und deren Eigenschaften haben. Wie erwartet, zeigen die konventionellen Beschichtungen die größten Karbidphasen in der Mikrostruktur. Vergleichbar mit dem Ausgangspulver (durchschnittliche WC-Partikelgröße 2,5 μm) liegt ein Großteil der WC-Phasen im unteren Mikrometerbereich (1 - 3 μm). Der überwiegende Teil hat eine eckige, scharfkantige Struktur. Darüber hinaus können einige größere Karbidphasen von etwa 6 μm beobachtet werden, die in der Beschichtungsstruktur zufällig verteilt sind. Hinsichtlich der Karbidphasen weisen die feinstrukturierten Beschichtungen eine bimodale Größenstruktur auf. Insbesondere lassen sich viele feine WC-Phasen im Submikrometerbereich in der Größenordnung um 500 nm finden. Bereiche mit solchen feinen Karbidphasen sind häufig mit größeren Phasen (900 nm bis einige Mikrometer) durchsetzt. Darüber hinaus lassen sich auch größere WC-Phasen mit lateralen Abmessungen von etwa 6 μm beobachten. Ihre Existenz ist jedoch eher sporadisch. Die nanostrukturierten Beschichtungen bestehen aus einer Vielzahl sehr feiner WC-Phasen. Mit ihrer Größe zwischen 100 und 300 nm sind sie immer noch deutlich kleiner als die der feinstrukturierten Schichten. Die allgemein hohe Homogenität der feinverteilten Karbidphasen in der nanostrukturierten Beschichtung ist bemerkenswert. In Analogie zu den feinstrukturierten Beschichtungen können auch einige iso-

Pulver / Schicht	Auftragswirkungswirkungsgrad [%]	Mikrohärte [HV 0.3]	Bruchzähigkeit [MPa*(m)^0.5]	Porosität [%]	Rauheit Ra [µm]
Konventionell*	38 ± 0,18	1.090 ± 41	4,34 ± 1,35	3,57 ± 1,71	4,09 ± 0,12
Feinstrukturiert	35 ± 0,25 - 8 % ↓	1.340 ± 30 + 23 % ↑	2,44 ± 0,39 - 44 % ↓	1,03 ± 0,06 - 71 % ↑	1,75 ± 0,03 - 57 % ↑
Nanostrukturiert	47 ± 0,18 + 24 % ↑	1.202 ± 22 + 10 % ↑	4,5 ± 0,7 + 4 % =	3,34 ± 0,13 - 6 % =	4,68 ± 0,06 + 14 % ↓
C45		258 ± 4 - 76 % ↓			

↑ Verbesserung
= Keine Änderung
↓ Verschlechterung

*dient als Vergleichsgröße für die anderen Pulver / Schichten und C45

lierte Karbide mit größeren Abmessungen im oberen Submikrometerbereich (700 - 900 nm) identifiziert werden. Ihr Anteil ist jedoch gering. Karbide im Mikrometerbereich sind hier nur in sehr seltenen Fällen vorhanden.

In **Abb. 4** sind der Auftragswirkungsgrad der Beschichtung und die mechanischen Eigenschaften der konventionellen, fein- und nanostrukturierten Schichten, die jeweils mit ihren entsprechenden optimierten Beschichtungsparametern hergestellt wurden, zusammengefasst. Die Mikrohärte des unbehandelten C45 Grundwerkstoffs ist zum Vergleich angegeben. Die erzielten Ergebnisse für die konventionelle WC-12Co Schicht dienen als Referenzgrößen, die mit denen der anderen beiden Beschichtungen und denen des Grundwerkstoffs C45 verglichen werden. Die Prozentwerte unterhalb der mechanisch-morphologischen Eigenschaften der fein- und nanostrukturierten Schicht und des Grundwerkstoffs veranschaulichen die jeweiligen Verbesserungen oder Verschlechterungen im Vergleich zur konventionellen Schicht. Richtung und Farbe der Pfeile deuten auf eine Verbesserung (grün) oder Verschlechterung (rot) der Ergebnisse hin. Im Falle eines Gleichheitszeichens (gelb) ist die Änderung nur minimal und damit

vernachlässigbar. In der Mikrostruktur der konventionellen Beschichtungen lassen sich vor allem bei den größeren Karbiden Risse und Fragmentierungen beobachten. Es ist wahrscheinlich, dass dieser Effekt zustande kommt, wenn die stark beschleunigten WC-Partikel auf das Substrat bzw. die Beschichtungsoberfläche auftreffen. Da größere Karbide eine äquivalent größere Masse besitzen, führt die höhere kinetische Energie bzw. die entsprechend starke Impulsübertragung während des Aufpralls zu Rissbildungen oder sogar zum Bruch der Karbide.

Zu den wichtigsten Verbesserungen, die durch die nanostrukturierten Schichten erreicht werden, zählen eine Erhöhung des Auftragswirkungsgrads (um 23,7% höher) und der Mikrohärte (um 11,5 %) im Vergleich zu konventionellen Schichten, während die Bruchzähigkeit bei den Schichten nahezu beibehalten wird [9]. Die Zunahme des Auftragswirkungsgrades resultiert aus der höheren thermochemischen Reaktivität der nanostrukturierten Pulver, die während der Flugphase der Spritzpartikel durch die HVOF-Flamme zu höheren Oberflächentemperaturen führt [9]. Dadurch wird ein schnelleres und stärkeres Aufschmelzen der Randbereiche bei den

Abbildung 4: Zusammenfassung und Vergleich der erreichten Prozess- und Schichteigenschaften der drei optimierten WC-12Co Schichtsysteme sowie der Mikrohärte des Grundwerkstoffs.

Spritzpartikeln erzielt. Die höhere Mikrohärte lässt sich wiederum auf den Erhalt der Nanostrukturen im Schichtgefüge zurückführen, die von den sich unter Beanspruchung bildenden und ausbreitenden Rissen nicht oder nur mit größerem Aufwand durchlaufen werden können. Einen weiteren Aspekt stellen die bei der Verarbeitung nanostrukturierter Pulver (gegenüber den konventionellen) deutlich intensiveren Phasenreaktionen dar, die zu einer Erhöhung der Kohäsionsfestigkeit zwischen den einzelnen Phasen bzw. Splats (d. h. einzelne Lamellenteile der Schicht, die sich durch das sukzessive Auftreffen der einzelnen Spritzpartikel auf dem Grundwerkstoff/der Schicht in lentikularer Form ergeben) führen. Einen Nachteil der nanostrukturierten Pulver stellt jedoch die im Vergleich zu den feinen Pulvern verhältnismäßig große Agglomeratgröße dar. Trotz des schnelleren und stärkeren Aufschmelzens der Randbereiche und der höheren Oberflächentemperaturen erzielen die Agglomerate aufgrund ihrer Größe jedoch eine schlechtere Durchwärmung. Dadurch ist die Porosität in den Schichten mit 3,34 ± 0,13% verhält-

nismäßig hoch und liegt in der Größenordnung der konventionellen Schichten ($3,57 \pm 1,71 \%$). Im Umkehrschluss, d. h. durch ihre deutlich geringere Porosität, erreichen die feinstrukturierten Schichten eine noch höhere Mikrohärtigkeit als die nanostrukturierten und konventionellen Schichten (um 23 % höher) [9]. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Zunahme der Mikrohärtigkeit stärker durch die Verringerung der Agglomeratgröße, als durch die Reduzierung der einzelnen WC-Partikel im Ausgangspulver verursacht wird. Wenn die WC-Partikel im Nanobereich vorliegen, zeigen die Schichten gleichzeitig eine Verringerung der Bruchzähigkeit. Die Ausnahme bilden hier jedoch die feinstrukturierten Schichten. Sie verfügen über eine halb so große Bruchzähigkeit im Vergleich zu den konventionellen und nanostrukturierten Schichten. Gründe hierfür liegen in der erschwerten Einbringung der feinen Pulver in das Zentrum der HVOF-Flamme aufgrund ihrer geringeren Masse. Durch den Drift einiger Partikel in die äußeren und kühleren Randzonen der Flamme schmelzen diese schlechter auf, wodurch sich lokale Porensäume mit Nanoporen zwischen den Schichtlamellen ergeben, welche die Bruchzähigkeit des Gefüges insgesamt verringern.

Entscheidende Vorteile der feinstrukturierten Schichten gegenüber den anderen beiden Schichten sind der sehr geringe Porositätsgrad von $1,03 \pm 0,06 \%$ und die höhere Oberflächengüte (mit $R_a = 1,75 \pm 0,03 \mu\text{m}$ bzw. $R_z = 10,76 \pm 0,3 \mu\text{m}$) [9]. Infolge der stärkeren Beschleunigung der feinen Pulver in der HVOF-Flamme und der damit verbundenen kurzen Verweilzeit verringert sich jedoch der Auftragswirkungsgrad um ca. 8 % gegenüber der Verarbeitung von konventionellen Pulvern. Mit Bezug auf das konturnahe Beschichten werden die technologisch bedeutsamsten Verbesserungen somit durch das HVOF-Spritzen von feinen WC-12Co Ausgangspulvern erreicht.

Gleitverschleiß-, Wälzverschleiß und Reibverhalten der WC-12Co Schichten

Abb. 5 zeigt die Gleitverschleiß-, Reib- und Wälzverschleißkoeffizienten der drei WC-12Co Schichtsysteme, die mit verschiedenen Standard Testverfahren (Gleitverschleiß: Ball-on-Disc Tribometer mit Al_2O_3 Kugel; Wälzverschleiß: Taber Abraser Test mit einem grobkörnigen, keramisch gebundenen H10-Wälzkörper sowie mit einem feinkörnigen CS17-Wälzkörper mit Polymerbindung) ermittelt und

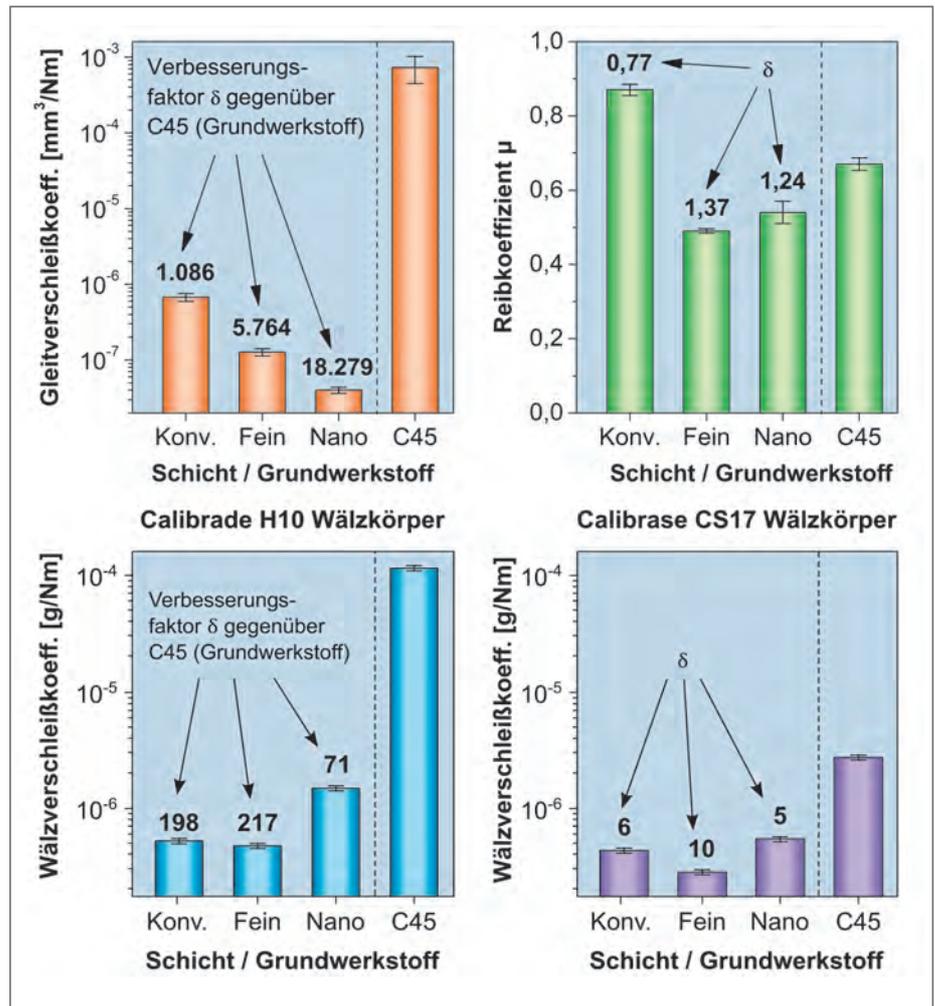


Abbildung 5: Signifikante Verbesserung des Gleit- und Wälzverschleißverhaltens sowie des Reibkoeffizienten der Werkzeugoberfläche durch konventionelle, feinstrukturierte und nanostrukturierte WC-12Co Beschichtungen gegenüber C45.

mit denjenigen des unbeschichteten und unbehandelten C45-Grundwerkstoffs verglichen wurden. Der in den Diagrammen dargestellte „Verbesserungsfaktor“ gibt an, um welches Vielfache sich das Verschleißverhalten der Schichten gegenüber dem Grundwerkstoff erhöht hat. Gleichzeitig können dadurch die Schichten untereinander verglichen werden. Wie anhand der Balkendiagramme zu erkennen ist, lässt sich durch den Auftrag einer thermisch gespritzten WC-12Co Schicht, ganz gleich mit welchem Ausgangspulver sie erzeugt wurde, generell eine deutliche Verbesserung des Reib- und Verschleißverhaltens der Oberfläche erzielen. Hinsichtlich der Beständigkeit gegenüber dem Gleit- und Wälzverschleiß liegt die beschichtete Oberfläche um mehrere Zehnerpotenzen über denjenigen des Grundwerkstoffs. Das thermische Spritzen von WC-12Co Pulvern mit verringerter

Agglomerat- und WC-Partikelgröße (d. h. feiner und nanostrukturierter Pulver) birgt dabei besondere Potentiale. Gegenüber den konventionellen besitzen die feinstrukturierten und nanostrukturierten Schichten nicht nur einen niedrigeren Reibungskoeffizienten, sondern zugleich auch eine höhere Beständigkeit gegenüber Gleit- und Wälzverschleiß. Die Beständigkeit gegen Gleitverschleiß ist im feinstrukturierten um 81 % und im nanostrukturierten sogar um 94 % höher als im konventionellen Schichtsystem. Hinsichtlich des Reibungskoeffizienten ermöglicht das feinstrukturierte Schichtsystem eine Reduktion um 44 % und das nanostrukturierte um 38 % gegenüber dem konventionellen Schichtsystem. Im Wälzverschleißtest erreichten die feinstrukturierten WC-12Co Beschichtungen eine um 9 % (H10-Wälzkörper) bzw. 36 % (CS17-Wälzkörper) höhere Wälzverschleißbe-

ständigkeit gegenüber der konventionellen Schicht. Die Beständigkeit der nanostrukturierten Beschichtung ist sogar um 179 % (H10-Wälzkörper) bzw. um 26 % (CS17-Wälzkörper) geringer als die der konventionellen Beschichtung [9, 23]. Die höhere Verschleißbeständigkeit der feinstrukturierten und nanostrukturierten gegenüber der konventionellen Schicht lässt sich einerseits auf die verbesserten mechanischen Eigenschaften (höhere Härte, geringere Porosität) und auf die höhere Kohäsionsfestigkeit der Lamellenstruktur der Schicht aufgrund von Phasenreaktionen zurückführen. Andererseits nehmen bei diesen Schichten aufgrund der besonderen Gefügestruktur die Laufwege für den Rissfortschritt bzw. die hierfür erforderlichen Energien zu, wodurch die Festigkeit der Schichten steigt.

Das Verschleißverhalten der Beschichtungen ist durch eine Vielzahl von mikroskopischen Effekten, die während der tribologischen Beanspruchung auftreten, gekennzeichnet. Je nach Art des Verschleißes dominieren dabei unterschiedliche tribologische Phänomene, wobei Form und Intensität wesentlich von der Art des Schichtsystems bzw. von den eingesetzten Ausgangspulvern abhängen. So werden verschleißbedingte Effekte wie Ausbrüche, Abrasion, Loch- und Furchenbildung oder Fragmentierungen von Karbiden bzw. von ganzen Schichtbereichen, Erosionen der Matrix, Rissbildung entlang von Porensäumen oder spröder Co(W,C)-Mischbereiche (wie z. B. η -Phasen) bei den feinstrukturierten und nanostrukturierten Schichten deutlich seltener beobachtet als bei konventionellen [9, 23]. Die aufgrund des größeren Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses und der geringeren Agglomeratgröße in bestimmten Grenzen zunehmenden Phasenreaktionen (vor allem bei den nanostrukturierten Schichten) der Pulver beim Durchgang durch die heiße HVOF-Flamme sowie die z. T. stark reduzierte Porosität in diesen Schichten (vornehmlich bei den feinstrukturierten Schichten) wirken sich besonders positiv auf die Festigkeitseigenschaften der Gefügestruktur und folglich auf die mechanisch-tribologischen Eigenschaften der Schichten aus.

Konturnahe Beschichtung komplexer Werkzeugoberflächen

Thermische Spritzverfahren werden überwiegend für die Beschichtung von geometrisch einfachen, d. h. ebenen und rotationssymmetrischen Bauteilen eingesetzt. Komplexe,

freigeformte (NURBS-)Oberflächen mit besonderen Winkeln und engen Radien stellen eine Herausforderung an den Beschichtungsprozess, vor allem an die Bahnplanung und die Prozessführung beim thermischen Spritzen, dar. Dies erfordert nicht nur die Generierung geeigneter 3D-Bahnen für das Robotersystem, sondern auch deren Umsetzung in effiziente Bewegungen. Hierbei muss zunächst sichergestellt werden, dass der über die Werkzeugoberfläche geführte Spritzbrenner alle zu beschichtenden Konturen geometrisch erreichen kann, um so eine vollständige Beschichtung zu realisieren. Des Weiteren muss der Einfluss der kinematischen und dynamischen Bewegungsparameter des Roboters nicht nur ausreichend verstanden, sondern die Parametereinstellungen insoweit optimiert werden, dass eine Beschichtung mit konstanter Dicke und gleichmäßigen Eigenschaften entlang der gesamten Werkzeuggeometrie ermöglicht wird. Hinsichtlich der Dynamik der Bewegungsvorgänge gilt es dabei, vor allem die Trägheit der kinematischen Kette bestehend aus dem Spritzbrenner und seinem mitgeführten Schlauchpaket sowie ein mögliches Aufschwingen dieser infolge starker Beschleunigungs-, Umorientierungs- und Verzögerungsvorgänge zu berücksichtigen. Bei der Prozessführung ist es ebenso notwendig, den Eintrag großer Wärmeenergien in die Bauteiloberfläche während der Beschichtung zu vermeiden. Dadurch lässt sich zum einen das Risiko eines thermischen Verzugs der Werkzeugkonturen und zum anderen die Bildung starker thermischer Spannungen, die im späteren Einsatz des Werkzeugs zu Abplatzungen der Schichten führen können, verringern. Daneben ist beim thermischen Spritzen hierfür oft der Einsatz geeigneter Kühlkonzepte, z. B. durch eine großflächige Druckluftkühlung des zu beschichtenden Werkzeugs oder durch ein mit dem Spritzbrenner bewegtes Front-Airjet-System, erforderlich. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten spielt außerdem die Reduzierung des beim thermischen Spritzen üblicherweise auftretenden Materialverlusts durch den sogenannten „Overspray“ (dieser bezeichnet all dasjenige Schichtmaterial, welches entweder nicht schichtbildend oder nicht im Sinne der Zweckbestimmung auf die gewünschte Oberfläche aufgetragen wird) bzw. die Vermeidung eines ungewollten Schichtmaterialauftrags an nicht dafür vorgesehenen Stellen des Umformwerkzeugs eine wichtige Rolle. Letzteres würde

eine zeit- und kostenintensive Entfernung des ungewollt aufgetragenen Schichtmaterials erforderlichen.

Bei der Prozessführung für das konturnahe thermische Spritzen spielt die Einhaltung der Soll-Bahngeometrie sowie der programmierten Bahnparametereinstellungen für das Bewegungssystem eine wichtige Rolle. Aufgrund von kinematischen und dynamischen Grenzen des Robotersystems kann es hier jedoch zu prozessbedingten Abweichungen kommen. Diese führen wiederum zu einer unerwünschten Variation in der Schichtdicke und damit in der Formgenauigkeit der Oberfläche sowie zu Veränderungen der mechanisch-tribologischen Schichteigenschaften. Derartige Abweichungen müssen daher bereits vor dem Beschichtungsprozess durch geeignete Strategien (wie z. B. einer adaptiven Anpassung der Bahnparametereinstellungen, der Glättung von Bewegungspfaden oder der Sicherstellung von Laufruhe) kompensiert werden.

Am LWT erfolgt die Generierung von Bewegungsbahnen mittels eines im Rahmen des SFB 708 von Ingenieuren, Informatikern und Mathematikern zusammen entwickelten Softwaresystems. Dieses Programm nutzt bei der Bahngenerierung verschiedene Ansätze (z. B. linear, trochoidal) und erlaubt zudem die gezielte Anpassung der Bahnform, des Verfahrwegs sowie der Bahngeschwindigkeit für das Robotersystem, wie in **Abb. 6** dargestellt. Durch die Kopplung der im SFB 708 entwickelten Software mit dem Programm „RobotStudio“ der Firma ABB Ltd lassen sich die Bahnen auf den Roboter übertragen. Die Robotersteuerung setzt diese Bahnen dann in Bewegungen um, die vor dem Beschichtungsprozess mit dem gleichnamigen Programm simuliert werden. Neben den bereits genannten Parametern lassen sich weitere, für das Beschichten notwendige Steuergrößen wie der Spritzwinkel, der Spritzabstand und der Bahnabstand festlegen. Zur Analyse und Optimierung der Prozessführung wurde im AiF Projekt „Optispray“ beim konturnahen Beschichten komplexer Werkzeuggeometrien der Einfluss des Verfahrwegs auf die Roboterkinematik, auf die daraus resultierenden Abweichungen anderer Bewegungsparameter und auf die Schichteigenschaften untersucht [24]. Um die gemessenen Ergebnisse zu interpretieren, erfolgt vor der Beschichtung eine Simulation der Bewegungen des Robo-

tersystems. Anschließend werden die Verfahrwege individuell angepasst, um optimierte Bewegungsparameter, insbesondere eine adaptive Verfahrgeschwindigkeit, zu realisie-

ren. Um die gewünschte Geschwindigkeit zu erreichen, stellt die Laufruhe des Robotersystems während der Beschichtung einen wichtigen Faktor dar [24].

Ein am LWT verfolgter Optimierungsansatz liegt darin, einen geglätteten Eingangspfad für die Roboterbahnen zu verwenden und die Pfadglätte während einer nachfolgenden Pfadoptimierung zu bewahren, wodurch die Abweichungen der Bewegungsparameter nachvollzogen werden können [24, 25]. Mit Hilfe einer kombinierten Simulation des Beschichtungs- und Materialauftrags einerseits sowie der Roboterkinematik (in späteren Phasen auch die Roboterdynamik) während der Beschichtung andererseits, kann die Effizienz der generierten 3D-Bahnen stetig überprüft und angepasst werden. Durch die Bahnoptimierung lässt sich der Verfahrweg und die Bahnform dahingehend verbessern, dass Schichtdickenvariationen auf dem Werkstück weitestgehend vermieden werden [24].

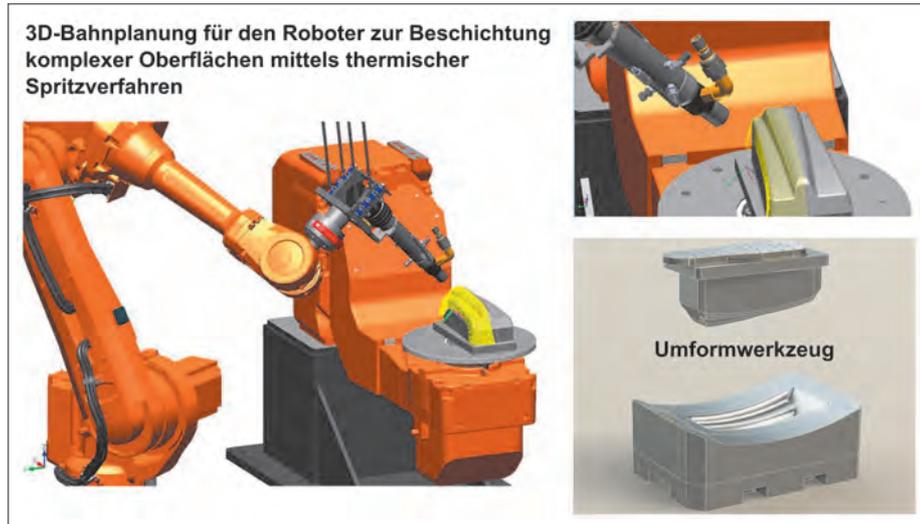


Abbildung 6: Offline Generierung von 3D-Bahnen sowie Roboterbewegungen für das konturnahe Beschichten komplexer Umformwerkzeuge im Rahmen des SFB 708.

Aufgrund der hervorragenden mechanisch-tribologischen und morphologischen Eigenschaften (zu denen insbesondere eine hohe Mikrohärtigkeit von $1.340 \pm 30 \text{ HV}_{0,3}$, eine sehr geringe Porosität von $1,03 \pm 0,06 \%$ und eine niedrige Rauheit von $R_a = 1,75 \pm 0,03 \mu\text{m}$ bzw. $R_z = 10,76 \pm 0,3 \mu\text{m}$ zählen) eignen sich vor allem die feinstrukturierten WC-12Co Schichten für die konturnahe Beschichtung von komplexen Oberflächen [9]. Ein weiterer Vorteil sind die für das thermische Spritzen feiner WC-12Co Pulver notwendigen, niederenergetischen HVOF-Flammparameter, um unerwünschte Überhitzungs- und Phasenreaktionen zu vermeiden. Dadurch lässt sich gleichzeitig der Wärmeenergieeintrag in die Werkzeugoberfläche während der Beschichtung reduzieren. **Abb. 7** zeigt das Ergebnis der robotergestützten konturnahen Beschichtung komplexer Umformwerkzeuge unter Einsatz feiner WC-12Co Pulver. Wie anhand der lichtmikroskopischen Querschliffbilder zu erkennen ist, konnten mit Hilfe der entwickelten und optimierten Bahnen und Roboterbewegungen nahezu konstante Schichtdicken auch an geometrisch anspruchsvollen Zonen realisiert werden.

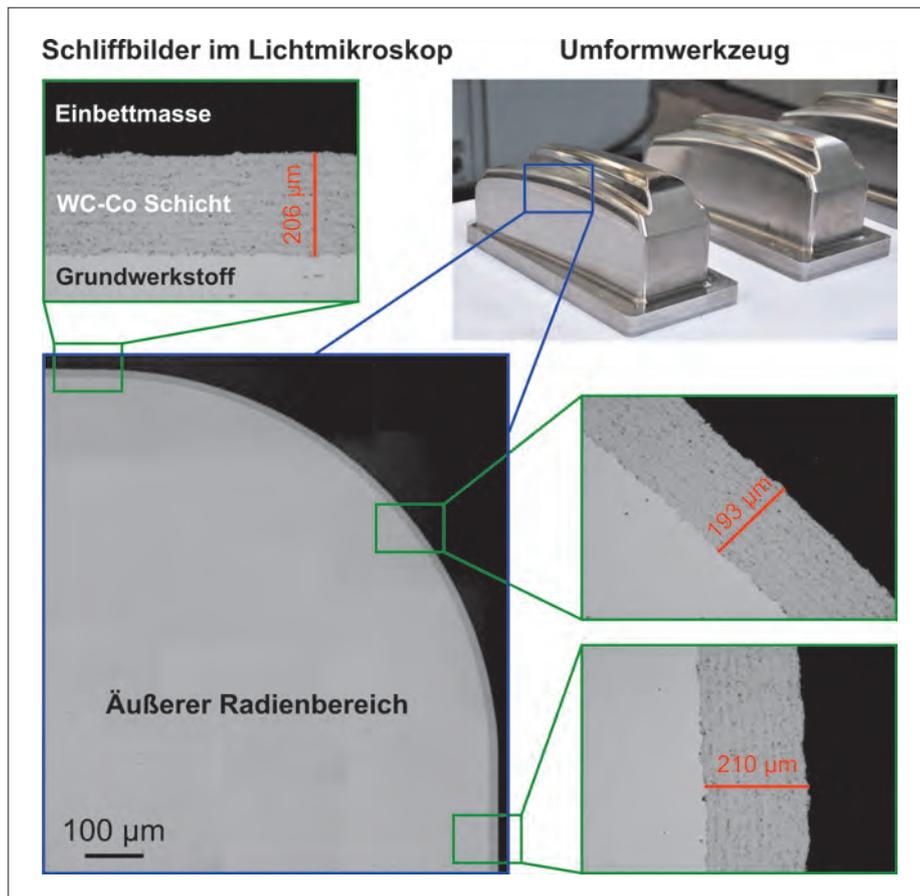


Abbildung 7: Applikation von konturnahen feinstrukturierten WC-12Co Verschleißschutzschichten auf komplexen Umformwerkzeugen mit nahezu konstanter Schichtdicke, -struktur und -eigenschaften am LWT.

Nachbearbeitung der Schichtoberfläche

Trotz der beim HVOF-Spritzen feiner WC-12Co Pulver erzielten niedrigen Rauheit der beschichteten Oberfläche von $R_a = 1,75 \pm 0,03 \mu\text{m}$ bzw. $R_z = 10,76 \pm 0,3 \mu\text{m}$ (die für thermische gespritzte Schichten vergleichsweise sehr gering ist) sowie nahezu konstanter Schichtdicken, machen die hohen Anforder-

rungen an die Oberflächengüte und die Formgenauigkeit in der Umformtechnik den Einsatz von Nachbearbeitungsverfahren notwendig. Diese werden zum Glätten der Oberfläche einerseits und zur Erzeugung des Endmaßes der Werkzeugkonturen andererseits eingesetzt. Aufgrund der hohen Schichthärte ist das Spektrum an möglichen Verfahren dabei jedoch stark eingeschränkt. In der thermischen Spritztechnik werden beschichtete Bauteile, die mit einer keramischen Schicht oder einer Hartstoffschicht zum Verschleißschutz beschichtet wurden und in der Regel eine ebene oder rotationssymmetrische Geometrie aufweisen, üblicherweise mit einfachen Band- oder Flachsleifanlagen nachbearbeitet. Bei komplexen Geometrien ist dies jedoch nicht möglich, wodurch es neuer Nachbearbeitungsstrategien bedarf. Im Rahmen des SFB 708 wurde daher das Schleifen mit keramisch-, metallisch- und polymergebundenen Schleifstiften aus kubischem Bohrnitrid (CBN) und Diamant sowie das inkrementelle Walzen mit einer Keramikugel zur Anpassung der Oberflächengüte und der Einstellung der finalen Werkzeugkonturen verwendet und qualifiziert [3]. Beide Prozesse wurden in konventionellen mehrachsigen CNC-Bearbeitungszentren durchgeführt und ermöglichten eine Erhöhung der Oberflächengüte auf $R_z = 7,8 \pm 0,4 \mu\text{m}$ (nach dem inkrementellen Walzen) und $R_z = 1,4 \pm 0,3 \mu\text{m}$ (nach dem Schleifen mit Schleifstiften) [3]. Während beim inkrementellen Walzen eine gewisse Einebnung der Rauheitsspitzen an der Schichtoberfläche stattfindet (aufgrund der hohen Schichthärte lässt sich die Rauheit jedoch nicht weiter reduzieren), können mit Hilfe der Schleifverfahren gleichzeitig auch Form- und Lagefehler der Beschichtung korrigiert werden.

Einsatz der beschichteten Werkzeuge in Tiefziehtests

Um die Verschleißbeständigkeit der beschichteten und auch nachbearbeiteten Umformwerkzeuge sowie die Abbildungsgenauigkeit bzw. die Qualität der erzeugten Blechformteile zu untersuchen und zugleich die Potentiale dieses Ansatzes aufzuzeigen, wurde das Einsatzverhalten in realen Umformtests untersucht. Bei diesen Umformtests wurden Napfbauteile aus 1 mm dickem hochfesten Stahlblech (HC380LA) tiefgezogen [3]. Tiefziehwerkzeuge bildeten Ziehringe aus unlegiertem C60-Stahl (1.0601), die mit HVOF gespritzten, feinstrukturierten

WC-12Co Beschichtungen versehen wurden. Die beschichteten Ziehringe wurden dann sowohl im wie-gespritzten (d. h. im nicht nachbehandelten), im geschliffenen, wie auch im inkrementell gewalzten Zustand beim Tiefziehen verwendet. Zum Vergleich kam ein unbeschichtetes Referenzwerkzeug aus einsatzgehärtetem X155CrVMo12 1 Kaltarbeitsstahl (1.2379) mit einer Härte von 58 HRC zum Einsatz. Dieser Werkstoff wird häufig für Umformwerkzeuge verwendet [3]. Der Einsatz der beschichteten, jedoch nicht nachbehandelten Umformwerkzeuge führte aufgrund der vergleichsweise hohen Rauheit bereits nach kurzer Zeit zu Beschädigungen der Blechteiloberflächen und zu einer starken Einschränkung des realisierbaren Ziehverhältnisses. Dies macht deutlich, dass auf eine Nachbearbeitung der beschichteten Werkzeugoberflächen für den Einsatz in der Umformtechnik grundsätzlich nicht verzichtet werden kann. Bei dem Referenzwerkzeug aus gehärtetem Kaltarbeitsstahl kam es bereits nach der Herstellung von 3.200 Näpfen zu einer massiven Verschleißbildung in Form von Oberflächenbeschädigungen und Kratzern. Die gleichzeitige inakzeptable Verschlechterung der Bauteilqualität sowie das Auftreten von Bauteilfehlern wie massiven Rissen im Napfbodenbereich führte zum Ausschluss des Werkzeugs [3]. Demgegenüber zeigten die Tiefziehversuche unter Einsatz der beschichteten und geschliffenen und gewalzten Werkzeuge auch nach der Fertigung von 10.000 Napfbauteilen keinen nennenswerten Verschleiß. Eine Verschlechterung der Bauteilqualität bzw. das Auftreten von Bauteilfehlern war ebenfalls nicht zu beobachten [3]. Dies zeigt, dass sich HVOF-gespritzte und nachbearbeitete feinstrukturierte WC-12Co Schichten in idealer Weise für den Verschleißschutz von komplexen Werkzeugen eignen, die für die Umformung hochfester Blechwerkstoffe eingesetzt werden.

Zusammenfassung

Das thermische Spritzen von feinen und nanostrukturierten WC-12Co Ausgangspulvern repräsentiert einen innovativen Ansatz in der thermischen Spritztechnik. Die unter Einsatz dieser Pulver hergestellten Schichten besitzen hervorragende mechanisch-tribologische und morphologische Eigenschaften, die denjenigen Schichten, welche mit konventionellen

Ausgangspulvern hergestellt wurden, weit überlegen sind. Feinstrukturierte Schichten besitzen dank ihrer geringen Oberflächengüte und der niedrigen Porosität im Gefüge das größte Potential für das konturnahe Beschichten von komplexen Umformwerkzeugen eingesetzt zu werden. Um dies allerdings zu ermöglichen, bedarf es einer geeigneten Prozessführung beim Beschichten (d. h. effiziente Bahnen und Bewegungen für das Robotersystem), um Schichten mit konstanten Eigenschaften dünn und gleichmäßig entlang der Bauteilgeometrie aufzutragen. Der Einsatz der beschichteten Werkzeuge in der Umformtechnik erfordert zuvor jedoch eine Nachbearbeitung der Schichtoberfläche durch Schleifen oder inkrementelles Walzen, da sich die Oberflächenrauheit sonst negativ auf die Fertigungsqualität der Bauteile auswirkt und zudem das Ziehverhältnis einschränkt.

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann, Dr.-Ing. Ingor Baumann, Christopher Schaak, Dr.-Ing. Peter Hollingsworth, Lukas Wojarski
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Technische Universität Dortmund

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten im Rahmen des SFB 708 sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. für die finanzielle Förderung im Rahmen des Projekts „Optispray“.

KONTAKT

Technische Universität Dortmund

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

Dr.-Ing. Ingor Baumann

Leonhard-Euler-Straße 2

D-44227 Dortmund

Tel.: +49 (0)231 755-5318

Fax: +49 (0)231 755-4079

ingor.baumann@tu-dortmund.de

www.lwt.mb.tu-dortmund.de/



Literatur

- [1] H. Hütte, E. Doege, and L. E. Elend. *Stand und Entwicklungstendenzen in der Blechumformung*. In: *Umformtechnik Erfurt Workshop Qualitätssteigerung und Produktionssteigerung beim Tiefziehen mit Hybrid-Antrieb*, 04.2000
- [2] F. Klocke. *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*. 2017.
- [3] W. Tillmann, P. Hollingsworth, I. Baumann, L. Hiegemann, C. Weddeling, A. E. Tekkaya, S. Rausch, and D. Biermann. *Thermally sprayed finestructured wc-12co coatings finished by ball burnishing and grinding as an innovative approach to protect forming tools against wear*. *Surface and Coatings Technology*, 268: 134-141, 2015.
- [4] A. Mackensen. *Presswerkorientierte Analyse der Umform- und Scher-schneideigenschaften von Mehrphasenstählen*. *Dissertation*, 2013.
- [5] J. W. Kolbe. *Thermisch beschichtete, faserverstärkte Polymerwerkzeuge für die Umformung höherfester Blechwerkstoffe*. *Dissertation*, 2012.
- [6] D. Lundin and K. Sarakinos. *An introduction to thin film processing using high-power impulse magnetron sputtering*. *Journal of Materials Research*, 27(5): 780-792, 2012.
- [7] W. Tillmann, P. Hollingsworth, I. Baumann, and D. Stangier. *Near-net-shape coatings manufactured by means of thermal spraying: Influence of path strategy and robot dynamics*. In: *SFB 708 - 6. Öffentliches Kolloquium*, Seiten 21-31, 2013.
- [8] *Thermal spraying - terminology, classification (iso 14917:2017); german version en iso 14917: 2017, August 2017*.
- [9] I. Baumann. *Hochverschleißfeste und konturnahe Werkzeugoberflächen durch Hochgeschwindigkeitsflammspritzverfahren*. *Dissertation*, 2012.
- [10] M. Büteführ. *Einfluss des Aluminiumgehaltes gespritzter Zinküberzüge auf den Korrosionsschutz von Stahl*. *Dissertation*, 2006.
- [11] S. Zimmermann. *Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen von Molybdän Charakterisierung des Spritzprozesses und der Schichteigenschaften*. *Dissertation*, 1996.
- [12] A. Forn, Josep A. P., and G. Matthäus. *Wear behaviour of hvof thermal sprayed wc-co and crc-nicr coatings*. *Materials Science Forum*, 426-432: 2623-2630, 2003.
- [13] A. Ghabchi, T. Varis, E. Turunen, T. Suhonen, X. Liu, and S.-P. Hannula. *Behavior of hvof wc-10co4cr coatings with different carbide size in fine and coarse particle abrasion*. *Journal of Thermal Spray Technology*, 19: 368-377, 2010.
- [14] K. Niemi, P. Vuoristo, T. Mäntylä, G. Barbezat, and A. R. Nicoll. *Abrasion wear resistance of carbide coatings deposited by plasma and high velocity combustion processes*. In: *International Thermal Spray Conference Exposition*, Seiten 685-689, 1992.
- [15] F. W. Bach, K. Möhwald, and T. Wenz. *Moderne Beschichtungsverfahren*. 2005.
- [16] B. H. Kear, R. K. Sadangi, M. Jain, R. Yao, Z. Kalman, G. Skandan, and W. E. Mayo. *Thermal sprayed nanostructured wc/co hardcoatings*. *Journal of Thermal Spray Technology*, 9: 399-406, 2000.
- [17] T. Wenz, F. Schreiber, A. Wank, T. Grund, and B. Wielage. *Endkonturnahe Spritzen von Hartmetallschichten*. *Neue Materialien und Verfahren in der Beschichtungstechnik*, 22: 201-206, 2005.
- [18] W. Tillmann, E. Vogli, and I. Baumann. *Roboterassistierte Beschichtung regelgeometrischer Oberflächen mittels feinststrukturierter wc-12co Verschleißschutzschichten*. In *SFB 708 - 3. Öffentliches Kolloquium*. 2009.
- [19] W. Tillmann, I. Baumann, P. Hollingsworth, and I. A. Laemmerhirt. *Influence of the spray angle on the properties of hvof sprayed wc-co coatings using (-10 + 2 µm) fine powders*. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22: 272-279, 2013.
- [20] W. Tillmann, P. Hollingsworth, I. Baumann, M. Tolan, M. Paulus, and F. Wieland. *Nanostructured wc-co coatings manufactured by fine powders (-10 + 2 µm) with ultra-fine carbides (400 nm) by means of hvof*. In *DVS (Herausgeber) Proceedings of the ITSC International Thermal Spray Conference*, 2011.
- [21] G. Matthaues, M. Kostecki, and O. Dau. *The fully automatic, computer controlled c-cjs (computerised carbide jet system) hvof system with 25 bar combustion-chamber pressure by thermico*. In: *5th Colloquium on HVOF Flame Spraying*, Seiten 16-17, 2000.
- [22] G. Matthaues and G. Stevens. *New hvof equipment and technology for the use of superfine powders - 10 microns and internal coating applications*. In: *Gemeinschaft thermisches Spritzen e. V. (Herausgeber) 6. Kolloquium Hochgeschwindigkeitsflammspritzen*, Seiten 167-176, 2003.
- [23] W. Tillmann, I. Baumann, P. Hollingsworth, and L. Hagen. *Sliding and rolling wear behavior of hvof-sprayed coatings derived from conventional, fine and nanostructured wc-12co powders*. *Journal of Thermal Spraying Technology*, 23: 262-280, 2014.
- [24] W. Tillmann, P. Hollingsworth, I. Baumann, H. Müller, T. Wiederkehr, D. Hegels, B. Kühlenkötter, and B. Johnen. *Adaption of the path strategy to produce near net shape coatings manufactured by hvof spraying*. In: *Proceedings of International Thermal Spray Conference & Exposition 2014, Barcelona/Spain*, 21.-23. Mai 2014.
- [25] D. Hegels and H. Müller. *A simulation based path optimization system for robot guided thermal spray*. In: *SFB 708 - 6. Öffentliches Kolloquium*, Seiten 127-136, 2013.

» CMC im Triebwerksbau – der Werkstoff macht den Unterschied «

Geringes Gewicht und hitzeresistent: Werkstoffe für zukünftige Triebwerksgenerationen sollten bis zu 20 Prozent leichtere Bauteile ermöglichen als herkömmliche Materialien und deutlich höhere Temperaturen aushalten.

Infrage kommen neben hochwertigen Metallen ganz neue Werkstoffklassen. Kandidaten sind Intermetalle aber auch faserverstärkte Verbundwerkstoffe, darunter keramische Verbundwerkstoffe – Ceramic Matrix Composites (CMC). „Keramische Verbundwerkstoffe haben für uns das größte Potenzial“, erklärt Dr. Jörg EBLinger. In ihnen sieht der Leiter Werkstofftechnik der MTU Aero Engines eine Schlüsseltechnologie für die Branche. „Sie kommen auf die besten Gewichts- und Temperaturwerte, stellen uns aber auch vor die größten Herausforderungen bezüglich werkstoffgerechten Designs und des Aufbaus einer stabilen Produktion zu akzeptablen Kosten.“ Besonders interessant ist ihre mechanisch-thermische Belastbarkeit auch deutlich oberhalb von 1.000 Grad Celsius in Kombination mit ihrem niedrigen Gewicht.

Die MTU untersucht keramische Verbundwerkstoffe als neue Materialien für Turbinenbauteile. Deutschlands führender Triebwerkshersteller ist auf Hochdruckverdichter, Niederdruckturbinen und Turbinenzwischengehäuse spezialisiert und hat sich hier technologisch an die Spitze gesetzt. Mit Partnern aus Forschung und Industrie treibt die MTU jetzt die Entwicklung von CMC für hoch belastete Turbinenbauteile im Heißgasbereich voran.

Das Triebwerk von morgen verlangt nach innovativen Ideen: Wachsende Mobilitätsansprüche, limitierte Rohstoffe und die sich verschärfende Umweltproblematik fordern neue Lösungen, die über bestehende Konzepte hinausgehen. Die Prognosen gehen von einem jährlichen Wachstum des weltweiten Passagierflugverkehrs von rund fünf Prozent aus. Um die Umweltbelastungen zu kompensieren und zu reduzieren, müssen Flugzeuge und Antriebe noch sparsamer, schadstoffärmer und leiser werden. Daran arbeitet die MTU seit Jahren. In enger Kooperation mit

bedeutenden Akteuren der Branche entwickelt sie neuartige Antriebssysteme und Technologien in allen Schub- und Leistungsklassen.

Mit dem Getriebefan-Triebwerk (GTF) Pure Power® PW1000G realisieren Pratt & Whitney und die MTU das Antriebskonzept der Zukunft und schaffen eine komplett neue Triebwerksfamilie. Die neue GTF-Technologie senkt Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen um je 16 Prozent und verringert den Lärmteppich um 75 Prozent. Weitere Einsparungen sind möglich: bis zu 40 Prozent weniger Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen.

Das Konzept ist nicht nur ein technologischer Quantensprung sondern auch auf dem Markt ein Erfolg. Es gibt fünf Anwendungen: Airbus bietet den GTF für die A320neo an; Bombardier stattet mit ihm exklusiv die neue C Series aus, Mitsubishi den MRJ und Embraer die neuen E-Jets der Familien E-170 und E-190. Auch Irkut will den Getriebefan für die MC-21. Derzeit haben weltweit über 80 Fluglinien über 8.000 Getriebefan-Antriebe bestellt.

Der Clou der neuen GTF-Antriebstechnologie ist ein Untersetzungsgetriebe zwischen dem Fan und der Niederdruckwelle mit Niederdruckverdichter und der antreibenden Niederdruckturbinen. Das erlaubt dem Fan mit seinem großen Durchmesser, langsamer zu drehen, während gleichzeitig Niederdruckverdichter und -turbinen erheblich schneller laufen. Dadurch lassen sich geringere Fan-Druckverhältnisse und damit höhere Nebenstromverhältnisse verwirklichen sowie alle Komponenten in ihrem jeweiligen Drehzahl-Optimum betreiben. „Das verhilft dem Getriebefan zu einem sehr hohen Gesamtwirkungsgrad, verringert Treibstoffverbrauch und Kohlenstoffdioxid ausstoß um je 16 Prozent und verkleinert den Lärmteppich um 75 Prozent“, erklärt Dr. Jörg Henne, Leiter Entwicklung und

Technologie bei der MTU. Weiterer Vorteil: Da weniger Verdichter- und Turbinenstufen benötigt werden, wird der Antrieb leichter; zudem sinken die Instandhaltungskosten.

Die MTU steuert zum GTF mit der schnelllaufenden Niederdruckturbinen eine Schlüsselkomponente bei. Diese Technologie beherrscht weltweit nur Deutschlands führender Triebwerkshersteller. Des Weiteren hat die MTU zusammen mit Pratt & Whitney einen neuen Hochdruckverdichter entwickelt. Die ersten vier Stufen stammen von der MTU, die letzten vier von Pratt & Whitney. Der komplette Kompressor entsteht in der innovativen Blisk-Bauweise. Blisks (Blade Integrated Disks) sind Hochtechnologie-Bauteile, bei denen Scheibe und Schaufeln aus einem Stück bestehen. Diese Konfiguration hat bedeutende Vorteile: höhere Festigkeit, geringeres Gewicht, bessere aerodynamische Eigenschaften durch höhere geometrische Genauigkeiten der Schaufeln, kein Verschleiß am Schaufelfuß bzw. in der Scheibennut sowie Entfall der Montagekosten. Die MTU hält am GTF je nach Version einen Programmanteil von bis zu 18 Prozent.

Eine besondere Rolle in der GTF-Triebwerksfamilie spielt das PW1100G-JM für die A320neo: Erstmals hat die MTU hier ihr neues additives Fertigungsverfahren, das selektive Laserschmelzen, angewendet. Zudem verantwortet sie die Endmontage eines Drittels dieser Antriebe. Die schnelllaufende Niederdruckturbinen des Getriebefans PW1100G-JM ist die erste Turbinen, die serienmäßig mit additiv gefertigten Boroskoppaugen ausgerüstet wird. Diese Bauteile sind Teil des Turbinengehäuses und werden benötigt, um die Beschaukelung von Zeit zu Zeit mit einem Boroskop zu überprüfen. Bisher wurden Boroskopaugen gegossen oder aus dem Vollen gefräst – jetzt entstehen sie additiv per selektivem Laserschmelzen.

Das zweite Novum: Zum Programmanteil der MTU gehört beim PW1100G-JM auch die Serienendmontage. Ein Drittel aller Triebwerke dieses Typs werden bei der MTU in München zusammengebaut.

In ihrer Technologieagenda Clean Air Engine (Claire) formuliert die MTU ihre Ziele sowie Umsetzungsmöglichkeiten für einen zivilen Antrieb, der die von der europäischen Luftfahrtindustrie und Forschung in der Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) definierten Umweltziele im Jahr 2050 erreicht: 40 Prozent weniger Kraftstoff, eine entsprechend niedrigere CO₂-Emission sowie 65 Prozent weniger Lärm. In drei Schritten will man die SRIA-Vorgaben erreichen.

15, 25, 40 Prozent weniger Kohlenstoffdioxid – das sind die Claire-Etappenziele. Im ersten Schritt wurde bis zum Jahr 2015 durch den Einsatz eines Getriebefans eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit der Kohlenstoffdioxid-Emissionen um je 15 Prozent sowie eine drastische

Verkleinerung des Lärmteppichs anvisiert. Erreicht werden tatsächlich höhere Werte: Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß sinken um je 16 Prozent; die Verkleinerung des Lärmteppichs liegt bei 75 Prozent. Für die nächste Etappe zeigen Konzeptstudien, dass auf Basis der Getriebefan-Triebwerkskonfiguration die erforderlichen weiteren Verbesserungen möglich sind. „So könnte bis zum Jahr 2030 das Fan-Druckverhältnis weiter reduziert und damit das Bypass-Verhältnis weiter erhöht werden – von derzeit 12:1 auf bis zu 20:1“, erläutert Dr. Stefan Weber, Leiter Technologie und Vorauslegung. Zudem kann der thermische Wirkungsgrad des Kerntriebwerks durch höhere Druck- und Temperaturverhältnisse weiter verbessert werden. Das Gesamtdruckverhältnis will man deutlich über den derzeit knapp erreichten Wert von 50:1 steigern und gleichzeitig die erforderliche Kühlluftmenge deutlich reduzieren.

Der dritte und letzte Claire-Schritt erfordert neuartige Antriebskonzepte, die jenseits der bekannten Gasturbinen liegen können. Weber: „Hierfür brauchen wir disruptive Ansätze für

das Triebwerk, vor allen Dingen aber auch bei der Flugzeuggestaltung.“ Die MTU erarbeitet gemeinsam mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen Studien für diese Phase, die ab 2050 beginnen soll. Es geht etwa um hocheffiziente Wärmekraftmaschinen mit extrem hohen Drücken oder die Einführung rekuperativer Elemente zur Verbesserung des thermodynamischen Kreisprozesses. Auch abgeschirmte Propellerantriebe oder am Flugzeug verteilte Fans sind denkbar. Hinzukommen technologische Lösungen wie alternative Kraftstoffe und auch Schritte hin zum turboelektrischen Fliegen. An allen Ideen arbeitet die MTU bereits.

KONTAKT

MTU Aero Engines

Martina Vollmuth

Pressesprecherin Technologie

Tel.: +49 (0)89 1489-5333

Martina.Vollmuth@mtu.de



LIFETIME EXCELLENCE

Eine neue Ära der zivilen Luftfahrt hebt ab: das Getriebefan-Triebwerk ist leiser, ökologischer und effizienter. Das Geheimnis? Die einzigartige schnelllaufende Niederdruckturbine der MTU Aero Engines. Innovative Technologien, höchste Qualität bei Entwicklung, Serienproduktion und Aftermarket-Services machen die MTU zu einem starken Partner der Luftfahrtindustrie.

eMove360° 2018

3. Internationale Fachmesse für die Mobilität 4.0
elektrisch - vernetzt - autonom

16. - 18. Oktober 2018, Messe München



www.emove360.com

» eMove360° Europe 2018 zeigt die Mobilität 4.0 – elektrisch – vernetzt – autonom «

Die Mobilität der Zukunft ist elektrisch, vernetzt und autonom – es geht dabei nicht nur um die Fahrzeugtechnologie, sondern um die große Frage, wie wir uns künftig fortbewegen. Die internationale Fachmesse eMove360° zeigt vom 16.-18. Oktober in München die besten Lösungen für die New Mobility, auch in Sachen Materialien und Leichtbau.

Die Elektromobilität ist ein wichtiger Teil der Mobilität der Zukunft. Darüberhinaus wird das Auto in einigen Jahren eines der wichtigsten vernetzten Geräte sein. Diese Entwicklung beeinflusst maßgeblich den Fahrzeugbau genauso wie das Interieur-Design und den Straßen- und Städtebau oder die Anforderungen an die Kommunikations- und IT-Infrastruktur. Denn Vernetzung bedeutet nicht nur, dass Autos mit dem Fahrer oder untereinander kommunizieren, sondern Daten und Informationen mit der gesamten – physischen und digitalen – Umgebung austauschen.

Elektromobilität bildet jedoch die Basis der neuen Stufe ‚Mobilität 4.0‘. Natürlich bedarf es insbesondere bei den Themen Batterie und Laden noch einiger Entwicklungen für den vollumfänglichen Übergang vom Verbrenner zur Elektromobilität, aber am Ende wird sie fossile Fahrzeuge ablösen. Insofern sind Batterietechnologie und Antriebskonzepte sowie die Ladeinfrastruktur entscheidende und zentrale Themen der eMove360° Europe 2018. Doch die New Mobility bringt einen grundlegenden Wandel des gesamten – insbesondere urbanen – Zusammenlebens mit sich. Fahrzeuge werden beispielsweise durch Car- oder Ride-Sharing austauschbare Fortbewegungsmittel. Zum anderen entwickeln sie sich, durch die zunehmende Automatisierung hin zum Autonomous Driving, neben Wohnung und Arbeitsplatz zum „Dritten Ort“. Deswegen muss das Auto insgesamt wohnlicher werden, in dem wir nicht mehr nur zweckmäßig angeordnete Instrumente und Bedienelemente vorfinden müssen, sondern eine insgesamt einla-



dende Umgebung, in der wir uns gerne aufhalten. Leichtbaukonzepte und damit höhere Reichweiten aufgrund der Gewichtseinsparung erhalten ebenso eine zentrale Bedeutung wie der 3D-Druck für die Individualisierung der Fahrzeuge.

Darüberhinaus versteht sich eMove360° als neue, übergreifende Community-Plattform mit der Messe als Höhepunkt des Jahres: Ziel ist es dabei, umfassend den Austausch zwischen Angebot und Nachfrage zu ermöglichen, einerseits über das Newsportal www.emove360.com, auf dem sich die Branche das ganze Jahr über austauscht. Dazu kommen der Netzwerk-Club

e-Monday, auf dem man sich einmal im Monat persönlich trifft und die englischsprachigen eMove360° Conferences, die parallel zur Messe vom 16.-18. Oktober 2018 durchgeführt werden. Ein weiterer Baustein sind zwei Awards: Der eMove360° Award für Elektromobilität & Autonomes Fahren wird dieses Jahr zum zweiten Mal stattfinden, der MATERIALICA Design + Technology Award, der einzige seiner Art an der Schnittstelle von Materialien und Design, geht sogar in seine 16. Auflage. Zudem bieten sich der Branche auf Seiten und Gruppen in Twitter, LinkedIn, Facebook, XING und YouTube neue Austauschmöglichkeiten.

» Erweiterte Funktionalitäten durch hybride Werkstoffe mit Kunststoffen «

Die Kombination von Kunststoffen mit weiteren Werkstoffen eröffnet neue Potentiale in Verarbeitung und Anwendung. Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg konzentriert in einem Forschungsschwerpunkt Themenfelder, die dieses Potential hybrider Systeme aufgreifen.

Hybride Systeme beschreiben die Kombination mehrerer Werkstoffe in einem Bauteil oder einem Verbundwerkstoff. Grundlegendes Ziel dieser hybriden Systeme ist die Kombination der Eigenschaften der eingesetzten Materialien, um so maßgeschneiderte Werkstoffeigenschaften oder eine Funktionsintegration innerhalb eines Bauteils zu generieren.

Insbesondere die Kombination von Kunststoffen mit weiteren Werkstoffklassen, allem voran Keramiken und Metallen gewinnen aktuell zunehmend an Bedeutung in industriellen Anwendungen. Die wesentlich geringeren Verarbeitungstemperaturen der Kunststoffe begünstigen hierbei hybride Systeme, da eine Verarbeitung mit kunststofftechnischen Verfahren meist ohne thermische Schädigung der zweiten Komponente möglich ist.

Zwei grundsätzliche Verfahrensprinzipien werden angewendet, um Kunststoffe mit einem zweiten Werkstoff zu kombinieren. Zum einen besteht die Möglichkeit z.B. der Compoundierung zu einem Verbundwerkstoff, d.h. der Vermengung der Kunststoffe mit einem Füllstoff. Ziel ist meist ein makroskopisch quasi homogener Werkstoff. Die Eigenschaften dieses Werkstoffs sind durch die Charakteristika von Kunststoff und Füllstoff, dem Füllstoffgehalt, dessen Größenverteilung und -anbindung sowie der Verteilung und Orientierung des Füllstoffs definiert. Häufig werden insbesondere Fasern zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften eingesetzt. Zudem finden bereits Füllstoffe Anwendung, mit denen die thermischen, magnetischen oder elektrischen Eigenschaften von Kunststoffcompounds definiert eingestellt werden können.

Das zweite grundsätzliche Werkstoffprinzip hybrider Systeme mit Kunststoffen findet sich in der Kombination von Kunststoffen mit einem zweiten Werkstoff, der räumlich getrennt vorliegt und so einen Werkstoffverbund bildet. Metalle stellen hierbei den bedeutendsten Verbundpartner dar, wobei auch Kombinationen unterschiedlicher polymerer Systeme zum Einsatz kommen. Ziel dieses Ansatzes ist die Erzeugung lokal optimierter Eigenschaften. Insbesondere definierte Verbundeigenschaften, meist Haftung zwischen den Werkstoffen stellt hierbei ein entscheidendes Qualitätskriterium dar und ist Gegenstand aktueller Forschung. Anwendungsbereiche finden sich in der Automobilindustrie, z.B. bei Frontends, oder auch in der Folientechnik.

Bei beiden oben beschriebenen Prinzipien stehen heute definierte Grenzflächen der Werkstoffe im Vordergrund, aber auch gradierte Übergänge gewinnen teils an Bedeutung.

Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg (FAU) beschäftigt sich mit einer Vielzahl der oben genannten Möglichkeiten zur Modifikation von Kunststoffen durch Compoundierung als auch mit Lösungen um verschiedene Werkstoffe effizient miteinander zu verbinden. Aktuelle Aktivitäten des LKT in diesem Themengebiet sind im Folgenden beschrieben.

Funktionalisierung von Kunststoffen

Die Nutzung von Hybridbauteilen in der Kunststofftechnik beinhaltet die Funktionalisierung von Kunststoffen, z.B. über die Einbettung von hartmagnetisch, wärme- oder elektrisch leitenden Füllstoffpartikeln. Somit lässt sich

das Eigenschaftsspektrum, z.B. in der Sensorik und Aktorik durch den Einsatz sogenannter kunststoffgebundener Dauermagnete deutlich erweitern. Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik befasst sich bereits seit vielen Jahren mit der Funktionalisierung von Kunststoffen und den damit verbundenen Fragestellungen in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Zwei der hierbei verfolgten Themenschwerpunkte, kunststoffgebundene Dauermagnete sowie leitfähige Kunststoffe werden im Folgenden thematisiert.

Kunststoffgebundene Dauermagnete

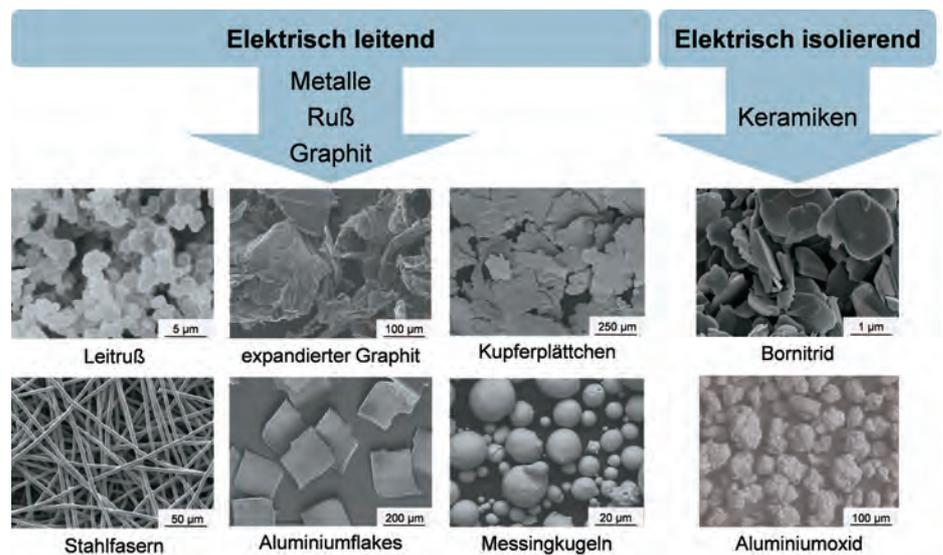
Durch Einbettung hartmagnetischer Füllstoffpartikel in eine Kunststoffmatrix kann eine magnetische Funktionalisierung von Kunststoffen erfolgen. Anwendungsgebiete solcher kunststoffgebundenen Dauermagnete liegen



Abbildung 1: Polorientiert spritzgegossene Magnetringe mit unterschiedlichen Polteilungen für die Anwendung als Signalgeber in der Sensorik.

vor allem in der Sensorik und Aktorik, wobei die Komponenten häufig als multipolare Signalgeber, bzw. Rotor eingesetzt werden. Diese Magnete können über kunststofftechnische Urformverfahren, wie z. B. dem Spritzgießprozess effizient hergestellt werden. Vorteile gegenüber konventionell gesinterten Magneten liegen vor allem in der hohen Geometriefreiheit sowie Gestaltungsmöglichkeiten der Magnetisierungsstrukturen und den engen Toleranzen, so dass keine Nachbearbeitungsschritte notwendig sind. Durch die Prozessintegration von Einlegeteilen, wie z. B. Wellen oder Buchsen, beim Umspritzen sowie einer vollständigen Magnetisierung im Prozess können zusätzliche Montage- und Nachmagnetisierungsschritte reduziert werden. Eine reine Substitution konventionell hergestellter Sintermagnete durch kunststoffgebundene Dauermagnete ist aufgrund der grundsätzlich geringeren magnetischen Charakteristika durch den prozessbedingt limitierten Füllstoffgehalt von bis zu 65 Vol.-% im Spritzguss nicht sinnvoll. Vorteile ergeben sich insbesondere bei einer Gesamtanpassung des Systems unter Beachtung des Werkstoffs und des Herstellungsverfahrens.

Als Füllstoff werden in der Regel hartmagnetische Füllstoffe, wie z. B. Strontiumferrit oder Neodym-Eisen-Bor eingesetzt. Zur Nutzung des vollständigen Werkstoffpotentials werden anisotrope Typen verwendet, die innerhalb des Herstellungsprozesses, z. B. über in das Werkzeug integrierte Spulen oder Dauermagnete, ausgerichtet werden müssen. Zur Erzeugung eines homogenen Richtfelds in der Kavität ist eine magnetische Auslegung des Spritzgießwerkzeugs unter Beachtung des Einsatzes von Stählen mit definierten magnetischen Eigenschaften notwendig. Neben diesem Magnetrichtfeld ist vor allem die Füllstoffart, der Füllstoffanteil sowie der Orientierungsgrad der Partikel für die finalen Bauteileigenschaften maßgeblich, wobei diese in komplexen Wechselwirkungen mit den Prozessparametern und der Bauteilgeometrie zusammenhängen. Auch die Polbreite multipolarer Magnetisierungsstrukturen, wie sie z. B. bei Signalgebern zur Messung von Winkel, Position oder Geschwindigkeit zum Einsatz kommen, vgl. **Abb. 1**, haben durch eine inhärente Änderung des Richtfelds in der Kavität maßgebliche Einflüsse auf die finalen Bauteileigenschaften. Im Einsatz benötigen solche Signalgeber eine hohe Präzision und Wieder-



holbarkeit der magnetischen Charakteristika, wie z. B. der Peakflussdichte, der Polteilungsgenauigkeit oder dem Winkel im Nulldurchgang. Mögliche Einflussfaktoren auf die wichtigsten Qualitätskriterien entlang der gesamten Prozesskette von Compoundzusammensetzung, Magnetisierungsstruktur, Angussgeometrie sowie Prozessbedingungen werden am Lehrstuhl für Kunststofftechnik untersucht und mit den sich lokal einstellenden Füllstofforientierung korreliert.

Leitfähige Kunststoffe

Ein großes Portfolio an verschiedensten Füllstoffen steht bei der Erzeugung leitender Eigenschaften in Kunststoffen zur Verfügung, was die Wärmeleitung wie auch die Leitung elektrischer Ströme beinhaltet. Keramiken wie Bornitrid oder Aluminiumoxid eignen sich dabei, wenn mit der Wärmeleitfähigkeit elektrische Isolation einhergehen soll. Dies geht allerdings zu Lasten der erreichten Wärmeleitfähigkeit im Compound. Abhilfe schaffen metallische Füllstoffe und Kohlenstoffderivate. Neben einer Steigerung der Wärmeleitfähigkeit kann durch die Zugabe derartiger Füllstoffe auch eine elektrische Leitfähigkeit erreicht werden, vgl. **Abb. 2**. Elektrisch leitende Füllstoffe, wie Metalle oder Graphit, weisen höhere intrinsische Wärmeleitfähigkeiten als Keramiken auf und führen damit zu höheren Wärmeleitfähigkeiten im Compound. Zudem bewegen sie sich auf einem signifikant geringeren Preisniveau und sind in der Verarbeitung weniger abrasiv. Eingesetzt werden sie bislang in der Antielektrostatik, der elektromagnetischen Abschirmung oder für Leit-

Abbildung 2: Füllstoffe für die elektrische und wärmeleitfähige Funktionalisierung.

kleber als Alternative zum Lötten elektronischer Bauelemente.

Maßgeblich beeinflusst wird die Wärmeleitfähigkeit im gefüllten Kunststoffbauteil durch Basispolymer, Füllstofftyp, -gehalt und -geometrie. Anisometrische Füllstoffe wie Fasern oder Plättchen werden durch Verarbeitungsprozesse, wie beispielsweise das Spritzgießen, orientiert. Dies bedingt unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten in den verschiedenen Raumrichtungen, wobei die Werte in Fließrichtung signifikant höher liegen als diejenigen in Bauteildickenrichtung. Mit hexagonalem Bornitrid werden so in Fließrichtung bis zu 7 W/mK, mit elektrisch leitenden Graphit bis zu 20 W/mK erreicht.

Das Potential leitender Kunststoffe lässt sich dabei keineswegs durch die bloße Substitution metallischer Bauteile ausschöpfen, sondern erfordert eine ganzheitliche Anpassung des Systems. Konkret bedeutet dies im Fall der Entwärmung die Kombination von Schaltungsträger und Kühlkörper in einem Bauteil. Dadurch entfallen unnötige Wärmeübergänge zwischen Leiterplatte, Leitkleber und metallischem Kühlkörper. Die hohen Wärmeleitfähigkeiten metallischer Kühlkörper und das damit verbundene „Over Engineering“ werden durch ein intelligentes Baugruppenkonzept hinfällig. Zudem lässt sich die Kühlkörperfunktion zielgenau an „Hot-Spots“ verwirkli-

chen. Damit einhergehend entfallen auch die zusätzlichen Prozessschritte der Kühlkörperkonfektionierung und -montage. Des Weiteren zeichnen sich die Kunststoffbaugruppen durch ein geringeres Gesamtgewicht und Korrosionsbeständigkeit aus, Vorteile die v. a. im Automotive- und Outdoor-Bereich zum Tragen kommen. Darüber hinaus lassen sich Zentrierungen und Verbindungselemente im großserientauglichen Spritzgießverfahren genauso einbringen wie metallische Inserts verschiedener Art. Auch für einen Einsatz in Gehäusematerialien besteht ein enormes Anwendungspotential, zumal hier oft keine elektrische Isolation gefordert ist. Teilweise ist zur elektromagnetischen Abschirmung eine elektrische Leitfähigkeit sogar gewünscht.

Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik beschäftigt sich vorwiegend mit der Entwicklung neuartiger Hochleistungs-Compounds und deren Verarbeitbarkeit. Im Fokus stehen besonders die Formfüllung dünnwandiger Teile der hochgefüllten Kunststoffe sowie die Vorhersage der erreichbaren Eigenschaften. Unter anderem das anisotrope Werkstoffverhalten aufgrund der Orientierungen während der Verarbeitung sind hier zu beachten.

Faserverbundwerkstoffe

Die Kombination von Fasern mit einer polymeren Matrix wird bereits vielfach für strukturelle Anwendungen eingesetzt. Insbesondere die hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht stellt hierbei das maßgebliche Potential dar. Unter anderem in der Automobilindustrie, aber auch der Luftfahrt steigt die Bedeutung dieser Werkstoffklasse daher stetig. Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik beschäftigt sich mit unterschiedlichen Aspekten von Faserverbundwerkstoffen. Dies umfasst sowohl die Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die Verarbeitungssimulation als auch die Entwicklung innovativer Lösungen zur Verkürzung von Prozessketten.

Effektive Rückkopplung von Simulation und Materialprüfung

Bei der Verwendung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Halbzeugen, sogenannten Organoblechen, handelt es sich um ein in der industriellen Umsetzung noch junges Feld der Kunststofftechnik. Verschiedene Serienanwendungen illustrieren dennoch bereits das hohe Potential dieser Werkstoffe. Die hohe Komplexität dieser Kombination aus

anisotropen Geweben und viskoelastischer-viskoplastischer Matrix ist nach wie vor eine Herausforderung in Hinblick auf ganzheitliches Materialverständnis, Modellierung und Simulation.

Einen ersten Schritt in Richtung eines verbesserten Modellverständnisses des Werkstoffes geht das vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie geförderte Projekt „THiNK Organo“ im Rahmen des Programms „Neue Werkstoffe“. In enger Zusammenarbeit mit der Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. Kommanditgesellschaft werden hier explizit die Schnittstellen von Material und Simulation untersucht. Besonderer Fokus wird am Lehrstuhl für Kunststofftechnik dabei auf die Entwicklung einer standardisierten und alle relevanten Randeinflüsse berücksichtigenden Prüfsystematik gelegt. Eine Simulation kann nur dann aussagekräftige Ergebnisse liefern, wenn die Materialmodelle und Materialkennwerte ebenso hochwertig sind. Im vorliegenden Fall der Organobleche steht hierfür noch keine zufriedenstellende Informationsbasis zur Verfügung, da noch keine Standards oder Normen für die relevanten Beanspruchungsarten, wie etwa inter- und intralaminare Scherung und Reibung oberhalb der Schmelztemperatur der Matrix existieren. Die verbreiteten Prüfverfahren, wie etwa der Scherrahmenversuch, mit dem nach aktuellem Stand der Wissenschaft oft gearbeitet wird, reagieren dabei beispielsweise so empfindlich auf Veränderungen der Randbedingungen, dass ein nicht aufgeschmolzener Bereich des Prüfkörpers nahe der Einspannungen von wenigen Millimetern um einen Faktor von zehn höhere Scherkräfte zur Folge haben kann, **Abb. 3**;



Abbildung 3: Unaufgeschmolzener Bereich von 2,2 mm Breite nahe der Einspannung bei einem Scherrahmen, hier gezeigt für ein PP-GF Organoblech nach Prüfung bei 220 °C.

ein Sachverhalt, der kaum Beachtung findet und in entsprechenden Untersuchungen oft gänzlich außer Acht gelassen wird. Die Folge ist, dass in der Simulation oftmals mit auf Erfahrungswerten basierenden Modellen gearbeitet wird und Materialdaten, wenn überhaupt, nur bedingt einfließen. Eine Kalibrierung der Simulationen findet stattdessen anhand von gefertigten Bauteilen statt. Die Modellparameter der Simulation werden hierbei so lange variiert, bis das Simulationsergebnis mit dem Bauteil übereinstimmt.

Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik arbeitet an Möglichkeiten der direkten Rückkopplung zwischen Simulation, Materialprüfung und Modellierung, um so Einflüsse von Abweichungen in der Materialcharakterisierung auf das Simulationsergebnis direkt bewertet zu können, sodass ein spezifisches Anforderungsprofil erstellt werden kann. Gleichzeitig können so zusätzliche Faktoren identifiziert werden, die in der Simulation berücksichtigt werden müssen. Daraus können in einem nächsten Schritt effektive, reproduzierbare Prüfmethodiken entwickelt werden, die eine simulationsgerechte Materialmodellierung erlauben. Damit soll der wichtige Entwicklungsschritt der simulationsgestützten Bauteilauslegung in gleicher Weise ermöglicht werden, wie dies etwa im Spritzguss bereits der Fall ist. Eine vorgelagerte Materialanalyse kann das Materialverhalten aussagekräftig modellieren und repräsentieren, sodass Werkstoffsubstitutionen kosteneffizient betrachtet und Herausforderungen wie Faltenbildung bereits in der Werkzeug- und Prozessentwicklung berücksichtigt werden können.

Energieeffizientes Verfahren zur Direktimprägnierung von thermoplastischen Faserverbundbauteilen

Die herkömmlichen Herstellungsverfahren von thermoplastischen Faserverbundbauteilen beruhen derzeit noch auf mehrstufigen Prozessen. Zuerst werden die Fasergelege/-Gewebe zu Halbzeugen vorkonsolidiert (im Fall von endlosfaserverstärkten Thermoplasten sogenannte Organobleche) und anschließend wird die Formgebung und eventuelle Funktionalisierungen im Spritzgießprozess erzeugt. Dieser mehrstufige Prozess ist aufgrund seines mehrmaligen Aufheizens und Abkühlens sehr energieintensiv und bietet sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht weiteres Optimierungspotential.

Genau diesen Herausforderungen stellt sich das In-Mould-Impregnation-Verfahren (IMI), das im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts „TC-Fast“ (Förderkennzeichen: 03ET1404A-I) untersucht wird. Das Projekt-konsortium besteht aus der Audi AG, Christian Karl Siebenwurst GmbH & Co. KG, Gubesch Thermoforming GmbH, Neue Materialien Fürth GmbH, Plastic Omnium Auto Components GmbH, SAERTEX GmbH & Co. KG, SimpaTec Simulation & Technology Consulting, Weilburger Coatings GmbH und dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik. In diesem Sonderverfahren des Spritzgießens ist es gelungen, die Imprägnierung in einen einstufigen Prozess in das Spritzgießwerkzeug zu verlagern. Kerninnovation ist dabei die elektrische Erwärmung der Kohlenstofffasern, welche als Widerstandsheizung genutzt werden und somit die Prozesstemperatur erzeugt, welche für die Direktimprägnierung benötigt wird. Diese Art der Erwärmung ist lokal optimiert möglich und somit sehr energieeffizient.

In der Prozesskette wird im ersten Schritt ein trockenes Kohlenstofffasergelege mittels eines Handlingssystems dem Spritzgießwerkzeug zugeführt. Anschließend fährt das Spritzgießwerkzeug auf Prägehubposition und führt damit die Drapierung sowie die elektrische Kontaktierung des Geleges aus. Aus prozesstechnischer Sicht vorteilhaft ist hier die zeitlich unbegrenzte Möglichkeit, die trockenen Fasern zu drapieren. Die Kohlenstofffasern heizen bis zur Prozesstemperatur auf und der Thermoplast wird nahezu drucklos injiziert. Der Thermoplast verteilt sich erst lateral und wird mittels anschließendem Prägehub in Dickenrichtung des Bauteils imprägniert und konsolidiert. Zudem kann direkt eine Funktionalisierung des Bauteils, z.B. durch Anspritzen einer Verrippung realisiert werden. Nach der Abkühlphase wird das Bauteil entformt und kann danach weiteren Prozessschritten zugeführt werden.

Mit diesem Prozess lassen sich Zykluszeiten von unter einer Minute (abhängig von der Bauteilgröße) realisieren und es wird aktuell eine Energieeinsparung von über 70 % gegenüber herkömmlichen Verfahren im ganzen Life Cycle Assessment erwartet. Ein ebenfalls positiver Effekt ist die Reduzierung der thermischen Belastung des thermoplastischen Werkstoffs durch das einmalige Aufschmelzen und kurze Verarbeitungszeiten.



Abbildung 4: Wanneprobekörper, hergestellt im IMI-Verfahren.

Versuche haben gezeigt, dass sich das IMI-Verfahren für eine direkte Imprägnierung der trockenen Kohlenstofffasern mit einem Thermoplasten im Spritzgießwerkzeug sehr gut eignet, **Abb. 4**. Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit den elektrischen und thermischen Wirkzusammenhängen und deren Folgen auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Diese Erkenntnisse sollen in eine gesamtheitliche Simulation des Verfahrens einfließen.

Werkstoffverbunde

Die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe wird häufig eingesetzt, um die spezifischen Eigenschaften unterschiedlicher Materialien zu kombinieren. Sowohl Kunststoff-Kunststoff-Verbunde als auch Kunststoff-Metall-Verbunde finden hierbei vielfach Anwendung. Neben der Konzipierung effizienter Prozesse für die Fertigung von Werkstoffverbunden steht insbesondere auch die erreichbare Verbundfestigkeit im Fokus wissenschaftlicher Betrachtung. Der Lehrstuhl für Kunststofftechnik beschäftigt sich mit verschiedensten Möglichkeiten, um die Verbundfestigkeit unterschiedlicher Werkstoffkombinationen zu optimieren und so weitere Anwendungsfelder für Werkstoffverbunde mit Kunststoffen zu erschließen.

Rotationsformen haftungsinkompatibler Werkstoffe

Rotationsformen ist ein Kunststoffverarbeitungsverfahren, mit dem nahtlose Hohlkörper mit komplexen Geometrien in einem breiten Größenspektrum hergestellt werden können. Im Gegensatz zu den meisten anderen Kunst-

stoffverarbeitungsverfahren erfolgen das Aufschmelzen, die Formgebung sowie das Abkühlen innerhalb eines Werkzeugs in einem variothermen Prozess. Die Bauteilgeometrie ist hier lediglich an der Bauteilaußenseite formgebunden, wodurch der Aufbau mehrschichtiger Systeme mit variablem Schichtaufbau und Schichtdicken durch die sequentielle Zugabe von pulverförmigen Werkstoffen in den Prozess möglich ist. Durch die Zugaben von Pulvermischungen können gezielt Werkstoffmischungen generiert werden. Hierdurch wird der Aufbau mehrschichtiger Systeme ermöglicht, bei denen eine mehrphasige Zwischenschicht zur Verbesserung der Verbundfestigkeit eingebracht wird. Die Haftungsoptimierung, insbesondere bei haftungsinkompatiblen Werkstoffen beruht auf mechanischer Adhäsion, der formschlüssigen Verbindung verschiedener Werkstoffe innerhalb der Zwischenschicht.

Am Lehrstuhl für Kunststofftechnik fanden, unter anderem im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projekts Sport Infinity (Horizont 2020, Förderkennzeichen Nr.: 645987) Untersuchungen statt, in denen mit Hilfe dieses Ansatzes Verbunde aus den zueinander haftungsinkompatiblen Kunststoffen Polyethylen und Polyamid 12 generiert wurden. Es zeigte sich, dass Verbundfestigkeiten von bis ca. 12 N mm^{-1} im 180° Schälversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 11339 erreicht werden können. Die Verbundfestigkeit ist bei diesem Ansatz von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Zum einen ergibt sich ein, von der jeweiligen Werkstoffkombination abhängiges Maximum bei spezifischen Volumenanteilen der beiden Werkstoffe in der Zwischenschicht. Bei der Kombination PE und PA12 liegt dieses bei jeweils 50 Vol.-%. Zudem kommt es bei diesem Prozess zu Entmischungseffekten die auf Grenzflächenspannungen der Werkstoffe zurückzuführen sind. Diese führen zu Abhängigkeiten der Verbundfestigkeiten von verschiedenen Prozessparametern wie z. B. Prozesszeit und Verarbeitungstemperatur.

In **Abb. 5** ist die Phasengrenze eines solchen Verbundes dargestellt. Zu sehen sind verschiedene Hinterschneidungen der beiden Werkstoffe zueinander, die zur mechanischen Adhäsion beitragen. Die Phasengrenze als solches ist stets verrundet und weißt keine engen Radien auf. Dies ist ein Resultat der oben beschriebenen Entmischungseffekte.

Abbildung 5:
Phasengrenze eines rotationsgeformten PA12-PE Werkstoffverbunds, Hinterschneidungen der Materialien führen zu einem formschlüssigen Verbund.

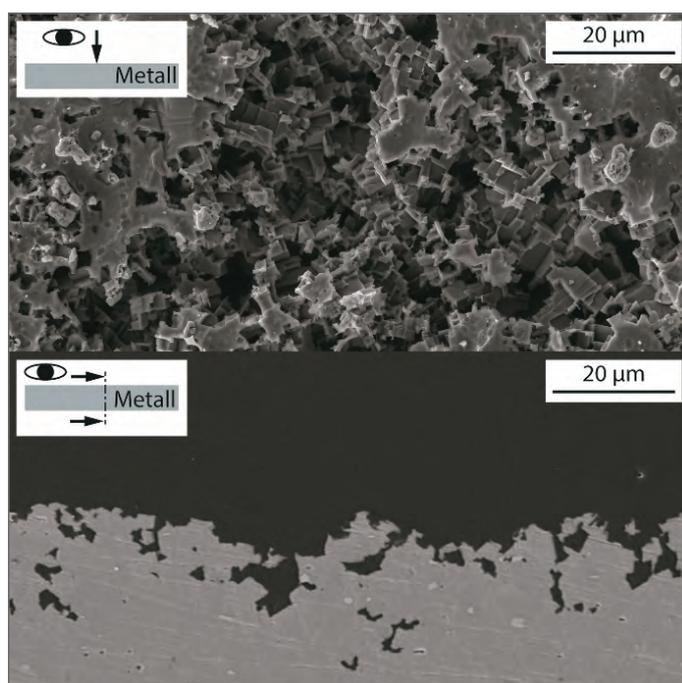


Herstellung mediendichter Kunststoff-Metall Hybride

In der Elektronikindustrie wächst die Nachfrage nach elektronischen Systemen mit hoher Beständigkeit der Mediendichtheit. Ein wesentlicher Treiber ist hierbei die Automobilindustrie, deren Bedarf durch die zunehmende Elektromobilität sowie steigenden Anforderungen, z. B. an die Sicherheit, stetig zunimmt. Infolgedessen gewinnen Kunststoff-Metall Hybride vermehrt an Bedeutung, die bei einer geeigneten Kombination der Materialien Bauteileigenschaften bzw. Funktionen ermöglichen, die mit einem Material alleine nicht möglich sind. So kann beispielsweise bei Elektronikgehäusen die elektrische Kontaktierung der Elektronik im Inneren des Gehäuses über metallische Stanzgitterstrukturen erfolgen, die im schützenden Kunststoffgehäuse fest und dicht integriert sind. Eine

Prozessroute zur effizienten Herstellung derartiger Kunststoff-Metall Hybride ist das Montagespritzgießen, bei dem die Metallkomponenten während der Formgebung der Kunststoffkomponente mit dieser verbunden wird. Aufgrund der mangelnden Kompatibilität von Kunststoffen und Metallen stellt das dichte Verbinden jedoch eine große Herausforderung dar. Am Lehrstuhl für Kunststofftechnik wird sich dieser Herausforderung unter anderem in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen des DFG-Gemeinschaftsprojektes „Grundlagenuntersuchung zum Trennen, Umformen und Montagespritzguss und deren Interdependenz für die Herstellung beständig mediendichter elektronischer Systeme“ (Förderkennzeichen: DR 421/10-2 und ME 2043/33-2) gestellt.

Abbildung 6:
Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen eines mikrostrukturierten Metalleinlegers aus AlMg3; oben: Blick auf die Oberfläche; unten: Aufnahme eines Querschnittes.



Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die gezielte Oberflächenmodifizierung der Metallkomponente, bei der auf Meso- und Mikroebene Strukturen erzeugt werden, die neben der Dichtheit auch die Verbundfestigkeit positiv beeinflussen. Die Strukturen werden durch Prägen oder elektrochemische Verfahren erzeugt. Beim Prägen haben die Strukturen ein gleichmäßiges, linienförmiges Erscheinungsbild auf Meso- und / oder Mikroebene. Hingegen sind die Strukturen bei den elektrochemischen Verfahren auf die Mikroebene beschränkt, flächig aufgebracht und verfügen über ein zerklüftetes Erscheinungsbild, **Abb. 6**.

Die Dichtheitsuntersuchung von Probekörpern mit unterschiedlich strukturierten Metalleinlegern hat gezeigt, dass bei Nutzung einer geeigneten Struktur eine signifikante Erhöhung der Dichtheit möglich ist. Durch den Abgleich der erzielbaren Dichtheit mit der Simulation der gesamten Prozesskette, von der Herstellung der Metallkomponente bis hin zum Montagespritzguss, ist es zudem möglich, Einflüsse der Strukturierung zu bewerten, sodass ein spezifisches Anforderungsprofil an zu verwendende Strukturen für eine definierte Dichtheit abgeleitet werden kann. Neben der Steigerung der Dichtheit wird durch die Strukturen zudem die Auszugsfestigkeit der Metallkomponenten erhöht. So ist beispielsweise beim verwendeten Probekörper mit elektrochemisch erzeugten Mikrostrukturen das Versagen durch einen wandernden Spalt zwischen dem Kunststoff und dem Metall geprägt, der infolge der plastischen Materialverjüngung der Metallkomponente entsteht. Auf der Bruchfläche der Kunststoffkomponente als auch auf der Bruchfläche der Metallkomponente sind hierbei jeweils Reste des anderen Materials zu finden.

Hybride-Prozesse für den Leichtbau

Ein primäres Kriterium für den Erfolg von Hybridbauteilen ist gerade bei mechanisch belasteten Anwendungen die Verbundhaftung zwischen den zu kombinierenden Materialien. Am Lehrstuhl für Kunststofftechnik ist es möglich, eine Vielzahl von Materialkombinationen im Spritzguss herzustellen und bzgl. der resultierenden Verbundeigenschaften zu validieren. Dabei sind Materialkombinationen von Thermoplasten, Duroplasten, beide mit den verschiedensten Faserkonfigurationen, sowie Metallen möglich. Durch diese Materialkombinationen sind z. B. endlosfaserver-

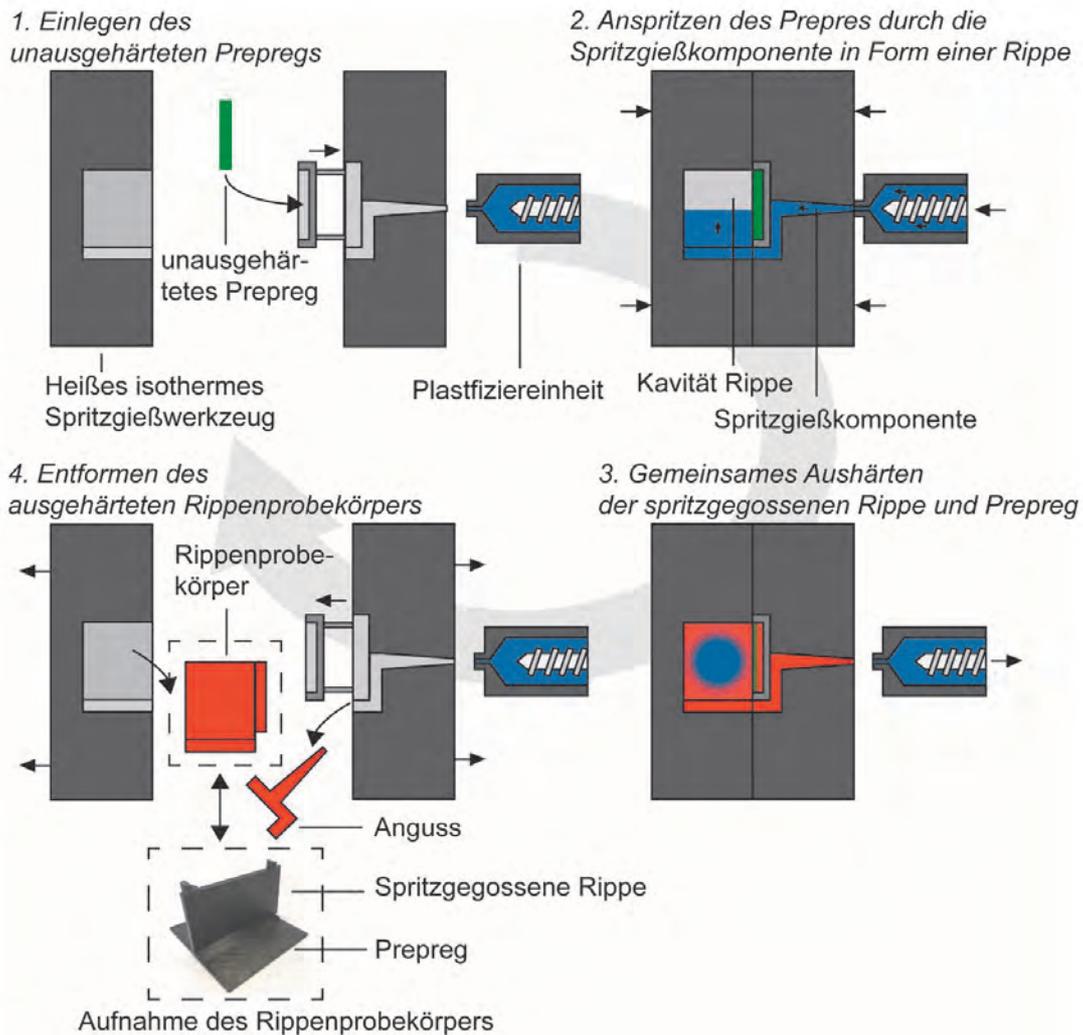


Abbildung 7: Beispiel eines hybriden Herstellungsprozesses: Nutzung des Werkzeugs zur Formgebung/Härtung eines duroplastischen Prepregs und einer duroplastischen Spritzgießkomponente.

stärkte Bauteile nicht mehr auf einfache Geometrien beschränkt, sondern können komplexe Funktionsbauteile abbilden.

Der Herstellungsprozess für solche Hybridbauteile und die hierfür am Lehrstuhl für Kunststofftechnik verwendete Werkzeugtechnik wurde im Konsortium, bestehend aus dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Siebenwurst GmbH & Co. KG, Gubesch Thermofforming GmbH und Schmidt Gesellschaft für Werkzeug und Formtechnik mbH, im Rahmen des Fördervorhabens „Duro-IMF“ erarbeitet, das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen: 20W1503D) gefördert wird.

Der Prozessablauf ist in **Abb. 7** schematisch dargestellt. Zu Beginn des Prozesses wird das ausgewählte Halbzeug eingelegt. Anschließend folgt das Schließen des Werkzeugs und die Funktionalisierung mittels der Spritzgießkomponente. Bei der Verarbeitung von Duroplasten erfolgt nach der Funktionalisierung der gemeinsame Aushärtungsprozess, bei Thermoplasten hingegen die Abkühlung. Im letzten Prozessschritt erfolgt die Entformung der hergestellten Hybridbauteile.

Ein aktuelles Forschungsthema am Lehrstuhl für Kunststofftechnik ist die Kombination von Prepregs (endlosfaserverstärkte duroplastische Halbzeuge) mit einer kurzfaserverstärkten Spritzgießkomponente auf Duroplastbasis. Zwei wesentliche Aspekte sind hier die Werkzeugtemperatur und Aushärtezeit bei der Herstellung. Beide stehen in direkter Abhängigkeit und sind für die Performance der spä-

teren Hybrid-Bauteile maßgeblich. Auf der einen Seite sind aufgrund der gemeinsamen Aushärtung die Parameter so zu wählen, dass beide Komponenten vollständig aushärten, ohne dabei die jeweilige Grenztemperatur des anderen zu überschreiten, da es sonst zu Abbaureaktionen des Harzes kommen könnte. Auf der anderen Seite müssen die Aushärtereaktionen möglichst schnell ablaufen, um die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu gewährleisten. Neben der Prozessführung/-entwicklung werden auch verschiedene Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit, wie z. B. die Rippenfußgeometrie und Anspritzsituationen, variiert und analysiert. Durch eigenentwickelte Prüfvorrichtungen können die hergestellten Hybridbauteile im Anschluss auf ihre Verbundhaftung geprüft werden. Zur Analyse der Versagensursachen ergänzen eine Vielzahl von Charakterisierungsmethoden die jeweiligen Untersuchungen.

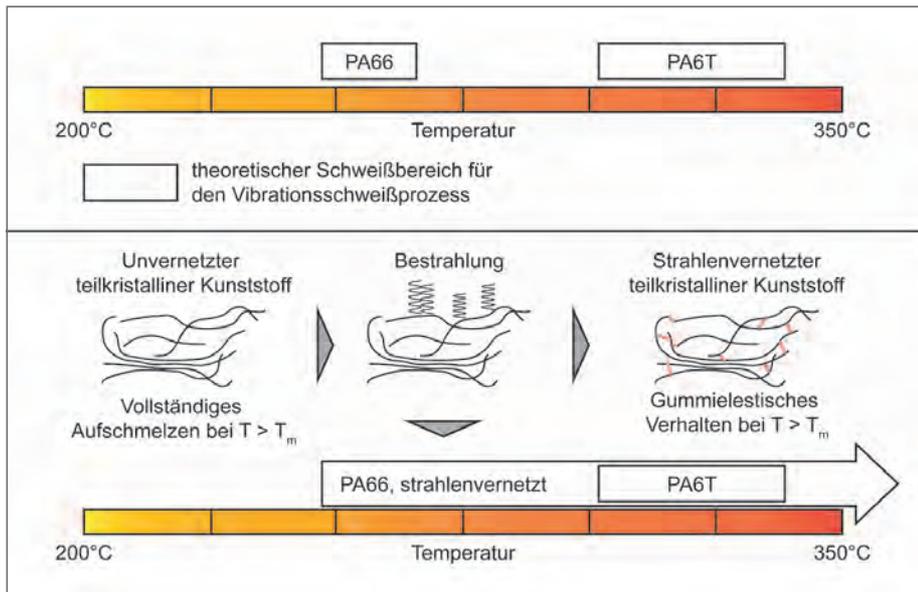


Abbildung 8: Erweiterung des Fügespektrums durch Bestrahlung mit energiereicher Strahlung (exemplarisch dargestellt für eine Schweißverbindung aus PA66 und PA6T).

Schweißen strahlenvernetzter Thermoplaste

Innerhalb der Fertigungsprozesskette nimmt das Fügen thermoplastischer Kunststoffe eine zentrale Stellung ein, wobei das Schweißen eine mediendichte Verbindung mit hohen Verbindungsfestigkeiten ermöglicht. Im Fokus einer wirtschaftlichen und ressourcenschonenden Produktion stehen vor allem Fügeverbindungen aus unterschiedlichen Materialien. Diese Werkstoffkombinationen ermöglichen lokal angepasste Bauteileigenschaften, wie z. B. unterschiedliche Einsatztemperaturen im Motorraum (Blow-by Leitung), stellen allerdings hohe Anforderungen an die Fügetechnik. Neben einer chemischen Verträglichkeit der Werkstoffe sind für den Vibrationsschweißprozess annähernd gleiche Schmelztemperaturen (teilkristallin) bzw. Erweichungstemperaturen (amorph) der Kunststoffe notwendig. Dies resultiert in einem deutlich eingeschränkten Spektrum an möglichen Werkstoffkombinationen für Schweißverfahren.

Eine Möglichkeit, diese reduzierten Kombinationsmöglichkeiten zu erweitern, stellt das Bestrahlen eines oder mehrerer teilkristalliner Fügepartner mit energiereicher Strahlung dar, **Abb. 8**. Mithilfe der Strahlenvernetzung kann ein gummielastisches Verhalten des niedrigschmelzenden Fügepartners (z. B. PA66) und somit eine Reststeifigkeit oberhalb der Kristallitschmelztemperatur erreicht werden. Dies hat eine Veränderung des Energieeintrags in die Fügezone während des

Vibrationsschweißprozesses zur Folge. Aufgrund der bestehenden Reststeifigkeit ist ein reduzierter Quetschfluss während des Schweißprozesses festzustellen, welcher in einer erhöhten Fügezonentemperatur im Vergleich zu unvernetzten teilkristallinen Thermoplasten mündet. Dies führt zu einer Verschiebung des theoretischen Schweißbereichs im Vibrationsschweißen zu höheren Temperaturen und ermöglicht die Herstellung von Verbindungen zwischen technischen Thermoplasten (z. B. PA66) und Hochtemperaturthermoplasten (z. B. PA6T, PA9T).

Am Lehrstuhl für Kunststofftechnik durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass Schweißverbindungen für herkömmlich inkompatible Werkstoffkombinationen wie z. B. PA9T und PA66 sowie PA6T und PA66 trotz eines Schmelztemperaturunterschiedes größer 150 Kelvin mittels Strahlenvernetzten des niedrig schmelzenderen Thermoplasten (PA66) hergestellt werden konnten. Hierbei führten bereits herkömmliche Bestrahlungsdosen von 33-99 kGy zu guten mechanischen Schweißnahtseigenschaften der Verbindung, welche im Bereich der Grundmaterialfestigkeit des schwächeren Fügepartners liegen. Eine höhere Bestrahlungsdosis hatte dabei geringfügig höhere Temperaturen in der Fügezone zur Folge.

Die Ausnutzung energiereicher Strahlung zur Erzeugung von Vernetzungspunkten zwischen den Molekülketten, wie es in **Abb. 8** darge-

stellt ist, welche eine Reststeifigkeit des Kunststoffes in der Schmelze zur Folge haben, lässt demzufolge eine Erweiterung des kombinierbaren Werkstoffspektrums für Schweißverfahren zu. Dies ermöglicht ein Verbinden von Thermoplasten mit stark abweichenden Schmelzpunkten und bietet die Möglichkeit, z. B. lokal an die Beanspruchung angepasste thermische Eigenschaften zu erreichen.

KONTAKT

Universität Erlangen-Nürnberg
 Lehrstuhl für Kunststofftechnik
 Prof. Dr. Dietmar Drummer
 D-91058 Erlangen
 Tel.: +49 (0)9131 85-29700
 Fax: +49 (0)9131 85-29709
 drummer@lkt.uni-erlangen.de
 www.lkt.uni-erlangen.de

» RUMUL – Pionier der Resonanzprüftechnik. Eine dynamische Erfolgsgeschichte.«

Im Jahr 1964 gründete Max E. Russenberger sein Unternehmen, dem sich bald Erwin Müller als Partner anschloss. Aus dieser Verbindung stammt das Kürzel RUMUL. Durch die ungewöhnliche Erfindergabe entstanden ganz neue Resonanzprüfmaschinen. Mit Resonanzprüfmaschinen können Proben und Bauteile mit einer dynamischen Last beansprucht werden, die meistens mit einer statischen Last überlagert wird. Aufgrund des Resonanzeffektes ist die aufgenommene Leistung sehr klein und durch die entsprechende Auslegung der Schwingensysteme ergeben sich hohe Prüffrequenzen bei minimalen Betriebskosten.

RUMUL CRACKTRONIC – die Kleinste mit dem besonderen Dreh

Die RUMUL CRACKTRONIC ist das Tischmodell von RUMUL mit minimalem Gewicht und Platzbedarf für schnelle und kostengünstige dynamische Biegebeanspruchungen bis zu einem Biegemoment von 160 Nm. Ein elektromagnetisch angetriebener Resonator, der als Drehschwinger ausgelegt ist, erzeugt das zur Belastung notwendige reine Biegemoment. Über einen Torsionsstab kann – unabhängig vom dynamischen Antrieb – ein statisches Biegemoment auf die Probe aufgebracht werden. Ursprünglich zum Anschwingen von Bruchmechanikproben entwickelt, bietet das heutige Modell durch ein modulares Konzept die folgenden Prüfmöglichkeiten: Biegung bis 160 Nm, Torsion bis 160 Nm und Zug bis 8 kN. Neben den Standardbaumodulen ist durch kundenspezifische Sondermodule auch die Prüfung von kleinen Bauteilen (z.B. Ventilmadeln, Einspritzdüsen, etc.) möglich.

RUMUL MIKROTRON – das universellste Leichtgewicht

Die RUMUL MIKROTRON ist die kleinere und kompaktere Ausführung der RUMUL TESTRONIC für Prüfkräfte bis 5kN oder 20 kN. Der große Hub an der Schwingmasse ist das Hauptmerkmal dieser Konstruktion, dies resultiert in einem für Resonanzprüfmaschinen ungewöhnlich geringen Gesamtgewicht (nur ca. 30% im Vergleich zu vergleichbaren Prüfsystemen). Der Maschinentisch erlaubt die zunehmend erforderliche Erweiterung des Anwendungsbereiches hinsichtlich der Prüfung von Bauteilen. Durch den Einbau der Steuerung in die Maschine ist die RUMUL MIKROTRON eine kompakte und somit platzsparende Lösung.

RUMUL TESTRONIC – das Original mit dem dynamischen RUMUL MAGNODYN Antrieb

Die RUMUL TESTRONIC basiert auf den neuesten Technologien der Mechanik und der Elektrotechnik und ist mit dem leistungsstarken dynamischen Antrieb „MAGNODYN“ ausgestattet. Die Maschine ist in einen statischen und dynamischen Teil gegliedert und gestattet, beliebige Spannungsverhältnisse zu fahren. Der große Maschinentisch und der anpassbare vertikale Prüfraum erlauben auch die Prüfung von größeren Bauteilen. Die RUMUL TESTRONIC ist verfügbar in den Nennlasten von 50 kN, 100 kN, 150 kN und 250 kN.

RUMUL VIBROFORTE – das Kraftpaket mit dem innovativen bipolaren Antrieb

Die RUMUL VIBROFORTE 500 Maschine ist in Verbindung mit den für Resonanzprüfmaschinen optimierten RUMUL Spannvorrichtungen das ideale Prüfsystem für schnelle und kostengünstige dynamische Prüfungen an Standardproben und probenähnlichen Bauteilen wie Pleuel, Ketten, Betonstähle, Schrauben etc. Die Anordnung von zwei gegenläufig arbeitenden Schwingensystemen und die Verwendung von zwei Spindeln für den statischen Antrieb bieten die folgenden Vorteile:

- erstaunlich leichte Konstruktion für eine Resonanz-Prüfmaschine mit 500kN Nennlast (ca. 4400 kg)
- statische Maximallast entspricht der Nennlast der Maschine (u.a. Kalibrierung)
- deutlich erhöhte dynamische Leistungsfähigkeit durch zwei Magnete
- sehr ergonomische Arbeitshöhe von nur ca. 1000 mm



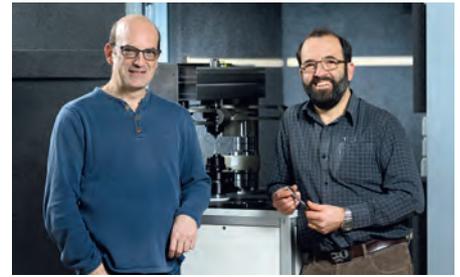


WELTNEUHEIT!
RUMUL GIGAFORTE 50 –
100 Millionen Lastspiele in weniger
als 28 Stunden

Die RUMUL Russenberger Prüfmaschinen AG stellt die weltweit erste Resonanzprüfmaschine mit einer Prüffrequenz von 1000 Hz vor. Die Schwingfestigkeit eines Werkstoffes, bzw. eines Bauteils, ist für viele Anwendungen die entscheidende Kenngröße, um eine effiziente Bauteilauslegung durch eine optimale Ausnutzung des werkstoffspezifischen Festigkeitspotentials zu gewährleisten.

Ein Festigkeitsnachweis erfordert in der Regel eine statistisch abgesicherte Aussage über

das zyklische Festigkeitsverhalten im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich. Magneterregte Resonanzprüfmaschinen ermöglichen schnelle und sehr ökonomische Ermüdungsversuche und erlauben bisher Prüffrequenzen im Bereich von ca. 40 Hz bis 250 Hz, wobei bei ca. 120 Hz 10 Millionen Lastspiele innerhalb eines Tages möglich sind. Mit der neuen Entwicklung RUMUL GIGAFORTE 50 benötigt man für 10 Millionen Lastspiele weniger als 3 Stunden und für 100 Millionen Lastspiele weniger als 28 Stunden, was sehr zeitnahe experimentelle Ergebnisse auch für sehr hohe Lastspielzahlen ermöglicht. Mit der Nennlast von 50 kN statisch und +/- 25 kN dynamisch können erstmals auch größere Rund- und/oder Flachproben sowie probenähnliche Bauteile schnell und in extrem kurzer Zeit geprüft werden. Die Versuche können je nach geplanter Anwendung bei allen R-Werten (Verhältnis Unterlast zur Oberlast) durchgeführt werden. Neben kraftgeregelten Versuchen sind auch dehnungsgeregelte und beschleunigungsgeregelte Ermüdungsversuche möglich.



Jürg und Markus Berchtold präsentieren stolz eine weitere Innovation aus dem Hause RUMUL; die RUMUL GIGAFORTE 50.

KONTAKT

RUMUL Russenberger Prüfmaschinen AG

Ingbert Klopfer, Vertriebsleiter
 Gewerbestraße 10
 CH-8212 Neuhausen am Rheinflall
 Tel.: +41 (0)52 672 4627
 iklopfer@rumul.ch
 www.rumul.ch



RUSSENBERGER PRÜFMASCHINEN AG

Vorsprung durch Spezialisierung
Resonanzprüfmaschinen von RUMUL

Ihr kompetenter Partner
für Resonanzprüfmaschinen

- ◆ schnell
- ◆ kostengünstig
- ◆ wartungsfrei

Produktprogramm

- ◆ Resonanzprüfmaschinen von 5 – 700 kN
- ◆ Prüffrequenzen bis zu 1000 Hz
- ◆ Softwareprogramme für alle gängigen Anwendungen
- ◆ Zubehör für bruchmechanische Untersuchungen
- ◆ Service, Kalibrierung, Modernisierung

RUMUL
Russenberger Prüfmaschinen AG

Gewerbestrasse 10 / Rundbuck
 CH-8212 Neuhausen am Rheinflall
 info@rumul.ch · www.rumul.ch



Nachhaltige Leichtbaulösungen für unsere Zukunft

» 70 Jahre MENZOLIT – Vielfalt und Langlebigkeit «

Die Unternehmen der Menzolit Gruppe produzieren an drei europäischen Standorten faserverstärkte Kunststoffe (GFK und CFK). Abnehmer sind vor allem die Automobil- und die Elektroindustrie. Der 1948 von Albert Schmidt in Menzingen gegründete Kunststoffhersteller, wurde vom GFK Pionier zu einem weltweit führenden Hersteller von „Sheet Moulding Compounds“ (SMC) und „Bulk Moulding Compounds“ (BMC). Produktionstechnische Vorteile, vielfältige Anwendungsmöglichkeiten und verlässliche Kosten erschließen dem zur Freisinger Senata GmbH gehörenden Faserverbundspezialisten weitere Zukunftsmärkte.

Neben den europäischen Standorten in Italien, Spanien und UK sichern Lizenzpartner in China und Indien die globale Verfügbarkeit der gemeinsam mit unseren Kunden entwickelten Composite Lösungen. Menzolit® SMC ist eine vorimprägnierte Harzmatte, die im beheizten Werkzeug zu höchst stabilen und langlebigen Bauteilen umgeformt wird. Durch die spezielle Materialkomposition können verschiedenste Eigenschaften kombiniert werden. Geringe Dichte für hocheffiziente Leichtbaulösungen ebenso wie höchste mechanische Performance oder exzellente Oberflächenqualität für online lackierte Karosseriebauteile. Dazu zeichnen sich Formteile aus Menzolit® SMC durch hohe Wärmebeständigkeit, Korrosionsfreiheit und enorme Dimensionstreu aus. Unschlagbarer Vorteil gegenüber metallischen Werkstoffen ist die hohe Funktionsintegrität, Permeabilität für elektromagnetische Wellen und deutlich erhöhten Design Möglichkeiten bei vergleichsweise geringen Investitionskosten (Abb. 1).

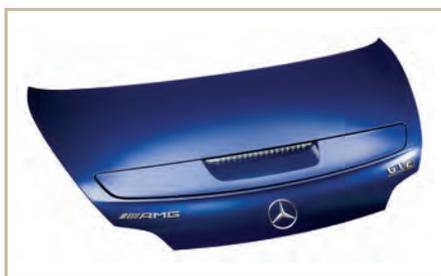


Abb. 1: Mercedes AMG - Superleichter Heckdeckel mit integrierten Antennen aus menzolit® SMC 0430



Abb. 2: Mercedes AMG - Extrem hochfester Querträger aus menzolit® Carbon-SMC 1100

Diese Eigenschaften machen Menzolit® SMC zum idealen Werkstoff für multiple Anwendungsmöglichkeiten im Bereich nachhaltiger Mobilität. Leichte Karosserieaußenhautteile sind ebenso kostengünstig darstellbar wie hochfeste Strukturbauteile im Chassis (Abb. 2) oder um die Batterie. Aber die Anwendungen sind nicht auf das Fahrzeug beschränkt, sondern auch in der Infrastruktur zu finden. Bestes Beispiel sind die E-Ladesäulen unseres langjährigen Kunden EBG Compleo. Hier sorgt Menzolit® SMC für ein perfektes Witterungs- und Vandalismusbeständiges, selbstverlöschendes Gehäuse das zusätzlich die geschützte Integration der notwendigen Kommunikationsantennen ermöglicht (Abb. 3).

Hochbrandfeste Menzolit® SMC, welche beim Brandfall eine äußerst geringe Rauchgasdichte und nahezu keine toxischen Zersetzungsprodukte entwickeln, kommen in diversen Bereichen der Massenverkehrsmittel in Einsatz und entsprechen dem neuesten Stand der DIN EN 45545-2 (HL3).

Menzolit® BMC ist ein hauptsächlich im Spritzgussverfahren verarbeiteter Verbundwerkstoff der sich durch die Möglichkeit komplexer Formgebung, höchster Dimensionstreu und kurzer Prozesszeiten auszeichnet. Unverzichtbar ist Menzolit® BMC für die Produktion moderner Scheinwerfer, insbesondere durch seine hohe Temperaturbeständigkeit und günstigen Preis. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind isolierende Komponenten für Sensoren, Steuergehäuse, E-Motoren aber auch Außenhautteile wie Spoiler und Versorgungsklappen für E- oder Hybridfahrzeuge.

Menzolit legt höchsten Wert auf die Qualität seiner Verbundwerkstoffe und einer engen partnerschaftlichen Zusammenarbeit mit seinen Kunden. Fordern Sie uns...

Weitere Informationen:

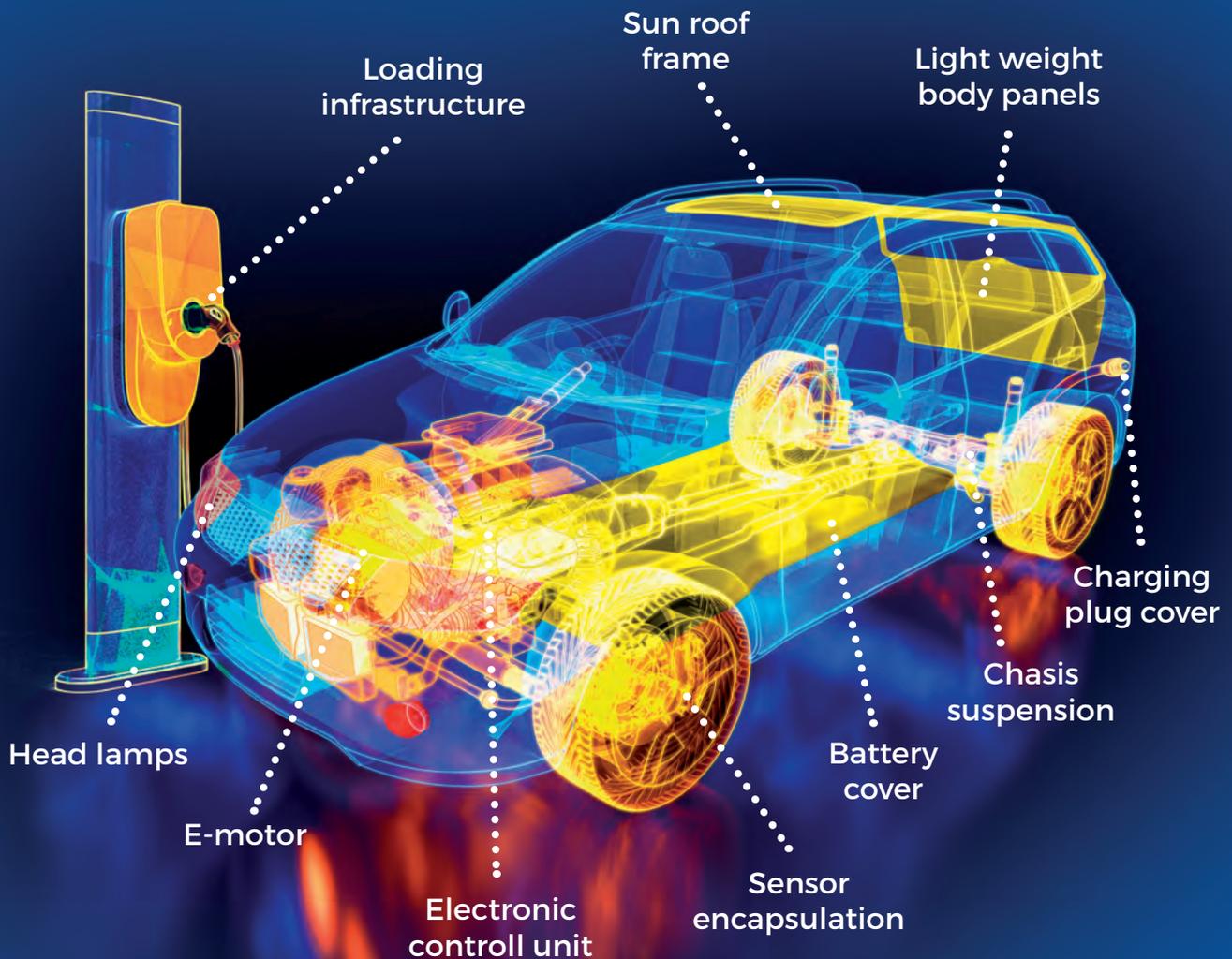
<http://www.menzolit.com>



Abb. 3: EBG Compleo Ladestation CITO - Verkraftet mühelos Temperaturbelastungen bei Schnellladung mit 50 kW

70 Years Menzolit

Compounding solutions for a sustainable environment



menzolit[®] compounds for future mobility

High Strength	Robustness and persitancy in multiple applications
Low Density	High Efficcencie due to optimized weight
Excellent Surface	Online paintable with high aspect ratio
Thermal Resistance	Perfect heat managment for battery and plugs
Dimensional Stability	Reliable dimensions even under temperature

» mtex+ und LiMA «

Hier wächst zusammen, was zusammengehört

Die Symbiose von Technischen Textilien und Leichtbau eröffnet völlig neue Möglichkeiten für Produkt- und Technologieentwicklungen. Anwendungsbeispiele für Branchen von A wie Architektur bis Z wie Zugtechnik stellt das Messe-Duo mtex+ und LiMA am 29./30. Mai 2018 in Chemnitz vor.

Die Technologiefelder Technische Textilien und Leichtbau weisen ständig wachsende Schnittmengen auf. Folgerichtig führt die Messe Chemnitz die Internationale Messe für Technische Textilien mtex+ und die Leichtbaumesse LiMA noch enger zusammen. Ausdruck findet dies im neuen Slogan „Exzellente Verbindungen: Technische Textilien treffen Leichtbau“. Unter dieser Überschrift werden am 29./30. Mai 2018 Aussteller aus Deutschland, Frankreich, Österreich, der Schweiz und Tschechien anwendungsorientierte Leichtbau- und textile Lösungen für den Fahrzeug- und Maschinenbau, für Architektur und Bauwesen, für die Gesundheitswirtschaft, den Freizeitbereich sowie weitere Branchen vorstellen. Das begleitende Fachprogramm vertieft diese Themen.

Akteure spielen Zukunftsmusik

Fahrzeugkomponenten aus Basalt- und Bambusfasern, schnittfeste und flammenhemmende Schutzbekleidung oder interaktive Fassa-

den- und Brückenelemente, bei denen das Gewicht mittels Naturfasern bzw. textilverstärkten Hybridwerkstoffen reduziert und der Gebrauch durch Integration von Sensorik erhöht wird, sind einige der Highlights, welche die Besucher erwarten. „Die Akteure spielen wahrlich Zukunftsmusik. Sie vertreten unter anderem das überdurchschnittlich starke Forschungs- und Entwicklungspotenzial der mitteldeutschen Industrieregion mit den zahlreichen Leichtbau- und Textilforschungseinrichtungen in Chemnitz, Freiberg und Dresden. Ebenso freuen wir uns, wiederum leistungsstarke Präsentationen aus unseren Nachbarländern Tschechien und Österreich begrüßen zu dürfen“, berichtet André Rehn, Leiter Messen & Märkte der mtex+- und LiMA-Veranstalterin C³ GmbH.

International aufgestellt

Nach 2016 werden der tschechische Textilverband ATOK und das Techtex-Cluster CLUTEX mit einem Firmengemeinschaftsstand erneut

in Chemnitz dabei sein. Die österreichische Smart-Textiles-Plattform hat ebenfalls ihre Teilnahme angekündigt. Zur weiteren Vertiefung dieser Kontakte trägt bei, dass die Messegesellschaften von Chemnitz und von Dornbirn/Österreich kürzlich eine Kooperation vereinbart haben. Die in Dornbirn veranstaltete SALTEX hat ein ähnliches Profil wie das Chemnitzer Messe-Duo. Während die mtex+ auf funktionalisierte und intelligente Textilien, digitalisierte Produktion, Verfahrens- und Prozessentwicklung, Textilveredlung, Verbundstoffe sowie Nachhaltigkeit und Recycling fokussiert, rückt die LiMA Leichtbauwerkstoffe und -produkte, Fertigungsverfahren und Fertigungstechnik sowie neueste Forschungsergebnisse in den Mittelpunkt.

Attraktive Sonderausstellungen

Thematische Schwerpunkte setzen erstmals auf dem Programm stehende Sonderschauen wie „light.building“ zum Leichtbau in Architektur und Bauwesen oder „flexible.protect“



Abb. 1: Verschiedene Leichtbau-Lösungen für Schienenfahrzeuge zogen zur LiMA 2016 ein internationales Publikum an. Der Bereich ist auch 2018 ein Schwerpunktthema.



Abb. 2: Für einen Vliesstoff auf Flachsfaserbasis, der u. a. für Sportartikel und ökologisches Bauen eingesetzt werden kann, erhielt Norafin den mtex+-Innovationspreis 2016. (Fotos: Messe Chemnitz/Kristin Schmidt)

zu Schutz- und Sicherheitstextilien für Mensch, Natur, mobile und immobile Güter. Neue Materialien und Verfahren für den Leichtbau bei Schienen- und Straßenfahrzeugen präsentieren Partner aus Industrie und Forschung. Fortgesetzt wird die bereits 2016 erfolgreiche Ausstellung „health.textil“ mit Medizin-, Gesundheits- und Wellnesstextilien, die um ein Dialogforum von Entscheidern aus Textilbranche und Gesundheitswirtschaft ergänzt wird.

Inspirationen für neue Ideen, Entwicklungen und Partnerschaften können sich die Besucher außerdem in der „Chemnitzer Ideenfabrik“ sowie bei Kooperationsbörsen mit internationalen Teilnehmern vorwiegend aus Osteuropa holen. Der Fachkräfte- und Studententag zeigt zudem die vielfältigen beruflichen Möglichkeiten auf den Zukunftsfeldern Technische Textilien und Leichtbau für Schüler, Studenten sowie Berufserfahrene auf.

Bestandteil des Programms ist erneut die Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, die am 28. und 29. Mai 2018 auf dem Messegelände stattfindet und zu der rund 300 Fachleute aus dem In- und Ausland erwartet werden. Auch sie schlägt thematisch die Brücke zwischen moderner Textilherstellung und vielfältigen Leichtbau-Anwendungen.

Klein, aber fein

Aussteller und Fachbesucher schätzen mtex+ und LiMA noch aus einem weiteren Grund: „Wer zu unserem kleinen, aber feinen Messe-Duo kommt, weiß: In Chemnitz habe ich bessere Chancen für den Aufbau und die Pflege vertrauensvoller Geschäftskontakte als bei kaum überschaubaren Großveranstaltungen, auf denen eilige Betriebsamkeit herrscht. Wir schaffen die Basis für die langfristig tragfähige Qualität solcher Kontakte“, betont Projektleiterin Katja Bauer.

KONTAKT

C³ GmbH/Messe Chemnitz
 Projektleiterin mtex+/LiMA
 Frau Katja Bauer
 Messeplatz 1
 D-09116 Chemnitz
 Tel.: +49 (0)371-38038106
 Fax: +49 (0)371-38038109
 k.bauer@c3-chemnitz.de
 www.mtex-lima.de



29./30. Mai 2018

Exzellente Verbindungen

Technische Textilien treffen Leichtbau



Kompakt.
 Intensiv.
 International.

Illustration unter Nutzung eines Fotomotives d. TU Dresden/UK

www.mtex-lima.de



» Den Trends im Leichtbau auf der Spur «

Seien Sie dabei wenn am 25. und 26. Juni Anwender und Experten aus Industrie und Forschung beim „5. Technologietag Hybrider Leichtbau“ in Stuttgart über aktuelle Trends diskutieren und sich über neue Lösungsansätze austauschen – holen Sie sich top-aktuelle Informationen für Ihre Ausrichtung im Leichtbau bei der teilnehmerstärksten Veranstaltung zum hybriden Leichtbau.



„Die Leichtbau-Phase der reinen Materialsubstitution läuft aus. Die Stichworte Konzeptleichtbau und Multi-Material-Design werden in Zukunft an Bedeutung gewinnen“, ist sich Dr. Wolfgang Seeliger, Geschäftsführer der Leichtbau BW GmbH, sicher. Wohin die Reise in den kommenden Jahren im Leichtbau geht, diskutieren Experten und Anwender beim 5. Technologietag Hybrider Leichtbau in Stuttgart. Dabei geht es um konkrete Lösungsansätze und mit Beiträgen von Influencern und Impulsgebern wird bewusst der branchenübergreifende „Blick über den Tellerrand“ gesucht.

Der Technologietag wirft mit einem Rekord seine Schatten voraus: Beim Call for Papers gab es 2018 so viele Einreichungen wie noch nie zuvor. Eines der großen Themenfelder ist der **Konzeptleichtbau**: Ein Vortrag

stellt dabei einen neuen Fertigungsprozess vor, der bei der Herstellung eines hybriden Unterbodenmoduls in Multi-Materialbauweise zum Einsatz kam, mit dem beispielsweise gezielt die Bauteilsteifigkeit erhöht werden konnte. Außerdem widmet sich ein Expertengespräch dem Thema Leichtbau im urbanen System. Auf dem Podium diskutieren dabei unter der Moderation von Dr. Wolfgang Seeliger unter anderem Martin Zeilinger (DAIMLER AG), Prof. Johann Tomforde (TEAMOBILITY GmbH) und Dr. Bernhard Wiedemann (automotive-bw).

Konzeptleichtbau – das heißt Bauteile komplett neu zu denken. Dabei ermöglichen vor allem Verfahren der additiven Fertigung Teile ganz neue Möglichkeiten. Daher widmet sich eine Vortragssession dem **Additive Manufacturing**. Ein Vortrag gewährt etwa

einen Einblick in die Herstellung eines Cockpitmodulquerträgers mittels 3D-Druck für ein Auto, bei dem das Gewicht optimiert wurde, indem etwa die Wandstärken reduziert wurden und filigrane Versteifungsstrukturen zum Einsatz kamen.

Gerade wenn man die Prozesse der additiven Fertigung betrachtet, kommt man an einem Thema nicht mehr vorbei: Digitalisierung. Daher widmen sich zwei Vortragssessions dem Themenblock **Digitalisierung und Simulation**, in denen es etwa darum geht wie künstliche Intelligenz zum Geometrieverstehen bei der Automatisierung von Prozessen des Computer Aided Engineerings eingesetzt werden kann. Außerdem werden Forschungsergebnisse aus dem Projekt „DigitPro“ vorgestellt, mit dem dank eines Digitalen Prototyps die Entwicklungszeiten verkürzt werden sollen.

Wann immer Materialien miteinander kombiniert werden, kommt dem Thema Fügetechnik eine zentrale Rolle zu, da die späteren Eigenschaften der Verbindung auch vom gewählten Fügeverfahren abhängen. Im Themenblock **Prozessinnovation** kann man beispielsweise erfahren, welche Probleme beim Fügen von Stahl-Kunststoff-Verbindungen auftreten können und es wird ein leichtbaugerechtes, flexibel einsetzbares Verfahren gezeigt, mit dem sich Stahl und Kunststoff wirtschaftlich verbinden lassen.

Innovationen hautnah bei der Fachausstellung erleben

Am ersten Tag lohnt sich neben dem Besuch der Vorträge auch ein Streifzug durch die begleitende **Fachausstellung**, bei der Unternehmen ihre Innovationen im Leichtbau präsentieren. Als Aussteller haben sich bereits unter anderem AutoTeam GmbH, CADFEM GmbH, EJOT GmbH & Co KG, KVT Fastening GmbH, Hachtel Werkzeugbau GmbH & Co. KG, Herbert Hänchen GmbH & Co KG sowie die L-Bank angemeldet. Mit HWAJIN Co., Ltd. ist erstmals auch ein südkoreanischer Aussteller vertreten.

Branchenspezifische Lösungen im Blick

Eine Neuheit beim Technologietag sind die drei Branchenforen am zweiten Veranstaltungstag. Warum setzen sich manche Technologien wie etwa der 3D-Druck nur langsam durch und wie kann man Hürden

überwinden, um Raum für neue Technologien zu schaffen? Um diese Fragen dreht sich das Branchenforum **Luft- und Raumfahrt**. Im Gespräch auf der Bühne geht es vor allem um Lösungswege, mit denen man Hindernisse bei der Einführung neuer Technologien überwinden kann. Doch auch die Foren zu **Maschinenbau und Automotive** warten mit spannenden Themen auf, wenn es darin etwa um die Frage geht, wie sich mit funktionaler Konstruktion und lösungsorientierten Maschinen Kosten senken lassen oder welche Rolle der Leichtbau beim Thema Mobilität in den kommenden Jahren spielen wird, um Fahrzeuge leichter zu machen.

Ein erstes „Date“ mit neuen Geschäftspartnern

Neben dem Fokus auf den Branchen steht der zweite Veranstaltungstag ganz im Zeichen des Themas Geschäftsanbahnung, denn es wird ein organisiertes B2B-Matching angeboten. Dort erhalten besonders kleine und mittlere Unternehmen die Möglichkeit mit Käufern, Verkäufern und technischen Entwicklern zu sprechen. Die Gespräche sollen in lockerer Atmosphäre ablaufen – daher läuft das Format ähnlich wie ein „Speed-Dating“ ab: Melden Sie sich online über die Webseite <https://leichtbau-b2b-2018.b2match.io/> an und erstellen Sie ein Kurzprofil. Ab Anfang Mai können Sie sich dann online für ein „Date“ mit anderen Teilnehmern des Technologietags bewerben. Ab dem 21. Juni erhalten Sie eine E-Mail mit Ihrem persönlichen, detaillierten Terminplan für das B2B-Matching. **Wichtig:** Für die Teilnahme am Technologietag müssen Sie sich zusätzlich noch separat unter www.technologietag-registration.de anmelden.

Gründung leicht gemacht

Außerdem bekommen Unternehmen, die sich in der Gründungs- oder Wachstumsphase befinden, beim Innovations- und Investmentforum am 26. Juni die Chance, in direkten Dialog mit potenziellen Investoren und innovativen (Gründer)-Unternehmern zu treten. Das Angebot findet im Rahmen der CyberOne-Roadshow der bwcon GmbH statt. Zudem besteht die Möglichkeit, sich vor Ort über Gründungsmöglichkeiten zu informieren.

Weitere Infos und das ausführliche Programm gibt es unter www.leichtbau-technologietag.de

Auf einen Blick
5. Technologietag Hybrider Leichtbau

Wann: 25. und 26. Juni 2018
Wo: ICS International Congress Center Stuttgart

1. Tag: Konferenz mit begleitender Fachausstellung, Vortragssessions zu Konzeptleichtbau, Prozessinnovation, Additive Manufacturing sowie Digitalisierung und Simulation

2. Tag: Fortsetzung der Konferenz mit den Branchenforen Automotive, Maschinenbau sowie Luft- und Raumfahrt, B2B-Matching, Innovations- und Investitionsforum

Teilnahmegebühr: Ticket für beide Veranstaltungstage: 190.00 € (inkl. MwSt.), Studierende 130.00 € (inkl. MwSt.)

www.leichtbau-technologietag.de

Darum lohnt sich der Technologietag – das haben Teilnehmer über die Veranstaltung 2017 gesagt

„Anspruchsvolle und sehr gelungene Veranstaltung mit einer super Begleitausstellung.“
Bernhard Wiedemann, automotive-bw

„Klasse Veranstaltung. Die guten Gespräche mit unserem bestehenden und erweiterten Netzwerk schätze ich immer wieder.“
Marc Kirchhoff, TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH

„Innovationen im Leichtbau benötigen oftmals einen Stein des Anstoßes. Hierfür sind Veranstaltungen wie der Technologietag Hybrider Leichtbau wegweisend.“
Fabian Giehl, deValu GmbH

„Fürs Networking eine sehr gute Veranstaltung.“
Karl-Heinz Menauer, acp - advanced clean production GmbH

„Eine rundum gelungene Veranstaltung, ich bin sehr zufrieden. Die Konferenz war gut besucht, die richtigen Leute waren da und es gab viele Möglichkeiten, gute Gespräche zu führen.“
Dr. Dipl. Ing. Elmar Beeh, DLR Institut für Fahrzeugkonzepte

„Hervorragendes Preis-Leistungs-Verhältnis im Vergleich zu anderen Veranstaltungen, auch das Niveau der Fachvorträge war sehr hoch.“
Leon Schäfer, TWT GmbH



Direkt am Puls der Zeit: Beim 5. Technologietag Hybrider Leichtbau bekommen Anwender und Experten aktuelle Informationen für ihre Ausrichtung im Leichtbau.

» Field emission scanning electron microscopy for ceramics «

Imaging and analysis of ceramics at sub-nanometer scale with ZEISS GeminiSEM 450

The field emission scanning electron microscope (FE-SEM) ZEISS GeminiSEM 450 combines ultrahigh resolution imaging with the capability to perform advanced analytics while maintaining flexibility and ease-of-use.

With ZEISS GeminiSEM 450, users benefit from high resolution, surface sensitive imaging, and an optical system that ideally supports them in obtaining the best analytical results – especially when working with low voltages. High-throughput electron backscatter diffraction (EBSD) analysis and low voltage X-ray spectroscopy (EDS) deliver excellent results thanks to ZEISS Gemini 450's ability to precisely and independently control spot size and beam current. With the Gemini 2 design, it is possible to always work under optimized conditions as the user can switch seamlessly between imaging and analytical modes at the touch of a button. This makes ZEISS GeminiSEM 450 the ideal platform for the highest demands in imaging and analytical performance.

This article will help you to gain an insight into developing next generation advanced ceramics, a better understanding of sintering processes and porous structures, as well as increase production, and reduce time to market through the use of microscopy.

Seamlessly characterize new ceramic materials in a single workflow

ZEISS GeminiSEM 450 is easy to use and offers overall flexibility for both imaging and analytics at high resolution. Optimize ceramics development by using a single workflow to avoid time-consuming sample preparation and increase your time for research.

Perform chemical mapping of synthesized nanoparticles

Using ZEISS GeminiSEM 450, you can have confidence in the chemistry of precursor powders, efficient synthesis processes, and the optimization of calcination treatment. Obtain live EDS imaging and mapping to better observe the uniformity in composition across your non-conductive samples without compromising resolution.

Characterize ceramic sintering processes at nanoscale

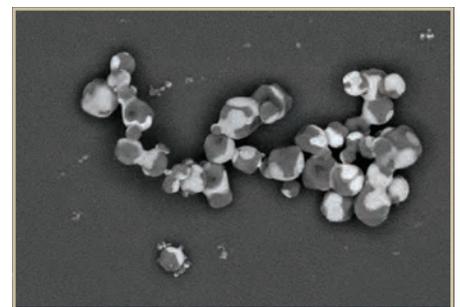
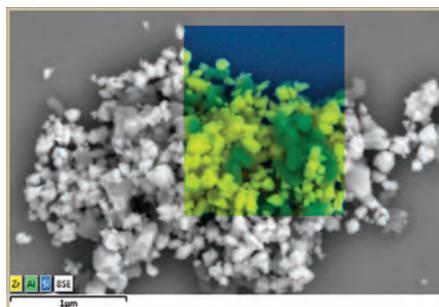
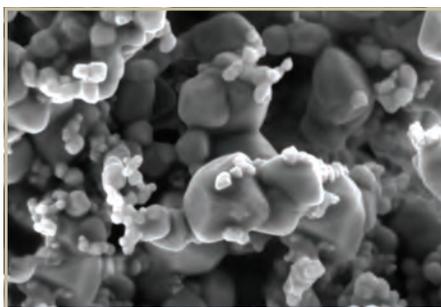
Get a better understanding of the effect of processing variables during sintering by quantifying uniformity in order to achieve the desired final product. Analyze phase distribution at multiple regions of interest using the InLens EsB detector on ZEISS GeminiSEM 450.

Highlights

- Easily quantify and spatially map the chemistry of ceramic nanoparticles using EDS
- Simple imaging of unprepared/uncoated samples
- Simultaneous topographic and compositional information from your advanced material
- Rapidly characterize and map the crystallography of ceramic surfaces
- Combined analytical and characterization techniques in one instrument

Ceramics Applications

- Morphology and grain size analysis
- Phase crystallization and separation of glass
- Porosity analysis
- Surface topography and contamination
- Correlative microscopy
- Compositional inhomogeneities of ceramic powders
- Coating thickness analysis
- Analysis of synthesis of ceramic nanoparticles
- Inclusions and failure analysis in glass
- Particle mixing



Left: ZnO nanoparticles. Taken using InLens SE detector, 3 kV on ZEISS GeminiSEM 450. **Middle:** High resolution EDS analysis of ZnO/Al₂O₃ nanoparticles. Taken using NanoVP, 5 kV, 2 nA, 20 Pa in 10 minutes on ZEISS GeminiSEM 450 **Right:** Strong material contrast in oxide nanoparticles. Taken using EsB detector, 2 kV on ZEISS GeminiSEM 450. Images were taken on unprepared / uncoated samples and no sputter coating was required.

Imaging at sub-nanometer resolution.

ZEISS GeminiSEM 450



// INSPIRATION
MADE BY ZEISS

Your field emission SEM for speed and surface sensitivity

ZEISS GeminiSEM 450 is your specialist for imaging and analytics. Image effortlessly and achieve high spatial resolution, especially when working at low voltages. Perform highly surface sensitive EDS or EBSD analyses. Profit from capturing images of large areas of your sample fast and with excellent quality, no matter if you select high vacuum or variable pressure. You always acquire excellent images from any real world sample.

www.zeiss.com/geminiSEM



» Nabaltec AG: Höchste Rohstoff- und Anwendungskompetenz in Aluminiumhydraten & -oxiden «

Die Nabaltec AG mit Sitz in Schwandorf ist ein, für stete Innovationen mehrfach ausgezeichnetes, Unternehmen der chemischen Industrie („TOP 100“). Auf der Basis von Aluminiumhydroxid und Aluminiumoxid entwickelt und vertreibt Nabaltec hochspezialisierte Produkte in den Segmenten „Funktionale Füllstoffe“ und „Spezialoxide“ im industriellen Maßstab. Produktionsstandorte sind Deutschland und die USA.

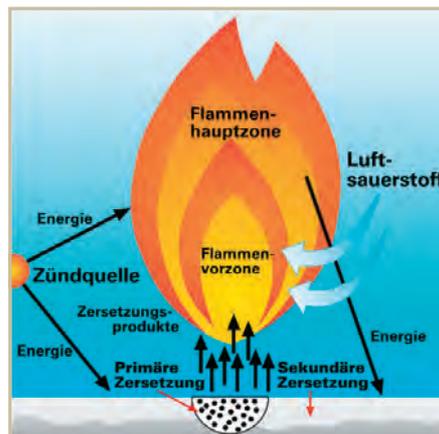
Nabaltec ist immer bestrebt, das optimale Produkt für die Kunden anzubieten. Um dieses zu entwickeln, arbeiten wir eng mit diesen zusammen. Im Vordergrund steht dabei u. a. die stetige Verbesserung des Verarbeitungsverhaltens der Produkte. Unsere Entwicklung & Anwendungstechnik ist darauf fokussiert, etablierte Erzeugnisse und Verfahren weiterzuentwickeln.

Funktionale Füllstoffe

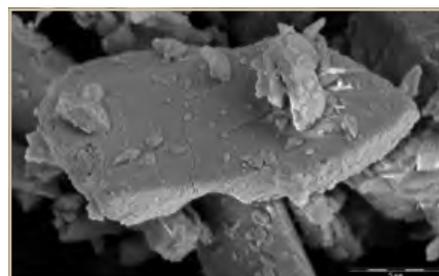
Die Produktpalette umfasst u. a. halogenfreie, flammhemmende Füllstoffe und funktionale Additive für die Kunststoffindustrie in Form von Metallhydraten, z. B. der APYRAL®-Reihe (Al(OH)₃). Diese werden durch genau eingestellte Fällungs- oder Lösungsreaktionen, mit anschließenden höchst aufwändigen Veredelungsschritten, produziert. Flammhemmende Füllstoffe (Flammschutzmittel) werden beispielsweise in Kabelummantelungen für den Verbau in Tunneln, Flughäfen, Hochhäusern, Verkehrsmitteln und elektronischen Geräten eingesetzt, um Brände bestenfalls zu verhindern und/oder Rauchgasentwicklung zu minimieren. Rauchgase verursachen die meisten Verletzten und Todesfälle bei Bränden. Metallhydrate von Nabaltec sind halogenfrei, umweltfreundlich und gänzlich ungefährlich. Die flammhemmenden Füllstoffe enthalten, im Gegensatz zu den halogenierten „Flammhemmern“, keine gesundheitsgefährdenden Substanzen.

Flammschutz mit Al-Metallhydraten

Eine Vielfalt von Flammschutzmitteln (APYRAL®, APYMAG®,...) wurden und werden kontinuierlich mit hohem Aufwand von Nabaltec industriell weiterentwickelt. Ergebnis ist ein



Schematische Darstellung der Vorgänge im Brandfall eines mit APYRAL® gefüllten Kunststoffs. Reduktion von Folgeschäden, z. B. durch deutliche Rauchgasminderung.



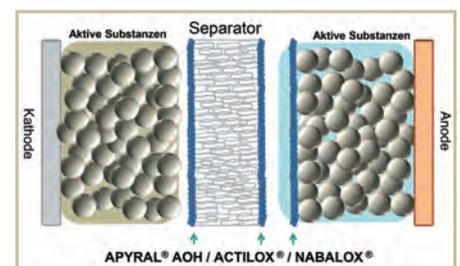
REM-Aufnahme APYRAL® 15.

stets wachsendes Produktportfolio mit unterschiedlichsten Korngrößenverteilungen, Zusammensetzungen, Mischungsverhältnissen und Oberflächenbeschichtungen. Der Einsatz kann in nahezu allen, sonst entflammaren, Kunststoffen, Farben und Lacken, erfolgen.

Die Verwendung von Standard-Metallhydraten alleine reicht mittlerweile für die enorme An-

zahl der Einsatzgebiete nicht mehr aus. Daher beschäftigt sich Nabaltec sehr intensiv mit weiterführenden Thematiken, insbesondere mit der Entwicklung und Markteinführung von z. B. feinstteiligen Böhmiten (AlOOH, ein Aluminium-Monohydrat).

Aluminiumhydrate finden zudem auch als Additive in der Katalyse und der Elektromobilität entsprechend großen Einsatz. Beispielsweise in Separatorenfolien, der hierfür genutzten Lithium-Ionen-Batterien.

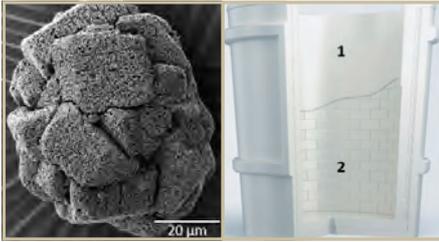


Separatorfolien einer Li-Ionen-Batterie mit Nabaltec-Produkten (APYRAL® AOH, NABALOX®...).

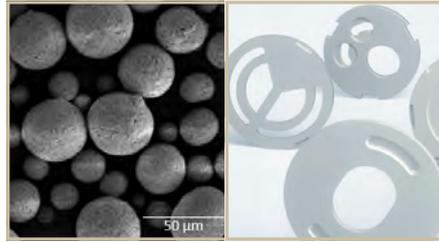
Spezialoxide

Als weitere Produktparte produziert Nabaltec u. a. Spezial-Aluminiumoxide (NABALOX®) für die technische Keramik sowie die Feuerfest- und Poliermittelindustrie. Das hochfeuerfeste α -Al₂O₃ (T_m > 2000 °C) wird mittels Kalzination bei unterschiedlichen Temperaturen (> 1000 °C) aus Al-Übergangsoxiden bei Nabaltec produziert.

Teilweise sortenrein oder in hochspezialisierten Homogenisierungen finden diese Aluminiumoxide, beispielsweise in Betonen und Steinen für die Feuerfestindustrie (z. B. Eisen-, Stahl-, Glas-Produktion), ihre weitläufigen



links: NABALOX®-Al₂O₃: NO 105-71.
rechts: Schematisierte Stahlpfanne mit feuerfester Auskleidung; Zone 1: NABALOX® in Betonen; Zone 2: NABALOX® in Steinen.



links: GRANALOX®-Sprühgranulate.
rechts: Wasserhahndichtscheiben aus gesinterter GRANALOX®-Keramik.

Einsatzgebiete. Durch ihre Verwendung werden die entsprechenden Produkte extrem hochtemperaturstabil (>1700 °C) und resistenter gegen aggressive Schlacken.

Zudem werden aus NABALOX®-Aluminiumoxiden Sprühgranulate (GRANALOX®) hergestellt. Diese werden weltweit für die Herstellung von technischer Hochleistungskeramik verarbeitet.

GRANALOX®- und NABALOX®-Produkte bieten auf höchstem Qualitäts- und Technologieniveau

die unterschiedlichsten Möglichkeiten der Formgebung. Weitere Nabaltec-Erzeugnisse für den Polier-, Bremsmittel- sowie für den Feuerfestsektor (NABACAST®, SYMULOX®) und viele mehr, runden das Produktportfolio ab.

„Forschung & Entwicklung ist für uns von zentraler Bedeutung und eine unserer Kernkompetenzen. Unsere F&E-Aktivitäten liefern immer wieder innovative Impulse, unsere eigenen – und damit auch die Produkte und Prozesse unserer Kunden – zu optimieren.“ (Dr. Reiner Sauerwein)

Nabaltec hat sich über viele Jahre eine hohe In-house-Kompetenz erarbeitet, die durch die Zusammenarbeit mit renommierten Forschungspartnern optimal ergänzt wird. So kooperieren wir in vielen Bereichen mit Universitäten, öffentlichen und privaten Institutionen, Forschungs- und Technologiegesellschaften. Für die Bereiche Entwicklung und Anwendungstechnik, Werkentwicklung und Verfahren sowie für unser Analysenzentrum bietet Nabaltec attraktive Praktika, Master- und Bachelorarbeiten an. Kontaktieren Sie uns!

KONTAKT

Nabaltec AG

Dr. Reiner Sauerwein
Bereichsleiter
Entwicklung/Anwendungstechnik
rsauerwein@nabaltec.de

Personalwesen
Alustraße 50 - 52
D-92421 Schwandorf
personalwesen@nabaltec.de

UNSER KNOW-HOW FÜR IHRE SICHERHEIT



Die **Nabaltec** AG mit Sitz in Schwandorf ist ein mehrfach ausgezeichnetes, innovatives Unternehmen der chemischen Industrie. Auf der Basis von Aluminiumhydroxid und Aluminiumoxid entwickelt, produziert und vertreibt **Nabaltec** hochspezialisierte Produkte für die Kunststoff-, Keramik- und Feuerfestindustrie weltweit.

Für die Bereiche Entwicklung und Anwendungstechnik, Werkentwicklung und Verfahren sowie unser Analysenzentrum bieten wir Praktika und Masterarbeiten an.

Haben wir Ihr Interesse geweckt?

Dann freuen wir uns auf Ihre aussagekräftigen Bewerbungen.

Nabaltec



Nabaltec AG
Personalwesen, Frau Glaser
Alustraße 50 - 52
92421 Schwandorf
Tel.: +49 9431 53-242
personalwesen@nabaltec.de
www.nabaltec.de

» Material- und Elektrodenentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien «

Das Institut für Angewandte Materialien – Keramische Werkstoffe und Technologien (IAM-KWT) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) befasst sich neben anderen Beiträgen zu keramischen Werkstoffen und Prozessen auch mit der Entwicklung von Materialien und Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien. Der Focus liegt dabei im Bereich der Synthese und Konditionierung von Elektrodenmaterialien, der Prozessierung der Elektrodenkomponenten bei der Elektroden- und Zellfertigung sowie der Etablierung von strukturanalytischen und in situ Methoden zur Material- und Elektrodencharakterisierung.

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind ein unverzichtbarer Energiespeicher in vielen tragbaren elektronischen und elektrischen Geräten. Die Vereinigung von hoher Energie- und Leistungsdichte, und einer langen Lebensdauer machen die Zellen nicht nur interessant für Mobiltelefone oder Power Tools, sondern bilden auch die Voraussetzung für die Verwendung entsprechender Batterien in der Elektromobilität oder für stationäre Speichersysteme. Vor allem vor dem Hintergrund der aktuellen Feinstaub- und Dieselstickoxid-Diskussion könnte die stärkere Verbreitung von Elektrofahrzeugen zu einer spürbaren Entlastung der Innenstädte führen. Derzeit spielen elektrisch angetriebene Privat- und Nutzfahrzeuge im Straßenverkehr allerdings nur eine Nischenrolle. Neben der noch fehlenden Ladeinfrastruktur sind es vor allem die Reichweitendiskussion und die erhöhten Anschaffungskosten, die viele Verbraucher vom Kauf abhalten. Obwohl die Kosten für LIB auf Zellebene in den letzten Jahren drastisch gefallen sind [1], bildet die Batterie immer noch die teuerste Komponente in einem Elektrofahrzeug. In stationären privaten und industriellen Anlagen sind größere Speichereinheiten auf Basis von LIB derzeit ebenfalls nur wenig anzutreffen. Wenngleich sie dort eine zentrale Rolle bei der Netzintegration von erneuerbaren Energien spielen könnten, stellen die hohen Investitionskosten die wichtigste Hürde für den Nutzer dar.

Werkstoffentwicklung und Werkstoffprozess-technik können an vielen Stellen Beiträge zur

weiteren Leistungsverbesserung und Kostenreduzierung liefern, z. B. durch die Entwicklung und Integration kostengünstigerer Materialien und Fertigungsverfahren. Auch die Erhöhung der Speicherkapazität oder der Zuverlässigkeit kann mittelbar zu einer Kostenersparnis führen, wenn sie zu einer Reduzierung der Batteriegröße genutzt wird oder zu verringerten Ausfallraten in Produktion und Einsatz führt. Der nachfolgende Beitrag gibt eine Übersicht über den derzeitigen Stand und über zukünftige Entwicklungen bei der Entwicklung und Prozessierung von Materialien für Elektroden von LIB. Er bezieht dabei aktuelle Entwicklungsarbeiten mit ein, die am Institut für Angewandte Materialien – Keramische Werkstoff-

fe und Technologien (IAM-KWT) auf diesem Gebiet durchgeführt werden.

Die Elektroden, d. h. Anode und Kathode, stellen die wichtigsten Funktionselemente einer Batterie dar. Bei LIB bestehen die Elektroden aus verschiedenen keramischen Pulvern, die als poröse Schicht auf eine metallische Trägerfolie aufgetragen sind (**Abb. 1**). Zentraler und volumenmäßig größter Bestandteil der Beschichtung ist das Aktivmaterial. Dort werden die Ladungsträger in jedem Zyklus ein- und ausgebaut. Anodenseitig stellt Graphit derzeit das Standardmaterial dar, während auf der Kathodenseite Lithium-Metall-Oxide als Quelle für die Lithium-Ionen zum

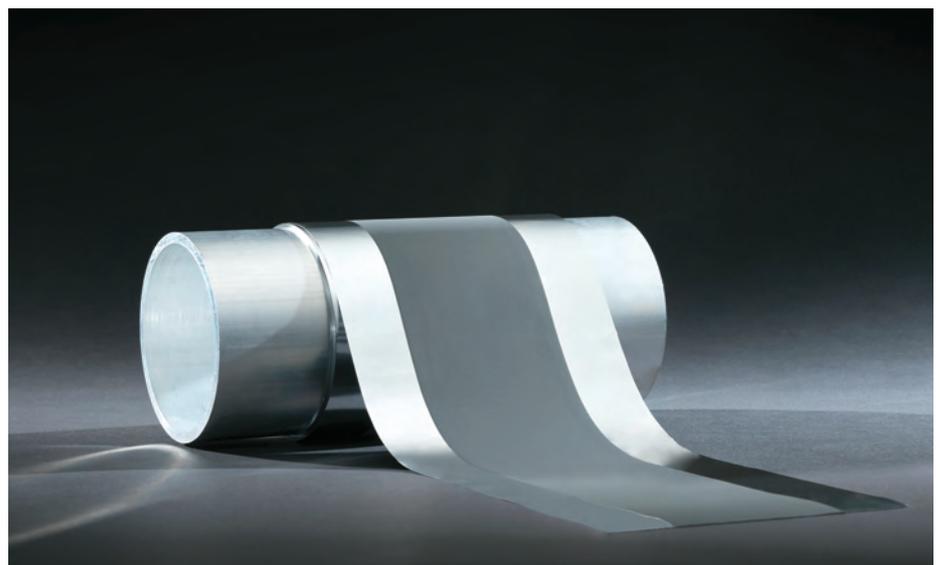


Abbildung 1: Kathodenbeschichtung auf einer Trägerfolie aus Aluminium.

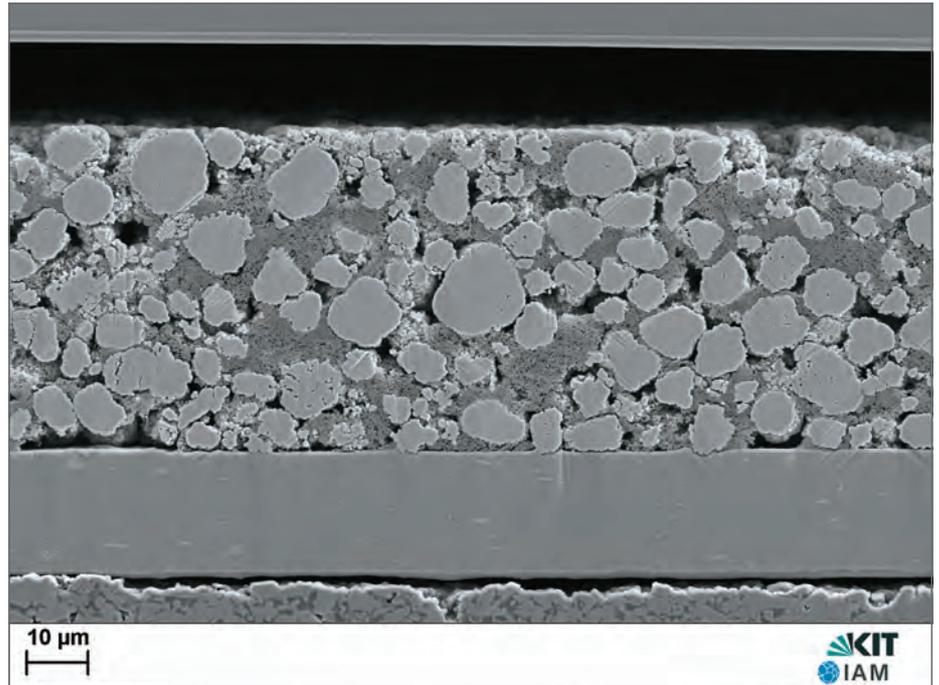
Einsatz kommen. Daneben finden sich noch weitere, inaktive Komponenten, wie ein Binder, der die Partikel zusammenhält und Ruß, der zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit zugegeben wird (**Abb. 2**). Diese Additive besitzen selbst keine Speicherfunktion, beeinflussen die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Batterie praktisch aber in gleichem Maße wie die Aktivmaterialien, da sie darüber bestimmen, wie effizient die Aktivmaterialien genutzt werden können.

Aktivmaterialien

Die erreichbare Energiedichte von LIB wird zunächst durch die verwendeten Aktivmaterialien bestimmt und hängt von deren Kapazität und Masse sowie von der Potentialdifferenz zwischen dem Anoden- und Kathodenmaterial ab. Im Gegensatz zum Bleiakкумуляtor, bei dem die Zellchemie klar definiert ist, gibt es bei den Lithium-Ionen-Batterien eine Vielzahl an unterschiedlichen Kombinationen von Anoden- und Kathodenmaterialien, die zu unterschiedlichen Zelleigenschaften führen. Neben der Energiedichte spielen u.a. die Leistungsdichte, Sicherheit, Lebensdauer und Kosten für die Auswahl der Aktivmaterialien eine Rolle.

Anodenmaterialien

In kommerziell erhältlichen wieder aufladbaren Lithium-Ionen Akkumulatoren wird derzeit vor allem Graphit als Anodenmaterial verwendet. Graphit stellt momentan einen optimalen Kompromiss dar zwischen einerseits den elektrochemischen Eigenschaften, sowie andererseits Rohstoffpreisen und Verfügbarkeit. Graphit ist ein Interkalationsmaterial, bei dem die Lithium-Ionen zwischen die schwach gebundenen Basalebene des Graphitgitters eingebaut werden. Mit einer theoretischen Kapazität von 372 mAh/g (entsprechend der Interkalationsverbindung LiC_6) übertrifft Graphit damit die meisten aktuellen Kathodenmaterialien. Graphit findet sowohl als Naturgraphit als auch als synthetischer Graphit Verwendung in LIB. Ersterer ist zum einen aus Kostengründen interessant, er zeichnet sich – bedingt durch die langsame geologische Entstehung – aber auch durch große kristalline Bereiche aus, die den Einbau der Li-Atome begünstigen. Dennoch wird häufig synthetischem Graphit der Vorzug gegeben, da sich dessen Eigenschaften stärker beeinflussen lassen. Zur Herstellung von synthetischem Graphit dienen kohlenstoffreiche



Rückstände der Erdöldestillation (Petrolpeche). Tritt bei der Pyrolyse der Kohlenstoff-Precursoren eine Flüssigphase auf, können sich geordnete Bereiche ausbilden, die die spätere Graphitstruktur vorgeprägt haben (Soft Carbons). Eine anschließende Hochtemperaturbehandlung bei 2800-3000 °C treibt verbliebene Heteroatome aus und bildet die geordnete Schichtstruktur des Graphits, wodurch synthetische Graphite eine höhere Reinheit als Naturgraphite aufweisen. Sowohl Natur- als auch synthetische Graphite bilden aufgrund ihrer markanten Schichtstruktur plättchenförmige Partikel. Über Mahlprozesse wird die Partikelgröße in Bereiche von 10-20 µm eingestellt, vor allem aber auch eine Verrundung angestrebt, die zu einer gleichförmigeren Orientierung der Graphit-Basalebene in der Elektrode führt.

Eine nahezu perfekt sphärische Morphologie weisen die sogenannten Meso-Carbon Micro-Beads (MCMB) auf, die ebenfalls den Soft Carbons zuzurechnen sind. Die Pyrolyse von Pechen kann so gesteuert werden, dass sich in einer isotropen Matrix flüssigkristalline Bereiche aus Polyaromaten-Mesophase ausbilden (Spherolite), ohne dass diese zu einem Koks koaleszieren. Aufgrund einer aufwändigen Isolierung der Spherolite und der Notwendigkeit einer anschließenden Stabilisierungs- und Graphitisierungsbehandlung sind die Herstellungskosten höher, was dazu geführt

Abbildung 2: Querschnitt durch die Kathode einer Lithium-Ionen-Batterie (Große Partikel: Aktivmaterial, kleine Partikel: Leitruß, unten: Aluminiumfolie)

hat, dass sich dieses Material trotz ausgezeichneter elektrochemischer Eigenschaften nicht durchgesetzt hat.

Von Hard Carbons spricht man, wenn aufgrund von dreidimensionaler Vernetzung die Pyrolyse mancher Kohlenstoff-Precursoren, wie etwa Phenolharze, im festen Zustand stattfindet. Durch die fehlende Ausrichtung größerer Bereiche auf molekularer Ebene werden Hard Carbons auch bei Hochtemperaturbehandlung nicht graphitisch. Dies bedeutet, es liegen nur begrenzte kristalline Bereiche vor (Nahordnung) aber keine Fernordnung. Als Anodenwerkstoff sind Hard Carbons dennoch von Interesse: Der Ein- und Ausbau von Lithium ist mit geringeren Volumenänderungen verbunden und aufgrund einer niedrigeren Dichte kann Lithium nicht nur interkaliert, sondern auch in Mikroporen gespeichert werden, was zu Kapazitäten bis zu 500 mAh/g führt. Allerdings treten bei diesen Materialien hohe irreversible Verluste am Beginn der Nutzung auf, wodurch die im Betrieb verfügbare Kapazität deutlich geringer ausfällt. Darüber hinaus lassen sich mit Hard Carbons nur geringe Strombelastungen erreichen, da der Lithium-Transfer deutlich langsamer ist.

Ebenfalls bereits in kommerziellen LIB etabliert ist, trotz des für ein Anodenmaterial vergleichsweise hohen Standardpotentials und einer geringen Kapazität, Lithiumtitanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO). LTO ist mit einer Volumenänderung während des Zyklierens von nur 0,2 % der bekannteste Vertreter der sogenannten *zero-strain* Elektrodenmaterialien. Der *zero-strain* Mechanismus basiert beim LTO auf einer Zweiphasenreaktion und hängt mit der reversiblen Variation der Bindungslängen in den LiO_6 -Oktaedern der gebildeten zweiten Phase sowie der Idealisierung der ursprünglich verzerrten TiO_6 -Oktaeder zusammen, so dass der Zellparameter stabilisiert wird. Strukturelle Deformationen (strains) des Aktivmaterials während der Interkalation bzw. Deinterkalation des Lithiums führen normalerweise zu Mikrorissbildung und Aufbrechen der Partikel sowie zu Kapazitätsverlusten in Folge fehlender elektronischer Anbindung. Durch die Verwendung von Aktivmaterialien mit *zero-strain* Effekt kommt es folglich zu einer deutlichen Verbesserung der Zyklenbeständigkeit.

Zur Erhöhung der Energiedichte bieten sich anodenseitig die Verwendung von Lithium oder Silizium an, die eine um den Faktor 10 höhere theoretische Kapazität aufweisen als die Graphite. Lithiummetall ist aufgrund des geringen Standardpotentials und der hohen theoretischen Kapazität von 3,86 Ah/g ein ideales Anodenmaterial und wird deshalb auch in Primärzellen verwendet. In Sekundärzellen bildet sich jedoch während des Ladens metallisches Lithium, das zu nadelförmigen Ablagerungen, sogenannten Dendriten, führt. Werden diese Dendriten so lang, dass sie eine leitende Verbindung zwischen den Elektroden herstellen, kommt es zum Kurzschluss, der das katastrophale Versagen der Batterie einleiten kann. Auch bei der Verwendung von Silizium als Anodenmaterial ist die Lebensdauer, die durch eine Volumenänderung von bis zu 400 % während des Ladens und Entladens und den damit verbundenen Spannungen aktuell sehr begrenzt ist, ein limitierender Faktor. Des Weiteren beeinflusst die langsame Lithiumdiffusionskinetik in Silizium und die niedrige elektrische Leitfähigkeit den alleinigen Einsatz von Silizium als Anodenmaterial. Derzeit wird aber an der Realisierung von Kompositen aus Silizium und Kohlenstoff gearbeitet. Sie ermöglichen eine vorteilhafte Kombination der beiden Materialeigenschaften,

wie die hohe Kapazität von Si und die ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften sowie die sehr gute Leitfähigkeit von C, wodurch Si/C-Komposite vielversprechende Anodenmaterialien für zukünftige LIB sind. Die Leistungsfähigkeit solcher Si/C-Komposite hängt wesentlich vom Komposit-Design und somit vom Herstellungsprozess ab; hierbei kommen sehr unterschiedliche Synthese- und Prozesstechnologien wie z.B. Mahlverfahren zum Einsatz [2]. Hinsichtlich der Energiedichte der Gesamtbatterie führen bereits 30 % Silizium in einem Si/C-Komposit zu einer Steigerung um ca. 25 %; Batteriezellen mit reinen Si-Anoden würden demgegenüber theoretisch nur ca. 33 % höhere Energiedichten im Vergleich zu Graphitanoden aufweisen. Erst wenn die Kapazitäten im Kathodenbereich signifikant steigen, würde die Verwendung von Anoden mit einer höheren Kapazität zu einer merklichen Verbesserung der Energiedichte der Gesamtbatterie führen.

Kathodenmaterialien

Kathodenmaterialien sind typischerweise Oxide von Übergangsmetallen, die bei der Delithierung während des Ladens zu höheren Valenzen oxidieren, wie z.B. Lithium-Cobalt-Oxid (LiCoO_2 , LCO); hierbei ist die strukturelle Stabilität über weite Bereiche der Zusammensetzung eine Anforderung an die Kristallstruktur von Kathodenmaterialien. Obwohl LCO ein erfolgreiches Kathodenmaterial ist, wird es aktuell nicht zuletzt aufgrund der vergleichsweise geringen Verfügbarkeit von Kobalt und des zunehmenden Rohstoffpreises

durch Materialien mit anderen Übergangsmetallen wie Mangan, Nickel oder Eisen abgelöst. So ist beispielsweise LiNiO_2 kostengünstiger und hat eine höhere Energiedichte, es ist aber auch weniger stabil. In den letzten Jahren wurde insbesondere das System LiNiO_2 - LiCoO_2 - LiMnO_2 sehr intensiv untersucht. Die derzeit am häufigsten verwendete Zusammensetzung enthält gleiche Mengen der drei Übergangsmetalle, $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$ (NCM111) und hat eine hohe Kapazität, eine gute Leistungsdichte und kann bei hohen Spannungen arbeiten. Nicht zuletzt die ausgezeichneten elektrochemischen Eigenschaften führten dazu, dass es ein weit verbreitetes Kathodenmaterial für LIB ist. Die Leistungsfähigkeit und Alterung hängt dabei stark von der Morphologie und dem Gefüge des Materials ab. Ein Grund für die Degradation von NCM-Materialien während des Zyklierens ist die Rissbildung innerhalb der typischerweise aus Primärkristalliten aufgebauten Sekundärpartikel, die durch mechanische Spannungen an den Grenzflächen zwischen den Primärkristalliten verursacht wird. Für Ni-reiche NCM-Materialien, die aufgrund der hohen spezifischen Kapazität sehr interessant sind, ist diese intrinsische Degradation durch signifikante anisotrope Gitteränderungen bei hohen Ladungszuständen beschleunigt [3]. Dieser Degradationsmechanismus kann zumindest für NCM111-Materialien verringert bzw. vermieden werden, wenn nanostrukturierte, poröse Materialien, die z.B. über Nanomahlen, Sprühtrocknung und Sintern hergestellt werden (Abb. 3), verwendet werden [4].

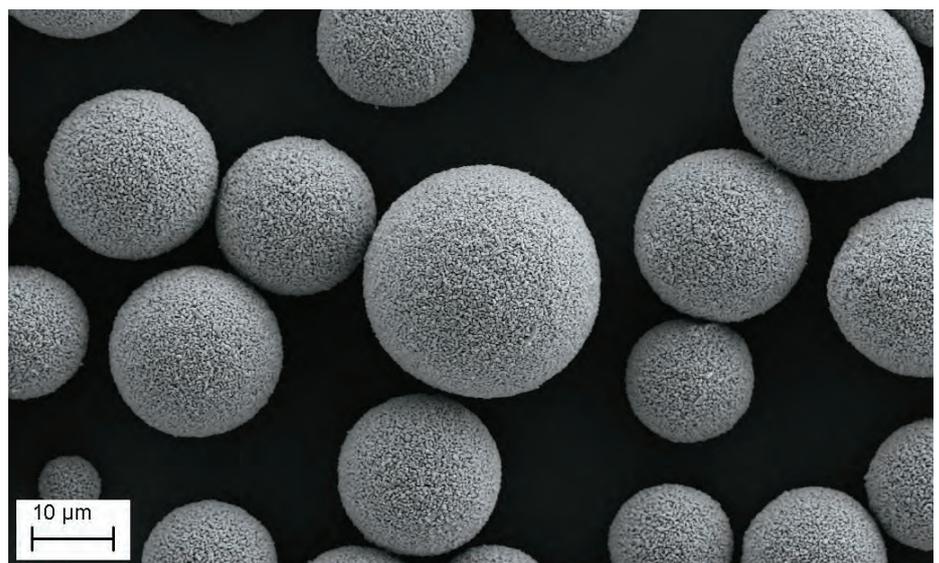


Abbildung 3: REM-Aufnahme (Streupräparat) von porösen, nanostrukturierten NCM-Kathodenmaterialien.

Material	E / V	$Q_{th} / \text{Ah}\cdot\text{kg}^{-1}$ *	$W_{th,Li} / \text{Wh/kg}$	$W_{th,C} / \text{Wh/kg}$
$\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$	4,7	147	666	485
LiMn_2O_4	4,0	148	570	413
$\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$	3,6	167	576	403
LiCoO_2	3,7	137	490	360
LiFePO_4	3,5	170	570	397

*basiert auf die Deinterkalation von 1 Li pro Mol bei LNMO, LMO und LFP bzw. 0,6 Li pro Mol bei NCM bzw. 0,5 Li pro Mol bei LCO.

Ein weiteres vielversprechendes Kathodenmaterial ist der Mangan-Spinell (LiMn_2O_4 , LMO). Im Gegensatz zu der 2D-Schichtstruktur der NCM-Materialien besitzt der Spinell ein dreidimensionales Netzwerk mit Kanälen, die eine beschleunigte Lithiierung bzw. Delithiierung erlauben. LMO ist kostengünstiger und sicherer als LCO, hat aber auch eine geringere Kapazität. Deutlich höhere Energiedichten können mit den sogenannten Hochvoltspinellen erzielt werden, bei denen z.B. Mangan durch Nickel substituiert wird ($\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$, LNMO). Das Redoxpaar $\text{Ni}^{4+}/\text{Ni}^{2+}$ hat eine Ladespannung von ca. 4,7 V vs. Li^+/Li im Vergleich zu ca. 4,0 V vs. Li^+/Li für den LiMn_2O_4 -Spinell (siehe Tabelle 1). Die elektrochemischen Eigenschaften des LNMO-Spinells werden durch die Morphologie und Partikelgröße beeinflusst, die durch die Zusammensetzung und Synthesebedingungen bestimmt werden. So bilden sich neben den bevorzugten {111}-Flächen, die zu den typischen oktaedrischen Kristalliten führen, durch Dotierungen oder zu schnellem Abkühlen zusätzlich {110}-Flächen aus, die am anfälligsten für die Lösung von Mn^{2+} -Ionen, welche bei der Disproportionierung von Mn^{3+} -Ionen entstehen, sind. Die Herstellung von Nanopartikeln erhöht zwar deutlich die Leistungsfähigkeit des Hochvoltspinells, allerdings führt die erhöhte Oberfläche auch zu einer beschleunigten Degradation der Zelle aufgrund der stattfindenden Nebenreaktionen mit dem Elektrolyten. Der Einsatz von zu großen Primärpartikeln ($> 1 \mu\text{m}$) führt wiederum aufgrund der Spannungen innerhalb der Kristallite während des Zyklierens zu Rissbildung und somit ebenfalls zu einer Alterung der Zelle. Die elektrochemischen Eigenschaften und die Stabilität der Hochvoltspinelle können positiv durch Dotierungselemente beeinflusst werden. So führen Fe- oder Co-Dotierungen zu einer Verbesserung der elektrochemischen Performance. Ti- und Ru-Dotierung verbessern

die strukturelle Stabilität; Eisen und vor allem Ruthenium führen zudem zu einer verbesserten elektronischen Leitfähigkeit. Insgesamt weisen die HV-Spinelle sehr attraktive Eigenschaften auf, allerdings besteht aktuell das Problem, dass noch kein geeigneter, hochvoltstabiler Elektrolyt verfügbar ist.

LiFePO_4 (LFP), das bekannteste Kathodenmaterial der Lithiumübergangsmetallphosphate, wird in kommerziellen Batteriezellen vor allem unter Sicherheitsaspekten und der geringen Kosten eingesetzt. Zielmarkt solcher Batteriezellen sind vor allem großvolumige Batterien für Elektrofahrzeuge und Energiespeicher für Haushalte. Die Batterieleistung von LFP wird allerdings durch die geringe elektronische Leitfähigkeit und langsame Li-Festkörperdiffusion begrenzt. Deshalb spielt das Materialdesign zur Erzielung leistungsfähiger Zellen eine ganz wesentliche Rolle. Neben der Verringerung der Partikelgröße ist bei Lithiumeisenphosphat das Beschichten der Partikel mit Kohlenstoff zur Verbesserung der elektronischen Leitfähigkeit essentiell. Hierbei wird ein möglichst geringer Kohlenstoffanteil angestrebt. Solche LiFePO_4/C -Komposite können ausgehend von verschiedenen Kohlenstoffquellen, wie z.B. Polymere, Zucker etc., und mit unterschiedlichen Prozesstechnologien hergestellt werden. Dabei sind neben der Verbesserung der elektronischen/elektrochemischen Eigenschaften aber auch die Verarbeitungseigenschaften, wie z.B. die Klopfdichte zu beachten. Die Realisierung von hierarchisch strukturierten Kompositmaterialien ist insbesondere bei den polyanionischen Kathodenmaterialien im Fokus aktueller Forschung. Mit neuartigen Phosphaten oder Silikaten ist bei gleichbleibend guter Stabilität eine deutliche Erhöhung der Energiedichte angezielt. Eine Erhöhung der spezifischen Energiedichte auf Materialebene durch die Verbesserung der Aktivma-

Tabelle.1: Spannung E vs. Li^+/Li und die spezifische Kapazität Q_{th} von unterschiedlichen Kathodenmaterialien, sowie die berechneten spezifische Energien (auf Materialebene) von entsprechenden Zellen mit Lithiummetallanode $W_{th,Li}$ bzw. Graphitanode $W_{th,C}$.

terialien muss aber auch durch eine geeignete Elektrodenfertigung auf die Zellebene transferiert werden können.

Inaktive Materialien

Binder

Neben dem Aktivmaterial besteht eine Elektrode noch aus Binder und Leitfähigkeitsadditiven. Da die Diffusionsgeschwindigkeit der Lithium-Ionen in den Aktivmaterialien ein leistungsbegrenzendes Element darstellt, werden Elektroden nicht als dichte, sondern als poröse Schicht ausgeführt, die mit dem Elektrolyten getränkt ist. Hierdurch wird ein ausreichend schneller Zugang der Lithium-Ionen zum Elektrolyten ermöglicht. Die pulverförmigen Elektrodenmaterialien werden dabei durch einen Binder zusammengehalten, der gleichzeitig auch die Haftung der Schicht auf dem metallischen Trägerfilm – Kupfer bei der Anode, Aluminium bei der Kathode – übernimmt. Neben guten Haftungseigenschaften muss der Binder eine ausreichende elektrochemische Stabilität über den gesamten Spannungsbereich der Zelle aufweisen und er sollte eine möglichst hohe chemische und thermische Beständigkeit besitzen. Aus diesem Grund hat sich das thermoplastische Fluorpolymer Polyvinylidendifluorid (PVDF) als Standardbinder für viele LIB etabliert. Die leistungsfähigsten PVDF-Binder sind hochreine Homopolymere, die ein Molekulargewicht in der Größenordnung von 1.000.000 g/mol aufweisen. Die hohe chemische Stabilität erweist sich aber als nachteilig bei der pastenbasierten Auftragung der Beschichtung, da

nur wenige Lösemittel eine ausreichende Löslichkeit für PVDF besitzen. Zum Einsatz kommt hierfür N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP), das aber aufwendige Maßnahmen für Explosions- und Arbeitsschutz aufgrund seiner Brennbarkeit und seiner Einstufung als Gefahrstoff erfordert. Um die damit verbundenen Kosten zu vermeiden, wird an der Verwendung von Wasser als Lösemittel gearbeitet. Dies bedingt wiederum, dass wasserlösliche Binder zum Einsatz kommen, wie z.B. Natrium-Carboxymethylcellulose (CMC), die in Salzform eine gute Wasserlöslichkeit besitzt. Für die Anwendung als Anoden- oder Kathodenbinder stehen unterschiedliche Typen zur Verfügung, die sich primär im Substitutionsgrad unterscheiden. CMC wirkt stark viskositätserhöhend. Um dennoch möglichst hohe Feststoffkonzentrationen in der Beschichtungspaste zu erreichen, muss man die Menge an CMC begrenzen und stattdessen einen Latexbinder zusetzen, da partikelbasierte Latexbinder nur einen geringen Einfluss auf die Viskosität haben. Latexbinder sind allerdings alleine nicht in der Lage, das rheologische Verhalten der Paste geeignet einzustellen, weshalb die gemeinsame Anwendung mit der CMC erforderlich ist. Der Latexbinder besteht üblicherweise aus einem Styren-Butadien-Kautschuk (SBR), wobei auf der Kathodenseite auch Fluor-Acryl-Copolymere aufgrund ihrer besseren Stabilität bei hohen Spannungen zum Einsatz kommen können. Weitere wasserlösliche Binder befinden sich derzeit in der Entwicklung. Erfolgversprechend sind z.B. Polymere auf Alginatbasis, die sich durch eine verbesserte Flexibilität auszeichnen. Polyacrylsäure (PAA) besitzt ebenfalls interessante Bindereigenschaften, da sie in der Lage ist, stabile chemische Bindungen zu dem oxydischen Aktivmaterial über eine Polykondensationsreaktion aufzubauen. Die dadurch verbesserte Haftung ist vor allem bei Aktivmaterialien mit starken Volumenänderungen, wie sie z.B. bei Siliziumanoden auftreten, von Vorteil [5].

Wässrige Verarbeitung

Trotz der wirtschaftlichen Vorteile bei der Elektrodenherstellung kommt die wässrige Verarbeitung im industriellen Umfeld aktuell nur bei der Anodenherstellung zum Einsatz. Dort ist sie dabei, den NMP-Prozess vollständig zu verdrängen. Bei den Kathoden findet man sie dagegen noch kaum in der Produktion vertreten. Verantwortlich hierfür ist die

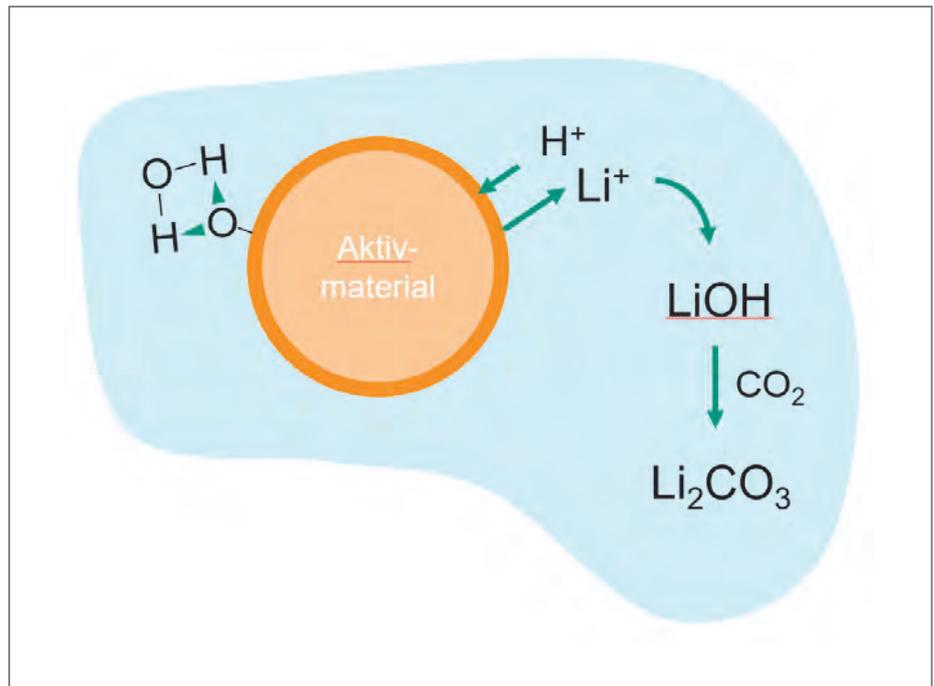


Abbildung 4: Hydroxylierung und Protonenaustausch bei Kathodenmaterialien in wässriger Umgebung.

Reaktionsfähigkeit der Kathodenmaterialien mit Wasser, während der in der Anode verwendete Graphit keine vergleichbare chemische Wechselwirkung zeigt. Am IAM-KWT wurden die Auswirkungen dieser Reaktionen für die Elektrodenentwicklung untersucht. Beim Kontakt der Kathodenmaterialien mit Wasser kommt es zu einem Ionenaustausch, bei dem Lithium-Ionen in Lösung gehen und durch Protoneneinbau ersetzt werden. Das Lithium bildet in Lösung Lithiumhydroxid, das bei Kontakt mit Kohlendioxid als Lithiumcarbonat ausfällt (Abb. 4). Dieses Lithium fehlt danach im Kathodeninventar, wodurch es zu einer Erniedrigung der Zellkapazität im Bereich einiger Prozentpunkte kommt. Durch die Hydroxidbildung kommt es weiterhin zu einem starken Anstieg des pH-Werts in der Paste. Beim Auftragen der basischen Paste auf die Aluminiumfolie wird die schützende Oxidhaut zerstört und es kann zur Zersetzung des Aluminiums und zur Freisetzung von Wasserstoffblasen kommen. Die dabei entstehenden Al^{4+} -Ionen in der Lösung und Gasblasen in der Schicht wirken sich nachteilig auf die Eigenschaften der Kathode aus. Aktuelle Ansätze, diese Schwierigkeiten zu umgehen, bestehen z.B. darin, die Aktivmaterialien mit einem Coating zu versehen, das einen direkten Kontakt mit Wasser verhindert [6]. Diese Maßnahmen zeigen bisher allerdings nur eine

eingeschränkte Wirksamkeit, da die Beschichtungen häufig fehlerbehaftet sind oder den Ladungstransport zu stark beeinträchtigen. Zur Unterdrückung der Aluminiumzerersetzung kann auch eine dünne leitfähige Kohlenstoffschicht auf die Metalloberfläche aufgetragen werden. Obwohl dies die basische Reaktion unterbindet, ist die zusätzliche Kohlenstoffschicht aus wirtschaftlichen Gründen unerwünscht, da sie zu einer Erniedrigung der Energiedichte führt. Der direkte Ansatz, den pH-Wert der Paste durch die Zugabe einer Säure zu reduzieren, hat sich bisher ebenfalls als problematisch erwiesen, da durch den Säurezusatz die Haftfestigkeit der Elektroden auf der Metallfolie drastisch erniedrigt wird und sich zusätzlich die Kapazität der Zelle verschlechtern kann. Bevor die wässrige Verarbeitung von Kathodenschichten breite industrielle Anwendung findet, müssen daher noch weitere Anstrengungen unternommen werden, um die Auswirkungen der Aktivmaterialhydrolyse und der Aluminiumkorrosion zu beseitigen.

Leitfähigkeitsadditive

Eine weitere inaktive Elektrodenkomponente sind die Leitfähigkeitsadditive. Sie sind notwendig, da die Kathodenmaterialien häufig eine niedrige elektrische Leitfähigkeit besitzen. Daher müssen zusätzliche Leitungspfade

innerhalb der Elektrode geschaffen werden, um einen vollständigen Ladungsausgleich zu gewährleisten. Dies wird üblicherweise durch die Zugabe von Rußpartikeln zur Elektrode erreicht. Andere Kohlenstoffmodifikationen, wie Graphit oder Kohlenstofffasern können ebenfalls für diesen Zweck verwendet werden. Allerdings kommt hierfür ein anderer Graphit zum Einsatz als in der Anode. Während der Anodengraphit aus möglichst stabilen kugelförmigen Partikeln bestehen sollte, ist es bei der Verwendung als Leitfähigkeitsadditiv erforderlich, dass der Graphit leicht in dünne Plättchen delaminiert. Solche Plättchen lassen sich besser innerhalb der Elektrodenporen verteilen, wo sie für zusätzliche Strompfade sorgen sollen. Der Graphit ist so für die Fernwirkung zuständig, während eine lokale Anbindung an die Aktivmaterialien effizienter durch den feineren Ruß erreicht wird. Weitreichende Leitstrukturen lassen sich auch mit Kohlenstofffasern aufbauen. Gegenüber dem plättchenförmigen Graphit besitzen sie sogar den Vorteil, dass sie die Poren nicht für den Lithiumtransport blockieren, was sonst zu Leistungseinbrüchen bei erhöhten Stromraten führt. Faserförmige Stoffe werden aber von den meisten Herstellern aufgrund ihrer potentiellen toxikologischen Wirkung nicht gern in der Produktion gesehen. In wissenschaftlichen Publikationen finden sich häufig auch Carbon Nanotubes oder Graphen als Leitfä-

higkeitsadditiv. Obwohl die hervorragenden elektrischen Eigenschaften eine verbesserte Effizienz versprechen, tragen diese Materialien die Nachteile der dickeren Plättchen und Fasern in sich und dürften vor allem aufgrund der enormen Kosten in absehbarer Zeit keinen Eingang in industrielle Produkte finden.

Binder-Ruß-Cluster

Eine zentrale Bedeutung für die Wirksamkeit der inaktiven Komponenten hat auch deren Position innerhalb der Elektrode. Obwohl makroskopisch eine möglichst homogene Verteilung anzustreben ist, ist es auf mikroskopischer Ebene von Vorteil, eine gezielte Aggregation und Lokalisierung zu erreichen. Eine perfekte Deagglomeration und Homogenisierung des Rußes ist sogar unerwünscht, da sie zu isolierten Partikeln ohne elektrische Anbindung führen würde. Die Aggregation der Rußpartikel in Form kettenförmiger oder vernetzter Strukturen bietet hier wesentlich günstigere Voraussetzungen, um eine vollständige elektrische Kontaktierung der Aktivmaterialien mit möglichst geringer Rußmenge zu erreichen. Zur Erhöhung der Haftfestigkeit kann der Binder bevorzugt dann beitragen, wenn er sich zwischen den Partikeln befindet, während Binder in den Porenräumen hauptsächlich die Ionendiffusion behindert. Andererseits stellt der Binder einen elektrischen Isolator dar, der den direkten Elektronenfluss

zwischen den Partikeln unterbindet. An dieser Stelle kommt die spezifische Wechselwirkung zwischen Ruß und Binder zum Tragen, die ein Funktionieren der Zelle erst ermöglicht. Ruß und Binder bilden dabei Cluster, die gleichzeitig adhäsive und elektrische Eigenschaften besitzen (**Abb. 5**). Die Rußpartikel müssen so in den Binder eingebettet sein, dass eine leitfähige Perkolationsstruktur entsteht, die die isolierende Binderschicht elektrisch überbrückt. Voraussetzung ist ein ausreichender Anteil an Rußpartikeln und die Benetzung durch den Binder, da es sonst zur Bildung von dicken Binderschichten kommt, die elektronisch nicht durchtunnelt werden können. Im Verständnis der Struktur und der Verteilung dieser Cluster liegt eine wesentliche Voraussetzung dafür, das Verhalten von LIB erklären zu können.

Multifunktionale Additive

Der Anteil an inaktiven Bestandteilen sollte so gering wie möglich gehalten werden, da sie zur Gesamtmasse, aber nicht zur Kapazität beitragen, d.h. sie reduzieren die spezifische Energie der Zelle. Dazu kommt die Problematik, dass jede zusätzliche Komponente in der Elektrode sich negativ auf Zeleigenschaften auswirken kann. Konsequenzen müssen sich dabei nicht sofort nach der Fertigung zeigen, sondern können z.B. auch zu einer beschleunigten Alterung führen. Bei der Auswahl der inaktiven Komponenten ist es daher von Vorteil, wenn Materialien mehrere Funktionen abdecken und dadurch auf die Zugabe weiterer Stoffe verzichtet werden kann. So werden sowohl PVDF als auch CMC nicht nur wegen ihrer Binderwirkung in der Elektrode eingesetzt, sondern auch weil sie in der Lage sind, die Re-Agglomeration der Rußpartikel in der Dispersion zu unterbinden (**Abb. 6**). Auf die Verwendung von zusätzlichen Dispergierhilfsmitteln kann daher verzichtet werden. Die sonst üblichen Tenside wirken sich zwar günstig auf das Fließverhalten der Pasten aus, sie führen aber gleichzeitig zu einer ausgeprägten Reduzierung der Haftfestigkeit, die eine Weiterverarbeitung der Schichten massiv erschwert. Die Stabilisierung der Rußpartikel beruht auf Immobilisierung durch Anhaftung an die Polymerketten des Binders. Diese Wechselwirkung bildet auch die Basis für die Entstehung eines Gels in der Dispersion. Ein Gelnetzwerk entsteht durch Brückenbildung von Polymerketten mit Hilfe der feinen Rußpartikel. Ein sta-

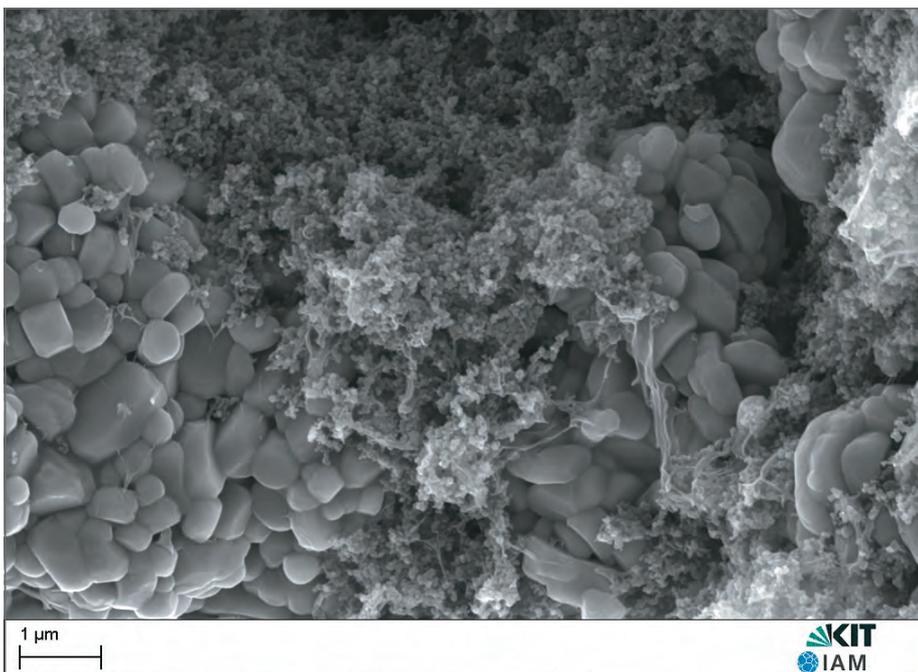
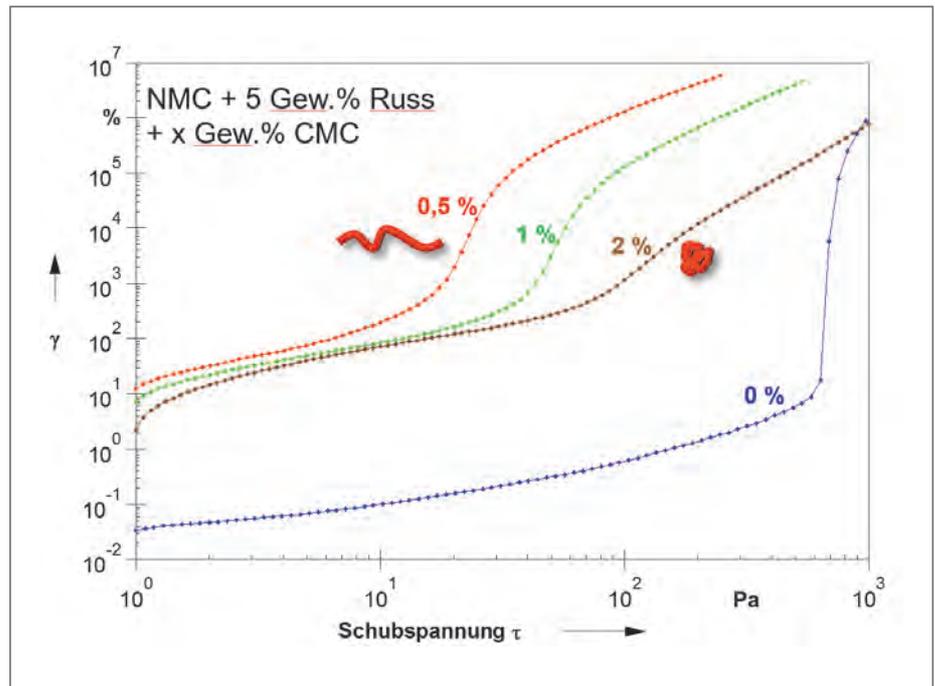


Abbildung 5: REM-Aufnahme einer Binder-Ruß-Struktur.

Abbildung 6: Fließverhalten von Rußdispersionen mit unterschiedlichem CMC-Gehalt. Eine geringe Menge des Polyelektrolyts erhöht die Fließfähigkeit drastisch, weitere Zugabe reduziert die Viskosität durch Verschlaufung der Polymerketten wieder.

biles Gelnetzwerk kann dabei nicht nur Agglomeration verhindern, sondern auch die Sedimentation der schweren Aktivmaterialien in der Paste unterdrücken, was sich ebenfalls günstig auf die Homogenität der Elektroden auswirkt.

Eine vollständige Umhüllung der Aktivmaterialien mit dem Binder stellt ein Hindernis für den Ladungstransport dar. Andererseits wird dadurch auch ein direkter Kontakt des Aktivmaterials mit dem Elektrolyten verhindert. Hierdurch bietet sich eine theoretische Möglichkeit, um unerwünschte Reaktionen, wie Elektrolytzersetzung oder Formierungsverluste, zu vermeiden („Künstliche SEI“). Im Gegensatz zu anorganischen Beschichtungen würde eine Polymerschicht in begrenztem Umfang auch Volumenänderungen der Partikel mitmachen ohne zu zerbrechen. Sollte es gelingen, die Schichten zuverlässig stabil und ausreichend durchlässig für Ladungsträger zu gestalten, würde das Funktionsspektrum des Binders noch um eine weitere Aufgabe erweitert, die die Einsatzfähigkeit vieler Aktivmaterialien massiv verbessern kann.



Ausblick

Die Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien bildet einen zentralen Baustein bei der Verbesserung von Lithium-Ionen-Batterien. Die Arbeiten dürfen aber nicht auf eine reine Materialentwicklung beschränkt bleiben. Nur wenn die Weiterentwicklung auf unterschiedlichen Ebenen, von der Aufbereitung und der Prozessierung der Werkstoffe bis zur Addi-

tiventwicklung betrieben wird, können die theoretisch erreichbaren Eigenschaften auch in realen Produkten Eingang finden.

Autoren:

W. Bauer, J. R. Binder, M. Müller, M. J. Hoffmann

KONTAKT

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Angewandte Materialien –
Keramische Werkstoffe und Technologien

Prof. Dr. M. J. Hoffmann

Haid- und Neu-Straße 7

D-76131 Karlsruhe

Tel.: +49 (0)721 608-44246

Fax: +49 (0)721 608-48891

michael.hoffmann@kit.edu

www.iam.kit.edu/kwt/

Literatur

- [1] B. Nykvist and M. Nilsson: Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change* 5 (2015) 329-332, DOI: 10.1038/NCLIMATE2564.
- [2] X. Shen, Z. Tian, R. Fan, L. Shao, D. Zhang, G. Cao, L. Kou, Y. Bai: Research progress on silicon/carbon composite anode materials for lithium-ion battery. *J. Energy Chem.* (2018) in press.
- [3] A.O. Kondrakov, A. Schmidt, J. Xu, H. Geßwein, R. Mönig, P. Hartmann, H. Sommer, T. Brezesinski, J. Janek: Anisotropic lattice strain and mechanical degradation of high- and low-nickel NCM cathode materials for li-ion batteries. *J. Phys. Chem. C* 121 (2017) 3286-3294.
- [4] M. Dreizler, N. Bohn, H. Geßwein, M. Müller, J.R. Binder, N. Wagner, K.A. Friedrich: Investigation of the influence of nanostructured $\text{LiNi}_0.33\text{Co}_0.33\text{Mn}_0.33\text{O}_2$ lithium-ion battery electrodes on performance and aging. *J. Electrochem. Soc.* 165 (2018) A273-A282.
- [5] W. Porcher, S. Chazelle, A. Boulineau, N. Mariage, J. P. Alper, T. Van Rompaey, J. -S. Bridel, C. Haona: Understanding Polyacrylic Acid and Lithium Polyacrylate Binder Behavior in Silicon Based Electrodes for Li-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 164 (2017) A3633-A3640.
- [6] M. Kuenzel, D. Bresser, T. Diemant, D. V. Carvalho, G.-T. Kim, R. J. Behm, S. Passerini: Complementary Strategies Toward the Aqueous Processing of High-Voltage $\text{LiNi}_0.5\text{Mn}_1.5\text{O}_4$ Lithium-Ion Cathodes. *ChemSusChem* 11 (2018) 562-573.



IM HERBST 2018 ERSCHEINT DIE NEUE AUSGABE!

Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit richten Sie bitte an

- **Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)**
Finkenstraße 10 • D-68623 Lampertheim
www.institut-wv.de
- **Miriam Knab**
Telefon 06206 939-352 • miriam.knab@alphapublic.de

Keramische Werkstoffe

» Keramik – der andere Werkstoff

Eine Herausforderung für den Konstrukteur «

Einleitung

Technische Keramik hat sich als Werkstoff für technisch anspruchsvolle Anwendungen in weiten Bereichen der Technik durchgesetzt. Die Eigenschaften sind Metallen in einiger Hinsicht deutlich überlegen. Außergewöhnlich hohe Härte und exzellente Gleiteigenschaften bei extremer Verschleißfestigkeit überzeugen. Hochtemperaturfestigkeit bis 1800 °C und eine ausgezeichnete Korrosionsfestigkeit sind beinahe unschlagbare Eigenschaften von Technischer Keramik. Gut bekannte metallische Werkstoffe werden gezielt durch die keramischen Hochleistungswerkstoffe ergänzt. Die Aufgabenstellung, Standzeit von Maschinen und Anlagen zu verlängern oder ihre Produktivität zu erhöhen steht generell im Fokus. Diese Ziele werden erreicht, wenn Keramik entsprechend ihren Eigenschaften Anwendung findet.

Hochleistungskeramik

Als Hochleistungskeramik bezeichnet man chemisch gewonnene Keramiken, die aus einer chemischen Verbindung in hoher Reinheit bestehen. Eine weite Verbreitung hat Aluminiumoxid (Al₂O₃) gefunden. Für spezielle Anwendungen stehen Materialien wie Siliziumcarbid oder -nitrid neben einer Vielzahl weiterer keramischer Materialien zur Verfügung.

Marktübersicht

Aluminiumoxid erfuhr die größte Verbreitung unter den hochreinen Keramik Typen. Ein

Hauptanwendungsgebiet ist seine Verwendung als Chipträger für Mikroelektronik. Diese Keramik weist neben einem sehr hohen elektrischen Widerstand in Verbindung mit extremer elektrischer Durchschlagsfestigkeit die erforderliche Wärmeleitfähigkeit auf, um die erforderliche Kühlung zu ermöglichen. Das Verlöten mit metallischen Werkstoffen eröffnet die Möglichkeit einer Vielzahl von Einsatzgebieten in Elektro- und Vakuumtechnik. Im Maschinenbau, der chemischen Industrie, der Hochtemperaturtechnik, in der Optik, der Medizintechnik und im Reaktorbau findet Technische Keramik ebenfalls eine weite Verbreitung.

Werkstoffüberblick

Tabelle 1 enthält die vier wichtigsten industriell verwendbaren keramischen Werkstoffe: Aluminiumoxid, Zirkonoxid, Siliziumcarbid und Siliziumnitrid. Auf keramische Werkstoffe wie Magnesiumoxid, Berylliumoxid, Thoriumoxid, Borcarbid oder andere spezielle Keramiken (z.B. für Wendschneidplatten zur spanabhebenden Bearbeitung auf schnelllaufenden Werkzeugmaschinen) soll hier nicht eingegangen werden.

Herausragende Eigenschaften der Technischen Keramik sind:

- hohe mechanische Festigkeiten auch bei hohen Temperaturen
- Hohe Temperaturfestigkeit (1800°C und mehr)
- ausgezeichnete chemische Beständigkeit gegen Säuren und Laugen
- große Härte und Verschleißfestigkeit
- niedrige Dichte
- gute Temperaturwechselbeständigkeit
- hoher elektrischer Widerstand (außer SiC und ZrO₂)

Beispiele

Neue Aufgabe erfordern spezielle Lösungen. Dichtscheiben aus Keramik finden seit Jahrzehnten Verwendung in Einhebelmischern und

Zweigriffarmaturen in Sanitärarmaturen. Die meist aus Al₂O₃ bestehende Scheiben werden fein geläppt. Eine Rauhtiefe der Oberfläche kleiner als 0,05µm wird für die erforderliche Dichtwirkung bei geringem Andruck gefertigt. Die diamantähnliche Härte verhindert, dass Schmutz, Metallspäne, Rost, Sand oder Kalk Schäden an der Scheibe hervorrufen. Die extrem gute Korrosionsbeständigkeit sichert den Dichtelementen die lange Lebensdauer. Dieses Dichtscheibenprinzip findet auch bei Industrie-Armaturen Anwendung.

Im Pumpenbau werden aufgrund der aggressiven Medien ebenfalls Keramikprodukte eingesetzt, z. B. als Ringe für Gleitringdichtungen. Diese Dichtungsart hat in weiten Bereichen die wartungsintensive Stopfbuchspackung abgelöst. Die Gleit- und Dichtflächen der Ringe sind feinstgeläppt, so dass die gewünschte Dichtwirkung erreicht wird. Da eine geringe Tropfleckage für die Befeuchtung der Dichtflächen erforderlich ist, gelangen geringe Mengen der abdichtenden Flüssigkeit bzw. Chemikalie zwangsläufig in die Atmosphäre. Die Gleitringdichtung wird für Wellen (mit Durchmesser bis 300mm) in großen Chemiepumpen und auch bei kleinen Abmessungen in PKW und Spülmaschine für die Wasserpumpe eingesetzt.

Eine weitaus elegantere Form der Wellendichtung erreicht die hermetisch dichte Magnetkupplung. Die Antriebswelle wird geteilt ausgeführt und das Drehmoment durch magnetische Kräfte auf das Laufrad übertragen. Ein Spalttopf aus unmagnetischer Keramik bildet die hermetisch dichte Trennung von angetriebenem Magnet und dem Magneten, der mit dem Pumpenlaufrad auf einer Welle sitzt. Da Keramik nicht magnetisierbar ist treten keine Wirbelströme mit Erwärmung und Leistungsverlust auf. Diese Art der Wellendichtung ist absolut dicht und wartungsfrei. Die Keramik leistet durch Vermeidung jeglicher Tropfleckage einen wichtigen Beitrag zum Umwelt-

KONTAKT

FRIATEC AG

Steinzeugstraße 50
 D-68229 Mannheim
 Tel.: +49 (0)621 486-0
 Fax: +49 (0)621 486-1279
 info@friatec.de
 www.friatec.de

Eigenachft	Einheit	Al ₂ O ₃		ZrO ₂		SiC	Si ₃ N ₄
		F99D	F99,7	FZM	FZM/K	SiC 198	HP 79
Dichte	g/cm ³	3,7 - 3,8	3,9 - 3,95	5,7	6,0 - 6,1	3,1	3,2
Härte (Knoop, 100g)	N/mm ²	20.000	23.000	17.000	18.000	21.000	17.000
Druckfestigkeit	N/mm ²	3.000	3.500	2.000	2.200	1.200	3.000
Biegebruchfestigkeit	N/mm ²	300	350	500	800	350	750
Elastizitätsmodul	10 ⁵ N/mm ²	3,5	3,8	2	2	3,3	3,2
WEIBULL-Modul	m	>10	>10	>20	>15	>10	>20
Poisson-Zahl	-	0,22	0,22	0,3	0,3	0,2	0,26
offene Porosität	%	0	0	0	0	>1	0
Max. Einsatztemperatur	°C	1.700	1.950	900	1.200	1.400	1.400
Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	8,5	8,5	10	11	4,4	3,2
Spezifische Wärme	J/kgK	900	900	400	400	900	800
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	25	30	2,5	2,5	90	40
Spez. Widerstand		10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ⁻¹	10 ¹⁴
Farbe		weiß	weiß	gelb	weiß	schwarz	schwarz

Tabelle Gegenüberstellung der physikalischen Daten verschiedener Keramikwerkstoffe. Die Daten gelten für die Prüfkörper, an denen sie ermittelt wurden; eine Übertragung auf andere Bauteile ist daher nur bedingt zulässig. Alle Werte beziehen sich auf eine Temperatur von 20 °C. F99D 9 6% Aluminiumoxid, F99,7 99,7% Aluminiumoxid; FZM Zirkonoxid; ZrO₂-PSZ; FZM/K Zirkonoxid, ZrO₂-TZP; SiC 198 Siliciumcarbid, 8% bis 12% Si; HP 79 heißgepreßtes Siliciumnitrid.

schutz. Kolben aus Keramik für Hochdruck-Pumpen verlängern Lebensdauer und Wartungsintervalle durch reibungsarme und harte Oberflächen. Der Verschleiß an Dichtungselementen kann deutlich reduziert werden. Wenn hygienische Gründe den Einsatz von Dichtungselementen wie O-Ring nicht zulassen kommen für Abfüllanlagen eingepasste Kolben/Zylinder-Einheiten zum Einsatz. Lebensmittel, Reinigungsmedien und Medikamente werden so abgefüllt. Durch den Wegfall der Dichtungen wird ein automatisierter CIP/SIP Prozess ermöglicht.

Wellenschutzhülsen aus Keramik vermeiden bei Verwendung von Lippendichtungen den Verschleiß an extrem beanspruchten Stellen. Wellen werden durch Lippendichtungen zerstört, wenn sich Riefen an den Stellen bilden, an denen die Dichtlippe anliegt. Bringt man hier hochglanzpolierte Wellenschutzhülsen aus Keramik als Panzerung der Welle an, verlängert sich die Lebensdauer von Welle und Dichtring entscheidend. Es empfiehlt sich, die Dichtscheiben, Gleitringe, Kolben und Wellenschutzhülsen mit abgerundeten Kanten oder 45°-Fasern auszuführen, um Abplatzer an scharfen Kanten des zwar sehr harten, aber damit auch sehr spröden Werkstoffs zu vermeiden. Dennoch lassen sich auch scharfkantige Teile wie Rundmesser für die Papierindustrie oder Hobelmesser für die Holzverarbeitung aus Keramik fertigen. Dies ist aber nur möglich, wenn das Materialgefüge extrem verfeinert und modifiziert wird. Geschehen ist dies bei der Weiterentwicklung von Zirkonoxidkeramik: Mit diesem Werkstoff lassen sich inzwischen scharfe und schnitthaltige Schneiden ausführen.

In der Humanmedizin hat die Keramik ein weiteres bedeutendes Anwendungsgebiet gefunden. So hat sich Aluminiumoxid wegen seiner guten Körperverträglichkeit als Implantatwerkstoff durchgesetzt (z.B. Hüftgelenke, Zahnimplantate).

Weitere Anwendungen für den interessanten Werkstoff Keramik:

- Verschleißfeste Düsen für Sandstrahlarbeiten und chemische Prozesse
- Ventilbauteile wie Kugel oder auch Kegel mit entsprechendem Sitz, die wegen der hohen örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten einem starken abrasiven Angriff ausgesetzt sind
- Gleit- und Kugellager
- Umlenkorgane für die Drahtindustrie bis hin zu Ziehkonen sowie
- Fadenführer

Dieser Beitrag soll eine allgemeine Information über die Einsatzmöglichkeiten der Technischen Keramik geben. Erfolgreich wird dieser wertvolle Werkstoff eingesetzt, wenn das Anforderungsprofil durch konventionelle Werkstoffe wie Metall, Glas oder auch Kunststoff nicht sicher abgedeckt werden kann. Eine Anpassung der Konstruktion an die keramischen Werkstoffeigenschaften wird günstigstenfalls im Zusammenspiel von Keramikhersteller und Anwender zum Erfolg führen.

ACHEMA
Halle 8.0
Stand A24



FRIALIT®-DEGUSSIT®
Hochleistungskeramik

www.friatec.de/keramik

» Werkstoffe für Sicherheit und Miniaturisierung «

Kundenanforderungen lassen sich durch eine anwendungsbezogene, ressourcenschonende Werkstoffauswahl zielgerichtet erreichen. Dabei helfen nicht nur Neuentwicklungen von Materialien oder Legierungen, sondern vielmehr auch spezielle Verbundwerkstoffe und Materialkombinationen. Um Ihre individuellen Materialwünsche zu erfüllen, produzieren wir als Auerhammer Metallwerk GmbH Verbundmaterialien durch Kaltwalzplattieren. Doch was bedeutet eine Werkstoffinnovation durch komplexe Walzverfahren?

Sie benötigen Bauteileigenschaften, die mit nur einem Werkstoff nicht erreichbar sind – wie beispielsweise eine hohe elektrische Leitfähigkeit oder Temperaturleitfähigkeit verbunden mit einer hohen Festigkeit? Hier bietet sich das Kaltwalzplattieren als Fertigungsverfahren explizit an. Mit unserer Anlagentechnik verbinden wir hierfür Kupferlegierungen und Edelmehle zu einem untrennbaren Metallband mit diesen an sich konträren Eigenschaften. Grundsätzlich sind vielfältige Metallverbunde mit bis zu fünf Lagen möglich. Begrenzt wird unser Verfahren lediglich durch die minimal mögliche Schichtdicke der einzelnen Plattierwerkstoffe von 2% der Gesamtdicke und durch Werkstoffkombinationen, die eine sehr hohe Festigkeitsdifferenz untereinander aufweisen.

Viele unserer Verbundwerkstoffe sind Ihnen schon im Alltag begegnet. Wussten Sie, dass Auerhammer-Plattierungen in Ihrem Wasserkocher, Ihrem Bügeleisen oder Ihren Leitungsschutzschaltern zu finden sind? Sie werden es bisher kaum wahrgenommen haben, da die Verbundwerkstoffe im Inneren der Geräte verbaut sind. Diese haben jedoch eine sehr wichtige Funktion, denn sie sorgen für Ihre Sicherheit und schützen in manchen Anwendungsfällen sogar Ihr Leben. Wie? In vielen elektrischen Geräten ist unser Thermobimetallband, eine Sonderform von Plattiertem Band, als gestanztes Teil in elektrischen Baugruppen verbaut. Thermobimetallbänder sind Verbundwerkstoffe, die aus mindestens zwei Komponenten mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten bestehen. Sie dehnen sich bei Erwärmung verschieden stark aus und bewirken dadurch eine Krümmung. Dieser sogenannte Thermobimetalleffekt führt dazu, dass

Ihr Wasserkocher bei 100°C abschaltet, Ihr Bügeleisen die eingestellte Temperatur regelt oder Ihre Leitungsschutzschalter reagieren, wenn Überlast droht. Durch die gezielte, dauerhafte Verbindung von wenigstens zwei Metallen mit unterschiedlicher thermischer Längenausdehnung beim Kaltwalzplattieren entsteht somit ein mechanischer Temperaturregler.

Einen weiteren innovativen Metallverbund der Auerhammer Metallwerk GmbH halten Sie in Ihren Händen, wenn Sie mit Bargeld bezahlen. Es ist das Material, aus dem der Kern der 1€- und 2€-Münze besteht. Das Besondere in diesem Fall ist der gewählte Aufbau des Verbundwerkstoffs, welcher der Fälschungssicherheit dient. Im von außen nicht sichtbaren Bereich der Geldmünze befindet sich dabei eine Speziallegierung, die den Geldautomaten, z.B. einen Parkschein- oder Zigarettenautomaten, erkennen lässt, dass es sich um eine echte Euromünze handelt. Aus diesem Grund fällt beispielsweise die zur 2€-Münze fast identisch aussehende türkische 1 Lira-Münze am Parkscheinautomat durch.

Aktuell arbeiten wir in einem öffentlich geförderten Projekt mit sächsischen Partnern aus Forschung und Industrie an einer großserientauglichen und kostengünstigen Bipolarplatte für PKW-Brennstoffzellen und leisten damit einen Beitrag zur nachhaltigen Elektromobilität.

Technische Grundlagen des Kaltwalzplattierens

Das Kaltwalzplattieren erzeugt durch eine gemeinsame Kaltumformung von zwei oder mehr Metallbändern und einer anschließenden Diffusionsglühung einen untrennbaren Materialverbund. Dieser lässt sich wie ein normales Me-

tallband weiterverarbeiten, z.B. durch Kaltwalzen. In den folgenden Bearbeitungsschritten werden die Eigenschaften des Verbundes, wie Gefüge, Festigkeit und Oberflächenbeschaffenheit, gezielt nach den Kundenwünschen eingestellt.

Der technische Prozess wird durch folgende Teilschritte charakterisiert:

Aktivieren: Im ersten Prozessschritt wird die Oberfläche durch die Entfernung von Adsorptions- und Oxidschichten aktiviert. Dies geschieht meist durch Mattieren der Bandoberfläche mit Drahtbürsten.

Plattieren: Der Plattierprozess beinhaltet das gemeinsame Kaltwalzen der Bänder mit Umformgraden von mehr als 60% in einen einzigen Umformschritt. Durch die starke Längung der Bänder bei diesen hohen Umformgraden reißen Grenzflächen auf und reaktive Oberflächen treten im Walzspalt in Kontakt miteinander. Die entstehende, so genannte Grünhaftung basiert auf Adhäsionskräften, mechanischer Verklammerung und lokaler metallischer Bindung.

Glühung: Die Haftungs- oder Diffusionsglühung erfolgt im direkten Anschluss an den Plattierprozess. Es laufen auf atomarer Ebene Diffusionsprozesse zwischen den Plattierpartnern ab, die aus den unvollständig verbundenen Metallbändern einen untrennbaren Materialverbund erzeugen.

Weiterverarbeitung: Im Anschluss an die Haftungsglühung werden die vom Kunden gewünschten Materialeigenschaften des Endproduktes (Verbunddicke, Oberflächenqualität,

mechanische Eigenschaften) durch eine gezielte Kombination aus Kaltwalzprozessen und Glühbehandlungen eingestellt.

Vorteile für Ihr Produkt:

- beliebige Metallauswahl
- variable Schichtdicken-Kombination
- maßgeschneiderte Eigenschaften
- Kostenersparnis durch optimierte Werkstoffkombinationen

Weiteres Produktportfolio

Metallbänder und Metallfolien sind weitere tragende Geschäftsfelder der Auerhammer Metallwerk GmbH, die hervorragende Akzeptanz im Markt genießen. Metallfolien stellen dabei eine Spezialform der Metallbänder dar. Sie werden bei uns mit einer Dicke kleiner als 0,10 mm produziert. Die dünnste Metallfolie der Auerhammer Metallwerk GmbH ist mit einer Dicke von 0,002 mm sogar bis zu zwanzig Mal dünner als ein menschliches Haar. Für diese Metallfolien können wir auf eine breite Werkstoffpalette zurückgreifen. Neben den für uns üblichen

Nickel-, Eisen-Nickel-, und Eisen-Nickel-Chrom-Legierungen fertigen wir bei dieser speziellen Produktgruppe zudem verschiedenste Edelmetalle sowie Tantal- und Titan-Legierungen.

Ihre Anwendung finden unsere hochpräzisen, ultradünnen Metallfolien in vielen metallverarbeitenden Branchen. Sie sind vor allem dann als Lösungen gefragt, wenn eine der folgenden Aufgaben zu bewältigen ist:

- Komponenten bei gleichbleibender bzw. gesteigerter Leistungsfähigkeit in Abmaßen und Gewicht zu reduzieren
- Gefahren und Risiken eines Produktes zu minimieren

In den zurückliegenden Jahren entwickelten wir gemeinsam mit verschiedenen Kunden neue, innovative Produkte bis zur Marktreife. Auerhammer-Metallfolien kommen beispielsweise für die Herstellung von Berstscheiben zum Einsatz. Diese werden unter anderem gezielt für die Überdruckregelung in Beatmungsgeräten

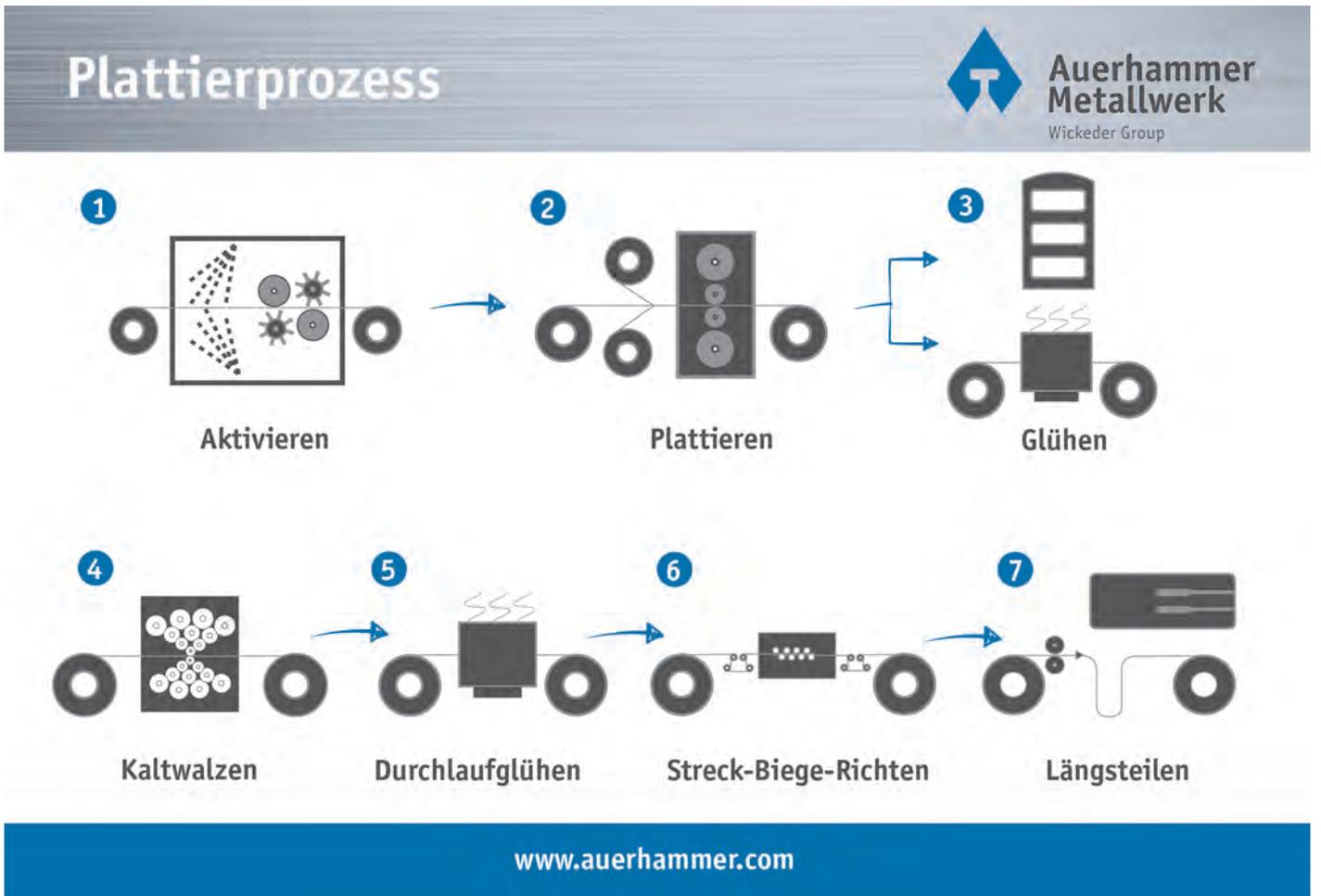
der Medizintechnik genutzt. Unsere ultradünnen Metallfolien werden weiterhin in der Lebensmittelindustrie zur Reinigung von Verpackungen vor dem Abfüllprozess eingesetzt.

Wir haben mit Metallfolien dünner als 0,020 mm bereits 2,5 Mal die Erde eingewickelt. Somit blicken wir bei unserem Alleinstellungsmerkmal, der Herstellung ultradünner Metallfolien, auf eine Lauflänge von über 100.000 km an Erfahrung zurück.

Profitieren auch Sie von unserem Know-How! Gern entwickeln wir mit Ihnen den für Ihren speziellen Anwendungsfall erforderlichen innovativen Werkstoff.

KONTAKT

Auerhammer Metallwerk GmbH
 Hammerplatz 1, 08280 Aue
 Tel.: +49 (0)3771 - 272 0
 info@auerhammer-metallwerk.de
 www.auerhammer.com



» Fügetechnik: Schlüsseltechnologie für ressourceneffiziente Hochleistungsverbundsysteme «

Das LWF® (Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik) ist eine national und international vernetzte und anerkannte Forschungseinrichtung mit dem Schwerpunkt der sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierten Forschung auf dem Gebiet der Fügetechnik, insbesondere Kleben, Mechanisches Fügen, Hybridfügen und der Schweißtechnik sowie der Werkstofftechnik. Als Partner innovativer Industrien und Förderorganisationen erbringt das LWF® verfahrens-, materialspezifische und konstruktive Forschungsergebnisse in der Fügetechnik zur wirtschaftlichen Entwicklung und Fertigung insbesondere von ressourcenschonenden Leichtbaustrukturen. Besondere Bedeutung haben die Ausbildung des ingenieurwissenschaftlichen Nachwuchses und der Wissenstransfer in Industrie und Forschung.

Produktive und werkstoffgerechte Füge-technologien sind der Schlüssel für innovative Mischbauweisen, die die Basis für den Leichtbau bilden und somit entscheidend zur Energie- und Emissionseinsparung beitragen. Die Forschungsschwerpunkte des Laboratoriums für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF®) sind seit seiner Gründung 1976 mit der Berufung von Prof. Dr.-Ing. Ortwin Hahn auf die Neu- und Weiterentwicklung mechanischer, klebtechnischer, thermischer und hybrider Fügetechniken für das Verbinden

von neuen Leichtbauwerkstoffen in der Mischbauweise ausgerichtet. Im Vordergrund stehen dabei Verfahren zur effizienten Umsetzung und Optimierung von Fügeverfahren für ressourceneffiziente Hochleistungsverbundsysteme.

Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Erarbeitung von Methoden zur experimentellen und numerischen Prozesssimulation sowie zur Beanspruchungsanalyse bzw. Lebensdauererproberung gefügter Leichtbaustrukturen.

Seit September 2011 wird das LWF® von Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut geführt. In **Abb. 1** sind die Arbeitsgebiete des LWF® dargestellt.

Als Schlüssel für die Entwicklung innovativer Leichtbaustrukturen ist dabei die Fügbarkeit (**Abb. 2**) zu sehen. Die Fügbarkeit hängt von der Fügeignung des Werkstoffs, der Füge-sicherheit der Konstruktion sowie der Füge-möglichkeit in der Fertigung ab. Im Vordergrund der Forschung am LWF® steht die



Abbildung 1: Arbeits- und Forschungsgebiete des LWF®

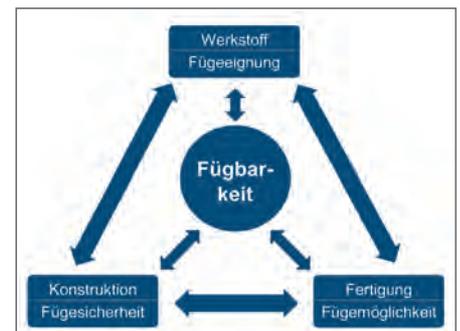


Abbildung 2: Begriff der Fügbarkeit mit wesentlichen Einflussgrößen.

ganzheitliche Betrachtung der Fügbarkeit mit dem Ziel der Prognostizierbarkeit entlang des gesamten Lebenszyklusses von Leichtbauverbindungen. Ein grundlegendes Werkstoffverständnis mit den Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen bei der fügetechnischen Verarbeitung ist von zentraler Bedeutung für die Beherrschung der Lösung anspruchsvoller Fügeaufgaben und die sichere Prognose der Fügbarkeit bei der Entwicklung und Fertigung innovativer Verbundsysteme und Produkte.

Im Folgenden wird ein Einblick in ausgewählte Forschungsgebiete des LWF[®] gegeben.

Simulation Bolzensetzen

Eine Leichtbaustrategie zur Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben zum CO₂-Ausstoß ist die Aluminium-Profil- und -Druckgussknoten-Bauweise. Zur Umsetzung solcher Leichtbaukonzepte sind häufig einseitig einsetzbare Fügeverfahren erforderlich, mit denen sich Mischbaustrukturen effizient fügen lassen. Aufgrund der geringen Prozesszeiten und der damit resultierenden wirtschaftlichen Vorteile, stellt das Hochgeschwindigkeits-Bolzensetzen eine effiziente Technologie dar, welche vom LWF[®] maßgeblich zur Serienreife mit entwickelt wurde. Beim Bolzensetzen wird ein nagelförmiges Hilfsfügeteil einseitig ohne Vorloch mit hoher Geschwindigkeit (bis ca. 40 m/s) in die Fügeteile getrieben. Anders als bei zweiseitig wirkenden Verfahren, hat die lokale und globale Steifigkeit der Fügestelle einen erheblichen Einfluss auf die Ausprägung der Verbindung und entscheidet über die grundsätzliche Einsetzbarkeit des Verfahrens. Da es sich beim Bolzensetzen um ein Impulsverfahren handelt, beeinflusst darüber hinaus die Massenträgheit der Fügeteile bzw. der Fügestelle die Verbindungsausbildung. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass die Erprobung der Einsetzbarkeit des Bolzensetzens nicht ausschließlich an Laborproben erfolgen kann, sondern dass bauteilspezifische Randbedingungen berücksichtigt werden müssen.

Im LWF[®] wurde eine Methode zum Nachweis der Einsetzbarkeit des Hochgeschwindigkeits-Bolzensetzens unter Berücksichtigung der Bauteileigenschaften entwickelt. Zum Einsatz kam primär das Simulationsprogramm LS-Dyna, begleitend wurden zusätzliche Analysen in Simufact.forming sowie SolidWorks Simulation durchgeführt.

In **Abb. 3** wird exemplarisch eine simulierte Stahl-Stahl-Verbindung illustriert. Zu erkennen ist die Spannungsverteilung nach von Mises im Setzbolzen aber auch in den gefügten Blechen.

Die Simulationen können genutzt werden, um u. a. die folgenden Eigenschaften zu prognostizieren:

- Energiebedarf (Kolbengeschwindigkeit, Fügedruck)
- Lokale Spannungen, Deformationen und Temperaturen
- Kraftverläufe beim Fügen und Ausdrücken
- Ausdrückkräfte und Tragfähigkeiten
- Tragfähigkeiten sowie Spaltbildung in Abhängigkeit der Steifigkeit

Aus den Detailsimulationen und den Steifigkeitsuntersuchungen konnte eine simulationsbasierte Auslegungsmethode zum Nachweis der Einsetzbarkeit des Bolzensetzens entwickelt werden, welche in Form eines Ersatzmodelles die Deformation eines Bauteiles durch den Fügeprozess in Abhängigkeit der Fügereihenfolge abbilden kann.

Schädigungsarmes Fügen von FKV mit metallischen Halbzeugen

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden häufig mit metallischen Konstruktionswerkstoffen kombiniert. Da Schweißverfahren für diese Werkstoffe ausscheiden, kommt die Klebtechnik zum Einsatz, welche jedoch aufgrund der langen Aushärtezeiten eine wirtschaftliche Fertigung erschwert. Daher werden in der Regel zusätzlich mechanische Fügeverfahren eingesetzt, die eine sofort belastbare Verbindung ausbilden und somit die Bauteile sicher bis zum Zeitpunkt der Klebstoffhärtung miteinander fixieren. Es bieten sich hierfür etablierte Verfahren wie das Voll- und Halbhohlstanzen an, da diese keine vorgelochten Bauteile benötigen und eine effiziente Baugruppenfertigung erlauben. Da Faser-Kunststoff-Verbunde allerdings keinerlei Plastizität

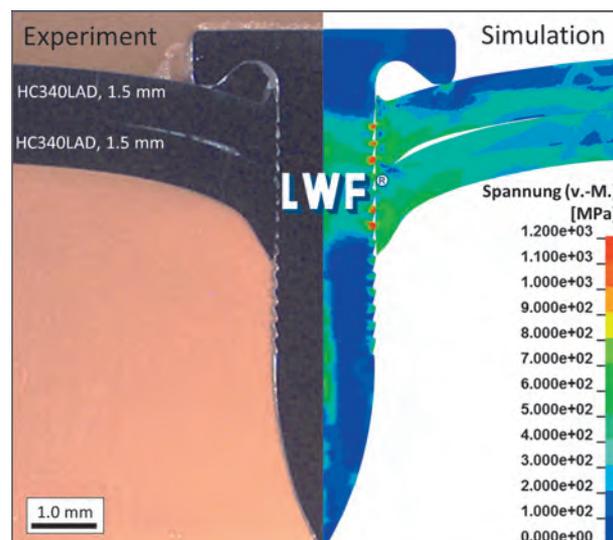


Abbildung 3: Vergleich des Schlibbildes (links) mit der Simulation (rechts) einer mit dem Hochgeschwindigkeitsbolzensetzen hergestellten Verbindung aus HC340LAD 1,5/HC340LAD 1,5

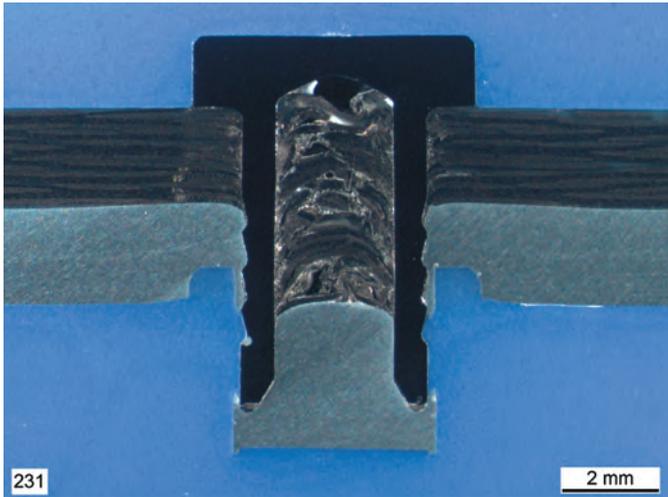


Abbildung 4:
Makroschliff einer mittels Reservoirstanzniet gefügten FKV-Aluminium-Verbindung.

im Gegensatz zu Metallen aufweisen, werden beim Stanzvorgang Schädigungen in Form von Faser-, Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen in den Verbundwerkstoff induziert. Fügeprozessinduzierte Schädigungen können Verbundwerkstoffe signifikant schwächen, sodass eine stark reduzierte Resttragfähigkeit verbleibt und der Werkstoff ungenügend ausgenutzt werden kann.

Mithilfe einer gezielten Anpassung der Nietgeometrie konnte das Lochungsverhalten im FKV-Werkstoff dahingehend verbessert werden, dass sich ein zylindrisches Stanzloch ausbildet, das die Schädigungen im Verbundwerkstoff auf ein Minimum reduziert und eine Verbesserung der Verbindungsqualität bewirkt. Erreicht wurde dies mithilfe einer halbhohlen Kontur, die am Nietfuß an scharfen Schneidkanten endet und den Laminatwerkstoff nach dem Durchtrennen jeder einzelnen Lage in

das Nietinnere aufnehmen kann. Verglichen mit den prozesstypischen Schädigungen des Voll- und Halbhohl-Stanznietverfahrens konnten mit dem neuartigen Stanzniet die Schädigungen flächenmäßig halbiert und die Restdruckfestigkeit des gekerbten Werkstoffs um ca. 17% angehoben werden.

Da sich der FKV-Butzen bei der finalen Verbindung im Reservoir des Niets befindet, könnte sich dieser später lösen und sensible Reinigungsbäder verschmutzen oder zu Störgeräuschen im Betrieb führen. Für CFK-Aluminium-Verbindungen wurde mit einer öffnenden Matrize mit beweglichem Innenstift ein Konzept umgesetzt, den Metallbutzen zusätzlich partiell mit in den Niet einzupressen. Dieser weitet den Niettubus am Fuß elastisch und wird aufgrund der damit einhergehenden radialen Druckkräfte kraftschlüssig gehalten. Ein Lösen des FKV-Butzens kann

somit effektiv verhindert werden, siehe **Abb. 4**. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sämtliche Butzen an der Verbindung verbleiben und nicht über die Fügeanlage abgeführt werden müssen, was insbesondere bei Verwendung von Klebstoff zu Stillständen führen kann.

Einstufiges Widerstandselementschweißen

Auf dem Gebiet der Pressschweißverfahren wird am LWF® das sogenannte Widerstandselementschweißen (WES) erforscht und hinsichtlich der Grobserientauglichkeit weiterentwickelt. In einem aktuellen Forschungsprojekt wird das einstufige Widerstandselementschweißen betrachtet, welches eine vorlochfreie Fügeoperation von ultrahochfesten Stählen mit Aluminiumwerkstoffen ermöglicht. Das Widerstandselementschweißen ist ein thermisch-mechanisches Fügeverfahren, welches bei Einhaltung kürzester Taktzeiten kraft-, form- und stoffschlüssige Verbindungsmechanismen vereint. Neben dem einstufigen Fügeprozess existieren weitere zweistufige Verfahrensvarianten. Diese haben gemeinsam, dass die Widerstandselemente in einer dem eigentlichen Schweißprozess vorgelagerten Fertigungsstufe in das Aluminiumbauteil eingebracht werden müssen. Nach der Positionierung der Bauteile zueinander erfolgt die Verschweißung mittels konventioneller Widerstandspunktschweißanlagen.

Bei dem einstufigen Fügeprozess entfällt die vorgelagerte Fertigungsstufe, da die Widerstandselemente mit Zuschaltung eines Gleichstromes in den Aluminiumwerkstoff

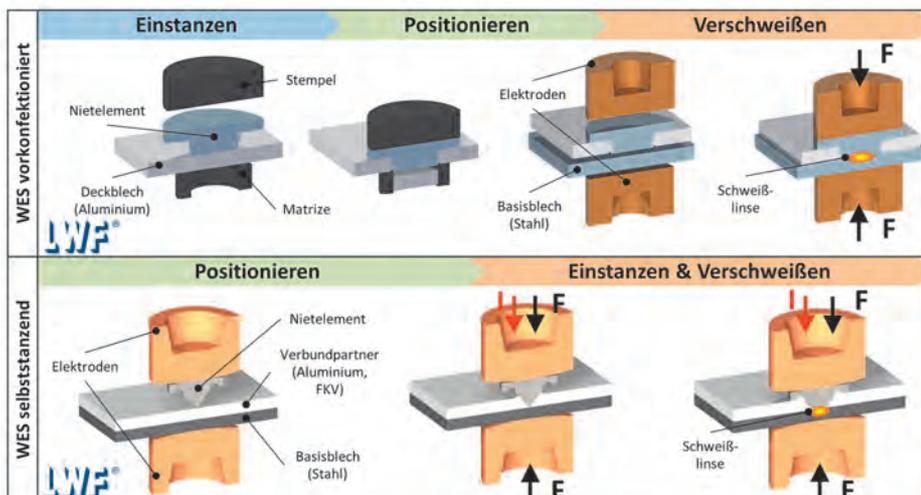
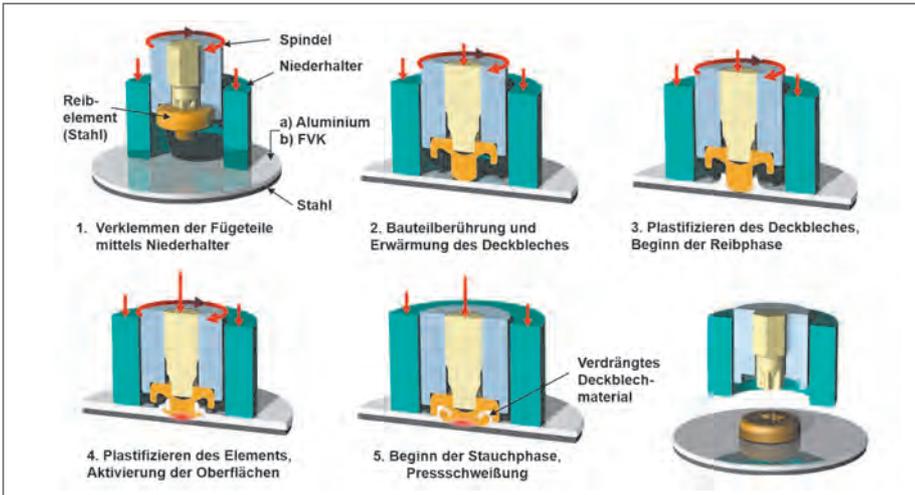


Abbildung 5: Prozessschritte des zwei- und einstufigen Widerstandselementschweißens.



Abbildung 6: Makroschliff einer einstufigen WES-Verbindung (Deckblech: EN-AW 6016 T4, Basisblech: 22MnB5+AS150) mit 35 mm Überlappungslänge.



eingebracht und in derselben Fertigungsstufe mit dem Stahlwerkstoff verschweißt werden. Neben der Fertigungsabfolge unterscheiden sich die beiden Verfahrensvarianten in der verwendeten Elementgeometrie. Nach dem Fügeprozess entsteht eine für das WES charakteristische Schweißlinse, siehe **Abb. 5**.

Die **Abb. 6** zeigt ein optimiertes Widerstandselement, welches eine verbesserte Unterkopfringnut besitzt. Diese nimmt hierbei bei den durch den Schaft verdrängten Aluminiumwerkstoff auf, sodass eine aluminiumfreie Kontaktierung des Elementes mit dem Stahlblech gewährleistet und Aluminiumspritzer vermieden werden können. Es zeigt sich, dass die einstufig erzeugten Zweiblechverbindungen die hohen Verbindungsfestigkeiten der zweistufigen Verfahrensvariante erzielen.

Reibelementschweißen (RES)

In weiteren internationalen Forschungsarbeiten wurde am LWF® das Reibelementschweißen für den Einsatz im Multi-Materialleichtbau entwickelt.

Dieses Pressschweißverfahren ist ebenfalls geeignet, die schwer fügbare Werkstoffkombination aus presshartem 22MnB5 und Aluminium zu verbinden. Dabei wird ein nietförmiges Hilfsfügeteil unter Rotation (ca. 10.000 U/min) und vergleichsweise geringer Anpresskraft (ca. 10 kN) mit dem Basisblech der Verbindung durch Diffusionsvorgänge verschweißt. Das Deck-

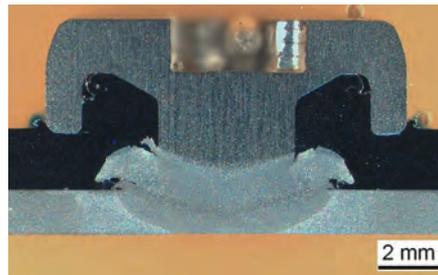


Abbildung 8: Makroschliff einer RES-Verbindung (Deckblech: EN-AW 6016 T4, Basisblech: 22MnB5+Zn).

blech kann ohne Vorloch durchrieben werden und wird über die Elementgeometrie axial geklemmt (siehe **Abb. 7**). Im Vergleich zu Schmelzschweißverfahren zeichnet sich das Reibelementschweißen durch eine geringere thermische Belastung auf die Fügezone aus, da es zu keinem Aufschmelzen der Fügeteilwerkstoffe kommt (**Abb. 8**).

Abbildung 7: Prozessschritte des Reibelementschweißens.

Kleben von ZnMgAl beschichteten Blechen

Die innovativen ZnMgAl-Legierungsüberzüge (+ZM) bieten hinsichtlich der Umformeigenschaften und der Korrosionsbeständigkeit entscheidende Vorteile gegenüber den ebenfalls im Schmelztauchverfahren hergestellten Zink (+Z) Beschichtungen. Die im Wesentlichen durch die dünne Oxidschicht bestimmten adhäsiven Eigenschaften weisen im Verbund mit strukturellen Klebstoffen teilweise ein ungeklärtes Versagensverhalten bei dennoch guten mechanischen Eigenschaften auf. Daher werden die grundlegenden Einflüsse einer +ZM Beschichtung und deren Oberflächenzustand auf das Versagensverhalten und die mechanischen Eigenschaften in einem strukturell geklebten Verbund erforscht.

Zur Identifizierung der relevanten Einflussgrößen auf das Versagensverhalten sowie der Entwicklung eines molekularen Grenzflächenverständnisses ist es erforderlich, die Zusammenhänge zwischen der Verbundschädigung und dem Klebstoffübertrag auf das Substrat in Abhängigkeit der Oberflächenchemie zu analysieren.

Die REM-Aufnahme sowie das EDX-Mapping für die Elemente Aluminium und Magnesium nach einer lösemittel- (Solvent), säure- (Acid) und alkalischen- (Alcaline) Vorbehandlung ist in **Abb. 9** dargestellt und zeigt die Änderung der Zusammensetzung.

Die 90°-Peeltest Untersuchungen mit einem Modellklebstoff an lösemittelgereinigten +Z und +ZM beschichteten Werkstoffen zeigen vergleichbare Ergebnisse zu einer Rollenschälprüfung bei Einwirkung von Feuchtigkeit. Hier wird durch das Einwirken von Wasser ein Herabsetzen der Schälkraft der +Z Beschichtung auf das Niveau der +ZM Beschichtung erzielt, was auch im 90°-Peeltest beobachtet werden kann. Zudem ist hier ein Übergang von kohäsivem (trocken geprüft) zu adhäsivem (nass geprüft) Versagen zu beobachten. Einen Erklärungsansatz liefert der höhere Oberflä-

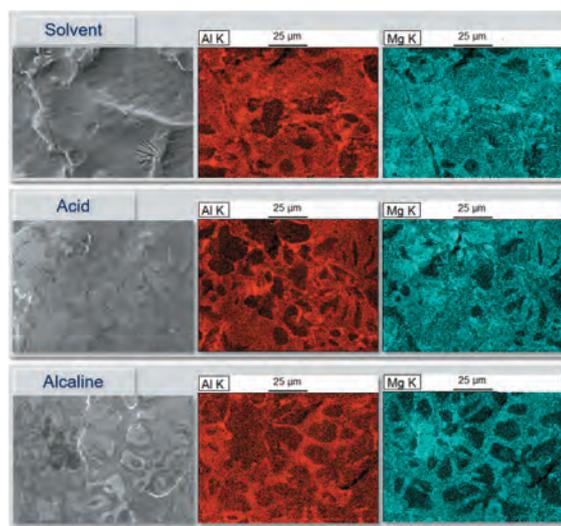
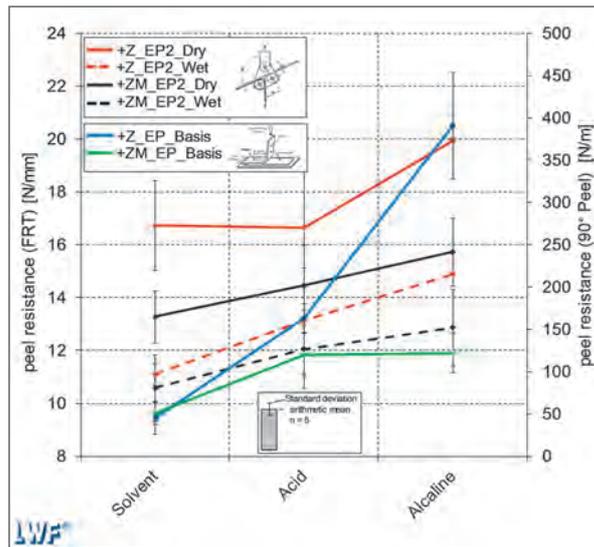


Abbildung 9: EDX-Elementmapping einer lösemittel-, Säure- und Alkalischvorbehandelten +ZM Oberfläche.

chenanteil an Aluminium bei der +Z Beschichtungen, dessen basische Oxide zur Bildung von leicht brechenden Wasserstoffbrückenbindungen neigen (Abb. 10).

Die geringere Dehnratenabhängigkeit des grenzflächennahen Versagens führt zu einer Eigenschaftsdifferenz zwischen Grenzfläche und Klebstoffbulk und bietet einen Erklärungsansatz für das zu kohäsiv wechselnde Versagensverhalten auf der +ZM Oberfläche bei erhöhten Prüfgeschwindigkeiten. Dies verdeutlicht die Komplexität des vorliegenden Versagensverhaltens. Die Analyse der makroskopisch adhäsiv versagten Prüfkörper aus dem Rollenschälversuch mittels XPS, Raman- und FTIR-Spektroskopie bringen weitestgehend vergleichbare Ergebnisse, dass ein Elementübertrag des Klebstoffs und der Oxide auf der jeweiligen Bruchfläche nachgewiesen werden kann. Aus diesen Untersuchungen wird klar, dass das Versagen nicht auf eine mangelnde Adhäsion zurückzuführen ist, sondern ein komplexer Versagensmechanismus in der Interphase zwischen der Beschichtung, den Metalloxiden und der Klebstoffgrenzschicht auftritt. So geht aus diesen Erkenntnissen hervor, dass die Differenzierung in adhäsives und kohäsives Versagensverhalten für die Bewertung einer schlecht bzw. einer gut ausgelegten Klebverbindung nicht hinreichend ist und einer systematischen Analyse bedarf.



Test method	quasi-static peel test
Test speed	100 mm/min / 1 mm/s
Material	DX54+ZM100
Pretreatment	see diagram
Joining process	adhesive bonding
Adhesive	EP2 / EP-model adhesive
Displacement measurement	crosshead travel
Specimen	90° peel test / Floating roller method EN1464:2010

Abbildung 10: Schälwiderstand aus dem Nass- und Trockenschälversuch nach verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen.

Ausblick

Die Fügetechnik hat sich in der Zukunft gerade im Hinblick auf das Fügen im Mischbau neuen Herausforderungen zu stellen (s. Abb. 11). Zu diesen neuen Anforderungen zählen unter anderem das Fügen von ultrahöchstfesten Stählen und Leichtmetallgusswerkstoffen, das Fügen von Profil-Strukturen in Mischbauweise, eine materialgerechte Lastübertragung in FKV- und Hybridsystemen sowie eine durchgängige Prozess- und Beanspruchungssimulation. Um auch in Zukunft

produktive Fügeverfahren für den bezahlbaren Leichtbau zu entwickeln, bedarf es weiterhin einer grundlagenorientierten Forschung mit einem Transfer in die Anwendung zur Erarbeitung innovativer Lösungen.

Autoren: Prof. Dr.-Ing. G. Meschut, F. Augenthaler, M. Ditz, M. Gerkens, H. Günter, C. Schmal, J. Vorderbrüggen

KONTAKT

Universität Paderborn
 Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF®)
 Prof. Dr.-Ing. G. Meschut
 Pohlweg 47-49
 D-33098 Paderborn
 Tel.: +49 (0)5251 60-3031
 Fax: +49 (0)5251 60-3239
 gerson.meschut@lwf.uni-paderborn.de
 www.lwf-paderborn.de

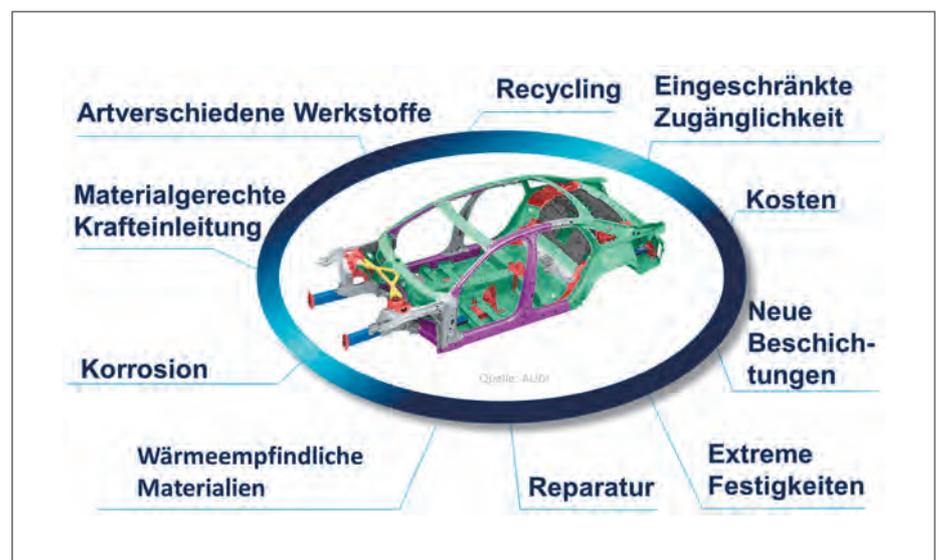


Abbildung 11: Herausforderungen beim Fügen im Mischbau.

» Benetzungsanalysen auf kleinsten Oberflächen – Und wie groß ist Ihre Probe? «

Dina Otto, DataPhysics Instruments GmbH

Oberflächen untersuchen, verstehen und optimieren – dazu sind Kontaktwinkelmessgeräte und Tropfenkonturanalysesysteme von DataPhysics Instruments weltweit im Einsatz. Mit der neuesten Nano- und Pikoliter Dosiertechnologie von DataPhysics Instruments können Sie auch kleinste Oberflächen, wie zum Beispiel elektronische Bauteile, Sensoren oder Implantate, schnell und exakt analysieren.

Die optischen Kontaktwinkelmessgeräte von DataPhysics Instruments eignen sich hervorragend für die Durchführung von Benetzungsanalysen auch auf minimalen Festkörperoberflächen. Der Kontaktwin-

kel erlaubt dabei eine direkte Oberflächencharakterisierung: niedrige Wasserkontaktwinkel $<90^\circ$ zeugen von Hydrophilie, während man auf hydrophoben Oberflächen kugelförmige Wassertropfen mit Kontaktwinkeln $>90^\circ$ beobachtet. Kontaktwinkelmessungen mit mehreren unterschiedlichen Testflüssigkeiten ermöglichen darüber hinaus die Bestimmung der freien Oberflächenenergie, sodass auch die dispersen und polaren Anteile der Oberfläche definiert werden können. Mit diesem Wissen wiederum lassen sich Rückschlüsse auf die Oberflächenchemie des Materials ziehen. DataPhysics Instruments hat zu diesem Zweck zwei innovative Dosiersysteme entwickelt: die Nanoliterdosierung

sowie die Pikoliterdosierung PDDS. Mit der Nanoliterdosierung werden Tropfen mit einem Volumen von nur etwa 10 nl erzeugt. Diese passen zum Beispiel auf den Rand einer 2-Cent-Münze oder in die Gewindegänge einer Schraube. Mit der Pikoliterdosierung lassen sich noch dreißigmal kleinere Tropfen dosieren, sodass Kontaktwinkelmessungen selbst auf einer Glasfaser oder auf einzelnen Feindrähten eines Koronarstents reproduzierbar möglich sind.

Und wie groß ist Ihre Probe? – Die Oberflächenexperten bei DataPhysics Instruments beraten Sie gerne und konfigurieren für Sie das passende Messsystem.

dataphysics Messtechnik für die Grenzflächenchemie

Understanding Interfaces Wo für andere Grenzflächen ein Phänomen bleiben, helfen wir sie zu verstehen

Kontaktwinkelmessgeräte

- optische Messung von Kontaktwinkeln, Grenz- und Oberflächenspannungen
- Hochtemp.-Systeme bis 1800 °C
- Hochdrucksystem bis 750 bar



Tensiometer

- kraftbasierte Messung von Grenz- und Oberflächenspannungen sowie dyn. Kontaktwinkeln
- automatisierte CMC-Bestimmung



Spinning Drop Tensiometer

- Messung extrem niedriger Grenzflächenspannungen



Stabilitätsanalyzesysteme

- optische Stabilitäts- und Alterungsanalyse disperser Systeme (Suspension, Emulsion)



Feuchtgeneratoren

- automatische Regulierung der relativen Luftfeuchtigkeit im Probenraum



Applikations-/Schulungszentrum

- Probenmessungen für und mit Kunden
- Seminare mit Theorie und Praxis



DataPhysics Instruments GmbH • Raiffeisenstraße 34 • 70794 Filderstadt
 Tel +49 (0)711 770556-0 • Fax +49 (0)711 770556-99
sales@dataphysics.de • www.dataphysics.de

© Copyright by DataPhysics Instruments GmbH, Filderstadt.
dataphysics ist ein eingetragenes Warenzeichen der DataPhysics Instruments GmbH
 Photos: Norbert Heil, Daniel Maier, Dreamstime. Visuelle Konzeption/Gestaltung: Daniel Maier

»» COMPOSITES EUROPE 2018: Fertigungsprozesse im Fokus ««

Sie sind leicht, stabil, korrosionsbeständig und wartungsarm: Es sind diese Eigenschaften, die dem Werkstoff und damit der europäischen Composites-Industrie gute Aussichten bescheren. Vor allem den Automobilbau, die Luftfahrt und das Bauwesen haben die Faserverbundwerkstoffe weiter vorangetrieben. Composites als Werkstoff verfügen über enorme Potenziale – das zeigt auch die COMPOSITES EUROPE vom 6. bis 8. November in Stuttgart.

Die Fachmesse zeigt sämtliche Fertigungsprozesse faserverstärkter Kunststoffe, von Rohstoffen über Verarbeitungsprozesse bis zu Leichtbau-Innovationen in Automobilbau, Luftfahrt, Bootsbau, Windenergie-Wirtschaft und im Bausektor.

Vor allem für Konstrukteure und Materialexperten aus Forschung und Entwicklung ist die COMPOSITES EUROPE Anlaufstelle in Sachen Leichtbau. Die Besucher treffen auf über 400 Aussteller aus 30 Nationen, die auf der größten Veranstaltung ihrer Branche in Deutschland den Stand der Technik und das Potential von Faserverbundwerkstoffen zeigen – und das nicht nur im Ausstellungsbereich, sondern auch auf den zahlreichen Event-Areas, in Vortragsforen, Themenrundgängen und Workshops.

Der richtige Werkstoff an der richtigen Stelle

Besonders im Multimaterial-Leichtbau spielen Faserverbundwerkstoffe ihre Stärken aus. Denn inzwischen ist es eindeutig, dass sich die Anforderungen des modernen Leichtbaus nicht mehr

innerhalb eines einzelnen Werkstoffs beantworten lassen, sondern beste Lösungen nur mit hybridem Leichtbau erreicht werden können. Als Schnittstelle zwischen Metall- und Faserverbund-Technologien dient auf der COMPOSITES EUROPE das Lightweight Technologies Forum. Das materialübergreifende Forum bringt die Composites-Industrie und die Anwendungsbranchen zum integrativen und hybriden Leichtbau zusammen.

Messeauftakt: 4th International Composites Congress (ICC)

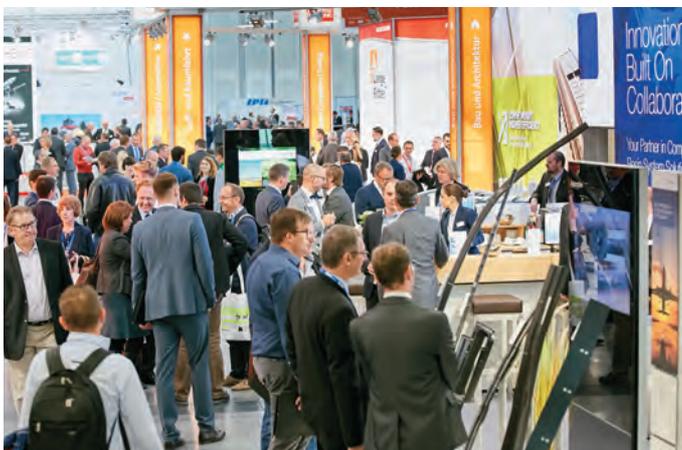
Den Auftakt zur COMPOSITES EUROPE 2018 bildet der „4th International Composites Congress (ICC)“, der vom 5.-6. November von der Wirtschaftsvereinigung Composites Germany in Stuttgart veranstaltet wird. Themenschwerpunkte sind u. a. effiziente Prozesse, integrative Produktionstechnik, additive Fertigung, Multimaterial-Lösungen sowie aktuelle Marktentwicklungen. Den Abschluss des Kongresses bildet eine Podiumsdiskussion zum Thema „Composites im Wachstumsmarkt Bau und Infrastruktur“. Partnerland des Kongresses ist in diesem Jahr Österreich.

COMPOSITES EUROPE: Jetzt jährlich in Stuttgart

Die COMPOSITES EUROPE findet künftig jährlich in Stuttgart statt. Bislang wechselte die Veranstaltung jährlich zwischen Düsseldorf und Stuttgart. Ausschlaggebend für den alleinigen Standort Stuttgart ist die Nähe zu den Industriezweigen, in denen faserverstärkte Werkstoffe zum Einsatz kommen. Das gilt speziell für die Automobilbranche, den Fahrzeugbau, die Luft- und Raumfahrt sowie die Elektrobranche.

Organisiert wird die COMPOSITES EUROPE vom Messeveranstalter Reed Exhibitions in Kooperation mit dem europäischen Branchenverband EuCIA und der Wirtschaftsvereinigung Composites Germany, einem Zusammenschluss der Branchenverbände und Cluster AVK, CCeV, CFK-Valley Stade und VDMA AG Hybride Leichtbau Technologien.

www.composites-europe.com





COMPOSITES EUROPE

13. Europäische Fachmesse und Forum für
Verbundwerkstoffe, Technologie und Anwendungen

WE CONNECT – MATERIALS AND EXPERTS

06. – 08. November 2018
Messe Stuttgart

www.composites-europe.com

Organised by
 Reed Exhibitions

Partners



» Excellence in Science «

Als ein weltweit führender Hersteller in der Instrumentellen Analytik entwickelt und produziert Shimadzu innovative Systeme für die Labore in Industrie, Wissenschaft und Institutionen. 1875 im japanischen Kyoto gegründet, ist Shimadzu heute weltweit in 74 Ländern mit über 11.000 Mitarbeitern vertreten.

Das Produktprogramm umfasst Instrumente für die Chromatographie (GC, HPLC/UHPLC), Massenspektrometrie (LC-MS, GC-MS), Spektroskopie (UV/VIS, RF, FT-IR, ICP/ICP-OES/ICP-MS, AAS, EDX), Summenparameter (TOC) sowie Materialprüftechnik, Waagen und Software. Die Geräte dienen der Produktsicherheit, dem Verbraucher-, Gesundheits- und Umweltschutz. Sie entsprechen den internationalen Standards und werden in nahezu allen Fertigungsindustrien eingesetzt, im Gesundheitswesen sowie in der Lebensmittelherstellung, -verarbeitung und -sicherheit. Sie werden sowohl für Routine- und HighEnd-Anwendungen als auch für Prozess- und Qualitätskontrolle oder Forschung und Entwicklung verwendet.

Shimadzu Materialprüftechnik

In der Materialprüftechnik blickt Shimadzu auf über 100 Jahre Erfahrung und Entwicklungsarbeit zurück. Das Produktprogramm umfasst statische und dynamische Universalprüfmaschinen, Härteprüfgeräte, Kapillarrheometer sowie die Hochgeschwindigkeitskamera HPV-X, die mit 10 Mio. Bildern pro Sekunde die leistungsfähigste ihrer Klasse ist. Die Prüfmaschinen von Shimadzu sind auf dem neusten technologischen Stand hinsichtlich Regelungstechnik, Sensorik oder Informationsverarbeitung und unterstützen somit zuverlässig Entwickler und Anwender.

Was 1917 mit Faser- und Zementprüfanlagen begann, setzte sich in den folgenden Jahrzehnten mit hydraulischen, dynamischen und vollautomatischen Prüfanlagen, mit Ultraschall-Ermüdungsprüfsystem sowie einem Partikelgrößenanalysator fort.

Test von innovativen und immer leistungsfähigeren Materialien

Die Eigenschaften von Materialien sind vielfältig und verhalten sich unterschiedlich, abhängig von Umgebungsbedingungen und wirkenden Kräften. Für innovative und immer leistungsfähigere Materialien bzw. Materialkombinationen oder Verbindungstechniken benötigen die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen sehr genaue und zuverlässige Daten für die Produktion und auch Qualitätskontrolle. Stellvertretend zwei Beispiele für die Vielseitigkeit und Leistungsfähigkeit der Shimadzu Materialprüfsysteme.

Materialien in Rekordzeit geprüft

Das Ultraschall-Ermüdungsprüfsystem USF-2000 ist ideal geeignet für Anwendungen, die das Ermüdungsverhalten von Werkstoffen erforschen, etwa für Automobil-, Luft- und Raumfahrt, Eisenbahn und andere Industrien. Innerhalb von nur 6 Tagen (statt mindestens eines Jahres) bietet das USF-2000 den zeit- und kosteneffektivsten Prüfaufbau, um Daten über die Lebensdauer von Materialien zu erhalten. Das USF-2000 schwingt bei einer Frequenz von 20 kHz mit 10^{10} Lastwechseln über 60-mal schneller als Tests mit einer Prüffrequenz



Links das USF-2000, rechts ein Modell der AG-Xplus Serie

von 300 Hz. Für Automobil-, Luft- und Raumfahrt sowie Schienenverkehr muss die Zuverlässigkeit von Materialien vorhersagbar sein, um beste Qualität und höchste Sicherheit für Reisende zu gewährleisten, aber auch für die Hersteller.

Beispielsweise wird das USF-2000 eingesetzt, um Ermüdungsverhalten zu testen, etwa bei selektivem Laserschmelzen (SLM – selective laser melting), eine Technologie, die in der additiven Fertigung genutzt wird. Da der Fertigungsprozess u.a. eine hohe Gestaltungsfreiheit bietet, wird er angewendet, um Strukturen im Leichtbau zu generieren. Um ein Ermüdungsversagen von SLM-gefertigten Strukturen zu verhindern, muss eine prozessbegleitende mikrostrukturbasierte Charakterisierung der Leistungsfähigkeit durchgeführt werden: Neue Testmethoden basierend auf Ultraschallermüdung (VHCF – very high cycle fatigue) ermöglichen detaillierte Untersuchungen unter betriebsrelevanten Bedingungen und Lebensdauern im Zusammenhang von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Präzisions-Universalprüfmaschine für Forschung und Entwicklung

Die Modelle der Shimadzu AG-Xplus Serie sind besonders leistungsstarke und vielseitige elektromechanische Prüfmaschinen. Mit ihrem steifen Rahmen und den präzisen Messzellen sind sie optimal für alle Anforderungen ausgelegt, insbesondere auch für Forschung und Entwicklung.

Für kundenspezifische Anforderungen gibt es zahlreiche Lösungen, etwa eine Maschine mit 2 Prüfräumen, die den Werkzeugwechsel für den Druck- und den Zugversuch überflüssig macht. Auch ein vergrößerter Prüfraum ist eine Option, zum Beispiel für Bauteile oder Proben mit großer Dehnung wie Elastomere oder Gummi. Für Druckversuche an kleinen Teilen hingegen, zum Beispiel elektrische oder elektronische Bauteile, ist eine Ausführung mit einer Prüfraumhöhe von nur 700 mm erhältlich.

Mit der bedienfreundlichen Software Trapezium X können alle notwendigen Einstellungen in kürzester Zeit selber durchgeführt werden.

Der kurze Weg zum Kunden

Shimadzu Deutschland bedient den deutschen Markt mit Beratungs- und Produktlösungen sowie Serviceleistungen. Neben seiner Vertriebszentrale in Duisburg unterhält Shimadzu Deutschland sechs Technische Büros und Service-Stützpunkte in regionalen Einzugsgebieten und gewährleistet damit schnelle und kurze Wege zu den Kunden.

KONTAKT

Shimadzu Deutschland GmbH

Keniastr. 38
D-47269 Duisburg
info@shimadzu.de
www.shimadzu.de



Alles ist möglich

Hochpräzise Messungen und intuitive Bedienung. Die AG-X plus mit der Software Trapezium-X für Qualitätskontrolle, Forschung und Entwicklung.

- **Herausragende Leistungsdaten**
- **Verschiedene Modelle für jeden Zweck**
- **Modernste und einfach zu bedienende Software**
- **Energieeffizient durch Sparmodus**

» Leichtbau in Guss 2018 «

*Innovative Lösungen zur Effizienzsteigerung in der Wertschöpfungskette
06. - 07. November 2018 in Bad Gögging*

Leichter, besser, effizienter: Mittlerweile zum zwölften Mal veranstaltet der Hanser Verlag die renommierte Fachtagung und lädt Gießerei-Experten aus ganz Deutschland und dem angrenzenden Ausland zur Leichtbau in Guss – diesmal nach **Bad Gögging**. Auch für dieses Jahr ist ein vielversprechendes Vortragsprogramm geplant, zudem steht im Rahmen der Veranstaltung als Highlight ein Besuch der Audi Strukturteilefertigung auf der Agenda.

Die Tagung am 6. und 7. November 2018 in Bad Gögging steht unter dem Motto „**Innovative Lösungen zur Effizienzsteigerung in der Wertschöpfungskette**“ und beschäftigt sich mit diesen Schwerpunkten:

- Innovative Druckgusstechnik in Anwendung und Simulation
- Gießerei im digitalen Wandel
- Konzepte mit Zukunft: Werkstoffe und Verfahren

Der Leichtbaugedanke ist seit jeher immanenter Bestandteil der deutschen Ingenieurskunst. Um nachhaltig die Produktion am Hochlohnstandort Deutschland sowie den Technologievorsprung zu festigen und zu erweitern, gilt es, ständig innovative Lösungen für mehr Effizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu finden und einzusetzen. Im Fokus der „Leichtbau in Guss 2018“ stehen aus diesem Grund u.a. die Innovationen in der Druckgusstechnik, die in Anwendung als auch Simulation exemplarisch vorgestellt werden. Da fortschreitende Digitalisierung die Gießerei-Branche vor neue Herausforderungen stellt, beschäftigen sich weitere Vorträge daher mit dem Thema der „Gießerei im digitalen Wandel“. Fit für die Zukunft auch hinsichtlich Werkstoffe und Verfahren – Konzepte mit Zukunft stellen den dritten Schwerpunkt-Block innerhalb der zweitägigen Veranstaltung dar. Als Höhepunkt erwartet die Teilnehmer die Besichtigung der Audi Strukturteilefertigung in Münchsmünster (Teilnehmerzahl begrenzt).



Überführung der Schmelze in den Transport- bzw. Reinigungstiegel

© AUDI AG

Zu den vortragenden Firmen gehören in diesem Jahr unter anderem AUDI AG, BMW Group, ExOne GmbH und RWP GmbH.

Weitere Informationen finden Sie auf der Internetseite zur Tagung: www.hanser-tagungen.de/guss

Die Tagung wird geleitet von Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk und Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München). Dem Fachbeirat gehören ferner an: Dr.-Ing. Erwin Flender (MAGMA Gießereitechnologie GmbH), Dr.-Ing. Andreas Fent (BMW Group Dingolfing), Thomas Heller (BMW Group Landshut) Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien (Hochschule Aalen), Peter Wanke (Audi AG)

Veranstaltungsort

The Monarch Hotel
Kaiser-Augustus-Straße 36
D-93333 Bad Gögging
<http://www.monarchbadgoegging.com/hotel-bayern.html>

Preis

Bei einer Anmeldung bis 09.10.2018 € 980,-
Bei einer Anmeldung ab 10.10.2018 € 1.120,-

Abonnenten der Zeitschriften FORM+Werkzeug und HTM Journal of Heat Treatment and Materials sowie Mitglieder des BDG und VDG erhalten 10% Rabatt.

Hochschulrabatte auf Anfrage.
Alle Preise zzgl. MwSt.

Eine kostenlose Teilnahme ist für die Fachpresse auf Anfrage möglich.

KONTAKT

Tagungsorganisation:

Sabine Schuster
T +49 (0)89 99830-674
sabine.schuster@hanser.de

Pressekontakt:

Marion Völker
Presse Fachverlag
Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
T +49 (0)89 99830-119
marion.voelker@hanser.de

Leichtbau in Guss

Innovative Lösungen zur Effizienzsteigerung in der Wertschöpfungskette

6. und 7. November 2018 in Bad Gögging

HIGHLIGHT:

Besichtigung der
Audi Strukturteilefertigung
in Münchsmünster

Jetzt anmelden für praxisnahe Vorträge und Diskussionen zu diesen Schwerpunkten:

- Innovative Druckgusstechnik in Anwendung und Simulation
- Gießerei im digitalen Wandel
- Konzepte mit Zukunft: Werkstoffe und Verfahren

Teilnehmerstimmen zu **Leichtbau in Guss 2017**:

»Wertvolles Branchentreffen von innovativen Giessereifachleuten.«

Stephan Philipp > Georg Fischer Automotive AG

»Sehr gut strukturierte und informative Veranstaltung. Viele Einblicke zu dem ausgeschriebenen Thema mit verschiedenen Blickwinkeln. Sehr gut für »Networking«. Nächstes Jahr gerne wieder.«

Martin Gawlitza > Continental Automotive GmbH



In Kooperation mit



Mit freundlicher Unterstützung von



» Materialgraphische Präparation von Faserverbundwerkstoffen «

Verbundwerkstoffe, auch Composites (engl.) genannt, haben einen breiten Bereich an Zusammensetzungen und werden in Untergruppen eingeteilt Metallmatrix-Verbunde (engl. MMC), Polymermatrix-Verbund (engl. PMC) und Keramikmatrix-Verbund (engl. CMC).

Im Allgemeinen ist es schwierig, diese Materialien zu präparieren, da die Phasen unterschiedliche Härten und somit unterschiedliche Poliereigenschaften besitzen. Die Reliefbildung ist daher ein allgemeines Problem. Ausbrüche treten besonders bei PMCs auf. Das Trennen verursacht eine starke Zerstörung, die durch das Planschleifen entfernt werden muss. Die Einbettung sollte mit Epoxidharz unter Vakuum erfolgen.

Polymerverbundwerkstoffe werden normalerweise auf Poren und Lunker untersucht, daneben sind Aussagen über die Fasercharakteristik sowie den Faseranteil und deren Verteilung zu treffen. Aussagefähige Proben müssen daher möglichst relieffrei sein. Da-

neben werden Schadensmechanismen (bspw. Risse) untersucht oder mikrostrukturelle Untersuchungen der Matrix durchgeführt. Eine Vielzahl unterschiedlichster Kunststoffe (Thermo- und Duroplaste) finden als Matrixmaterial für faserverstärkte Verbundwerkstoffe Verwendung. Darüber hinaus können Modifikatoren als dispergierte Phasen von wenigen Nanometern bis Mikrometergröße in die Matrix eingebracht sein. Die Fasern zur Verstärkung sind in der Regel aus Kohlenstoff, Glas, Bor oder natürliche Materialien (bspw. Holz, Hanf). Die Charakteristik der Grenzflächen spielt bei den Materialeigenschaften eine wichtige Rolle. Bei der Untersuchung von Schadensursachen wird besonders auf Erscheinungen wie Delami-

nation geachtet. Um Gewicht zu sparen werden vor allem in der Automobil, sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie Bauteile aus Verbundwerkstoffen mit Wabenstruktur oder geschäumte Materialien eingesetzt, neben Gelegen und Geweben. **Tab. 1** zeigt eine allgemeine Präparationsmethode für die Präparation von vielen Polymermatrixverbundwerkstoffen.

Einige Faserverstärkungsmaterialien, speziell wenn sie kleiner als 10 µm sind, können bei der Diamantpolitur anfällig für spröde Ausbrüche sein. Hier kann es sinnvoll sein, die 3 µm Stufe durch eine Politur mit 0,3 µm Aluminiumoxid auf einem TexMet C Tuch zu ersetzen. Für die meisten Untersuchungen

KONTAKT

**Buehler – ITW
Test & Measurement GmbH**
Matthias Pascher
Boschstraße 10
D-73734 Esslingen am Neckar
Tel.: +49 (0)711 490 4690-847
marketing@buehler.com
www.buehler.com

Trennen		Präzisionstrennscheibe, z.B. 10LC				
Einbetten		Kalteinbetten, z.B. Epoxidharz EpoThin 2				
Medium	Abrasivmedium	Druck je Probe [N]	Tellergeschw. [U/min]	Relative Rotation	Zeit [min:sek]	
CarbiMet	P320 SIC Papier	25	300	Gleichlauf	Bis plan	
TexMet P	9µm MetaDi Diamant-suspension*	25	150	Gegenlauf	05:00	
VerduTex	3µm MetaDi Diamant-suspension*	25	150	Gleichlauf	05:00	
MicroCloth	0,05µm MasterPrep Al2O3 Suspension	25	150	Gegenlauf	01:30	

* MetaDi Fluid Schmiermittel nach Bedarf hinzufügen

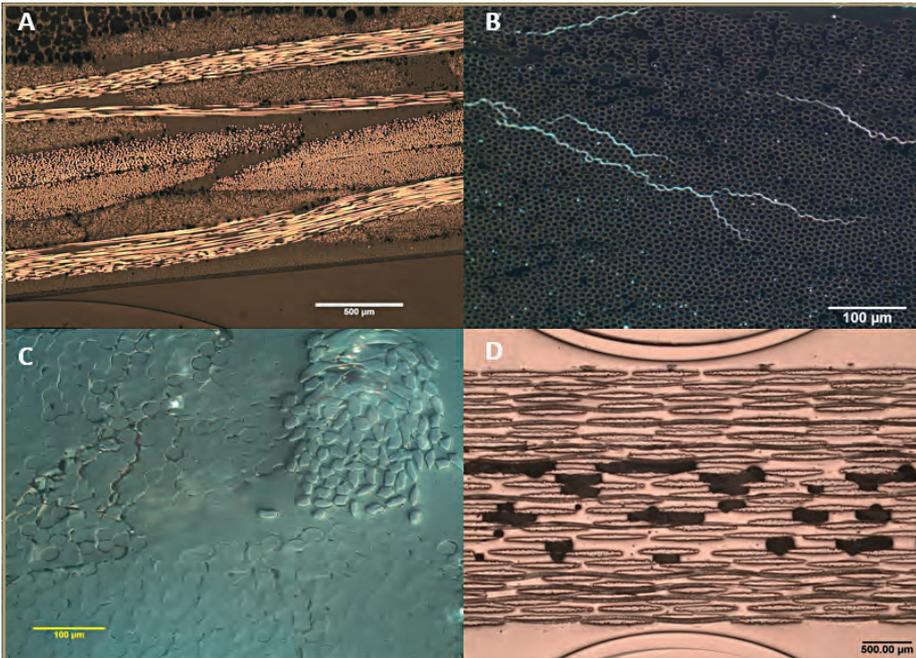


Abb. 1: A: Hellfeldaufnahme eines CFK Gewebes; B: Dunkelfeldaufnahme zeigt Risse in der polymeren Matrix; C: Glassfasern werden sichtbar mittels Differenzialinterferenzkontrast; D: Polyamidfasern verstärkter Kunststoff mit Poren.

(Bestimmung der Porosität, Faserverteilung und Untersuchung auf Delamination) ergibt dies eine aussagefähige Probe bei geringem bis akzeptablem Relief.

Tipps zur Präparation von Verbundwerkstoffen

Trennschäden treten vorwiegend an den Fasern auf und sind schwer wieder zu beseitigen. Verwenden Sie Präzisionstrenner, wie z.B. die IsoMet High Speed pro, mit feinen Diamanttrennscheiben wie Scheiben der Serie 5 LC oder 10 LC. Dünnere Scheiben verursachen grundsätzlich geringere Schäden. Verbundwerkstoffe können durch Warmeinbetten zerstört werden. Epoxidharze mit niedrigen Aushärtetemperaturen sind daher zu bevorzugen, wie z.B. EpoThin 2. Grobe Schleifstufen sollten durch feinere Körnungen ersetzt werden.

Anschließend kann problemlos die Auswertung am Mikroskop vorgenommen werden, siehe Abb. 1.



INNOVATIONEN SEIT 1936

EcoMet™ 30
Schleif- und Poliergerät

IsoMet™ High Speed
Präzisions- und Abrasivtrenner



Buehler ist stolz darauf, die Komplettlaborlösung anbieten zu können, mit der sich Vorgänge wie Trennen, Einbetten und Schleifen über Polieren bis hin zum Analysieren im Rahmen von Härteprüfungen durchführen lassen.



» Einsatzgrenzen erweitern – der Schlüssel zum Erfolg «

Die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) mit ihren angeschlossenen Instituten für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) und für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) entwickelt innovative Werkstoffsysteme für den Einsatz in modernen Hochleistungsanwendungen und sichert diese über den gesamten Lebenszyklus ab.

Der Schlüssel zur Absicherung der Gebrauchsfähigkeit unter hohen und höchsten Beanspruchungen liegt oft in dem Verständnis der Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe. Dabei sind moderne Verfahren der Materialcharakterisierung und der experimentellen und numerischen Simulation im Einsatz, welche eine lückenlose Betrachtung auf allen relevanten Größenskalen ermöglichen, beginnend von der atomaren Gitterskala bis hin zum makroskopischen Bauteil in einer komplexen Anlagenumgebung.

Als Mitglied im WAW legen die Kompetenzzentren im Bereich der metallischen Werkstoffe der MPA den gemeinsamen Schwerpunkt auf mechanisch und/oder thermisch beanspruchte Bauteile. Dabei wird der Einfluss der vollständigen Betriebslasten einschließlich der Umgebungsmedien mit abgebildet.

Unser Zielbild: „The Lifetime Experts“

Transiente thermomechanische Beanspruchungen und Beanspruchungsabläufe initiieren unterschiedliche spezifische Schädigungsmechanismen, die im gesamten Lebenszyklus von der Auslegung bis zur Lebensdauerbewertung berücksichtigt werden müssen. Sie sind Basis für das Verständnis und die Vorhersage des Bauteilverhaltens. Die Beanspruchung ihrerseits wird durch das Zusammenwirken des Bauteils in seinem Umfeld innerhalb der Gesamtanlage bestimmt. Somit ist für die Bestimmung der einzelnen Einwirkungen auf das Bauteil und den eingesetzten Werkstoff das Anlagenverhalten und die Betriebsweise von entscheidender Bedeutung. Nur durch diese skalenübergreifende Betrachtung von der mikroskopischen Skala des Werkstoffs bis zur Makroskala der Anlage können belastbare Aussagen über die Lebens-



MPA: Belastbare Aussagen für Ihre Sicherheit.

dauer, die Zuverlässigkeit im Betrieb, lebensdauer- und kostenoptimierte Fahrweisen des Anlagenbetriebs und zur vorausschauenden Planung von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten getroffen werden. Die Untersuchungen an der MPA Stuttgart decken dabei in engem Zusammenwirken von experimentellen und numerischen Methoden alle notwendigen Größenskalen ab:

Werkstoffverhalten und -modellierung:

- Durchführung geeigneter transients Experimente unter betriebsgerechter
 - ▶ thermischer und mechanischer Beanspruchung und
 - ▶ Beanspruchungsgeschwindigkeiten bis zu 50.000 1/s

- Ermittlung und Validierung von werkstoffspezifischen Kennwerten
- Sicherung einer gemeinsamen Datenbasis für alle materialspezifischen Ergebnisse
- Implementierung numerischer Werkstoffbeschreibungen und deren Absicherung
- Bereitstellung einer standardisierten Modelldatenbank innerhalb der MPA

Bauteilauslegung und Komponentenverhalten:

- Bauteilqualifikation unter Berücksichtigung der Herstellungsprozesse multiphysikalischer und interdisziplinärer Problemstellungen
- Bewertung der Bauteilintegrität inkl. bruchmechanischer Charakterisierung

- Anwendung und Weiterentwicklung von Regelwerken und adaptierten Softwarelösungen und Zertifizierung von Baugruppen
- statistische und probabilistische Methoden zur Zuverlässigkeits- und Risikoanalyse

Anlagenverhalten und Betriebsstrategie:

- Analyse und Abbildung komplexer transienter Betriebsbeanspruchungen
- Ableitung der betriebsspezifischen Bauteilbeanspruchung aus Betriebslasten
- Qualitätsüberwachung und Qualitätssicherung
- Lebensdaueranalyse und Identifikation limitierender Baugruppen und Bauteile
- umfassende Schadensanalyse bei Störungen und Bauteilschäden
- Probabilistik der Zuverlässigkeit und Integrität der Anlage und aller Komponenten
- Ableitung optimaler Betriebs-, Wartungs- und Ertüchtigungsstrategien

Zu diesen skalenspezifischen Säulen sind fachspezifische Querschnittsbereiche etabliert, die für das Gesamtverständnis der Wirkungskette unabdingbar sind:

ZfP und Materialcharakterisierung:

- mikrostrukturelle Charakterisierung und Werkstoffqualifizierung
 - ▶ Metallografie
 - ▶ Elektronenmikroskopie (REM, TEM)
- in-situ Beanspruchungen von Werkstoffproben im REM
- Zusammenhang zwischen mikroskopischen Eigenschaften und Schädigung
- zerstörungsfreie Bestimmung des Bauteilzustands
- Optimierung der ZfP-Verfahren und Bewertung der Zuverlässigkeit von ZfP-Aussagen

Bauteilverhalten unter Medieneinfluss:

- Berücksichtigung aller technisch relevanten Medien, sowohl als Betriebsstoff als auch als Umgebungsmedium
- experimentelle Erfassung der Einflüsse auf Lebensdauer und Rissverhalten
- Entwicklung entsprechender mechanismbasierter numerischer Ansätze
- Überführung der Erkenntnisse in Auslegungs- und Regelwerksvorgaben

Fügetechnik und Additive Fertigung

- experimentelle und numerische Beschreibung stoffschlüssiger Verbindungen
- Prozessentwicklung und Prozessoptimierung einschließlich Robustheitsanalyse
- Sonderschweißverfahren: Rührreißschweißen, Pressschweißverfahren, Ultraschall
- Analyse und gezielte Beeinflussung der Gefüge im Bereich der Schweißung und WEZ
- Eigenspannungsanalyse im Labor und on-site

Kalibrierung und Industriedienstleistungen

- Kalibrierung von Prüfmaschinen und Kraftmessgeräten
- Überwachung und Zertifizierung von Fahrbahnübergängen,
- Brückenlagern und Erdbebenvorrichtungen
- Fort- und Weiterbildungskurse für industrielle Partner
- Prüfung und Zertifizierung von KFZ-Rückhaltesystemen und Schutzhelme

In dieser Zusammensetzung ist es an der MPA Stuttgart möglich, komplexe Fragestellungen hochbeanspruchter Strukturen umfassend zu analysieren, zu verstehen und entsprechend den individuellen Zielsetzungen weiterzuentwickeln – alles aus einer Hand.

Dieses Zusammenwirken soll im Folgenden an drei aktuellen Fragestellungen exemplarisch erläutert werden.

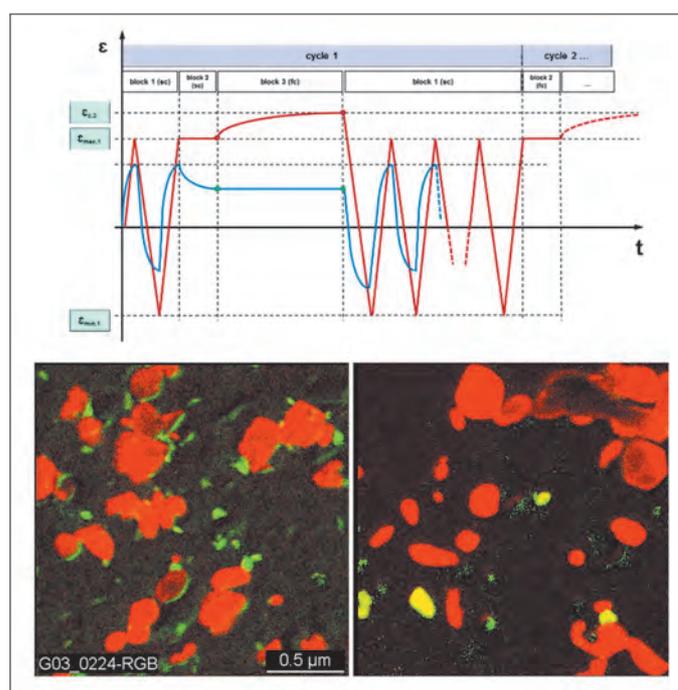
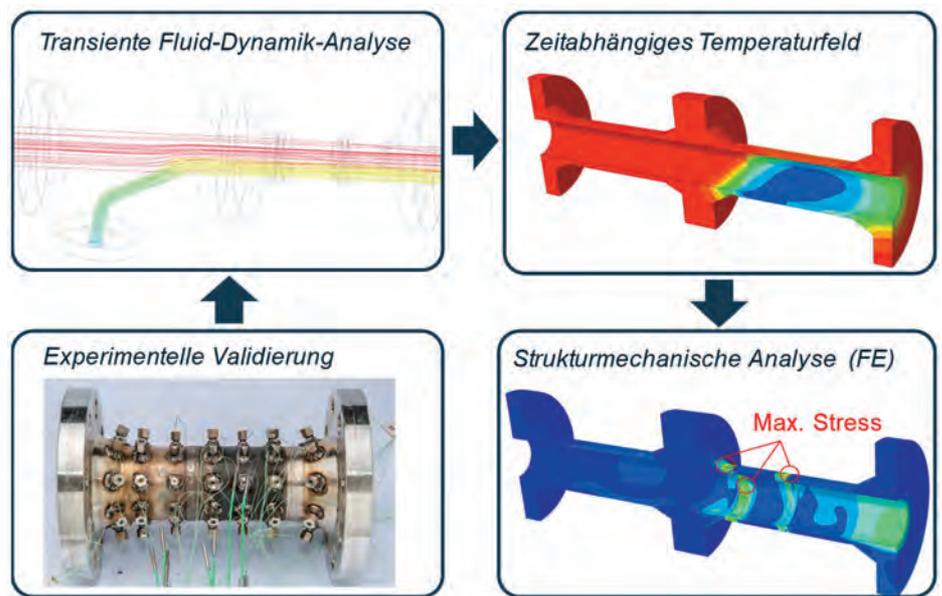
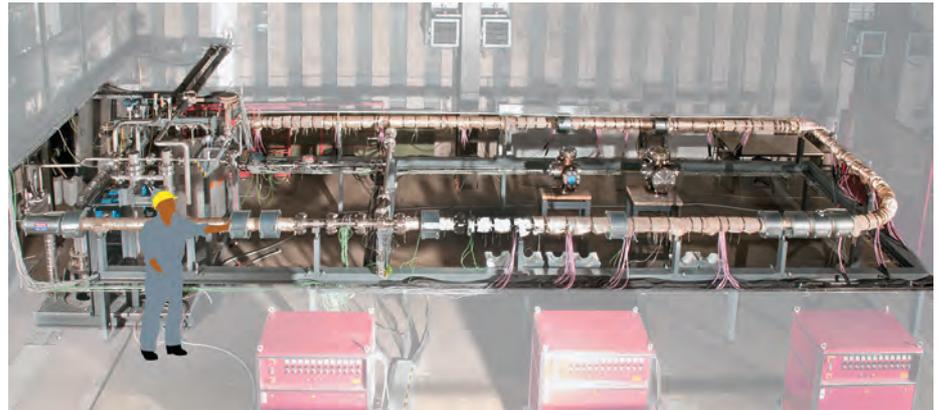


Abbildung 1: Komplexe Versuche und resultierende Ausscheidungsentwicklung (Martensit, TEM): vor (links) und nach Kriechermüdigungsbeanspruchung mit vergrößerten (M23C6, rot) und neu gebildeten Ausscheidungen (Z-Phase, gelb).

Abbildung 2: Prüfstand im Gesamtsystem zur Verifikation von thermozyklischen Bauteil-auslegungen unter Berücksichtigung der Fluid-Struktur-Interaktion (FSI).



Thermomechanisch beanspruchte Sicherheitsbauteile

Hochwertige Bauteile erfordern eine umfassende Qualifizierung der Werkstoffe. Sowohl in der Auslegung als auch in der Lebensdauerprognose stehen dafür die gesamte Bandbreite mechanismenbasierter, phänomenologischer und probabilistischer Schädigungsmodelle zur Verfügung. Diese numerischen Verfahren werden im eigenen Haus nicht nur entwickelt, sondern über entsprechende Erprobung auch im langzeitigen Bereich mit Versuchseinrichtungen für Zeitstandversuche und spezielle Prüftechnik für zyklische Versuche validiert und durch modernste elektronenmikroskopische Charakterisierungen begleitet (Abb. 1). Somit sind belastbare Lebensdauervorhersagen möglich. Zur Verifizierung dieser numerischen Auslegungsverfahren und der zugrundeliegenden Stoffgesetze sind auch entsprechend komplexe

Versuche auf der Bauteilskala unabdingbar (Abb. 2).

Die so verifizierten Kenntnisse werden in reale Anlagen (Abb. 3) überführt und durch Temperatur- und Dehnungsmessungen sowie intensiven Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren vor und während des Betriebs begleitet, um belastbare Voraussagen auch unter zukünftigen Einsatzbedingungen zu ermöglichen.

Additive Fertigungsverfahren

Basierend auf dem Unterpulverschweißen wurden bereits in den 80-er Jahren an der MPA Großbauteile mit bis zu 72 Tonnen Stückgewicht durch Formschiessen hergestellt. Die resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften konnten gegenüber den Eigenschaften geschmiedeter Probekörper verbessert werden: Durch eine geschickt gewählte Form der Schweißlagen und eine intelligente

Anordnung derselben wurde die Wärme der nachfolgenden Lagen gezielt zur Vergütung und damit zur Umkörnung des ursprünglich dendritisch erstarrten Werkstoffs genutzt. Somit waren bereits erste Grundlagen für die Optimierung Additiver Fertigungsverfahren gelegt (Abb 4).

Aus dem lokalen, selektiven Aufschmelzen des Werkstoffs beim selektiven Strahlschmelzverfahren ergeben sich Eigenspannungen und Verzug durch hohe lokale thermische Gradienten im Wirkungsbereich des Laserstrahls (Abb. 5). Aus dem lokalen Wärmeintrag resultieren komplexe Aufschmelz- und Erstarrungsprozesse, und nur durch sorgfältig gewählte Prozessparameter lassen sich resultierende Fehler wie Poren und Bindefehler nachhaltig vermeiden. So ist bereits bei geringfügig abweichenden Prozessparametern eine signifikante Zunahme großer

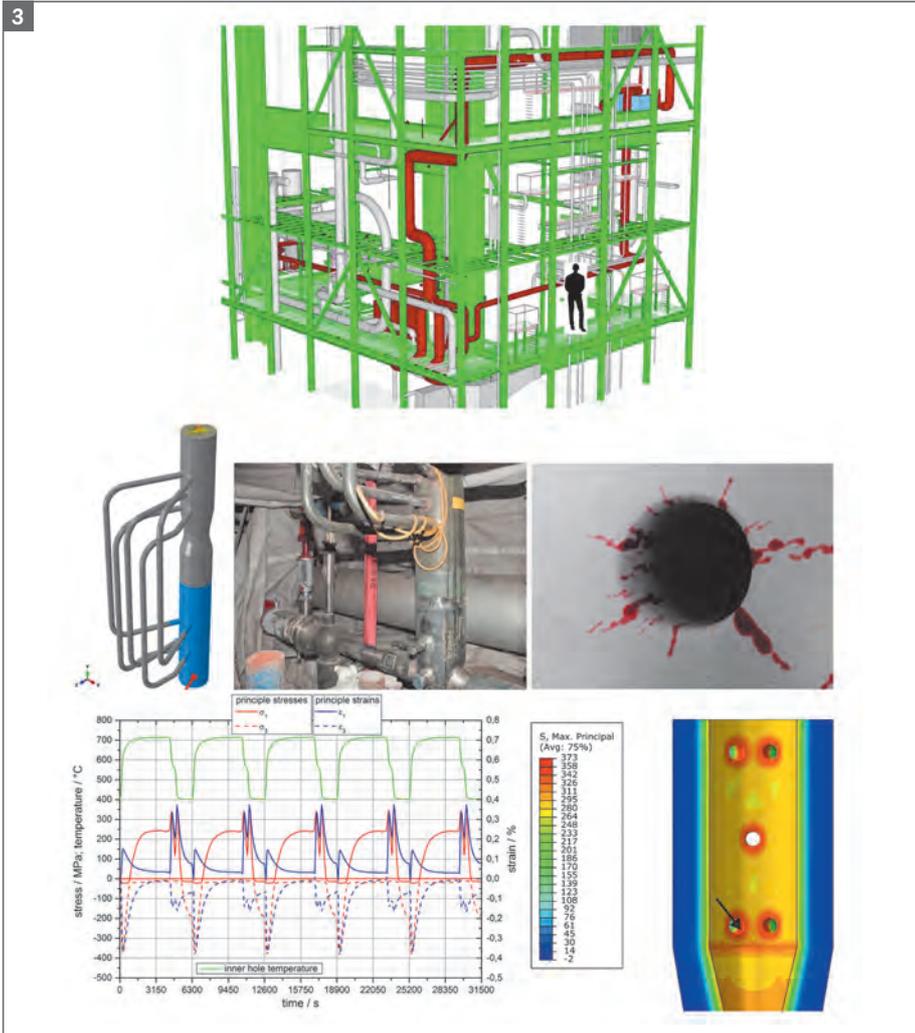


Abbildung 3: Rohrkreislauf integriert in einem 900 MW-Kraftwerk (GKM Mannheim) mit Vorentwicklungsstufe eines 700°C-Sammlers und dem Schadensbefund nach 2600 thermischen Zyklen (experimenteller Befund und numerische Prognose).

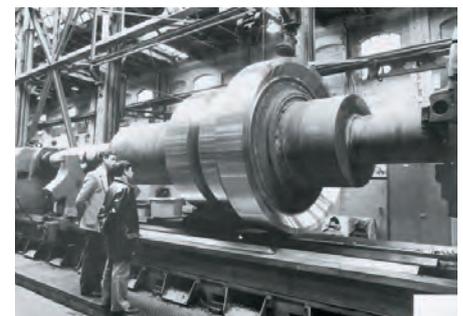


Abbildung 4: Formgeschweißter Behälterschuss (links) und formgeschweißte Turbinenwelle (rechts).

Poren durch das zyklische Kollabieren der Dampfkapillare zu beobachten.

Thermomechanisch gekoppelte Simulationen der Einwirkung des Laserstrahls als hochaufgelöste, bewegte Wärmequelle (Abb. 6) erlauben eine detaillierte Beurteilung des Ein-

flusses der Prozessparameter beim selektiven Laserschmelzen auf die Gefügeentwicklung, die Eigenspannungen sowie die resultierende Porenverteilung und Dichte.

In der Abteilung Zerstörungsfreier Prüfung und Mikroskopie zeigt die lichtmikroskopische

und elektronenmikroskopische Charakterisierung beispielsweise den Lagenaufbau und die dendritische Erstarrung. Charakteristisch für die nah-eutektische Aluminiumlegierung AlSi10Mg ist hierbei der Saum vergleichsweise feiner Körner am Rand der einzelnen Schmelzspuren (Abb. 7).

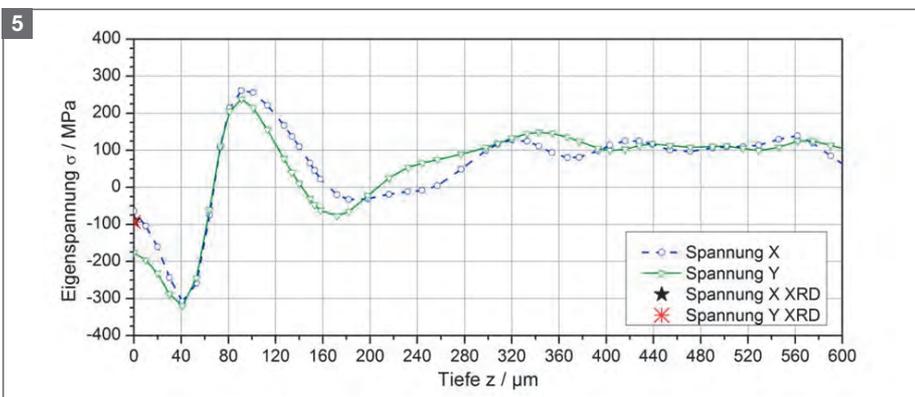


Abbildung 5: Eigenspannungsmessungen an einer additiv gefertigten martensitischen Legierung 1.2709

Abbildung 6: Temperaturfeld bei der numerischen, thermomechanisch gekoppelten Simulation des SLM Prozesses.

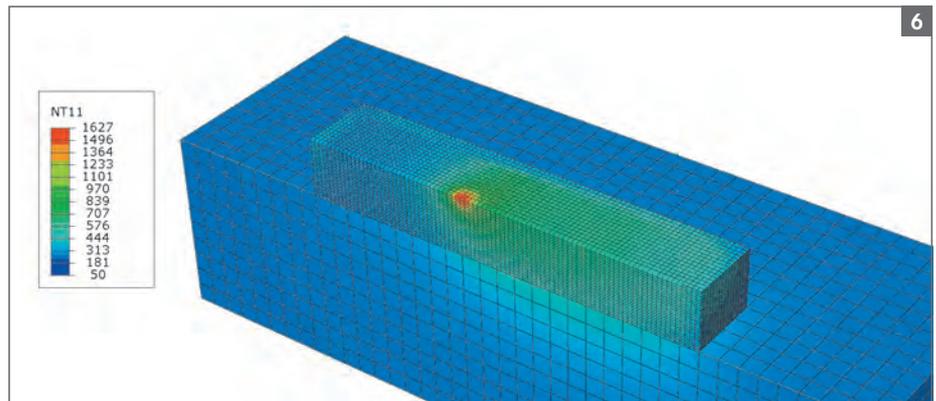


Abbildung 7: Lichtmikroskopische (links) und elektronenmikroskopische EBSD Analyse (rechts) des Lagenaufbaus.

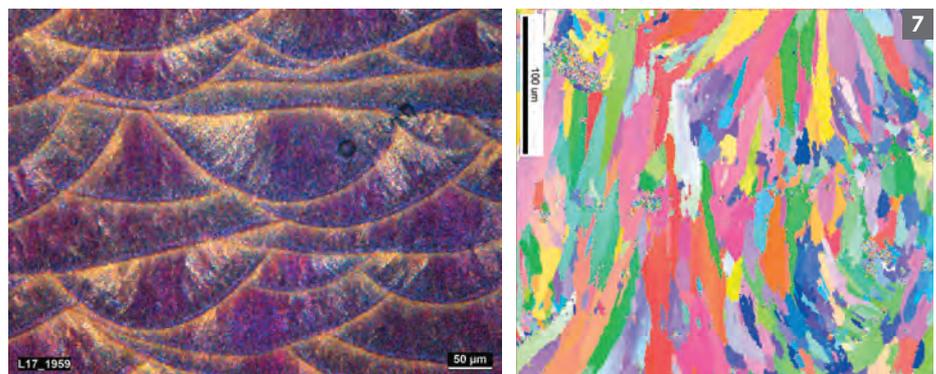
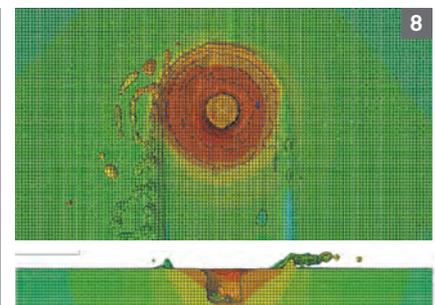


Abbildung 8: Umgeformte Aluminium-Stahl-Aluminium und numerische Optimierung der Prozessparameter.

Intensiv wird auch an der Weiterentwicklung und numerischen Modellierung von Schweißprozessen wie beispielsweise dem Widerstandspunktschweißen und dem Rührreibschweißen gearbeitet. Hierbei können die Festigkeiten einer resultierenden Aluminium-Stahl-Verbindung dabei so gesteigert werden, dass die verschweißten, hybriden Platinen gemeinsam umgeformt werden können, ohne dass es zu einem Aufreißen der Schweißnaht selbst kommt (**Abb. 8, 9**).

Auch bei der Verschweißung unterschiedlich gearteter Stähle sind überlagerte Schadensmechanismen zu beobachten, die sowohl von den thermischen und mechanischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe als auch vom Fügeprozess und den Beanspruchungen abhängig sind. Die numerische Simulation einer zeitstandbeanspruchten, mehrachsigen beanspruchten Rundnaht aus einem martensitischen Werkstoff mit einem integrierten Schädigungsmodell und -kriterium erlaubt so detaillierte Aussagen über den Schädigungsablauf (**Abb. 10**).



Betriebsverhalten metallischer Werkstoffe unter Medien

Der (korrosive) Medieneinfluss unter mehrachsiger Beanspruchung auf die Bauteillebensdauer wird im gleichnamigen Kompetenzbereich mittels experimenteller, metallografischer und numerischer Untersuchungen untersucht. Die Bandbreite reicht dabei von Hochtemperatur-Salzschmelzen (**Abb. 11**) über Dampfbeaufschlagung bis hin zu Wasserstoff bei höchstem Druck (**Abb. 12**).

Für einen Schwerpunkt – die Untersuchung des Werkstoffverhaltens in Wasserstoff – stehen servohydraulische Prüfsysteme unter

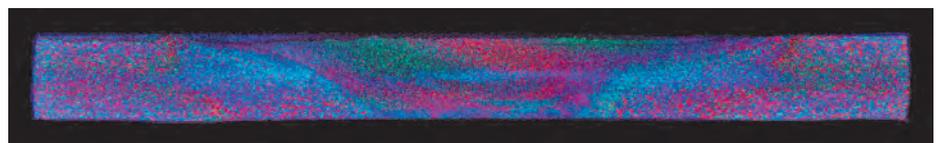


Abbildung 9: Hochfeste Rührreibschweißnaht an einer aushärtbaren Aluminiumlegierung.

Flüssigwasserstoff bei 20 K bis hin zu Druckwasserstoff bei Temperaturen bis zu 450 K und Drücken bis zu 1000 bar zur Verfügung.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse werden durch aktive Mitwirkung in Normungsgremien (u. a. DIN Normenausschüsse, SAE

Gremien) in den Stand der Technik übergeleitet. Auch Qualifizierungsprüfungen, wie sie z. B. für Komponenten in Brennstoffzellenfahrzeugen die kanadische Prüfnorm CSA CHMC1 fordert, werden im direkten Industriesauftrag durchgeführt.

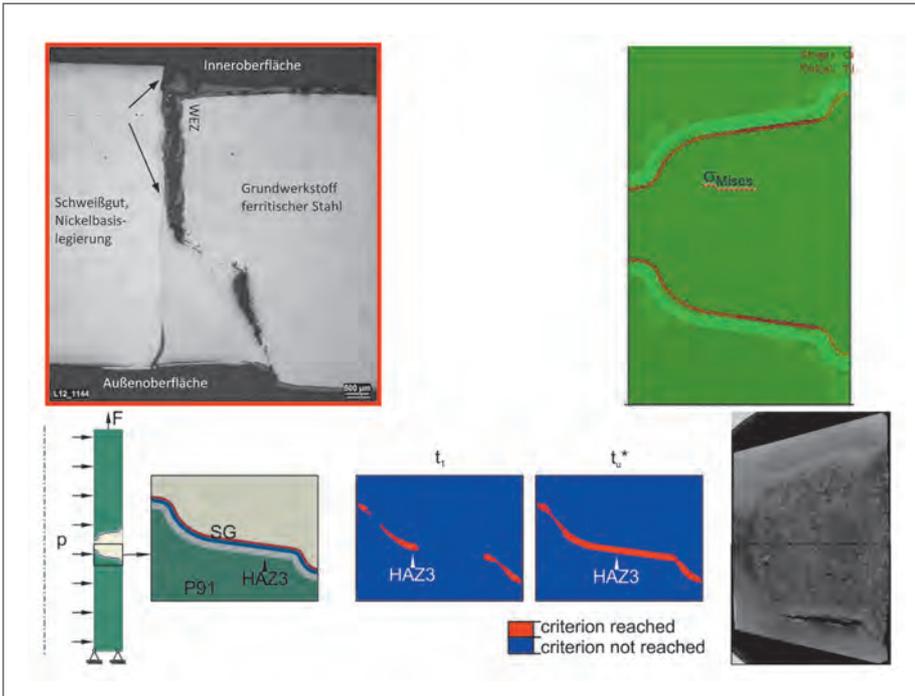


Abbildung 10: Schädigungsmechanismen in einer Mischschweißverbindung unter mehrachsiger Kriechbeanspruchung.

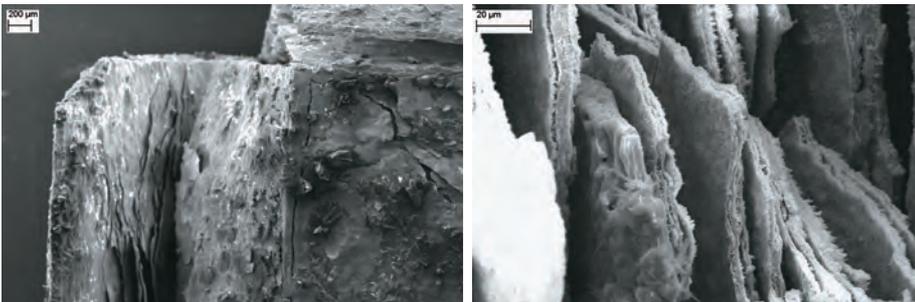


Abbildung 11: Hochttemperatur-Salzangriff am Werkstoff T91.



Abbildung 12: Fraktografie einer Zugprobe aus dem Werkstoff 1.4306 (mod. Variante) in Wasserstoffumgebung.



Zusammenfassung

Die betriebssichere Auslegung hochbeanspruchter thermomechanisch belasteter Sicherheitsbauteile ist ein zentrales Anliegen unseres Hauses. Dies ist nur durch die Verknüpfung zweier extremer Skalen möglich: einerseits des mechanismenbasierten Verständnisses des Werkstoffverhaltens unter Einbeziehung der Herstellungsrouten und aller anschließenden Fertigungsschritte, andererseits der umwelt- und betriebsbedingten Beanspruchung des Bauteils als Teilsystem einer komplexen Gesamtanlage. Dabei gewinnt die Berücksichtigung probabilistischer Effekte als Basis einer sinnvollen Bewertung von Zuverlässigkeit und Risiko immer mehr an Bedeutung. Mit einer detaillierten zerstörungsfreien Erfassung des Ist-Zustands erschließt sich dann die Chance, bereits vorausschauend kostenoptimierte Betriebs-, Wartungs- und Ertüchtigungsstrategien bei gleichzeitig abgesicherter Anlagenverfügbarkeit abzuleiten.

Alle dazu notwendigen Kompetenzen und Einrichtungen sind am Standort Stuttgart in der Materialprüfungsanstalt gebündelt und werden sowohl für Forschung als auch für Industrie eingesetzt. Neben dem Labormaßstab ist dies auch in den vielfältigen Großversuchseinrichtungen der MPA für industrielle Großbauteile (**Abb. 14**) nahezu uneingeschränkt möglich.

Autoren:
S. Weihe, A. Klenk, M. Werz, S. Zickler



Abbildung 13: Prüfsysteme zur Untersuchung des Werkstoff- und Bauteilverhaltens unter Wasserstoff.

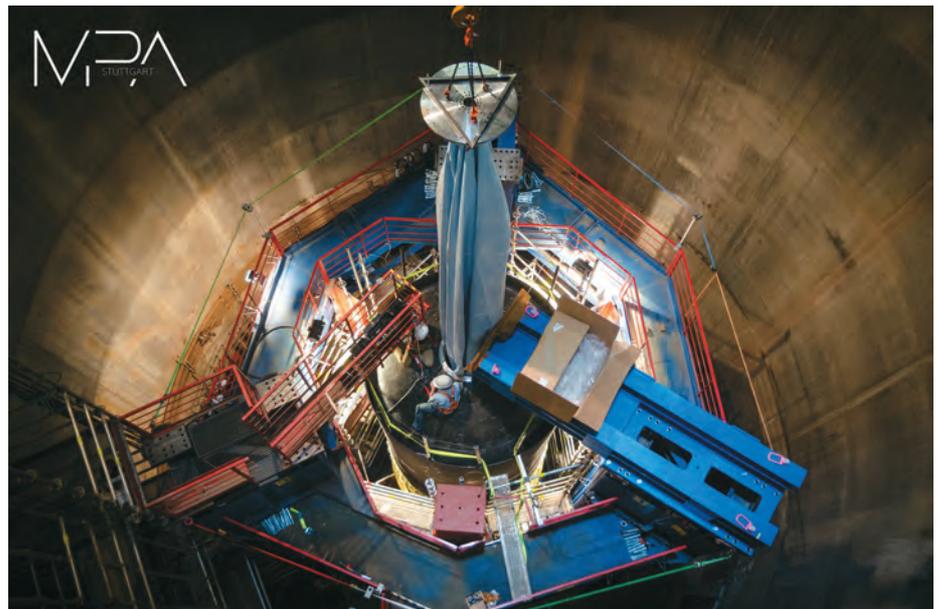


Abbildung 14: Großversuch an einem CFK-Technikdemonstrator für den Booster der Ariane 6.

KONTAKT

Universität Stuttgart
Materialprüfungsanstalt MPA
Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde
und Festigkeitslehre
Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe
Pfaffenwaldring 32
D-70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685-62604
Fax: +49 (0)711 685-63053
Stefan.Weihe@mpa.uni-stuttgart.de
www.mpa.uni-stuttgart.de

» VON ARDENNE – Wegbereiter der industriellen Vakuumbeschichtung «

Die Dresdner VON ARDENNE GmbH wurde 1991 aus dem Forschungsinstitut Manfred von Ardenne ausgegründet, dessen Wurzeln bis in das Jahr 1928 zurückreichen. Das Technologieunternehmen entwickelt und fertigt Anlagen und Komponenten zur industriellen Vakuumbeschichtung von Werkstoffen wie Glas, Wafer, Metallband oder Kunststofffolie. Die metallischen, keramischen oder organischen Schichten im Nanometer-Bereich verleihen diesen Materialien neue funktionale Eigenschaften. Die Kunden des Dresdner Familienunternehmens stellen aus diesen beschichteten Werkstoffen hochwertige Produkte her, wie Architekturglas, Displays für Smartphones und Touchscreens, Solarmodule oder Wärmeschutzfolien für Autoverglasung.

Funktionalisierung von Oberflächen

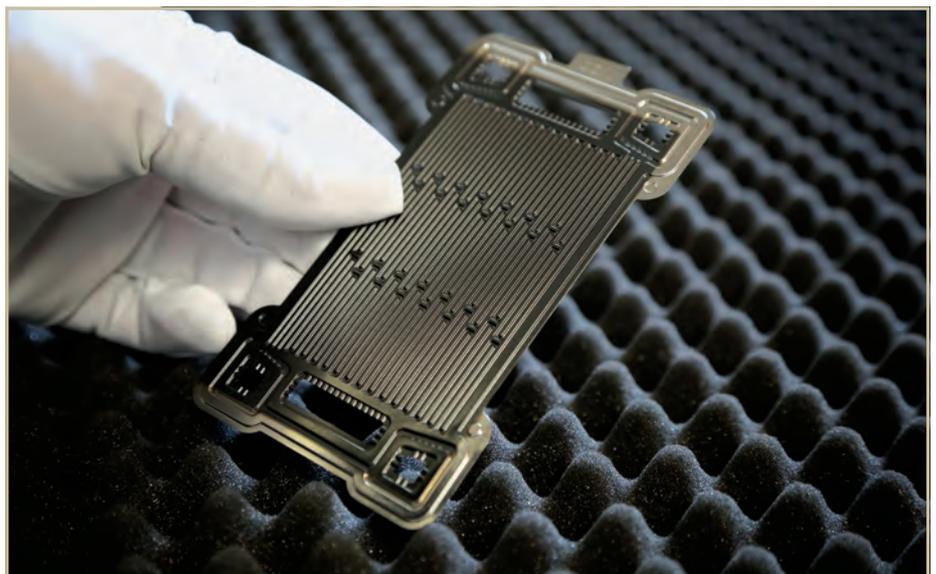
Über 55 Jahre Erfahrung mit Elektronenstrahlverfahren und mehr als 40 Jahre Kompetenz im Magnetron-Sputtern machen VON ARDENNE zu einem weltweit führenden Anbieter von Anlagen und Technologien in der PVD-Dünnschichttechnik und der Vakuumprozesstechnik.

Beide Verfahren sind die Basis der Beschichtungsanlagen aus dem Hause VON ARDENNE. Die damit abgeschiedenen Schichten können die elektrischen, optischen, mechanischen oder chemischen Eigenschaften der Substratoberflächen deutlich verändern und damit für unterschiedlichste Einsatzgebiete effizient gestalten. Der größte Teil der Anlagen und Komponenten kommt in Branchen zum Einsatz, in denen die Gewinnung erneuerbarer Energie, der effiziente Umgang mit und die Speicherung von Energie im Vordergrund stehen und trägt damit zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen bei. In der Solarbranche sind es etwa Kontakt- und Absorberschichten für die kristalline und Dünnschicht-Photovoltaik. Auch bei neuesten Technologien für höchste Zellwirkungsgrade und Produktivität ist VON ARDENNE mit seinen Anlagen aktiv.

Eine wichtige Rolle in vielen Anwendungen spielen leitfähige, transparente Schichten, sogenannte TCO-Schichten wie ITO (Indium-Zinn-Oxid), deren optische und elektrische Eigenschaften über Materialauswahl und Prozessparameter in einem sehr breiten Bereich variiert werden können.



© VON ARDENNE Corporate Archive: Elektrode, beschichtet mit amorphem Kohlenstoff



© VON ARDENNE Corporate Archive: beschichtete Edelstahl-Bipolarplatte (Hersteller: Borit NV)



© VON ARDENNE Corporate Archive: FOSA LabX 330 Glass: Beschichtungsanlage für flexibles Glas von der Rolle

Mit Reflexionsschichten veredelte Gebäudeverglasung und Fahrzeugscheiben verhindern das Aufheizen oder Auskühlen der Innenräume und helfen, bis zu 80 % der Kosten für Heizung und Kühlung – und damit fossile Brennstoffe – einzusparen.

Der wachsende Flugverkehr verlangt nach neuen und effizienteren Turbinen, die deutlich höhere Verbrennungstemperaturen als herkömmliche Triebwerke verkraften müssen. VON ARDENNE hat die passende Antwort: eine spezielle Keramikbeschichtung der Turbinenschaufeln.

Effiziente Speicherlösungen werden ein wichtiger Bestandteil der Energiewende sein. Dafür entwickelt das Dresdner High-Tech-Unternehmen neue kohlenstoffbasierte Beschichtungen. Neben einer höheren Leistungsdichte und Zellperformance bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren bietet die neue Technologie u.a. einen verbesserten Kontaktwiderstand sowie höhere Korrosionsbeständigkeit und verspricht sinkende Produktionskosten. Für die Herstellung von Brennstoffzellen lässt sich dieses Verfahren ebenfalls gewinnbringend einsetzen. Hier sorgen Bipolarplatten aus Edelstahl mit dünnsten Kohlenstoffschichten für entscheidende Vorteile: sie ersetzen die bisherigen, teuren Bipolarplatten aus Graphit. Zudem sind sie deutlich dünner und weniger vibrationsempfindlich als die herkömmliche Lösung und ermöglichen dadurch eine höhere Leistung bei gleichem Volumen und besserer Ausfallsicherheit.

Dünnste Schichten verleihen auch elektronischen Bauteilen neue Funktionen. Das Dresdner Unternehmen liefert seine Anlagen zur Folienbeschichtung für weltweit führende Hersteller von Displays für Smartphones und Tablets, die durch transparente, leitfähige Schichten ihre Touch-Funktion erhalten. Auch flexible und leichte Elektronik, etwa für die Medizintechnik oder mikroelektromechanische Systeme für vielfältige Sensorik, entfaltet ihren vollen Leistungsumfang durch Beschichtungen aus dem Hause VON ARDENNE.

Von der Simulation zum fertigen Produkt

So breit wie das Spektrum an Anwendungen ist, so breit ist auch die technologische Kompetenz bei VON ARDENNE, um seine Kunden von der Entwicklung bis hin zum fertigen Produkt zu unterstützen.

Neben dem notwendigen Know-how für die komplexen Beschichtungsprozesse bedarf es großer Erfahrung im Umgang mit unterschiedlichsten Substratmaterialien und Formaten. Anwendungen in der Mikroelektronik verlangen nach Anlagen zur Beschichtung kleiner Substrate wie etwa Siliziumwafer. Am anderen Ende des Spektrums stehen Beschichtungssysteme für Architekturglas mit einem Standardmaß von 6,0 x 3,3 m und darüber hinaus. Hinzu kommen flexible Substrate wie kilometerlange Kunststofffolien, die im Rolle-zu-Rolle-Verfahren beschichtet werden und ihren

Einsatz in der Displayindustrie finden. Selbst für einen neuartigen Werkstoff – flexibles Glas von der Rolle – liefert VON ARDENNE die passende Beschichtungstechnik.

Für diese vielfältigen Anforderungen können die Ingenieure der VON ARDENNE GmbH auf jahrzehntelange Erfahrung und ein einzigartiges Technology and Application Center (TAC) zurückgreifen. Das TAC bietet dank seiner umfangreichen Ausstattung beste Voraussetzungen für die Produktentwicklung unter einem Dach. Dafür stehen die notwendigen Soft- und Hardware sowie Beschichtungsanlagen und Prüftechnik für alle wesentlichen Schritte zur Verfügung: von der computergestützten Simulation, über die Forschung an und Entwicklung von neuen Anwendungen bis hin zur Skalierung von Forschungsergebnissen in den Pilot- und Industriemaßstab. In enger Zusammenarbeit mit Kunden und Entwicklungspartnern entstehen hier die Produkte von morgen.

KONTAKT

VON ARDENNE GmbH

Am Hahnweg 8
D-01328 Dresden
Tel.: +49 (0)351 2637-300
Fax: +49 (0)351 2637-308
office@vonardenne.biz
www.vonardenne.biz



**WERKSTOFF
WOCHE**
18.-20.09.2019
DRESDEN

KONGRESS UND FACHAUSSTELLUNG
FÜR INNOVATIVE WERKSTOFFE,
VERFAHREN UND ANWENDUNGEN

18.-20.09.2019
MESSE DRESDEN

**SICHERN SIE SICH JETZT
IHRE STANDFLÄCHE!**
● EXPO@WERKSTOFFWOCHE.DE

VON ARDENNE

PAVING THE WAY FOR INDUSTRIAL VACUUM COATING



ARCHITECTURAL GLASS



WEB COATING



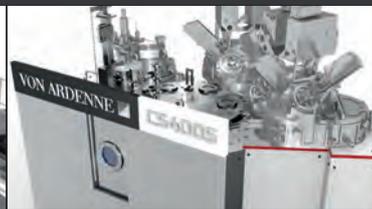
CRYSTALLINE PHOTOVOLTAICS



THIN-FILM PHOTOVOLTAICS



SPECIAL APPLICATIONS



MODULAR PROCESS SYSTEMS

VON ARDENNE verfügt über mehr als 55 Jahre Erfahrung in der Elektronenstrahltechnik, 45 Jahre in der Rolle-zu-Rolle-Beschichtung, 40 Jahre im Magnetron-Sputtern und kann auf über 400 weltweit installierte Beschichtungssysteme verweisen.

Wir sind Ihr perfekter Partner für alle Substrate, Technologien und Anwendungen - egal ob es sich um F & E, Pilot- oder Massenproduktion handelt oder ob die Substrate Glasscheiben, Metallplatten, Silizium-Wafer, flexibles Glas oder Kunststofffolien sind.



**INTERESSANTE BERUFLICHE PERSPEKTIVEN FÜR
TECHNOLOGEN UND INGENIEURE FINDEN SIE UNTER
www.vonardenne.biz**