WAK

Wissenschaftlicher Arbeitskreis der Universitäts-Professoren der Kunststofftechnik

IM FOKUS

Jahresmagazin Kunststofftechnik

Ingenieurwissenschaften 2021

ISSN 1618-8357
EUR 9,80

Herausgegeben vom Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen

INSTITUT FÜR WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN

RECYCLAMINE®

WIND

SPORTS

Introducing

BRIOZEN™

TOWARDS RADIANT HORIZONS

Recyclable Series based on

Recyclamine® Technology

LEISURE

AUTOMOTIVE

AEROSPACE

A Path Breaking Technology for Recycling Epoxy Thermosets

ADITYA BIRLA ADVANCED MATERIALS

CTP ADVANCED MATERIALS

Website: abg-am.com

Email: A.Palinsky@ctpgmbh.de, abg.am@adityabirla.com

Follow us on : Advanced Materials-Aditya Birla Chemicals

VORWORT

Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Bonten

Liebe Leserinnen und Leser,

seit Anfang Juli sind europaweit viele Einwegprodukte aus Kunststoff verboten. Dies betrifft Rührstäbchen, Trinkhalme, Stäbe für Luftballons sowie Einweg-Geschirr aus Kunststoff und Biokunststoff. Auch Becher für unterwegs und Einweg-Behälter aus Styropor dürfen in der EU nicht mehr produziert und in den Handel gebracht werden.

Diese Regelung führte zu teilweise absurden Ersatzprodukten. Viele sind ebenfalls Einwegartikel, z.B. aus Aluminium, Holz oder Pappe, welche ebenfalls nicht in die Umwelt gelangen sollten und deren Ökobilanz meist schlechter ist als die von vergleichbaren Produkten aus Kunststoff.

Dass nicht ein Werkstoff für menschliches Verhalten ursächlich ist, sondern „bad design“, setzt sich in der Öffentlichkeit langsam durch. Z.B. wünscht sich der Deutsche Hotel- und Gaststättenverband DeHoGa für das Außer-Haus-Catering bereits Mehrwegverpackungen aus Polypropylen. Dies sei leicht, sei einfach zu reinigen und zugleich wärmeformbeständig.

In Zeiten der andauernden COVID-Pandemie stieg die Wertschätzung von Produkten aus Kunststoff weiter an. Viele Menschen greifen beim Einkauf zu eingeschweißten Frischeprodukten und nutzen Einwegartikel, um das Ansteckungsrisiko zu verringern. Auch wurde vielen bewusst, dass so manches Leben auf Intensivstationen mit Hilfe von Kunststoff-Medizinprodukten (teils auch Einwegprodukte) gerettet wurde.

Wollen wir hoffen, dass diese Wertschätzung weiter steigt, die Wichtigkeit von Einwegprodukten an der richtigen Stelle verstanden wird und der Einsatz von Mehrwegprodukten aus Kunststoff fortschreitet.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Bonten
Sprecher des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik

INHALTSÜBERSICHT

1 ..... **Vorwort**
Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Bonten
Sprecher des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik

8 ..... **Herausforderungen und Chancen von Nachhaltigkeit und Digitalisierung in der Kunststoffforschung**
Autoren: **Holger Ruckdäschel, Volker Altstädt, Florian Rothenhäusler, Fabian Hübner, Julia Utz, Nico Geis, Nick Weingart und Tobias Standau**
Universität Bayreuth / Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe

16 ..... **Langzeitbetriebssichere Metall-Duroplast-Verbunde in höchst beanspruchten Bauteilen**
Autoren: **Nils Schmeißer und Michael Gehde**
Technische Universität Chemnitz (TUC) / Professur Kunststoffe

24 ..... **Bewertung der Chip und Cut Resistenz von Gummimischungen bereits vor der Reifenentwicklung**
Autoren: **Radek Stoček, Gert Heinrich und Reinhold Kipscholl**
Tomas Bata University, Tschechien / Technische Universität Dresden / Coesfeld GmbH & Co. KG

32 ..... **Numerische Simulationen in der Kunststofftechnik – Alles andere als Standard**
Autoren: **Reinhard Schiffers, Marius Janßen, Moritz Rayer und Lucas Schulz**
Universität Duisburg-Essen / Institut für Produkt Engineering

38 ..... **Hochgefüllte Kunststoffe: Neue Potenziale durch den Einsatz von Füllstoffen zur gezielten Eigenschaftsmodifikation**
Autoren: **D. Drummer, C. Grützmacher, T. Kleffel, L. Lanzl, U. Rösel, B. Roth, K. Schneider, F. Tomiak und L.-M. Wittmann**
FAU Erlangen-Nürnberg / Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT)

46 ..... **Der Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe – Polymerphysik trifft anwendungsnahe Prozessierung**
Autor: **Dirk W. Schubert**
FAU Erlangen-Nürnberg / Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe

54 ..... **Flammhemmende Faser-Kunststoff-Verbund-Systeme und deren Herstellung für die Flugzeugkabine**
Autoren: **Hans Wittich, Julian Karsten und Bodo Fiedler**
Technische Universität Hamburg / Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe

62 ..... **Funktionenintegrierende Kunststoffverarbeitung**
Autoren: **Matthias Koch, Christopher Johannes und Fabian Lins**
Universität Kassel / Institut für Werkstofftechnik, Kunststofftechnik

Dynamische Differenzkalorimetrie
für höchste Anforderungen

DSC 3+ Differenzkalorimeter – zuverlässig, genau, robust und modular

Dank seines modularen Designs ist das DSC 3+ aus der Thermal Analysis Excellence-Reihe von METTLER TOLEDO sowohl für den manuellen als auch für den automatischen Betrieb die beste Wahl – von der Qualitätssicherung und Produktion bis hin zu Forschung und Entwicklung.

- **Höchste Empfindlichkeit** – Detektion kleinster Effekte mit 120 Thermoelementen auch bei geringer Probenmenge
- **Herausragende Auflösung** – genaue Messung von schnellen Änderungen und dicht beieinander liegenden Effekten
- **Robuster, belastbarer Probenwechsler** – für einen effizienten und zuverlässigen Betrieb rund um die Uhr
- **Kleine und große Probenvolumen** – für kleinste Probenmengen oder inhomogene Proben
- **Flexible Kalibrierung und Justierung** – garantiert genaue Ergebnisse unter sämtlichen Messbedingungen
- **Großer Temperaturbereich** – von –150 bis 700 °C in einer Messung
- **Modulares Konzept** – ermöglicht weitergehende Anpassungen an heutige und zukünftige Anforderungen

Mettler-Toledo GmbH, Ockerweg 3, 35396 Gießen | Tel.: +49 (0)641 507 444 | MTVerkaufD@mt.com

www.mt.com/DSC

METTLER TOLEDO

INHALTSÜBERSICHT

70 ..... **Untersuchung der mechanischen Eigenschaften, Hintergründe und weitere Entwicklungen im Kunststoff Freiformen**
Autoren: **Elmar Moritzer und Felix Hecker**
Universität Paderborn / Kunststofftechnik Paderborn

80 ..... **Der Nachwuchs-Förderung verpflichtet**
WAK-Preise
Der Brose-Preis • Brose Fahrzeugteile SE & Co. KG, Coburg
Wilfried-Ensinger-Preis • Ensinger GmbH
Der Oechsler-Preis • OECHSLER AG
Röchling-Sonderpreis • Röchling SE & Co. KG

6 ..... **Inserentenverzeichnis**

86 ..... **Impressum**

ERNEUERBARER KOHLENSTOFF – UMSCHALTER ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT

Der Klimaschutz erfordert von der Chemie- und Kunststoffindustrie erhebliche Anstrengungen. Gleichzeitig wächst die Nachfrage nach innovativen und einsatzbereiten erneuerbaren Rohstoffen und Materiallösungen mit einem geringen CO_2-Abdruck – frei von fossilen Rohstoffen. Hier setzt die „Renewable-Carbon-Strategy" an: Erneuerbarer Kohlenstoff umfasst alle Kohlenstoffquellen, die die Verwendung von zusätzlichem fossilem Kohlenstoff aus der Geosphäre vermeiden oder ersetzen. Erneuerbarer Kohlenstoff zirkuliert zwischen Biosphäre, Atmosphäre und Technosphäre und schafft so eine Kohlenstoffkreislaufwirtschaft.

In den letzten Jahrzehnten sind mehrere technologische Wege entstanden, um fossilen Kohlenstoff vollständig durch erneuerbare Kohlenstoffquellen zu ersetzen: Biomasse, direkte CO_2-Nutzung (aus Industrieabgasen oder der Atmosphäre) sowie mechanisches und chemisches Recycling. Die Strategie für erneuerbaren Kohlenstoff vereint diese Quellen und bietet den Unternehmen einen Rahmen für künftige Investitionen, indem sie genügend Handlungsspielraum schafft. Sie gibt auch eine strategische Richtung vor, um die Abhängigkeit von fossilem Kohlenstoff zu verringern und schließlich die Nutzung von fossilem Kohlenstoff ganz zu beenden. Dieser stoffliche Wandel wird durch eine vielfältige Mischung aus internationalen Unternehmen und Start-ups vorangetrieben, initiiert und geleitet vom deutschen nova-Institut. Seit September 2020 wächst die vom nova-Institut mit namhaften Gründungsmitgliedern ins Leben gerufene Renewable Carbon Initiative (RCI) kontinuierlich. Eine wachsende Zahl von Arbeitsgruppen sowie die Teilnahme an Veranstaltungen wie der „Renewable Materials Conference" sind bereits etabliert. Die Initiative zielt darauf ab, den Übergang von fossilem Kohlenstoff zu erneuerbarem Kohlenstoff für alle organischen Chemikalien und Materialien zu unterstützen und zu beschleunigen. Heute zählen zur Initiative bereits 19 internationale Großunternehmen, fünf KMU, drei Start-ups, ein Forschungsinstitut, sechs Partnerverbände sowie mehr als 200 Unterstützer. Fokus sind bio- und CO_2-basierte Produkte sowie Recycling – alles was den fossilen Kohlenstoff durch erneuerbaren substituiert. Weitere Hintergrundinformationen, Positionspapiere, Termine für Webinare und Konferenzen sind über die Kontaktdaten erhältlich.

KONTAKT

nova-Institut GmbH
Michael Carus
Chemiepark Knapsack
D-50354 Hürth
Tel.: +49 (0)2233 481440
contact@nova-institut.de
www.nova-institut.eu
www.renewable-carbon.eu
www.renewable-carbon-initiative.eu

International Conference on CELLULOSE FIBRES 2022
2 – 3 February 2022
Hybrid Event
Cologne (Germany)
cellulose-fibres.eu

Conference on CO_2-based Fuels & Chemicals 2022
23 – 24 March 2022
Hybrid Event
Cologne (Germany)
co2-chemistry.eu

RENEWABLE MATERIALS CONFERENCE 2022
10 – 12 May 2022
Hybrid Event
Cologne (Germany)
renewable-materials.eu

RENEWABLE CARBON NEWS
More than 28,000 news on bio-based and CO_2-based materials and recycling
renewable-carbon.eu/news
nova

INSERENTENVERZEICHNIS

7 ..... **asma GmbH** www.asma.at
Wir gießen Ihre Ideen in Form

13 ..... **Berghof Products + Instruments GmbH** www.berghof-instruments.com
Höchste Qualität & Sicherheit mit Berghof

60 ..... **B. Braun SE** www.bbraun.de
Seine Mission: Clevere Lösungen für die Arzneimittelzubereitung

76 ..... **CG Rail GmbH** www.cgrail.de
Leichtbaulösungen für die Schienen- und Nutzfahrzeugtechnik

U2 ..... **CTP ADVANCED MATERIALS** www.abg-am.com
A Path Breaking Technology for Recycling Epoxy Thermosets

78 | U4 ..... **ENGEL AUSTRIA GmbH** www.engelglobal.com
Nachhaltigkeit geht nur mit Digitalisierung

68 ..... **Leister Technologies AG** www.leister.com
Laserschweißen von Kunststoffen

3 | 22 ..... **Mettler-Toledo GmbH** www.mt.com
Analyse der Fehlerquellen bei Polymerwerkstoffen

5 ..... **nova-Institut GmbH** www.nova-institut.eu
Erneuerbarer Kohlenstoff – Umschalter zur Kreislaufwirtschaft

37 ..... **Plasmatreat GmbH** www.plasmatreat.de
Premium-Oberflächenbehandlung für verschiedene Klebanforderungen ...

21 ..... **PME fluidtec GmbH** www.pme-fluidtec.de
Fluidinjection in Perfection

45 ..... **Waters GmbH** www.tainstruments.com
From Development to Processing to Final Product

14 ..... **ZwickRoell GmbH & Co. KG** www.zwickroell.com
Polymere auf dem Prüfstand

asma®
Kunststofftechnik PUR
Wir gießen
Ihre Ideen
in Form
We cast your ideas
www.asma.at
A - 3 9 7 0 W e i t r a - Gmünder Straße 229
Tel. +43(0)2856/5011 - Fax. +43(0)2856/5012
e-mail:office@asma.at

HERAUSFORDERUNGEN UND CHANCEN VON NACHHALTIGKEIT UND DIGITALISIERUNG IN DER KUNSTSTOFFFORSCHUNG

Autoren: **Holger Ruckdäschel, Volker Altstädt, Florian Rothenhäusler, Fabian Hübner, Julia Utz, Nico Geis, Nick Weingart, Tobias Standau,** **Universität Bayreuth / Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe**

Mitten in den aufwühlenden Pandemiezeiten wurde im Januar 2021 am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe an der Universität Bayreuth der Wechsel der Lehrstuhlleitung vollzogen. Auf Professor Altstädt folgt Professor Ruckdäschel. Auch in Zukunft wird anwendungsnah geforscht – zudem werden neue Impulse in der Nachhaltigkeit und insbesondere der Digitalisierung gesetzt.

Polymerforschung an der Universität Bayreuth

Seit über 20 Jahren steht der Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe sowohl für eine praxisnahe Polymerforschung als auch für innovative und leistungsstarke Lösungen rund um das Thema Kunststoffe. In dieser Zeit wurden unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt vielfältige Möglichkeiten zur Herstellung, Verarbeitung und Analyse von Kunststoffen aufgebaut sowie langjährige Kontakte zu Industrie und Wissenschaft etabliert. Dies bildete lange Zeit das Fundament für breit gefächerte Forschungsaktivitäten in den Bereichen Thermoplastverarbeitung, Faserverbundwerkstoffe und polymerer Schaumstoffe.

Seit Anfang 2021 leitet Prof. Dr.-Ing. Holger Ruckdäschel den Lehrstuhl. Anknüpfend an die bisherigen Erfolge sollen bestehende Kompetenzen gestärkt und noch mehr Innovation gewagt werden. Zukünftig setzt der Lehrstuhl verstärkt auf Nachhaltigkeit und Digitalisierung; wobei die Anwendung – insbesondere neuer Verfahren – stets im Fokus bleibt. Nachhaltigkeitsthemen wurden in den letzten Jahren bereits erfolgreich bearbeitet. Beispiele hierfür sind die Forschung an Biopolymeren oder die Materialentwicklung für alternative Energien (z.B. Leichtbaustrukturen für Windkraftanlagen). Weiterhin wird der Themenkomplex Mikroplastik intensiv bearbeitet, wobei dessen Entstehung durch Verwitterung und Mikrorissbildung sowie der enzymatische Abbau von Polyestern untersucht werden. Aktuell wird unter anderem auch noch an Prepregs auf Basis von Naturfasern und biobasiertem Flammschutz gearbeitet. Außerdem beschäftigt sich der Lehrstuhl mit effizienten Lösungen zur Speicherung von Wasserstoff für neuartige Antriebskonzepte in der Luftfahrt. Ebenso soll zukünftig das Potential der additiven Fertigung ausgebaut werden. Ein zukunftsweisender Schritt stellt die Digitalisierung eines großen Teils des Maschinenparks dar, was innerhalb kürzester Zeit in Zusammenarbeit mit Siemens angegangen wurde.

EcoPrepreg – Nachhaltigkeit startet durch

Naturfasern sind einer der ältesten vom Menschen verwendeten Werkstoffe und bildeten für viele Jahrtausende den Grundstoff für Textilien. Und auch heute finden sich in vielen Produkten des Alltags Naturfasern jeglicher Art; egal ob Baumwolle in Kleidung oder Leinen in Textilbezügen. Nicht zuletzt wegen der mit dem gegenwärtigen Zeitgeist wachsenden Bedeutung der Nachhaltigkeit fällt große Aufmerksamkeit auf die Forschung mit den altbewährten Naturfasern. Im Projekt „EcoPrepreg“, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird, werden am Lehrstuhl naturfaserverstärkte Prepregs mit biobasierten Flammschutzmitteln untersucht. Das immer noch weitverbreitete Vorurteil vom leistungsschwachen Naturfaserverbund soll damit angegangen werden, um letztendlich der Sprung dieses Verbundmaterials mit gesteigerter Ökoeffizienz in die Luftfahrt zu ermöglichen.

Das Ziel ist die Entwicklung eines nachhaltigen, biobasierten Naturfaser-Prepregs. Konkret geht es um die Klärung der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von biobasierten Epoxidharzen, biobasierten Flammschutzmitteln und Naturfasern zur Anwendung in der Sekundärstruktur von Flugzeugen.

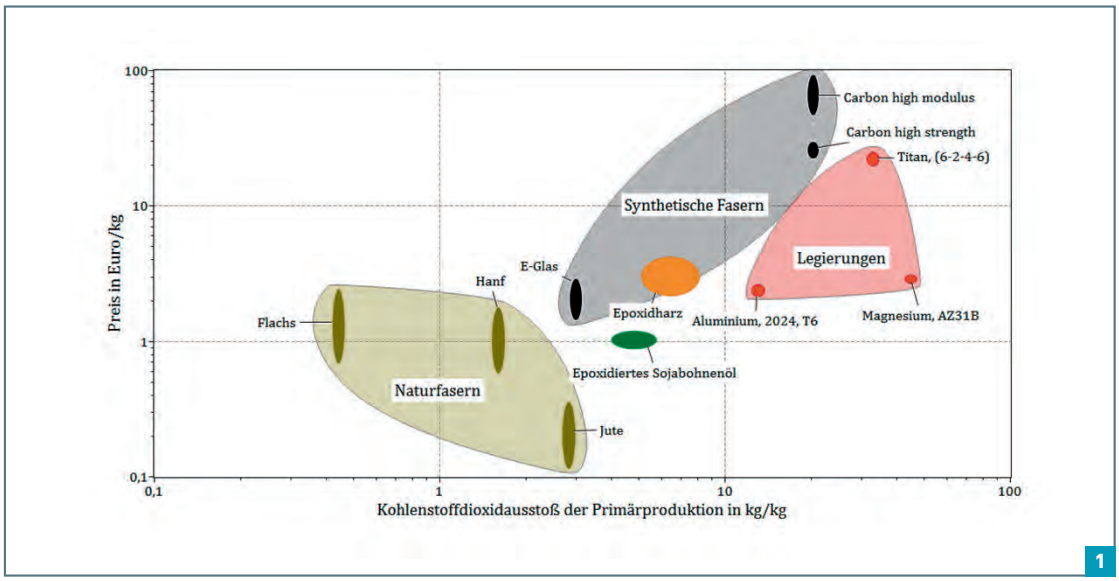


Abb. 1: Preis und Kohlenstoffdioxidausstoß der Primärproduktion von biobasierten und petroleum-basierten Faserwerkstoffen und Matrixmaterialien, sowie Glasfasern und Legierungen für die Luftfahrt.

Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Schaffung einer umweltverträglichen und ressourcenschonenden Luftfahrt geleistet werden. Die Ökobilanz des gesamten Produktlebenszyklus ist dabei von Bedeutung. Hierfür entscheidend ist die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bei der Auswahl von geeigneten Rohstoffen und Verarbeitungsprozessen. Die Herstellung von Carbon- und Glasfasern, die aufgrund ihres hohen Leichtbaupotentials für die Luftfahrt attraktiv sind, ist energieintensiv und benötigt große Mengen an fossilen Rohstoffen. Das führt zur Freisetzung großer Mengen des Treibhausgases CO_2. Im Gegenzug dazu ist die CO_2-Bilanz von Naturfasern wesentlicher geringer. **Abbildung 1** zeigt den Preis verschiedener Leichtbauwerkstoffe über ihren jeweiligen CO_2-Ausstoß während der Primärproduktion. Hierbei lässt sich sehr schnell erkennen, dass die Naturfaserproduktion verglichen mit synthetischen Fasern nicht nur weniger CO_2 verursacht, sondern auch wesentlich günstiger ist. Gleiches gilt für das Harzsystem, in welchem die Fasern eingebettet werden. Auch hier zeigt sich, dass der biobasierte Gegenpart weniger CO_2 verursacht und preiswerter ist.

Im Zentrum der Forschung stehen unidirektionale Flachsgelege, welche mit einer Matrix aus epoxidierten Pflanzenölen und Anhydriden imprägniert werden. Bisher wurden hierbei durch die Struktur des Anhydrids Glasübergangstemperaturen oberhalb von 110 °C erreicht. Allerdings ist das Harzsystem nicht auf Pflanzenöle beschränkt, sondern ermöglicht auch den Einsatz von Derivaten natürlicher Verbindungen, wie beispielsweise Vanillin. Ein weiterer wichtiger Punkt sind die hohen spezifischen Eigenschaften von Naturfaserverbunden. So spielt die niedrige Dichte von Flachsfasern vor allem bei flächigen Bauteilen unter Biegung eine große Rolle, wie etwa bei Sandwichverbunden. Da jeder Sandwichverbund nicht nur aus Decklagen, sondern auch aus einem Kern besteht, enthält der fertige Verbund einen Schaumkern aus biobasiertem Epoxidharz (siehe **Abbildung 2**). Der Kern mit einer Dichte von circa 450 kg/m³ eignet sich besonders für semi-strukturelle Anwendungen, wie Verkleidungselemente im Flugzeuginneren. Sowohl der Schaumkern als auch die Faserdecklagen, stammen zu mehr als 98 Massenprozent aus nachwachsenden Rohstoffen. Somit wird das Nachhaltigkeitskonzept holistisch auf den gesamten Verbund angewandt. Weiterhin sollen die hohen Anforderungen der Luftfahrt an Flammschutz und Rauchgasentwicklung durch biobasierte Flammschutzmittel gewährleistet werden. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk auf der Untersuchung von synergistischen Effekten, die bei der Kombination unterschiedlicher nachwachsender Flammschutzmittel auftreten. Von konventionellen Flammschutzmitteln ist bereits bekannt, dass Phosphor und Stickstoff hervorragende Synergisten sind und die Wärmefreisetzungsrate während der Verbrennung verringern. Zudem fördern stickstoff- und phosphorhaltige Verbindungen die Bildung intumeszierender Schichten in Materialien, die aromatische Strukturen enthalten. Vorteilhaft ist, dass die Natur sogar eine Vielzahl von Verbindungen bereitstellt, die Stickstoff, Phosphor oder einen aromatischen Charakter besitzen. Nennenswert sind hierbei Aminosäuren, natürliche Phosphate, Lignin oder Vanillin. Da es sich bei den betrachteten Mischungen von Flammschutzmitteln um komplexe Mehrkomponentensysteme handelt und die Wechselwirkungen zwischen einzelnen

Abb. 2:
Biobasierte Materialien, welche den Sandwichverbund bilden (von links nach rechts): unidirektionales Flachsgelege, Schaumkern und Reinharz.

Komponenten mannigfaltig sind, ist die Ermittlung einer optimalen Mischung hinsichtlich deren Preis und Eigenschaften nicht trivial. Daher werden die neu geschaffenen Kompetenzen am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe im Bereich Digitalisierung und maschinellem Lernen genutzt, um die Forschung zu beschleunigen, Synergien aufzuzeigen und auch für zukünftige Matrixsysteme einen effizienten und auch preiswerten Flammschutz sicherzustellen.

Tieftemperaturspeicherung von Wasserstoff für verdreifachte Energiedichte– Alternativer Treibstoff für Mobilitätskonzepte von morgen

Die Elektromobilität hielt in den vergangenen Jahren weiter Einzug in die alternativen Mobilitätskonzepte zur Reduzierung der Emissionen in unserem Verkehrswesen. Jedoch sind für die flächendeckende, uneingeschränkte Nutzung von E-Fahrzeugen noch einige Entwicklungs- und Investitionsschritte nötig, um in Deutschland die batteriebetriebene Antriebstechnologie kosteneffizient zu nutzen. Vor allem für Nutzfahrzeuge stellen sich Fragen insbesondere zur Laufleistung. Hier bietet sich das Konzept Wasserstoff-Brennstoffzelle als Alternative an. Mit Wasserstoff und zugeführtem Sauerstoff wird in der Brennstoffzelle Strom generiert, der direkt zum Antrieb verwendet werden kann – ohne lange Ladezeiten, sondern mit einem Auftanken in Minuten.

Dem vollelektrischen Konzept ist Wasserstoff damit in vielerlei Hinsicht überlegen, allen voran bei Reichweite und Flexibilität. Ebenfalls kann Wasserstoff durch eine nahezu 3-fach höhere gewichtsbezogene Energiedichte im Vergleich zu Benzin oder Kerosin punkten. Um jedoch eine hohe Energiedichte in Tanksystemen sicherzustellen, muss der Wasserstoff auf Drücke von 700 bar komprimiert oder kryogen (-253 °C) bei geringen Drücken flüssig gespeichert werden. Letzteres wird vor allem bei Raumfahrttanks angewandt. Im europäischen Raumfahrtprogramm wird Wasserstoff als hochenergiedichter Treibstoff zusammen mit flüssigem Sauerstoff als Oxidator zur Schuberzeugung im Direktverbrennungsprinzip verwendet. Das Transportwesen präferiert im Gegenteil zu den 700 bar Tanks in Automobilen eher den flüssigen Zustand für Brennstoffzellen. Aktuelle Entwicklungsprojekte sehen sowohl in der Luft- und Raumfahrt als auch dem Straßenverkehr Faser-Kunststoff-Verbunde als vielversprechend an, da die Nutzlast im Vergleich zu Stahl- oder Aluminiumtanks erhöht werden kann. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe sind hier erste Wahl. Als Leichtbau-Speichersystem eignen sie sich hervorragend für die Aufnahme von permanenten, strukturellen Lasten unter Innendruck. Dazu werden Endlosrovings mittels Wickelverfahren zu rotationssymmetrischen, faserverstärkten Tanks verarbeitet. Hierfür wird in Forschungsprojekten des Lehrstuhls an neuen verbesserten Duromer-Matrices und den daraus entstehenden Faser-Kompositen geforscht. Die neuen Systeme zeichnen sich durch optimierte Eigenschaften hinsichtlich Mechanik, Verarbeitungsprozesse und Handhabung des Produkts „Wasserstofftank“ aus und ermöglichen es neue Marktpotentiale zu erschließen.

Vor allem bei Tieftemperaturspeichern (**Abbildung 3a**) sind die Anforderungen an die Komposite enorm. Bei -253 °C im Betrieb müssen Harz und Kohlenstofffaser optimal im Wickelverbund aufeinander abgestimmt sein, um Mikrorissbildung und -wachstum entgegenzuwirken. Komposite können in der Regel sehr gut mit der Mikrorissbildung umgehen und bieten somit enorme Schadenstoleranzen, was sie für den Langzeitbetrieb prädestiniert. Jedoch hätte dies in neuartigen Typ V Drucktanks ohne separates Dichtigkeitskonzept über einen Liner ein Ausgasen (sog. „Boil-Off“) des Wasserstoffs über dünne Leckagepfade im Verbundwerkstoff zur Folge. Im Projekt „CryoFuselage“, das vom StMWi gefördert und vom DLR getragen wird, arbeitet der Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe an der Entwicklung von nachhaltigen, einkomponentigen Towpreg-Faserverbundhalbzeugen zur Herstellung von Flüssigwasserstofftanks für die Luftfahrt. Mittels einer ‚kryogenen Prüfmaschine‘ wird an der Klassifizierung einer wichtigen Kerneigenschaft gearbeitet: Der Bruchzähigkeit des inhärent spröden und bei niedrigen Temperaturen üblicherweise noch viel sprödere Epoxidharzes. Dabei zeigt Abbildung 3b den grundsätzlichen Verlauf des gemessenen Spannungsintensitätsfaktors KIC, der als Indikator für die Zähigkeit des Reinharzes herangezogen wird.

Grundsätzlich ist die Zähigkeit des unmodifizierten Epoxy-Systems bei Raumtemperatur auf einem niedrigen Level. Durch sogenannte Zähigkeitsadditive kann das Verhalten stark verbessert werden, da eine Wechselwirkung der Additive mit der umgebenden Matrix energiedissipierende Mechanis-

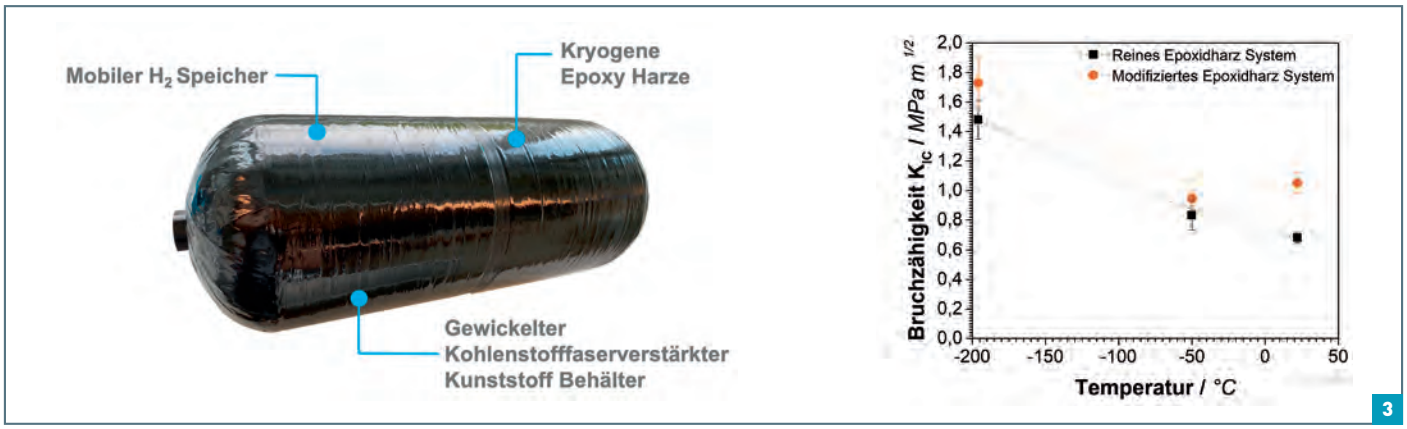


Abb. 3:
a) Wasserstofftank aus Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff
b) Bruchzähigkeit von gängigen Epoxidharzen in Abhängigkeit der Temperatur (Bildquelle: Lehrstuhl Polymere Werkstoffe)

men hervorruft. Damit kann die fortschreitende Ausbreitung der Risse gebremst oder umgelenkt werden, um ein katastrophales Versagen des Komposits zu verhindern. Bei kryogener Prüftemperatur in flüssigem Stickstoff (-196 °C, 77K) zeigte sich wider Erwarten eine Steigerung des KIC Faktors bei modifizierten und auch beim unmodifizierten Epoxy-System. Erklärt werden kann dies mittels bruchmechanischer Modelle. Mit einer Erhöhung der Festigkeit durch die Kälte folgt ebenfalls eine Erhöhung der herangezogenen Spannung zur Rissspropagierung, die zur Berechnung des KIC nötig ist. In Kombination mit der Bestimmung der Druckfließgrenze, die sich in kryogener Umgebung mehr als vervierfacht, kann jedoch eine extreme Versprödung des Epoxidharzes nachgewiesen werden. Mit einer Steigerung des E-Moduls resultiert dies in einer vielfachen Verkleinerung der plastischen Zone, die als Interaktionsradius um die Rissspitze für ein Verlangsamen oder Stoppen („Pinning“) des Risswachstums im Komposit nötig ist. Kurzum ist die Hürde zur Rissentstehung zwar wesentlich erhöht – nach Rissinitierung ist der Rissfortschritt im Vergleich zur Raumtemperatur allerdings wesentlich beschleunigt.

Um dieser Problematik Abhilfe zu schaffen, wurden bereits mit Erfolg bestimmte Zähigkeitsadditive eingebracht, die die Rissentstehung und das Wachstum auch bei kryogenen Temperaturen bremsen können. Zusätzlich senken diese die Fließgrenze herab, was dem Material eine gewisse Plastizität zurückgibt. Diese Entwicklungen tragen somit zu einer Dauerfunktionsfähigkeit der Leichtbau-Wasserstofftanks im Flugbetrieb bei.

Additive Fertigung – Visionen werden Wirklichkeit

Neben der seit 2 Jahrzenten etablierten Forschung an Faserverbundwerkstoffen gewinnt jüngst die Additive Fertigung am Lehrstuhl an Bedeutung. Die immer noch recht junge Technologiefamilie birgt neben einer Vielzahl neuer Möglichkeiten auch Herausforderungen. Zu den Vorteilen zählen die Designfreiheit, die Flexibilität und die Schnelligkeit in der Anpassung von Bauteilen. Darüber können Bauteile ohne logistischen Aufwand und damit ohne entsprechende Vorlaufzeiten direkt an Ort und Stelle hergestellt werden, was in einer immer dynamischer werdenden Welt enorme Wettbewerbsvorteile mit sich bringt. Die genannten Vorteile können entlang der gesamten Wertschöpfungskette eines Produktes integriert werden. In einem frühen Stadium der Entwicklung erfolgt die Herstellung additiv gefertigter Design- oder Funktionsprototypen bis hin zu Kleinserien, später die Bedienung des Ersatzteilgeschäfts. Bisher weitgehend ungenutztes Potential liegt in der Materialpalette bzw. dem Wechselspiel zwischen Material und Prozess. Additive Fertigungsverfahren stellen neue Anforderungen an den Werkstoff, wobei jede einzelne Technologie – ob Thermoplast oder Duromer, ob pulver- oder fluidbasiert – nochmal spezielle angepasste Material- und Verarbeitungsparameter voraussetzt.

Genau an dieser Stelle nutzt der Lehrstuhl Polymere Werkstoffe seine langjährige Expertise in der Materialentwicklung, um die Werkstoffpalette der Additiven Fertigung zu erweitern und maßgeschneiderte, leistungsfähige Lösungen für Anwendungen zu verwirklichen.

Für die Additive Fertigung steht eine Vielzahl an Technologien zur Verfügung. Um ein tiefgreifendes Verständnis zu materialwissenschaftlichen Struktur-Eigenschafts-Beziehungen aufzubauen, fokussiert sich der Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe auf die beiden zukunftsträchtigen Verfahren Fused Filament Fabrication (FFF) und Digital Light Processing (DLP). Die beiden industriell bedeutenden Verfahren auf Thermoplast- bzw. Duromerbasis

Abb. 4:
Labor der Additiven Fertigung des Lehrstuhls für Polymere Werkstoffe

stehen für Ressourceneffizienz und bauen auf der Forschungsexpertise des Lehrstuhls auf. **Abbildung 4** zeigt das Labor der Additiven Fertigung.

Ziel unserer Forschungstätigkeiten ist es, nicht nur den Druckprozess an sich zu betrachten, sondern die komplette Prozesskette vom Rohstoff bis zum fertigen Bauteil zu verstehen. Beim FFF-Verfahren beginnt das bei der Analyse des Schmelz- und Fließverhaltens kommerzieller und selbstentwickelter Compounds, führt über die Extrusion von Filamenten über den Druckprozess bis zur Untersuchung von Produkteigenschaften wie mechanischem Versagensverhalten, Wärmeleitfähigkeit oder Brandbeständigkeit. Hierzu kann auf einen umfangreichen Maschinenpark und ausgezeichnete Analytik am Lehrstuhl bzw. auf dem Campus zurückgegriffen werden. Im Kontext der thermoplastbasierten Additiven Fertigung ermöglicht der Filamentextruder Teach Line BAW130 der Firma Dr. Collin durch seine variable Steuerung sowie die lasergestützte Überwachung des extrudierten Filaments wichtige material- und prozessseitige Einblicke. Diese können anschließend in weiterführenden Charakterisierungsschritten sowie im lehrstuhleigenen Testing Center evaluiert werden. Ein identischer Ansatz ist beim DLP-Verfahren etabliert. Hier liegen die Schwerpunkte bei der Untersuchung der UV-initiierten Vernetzungsreaktion und des Upscalings vom Materialscreening bis zum industriellen Verfahren. Um langwierige Iterationsprozesse und „trial and error“ zu vermeiden, nutzt der Lehrstuhl digitale Technologien. Dazu zählt die Erfassung, Analyse und Nutzung von Daten, um Zusammenhänge zwischen Material- und Prozessgrößen zu erkennen, Modelle zu etablieren und damit bei der Materialentwicklung schneller ans Ziel zu kommen.

Fazit: Innovation durch Digitalisierung – unser neuer Leitspruch

Die Nachhaltigkeit wird bereits seit einiger Zeit beforscht und stellt auch beim Lehrstuhl Polymere Werkstoffe ein zentrales Thema für die Zukunft dar. Dagegen ist das Potential der Digitalisierung in den Materialwissenschaften oft noch unentdeckt. Durch vermehrte und gezielte Anwendung digitaler Methoden ist jedoch ein großer Mehrwert für die Forschung zu erwarten.

Der Lehrstuhl nutzt die Möglichkeiten neuartiger Technologien sowohl für den effizienten Betrieb unter Corona-Bedingungen als auch für die zielgerichtete Forschung. So setzen wir Mixed-Reality-Brillen ein, um beispielsweise den Lehrebetrieb aufrecht zu erhalten oder um Projektpartnern die virtuelle Teilnahme an Versuchen zu ermöglichen. Diese Technologie hat sich als enorme Bereicherung während der Pandemie erwiesen und wird auch danach ihren Platz behalten. Die Mixed-Reality-Brillen sind aber nur ein Bestandteil unseres Pilotprojektes im Bereich der Digitalisierung, Datenerfassung und Inline-Auswertung. Weiterhin wurden wichtige Anlagen wie die Tandem-Schaumextrusionsanlage der Firma Reifenhäuser inklusive der Peripherie datentechnisch eingebunden. Sie besteht aus einem Zweischneckenextruder und einem Einschnecken-Kühlextruder und ist in der Lage bei maximalen Temperaturen (400 °C) und Drücken (300 bar) auch Hochtemperaturthermoplasten zu verarbeiten. Durch die Anlagendigitalisierung mittels der cloudbasierte IIoT-Plattform ‚MindSphere‘ von Siemens können Daten in Echtzeit und von überall analysiert und ausgewertet werden. Neben der reinen Überwachung der Prozessparameter ist auch eine Fernsteuerung der Anlage möglich. Weitere aktuelle Schritte des Digitalisierungsvorhabens sind die Inline-Qualitätskontrolle und der Einsatz von maschinellem Lernen. Auf diesem Weg setzt der Lehrstuhl seine Digitalisierungsstrategie Schritt für Schritt um. Ziel ist die Einbindung des gesamten Geräteparks für Verarbeitung und Charakterisierung, die einfache Weiterverarbeitung der großen anfallenden Datenmengen und die maschinenunterstützte Auswertung der Informationen. Damit werden komplexe Zusammenhänge leichter aufgeklärt, neue Materialien entdeckt und bestehende Forschungsaktivitäten effizienter.

KONTAKT

UNIVERSITÄT BAYREUTH
Prof. Dr.-Ing. Holger Ruckdäschel
Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth
Tel.: +49 (0)921 5574-71
Fax: +49 (0)921 5574-73
sekretariat.pe@uni-bayreuth.de
www.polymer-engineering.de

Höchste Qualität & Sicherheit mit Berghof

Reaktortechnologie bis 200bar / 300°C

Einzigartiges Verschlusssystem
bietet einfachste Handhabung

Modulare Bauweise
auf Ihre individuelle Anwendung abgestimmt

Einzigartige PTFE Auskleidung
für korrosive Anwendungen

BERGHOF

+49 7121.894-266
www.berghof-instruments.com
info.bpi@berghof.com
72800 Eningen unter Achalm, Germany

POLYMERE AUF DEM PRÜFSTAND

Kunststoffe sind allgegenwärtig – von einfachen Transportverpackungen bis zu hochbelasteten Funktionsteilen in Maschinen. Die mechanischen Prüfungen und die Materialcharakterisierung von Kunststoffen sind daher vielfältig und reichen von Fließ- und Härteprüfungen über die klassischen Schlagprüfungen bis hin zu den statischen Zug-, Druck- und Biegeversuchen, dynamischen Lebensdauerprüfungen sowie Zeitstandversuchen. Hierzu bietet ZwickRoell ein breites Portfolio von Geräten und Maschinen an.

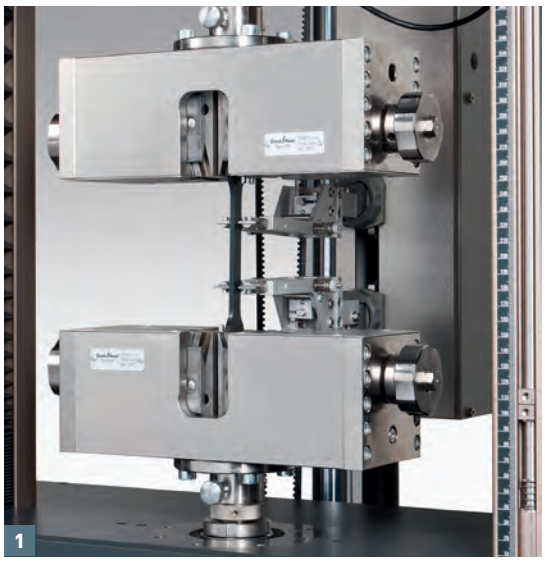


Abb. 1: Zugversuche ermöglichen Rückschlüsse auf das Materialverhalten von Kunststoffen

Dank der Entwicklung immer leistungsfähigerer Kunststoffe ergeben sich eine Vielzahl neuer Anwendungsgebiete. Auch Fertigungsmethoden wie der 3D-Druck schaffen fortwährend neue Einsatzmöglichkeiten. Angesichts der Fülle von Anwendungen wundert es nicht, dass die Anforderungen an das Material sehr unterschiedlich sein können: Die Automobilbranche legt den Fokus auf andere Eigenschaften als beispielsweise die Medizinbranche. Entsprechend vielfältig sind auch die Prüfungen. Sie reichen von Fließ- und Härteprüfungen über die klassischen Schlagprüfungen bis hin zu den statischen Zug- Druck- und Biegeversuchen sowie Zeitstandversuchen und dynamischen Lebensdauerprüfungen.

Um die Möglichkeiten und Chancen, die Kunststoff als Werkstoff bietet, in vollem Umfang zu nutzen, sind genaue Kenntnisse über die Materialkennwerte essentiell. Dies beginnt schon bei der Prüfung des Rohmaterials. Eine einfache, in der Qualitätssicherung und Wareneingangskontrolle weit verbreitete Methode ist die Fließprüfung. Sie gibt Auskunft über die Schmelze-Volumenfließrate (MVR) oder die Schmelze-Massefließrate (MFR). Dabei stellen sich je nach Verarbeitungsstufe in der Kunststoffindustrie verschiedene Anforderungen an das Fließprüfgerät. Die Prüfgeräte der Xflow-Reihe von ZwickRoell, bestehend aus dem Cflow für die Wareneingangsprüfung, dem modular aufgebauten und zunehmend funktionsreichen Mflow und dem vollautomatischen Aflow für den 24/7 Schichtbetrieb, decken dabei die ganze Bandbreite ab. Sie zeichnen sich durch leichte Bedienung, zuverlässige Messungen und eine einfache Reinigung aus.

Schlagprüfungen – spröde oder zäh

In Schlagprüfungen beurteilt man das Materialverhalten eines Werkstoffs bei höheren Verformungsgeschwindigkeiten. Je nach Anforderung bedient man sich dabei eines Pendelschlagwerks, eines Fallwerks oder einer Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine. Instrumentierte Pendelschlagwerke mit Kraftsensor und schneller Messwerterfassung ermöglichen es, neben den Energiewerten der Schlagarbeit weitere Daten zu erfassen und auszuwerten. Gleiches gilt für den Einsatz instrumentierter Fallwerke. Sie zeichnen beispielsweise im Durchstoßversuch komplette Kraft-Wege-Diagramme auf, aus denen charakteristische Kraftpunkte und die aufgenommene Schlagenergie berechnet werden. Die immer instrumentiert ausgeführten Hochgeschwindigkeitsprüfmaschinen mit hydraulischem Antrieb erzeugen bis zu 20 m/s hohe Prüfgeschwindigkeiten. Sie sind variabel für Schnellzerreißversuche, Durchstoß- und Biegeversuche einsetzbar und decken die Verfahren der Pendelschlagwerke und instrumentierten Fallwerke ab. Dank des hohen Energieüberschusses und der speziellen Regelung ermöglichen sie nahezu konstante Prüfgeschwindigkeiten während des Prüfvorgangs.

Auch statische Prüfungen wie der Zug- und Druckversuch generieren grundlegende Kennwerte in der Entwicklung. Universalprüfmaschinen wie die ZwickRoell AllroundLine decken mit einer umfang-

KONTAKT

ZWICKROELL GMBH & CO. KG
August-Nagel-Str. 11
D-89079 Ulm
Tel.: +49 (0)7305 10-0
info@zwickroell.com
www.zwickroell.com

reichen Auswahl an Zubehör und einer Temperierkammer alle statischen Prüfmethoden in einem weiten Temperaturbereich von -40 °C bis +250 °C ab. Das Prüfplatzkonzept der Prüfsoftware testXpert III lädt auf Knopfdruck alle relevanten Parameter und unterstützt so den schnellen Wechsel der vorkonfigurierten Prüfräume.

Langzeitverhalten und dynamische Prüfung

Kriechprüfungen dienen der Bewertung des Langzeitverhaltens von Kunststoffen. Sie sind besonders wichtig für Produkte, die im Einsatz einer dauerhaften Belastung unterliegen wie Rohre, Dichtungen und Lagerbestandteile. Üblich sind Zug-, Druck- und Biegeversuche; die Prüfdauer liegt nicht selten bei mehreren Wochen oder gar Monaten. Häufig gesellt sich zur rein mechanischen eine thermische Belastung, ein Umstand dem die Kappa Multistation mit einer integrierten Temperierkammer (-40 °C bis +250 °C) Rechnung trägt. Die Kriechprüfmaschine wurde speziell für die Analyse des Zeitstandverhaltens von Kunststoffen und Polymerwerkstoffen entwickelt. Auf bis zu 6 individuell geregelten Prüfachsen können Zeitstandversuche bis 10 kN frei kombiniert und unter Normalbedingungen oder Temperatur ausgeführt werden. Präzise Dehnungsmessungen erfolgen über optische Längenänderungsaufnehmer der videoXtens-Reihe. Hinter der Temperierkammer angebracht, haben sie dank der Sichtfenster freies Blickfeld auf alle Proben, ohne die Tests zu beeinflussen.

Während das Langzeitverhalten unter statischer Last geprüft wird, sind zur Ermittlung der Betriebsfestigkeit im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich dynamische Prüfungen nötig. Mit einer zyklischen Last beanspruchte Bauteile ertragen auf Dauer geringere Spannungswerte als bei statischer Beanspruchung – sie versagen durch Materialermüdung. Eine gute Option sind die elektro-dynamischen Prüfmaschinen der LTM-Baureihe, die mit Kräften zwischen 1 und 10 kN angeboten werden. Durch den hohen Geschwindigkeitsbereich sind sie von quasistatischen Versuchen bis zu dynamischen Ermüdungsprüfungen mit maximal 120 Hz Prüffrequenz (je nach Modell) nutzbar. Der ölfreie Antrieb bietet eine ganze Reihe von Vorteilen, von der einfachen Inbetriebnahme der Prüfmaschine – es sind weder Anschlüsse für Öl noch Wasser nötig.

Flexible Automatisierung

Gerade in der Materialentwicklung und im seriennahen Prototypenbau gibt es immer wieder kleinere Serien an Materialproben oder Bauteilen zu prüfen. Mit dem Leichtbauroboter roboTest N lassen sich beliebige Pick&Place-Aufgaben an Prüfmaschinen automatisieren. Der kompakte Prüfassistent ist leicht in bestehende Prüflabors zu integrieren, bedarf er doch keiner aufwendigen Bedienerschutzmaßnahmen. Besonders in der mobilen Version ist sein Einsatz äußerst flexibel: roboTest N kann ganz nach Bedarf an die jeweilige Prüfmaschine geschoben, an die Software angebunden und innerhalb kürzester Zeit trainiert werden. Er ist vollständig in die ZwickRoell Automatisierungssoftware autoEdition 3 integriert und lässt sich ohne Roboterbedienterminal nutzen. Spezielle Kenntnisse im Bereich Roboterprogrammierung sind nicht nötig.

LANGZEITBETRIEBSSICHERE METALL-DUROPLAST-VERBUNDE IN HÖCHST BEANSPRUCHTEN BAUTEILEN

Autoren: **M. Sc. Nils Schmeißer, Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde**, Technische Universität Chemnitz (TUC) / Professur Kunststoffe

In Zusammenarbeit mit Industriepartnern entlang der gesamten Wertschöpfungskette forscht die Professur Kunststoffe der TU Chemnitz an einer Methoden- und Technologieentwicklung zur Konzeption, Konstruktion, Herstellung und Prüfung von Hybridbauteilen aus Stahl und duroplastischen Formmassen im Spritzgussprozess. Diese ermöglichen die Substitution schwerer metallischer Konstruktionen durch intelligente, energie- und ressourceneffiziente Duroplast-Metall-Verbunde.

Problemstellung und Hintergrund

Werkstoffverbunde kommen sowohl im Fahrzeug- als auch im Maschinenbau zunehmend zum Einsatz und dienen der Kombination von positiven Materialeigenschaften verschiedener Werkstoffsysteme [1,2]. Kunststoff-Metall-Hybride auf thermoplastischer Basis stellen den Stand der Technik dar und finden bereits bei zahlreichen Serienbauteilen Anwendung. Duroplastbasierte Kunststoff-Metall-Hybride werden kommerziell vor allem im Flugzeugbau als hybride Laminate eingesetzt. Bekannte Vertreter dieser faserverstärkten Metall-Laminate (FML) sind GLARE, ARALL und CARALL. Als Vorteil dieser Laminate sind insbesondere ein geringes Flächengewicht, eine gehemmte Rissausbreitung sowie ein gutes Impactverhalten zu nennen. Die Herstellung der Hybride mittels Aushärtung im Autoklaven wirkt sich jedoch negativ auf die Serientauglichkeit dieser Anwendungen aus [3,4]. Um die, im Vergleich zu thermoplastischen Kunststoffen, positiven Materialeigenschaften (z.B. gute Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit, geringe Kriechneigung) für Serienanwendungen nutzbar machen zu können, sind neue Methoden bzw. Technologien entlang des gesamten Produktzyklus nötig.

Zielstellung und Untersuchungsansätze

Ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Forschungsprojekt an der TU Chemnitz verfolgt daher das Gesamtziel

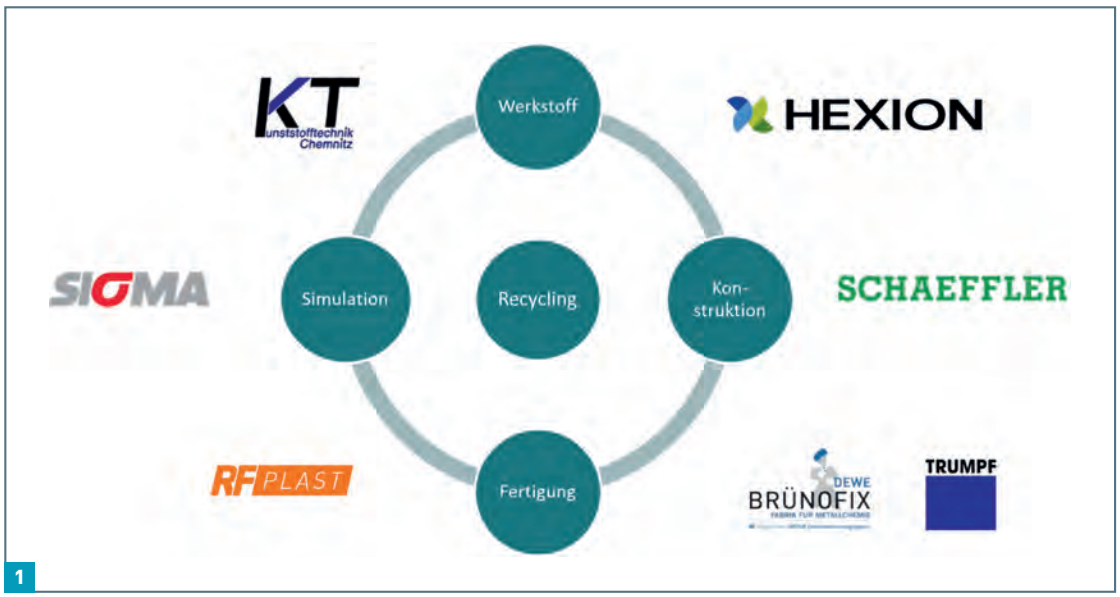


Abb. 1:
Übersicht der zentralen Forschungsgebiete und die teilnehmenden Projektpartner

der ganzheitlichen Entwicklung eines duroplastbasierten Kunststoff-Metall-Hybridbauteils innerhalb einer geschlossenen Wertschöpfungskette. **Abbildung 1** veranschaulicht die zentralen Arbeitsschwerpunkte sowie das teilnehmende Projektkonsortium. Dieses umfasst Partner aus verschiedenen Industriezweigen und ermöglicht die Bearbeitung der vielfältigen Projektthematiken. Die Projektpartner der TU Chemnitz sind Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Hexion GmbH, DEWE Brünofix GmbH, SIGMA Engineering GmbH, RF Plast GmbH sowie als assoziierter Partner Trumpf GmbH + Co. KG.

Werkstoff

Als polymere Komponente stehen phenol- sowie epoxidharzbasierte Formmassen im Mittelpunkt der Untersuchungen. Die Wahl unterschiedlicher Harzsysteme dient zur Abdeckung eines breiten Spektrums an Materialeigenschaften und bildet damit die Basis für die Untersuchungen der in der Grenzfläche wirkenden Haftungsmechanismen. Die gewählten Materialien besitzen hohe Füllstoffgehalte und bilden die genannten vorteilhaften Materialeigenschaften duroplastischer Formmassen in Bezug auf Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit, geringe Kriechneigung sowie hohe Festigkeiten und Steifigkeiten optimal ab. Aufgrund der Verarbeitbarkeit im Spritzguss eignen sie sich zur Herstellung von hoch beanspruchten Serienanwendungen. Neben der Verwendung unterschiedlicher Kunststoffe werden die stofflichen Randbedingungen der metallischen Komponente variiert, um die Grenzflächen- bzw. Bauteilperformance gezielt zu beeinflussen. Dabei werden in Hinblick auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften unterschiedliche Stahlsorten verwendet und die Oberfläche dieser mit dem Ziel der Haftungsoptimierung modifiziert. Zum einen wird der Einfluss unterschiedlicher Phosphatierungen auf die Grenzflächeneigenschaften untersucht. Zum anderen werden die Oberflächen laserstrukturiert. Die Verwendung unterschiedlicher Oberflächenstrukturierungen soll Rückschlüsse auf die in der Grenzfläche vordergründig wirkenden Effekte ermöglichen.

Fertigung

Die Umsetzung eines großserientauglichen Verfahrens zur Herstellung duroplastbasierter Metallhybride setzt die Neuentwicklung einer geeigneten Prozesskette voraus. Der Spritzguss, als großserienfähiges Fertigungsverfahren, bietet eine hohe Formgebungsfreiheit und die Möglichkeit der Prozessintegration des benötigten Fügeverfahrens. Das Handling sowie die Vor- und Nachbearbeitung der Einzelkomponenten und der hergestellten Bauteile führt zu einer hohen Komplexität innerhalb der einzelnen Prozessschritte.

Konstruktion

Elementarer Teil dieser Prozesskette ist die Bauteil- bzw. Werkzeugentwicklung. Die Variation der stofflichen Randbedingungen (Oberflächenbehandlung der Metallkomponente, Wahl/Modifizierung der duroplastischen Komponente), Materialcharakterisierungen sowie die Simulation der Prozess- und Bauteileigenschaften finden zunächst auf Probekörperebene statt. Die Entwicklung und Umsetzung unterschiedlicher Probekörperkonzepte dient zur Sondierung geeigneter Material- und Strukturierungspaarungen. Weiterhin bilden die gewonnenen Kenntnisse bezüglich adhäsiver Wechselwirkungen, Schwindungs- und Vernetzungsvorgänge sowie des thermomechanischen Verhaltens der Hybride die Grundlage für die Entwicklung eines geeigneten Demonstrators. Dieser dient zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und zum Aufzeigen des Nutzens der Hybridbauweise.

Simulation

Alle Entwicklungs- und Prozessschritte werden simulativ begleitet. Geplante Werkzeugkonstruktionen werden bezüglich der Thermik, Entstehungen von Hotspots sowie in Bezug auf die Umsetzung verschiedener Temperierungskonzepte untersucht. Außerdem stehen neben der Formfüll- und Struktursimulation die Abbildung der mechanischen Eigenschaften, Verzug und Eigenspannungen der Hybridbauteile im Zentrum der Berechnungen. Der aktuelle Stand der Technik zeigt Nachholbedarf in Bezug auf die Qualität der Vorhersagegenauigkeit der Formfüll- und Struktursimulation im Bereich der Duroplastverarbeitung. Das komplexe Fließ-Härtungsverhalten der Formmassen besitzt großen Einfluss auf die resultierende Wandhaftung und die sich einstellende Faserorientierung. Die Verbesserung der Vorhersagequalität des Materialverhaltens während des gesamten Produktzyklus setzt umfangreiche Materialcharakterisierungen an Grundmaterial, Probekörpern und dem Bauteil voraus. Auf Basis einer umfassenden Charakterisierung der polymeren Ausgangsmaterialien mittels thermoanalytischer und rheologischer Messverfahren sowie anhand zahlreicher mechanischer Prüfungen an den hergestellten Probekörpern und Bauteilen, wird die Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung der Hybridbauteile erfasst.

Recycling

Um die Nachhaltigkeit der hergestellten Bauteile innerhalb eines geschlossenen Stoffkreislaufes zu ermöglichen, wird an einem möglichst energieeffi-

zienten, stofflichen Recycling der Metall-Duroplast-Hybride geforscht. Dazu werden geeignete Methoden evaluiert und deren technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit bewertet.

Durch die enge Zusammenarbeit der Projektpartner wir ein ganzheitlicher Wissensaufbau in Bezug auf die Bauteilentwicklung, Oberflächenstrukturierung, Fertigungstechnologie, Simulationsgenauigkeit und Dauerfestigkeit gewährleistet. Aus den gewonnenen Ergebnissen können sich mögliche Anwendungen im Bereich des Automobilbaus, der Elektromobilität, der Kälte-Wärme-Klimatechnik sowie der Wasserstofftechnologie ergeben.

Probekörperherstellung

Zur Erreichung der gesetzten Zielstellungen dient ein Konzept, welches auf Basis verschiedener Probekörperebenen zur Entwicklung und Herstellung eines Demonstratorbauteils führen soll.

Zur Ermittlung der in der Grenzfläche wirkenden Effekte und der Vorauswahl geeigneter Materialpaarungen und Oberflächenstrukturierungen findet die Entwicklung und Herstellung geeigneter Prüfkonzepte statt. Zum einen dient die Herstellung hybrider Probekörper im Pressverfahren als erste Orientierung für die Kompatibilität der gewählten Materialpaarungen. Dabei werden kleine Metallplättchen im Pressverfahren mit den gewählten Formmassen verbunden. Somit können einfach und unkompliziert erste Anhaltspunkte bezüglich der Grenzflächenhaftung gesammelt werden. Weiterführend findet die Entwicklung und Herstellung eines komplexen Spritzgusswerkzeuges zur Herstellung von Zug-Scher-Probekörpern statt. Dieses Werkzeug ermöglicht die Herstellung von Duroplast-Metall-Verbundprobekörper in Anlehnung an DIN 1465. Eine drehbare Angussbuchse erlaubt die Herstellung von 1 bzw. 2 Probekörper pro Zyklus. Da aufgrund der Konstruktion des verwendeten Stammformwerkzeuges nur eine Kavität mit Drucksensorik ausgestattet werden kann, wird im Rahmen der Probekörperfertigung auf diese Kavität zurückgegriffen. Damit können verarbeitungsbedingte Unterschiede der Probekörper aufgrund der Herstellung in verschiedenen Kavitäten ausgeschlossen und gleichzeitig die Reproduzierbarkeit und Konstanz des Herstellungsprozesses anhand der drei verbauten Forminnendrucksensoren online kontrolliert werden.

Des Weiteren liegt der Fokus der Werkzeugkonstruktion darauf, einen möglichst definierten Materialzustand des Kunststoffes an der Grenzfläche zum Metall zu generieren. Das setzt voraus, dass sich diese nicht am Ende des Fließkanals befindet, da sich durch das Aufstauen des eingespritzten Materials am Fließwegende eine schwer vorhersagbare Faserorientierung einstellt. Dieser undefinierte Materialzustand führt dazu, dass die mechanischen Eigenschaften und damit auch die Festigkeit des Hybridbauteils nur bedingt simulativ abgebildet bzw. vorhergesagt werden können. Aus dem Grund wird mit Hilfe eines Metalleinlegers das Ende des Fließweges über die Grenzfläche hinaus verschoben. Dieser Einlegekeil leitet die Matrix nach dem Überfließen der Grenzfläche ab und führt somit zu einem reproduzierbaren Materialzustand an der Grenzfläche.

Abb. 2:
Vom Probekörper zum Demonstrator

Abb. 3:
links: Oberfläche der phosphatierten metallischen Komponente nach dem Verpressen, **rechts:** Oberfläche der polymeren Komponente nach dem Verpressen

Auf Basis der Ergebnisse der Zug-Scher-Probekörper werden weitere Versuche an einer bauteilnahen Probekörpergeometrie durchgeführt. Der geplante Rohrprobekörper dient zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Verarbeitungsparameter sowie des Einflusses der Reaktionsschwindung auf die Verbundfestigkeit. Die Konstruktion einer geeigneten Werkzeuggeometrie befindet sich derzeit in der Entwicklungsphase.

Die Erkenntnisse der gesamten Probekörperuntersuchungen fließen in die Entwicklung und Auslegung eines seriennahen Demonstratorbauteils, der die möglichen Vorteile eines mittels im Spritzguss hergestellten Duroplast-Metall-Hybridbauteils aufzeigt, ein. Als geeignetes Bauteil dient eine Rotorwelle. Anhand dieser sollen fertigungstechnische Vorteile und mögliche Gewichtseinsparungen der Hybridbauweise gegenüber einer reinen Metallkonstruktion nachgewiesen werden.

Auszug aus den bisherigen Ergebnissen

Pressversuche
Erste Untersuchungen zeigten, dass die Grenzflächenhaftung durch unterschiedliche chemische Vorbehandlungen gezielt beeinflusst werden kann. Mithilfe erster Pressversuche konnten umfangreiche Materialpaarungen getestet und erste Rückschlüsse auf deren Eignung zur Herstellung eines Hybridbauteils gezogen werden. **Abbildung 3** veranschaulicht die Eignung des Rasterelektronenmikroskops zur Analyse der in der Grenzfläche wirkenden Effekte.

Es ist zu erkennen, inwiefern chemische Beschichtungsverfahren zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur führen. Gegenüber einer polierten Metalloberfläche weist das beschichtete Blech eine stark strukturiertere Oberfläche auf. Weiterhin zeigen die Aufnahmen die Oberfläche der verwendeten Phenolharzformmassen nach dem Verpressen mit einem phosphatierten Stahlblech (16MnCr5). Es wird deutlich, dass die Formmasse aufgrund ihrer niedrigen Verarbeitungsviskosität, in der Lage ist, jegliche Strukturen der Metalloberfläche abzubilden und damit die Bildung von Hinterschnitten ermöglicht.

Beim Betrachten weiterer Materialpaarungen konnten an einigen Stellen Reste der Formmasse und deren Füllstoffe auf der Metalloberfläche ausgemacht werden, was darauf hindeutet, dass an diesen Stellen eine sehr gute Grenzflächenhaftung ein Versagen im Grundmaterial hervorgerufen hat.

Spritzgussversuche
Derzeitige Versuche dienen zur Untersuchung der Übertragbarkeit der im Pressverfahren erhaltenen Ergebnisse auf den Spritzgussprozess. Die zur Herstellung der Zug-Scher-Probekörper verwendete Werkzeugkonstruktion wurde bereits vorgestellt. Erste Verarbeitungsversuche belegen die Eignung des verwendeten Werkzeugs. **Abbildung 4** zeigt ein im Spritzguss hergestellten Zug-Scher-Probekörper. Mögliche Fehlstellen am Fließwegende aufgrund des Aufstauens der Formmasse bzw. aufgrund mangelnder Entlüftung treten nicht im Bereich der Grenzfläche von Metall und Kunststoff auf. Ein negativer Einfluss dieser Effekte auf die Haftfestigkeit des Verbunds kann daher vermieden werden. Weiterhin konnte anhand der verwendeten Forminnendrucksensoren nachgewiesen werden, dass trotz des manuellen Einlegens der Bleche und des Einlegekeils ein konstanter und reproduzierbarer Prozess umsetzbar ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Anwendung duroplastbasierter Kunststoff-Metall-Hybride stehen derzeit fehlende Werkstoff-

Abb. 4:
Im Spritzguss hergestellter Zug-Scher-Probekörper

4

Online-Bildrechte unklar

kennwerte, Schadensmodelle sowie das Fehlen der benötigten Fertigungs- und Fügetechnologien gegenüber. Zusätzlich kann das Werkstoffverhalten unter Temperatur- und Medieneinfluss schwer prognostiziert werden. Daraus ergeben sich neue Herausforderungen an die Analyseverfahren, die Konstruktion und Auslegung neuer Bauteile sowie an den zugehörigen Prozess. Diese Schwerpunkte stehen im Fokus des Forschungsprojekts DuroHyb. Neben den vorgestellten Verarbeitungsversuchen dienen daher auch zahlreiche laboranalytische Verfahren zur Charakterisierung der Grundmaterialien und der Verbundbauteile.

Danksagung

Das vorgestellte Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der *Werkstoffplattform: Hybride Materialien – Neue Möglichkeiten, Neue Marktpotenziale (HYMAT)* gefördert und vom Projektträger Jülich betreut.

KONTAKT

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Professur Kunststoffe
M.Sc. Nils Schmeißer
nils.schmeisser@mb.tu-chemnitz.de
Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde
michael.gehde@mb.tu-chemnitz.de
Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz
Tel.: +49 (0)371 531-32337
www.kt-chemnitz.de

LITERATUR

1. Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. M: Hanser-Verlag, 2014.
2. Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion.: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2011.
3. Vlot, A.: Low-velocity impact loading on fibre reinforced aluminium laminates (ARALL and GLARE) and other aircraft sheet materials. Interner Report, Technische Universität Delft, 1993.
4. Laliberté, J. F., Straznicky, P. V., Poon, C. and Fahr, A.: Applications of fiber-metal laminates. In: Polymer Composites: 21 (2000), Nr. 4, S. 558-567.

FLUIDINJECTION IN PERFECTION

PME fluidtec hat sich auf die Entwicklung und Herstellung von Komponenten und Anlagen für den Fluid-Injektionsspritzguss spezialisiert. Dazu zählen Verfahren wie die Gasinnendrucktechnik (GIT), die Projektilinnendrucktechnik (PIT) sowie die Wasser-Injektionstechnik (WIT). Die WIT bietet in der Fertigung eine höhere Prozessstabilität und Qualität der Bauteile und deutlich geringere Zykluszeiten als herkömmliche Injektionsverfahren – und damit marktrelevante Vorteile. Bei WIT-Anlagen ist PME fluidtec weltweit führend.

PME fluidtec begreift sich vor allem als Technologiepartner und steht seinen Kunden im Entwicklungsprozess von der ersten Idee bis zur serienreifen Produktionsanlage kompetent zur Seite. PME-Anlagen und -Komponenten sind bei renommierten Kunststoffverarbeitern weltweit seit Jahren erfolgreich im Einsatz. In der Fertigung beispielsweise von Leichtbaustrukturen aus umlaufenden Hohlprofilen lassen sich mit der Wasserinjektionstechnik enorme Festigkeiten und Steifigkeiten realisieren. Weitere Vorteile: Sehr kurze Zykluszeiten, geringes Gewicht, Recyclefähigkeit. PME-Anlagen sind wirtschaftlich – so können bei großen Stückzahlen die Herstellungskosten um bis zu 50 Prozent gesenkt werden.

Abb. PME cuboid basic: das innovative modulare WIT-System für 1 bis 4 Servopumpeneinheiten (kombinierbare Module).

KONTAKT

PME fluidtec GmbH
Friedbert Schmitt
Rudolf-Hell-Straße 12
D-77955 Ettenheim
Tel.: +49 (0)7822 300 60
info@pme-fluidtec.de
www.pme-fluidtec.de

PMEfluidtec
FLUIDINJECTION IN PERFECTION

Wir sind Ihr Technologiepartner.
Mehr als 100 WIT-Anwendungen weltweit
belegen unseren Erfolg.

- Leichtbaustrukturen mit hoher Festigkeit und Steifigkeit
- Mehr Produktivität dank kürzerer Zykluszeiten
- Innovative Technologie für höherer Prozessstabilität und Qualität
- Weniger Materialeinsatz, sinkende Kosten, ein Plus an Wirtschaftlichkeit

PME fluidtec GmbH
Rudolf-Hell-Straße 12
D-77955 Ettenheim
Tel. +49 (0)7822 300 60

www.pme-fluidtec.de

ANALYSE DER FEHLERQUELLEN BEI POLYMERWERKSTOFFEN

Polymere kommen in der Automobilindustrie häufig für die wirtschaftliche Produktion von gewichtsoptimierten Komponenten zum Einsatz. Die thermische Analyse ermöglicht dabei die Sicherstellung der Qualität und Stabilität dieser Bauteile.

Erkenntnisse über die Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften eines Werkstoffs fördern die Erkennung und Behebung potenzieller Fehler. Anhand von Materialversuchen und thermischen Analysen lassen sich entsprechende Rückschlüsse ziehen. Aufgrund der Vielfältigkeit von Polymeranwendungen ist eine umfassende Kenntnis des Werkstoffverhaltens unerlässlich.

Polymere in der Automobilindustrie

Dichtungen zählen zu den größten Anwendungsbereichen von Polymeren im Automobilbau. Hierbei sind die Qualitätsanforderungen enorm hoch, denn wechselnde Prozessbedingungen können zu Kristallisation führen. Das bedeutet, dass sich die Polymerdichtung ab einem bestimmten Temperaturwert zusammenzieht und somit versagt. Der Kontakt von Dichtungen mit Lösemitteln ist ein weiterer häufiger Grund für den Ausfall von Fahrzeugkomponenten.

Die folgenden beiden Anwendungen wurden zum einen mithilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) und zum anderen mithilfe der thermomechanischen Analyse (TMA) durchgeführt. Sie zeigen, auf welche Weise ausgefallene Komponenten charakterisiert werden können und welche Rückschlüsse die Messungen in Bezug auf Verarbeitung und physikalische Eigenschaften zulassen.

Heizkurven von thermoplastischen Dichtungen

Das erste Beispiel zeigt die Analyse zweier teilkristalliner thermoplastischer Dichtungen unter Verwendung des DSC von METTLER TOLEDO. Das Diagramm zeigt DSC-Heizkurven der beiden Materialien. Die „schlechte“ Dichtung versagte bei einer Temperatur von ca. 150 °C, während die „gute“ Dichtung ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielte. Die DSC-Analyse offenbarte markante Unterschiede zwischen den beiden Werkstoffen. Bei der „schlechten“ Dichtung liess sich ein Glasübergang bei ca. 145 °C beobachten, auf den sofort eine Kristallisation folgte. Im Gegensatz dazu zeigte das „gute“ Probestück nur den Glasübergang bei ca. 155 °C und keinerlei Anzeichen von Kristallisation. Die Dichtung zog sich aufgrund der Kristallisation zusammen, wodurch das „schlechte“ Material die Qualitätskriterien nicht erfüllt.

Das unterschiedliche Verhalten der beiden Dichtungen ist auf Unterschiede bei den Prozessbedingungen zurückzuführen – die „schlechte“ Dichtung wurde zu schnell abgekühlt. Daher hatte das Material nicht genügend Zeit für eine vollständige Kristallisation.

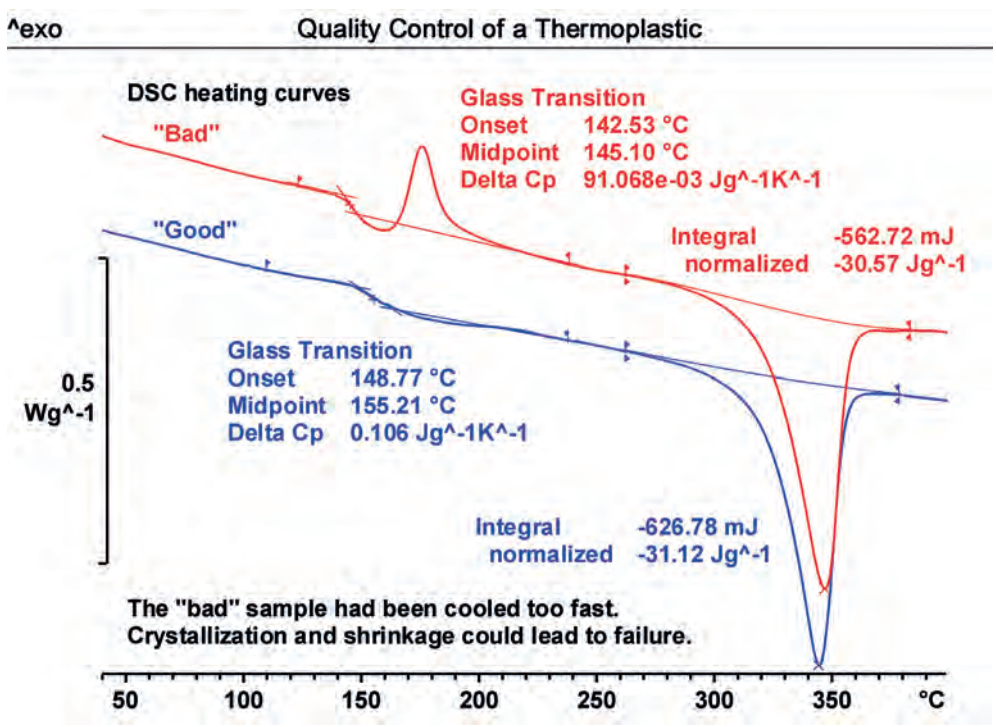
Kompatibilität von Polymeren und Lösemitteln

Der zweite Versuch zeigt ein typisches Beispiel für die Messung der Kompatibilität von Polymer und Lösemittel anhand eines technischen Verfahrens, wie beispielsweise des TMA/SDTA. Um die mechanischen Veränderungen als Funktion der Temperatur zu messen, wurde das Probestück zunächst für zwei Minuten bei 30 °C in den Ofen gelegt und anschließend die Materialstärke gemessen. Daraufhin wurde der Ofen geöffnet und der Glasbehälter mit Toluol gefüllt, das dieselbe Temperatur aufwies. Der Anstieg der Materialstärke durch das Aufquellen aufgrund der Lösemittelabsorption wurde mithilfe des Sensors gemessen. Wie beobachtet werden konnte, steigt diese in den ersten zehn Minuten um etwa 30 % an.

Diese Erkenntnisse helfen Forschungs- und Entwicklungsabteilungen bei der Entwicklung von Polymerwerkstoffen von höchster Qualität, die somit für die Fertigung von optimalen Fahrzeugkomponenten geeignet sind. Die Hochleistungsinstrumente zur thermischen Analyse von METTLER TOLEDO ermöglichen eine Untersuchung des Materialverhaltens und der Fehlerquellen.

KONTAKT

METTLER-TOLEDO GMBH
Ockerweg 3
D-35396 Gießen
Tel.: +49 (0)641 507 444
MTVerkaufD@mt.com
www.mt.com/TA



1

Abb. 1:
Ausfallanalyse von „guten/schlechten" Komponenten

2

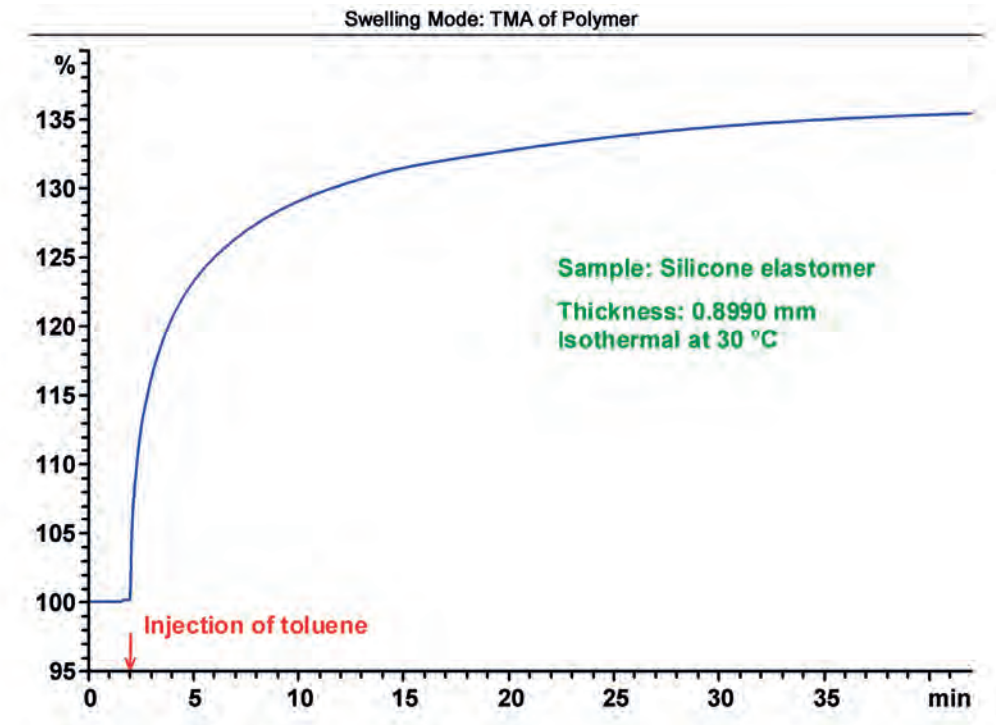


Abb. 2:
Bestimmung der Kompatibilität eines Polymers bei Kontakt mit einem Lösemittel

BEWERTUNG DER CHIP UND CUT RESISTENZ VON GUMMIMISCHUNGEN BEREITS VOR DER REIFENENTWICKLUNG

Autoren: Radek Stoček, PRL Polymer Research Lab; Centre of Polymer Systems, Tomas Bata University, Tschechien
Gert Heinrich, Technische Universität Dresden, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
Reinhold Kipscholl, Coesfeld GmbH & Co. KG, Dortmund

Die Entwicklung von Reifen ist ein sehr komplexer und schwieriger Prozess. Viele verschiedene chemische und physikalische Eigenschaften von Mischungskomponenten, die zur Einstellung der Eigenschaften auf die Anforderungen eines bestimmten Reifentyps benötigt werden, sind in geeigneter Weise zu kombinieren. Dabei beeinflussen sich die Eigenschaften der Mischungskomponenten gegenseitig, sodass das Ergebnis erst als optimal verifiziert werden kann, wenn der Reifen fertiggestellt ist.

Neben den Anforderungen an Fahrkomfort, Fahrverhalten, Bremsverhalten, Haftung und Rollreibung ist der Reifenverschleiß, durch den die Lebensdauer des Reifens in der Hauptsache bestimmt wird, ein wesentliches Kriterium bei der Reifenentwicklung. Außer chemischer und thermischer Alterung, die Einfluss auf die Lebensdauer nehmen, ist die Interaktion der Reifenlauffläche mit der Oberfläche der Fahrbahn der dominierende Einfluss auf die Lebensdauer eines Reifens. Aus diesem Grund ist die Beschaffenheit, Struktur und letztlich die Rauheit der Fahrbahnoberflächen im geplanten Einsatzbereich des Reifens der kritische Parameter für die Auswahl der Komponenten seiner Mischung. Nimmt man Fahrbahnoberflächen näher in Augenschein, so ist in allen Fällen eine mehr oder weniger ausgeprägte Rauheit festzustellen. Bei Fahrbahnen mit asphaltierten Oberflächen ist die Rauheit maßgeblich gegeben durch die Körnung des eingesetzten Gesteins im Belag. Die Untergründe jenseits von befestigten Straßen hingegen sind von grober Struktur. Aufgrund von mehr oder weniger rauen und schweren Bedingungen etwa durch Steine, Schotter, Wurzeln, Getreidestoppeln entstehen auf der Reifenlauffläche Beschädigungen wie etwa in **Abb. 1**, links dargestellt [1]. Dieses Verschleißbild ist gekennzeichnet durch Risse in der Reifenlauffläche und herausgeschälte Gummipartikel. Das Verschleißbild ist bekannt als Cut und Chip Verschleiß. Manchmal wird dieses Phänomen auch mit CCC bezeichnet. Die Abkürzung steht für Cut, Chip und Chunk [2].

Abb. 1:
Links: Cut & Chip Schaden an einem LKW-Reifen.
Rechts: eine Schädigungkombination aus Abrieb und CC-Schäden an einem „moto-cross" Reifen.

Die Schädigung von Reifen in dieser ausgeprägten Form ist allgemein assoziiert mit „off-the-road tires“ (OTR), die auf schwerem, unbefestigten Terrain betrieben werden. Dies sind Bereifungen von Fahrzeugen, die im landwirtschaftlichen Bereich, in der Schwerindustrie, im Bergbau oder Straßenbau sowie bei Erdarbeiten eingesetzt sind. Ebenso im sportlichen Bereich (Moto-Cross/Enduro) bei sogenannten MX Reifen treten neben Verschleiß durch Abrieb auch CC-Schädigungen auf. **Abb. 1, rechts** zeigt ein typisches Verschleißbild eines MX Reifens als Beispiel. Ähnliche Verschleißbilder werden ebenso an Reifen von Leicht-LKW und Kleintransportern (LTT) oder SUV beobachtet. Darüber hinaus treten solche Verschleißbilder auch an Bereifungen von LKW-Reifen auf, die im Transportwesen eingesetzt sind, als auch bei Ganz-Jahres-Reifen von PKW und Motorradreifen, allerdings mit jeweils unterschiedlich stark ausgeprägten Schadensbildern. Das CC-Verhalten bestimmt, über den verstärkten Verschleiß eines Reifens, erheblich seine Lebensdauer und beeinflusst Fahreigenschaften und Betriebssicherheit. Aufgrund der Bedeutung für eine Vielzahl von Reifentypen durch mechanischen Verschleiß im täglichen Betrieb ist es verständlich, dass die Erhöhung des Widerstandes gegen Abriebverschleiß und CC-Schädigungen ein bedeutendes Ziel für die R&D-Abteilungen eines jeden Reifenherstellers darstellt.

Jedes Oberflächenelement einer Reifenlauffläche ist im Fahrbetrieb mechanischen Belastungen durch den Kontakt der Reifenaufstandsfläche mit der Fahrbahnoberfläche ausgesetzt. Durch den Kontakt und die ständige zyklische Verformung des Gummis der Reifenlauffläche durch Rauheitsspitzen (Asperitäten) wird Reibungsarbeit geleistet, die im Fahrbetrieb im Wesentlichen aus Hysteresereibung besteht. Aufgrund der dabei entstehenden Dissipationswärme werden wiederum die mechanischen Eigenschaften der Lauffläche verändert. Abhängig von Form und insbesondere Größe der Asperitäten entsteht ein Verschleißbild, welches sich als Mischung zwischen Abrieb und CC-Schädigung darstellt.

Zum besseren Verständnis der beim Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn auftretenden Phänomene werden kurz die prinzipiellen Grundlagen der Kontaktmechanik erläutert. Details findet man zum Beispiel in [3, 4]. Über die Reifenaufstandsfläche werden Längs-, Hoch- und Querkräfte auf die Fahrbahn übertragen. Die Größe einer Reifenaufstandsfläche wird oft mit der Fläche einer Postkarte gleichgesetzt. Dabei handelt es sich jedoch um eine scheinbare Kontaktfläche, denn auf Grund der (fraktalen) Oberflächenrauhigkeit der Fahrbahnoberflächen ist nur ein geringer Teil des Gummis einer Reifenlauffläche in direkter Berührung mit den Oberflächenunebenheiten der Fahrbahn. Desweiteren ist die Reifenaufstandsfläche eine dynamische Kontaktfläche, die sich proportional zur Geschwindigkeit eines Fahrzeugs ändert. Es steht also stets nur ein Abschnitt der Lauffläche (Latchebene) zur Verfügung, um Hochkräfte, Quer- und Längskräfte zu übertragen. In Hochrichtung übernimmt überwiegend der Luftdruck im Reifen diese Übertragunsgarbeit; in Längs- und Querrichtung geschieht dies in der Reifenaufstandsfläche durch den Aufbau komplexer mechanischer Spannungsverhältnisse, die aus Antriebs-, Brems- und Lenkkräften resultieren. Veränderungen in der Radlast beeinflussen dabei die übertragbaren Kräfte in Längs- und Querrichtung. Ursache dafür ist in erster Näherung das Coulombsche Reibungsgesetz, bei welchem die überrtragbare Reibkraft (in der Latschebene) proportional zur Normalkraft ist. Die Gummi-Reibphysik und das Verständnis der dabei auftretenden Adhäsionsreibung und Hysteresereibung bei einem gleitenden Kontakt zwischen Gummi und einer rauhen (fraktalen) Oberfläche ist ein in den letzten zwei Jahrzehnten intensiv erforschtes Gebiet, das in Forschung und Entwicklung in der Reifenindustrie Eingang gefunden hat [5-9]. Heutzutage exisitieren zahlreiche Ansätze und Simulationswerkzeuge zur Modellierung des Kontaktverhaltens von Reifen mit einer Fahrbahn. Einen Überblick findet man z.B. in [4, 10, 11]. Anschauliche Ansätze bieten die sogenannten Bürstenmodelle (auch Borstenmodelle), in welchen einzelne Borsten zwischen Reifengürtel und Untergrund die Kraftübertragung in Längs- und Querrichtung beschreiben. Der vom Reifengürtel getragene Laufstreifen wird in dem Büstenmodell durch elastische Biegeelemente bzw. Profilstollenelemente repräsentiert. Die Verformung der Biegeelmente unterscheidet sich, wenn der Reifen gebremst oder angetrieben wird (siehe **Abb. 2**).

Aus der Differenzgeschwindigkeit zwischen Reifen und Fahrbahn lässt sich dabei der sogenannte dimensionslose Schlupf berechnen. Beim Bremsen gilt für den Bremsschlupf

$$S_B = \frac{v_x - \frac{D}{2}\cdot\omega_D}{v_x} \qquad (1)$$

Dabei sind v_x die translatorische Geschwindigkeit des Radmittelpunktes in horizontaler Richtung und ω_D die Winkelgeschwindigkeit des Rades. Bei 0 % Schlupf dreht sich das Rad mit der Winkelgeschwindigkeit mit der sich nach Multiplikation mit dem dynamischen Reifenhalbmesser D/2 die translatorische Geschwindigkeit des Radmittelpunktes ergibt. Im Fall $\omega_D = 0$ dreht sich das Rad nicht mehr und dies würde der Situation eines blockierten

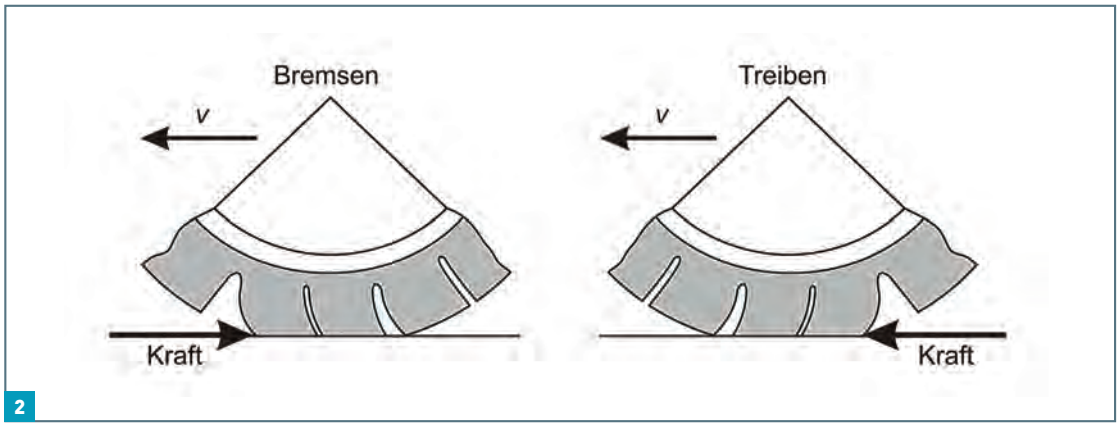


Abb. 2: Kontaktkinematik Reifen/ Fahrbahn beim Bremsen und Antreiben.

Rades mit 100 % Schlupf entsprechen. Es genügt hier der Hinweis, dass heutzutage die Fahrzeuge mit einem ABS-Bremssystem (Antiblockiersystem) ausgerüstet sind, die beim Bremsen des Kraftfahrzeugs einem möglichen Blockieren der Räder durch geregelte Reduzierung des Bremsdrucks entgegen wirken, was zu einem Erhalt der Lenkbarkeit und Spurtreue und durch die Radschlupfregelung zu einer Bremswegverkürzung insbesondere auf nasser Straße führt [12].

Beim Antreiben (Beschleunigen) lautet die Definition für den Antriebsschlupf

$$S_A = \frac{\frac{D}{2}\cdot\omega_D - v_x}{\frac{D}{2}\cdot\omega_D} \qquad (2)$$

Der schlupffreie Fall des freirollenden Reifens (S_A = 0 %) entspricht der Situation wie beim Fall S_B = 0. Dagegen beschreibt der Fall S_A = 100 % einen stehenden Radpunkt bei drehendem Reifen – eine Situation, der man z.B. beim Anfahren in tiefem Schnee oder Morast ausgesetzt sein kann.

Die Situation, die zu dem Phänomen des CC-Verschleißes führt, ist insbesondere bei beständigem Antrieb des Reifens auf einem harschen Untergrund zu erwarten.

Der Vorgang des Passierens des Oberflächenelements einer Reifenlauffläche über eine Asperität ist in **Abb. 3** prinzipiell dargestellt. Dies kann in 5 signifikanten Phasen dargestellt werden: 1. Zunächst erreicht der betrachtete Bereich der Lauffläche die Aspertät. 2. der Gummi nimmt Kontakt zur Asperität auf und haftet adhäsiv. 3. die Spitze der Asperität verformt den Gummi und ist über die Gewichtskraft des Fahrzeugs durch Haftreibung fixiert. 4. durch die Haftung zwischen Asperität und Gummi wird der radial deformierte Bereich des Gummis tangential in Reifenrollrichtung deformiert, bis die entstehende Scherkraft gleich der Haftreibung wird.

Für die Scherspannung τ_{SS} gilt

$$\tau_{SS} = \mu \cdot \frac{F_H}{A_H} \qquad (3)$$

mit dem Reibungskoeffizienten, der Hochkraft F_H und dem Teil der Lauffläche A_H, die im realen Kontakt mit den Asperitäten unter der Reifenaufstandsfläche ist. Nun rutscht die Asperität über den Gummi, bis die Scherkraft größer als die Haftreibung wird. Die Haftung bricht ab und die Asperität löst sich aus der Reifenoberfläche, die sich wieder zurück verformt wobei dieser Vorgang ist in 5 dargestellt. Die Scherspannung in den Phasen 3 und 4 macht den relevanten Mechanismus des Schädigungs-Vorgangs aus. Gummi vor der Asperität wird gestaucht und hinter der Asperität gestreckt. Dadurch wirkt im Gummi eine Streckspannung, die je nach ihrem Betrag, unmittelbar oder sukzessive durch zyklisches Auftreten einen Riss initiiert und ihn im weiteren Ablauf propagiert. Schließlich werden Gummichips oder –stücke aus der Reifenlauffläche abgelöst (Phase 5). Abhängig von der Größe der Asperitäten, der Fahrgeschwindigkeit und des radial wirkenden Anpressdrucks läuft der Schädigungsprozess unterschiedlich schnell, mit einem mehr oder weniger gravierenden Schadensbild ab.

Aufgrund des andauernden Abrollens des Reifens und dem dadurch zyklischen Be- und Entlastungsprozess bei Befahren rauer Fahrbahnoberflächen werden Gummipartikel einer Größe von etwa > 100 µm bis zu mehreren Zentimetern aus der Reifenlauffläche abgelöst. Im Falle des Befahrens von Beton- oder Asphaltpisten laufen aus physikalischer Sicht die gleichen Vorgänge ab. Die Größe der abgelösten Partikel jedoch liegt hier in einer Größenordnung von etwa 1 µm – 100 µm. [13] Hier wird wegen der um Größenordnungen geringeren Schäden von Ermüdungsverschleiß oder Abrieb gesprochen, auch wegen der deutlich längeren Dauer des Verscheiß-

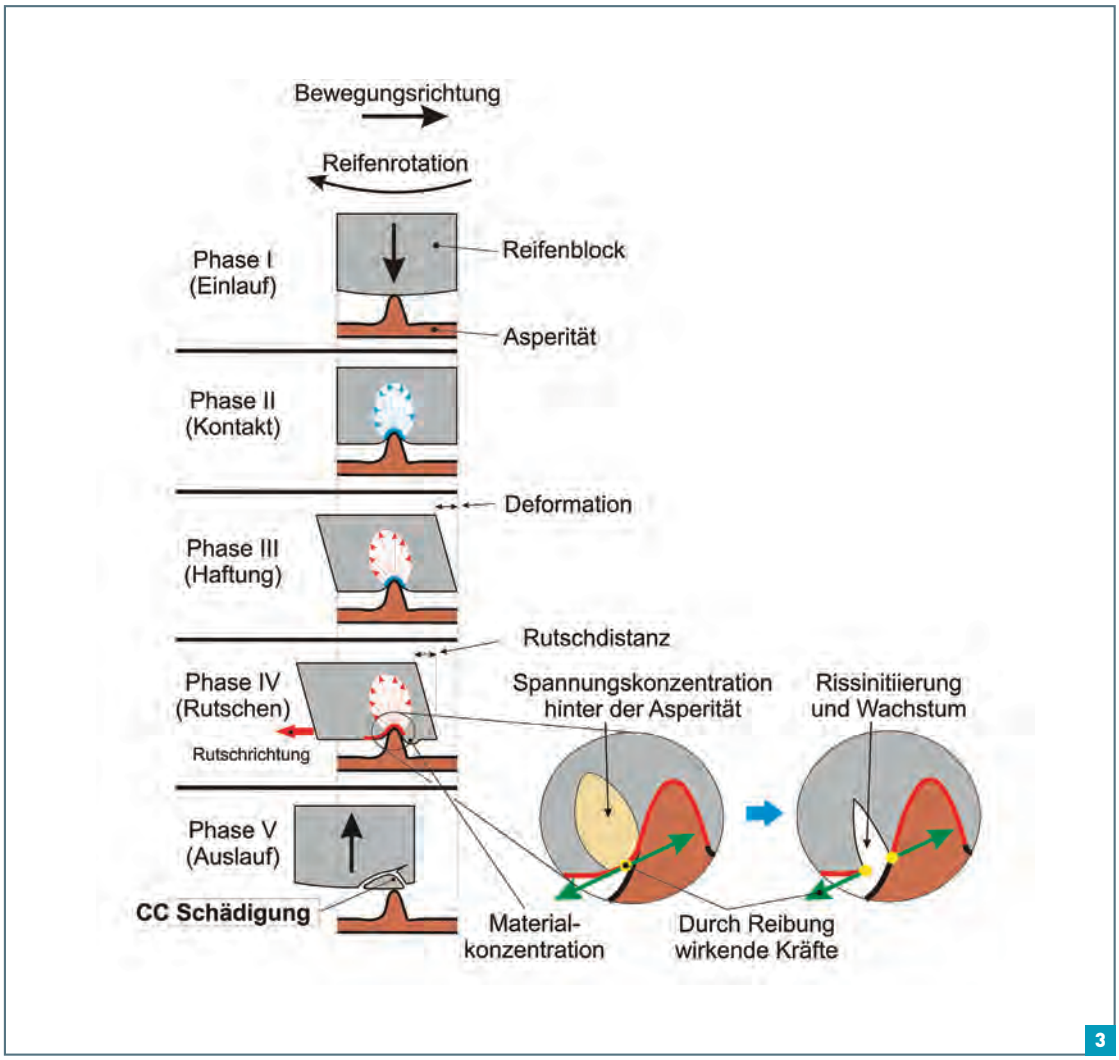


Abb. 3:
Schema des Ablaufs der Deformation des Laufflächenbereiches beim Passieren einer Asperität (vergl. auch [3]).

prozesses, der sich durch eine gleichmäßige und langsame Abnahme des Reifenprofils darstellt.

Aus bruchmechanischer Sicht erklärt sich der Unterschied zwischen CC-Schäden und Abrieb aus den signifikanten Unterschieden in den jeweils auftretenden risstreibenden Energien (Reißenergie). Die im CC-Prozess wirkenden Dehnspannungen sind hoch und liegen in einer Größenordnung nahe der Bruchspannung (ultimative Spannung). Die beim Abrieb auftretenden Reißenergien hingegen sind wesentlich kleiner. Sie liegen in der Größenordnung der Ausdauergrenze oder der intrinsischen Spannung eines Gummimaterials. [14-17] Dies ist die Reißenergie unterhalb der keine Schädigung des Gummis auftritt.

Die Ermittlung des CC-Verhaltens erfolgt typischer Weise durch Tests im Feld. Für den Test einer Mischung werden zwei bis vier gleiche Reifen (identische Mischung, gleiche Größe und Design der Reifen und Laufflächen) auf ein Fahrzeug z.B. des Leicht-LKW Typs montiert, für den der Reifen konzipiert ist. Der Reifendruck wird während aller Tests auf etwa 6 bar gleich gehalten. Die Last des Fahrzeuges wird so gewählt, dass der Druck über die Aufstandsfläche der Reifen im gewünschten Bereich liegt. Ein Test läuft für etwa 1.000 km mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h auf einem Schotteruntergrund mit scharfkantigen, harten Steinen der Größen um 10 mm bis 30 mm. Die Testauswertung erfolgt visuell im Vergleich mit Referenz-Schadensbildern, wobei die Anzahl und die Größen der Beschädigungen klassifiziert werden und so ein Vergleichsmaßstab entsteht. Diese Vorgehensweise ist sehr zeit- und kostenintensiv und schlecht reproduzierbar.

Aus diesen Gründen ist die Möglichkeit eine verlässliche Ermittlung und Bewertung des CC-Verhaltens von Gummimischungen an geeigneten Materialproben bereits im Labormaßstab durchzuführen zu können von hohem Nutzen. Eine solche Möglichkeit wird geschaffen, indem der transiente Vorgang des Kontaktes zwischen Reifengummi und Fahrbahnas-

Online-Bildrechte unklar

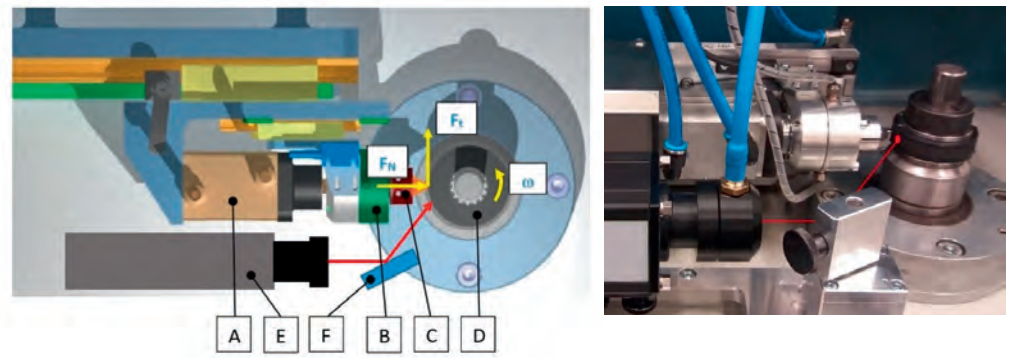
4

Abb. 4:
Links: ICCA.
Rechts: ICCA Messstelle in der Messkammer.

peritäten inklusive der assoziierten dynamischen Kräfte aus Gewicht, Reibung, Scherung und Verformung durch die Messeinrichtung der Realität entsprechend dargestellt wird.

Eine einfache bekannte Apparatur für solche Labortests an kleinen rotierenden Gummirädern als Prüfling wurde schon in [2, 18-21] vorgestellt. Ein Gewicht, am Ende eines Hebels montiert, wird mittels eines Nockenrades, das auf das andere Ende des Hebels wirkt, angehoben und fällt über seine Schwerkraft zum Ausgangspunkt zurück. Unterhalb des Gewichtes ist ein Eindringkörper montiert, der seinerseits beim Fallen des Hebels in seine Ausgangsposition die Materialprobe penetriert. Die Häufigkeit und die Dauer der Penetration sind durch die Drehzahl der Materialprobe bzw. des Nockenrads bestimmt. Die dadurch erzeugte Belastung ist nicht definiert, weil die Verweilzeit des Eindringkörpers auf der Probe durch die Rückprallelastizität der Probe bestimmt ist. Weiterhin ist der Energieinhalt der Penetration nicht regelbar und vom Betrag nicht vergleichbar mit den realen Lastbedingungen, denen ein Reifen ausgesetzt ist. Außerdem sind solche, einfache Einrichtungen nicht messtechnisch instrumentiert, sodass nach Testende lediglich der Masseverlust des Prüflings durch Wiegen vor und nach dem Test als Testergebnis verfügbar ist. Somit steht nur eine ungenaue, näherungsweise und qualitative Möglichkeit zu Beurteilung der Schädigung zur Verfügung. In [20] wurde berichtet, dass das Rating der Gummimischungen, welches mit einer simplen CC-Messmethode ermittelt wurde, ein abweichendes, teilweise gegensätzliches Resultat zu Feldtests der gleichen Mischungen zeigte. Trotz dieser Ergebnisse sind die Arbeiten von Beatty & Miksch in [18, 19] als wertvolle Pionierarbeit zu würdigen. Sie haben die Entwicklung zu dem von Stocek at. al. in [22, 23] vorgestellten, messtechnisch voll instrumentierten Prüfgerät angeregt.

Der ICCA (Instrumented Cut and Chip Analyser, Hersteller: Coesfeld GmbH & Co. KG, Dortmund) ist in **Abb. 4** dargestellt. Das Gerät simuliert die im Fahrbetrieb real auftretenden Belastungen. Die



5

Abb. 5:
Links: Schematische Darstellung des ICCA-Messprinzips.
A: Pneumatikzylinder;
B: Zweikanalige Kraftmesszelle;
C: Spannfutter mit Indenter;
D: Gummitestkörper;
E: IR sensor zur insitu Temperaturerfassung der Probenoberfläche;
F: Reflektor zur Ablenkung des IR Spots auf die Probenoberfläche.

Betriebsbedingungen sind in einem weiten Bereich einstellbar, sodass individuell für den Einsatzbereich des zukünftigen Reifens ein zugeschnittenes Lastprofil erstellt werden kann. So kann die Kraft (F_N), mit der der Eindringkörper (Indenter) radial auf das Probenrad stößt, parametriert werden. Der Eindringkörper kann auch gewechselt werden, um unterschiedliche Formen von Asperitäten zu simulieren. Ebenso die Drehzahl des Prüflings, die Frequenz der Penetration sowie die Verweildauer des Eindringkörpers, während dieser mit der Anpresskraft F_N auf die Probe drückt, werden für die Messung parametriert und während der Messung kontinuierlich aufgezeichnet. Die Messbedingungen werden in einem geschlossenen Regelkreis mit Rückführung geregelt. Die Tangentialkraft, Ft wird gemessen und aufgezeichnet. Ebenfalls der Deformationsweg, s(n) des Eindringkörpers in die Probe wird gemessen und registriert. Weiterhin wird mit einem IR-Sensor die Temperatur der Probenoberfläche gemessen und kontinuierlich aufgezeichnet. Somit sind alle Messbedingungen reproduzierbar und für die Testauswertung verfügbar.

Das Testprinzip des ICCA ist in **Abb. 5, links** schematisch dargestellt. **Abb. 5, rechts** zeigt den realen Aufbau der Messstelle und die IR-Strecke für die Temperaturmessung auf der Probe. Die Materialprobe ist ein kleines Gummirad (D) mit einem Durchmesser von 55 mm welches zyklisch penetriert wird. Ein Pneumatikzylinder (A) bewegt den Eindringkörper (C), der die Probe in der gewählten Wiederholfrequenz (f), mit der Anpresskraft (F_N) penetriert und für die eingestellte Gleitzeit mit F_N gegen die Probe drückt. Die Verweilzeit des Eindringkörpers auf der Probe simuliert die Dauer der Einwirkung der Scherkraft bei der Bewegung des Oberflächenelementes einer Reifenlaufläche über der Asperität und kann zwischen wenigen Millisekunden bis zu mehreren 10 ms eingestellt werden. Die Kräfte F_N und F_t werden mit einer zweiachsigen Kraftmesszelle (B) erfasst. Unmittelbar hinter den Eindringkörper wird der Fokus des IR-Sensors (E) durch den justierbaren Reflektor auf die Stelle der größten Spannungsintensität gespiegelt. In **Abb. 6** ist der Ablauf des Kontaktes zwischen Asperität und Reifen und den Kraftverläufen dargestellt. In Abb. 6 oben links befindet sich ein Foto, auf dem Rissinitiierung und Risswachstum gezeigt ist.

Mit dem beschriebenen ICCA werden die physikalischen Vorgänge, die beim Abrollen von Reifen auftreten, gut simuliert. Entscheidend ist, wie mit den Messergebnissen, quantifiziert durch eine Kenngröße, auf das Schädigungs-Verhalten einer Gummimischung geschlossen werden kann. Die Tangentialkraft F_t, ist die Antwort der mechanischen Eigenschaften der Gummimischung und des Zustands der Probenoberfläche auf die Anpresskraft F_N. Da angenommen werden kann, dass sich bei zunehmender Schädigung der penetrierten Probenoberfläche das Rauschband der Tangentialkraft vergrößert, wird die Breite des Rauschbandes von F_t genutzt, um je Lastzyklus den Grad der Schädigung zu ermitteln. Ein Schadensparameter „P“ wird berechnet, der reziprok proportional zur CC-Beständigkeit der Gummimischung ist. Hierzu werden zwei einhüllenden Kurven entlang der lokalen Minima und Maxima der Tangentalkraftkurve gebildet. Die Differenzen dieser Kurven werden pro Belastungszyklus numerisch integriert ab „Start des Tests“, jeweils pro Zyklus c(n), mit n = 1 bis k. Diese Integrale werden jeweils durch die assoziierte Zykluszahl dividiert (1 bis k). Die Quotienten q(1) bis q(k) = P(1) bis P(n) repräsentieren das Inverse des CC-Widerstandes zum jeweiligen Zyklus und sind ein Maß der CC-Schädigung bis zum Zyklus c(n).

Weitere Erläuterungen zur Berechnung des CC-Schaden Parameters P(n) können den Veröffentlichungen [22, 24] entnommen werden. In **Abb. 7** ist das Ergebnis der Messungen zweier verschiedener Mischungen unter identischer Parametrierung dargestellt. Die Kurven zeigen den CC-Schaden über den Belastungszyklen. Gezeigt sind beide Prüfkörper nach abgeschlossenem Test und die entsprechenden Kurven P(n) über c(n). Eindeutig ist die rechts gezeigte Materialprobe deutlich stärker geschädigt als die links dargestellte. Dieses Ergebnis ist zweifellos der Nachweis dafür, dass die quantitative Ermittlung der CC-Schädigung mit Hilfe einer

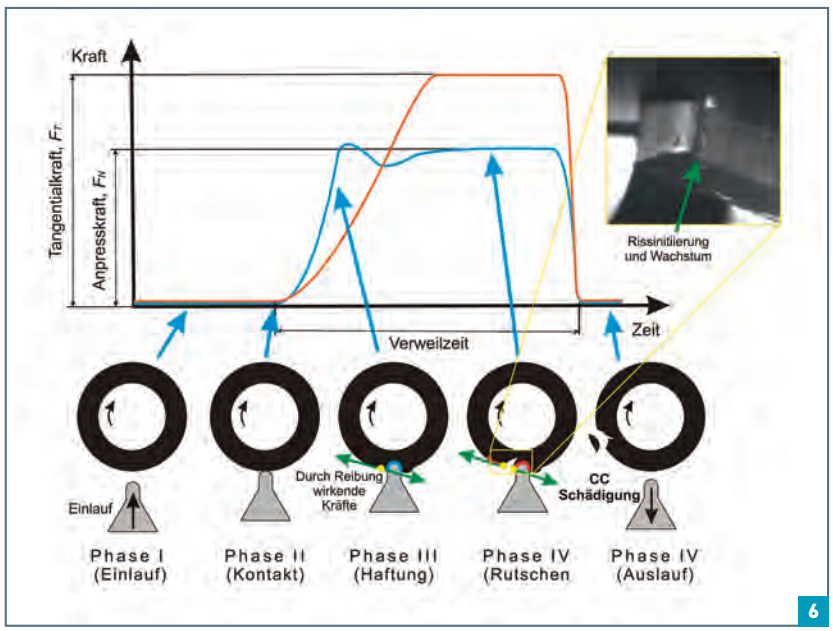
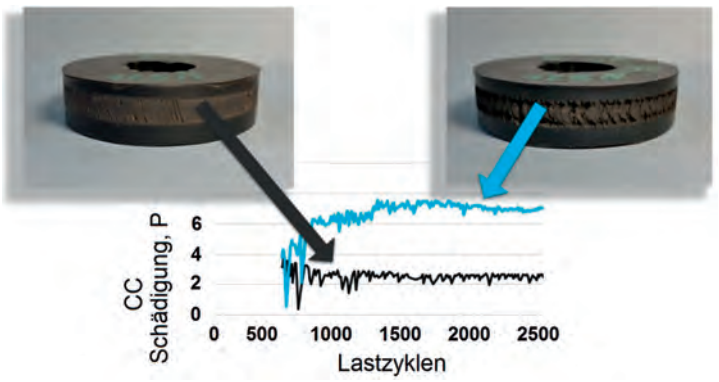


Abb. 6: Ablauf der Passage des Laufflächenabschnitts über der Asperität mit Messsignalen.



7

Abb. 7:
Beispiel der CC-Schäden an zwei verschiedenen Gummimischungen mit $P_{(n)}$ über $C_{(n)}$.

mess- und regelungs-technisch instrumentierten Messung im Vergleich zu einer qualitativen optischen Beurteilung wesentliche Vorteile mit sich bringt. Für weitergehende Analysen steht außerdem die elastische Schädigungsenergie aus Rauheit, Rückprall sowie Eindringtiefe, die Abnahme des Probenumfangs durch Materialverlust und die Temperaturentwicklung der Probenoberfläche zur Verfügung. Selbstverständlich kann durch Wiegen der Probe ebenfalls der Massenverlust durch den Test bestimmt werden.

Zum wissenschaftlichen Nachweis der Eignung des Verfahrens wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die eindrucksvoll dessen Korrektheit an den untersuchten Materialmischungen gezeigt und verifiziert haben. In allen Fällen zeigten die Messergebnisse des ICCA sehr gute Korrelationen mit dem Feldtest. Die Untersuchungen wurden durchgeführt mit vier Gummimischungen, aus denen Probekörper zum Einsatz im ICCA und je 4 LKW-Reifen für den “off-the-road”-Test hergestellt wurden. Der Feldtest wurde durchgeführt von der Continental Reifen Deutschland GmbH. Ein systematischer, standardisierter Vergleich hat die sehr gute Übereinstimmung zwischen den Labor-Messungen und dem Feldtest nachgewiesen. Abb. 8 zeigt exemplarisch die Fotos des Zustands der Proben und der Reifenlauflächen im Vergleich nach dem abgeschlossenen Test an zwei der getesteten Gummimischungen. Ausführlich sind die Ergebnisse der Untersuchung in [25] vorgestellt. Weiterhin sind ausführliche Grundsatzstudien (vergl. [22-24]) durchgeführt worden. Dazu wurden ungeblendete Gummimischungen verwandt, deren Verschleiß-Verhalten allgemein bekannt ist und mit Erfahrungen der Reifenindustrie übereinstimmt. Hierbei handelt es sich um Standardmischungen auf der Basis folgender Polymere: Naturkautschuk (NR), Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) und Butadien-Kautschuk (BR). Auch hier konnten die Testergebnisse in voller Übereinstimmung mit der Reifenindustrie bestätigt werden. (Höhe des CC-Widerstands in absteigender Reihenfolge: NR, SBR, BR). Daher konnte die ICCA-Methode inzwischen erfolgreich als Labormessmethode in der Reifenindustrie eingeführt werden.

Abb. 8:
Fotos zwei verschiedener Gummimischungen.
Im Hintergrund Laufflächen nach identischen Feldtests.
Im Vordergrund ICCA-Proben nach gleich parametrierten Labortests [16].

8

Die Herstellung von Reifen mit hohem CC-Widerstand bei gleichzeitiger Erhaltung oder Verbesserung der Reifeneigenschaften wie Fahrkomfort, Fahrsicherheit, Abrollgeräusch, optimiertem Kraftstoffverbrauch und Umweltfreundlichkeit erfordert eine beständige Weiterentwicklung der Gummimischungen und die möglichst exakte Einstellung ihrer Eigenschaften für die vorgesehenen Einsatzbedingungen. Zur erfolgreichen Verfolgung dieser Ziele sind neue Generationen von Rohmaterialien und Additiven, als auch eine gute Abstimmung der Mischungskompositionen in Bezug auf ihre dezidierten Einsatzbedingungen gefordert. Um diese Entwicklungen hoch effizient und wirtschaftlich zu gestalten, gilt es Zeit und finanziellen Aufwand zu verringern und objektive, quantifizierte Entwicklungsentscheidungen zu treffen. Dafür sind “vorhersagende Tests s.g. predictive tests” notwendig, mit deren Hilfe schon im Labormaßstab Eigenschaften des Endproduktes ermittelt werden können, noch bevor es produziert wurde. Aufwändige und kostenintensive Testiterationen können somit eingespart werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde unterstützt vom: Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic—DKRVO (RP/CPS/2020/004).

LITERATUR

1. Wunde, M., Klüppel, M., Vatterott, C., Tschimmel, J., Lacayo-Pineda, J., Schulze, A., Heinrich, G. (2019) Verbesserung der Laborvorhersagen zum Risswachstum und Verschleiß von LKW-Reifenlaufflächen, Kautschuk Gummi Kunststoffe 72, 72-78.
2. Scherbakov, M., Gurvich, M.R. (2003) A Method of Wear Characterization Under Cut, Chip and Chunk Conditions. Journal of Elastomers & Plastics. 35, 73-84. doi:10.1177/009524403031097.
3. Breuer, S., Rohrbach-Kerl, A. (2015) Fahrzeugdynamik, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, DOI 10.1007/978-3-658-09475-1_2.
4. The Pneumatic Tire; Edited by A. N. Gent and J. D. Walter. (2005) National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC 20590, DOT Contact DTNH22-02-P-07210.
5. Klüppel, M., Heinrich, G. (2000) Rubber friction on self-affine road tracks, Rubber Chemistry and Technology 73 (4), 578-606.
6. Heinrich, G., Klüppel, M., (2008) Rubber friction, tread deformation and tire traction, Wear 265 (7-8), 1052-106.
7. Persson, B.N.J. (2001) Theory of rubber friction and contact mechanics, The Journal of Chemical Physics 115 (8), 3840-3861.
8. Persson, B.N.J., Albohr, O., Tartaglino, U., Volokitin, AI. Tosatti, E. (2004) On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion, Journal of physics: Condensed matter 17 (1), R1.
9. Persson, B.N.J. (2006), Contact mechanics for randomly rough surfaces, Surface science reports 61 (4), 201-227.
10. Einsle, S. (2010) Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern; Dissertation TU Dresden, https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A25510/attachment/ATT-1/ ; Kapitel 4.
11. Wang, Y. (2017) Charakterisierung der Raddynamikmesstechnik für die Validierung von Fahrdynamikmodellen, Dissertation TU Darmstadt.
12. Schulze, T., Bolz, G., Strübel, Ch., Wies, B. (2010) Reifen im Zielkonflikt zwischen Rollwiderstand und Nassgriff, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 112, 516–523.
13. Persson, B. N. J. (2009) Theory of powdery rubber wear. J. Phys.: Condens. Matter 21. 485001. doi:10.1088/0953-8984/21/48/485001.
14. Stoček, R., Stěnička, M., Zádrapa, P. (2021) Future trends in predicting the complex fracture behaviour of rubber materials. Continuum Mech. Thermodyn. 33, 291–305. doi.org/10.1007/s00161-020-00887-z.
15. Stoček R., Ghosh P., Machů A., Chanda J., Mukhopadhyay R. (2020) Fatigue Crack Growth vs. Chip and Cut Wear of NR and NR/SBR Blend-Based Rubber Compounds. In: Heinrich G., Kipscholl R., Stoček R. (eds) Fatigue Crack Growth in Rubber Materials. Advances in Polymer Science, vol 286. Springer, Cham. doi.org/10.1007/12_2020_67.
16. Robertson, C.G., Mars, W.V., Stoček, R., Kipscholl, R. (2019) Characterizing durability of rubber for tires. Tire technology international, 78-82.
17. Robertson C.G., Stoček R., Mars W.V. (2020) The Fatigue Threshold of Rubber and Its Characterization Using the Cutting Method. In: Heinrich G., Kipscholl R., Stoček R. (eds) Fatigue Crack Growth in Rubber Materials. Advances in Polymer Science, vol 286. Springer, Cham. doi.org/10.1007/12_2020_71.
18. Beatty, J.R. (1979). Testing Apparatus and Method for Measuring Cutting, Chipping and Abrasion Resistance, U.S. Patent 4,144,740.
19. Beatty, J.R. & Miksch, B. (1982) A Laboratory Cutting and Chipping Tester for Evaluation Off-the-road and Heavy-duty Tire Treads, Rubber Chemistry and Technology, 55, 1531-1546. doi.org/10.5254/1.3535947.
20. Nah, C., Jo, B.W., Kaang, S. (1998) Cut and Chip Resistance of NR–BR Blend Compounds, Journal of Applied Polymer Science. 68, 1537–1541. doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19980531)68:9←1537::AID-APP17→3.0.CO;2-W.
21. Ma, J.-H., Wang, Y.-X., Zhang, L.-Q., Wu, Y.-P. (2012) "Improvement of Cutting and Chipping Resistance of Carbon Black-Filled Styrene Butadiene Rubber by Addition of Nanodispersed Clay", Journal of Applied Polymer Science. 125, 3484–3489. doi.org/10.1002/app.36710.
22. Stoček, R., Mars, W. V., Robertson, C. G., Kipscholl, R. (2018) Characterizing rubber's resistance against chip and cut behaviour. RUBBER WORLD. 257, 38-40.
23. Stoček, R., Mars, W. V., Kipscholl, R., Robertson, C. G. (2019) Characterisation of cut and chip behaviour for NR, SBR and BR compounds with an instrumented laboratory device, Plastics, Rubber and Composites. 48, 14-23. doi.org/10.1080/14658011.2018.1468161.
24. Kipscholl, R., Stoček, R. (2019) Quantification of chip and cut behaviour of basic rubber (NR, SBR), RFP Rubber Fibres Plastics. 02, 88-91.
25. Stoček, R., Heinrich, G., Schulze, A., Wunde, M., Klüppel, M., Vatterott, C., Tschimmel, J., Lacayo-Pineda, J., Kipscholl, R. (2020) Chip & Cut Wear of Truck Tire Treads: Comparison between laboratory and real Tire Testing. Kautschuk Gummi Kunststoffe, 73, 6, 51-55.

KONTAKT

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
Fakultät Maschinenwesen / Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
Prof. Dr. rer. nat. habil. Gert Heinrich (Seniorprofessor)
Hohe Straße, D-01069 Dresden
gheinrich@ipfdd.de
www.tu-dresden.de

COESFELD GMBH & CO. KG
Tronjestraße 8, D-44319 Dortmund
Tel.: +49 (0)231 912980-0
mail@coesfeld.com
www.coesfeld.com

NUMERISCHE SIMULATIONEN IN DER KUNSTSTOFFTECHNIK – ALLES ANDERE ALS STANDARD

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers, Marius Janßen, Moritz Rayer, Lucas Schulz,
Universität Duisburg-Essen / Institut für Produkt Engineering / Konstruktion und Kunststoffmaschinen

Die komplexen Zusammenhänge bei der Verarbeitung polymerer Werkstoffe erfordern heutzutage neben Erfahrung den Einsatz moderner Simulationstools zur Auslegung und Optimierung von Prozessen, Werkzeugen und Produkten. Aus diesem Grund wird am Institut für Produkt Engineering (IPE) der Universität Duisburg-Essen an verschiedenen Fragestellungen aus den Bereichen der numerischen Strömungssimulation (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD), sowie der Finiten-Elemente-Methode (FEM) geforscht.

Der Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen am IPE unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers beschäftigt sich in den drei Gruppen Extrusionstechnik, Spritzgießtechnik sowie Bauteilprüfung/Maschinenelemente mit aktuellen Forschungsthemen. Dazu stehen neben der Hard- und Software für Simulationen auch rund 1000 m² Laborfläche zur Verfügung, auf der an Extrusions- und Spritzgießanlagen, sowie Bauteilprüfständen die Ergebnisse der numerischen Simulationen am realen Prozess validiert werden können. Viele Fragestellungen erfordern, aufgrund von zeit-, ressourcen- und kostenintensiven experimentellen Versuchen, den Einsatz von Simulationswerkzeugen. Die Fragestellungen sind ebenso vielfältig wie die eingesetzten Simulationswerkzeuge zahlreich. In diesem Artikel soll anhand von drei Forschungsvorhaben exemplarisch diese Vielfalt für den Bereich der Kunststofftechnik aufgezeigt werden

Abb. 1:
Darstellung eines klassischen Einschneckenextruders mit Fokus auf das Mischelement (hier: Dynamic Mixing Sleeve, DMS), [2]

1

Online-Bildrechte unklar

Im ersten Projekt aus dem Bereich der Extrusionstechnik werden Möglichkeiten zur automatisierten Optimierung von Mischelementen mit einem genetischen Algorithmus untersucht. Das zweite Vorhaben beschäftigt sich mit mehrphasigen Füllsimulationen zur Ermittlung der entstehenden Randschichttopologie beim Spritzgießen. Abschließend wird ein Projekt aus der Bauteilprüfung vorgestellt, in dem eine auf Simulationen basierte Lebensdauerprognose für Elastomer-Faserverbund-Hybridbauteile entwickelt werden soll.

Automatisierte Optimierung von Mischelementen in der Kunststoffverarbeitung

Die Einschneckenextrusion stellt eines der wichtigsten Verfahren zur Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe dar. Dementsprechend ist eine kontinuierliche Optimierung der Verfahrenstechnik, vor dem Hintergrund der Ausschussvermeidung und Qualitätssteigerung, relevant. Vor allem der Bereich der dynamischen Mischelemente bietet hier großes Potential. Dynamische Mischelemente werden immer dann eingesetzt, wenn die stoffliche und thermische Homogenisierung der Schmelze durch die Extruderschnecke nicht ausreichend gegeben ist. Sie werden zumeist am Schneckenende

hinter der Plastifizierungszone eingesetzt und sorgen durch gezielte Manipulation des Strömungsfeldes für die nötigen Scher- und Dehnkräfte und Umlagerungsprozesse (**Abb. 1**). Insbesondere bei der direkten Verarbeitung von Additiven wie bspw. Masterbatches ist eine gleichmäßige Verteilung dieser Stoffe in die Polymermatrix des Basismaterials unerlässlich. Im Vordergrund stehen dabei die optischen und mechanischen Eigenschaften des Endproduktes. Um zu gewährleisten, dass die hohen Ansprüche an die Qualität des Extrudats erfüllt werden, fällt der thermo-rheologischen und anwendungsspezifischen Auslegung und Optimierung von Mischelementen eine entscheidende Bedeutung zu.

Diese Aufgabe erfordert ein hohes Maß an Expertenwissen und kann sowohl durch analytische Berechnungsvorschriften und experimentelle Versuche als auch mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation gelöst werden [1]. Die numerische Strömungssimulation hat sich dabei in den letzten Jahren als das Werkzeug der Wahl etabliert. Der Vorteil liegt unter anderem darin, dass detaillierte Einblicke in die komplexen Strömungsvorgänge innerhalb des Mischelementes gewonnen werden können. Außerdem kann die Analyse und Auswertung von Prozessgrößen erfolgen, welche in experimentellen Versuchen nicht, oder nur unter Einflussnahme auf das Strömungsfeld (z.B. durch Temperatursensoren), möglich sind.

Das Ziel des Projektes am IPE ist es, das Verhalten und die Wirkweise von Mischelementen zu untersuchen und neuartige Methoden zu deren Auslegung und Optimierung zu entwickeln. Die Forschung dazu umfasst neben der Betrachtung bereits etablierter Mischelemente, wie dem Wendelscherelement oder den Block-Head-Mischern, auch neuartige Mischkonzepte mit frei-rotierenden Mischhülsen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird das Verhalten der Kunststoffschmelze möglichst realitätsnah in das numerische Umfeld einer Strömungssimulation eingebettet. Darunter fällt zunächst die grundlegende Integration verschiedener Materialparameter, sowie der Einfluss der Temperatur auf die Schmelze, sowohl durch externe Wärmequellen als auch durch die in Folge von Scherung entstehende Dissipation. Die Simulation der Mischelemente erfolgt anschließend für eine Reihe verschiedener Betriebspunkte, um ein möglichst breites Anwendungsfeld abdecken zu können. Die Auswertung und manuelle Anpassung der CFD-Simulationen stellt dabei kein triviales Unterfangen dar und benötigt ein hohes Maß an Zeit und Know-how. Am IPE wird daher der aktuelle Fokus auf die automatisierte Auslegung und Optimierung von Mischelementen gelegt. Dazu wird die numerische Strömungssimulation mit einem genetischen (evolutionären) Algorithmus gekoppelt, welcher verschiedene geometrische Größen des Mischelementes selbstständig, hinsichtlich einer vorgegebenen Zielfunktion, variiert. Die Zielfunktion besteht dabei aus vorab definierten Qualitätskriterien, die das Strömungsfeld hinsichtlich des Potentials zur Umsetzung von Mischvorgängen bewerten. Betrachtet werden bspw. die Temperaturentwicklung und -verteilung, sowie die lokalen Scherbelastungen. Nach Eingabe einer Ausgangsgeometrie und geometrischen/verfahrenstechnischen Randbedingungen, gibt der Algorithmus nach einer, im Vergleich zur manuellen Auslegung, kurzen Berechnungszeit einen potentiellen Kandidaten für die jeweilige Mischaufgabe aus (**Abb. 2**). Dieser kann im Folgenden für eine detaillierte Betrachtung und Feinjustierung relevanter Bereiche herangezogen werden. Das IPE verspricht sich von der automatisierten Optimierung vor allem eine deutliche Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwandes sowie der Komplexität für den Prozess der Mischelementauslegung.

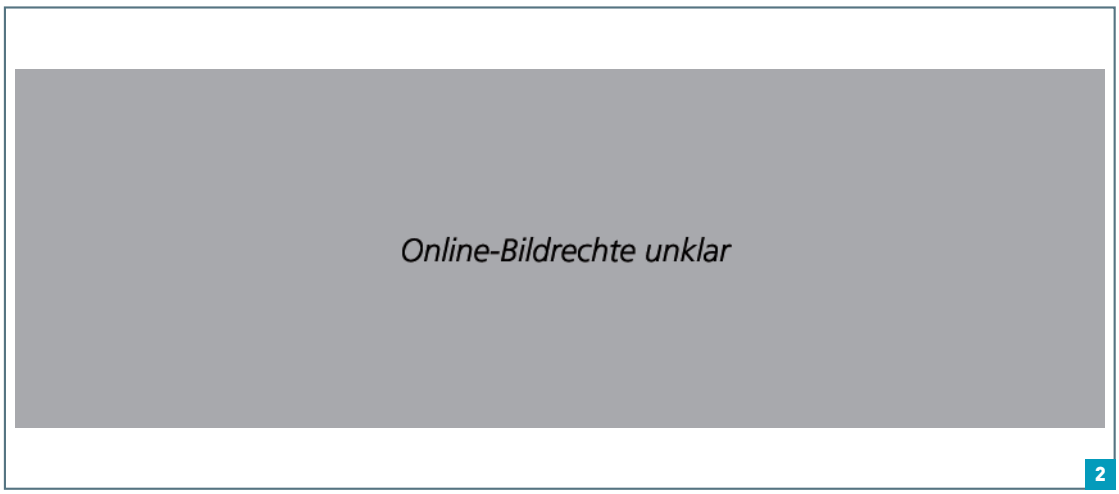


Abb. 2: Schematischer Ablauf einer automatisierten Optimierung

CFD-gestützte Mehrphasensimulation im Spritzguss

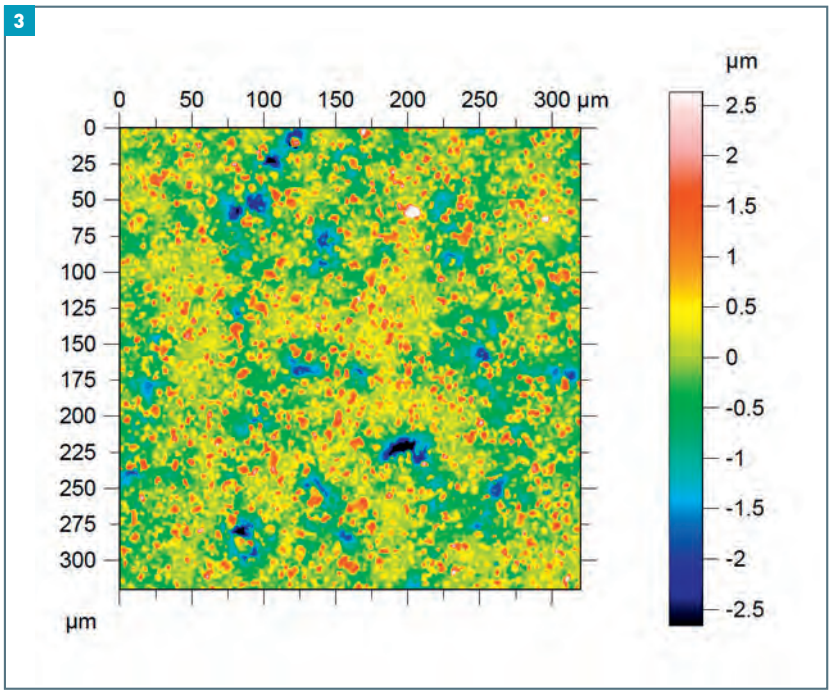
Heutzutage werden eine Vielzahl verchromter Kunststoffbauteile eingesetzt, um Metallbauteile zu substituieren, ohne dabei auf vergleichbare optische und haptische Eigenschaften zu verzichten. Diese Kunststoffbauteile zeichnen sich verglichen mit klassischen Metallbauteilen auch durch ein geringeres Gewicht aus und tragen somit z.B. in der Automobilindustrie zur Reduktion von CO_2-Emissionen bei. Bei den eingesetzten Materialien der spritzgegossenen Grundkörper handelt es sich häufig um Mehrphasensysteme, also um eine Polymermatrix in die eine zweite Phase (z.B. Mineralstoffe) dispergiert ist. Zu den am häufigsten eingesetzten Werkstoffen gehören ABS und PC/ABS. Jedoch sind im PKW für mechanisch beanspruchte Bauteile höhere Festigkeiten erforderlich. Mineralstoffgefülltes Polyamid 6 hat das Potential diese Anforderungen zu erfüllen, da es verglichen mit ABS, eine höhere Steifigkeit, Härte und Wärmeformbeständigkeit aufweist [3]. Jedoch sind bei den hohen Qualitätsansprüchen in der Automobilindustrie im Gegensatz zu ABS höhere Ausschussraten von bis zu 30% zu verzeichnen [4]. Die dominierenden Fehlerbilder sind neben einer mangelhaften Verbundhaftung zwischen der applizierten Metallschicht und dem Grundkörper, auch Blasen- und Rissbildung [4]. Maßgeblich beeinflusst wird die Verbundhaftung durch die Oberflächentopologie, die wiederum abhängig von der Prozessführung beim Spritzgießen ist. Eine Vorhersage kritischer Bauteilbereiche oder Prozesseinstellungen ist auf mikroskopischer Ebene für Mehrphasensysteme mit den kommerziell verfügbaren 3D-Spritzgießsimulationsprogrammen nur eingeschränkt möglich, d.h. man kann diesbezüglich lediglich auf Basis von lokalen Prozessgrößen bewerten. Mit diesen kann die Strömung lediglich vereinfacht über die kombinierten Materialeigenschaften des mehrphasigen Systems berechnet werden, was in abweichenden Ergebnissen zwischen Simulation und Realprozess resultiert. Eine Beurteilung bspw. der Partikelverteilung ist nicht direkt möglich.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 441824520, ist die Entwicklung einer Simulationsmethodik basierend auf kommerziellen Strömungssimulationstools, mit der die Interaktion zwischen den Füllstoffpartikeln und der Polymermatrix in Abhängigkeit der Spritzgießprozessparameter abgebildet werden kann. Hierdurch soll das Verständnis über den Einfluss der Verarbeitung von mehrphasigen Systemen verbessert werden, um damit die Produktqualität zu steigern und die Ausschussproduktion zu minimieren.

Zur Erreichung dieses Zieles werden in einem ersten Schritt die rheologischen und thermodynamischen Materialeigenschaften eines galvanofähigen mineralstoffgefüllten Polyamid 6 ermittelt. Hierbei werden sowohl die Eigenschaften des Mehrphasensystems als auch der Einzelkomponenten bestimmt und in konsistente Materialmodelle überführt. In einem zweiten Schritt werden experimentelle Versuchsreihen unter Variation von Spritzgießprozessparametern durchgeführt. Relevante Prozessparameter für die Galvanikprozesskette sind insbesondere die Einspritzgeschwindigkeit sowie die Werkzeug- und Zylindertemperatur [3]. Die produzierten Versuchsteile werden anschließend der Galvanikprozesskette zugeführt und nach den einzelnen Schritten, wie z.B. dem Beizen, eine Oberflächencharakterisierung durchgeführt. Mittels Konfokal- und Rasterelektronenmikroskopie können Rückschlüsse auf die Füllstoffverteilung und -ausrichtung gezogen werden (**Abb. 3**).

Die Umsetzung der Simulationsmethodik wird in einer kommerziell verfügbaren Strömungssimulationssoftware (hier ANSYS Fluent) erfolgen. Hierzu müssen zunächst die Randbedingungen ermittelt werden. Da der Angriff der Beize innerhalb der Galvanikprozesskette sich auf die Randschicht des Bauteils begrenzt und hierzu eine sehr feine Vernetzung zur Abbildung der Interaktion von Schmelze und Partikeln im Randbereich erforderlich ist, wird

Abb. 3: Aufbereitete konfokalmikroskopische Aufnahme eines gebeizten Bauteils



der Simulationsraum auf einen mikroskopischen Bauteilausschnitt reduziert. Zur Bestimmung der Randbedingungen dieses Simulationsraums wird zunächst eine 3D-Spritzgießsimulation (**Abb. 4**) mit den kombinierten Materialeigenschaften durchgeführt.

Dies erlaubt die Bestimmung zeit- und ortsabhängiger Größen wie z.B. der Fließgeschwindigkeit, der Temperaturverteilung und der Schubspannung. Anschließend wird das so vorliegende Strömungsfeld exportiert. Die Randbedingungen der Simulation setzen sich zum einen aus den instationären Größen der Spritzgießsimulation und zum anderen aus den Ergebnissen der Oberflächencharakterisierung zusammen. Ansys Fluent erlaubt die Integration der Materialeigenschaften der Polymermatrix und des Minerals. Ansätze, mit denen die Bewegung der Partikel nachvollzogen werden können, sind das Discrete-Phase-Model (DPM) und das Dense-Discrete-Phase-Model (DDPM). Darüber hinaus soll im Rahmen des Projektes der Einfluss verschiedener Füllstoffgehälter auf die Partikel-Partikel- und die Partikel-Schmelze-Interaktion untersucht werden. Abschließend gilt es mithilfe der Simulationsmethode, den Einfluss der Spritzgießparameter auf die Ausrichtung und Verteilung der Partikel in ausgewählten Bereichen in der Randschicht zu beurteilen und auf unbekannte Prozesseinstellungen anzuwenden.

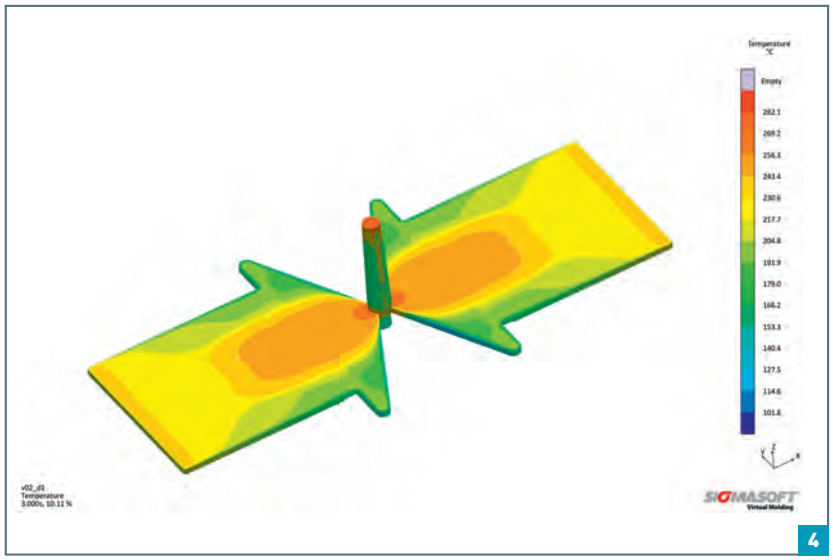


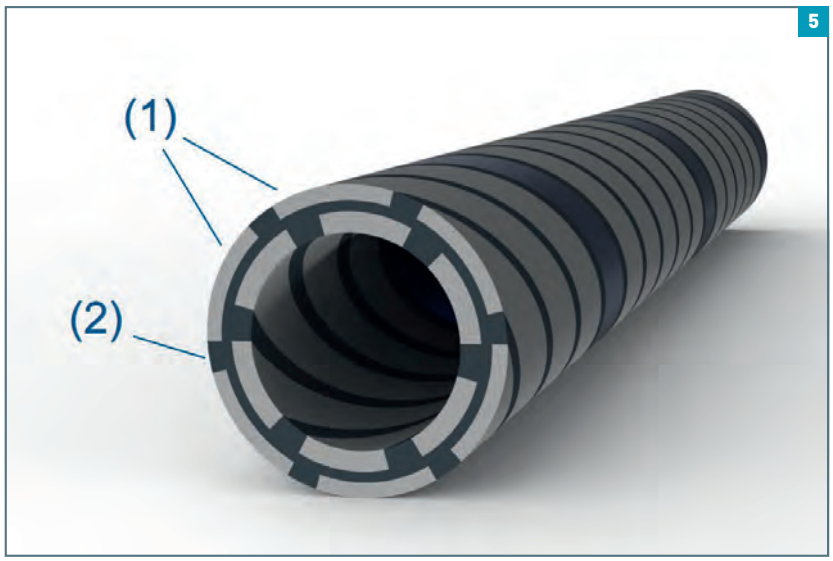
Abb. 4:
3D-Spritzgießsimulation

Lebensdauerprognose für dynamisch beanspruchte Elastomer-Faserverbund-Hybridbauteile

Im Zuge stetig wachsender Anforderungen an Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz spielt die vollständige Ausnutzung von Werkstoffpotentialen eine bedeutende Rolle. In vielen Anwendungsbereichen werden Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) eingesetzt, die aufgrund ihres einzigartigen Verhältnisses zwischen einer geringen Dichte und hohen Steifigkeits- sowie Festigkeitswerten ein enormes Leichtbaupotential bieten. Aufgrund der Anisotropie der mechanischen Eigenschaften werden für mehrachsige Belastungsfälle multidirektionale Laminataufbauten eingesetzt. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Werkstoffplattform Hybride Materialien (HyMat2) geförderten Verbundvorhaben „Elastomerbasierte Dehnungsentkopplung zur Leistungssteigerung von Faserverbundbauteilen“ (ELFAS; FKZ 03XP0418C) wird ein neuartiges Bauteilkonzept untersucht, in welchem spannungsführende FKV-Teilbereiche durch Elastomer-Zwischenbereiche in ihrer Dehnung entkoppelt werden (**Abb. 5**). Potentielle Anwendungsfelder finden sich in flexiblen Antriebswellen und Torsionsfedern für den Nutzfahrzeugbereich. Über die elastomerbasierte Dehnungsentkopplung lassen sich nahezu eindimensionale Spannungszustände in den lasttragenden FKV-Teilbereichen erzielen, wodurch eine äußerst hohe Materialauslastung erreicht wird. Simulationen und Belastungstests zeigten gegenüber Vergleichsbauteilen aus klassischen Laminataufbauten eine deutlich höhere mechanische Energieaufnahmefähigkeit.

Zum aktuellen Entwicklungsstand, der dem Technology Readiness Level (TRL) 4 entspricht, liegen jedoch noch keine Ergebnisse hinsichtlich der Bauteillebensdauer und dem Ermüdungsverhalten der Einzelkomponenten bzw. dem Materialverbund vor. [5]

Abb. 5:
Hybride FKV-Antriebswelle mit lasttragenden FVK-Strängen (1) und Elastomerzwischenbereichen zur Dehnungsentkopplung (2)



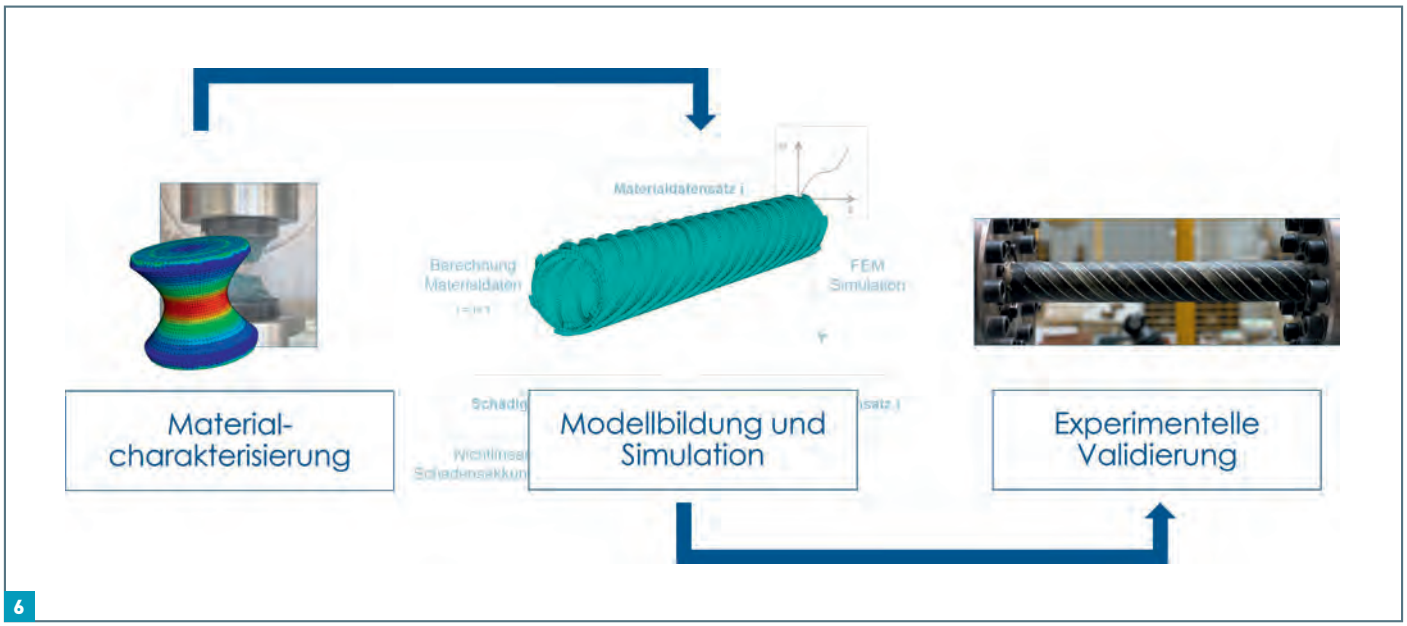


Abb. 6:
Prozess der simulationsgestützten Lebensdauerprognose, von der Materialcharakterisierung über die Modellbildung bis hin zur Verifizierung

Die Zielsetzung des Verbundprojektes ist eine Reifegradsteigerung von Elastomer-Faserverbund-Hybridmaterialien (ELFA). In Kooperation mit den Projektpartnern NEMOS GmbH (Duisburg) und ICM Composites GmbH (Weiterstadt) fokussiert das IPE das Teilziel, das Langzeitverhalten von ELFA in Hinblick auf die anwendungsspezifische Materialbeanspruchung zu untersuchen. Über eine simulationsgestützte Lebensdauerprognose kann die Erprobungsphase im Entwicklungsprozess verkürzt und die Bauteilgeometrie in einer frühen Phase beanspruchungs- und anwendungsgerecht optimiert werden (Design for X). Einen weiteren Schwerpunkt des Projektes bildet die funktionale Bewertung der ausgewählten Materialkombination in anwendungsnahen Prototypenuntersuchungen von flexiblen Antriebswellen und Fahrwerkstorsionsfedern. Das Ziel ist eine sensorgestützte Auswertung des ELFA-spezifischen Steifigkeits- und Schwingungsdämpfungsverhaltens in dafür vorgesehenen Prüfständen. Über eine schädigungsbedingte Degradation von Bauteilkennwerten kann auf den Schädigungsfortschritt im Bauteil geschlossen und das Simulationsmodell validiert werden.

Eine anschließende Detailcharakterisierung der vorausgewählten Werkstoffe auf Prüfkörperebene soll Erkenntnisse über das Steifigkeits-, Dämpfungs- und Schädigungsverhalten liefern. Im Fokus der Untersuchungen stehen Ermüdungs- und Kriecheffekte der Elastomerzwischenschicht. Über die Materialprüfungen sollen schädigungsabhängige Materialmodelle entwickelt werden, welche in die Simulationsumgebung implementiert werden. Mittels der Kopplung von nichtlinearen Schadensakkumulationsmodellen, die am IPE entwickelt wurden, und der Finite-Elemente-Methode (FEM) soll die Materialdegradation auf die Bauteilebene projiziert werden (**Abb. 6**).

Der Algorithmus der Lebensdauerprognose startet mit einer FE-Simulation der Bauteilgeometrie, die zuvor vernetzt wurde und der werkstoffspezifische Materialmodelle und -parameter zugeordnet wurden. Durch die Einleitung der Belastung auf das Bauteil resultiert eine (FE-)elementspezifische Beanspruchungsverteilung im Bauteil. Die schädigungsbedingte Werkstoffdegradation wird dabei über eine Änderung der Paramater des Materialmodells abgebildet. Das Lebensdauerprognosemodell basiert auf quasi-statischen FE-Simulationen, die mit nichtlinearer Schadensakkumulation gekoppelt werden. Für jeden Simulationsschritt wird der Schädigungsfortschritt im Bauteil berechnet und über eine nichtlineare Schadensakkumulation aufsummiert. Dabei erfolgt eine iterative Anpassung der lokalen Materialparameter für jedes Element bei jedem Simulationsschritt, wodurch ein dynamisches System simuliert wird. Die Iterationen werden ausgeführt bis auf globaler Bauteilebene das reale Ausfallkriterium erreicht ist. Die Kalibrierung der Modelle erfolgt über experimentelle Versuchsreihen auf Torsions- und Biegeumlaufprüfständen.

Um den steigenden Anforderungen an eine nachhaltige und ressourceneffiziente Produkt- und Prozessentwicklung gerecht zu werden, ist der Einsatz von Simulationswerkzeugen heutzutage unverzichtbar. Auch wenn sich die Nutzung kommerzieller Softwarelösungen bereits etabliert hat, bieten sich

über die Kopplung von Simulationsmodellen mit neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen große Potentiale. Am IPE werden daher auch in Zukunft in Projekten der Grundlagen- und Anwendungsforschung wegweisende Methoden zur virtuellen Abbildung von Produkten, Zuständen und Prozessen entwickelt.

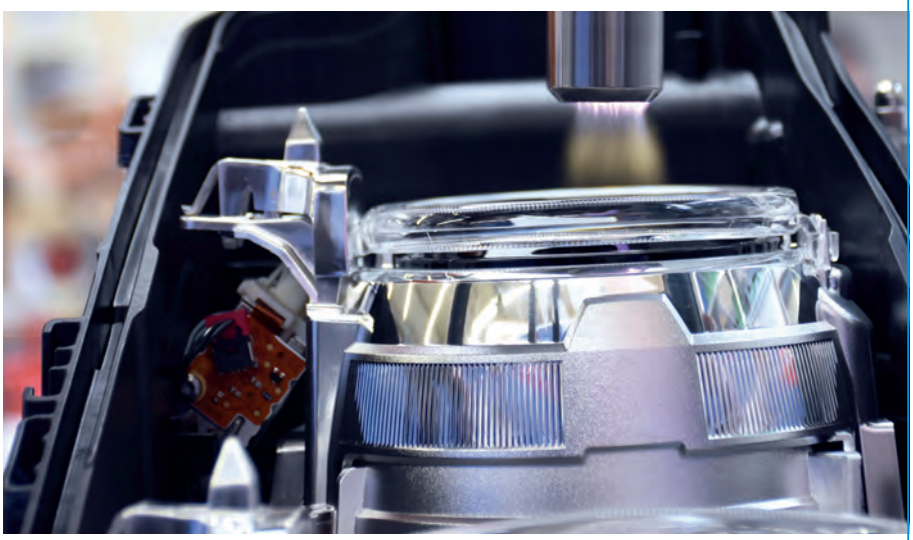
KONTAKT

UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN
Institut für Produkt Engineering
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers
Lotharstraße 1, MA222
D-47057 Duisburg
Tel.: +49 (0)203 379-2500
reinhard.schiffers@uni-due.de
www.uni-due.de/kkm

LITERATUR

1. Rauwendaal, C.; Osswald, T. A.; Gramann, P.; Davis, B.: DESIGN OF DISPERSIVE MIXING DEVICES. In Intern. Polymer Processing, 14. 1, (1999). S. 28–34.
2. Bonten, C.: Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen. Hanser, München, (2016).
3. Suchentrunk, R. et al.: Kunststoff-Metallisierung. 3. Auflage, Leuze Verlag Bad Saulgau, (2007).
4. Lake, M.: Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung: Vorbehandeln, Beschichten, Funktionalisieren und Kennzeichnen von Kunststoffoberflächen. Carl Hanser Verlag München, (2016).
5. Peckolt, J.; Vilsmeier, R.; Pütz, J.; Anordnung zur Übertragung von Torsionsmomenten, insbesondere als Torsionsfeder oder Antriebswelle aus Faserverbundwerkstoffen zur Erzielung einer hohen spezifischen Materialausnutzung (DE 10 2018 114 583 A1), Deutsches Patent- und Markenamt, 2019.

plasmatreat



Premium-Oberflächenbehandlung für verschiedene Klebanforderungen mit Openair-Plasma®

www.plasmatreat.de

HOCHGEFÜLLTE KUNSTSTOFFE: NEUE POTENZIALE DURCH DEN EINSATZ VON FÜLLSTOFFEN ZUR GEZIELTEN EIGENSCHAFTSMODIFIKATION

Autoren: **Prof. D. Drummer, C. Grützmacher, T. Kleffel, L. Lanzl, U. Rösel, B. Roth, K. Schneider, F. Tomiak, L.-M. Wittmann**

Um die Eigenschaften von Kunststoffen gezielt auf die Anforderungen in der Anwendung anzupassen und die Verarbeitungseigenschaften zu modifizieren, kommen Zusatzstoffe wie Füll- und Verstärkungsstoffe sowie Additive zum Einsatz, die unter anderem durch Mischen, Kneten oder Compoundieren eingebracht werden. Hierbei können die Zusatzstoffe hinsichtlich der Einflüsse auf verschiedene Eigenschaften kategorisiert werden [1]. So wirkt sich die Zugabe von beispielsweise Glasfasern oder Wollastonit auf die mechanischen Eigenschaften aus.

Weiterhin werden Füllstoffe wie Graphit gezielt in den Kunststoff eingebracht, um die (di)elektrischen Eigenschaften zu modifizieren [2]. Zudem können auch durch den Einsatz hartmagnetischer Füllstoffe magnetische Eigenschaften realisiert werden [3] und Flammschutzmitteln gezielt das Brandverhalten von Kunststoffen regulieren [1].

Verarbeitung von hochgefüllten Kunststoffen als Kompetenzfeld am LKT

Bei der Kunststoffmodifikation ist im Hinblick auf die gezielte Einstellung von Eigenschaften zu berücksichtigen, dass bei dem erforderlichen Füllstoffgehalt eine Verarbeitung möglich sein muss und die Verarbeitungsbedingungen die resultierenden Eigenschaften maßgeblich beeinflussen. Diese Verarbeitung kann abhängig von der Materialzusammensetzung und dem Prozess unterschiedlich stark limitiert sein. Im Rahmen dieses Beitrags werden aktuelle Trends im Bereich der Kunststoffmodifikation hinsichtlich der mechanischen, flammschützenden, (di)elektrischen und magnetischen Eigenschaften aufgezeigt. Hierbei wird insbesondere die Erschließung neuer Anwendungsgebiete auch durch die Erweiterung der Prozessfähigkeit von hochgefüllten Systemen vorgestellt.

Aktuelle Forschungsfelder

Einsatz hochgefüllter Systeme zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in der additiven Fertigung

Neben der Nutzung gefüllter Kunststoffe in konventionellen Herstellungsverfahren finden diese auch

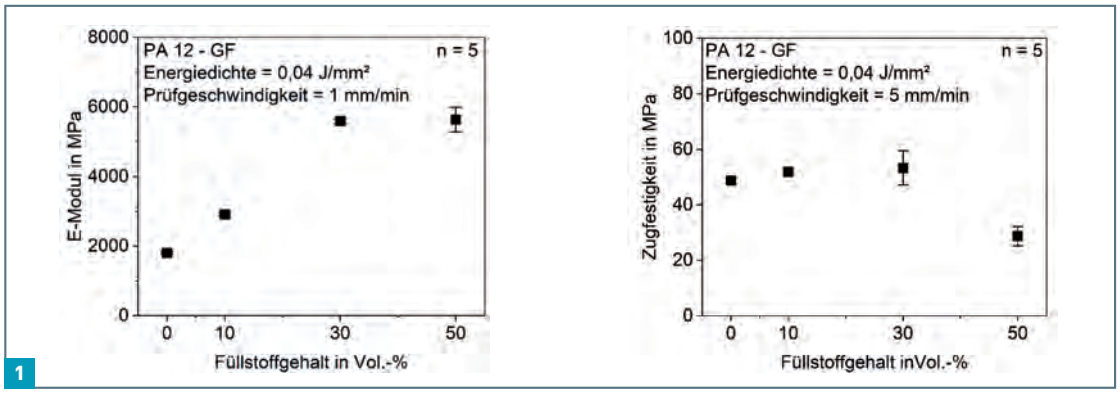


Abb. 1:
E-Modul **(A)** und Zugfestigkeit **(B)** von Zugstäben aus kurzglasfaserverstärkten PA 12 in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts

zunehmend in neuen Fertigungstechnologien, wie der Additiven Fertigung (AF), Einzug. Dies bietet neue Perspektiven für die pulverbasierte und strangablegende AF, um die Materialvielfalt und somit dessen Einsatzpotential zu erweitern.

Besonders im Hinblick auf eine Erhöhung des E-Moduls werden in der pulverbasierten AF beim Lasersintern von Kunststoffen (LS) Glasfüllstoffe eingesetzt. Da es sich beim Lasersintern um ein Schichtbauverfahren mit typischen Schichthöhen von 100 µm handelt, ist die Einbringung von langen Fasern begrenzt. Mittels Trockenmischung werden vorrangig sehr kurze Fasern eingebracht, welche sich während des Pulverauftrags innerhalb einer Schicht liegend ausrichten und in anisotrope Eigenschaften resultieren. Bei der Einbringung von Füllstoffen mit einem hohen Formfaktor, wie es bei Fasern gegeben ist, wird das Material- und Prozessverhalten verändert. So sinkt mit zunehmendem Fasergehalt beispielsweise die Pulverfließfähigkeit. Damit ändern sich die für die Prozessführung zu berücksichtigenden optischen sowie thermischen Eigenschaften im Vergleich zum unverstärkten Kunststoffpulver.

Neue Füllstoffeinbringungsstrategien am LKT können die prozessseitigen Füllstoffeinflüsse reduzieren. Dies wird im Rahmen des Projektes SFB 814 – Additive Fertigung, Teilprojekt A6, Selektives Strahlschmelzen von Mehrphasensystemen (Projektnummer: 61375930, Fördergeber: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)) untersucht. Hierzu zählen partikelgefüllte Kunststoffsysteme, bei welchen die Füllstoffe im Partikel integriert sind und die Verarbeitungseigenschaften auf diese Weise hauptsächlich von den Kunststoffpartikeln als Einheit bestimmt werden. Auch die Faserorientierung erfolgt in diesem Fall zufällig.

Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften kann bei einer Erhöhung des Fasergehalts in Trockenmischungen aus Polyamid 12 (PA 12), Typ: PA 22000 (Firma EOS GmbH; Krailling, Deutschland) und gemahlene Glasfasern, Typ: OK 7904 FM (Firma: WELA Handelsgesellschaft mbH; Geesthacht, Deutschland) das E-Modul bis auf das Dreifache ohne eine Verringerung der Zugfestigkeit entsprechend **Abb. 1 A und B** gesteigert werden. Ein Optimum des Füllstoffgehalts kann bei 30 Vol.-% beobachtet werden. Darüber wird die Fließfähigkeit und somit die Pulverbettdichte stark verringert, was zu einer hohen Bauteilporosität und zu einer Abnahme der Mechanik führt. Zu berücksichtigen sind auch die Faser-Matrix-Anhaftung sowie die kritische Faserlänge unter den spezifischen Prozessgegebenheiten beim Lasersintern.

Bisher können Füllstoffe im LS nur global in das Pulverbett eingebracht werden. Die Einstellung gradierter Bauteileigenschaften durch eine lokale Füllstoffeinbringung sowie eine Langfaserzuführung für eine Faserverstärkung über mehrere Schichten hinweg sind ebenfalls Gegenstand der aktuellen Forschung am LKT.

Neben der Faserverstärkung in der pulverbasierten AF wird auch ein Ansatz für strangablegende Prozesse verfolgt.

Im Rahmen des DFG-Großgeräteantrags (Förderkennzeichen: INST 90/1036 FUGG) wurde eine Doppelroboteranlage (Firma: FILL Gesellschaft M.B.H.; Gurten, Österreich) für die strangablegende AF aufgebaut. Die Basis der Anlage stellen zwei Roboter dar. Dabei ist der erste Roboter für die additive Strangablage zuständig, bei dem als Ausgangsmaterial Granulat eingesetzt wird. Hierdurch wird die Verarbeitung hochgefüllter Kunststoffe zur gezielten Erforschung der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen ermöglicht. Der zweite Roboter ist zum einen in der Lage eine subtraktive Bearbeitung durchzuführen. Zum anderen können Kenndaten unter anderem mittels Infrarot (IR)-Temperaturmessung und geometrischer Messverfahren messtechnisch erfasst sowie Handlingoperationen zur Funktionsintegration durchgeführt werden. Der allgemeine Aufbau der Doppelroboteranlage ist **Abb. 2** zu entnehmen.

Zur Herstellung komplexer Bauteile können mit dieser Anlage zwei verschiedene Ansätze verfolgt

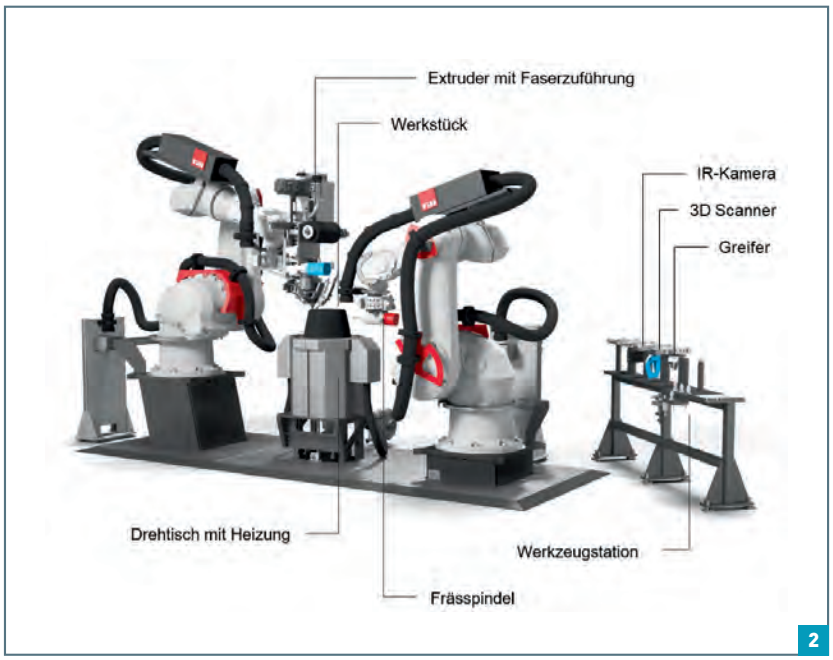
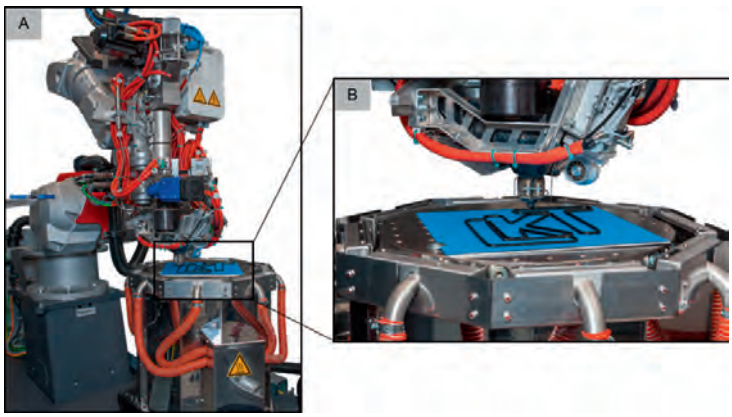


Abb. 2: Doppelroboteranlage mit Benennung der zentralen Komponenten



3

Abb. 3:
Fertigung eines komplexen Bauteils an der Doppelroboteranlage an Roboter 1 in der Übersicht **(A)** und im Detail **(B)**

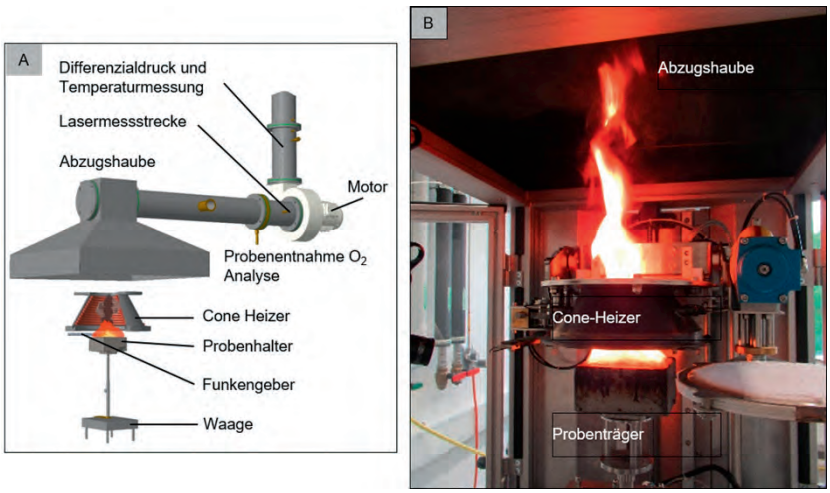
werden. Roboter 1 hat Zugriff auf zwei Extruder, die hochgefüllte Granulate verarbeiten können. Durch die zwei Knickarmroboter mit sechs Achsen und einem zentral positionierten, drehbar gelagerten Drehtisch stehen sieben Achsen für eine dreidimensionale Bauteilherstellung zur Verfügung. Somit ist eine Funktionalisierung in z-Richtung möglich. **Abb. 3 A** zeigt die Fertigung eines komplexen Bauteils mittels der Doppelroboteranlage in der Übersicht an Roboter 1 zusammen mit einer Detailansicht in **Abb. 3 B**.

Darüber hinaus ist auch eine lastpfadoptimierte oder hochfunktionalisierte AF möglich, indem in der Düse des Extruders Endloshalbzeuge, wie Rovings oder Kupferlitzen für Kabel, mit der Kunststoffschmelze benetzt und definiert abgelegt werden. Die Ausrichtung der Füllstoffe, mit und ohne Endloshalbzeug, und die Verbundhaftung der einzelnen Stränge sind Gegenstand aktueller Forschung.

Verbesserung der Flammschutzeigenschaften von Kunststoffen

Polymere Werkstoffsysteme erfordern bei erhöhter Temperaturbelastung oder in der Nähe von Zündquellen in technischen Anwendungen eine werkstoffliche Modifikation der Brandeigenschaften. Polymere verfügen in der Regel über schlechte brandhemmende Eigenschaften und können bei einer Entzündung maßgeblich zu einer raschen Brandentwicklung beitragen. Die Zugabe bestimmter Flammschutzadditive ermöglicht eine individuelle Einstellung der Entzündlichkeit des Werkstoffsystems sowie der selbstverlöschenden Eigenschaften im Brandfall. Dabei müssen Flammschutzadditiv-Systeme speziell auf die jeweiligen Werkstoffsysteme abgestimmt werden, um hohe Brandklassifikationen zu erreichen. Hierdurch werden hohe Füllgrade erreicht, die zu einer Versprödung führen und die Zugabe weiterer strukturell verstärkender Füllstoffe hemmen.

Durch den neuartigen Einsatz von synergistischen Wirkstoff-Kombinationen in sogenannten Multi-Material-Systemen sollen unterschiedliche Mechanismen zur Brandunterdrückung bzw. -ausbreitung bei gleichem oder geringerem Füllgrad kombiniert werden. Eine Erforschung dieser Systeme macht moderne Brandprüfstände mit der Möglichkeit einer umfassenden Gasanalytik erforderlich. Der LKT konnte gemeinsam mit dem Bayerischen Polymerinstitut einen neuartigen Zersetzungsprüfstand über einen DFG-Großgeräteantrag (Förderkennzeichen: INST 90/1039-1 FUGG) beschaffen und in Betrieb nehmen. Die Anlage kombiniert auf einzigartige Weise moderne Brandprüftechnik mit hochsensibler Gasanalytik und ermöglicht so eine multidimensionale



4

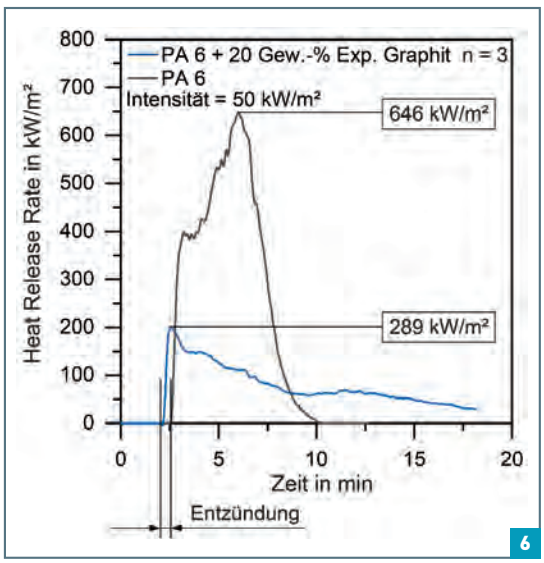
Abb. 4:
Allgemeiner Aufbau des neuartigen Zersetzungsprüfstandes **(A)** und exemplarische Brandprüfung **(B)**

Betrachtung komplexer Brandvorgänge. **Abb. 4 A** zeigt hierbei den allgemeinen Aufbau der Anlage inklusive einer exemplarischen Brandprüfung in **Abb. 4 B**.

Im Rahmen des Projekts HiPeX (Förderkennzeichen: KK5059902TA0; Fördergeber: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)) werden derzeit synergistische Werkstoffkombinationen auf Basis expandierbarer Graphite (EG) und damit Graphite mit interkalierten Treibmitteln untersucht. EG sorgen ab einer kritischen Temperatur für eine starke Expansion und bilden so entsprechend **Abb. 5** eine thermisch stabile Rückstandsschicht auf der Polymeroberfläche. Die Flammschutzwirkung ist mehrdimensional und funktioniert als Temperaturschild, Barriere für den Pyrolysegasfluss und Sauerstoffbarriere.

Versuche am neuen Zersetzungsprüfstand haben gezeigt, dass mit EG modifiziertes Polyamid 6 (PA 6) bemerkenswerte Flammschutzeigenschaften erzielt werden können. Als Messgröße dient hierbei die Heat Release Rate, welche das Brandverhalten des Werkstoffs über den gesamten Verlauf charakterisiert. Durch die starke Expansion der Graphite reduziert sich die Wärmeentwicklung von reinem PA 6 ge-genüber PA 6 + 20 Gew.-% EG entsprechend **Abb. 6**.

EG expandieren ohne werkstoffliche Verbindung untereinander. Dadurch erfolgt eine verhältnismäßig schwache Anbindung der Schutzschicht. Mit Hilfe bestimmter Synergisten werden im Rahmen des Projekts HiPeX werkstoffliche Lösungen gesucht, um die strukturelle Stabilität des Rückstands zu verbessern.



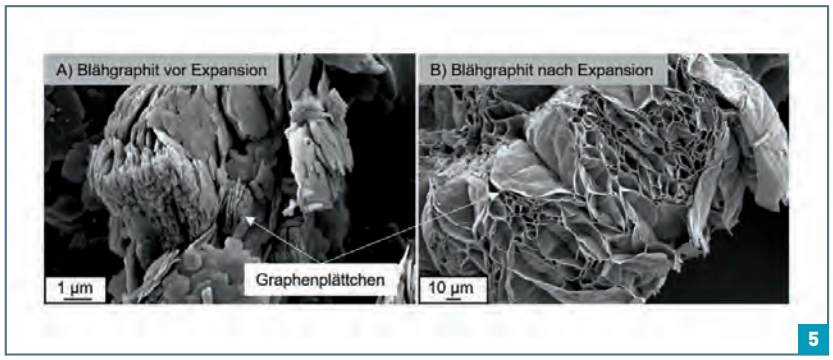


Abb. 5: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen expandierbarer Graphite vor **(A)** und nach der Expansion **(B)**

Elektrifizierung des Antriebsstranges durch gezielte Modifikation der elektrischen Eigenschaften von Kunststoffen

Die Zugabe elektrisch leitfähiger Füllstoffe zu flächigen Halbzeugen in der Extrusion mit anschließendem Thermoformen soll für mechatronische Anwendungen neue Potenziale eröffnen. Hierbei bietet die Mehrschichtfolienextrusion die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffsysteme zu verbinden, Eigenschaften für Verarbeitung und Anwendung gezielt einzustellen und zu kombinieren [4]. Durch den Schichtaufbau können die einzelnen Schichten individuell funktionalisiert werden, wodurch beispielsweise elektrisch leitfähige und isolierende Schichten kombiniert werden können [5].

Zur gezielten Einstellung der elektrischen Leitfähigkeit des Kunststoffs können Füllstoffe wie Kohlenstoff oder Graphit eingesetzt werden [6], wobei die Verwendung unregelmäßiger Füllstoffformen zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit führt [7,8]. Ungefüllte Schichten verbessern das Prozessverhalten hinsichtlich Umformgrad und erhöhen die für die elektrische Leitfähigkeit wichtige Dehnung der leitfähigen Schichten.

Erste Untersuchungen zur Thermoformbarkeit gefüllter mehrschichtiger Foliensysteme mittels Vakuumumformung am LKT zeigen das Potential des Verbundsystems. Während einschichtige Folien bei einem Graphitanteil von 52 Gew.-% nicht thermoformbar sind, ist eine Verarbeitung im Zwei- bzw. Dreischichtverbund möglich. Hierbei hängt die Thermoformeignung von der Lage der funktionalisierten Schicht ab. Befindet sich beispielsweise bei zweischichtigen Folien die gefüllte Seite auf der stempelzugewandten Seite, kann entsprechend **Abb. 7 A** eine hohe Abbildegenauigkeit der Stempelgeometrie erzielt werden. Die ungefüllte Schicht wirkt als stabilisierende und formgebende Komponente. Die Verbesserung der Ausformschärfe durch eine angepasste Vakuumführung bei der Umfor-

Abb. 6: Wärmeentwicklung von reinem PA 6 im Vergleich zu PA 6 mit 20 Gew.-% expandierbaren Graphit

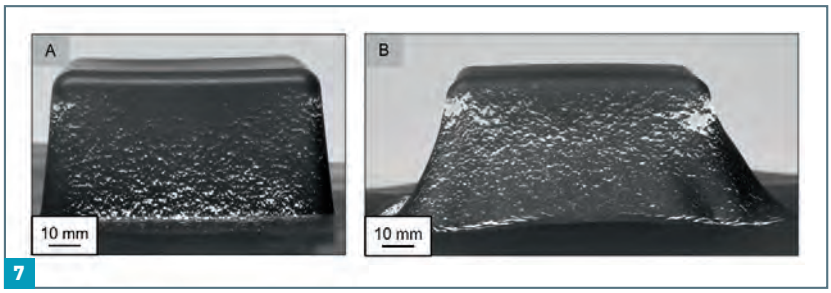


Abb. 7: Thermoformbauteil aus einem zweischichtigen Foliensystem mit einer ge-füllten und ungefüllten Schicht mit gefüllter Schicht auf der stempelzu-ge-wandten Seite **(A)** und auf der stempelabgewandten Seite **(B)**

mung sowie die zu erreichende elektrische Leitfähigkeit im Bauteil nach dem Thermoformen ist Gegenstand derzeitiger Untersuchungen.

Ferner stellt im Zuge der Elektrifizierung des Transportsektors der anhaltende Trend der Miniaturisierung von elektronischen Bauelementen hohe Anforderungen an die verwendeten Werkstoffsysteme und die zugrundeliegenden Fertigungsprozesse.

Thermoplastische Bipolarplatten für Redox-Flow Batterien und Brennstoffzellensysteme können gegenüber metallischen Bipolarplatten die Anforderungen wie eine hohe elektrische Leitfähigkeit, eine ausreichende mechanische Stabilität und eine hohe Korrosionsbeständigkeit erfüllen [9]. Hierfür sind hohe Füllgrade im Bereich ≥ 80 Gew.-% erforderlich [10], wodurch es jedoch zu Abbildungsfehlern und verschlechtertem Formfüllverhalten kommt. Ferner erfordert der Einsatz thermoplastischer Bipolarplatten für Mittel- und Langstreckenkonzepte im Transportwesen eine Reduktion des Gewichtes und des Bauraumes zum Stand der Technik bei gleichbleibender Funktionalität und Lebensdauer. Die Skalierung der Wandstärke ist aufgrund der erhöhten Schmelzeviskosität und den mit hohem Füllstoffgehalt verbundenen verschlechterten mechanischen Eigenschaften bisher kaum möglich. Am LKT wird daher an einem variothermen Spritzprägeprozess geforscht, welcher die präzise Abformung feinster Kanalstrukturen auch bei hohen Schmelzeviskositäten ermöglicht.

In einem ersten Schritt wurden Platten mit den Abmessungen 63,5 x 35 x 0,5 mm³ aus isotaktischem Polypropylen (PP), Typ: PP 505P (Firma: Sabic; Riad, Saudi-Arabien) und einem Compound aus diesem PP und 80 Gew.-% Graphit-Flakes, Typ: GHL 1699,95 (Firma: Georg H. LUH GmbH; Walluf, Deutschland) im konventionel-len Spritzguss (SG Isotherm), variothermen Spritzguss (SG Vario) und variothermen Spritzprägen (SP Vario) hergestellt und hinsichtlich der erreichbaren Aspektverhältnisse und mechanischen Eigenschaften untersucht. Eine vollständige Abformung der Geometrie war mit dem Compo und nur im SP Vario möglich.

Abb. 8 A zeigt das aus den Abmessungen der Platte errechnete Aspektverhältnis des Compounds der verschiedenen Varianten im Vergleich zu erreichten Aspektverhältnissen von Kanalstrukturen aus der Literatur. Mit der Variante SP Vario ist eine deutliche Erhöhung des möglichen Fließweglängen- zu Wanddickenverhältnisses zu sehen, was das Maximum mit dem verwendeten Werkzeug darstellt. Die Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung der unterschiedlich hergestellten Proben aus reinem PP sind in **Abb. 8 B** dargestellt. Es zeigt sich eine Steigerung des E-Moduls mit erhöhter Werkzeugtemperatur. Dies ist sowohl beim SG Vario als auch im SP Vario mit geringem Druck zu sehen. Durch die Erhöhung des Drucks im SP Vario steigt die Bruchdehnung um mehrere Größenordnungen

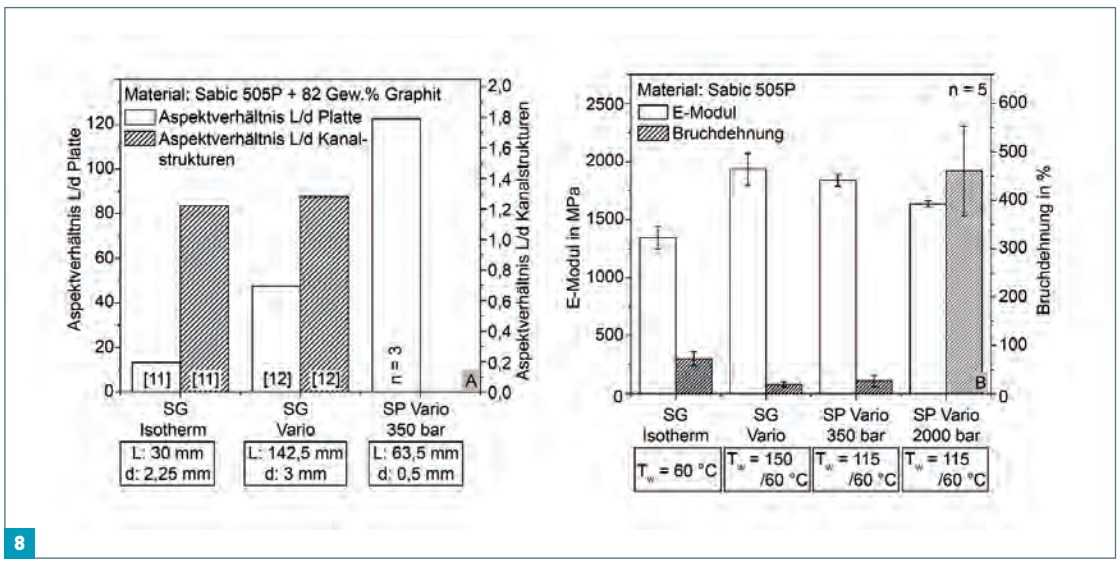


Abb. 8: Mögliche Aspektverhältnisse des Compounds im variothermen Spritzprägen im Vergleich zu Literaturwerten von Kanalstrukturen [11,12] **(A)** und Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des ungefüllten PPs durch die Prozessführung **(B)**; L: Plattenlänge, d: Plattendicke, L/d: Aspektverhältnis, T_W: Werkzeugtemperatur

an, was auf die vor-liegenden Kristallmodifikationen des PPs zurückzuführen ist. Dies verdeutlicht, dass die mechanischen Eigenschaften im SP Vario durch die geeignete Wahl der Verarbeitungsparameter gezielt eingestellt werden können und durch die enorme Bandbreite neue Möglichkeiten schafft.

Prozessadaption und –optimierung durch die Modifikation dielektrischer Eigenschaften von Compounds

Trotz ihrer guten Isolationseigenschaften werden Kunststoffe durch elektrische Felder beeinflusst, da sie auf diese durch Polarisation reagieren [13]. Dieses Verhalten wird beispielsweise in der Anwendung als Dielektrikum eines Kondensators genutzt. Wird das Vakuum zwischen den beiden Kondensatorplatten durch ein Dielektrikum ersetzt, kann bei gleichbleibender angelegter Spannung die Ladungsträgerdichte auf den Elektrodenplatten erhöht werden. Wird anstelle eines konstanten elektrischen Feldes ein Wechselfeld angelegt, findet eine fortlaufende Änderung der Polarisation des Kunststoffs statt, wodurch in Folge innerer Reibung eine Erwärmung erfolgt [14]. Im Verfahren des Hochfrequenzscheißens wird dieser Zusammenhang genutzt, um eine kontaktlose Erwärmung und Verschweißung durch das Anlegen eines hochfrequenten Wechselfeldes zu erreichen [15].

Im 2020 abgeschlossenen Forschungsprojekt MAP – Mold Materials for Advanced Particle Fusion (Förderkennzeichen: 47-6665g/1145/1-NW-1704-0004; Fördergeber: Bayerisches Programm Neue Werkstoffe des StMWI Bayerns) wurde untersucht, ob sich das Verfahren des Hochfrequenzschweißens auf die Herstellung dreidimensi-onaler Schaumstoffbauteile übertragen lässt. Am Beispiel einer Platte ist der schematische Werkzeugaufbau inklusive der Kondensatorplatten aus Aluminium und dem zu verschweißenden Schaumstoffmaterial in **Abb. 9** dargestellt. Das formgebende Werkzeug wird hierbei auf Basis von Kunststoff realisiert. Dies ist für die räumliche Trennung der Kondensatorplatten zur Erzeugung des elektrischen Wechselfeldes zwingend erforderlich, welches sowohl das Werkzeug als auch die zu verschweißenden Materialien durchdringt. Weist das zu verschweißende Material einen ausreichend hohen dielektrischen Verlustfaktor auf, so kann es erwärmt und die Schaumstoffpartikel miteinander verschweißt werden.

Da sich die dielektrischen Eigenschaften eines Materials aus den Ausgangswerten der einzelnen Bestandteile zusammensetzten, ist es möglich, die Permittivität durch das Einbringen von Füllstoffen entsprechend der Anforderungen an die Anwendung zu modifizieren. Durch gezielte Anpassung der Polarisationsfähigkeit der Werkzeugmaterialien ist es daher möglich, die Erwärmung der Schaumstoffpartikel bei gleichbleibender Spannung zu verändern. Der Zusammenhang zwischen Felddichte und Erwärmung kann bei dreidimensional komplexen Geometrien genutzt werden, um eine gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten.

Neue Antriebskonzepte unter Nutzung magnetischer Eigenschaften von Kunststoffen auf Duroplastbasis

Im Zuge der Elektromobilität zeigen aktuelle Bestrebungen einen vermehrten Einsatz Kunststoffgebundener (Ks.-geb.) Dauermagnete im Antriebsmotor durch die Integration in Elektroblechpakete [16]. Zur Realisierung der magnetischen Eigenschaften werden als hartmagnetische Füllstoffe vorwiegend keramische Materialien wie Strontiumferrit (SrFeO) oder Selten-Erd-Werkstoffe wie Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) eingesetzt [17]. Die Vorzugsorientierung bei anisotropen Füllstoffen erfordert die Ausrichtung der Partikel in einem Magnetfeld, sofern diese noch beweglich sind und ein magnetisches Moment besitzen. Hierbei wird die Orientierung der Partikel nicht nur durch das temperaturabhängige Viskositätsverhalten des Compounds und die Füllstoffgeometrie beeinflusst, sondern auch durch eine mögliche Partikel-Partikel-Interaktion und eine potentielle Agglomeratbildung [18].

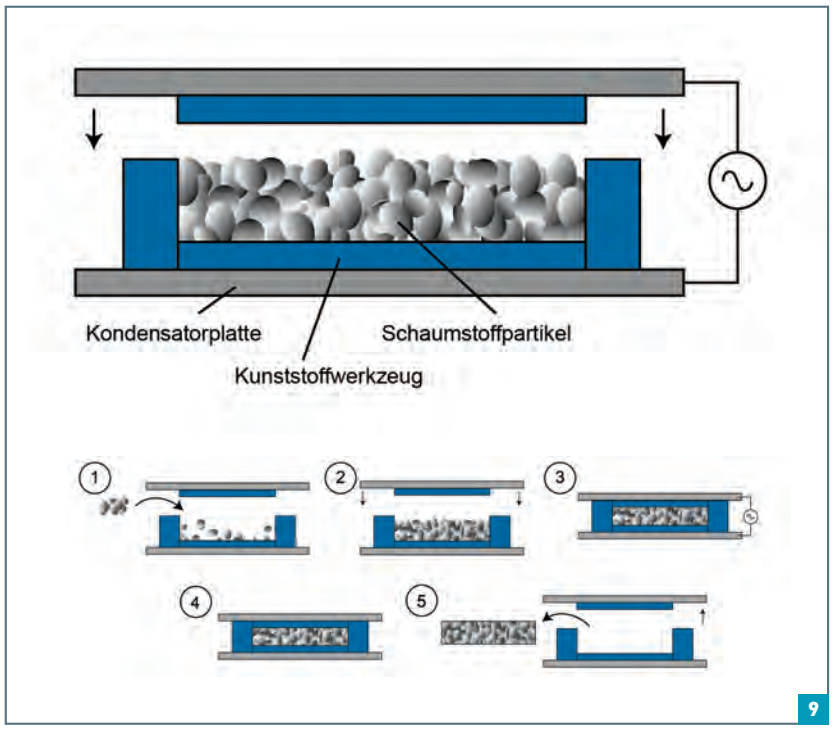


Abb. 9: Schematischer Werkzeugaufbau für die Herstellung dreidimensionaler Schaumstoffbauteile im Hochfrequenzschweißverfahren

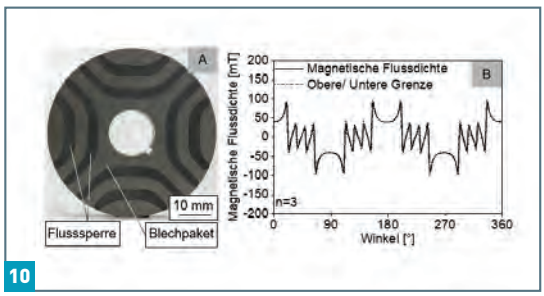


Abb. 10: Aufbau eines Rotors auf Thermoplastbasis **(A)** und charakteristischer Verlauf der Flussdichte am Rotorumfang **(B)**

Im Rahmen des Projektes HYDRESS – Entwicklung neuer Konzepte für hydrome-chatronische Aggregate zur signifikanten Erhöhung der Ressourceneffizienz (Förderkennzeichen: FKZ 03VNE2052D; Fördergeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)) konnten für Elektromotoren Rotoren auf Thermoplastbasis erfolgreich realisiert werden. Hierbei wurden Ks.-geb. Dauermagneten in Form von Flusssperren im Spritzguss in Blechpakete – wie in 10 A – eingebracht und ein – entsprechend 10 B – charakteristischer Verlauf der Flussdichte am Rotorumfang realisiert. Ks.-geb. Dauermagnete auf Thermoplastbasis weisen allerdings eine beschränkte Einsatzfähigkeit im Hinblick auf ihre Temperatur- und Medienbeständigkeit auf. Durch den Einsatz von Duroplasten ist eine Erweiterung der Einsatzfähigkeit von Ks.-geb. Dauermagneten möglich, da durch bessere Medienbeständigkeit sowie einem besseren Kriech- und Setzverhalten gegenüber Thermoplasten Anwendung im Bereich von Pumpen und hochgenauen Sensorsystemen möglich sind [1]. Ein hohes Potenzial wird der Verwendung von keramischen Füllstoffen durch die Möglichkeit zur Substitution von Seltenen Erden zugesprochen. Zudem erreichen Duroplasten im Gegensatz zu Thermoplasten die niedrigste Viskosität innerhalb der Werkzeugkavität [19], wodurch eine bessere sowie über den Querschnitt homogenere Orientierung der hartmagnetischen Füllstoffe vorliegen sollte.

Durch Untersuchungen am LKT konnten bislang bereits eine Reihe von Einflussfaktoren auf das Fließ- und Härtungsverhalten von hochgefüllten hartmagnetischen Compounds auf Duroplastbasis ermittelt

LITERATUR

1. E. Baur, S. Brinkmann, T. Osswald, N. Rudoplh, E. Schmachtenberg, Saechtling Kunststoff Taschenbuch, thirty-first ed., Carl Hanser Verlag, München, 2013.
2. G.W. Ehrenstein, Polymer-Werkstoffe, second ed., Hanser, München, 1999.
3. D. Drummer, Verarbeitung und Eigenschaften Kunststoffgebundener Dauermagnete. Dissertation, Erlangen, 2004.
4. G.-W. Lee, M. Park, J. Kim, Enhanced thermal conductivity of polymer composites filled with hybrid filler, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2006) 727–734.
5. H.S. Göktürk, T.J. Fiske, D.M. Kalyon, Effects of particle shape and size distributions on the electrical and magnetic properties of nickel/polyethylene composites, Journal of Applied Polymer Science 50 (1993) 1891–1901.
6. A. Kloziński, P. Jakubowska, The evaluation of extensional viscosity of highly filled polyolefins composites films with calcium carbonate, Polymer Engineering & Science 59 (2019) E155-E163.
7. M.M. Rueda, M.-C. Auscher, R. Fulchiron, Rheology and applications of highly filled polymers. A review of current understanding, Progress in Polymer Science 66 (2017) 22.
8. D.B. Genovese, Shear rheology of hard-sphere, dispersed, and aggregated suspensions, and filler-matrix composites, Advances in Colloid and Interface Science 171-172 (2012) 1–16.
9. Y. Song, Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy 45 (2020) 29832–29847.
10. T. Yang, P. Shi, Study on the mesocarbon microbeads/polyphenylene sulfide composite bipolar plates applied for proton exchange membrane fuel cells, Journal of power sources 1 (2008) 390–396.
11. P. Beckhaus, Verfahrensentwicklung eines variothermen Spritzgießprozesses zur Herstellung großdimensionierter Bipolarplattenfür den Einsatz in reformatgespeistenHochtemperatur PEM-Brennstoffzellen. in IGF-Vorhaben 455 ZN der Forschungsvereinigung Institut für Energie-und Umwelttechnik e. V. (IUTA). Zentrum für Brennstoffzellentechnik. (2015).
12. D. Serban, G. Lamanna, C.G. Opran, Mixing, Conveying and Injection Molding Hybrid System for Conductive Polymer Composites, Procedia CIRP 81 (2019) 677–682.
13. E. Ibers-Tiffée, W. Münch, Werkstoffe der Elektrotechnik: Mit 40 Tabellen, tenth ed., Teubner, Wiesbaden.
14. G. Abele, Kunststoff-Fügeverfahren, Hanser, München, 1977.
15. I. Jones, Ultrasonic and dielectric welding of textiles. In: Joining Textilies, S. 374-397, Elsevier.
16. M. Buchert, A. Manhart, J. Suttler, Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg, Öko-Institut eV (2014).
17. F. Brandstetter, Kunststoffe – ein reifes Arbeitsgebiet?, Kunststoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung 8 (2004) 20–23.
18. O.D. Oniku, Arnold, D.P., High-Energy-Density Permanent Micromagnets Formed from Heterogeneous Magnetic Powder Mixtures, 25th International Conference on Micro Electro Machanical Systems (MEMS).IEEE (2012).
19. W. Woebcken, Duroplaste, in: G.W. Becker, D. Braun (Eds.), Kunststoff Hand-buch, second ed., Hanser, München, 1988.
20. S.P. Yushanov, A.I. Isayev, V.Y. Levin, Perolation simulation of the network deg-radation during ultrasonic devulcanization, Journal of polymer science Part B: Polymer Physics 34 (1996) 2409–2418.

werden. Insbesondere die Integration der hartmagnetischen Füllstoffe in die Netzwerkstruktur des Harzsystems ist hierbei entscheidend. Durch den Einsatz von SrFeO kann der Anteil an ungehärteten Harz gegenüber NdFeB durch eine gute Matrixanbindung entsprechend der Theorie zur Netzwerkstruktur nach [20] bei hoher Wärmekapazität und niedriger Wärmeleitfähigkeit reduziert werden. Untersuchungen an einer Plattengeometrie mit den Abmessungen 60 x 60 x 3 mm³ zeigen exemplarisch an einem Füllstoffgehalt von 50 Vol.-%, dass durch den Einsatz von NdFeB 75 % des theoretisch maximalen Potentials der magnetischen Eigenschaften von reinen Füllstoffen ausgenutzt werden können, während es beim Einsatz von SrFeO auf Grund der unterschiedlichen Integration der Füllstoffe in das Netzwerk 80% sind.

Das allgemeine Verständnis zu den füllstoffabhängigen Fließ- und Härtungsverhalten sowie der sich ausbildenden Netzwerkstruktur von Ks.-geb. Dauermagneten auf Duroplastbasis bildet die Grundlage für die gezielte Entwicklung hartmagnetischer Compounds. Dies ist weiterhin die Voraussetzung für die Realisierung von komplexen Geometrien auf Basis von Ks.-geb. Dauermagneten vor allem in neuen Motorkonzepten.

KONTAKT

FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
LEHRSTUHL FÜR KUNSTSTOFFTECHNIK
Am Weichselgarten 9, 91058 Erlangen
Tel.: +49 (0)9131/85-29720
Fax: +49 (0)9131/85-29709
uta.ur.roesel@fau.de
www.lkt.tf.fau.de

DER LEHRSTUHL FÜR POLYMERWERKSTOFFE – POLYMERPHYSIK TRIFFT ANWENDUNGSNAHE PROZESSIERUNG

Autor: **Dirk W. Schubert,** **Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg / Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe**

Um die Eigenschaften von Kunststoffen gezielt auf die Anforderungen in der Anwendung anzupassen und die Verarbeitungseigenschaften zu modifizieren, kommen Zusatzstoffe wie Füll- und Verstärkungsstoffe sowie Additive zum Einsatz, die unter anderem durch Mischen, Kneten oder Compoundieren eingebracht werden. Hierbei können die Zusatzstoffe hinsichtlich der Einflüsse auf verschiedene Eigenschaften kategorisiert werden [1]. So wirkt sich die Zugabe von beispielsweise Glasfasern oder Wollastonit auf die mechanischen Eigenschaften aus.

Rheologisches Verhalten und molekularer Aufbau

Neben dem Molekulargewicht und seiner Verteilung spielt die Architektur der Moleküle (Lang- und Kurzkettenverzweigungen; Branch-on-Branch Architektur) sowie deren Polydispersität eine entscheidende Rolle für das Verarbeitungsverhalten und die Anwendungseigenschaften. Langkettenverzweigungen sind dabei von besonderer Bedeutung für Fertigungsprozesse mit (dominanten) Dehnungsanteilen der Deformation. Als solche wären das Faserspinnen sowie die Drahtummantelung mit einer überwiegend uniaxialen Deformation zu nennen. Daneben gibt es auch eine Reihe von Verarbeitungsverfahren mit biaxialer Dehndeformation wie etwa das Folienblasen, der Schäumprozess oder das Blasformen. Aus vielen Untersuchungen, zu denen auch der LSP beigetragen hat, ist klar, dass gerade Langkettenverzweigungen in solchen Prozessen zu einer Selbstheilung von unvermeidbaren Schwankungen der Produktdicke und damit zu einem homogeneren Produkt beitragen. Daher kommt der umfassenden Charakterisierung des molekularen Aufbaus im Zusammenhang mit der Bestimmung des rheologischen Verhaltens der Schmelze in Scherung und Dehnung eine wichtige Aufgabe bei der Optimierung von Materialien und Fertigungsverfahren zu.

Ein Beispiel soll nachfolgend kurz diskutiert werden. Polyethylenterephtalat ist als Polykondensat aus linearen Molekülen aufgebaut. Es kann durch reaktive Extrusion unter dem Einsatz von Chain Extendern modifiziert werden, um beim Recycling den Abbau zu kompensieren oder um über multifunktionale Chain Extender Langkettenverzweigungen zu erzeugen und damit die bereits beschriebe-

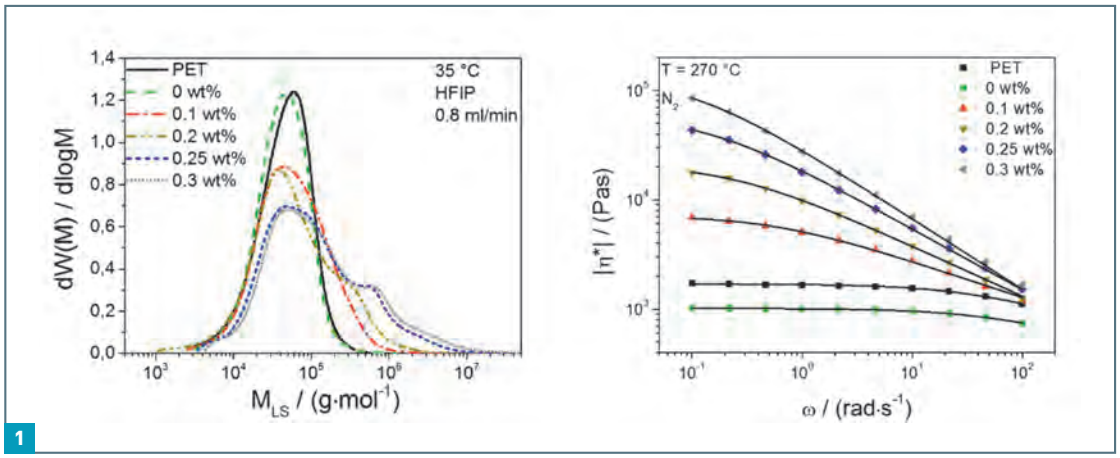


Abb. 1: Molmassenverteilung von reaktiv extrudiertem PET für verschiedene Konzentrationen an Chain Extendern [1] **(links)** und Veränderung der komplexen Viskosität bei Zugabe von Chain Extendern **(rechts)**

nen positiven Einflüsse auf das rheologische und das Verarbeitungsverhalten zu erhalten. **Abb. 1** (links) zeigt die Veränderung der absoluten Molmasse mit der Konzentration an multifunktionalem Chain Extender, der durch Verknüpfung mehrerer Moleküle eine hochmolekulare Komponente erzeugt

Den Einfluss der geänderten Molmassenverteilung zeigt ebenfalls **Abb. 1** (rechts) für die Scherviskosität. Bedingt durch die höhere Molmasse steigt die Scherviskosität mit der Konzentration an Chain Extendern an, gleichzeitig ergibt sich auch eine ausgeprägtere Strukturviskosität. Letztere kann mit einer Verbreiterung der Molmassenverteilung und/oder der Erzeugung von Langkettenverzweigungen erklärt werden.

Der LSP hat langjährige Erfahrung mit der Charakterisierung von verzweigten Strukturen mittels gekoppelter chromatographischer Methoden (GPC-MALLS; GPC-LS-Visco) sowie deren Auswirkung auf das rheologische Verhalten und die Performance bei der Verarbeitung. Diese umfasst neben den der Polyestern (PET und CoPET) und Biopolyester (PLA), vor allem die Polyolefine (LDPE, Metallocen LLDPE, ZN-LLDPE, HDPE und UHMWPE; PP und LCB-PP), sowie lineare und verzweigte Fluorthermoplaste. Details sind der unten aufgeführten Literatur zu entnehmen [2-6].

Faser- und Vliesstoffherstellung

Im Spinnvliesprozess hergestellte Vliesstoffe (Nonwovens) bilden die Grundlage für Hygieneprodukte wie Windeln, Reinigungs- und Mikrofasertücher und können in Filtermedien wie FFP2-Masken oder als Geotextilien eingesetzt werden. Um diese Vliesstoffe wirtschaftlich produzieren zu können, arbeiten übliche Spinnvliesanlagen mit Durchsätzen von mehreren Tonnen Kunststoff am Tag. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurde am Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe eine Spinnvliesanlage in Eigenregie entworfen und umgesetzt, mit der unter industrienahen Prozessbedingungen Vliesstoffmuster und Einzelfasern mit einem Materialeinsatz von unter 500 g/h hergestellt werden können. Dazu wird der Kunststoff über einen Extruder aufgeschmolzen, durch feine Düsen (300–600 µm) extrudiert und anschließend über einen Luftstrom verstreckt (**Abb. 2**). Durch die am Lehrstuhl vorhandenen Compoundieranlagen können zusätzlich Additivmasterbatches im Gramm- und Kilogrammmaßstab hergestellt und anschließend im Prozess auf Spinnbarkeit bewertet werden. Je nach späterem Einsatzzweck können die hergestellten Vliesstoffe oder auch Einzelfasern durch genormte oder eigens entwickelte Testverfahren [7; Auszeichnungen bei „Polychar 23“ in Lincoln, USA sowie bei „9th Aachen-Dresden International Textile Conference“ in Aachen] in Bezug auf mechanische Eigenschaften [Auszeichnung bei „14th Bayreuth Polymer Symposium“ in Bayreuth], Benetzungs-, Abrieb- oder aber Migrationsverhalten beurteilt werden.

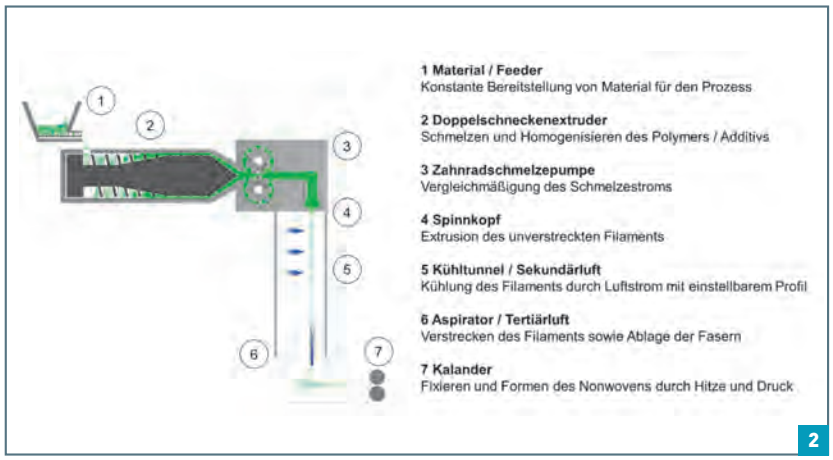
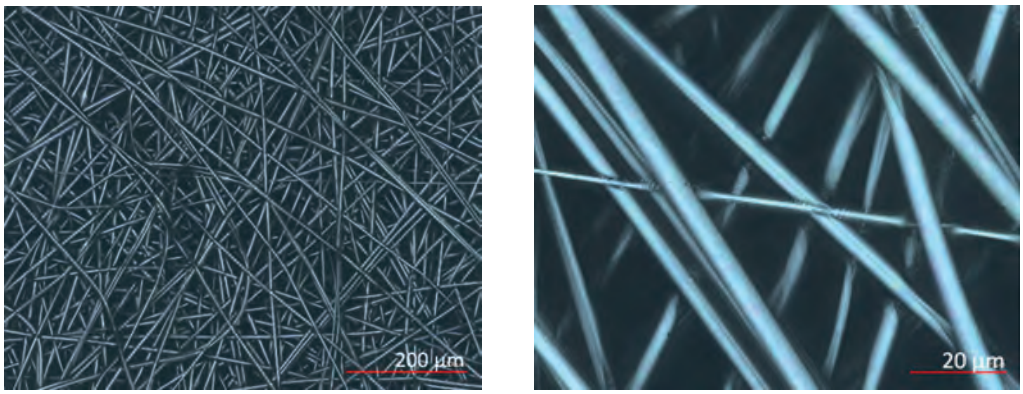


Abb. 2: Prinzipskizze der Laborspinnvliesanlage mit Beschreibung der wichtigsten Prozessgruppen

Aufbauend auf den erzielten Forschungsergebnissen an genannter Spinnvliesanlage, konnte der Lehrstuhl, gefördert von der deutschen Fördergesellschaft, eine weitere, einzigartige Anlage etablieren. Diese umfasst eine Kombination aus einer konventionellen Schmelzspinn- und einer Meltblown-Anlage. Letzter Anlagentyp ist vor allem seit Beginn der COVID-19-Pandemie in den Fokus der Wissenschaft gerückt, da mit ihr feinere Fasern erzeugt werden können. Die Meltblown-Anlage bedient sich hierbei heißer Verstreckluft, um Faserdurchmesser von wenigen Mikrometern (1–5 µm) zu erzielen. Diese geringen Durchmesser sind technisch vor allem für die Anwendung in der Filtration, z.B. als Maskenvlies, relevant. Durch die Produktion von ebendiesen Vliesstoffen und die anschließende Weiterverarbeitung (über einen eigens entworfenen Prozess) zu Atemschutzmasken, konnte der Lehrstuhl unter anderem dem Universitätsklinikum Erlangen zu Beginn der Pandemie über den damaligen Maskenmangel hinweghelfen. Für zukünftige Forschungsprojekte stehen zusätzlich zu Filtrations- auch weiterhin Hygieneanwendungen im Fokus des Lehrstuhls. Neben Optimierungsansätzen zur Leistungsverbesserung ist auch die Erhöhung der Nachhaltigkeit ein wichtiger Forschungsschwerpunkt. Durch die Forschung an Vliesstoffen aus Biopolymeren wie Polylactid (**Abb. 3**) leistet der Lehrstuhl seinen Beitrag für die aus ökologischer Sicht notwendige Integration von nachhaltigen Lösungen in den von petrochemischen Polymeren dominierenden Kunststoffmarkt.



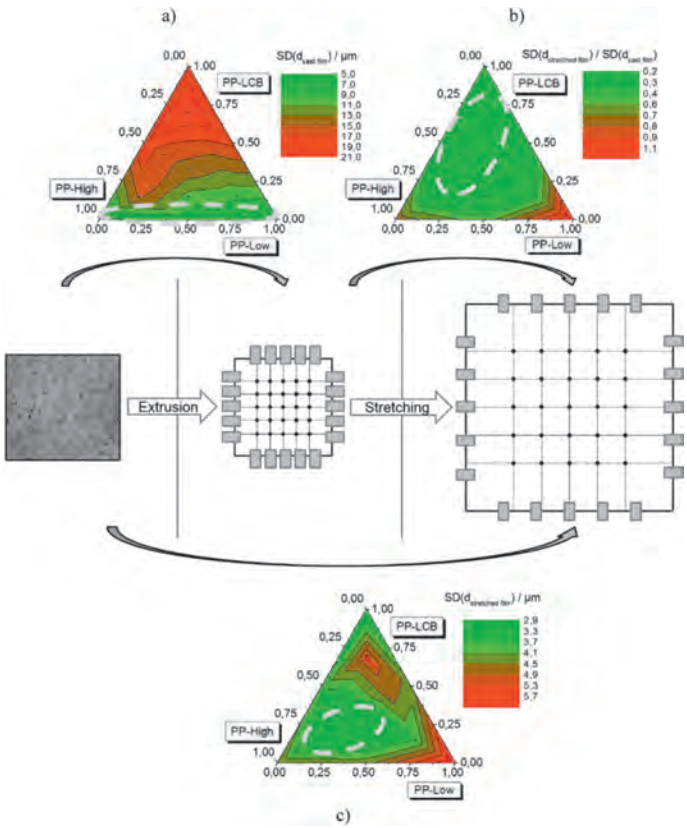
3

Abb. 3: Meltblown-Vliesstoff aus Polylactid (PLA) mit einem mittleren Faserdurchmesser von 5 µm

Folienherstellung und -charakterisierung

Konventionelle Folien können entweder im Blasverfahren, bei dem die Verstreckung mittels eingeblasener Luft erreicht wird, oder über eine Folienreckanlage, bei der die extrudierte Folie anschließend mechanisch biaxial verstreckt wird, hergestellt werden. Beide Prozesse können am LSP im Labormaßstab über eine Folienblasanlage, beziehungsweise über die Extrusion von Castfolien und einen biaxialen Streckrahmen unter industrienahen Prozessbedingungen nachgestellt werden. Während der letzten Jahre konnte hier beispielsweise gezeigt werden, wie geringe Anteile an Langkettenverzweigungen zu einem Selbstheilungsprozess beim Verstrecken von Polypropylenfolien führen (**Abb. 4**) [8-10].

Abb. 4: Studie über die Prozessierbarkeit von Folien aus Polypropylenen mit unterschiedlicher molekularer Architektur. In den Graphen ist die Standardabweichung der Foliendicke aufgetragen. Es zeigen sich Sweet Spots (besonders homogene Foliendicke) durch Zumischung von geringen Anteilen an langkettenverzweigtem Polypropylen.



4

Basierend auf der Erfahrung in der Folientechnik werden am LSP neuartige Nanocomposite und Polymerblends für Folienkondensatoren erforscht, welche die Leistungsdichte erhöhen sollen, um die Kosten für AC/DC-Konverterstationen für Off-Shore Windparks zu senken. Für einen Folienkondensator wird häufig eine Polymerfolie aus Polypropylen, Polyethylenterephthalat oder Polyimid als Dielektrikum verwendet, zur Kontaktierung metallisiert und aufgewickelt. Für die Auslegung des so gebildeten Kondensators sind dabei unter anderem die Spannungsfestigkeit der Folie, deren Permittivität und die dielektrischen Verluste entscheidend.

Eine Vielzahl von Studien hat bereits gezeigt, dass sich Nanopartikel positiv auf Spannungsfestigkeit und dielektrische Verluste auswirken können, sofern sie fein genug und homogen verteilt sind. Jedoch ist durch die hohe Oberflächenenergie feinstteiliger Partikel eine Zerteilung der Agglomerate und eine homogene Verteilung der Aggregate in einer produktionsnahen Größenordnung bisher kaum erreicht worden. Ebenfalls haben olefin- oder fluorpolymerbasierte Blendsysteme in sehr kleinem Maßstab gezeigt, dass extrem hohe Energiedichten möglich sind. Jedoch fehlt meist der Transfer auf die etablierten und wirtschaftlichen Produktionsanlagen.

Für die Verarbeitung zum Castfilm steht für den Doppelschneckenextruder eine Breitschlitzdüse mit Chillroll, sowie zum biaxialen Verstreckten zur Folie ein Karo IV Streckrahmen zur Verfügung. Über die letzten Jahre wurden zudem Kompetenzen zur Charakterisierung der Durchschlagfestigkeit, Rauheit, mechanischen Eigenschaften, Folienschrumpf

und der Folienmorphologie aufgebaut, welche in der nächsten Zeit auch auf die Prüfung fertiger Kondensatoren erweitert wird. Der LSP besitzt somit umfangreiche Möglichkeiten, um die für die Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbaren Energien nötigen Innovationen in die Anwendung zu übertragen, um so dem gesellschaftlichen Gesamtziel der CO_2-Neutralität näher zu kommen.

Elektrisch Leitfähige Polymerkomposite

Die elektrische Leitfähigkeit von Polymeren lässt sich durch die Einarbeitung von leitfähigen Füllstoffen signifikant verbessern. Derartige leitfähige Polymerkomposite kommen u.a. für antistatische Verpackungsmaterialien und für die elektromagnetische Abschirmung von elektronischen Komponenten zum Einsatz. Darüber hinaus besteht ein hohes wissenschaftliches und wirtschaftliches Interesse in der Entwicklung innovativer Sensoren beispielsweise für den Einsatz intelligenter Textilen. Entscheidend für die elektrischen Eigenschaften dieser Materialen ist dabei die Ausbildung von leitfähigen Füllstoffstrukturen in der Polymermatrix. Diese leitfähigen „Pfade“ werden dabei neben der Füllstoffkonzentration und dem Füllstofftyp maßgeblich durch den Herstellungsprozess beeinflusst, welcher in den meisten Fällen über die Schmelze erfolgt.

Die Herausforderung dieses Forschungsthemas liegt darin begründet die physikalischen Zusammenhänge der Strukturentwicklung von leitfähigen Füllstoffen in Polymerschmelzen unter dem Einfluss von Scher- und Dehnströmungen grundlegend zu verstehen. Gekoppelte elektrische und rheologische Messungen bieten dafür ein sehr sensitives Werkzeug um Veränderungen der leitfähigen Strukturen unter aufgebrachter Deformation zu untersuchen. Der Fokus liegt dabei neben den unterschiedlichen experimentellen Beanspruchungsarten und Versuchsmoden ebenfalls auf der gezielten Variation von Polymer- und Füllstoffeigenschaften. Darüber hinaus geben uns die rheologischen Experimente Informationen über das Fließ- und damit das Verarbeitungsverhalten von gefüllten Polymerschmelzen. Details sind den Veröffentlichungen im Literaturüberblick [11-13] zu entnehmen.

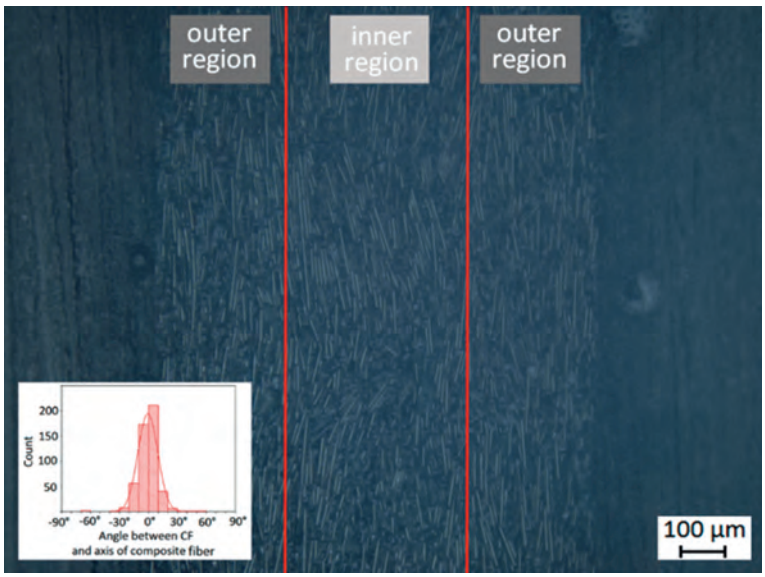
Weitere Untersuchungen am Institut beschäftigen sich mit der Leitfähigkeit von Mischungen aus Kurzkarbonfasern (short carbon fibers – SCF) und PMMA, welche anschließend zu Fasern versponnen werden (Faser in Faser Strukturen). Durch die Variation von Fasergeometrie und –Konzentration sowie der Anpassung der Prozessparameter kann hierbei über die Orientierung der Fasern (**Abb. 5**) die Perkolationsschwelle exakt eingestellt werden. Diese Untersuchungen erlauben ein fundamentales Verständnis der Strukturbildung bei Prozessen wie der Extrusion, dem Schmelzspinnen, dem Spritzgießprozess oder aber dem 3D Drucken [14]. Um Produkteigenschaften nach dem Prozessieren vorhersagen zu können, wird zusätzlich das elektrische Verhalten von Kohlenstoff-gefüllten Kompositen simuliert [15]. Im Fokus stehen hierbei Kompositfilme, welche mit Kohlenstofffasern, die ein ultrahohes Aspektverhältnis aufweisen, gefüllt sind [16]. Zudem wird dieser Forschungsansatz auch auf ternäre leitfähige Systeme, welche mit zwei verschiedenen Füllstofftypen verarbeitet werden, erweitert [17].

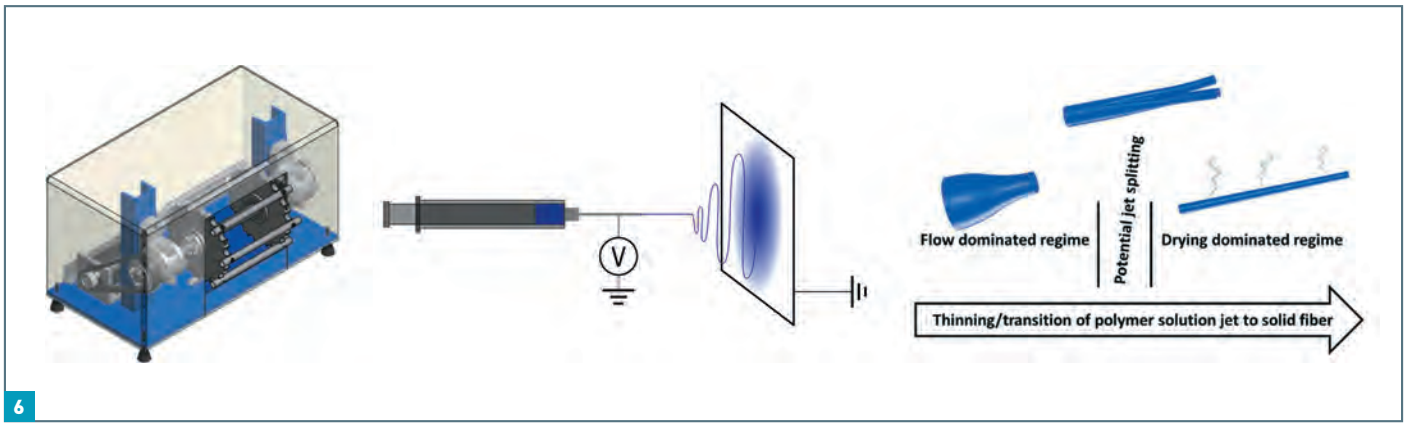
Biomedizinische Anwendung von Polymer-Nanofasern

Ein weiterer Forschungsbereich am LSP beschäftigt sich mit der Entwicklung von Polymer Nanofasern und deren Anwendung im biomedizinischen Bereich, etwa der Unterstützung und Rekonstruktion von menschlichem Gewebe. Eine Untersuchung der biologischen Eigenschaften erfolgt in Kooperation mit der Uniklinik Erlangen. Um bereits bei der Herstellung einen möglichst effektiven Prozess mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, gilt es mehrere Herausforderungen zu erfüllen. So müssen die Fasermorphologie und die 3-dimensionale Struktur des Fasergerüsts der Struktur des zu ersetzenden Gewebes entsprechen. Da am LSP derzeit vor allem die Nachbildung lamellarer Strukturen des Auges im Vordergrund steht,

Abb. 5: Morphologieentwicklung von Kurzkarbonfasern in einer PMMA Faser.

5





6

Abb. 6:
Modell des Rotationskollektors **(links)**, Prinzip des Elektrospinnings **(mitte)**, hypothetischer drei Stufen Prozess während des Elektrospinnings **(rechts)** [21].

Abb. 7:
Zur Charakterisierung der Nanofaserscaffolds wurden diese in Tissue Carrier Ringen fixiert und anschließend über mehrere Tage mit immortalisierten human kornealen Endothelzellen kultiviert. Unter dem Lichtmikroskop **(unten rechts)** konnten die eingefärbten Zellen bereits sichtbar gemacht werden **(unten rechts)** [23].

zielt die Forschung überwiegend auf die Herstellung parallel orientierter Fasergebilde ab.

Die Herstellung solcher Fasern mit einem Durchmesser im Bereich weniger Mikrometer bis hin zu einigen 100 Nanometern wird mittels Elektrospinnen realisiert. Hierfür wird eine Polymerlösung oder Schmelze durch eine Spritze in Richtung eines Kollektors gepumpt. Durch Anlegen einer Hochspannung von mehreren Kilovolt zwischen Spritze und Kollektor, bilden sich feste Polymerfasern, welche sich schließlich mit hoher Geschwindigkeit auf den Kollektor zubewegen und dort aufgefangen werden (**Abb. 6**).

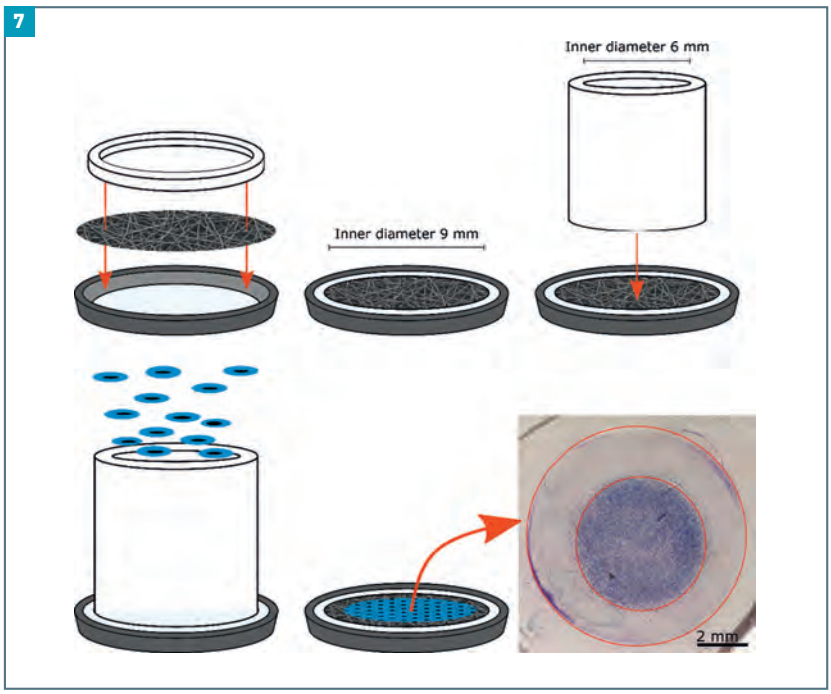
Um ausgerichtete Strukturen zu erhalten ist die Geometrie des Kollektors von entscheidender Bedeutung. Die erste Wahl bei der Produktion von orientierten Nanofasern ist hierbei ein Rotationskollektor (**Abb. 6, links**). Eine Untersuchung und Optimierung des Einflusses der relevanten Prozessparameter spielt hierbei eine zentrale Rolle [18].

Durch Anpassen diverser Parameter wie Spannung, Flussrate, Nadel-Kollektor Abstand und Balkenabstand der Kollektoren lässt sich vielfach Einfluss auf Morphologie, Ausrichtung und Struktur der Fasern nehmen. Forschern am LSP ist es gelungen, durch gezielte Anpassung der Parameter gepaart mit ausgiebiger Faseranalyse den Spinnprozess eines Polycaprolacton/Kollagen Gemisches derart zu kontrollieren und in seiner Effizienz zu steigern, dass deren Arbeit bereits international Anerkennung fand (27) [19; 20, Auszeichnung beim „Annual World Forum on Advanced Materials“, Posen 2016]. Die physikalische Beschreibung des E-Spinnings [21] wurde von „Macromolecular Theory and Simulations“ mit einer Ausgabe auf dem Titelblatt gewürdigt.

Im Bereich der Augenheilkunde bestehen besonderen Anforderungen für das Tissue Engineering. Beispielsweise ist ein Scaffold an der Augenoberfläche ständig dem Tränenfilm und den Schlägen des Augenliedes ausgesetzt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, forscht der LSP zusammen mit dem Universitätsaugenklinik Rostock an neuen Scaffolds auf Basis von Nanofasern und Hydrogelen. Die Fasern werden mittels Elektrospinning aus einem einzelnen Biopolymer oder aus Blends mehrerer Biopolymere aus einer Lösung hergestellt. Der Herstellungsprozess wird für jede Lösung hinsichtlich der Faserausbeute und dem Faserdurchmesser optimiert, um das bestmögliche Resultat zu erzielen.

In der Praxis werden weiche Implantate meist mit Nähten am Patienten fixiert. Hierbei spielt die Nahtfestigkeit des Gewebes und des Implantates eine entscheidende Rolle. Um die Nahtfestigkeit beurteilen zu können werden anwendungsnahe Tests

7



benötigt. Da das in der ISO 7198:1998 beschrieben Testverfahren nur auf tubuläre vaskulare Implantate anwendbar ist, wurde am LSP ein gesondertes Verfahren für die Augenheilkunde entwickelt [22].

Neben der oberflächlichen Anwendung von Nanofaserscaffolds als Wundabdeckung forscht der LSP auch an künstlichen biomimetischen Transplantanten für die posteriore lamellare Keratoplastik. Darunter ist der lamellare Ersatz der Hornhautrückfläche zur Behandlung von Endothelinsuffizienzen zu verstehen, welcher zum Verlust der Sehfähigkeit führen kann. Der aktuelle Goldstandard ist die sogenannten „Descemet Endothelial Membrane Keratoplasty", kurz DMEK. Hierbei wird dem Patienten eine humane Spenderlamelle transplantiert. Die Abhängigkeit von Spendergewebe und die einhergehenden Gefahren von Transplantaten biologischen Ursprungs motiviert die Suche nach einem künstlichen Ersatz. Nanofaserscaffolds aus dem Elektrospinning bieten sich für diesen Anwendungsfall an, da durch die poröse Struktur eine hervorragende Durchlässigkeit gewährleistet ist und die Eignung von Nanofaserscaffolds als Träger von Zellstrukturen vielfach in der Literatur bewiesen wurde. Am LSP wurden in einer Studie PCL-Scaffolds und PCL-Blend-Scaffolds hergestellt und auf ihre Eigenschaften bezüglich der Anwendbarkeit als künstlicher DMEK-Ersatz untersucht. Hierbei standen insbesondere die Scaffold-Zell-Interaktionen im Fokus der Forschung [23]. Die Scaffolds wurden in Tissue Carrier Ringen fixiert und mit human kornealen Endothelzellen kultiviert (siehe **Abb. 7**).

Zusätzlich zu lichtmikroskopischen Aufnahmen konnten mittels TEM-Aufnahmen die Zell-Scaffold Interaktionen sichtbar gemacht werden. Nanofaserscaffolds aus dem Elektrospinning zeigen demnach gute Eigenschaften, um die Abhängigkeit von humanem Spendergewebe zu überwinden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet solcher Nanofasern ergibt sich aus der Anwendbarkeit in Biofabrikationsprozessen (u.a. 3D-Druck). Die Integration der Fasern in Hydrogelen bietet einen vielversprechenden Ansatz um sowohl die Formbeständigkeit als auch die Zellproliferation im Bio-3D-Druck zu optimieren. Weitere Informationen zur Biofabrikation können der Homepage des SFB TRR 225 (Teilprojekt A07) entnommen werden.

KONTAKT

FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
LEHRSTUHL FÜR POLYMERWERKSTOFFE
Martensstraße 7, 91058 Erlangen
Tel.: +49 (0)9131 85-28593
dirk.schubert@fau.de
www.lsp.tf.fau.eu

LITERATUR

1. Härth M., Kaschta J., Schubert D. W., Shear and elongational flow properties of long-chain branched poly (ethylene terephtalates) and correlation to their molecular structure, Macromolecules 47 (2014), 4471-4478, DOI: 10.1021/ma5002657
2. Härth M., Kaschta J., Schubert D. W., Rheological Study of the Reaction Kinetics in a Poly(ethylene terephthalate) Melt, Polymer Degradation and Stability (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.001
3. Resch, J. A.; Stadler, F. J.; Kaschta, J., Münstedt, H., Temperature Dependence of the Steady-State Recoverable Compliance of Linear and Long-Chain Branched Polyethylenes, Macrolecules 42 (2009) 5676-5683.
4. [4] Stadler F. J. , Arikan B., Kaschta J., Kaminsky W., Long-Chain Branches in Syndiotactic Polypropene Induced by Vinyl Chloride, Macromol. Chem. Phys. 211 (2010) 1472-1481.
5. Resch J. A., Kaschta J., Wolff F., Münstedt H., Influence of molecular parameters on the stress dependence of viscous and elastic properties of polypropylene melts in shear, Rheol. Acta 50 (2011) 53-63.
6. Abdorasouli M. H., Kaschta J., Nazokdast, Morphology Development, Melt Linear Viscoelastic Properties and Crystallinity of Polylactide/Polyethylene/Organoclay Blend Nanocomposite, Journal of Applied Polymer Science 132, (2015) Article 41300 (11p) DOI: 10.1002/app.41300
7. Lanyi, F. J., Kunzelmann, P., Schubert, D. W. (2016), Novel Chart for Representation of Material Performance and Reliability. Macromol. Symp., 365: 194–202. doi:10.1002/masy.201650010
8. Schubert, D. W., Kaschta, J., Seidl, S. and Kunzelmann, P. (2016), Binary and Ternary Blends of Polypropylene Types – Influence on the Homogeneity of Biaxial-Oriented Films. Macromol. Symp., 365: 87–94. doi:10.1002/masy.201650019
9. Bechert, M., Schubert, D. W., Scheid, B. (2015). Practical mapping of the draw resonance instability in film casting of Newtonian fluids. European Journal of Mechanics B-Fluids, 52, 68-75. https://dx.doi.org/10.1016/j.euromechflu.2015.02.005
10. Bechert, M., Schubert, D. W., & Scheid, B. (2016). On the stabilizing effects of neck-in, gravity, and inertia in Newtonian film casting. Physics of Fluids, 2016(28). https://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1063/1.4941762
11. Krückel, J., Schubert, D. W. (2014). Theoretical and experimental study of the dynamic percolation behaviour of carbon black filled polymethylmethacrylate prior and after shear - A novel three phase approach. European Polymer Journal, 53, 50-57. https://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.01.011

12. Krückel, J., Stary, Z., Triebel, C., Schubert, D. W., Münstedt, H. (2012). Conductivity of polymethylmethacrylate filled with carbon black or carbon fibres under oscillatory shear. Polymer, 53(2), 395-402. https://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2011.11.041
13. Liu, X., Krückel, J., Zheng, G., & Schubert, D. (2013). Mapping the Electrical Conductivity of Poly(methyl methacrylate)/Carbon Black Composites Prior to and after Shear. Acs Applied Materials & Interfaces, 5(18), 8857-8860. https://dx.doi.org/10.1021/am4031517
14. Qu, M., & Schubert, D. W. (2016). Conductivity of melt spun PMMA composites with aligned carbon fibers. Composites Science and Technology, 136, 111-118.
15. Schubert, D. W. (2018). Novel Theoretical Self – Consistent Mean – Field Approach to Describe the Conductivity of Carbon Fiber Filled Thermoplastics—PART I—Theory. Macromolecular Theory and Simulations, 27(4), 1700104.
16. Xu, H., Qu, M., & Schubert, D. W. (2019). Conductivity of poly (methyl methacrylate) composite films filled with ultra-high aspect ratio carbon fibers. Composites Science and Technology, 107690.
17. Qu, M., Nilsson, F., Qin, Y., Yang, G., Pan, Y., Liu, X., ... & Schubert, D. W. (2017). Electrical conductivity and mechanical properties of melt-spun ternary composites comprising PMMA, carbon fibers and carbon black. Composites Science and Technology, 150, 24-31.
18. Dörgens, A., Roether, J., Dippold, D., Boccaccini, A., & Schubert, D. W. (2015). Identifying key processing parameters for the electrospinning of aligned polymer nanofibers. Materials Letters, 140, 99-102. https://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.150
19. Tallawi M., Dippold D., Rai R., D'Atri D., Roether J. A., Schubert D. W., Rosellini E., Engel F. B., Boccaccini A. R., Novel PGS/PCL electrospun fiber mats with patterned topographical features for cardiac patch applications, Materials Science and Engineering: C, Volume 69, p. 569-576, http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.083.
20. Dippold, D., Schubert, D. W., Beier, J. P., Boccaccini, A. R., Alligned PCL-Collagen electrospun nanofibers for skeletal muscle tissue engineering using benign solvents (2016). Posen: Polychar 24th
21. Schubert D. W., Revealing Novel Power Laws and Quantization in Electrospinning Considering Jet Splitting—Toward Predicting Fiber Diameter and Its Distribution. Macromolecular Theory and Simulations (2019): 1900006.
22. Küng F., Schubert D. W., Stafiej P., Kruse F. E., Fuchsluger T. A., A novel suture retention test for scaffold strength characterization in ophthalmology, Materials Science and Engineering: C, Volume 69, 2016, p. 941-946, http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.052.
23. Himmler M., Garreis F., Paulsen F., Schubert D. W., Fuchsluger T. A., Optimization of Polycaprolactone - based Nanofiber Matrices for the Cultivation of Corneal Endothelial Cells, Scientific Reports (2021)

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

Telefon 06206 939-0 · info@alphapublic.de

FLAMMHEMMENDE FASER-KUNSTSTOFF-VERBUND-SYSTEME UND DEREN HERSTELLUNG FÜR DIE FLUGZEUGKABINE

Autoren: Hans Wittich, Julian Karsten und Bodo Fiedler, TU Hamburg / Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe

Die Entwicklung von neuen, innovativen flammhemmenden Faser-Kunststoff-Verbund-Leichtbauwerkstoffen für den Einsatz im Flugzeuginnenraum und deren Herstellungstechnologien ist aus ökologischer, industrieller und sicherheitstechnischer Sicht von grundlegender Bedeutung. Zu diesem Zwecke haben sich im Zuge des Projekts COMP-1633 mehrere deutsche und kanadische Partner aus Forschung, Entwicklung und Industrie zusammengeschlossen und verfolgen hierbei einen ganzheitlichen Ansatz von der Materialentwicklung, über die Fertigung, bis hin zum fertigen Bauteil. Das Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe der Technischen Universität Hamburg unterstützt hierbei diese Entwicklungen des Projekts durch seine langjährige Erfahrung im Bereich der Herstellung, Verarbeitung und Materialprüfung von Kunststoffen und Faserverbunden.

Im Zuge der weltweiten Bemühungen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs und der Emission von Treibhausgasen, stehen zunehmend die Industrie und der Verkehrssektor in der Pflicht. In der Luft- und Raumfahrt und der Zulieferindustrie sollen diese Ziele vor allem durch Gewichtsreduzierung, geringeren Kraftstoffverbrauch und Effizienzsteigerung in den zugrunde liegenden Produktionsprozessen erreicht werden. Betrachtet man die Anstrengungen, die unternommen werden, um ein einziges Kilogramm in einem Flugzeug einzusparen, spiegelt dies die Notwendigkeit, aber auch die Komplexität solcher Aufgaben wieder, da hier eine Vielzahl von Themen und Anforderungen berücksichtigt werden müssen, sich aber auch ein enormes Potenzial der Kosteneinsparung im laufenden Betrieb bietet.

Eine verbreitete Methode zur Gewichtseinsparung ist die Substitution von herkömmlichen Leichtbaumaterialien (Aluminium und Titan) durch Polymere und Faserverbundwerkstoffe in Strukturbauteilen und dem Flugzeuginnenräumen. Die heutzutage in Flugzeug-Innenräumen eingesetzten Faserverbund-Bauteile unterliegen strengen Anforderungen hinsichtlich ihrer FST-Eigenschaften. Als polymere Matrixmaterialien werden daher Phenolharze oder mit halogenbasierten Flammschutzmitteln modifizierte Kunststoffmaterialien eingesetzt. Diese halogenmodifizierten Materialien sowie Phenoplaste bieten einen sehr guten Flammschutz und schlechte Brennbarkeit, jedoch werden in der Verarbeitung, während des Einsatzes in der Anwendung und im Brandfall teils hochgiftige Stoffe (Halogenradikale, Phenol, Formaldehyd) freigesetzt. Die Verwendung dieser Materialien wird deshalb zunehmend durch politische Verordnungen, wie z.B. die EU-Chemikalienverordnung REACH, reglementiert und untersagt. Auch gestaltet sich die Verarbeitung dieser Materialien in effizienten, automatisierten Verarbeitungsprozessen aufgrund der Schadstoffexposition teilweise schwierig, sodass aufwändige manuelle Prozesse wie beispielsweise das Handlaminieren bei der Faserverbundfertigung angewendet werden müssen. Des Weiteren besitzen beispielsweise Phenoplaste reaktionsbedingt nur niedrige mechanische Eigenschaften im Vergleich zu zahlreichen anderen Kunststofftypen. Es ist daher notwendig, neue flammresistente Kunststoffe sowie neue Flammschutzmittel mit der Eignung für die Modifikation von Polymeren zu entwickeln, zu testen und für die Verwendung in Luftfahrt-Anwendungen zu zertifizieren. Auch bietet dies die Gelegenheit, passende, energieeffiziente und zum Zweck einer besseren Wirtschaftlichkeit automatisierbare Prozesse zu entwickeln, in denen die flammwidrigen Materialien verarbeitet werden können.

In der aktuellen Fachliteratur finden sich zahlreiche Forschungsarbeiten zur Synthese von alternativen

partikelhaltigen sowie flüssigen Flammschutzmitteln und zur Modifikation von Polymeren mit diesen Flammschutzmitteln, wobei klar hervorzuheben ist, dass sich die Flammschutzmodifikation deutlich negativ auf die Verarbeitbarkeit oder andere wichtige Eigenschaften der modifizierten Polymere auswirken kann. Die Herstellbarkeit von Faserverbunden unter Verwendung eines flammwidrigen FST-Polymers mittels bestimmter industrierelevanter Fertigungsverfahren muss daher im Einzelfall geprüft werden. Des Weiteren kann von den Brandeigenschaften des modifizierten Kunststoffes nicht direkt auf die Brandeigenschaften des aus diesem Material hergestellten Faserverbundbauteils geschlossen werden, da die FST-Eigenschaften dieses Bauteils als Systemeigenschaft aus Werkstoff, Bauteilgeometrie und Umgebungsbedingungen verstanden werden müssen. Dabei empfehlen sich, je nach eingesetztem Material sowie den im Anwendungsfall vorherrschenden Randbedingungen, unterschiedliche Flammschutz-Mechanismen, die im Brandfall wirken sollen, um die geforderten FST-Eigenschaften zu erreichen. Es steht dem Materialentwickler zwar mit inhärent flammwidrigen Kunststoffen, verdünnend oder kühlend wirkenden Zuschlagstoffen, intumeszierenden Schutzschicht-(bildnern) oder in der Gasphase wirkenden Radikalfängern ein breites Spektrum an Materialien mit verschiedenartigen Flammschutzmechanismen zur Verfügung, diese können jedoch im Anwendungsfall aufgrund der Kompositbeschaffenheit, oder anderen Faktoren der erläuterten Systemeigenschaft nahezu wirkungslos sein. Aus diesem Grund muss die Forschungsarbeit unter Berücksichtigung der Themenkomplexität und der Vielzahl an Einflussfaktoren und Abhängigkeiten fortgeführt werden. Die Projektarbeit findet im Rahmen eines internationalen Projektes zwischen den Luftfahrtclustern Hamburg (Deutschland) und Montreal (Kanada) statt und fordert eine intensive Zusammenarbeit zwischen Technischer Universität Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Polytechnique Montréal und École de Technologie Supérieure Montréal auf der akademischen und CompriseTec GmbH, Exakt Advanced Technologies GmbH, Kruger Biomaterials und Pultrusion Technique Inc. auf der industriellen Seite. Das Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe der TUHH unterstützt hierbei das Vorhaben und alle Projektpartner durch seine langjährige Erfahrung im Bereich der Herstellung, Verarbeitung und Materialprüfung von Kunststoffen und Faserverbunden. In diesem Artikel widmen wir uns insbesondere den von uns durchgeführten Materialtests, der Mitentwicklung und Prozessoptimierung des DirectPreg-Prozesses, sowie der Entwicklung und Verarbeitung von partikelgefüllten FST Polymeren und Kompositen.

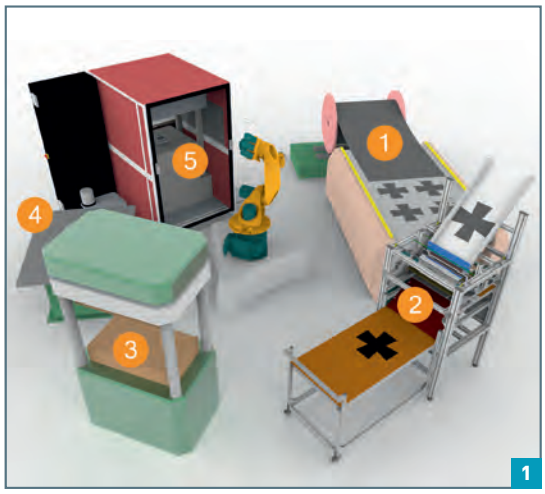


Abb. 1: Schematischer Prozessablauf im DirectPreg-Verfahren

DirectPreg-Prozess – Direktimprägnierungsverfahren von Prepregsystemen

Aufgrund der typischen Struktur und Zusammensetzung aktueller Bauteile des Flugzeuginnenraums (sie bestehen z.B. aus Paneelen, Profilen, Verbindungselementen) kommen viele verschiedene Fertigungstechniken zum Einsatz. Im Zuge des Projekts werden verschiedene Herstellungsverfahren (SMC-Heißpressen, Prepreg-Imprägnierung/Heißpressen, Pultrusion) an die anspruchsvolle Herstellung FST-optimierter Flugzeug-Innenraumteile angepasst und weiterentwickelt.

Ein Beispiel ist der DirectPreg-Prozess. Der Direct-Preg-Prozess wurde in Kooperation mit den Projektpartnern CompriseTec und Exakt entwickelt und gliedert sich entsprechend der **Abbildung 1** in nachfolgende Fertigungsschritte:

- 1. Zuschnitt und Bebinderung der textilen Halbzeuge
- 2. Imprägnieren am Imprägnierwalzwerk
- 3. Lagerung und Konsolidierung
- 4. Lay-Up / Laminieren
- 5. Vernetzung und Konsolidierung (z.B. Heißpresse, Ofen, Autoklav)

Besondere Bedeutung kommt hierbei der Imprägnierung der Textilhalbzeuge mit dem Harz zu. Die Firma EXAKT hat hierfür in einem iterativen Prozess ein Imprägnierwalzwerk (siehe **Abb. 2**) konzipiert, das eine teilautomatisierte Imprägnierung verschiedener Textilhalbzeuge mit den ebenfalls im Projekt entwickelten FST-Harzen ermöglicht.

Im Zuge der Prozessoptimierung des Direct-Preg Prozesses wurden Herstellungsparameteranalysen durchgeführt, mit dem Ziel endanwenderfreund-

Abb. 2:
Entwicklungsprozess von der ersten Skizze über den Prototypen, bis zum Vorserienmodell des Imprägnierwalzwerks der Firma EXAKT Advanced Technologies GmbH

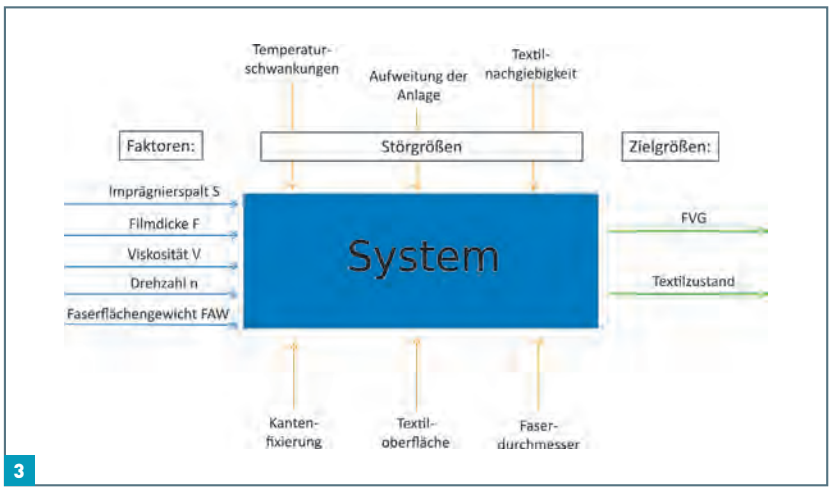
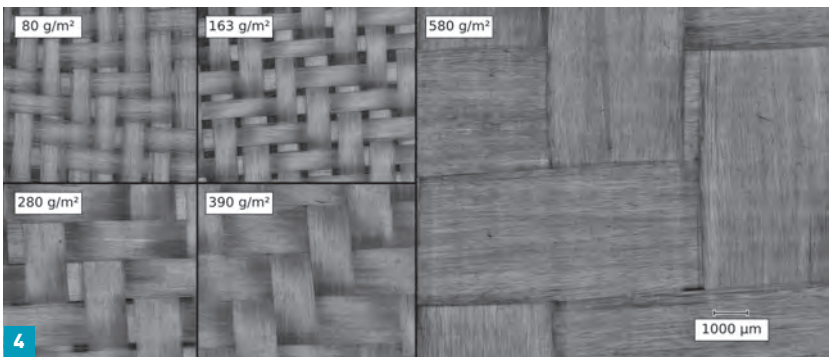


Abb. 3:
Vereinfachtes Ursache-Wirkungs-Diagramm des Imprägnierwalzwerks

liche Parameter-Einstellungskarten zu entwickeln. Dies wurde beispielhaft für das Harzsystem Blendur VP PU 90 IK 01 der Firma Covestro mit Glasfasergeweben mit Köperbindung und unterschiedlichen Faserflächengewichten zwischen 80 g/m² und 580 g/m² der Firma R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH durchgeführt. **Abbildung 3** zeigt hierzu die untersuchten Faktoren am „System" Imprägnierwalzwerk. Neben den materialspezifischen Parametern Viskosität des Harzes und dem Faserflächengewicht des Textils, wurden maschinenspezifische Parameter, wie der eingestellte Imprägnierspalt, die Harzfilmdicke und die Verarbeitungsdrehzahl mithilfe einer statistischen Versuchsplanung untersucht. Ziel war es, den Faservolumengehalt (FVG) des produzierten Prepregs möglichst genau in einem Bereich zwischen 40 - 60 Gew.-% einstellen zu können. Das Textil sollte darüber hinaus den hohen Qualitätsansprüchen genügen und keine Beschädigungen oder Ondulationen einzelner Faserrovings aufweisen. Einflüsse, wie etwa Temperaturschwankungen und maschinenspezifische Aufweitungen wurden darüber hinaus dokumentiert.

Abhängig vom Faserflächengewicht weisen die Textile eine signifikant unterschiedliche Offenheit, bzw. Imprägnierfähigkeit auf. Sowohl die Harzaufnahme zwischen und in den Faserrovings, als auch das interlaminare Haftungspotential ist von den unterschiedlichen Geometrien der Textile beeinflusst, weshalb globale Aussagen zum Imprägnierverhalten in Abhängigkeit der Einflussfaktoren schwierig sind und jedes Textil im Einzelnen neu bewertet werden muss. **Abbildung 4** zeigt hierzu mikroskopische Auflichtaufnahmen der unterschiedlichen Geometrien der Glasfasertextile.

Abb. 4:
Mikroskopieaufnahmen von GF-Köpergewebe unterschiedlicher Faserflächengewichte (80 - 580 g/m²)



Es wurden für alle Textile Regressionsanalysen der Einflussfaktoren durchgeführt und die Signifikanz der Einflussfaktoren bewertet. Mit Ausnahme der Harzviskosität ist jeder Einflussfaktor im untersuchten Bereich signifikant bis hochsignifikant. Eine Übersicht über die sich einstellenden Effekte der Einflussfaktoren auf den Faservolumengehalt ist in **Abbildung 5** gegeben. Hierbei wird die relative Änderung des Faservolumengehalts in Bezug auf den mittleren FVG aufgezeigt. Während eine Zunahme der eingestellten Harzfilmdicken in einer Reduktion des Faservolumengehalts resultiert, verschiebt sich der Einfluss aller anderen Faktoren mit

zunehmenden Faserflächengewicht des Textils vom Positiven ins Negative.

Zur Unterstützung des Endanwenders wurden Parameter-Einstellkarten entwickelt, welche den sich einstellenden Faservolumengehalt in Abhängigkeit der Einflussfaktoren darstellen. **Abbildung 6** zeigt eine solches Einstellkarte in Form eines Höhenliniendiagramms für die Faktoren Imprägnierspalt und Harzfilmdicke für das GF-Textil mit einem Faserflächengewicht von 280 g/m². Abhängig vom gewünschten Faservolumengehalt und der angestrebten Weiterverarbeitungsmethode (Autoklav, Heizpresse, Vakuumsackaufbau, etc.) kann in der Fertigung schnell ein möglicher Einstellungsparametersatz ermittelt werden.

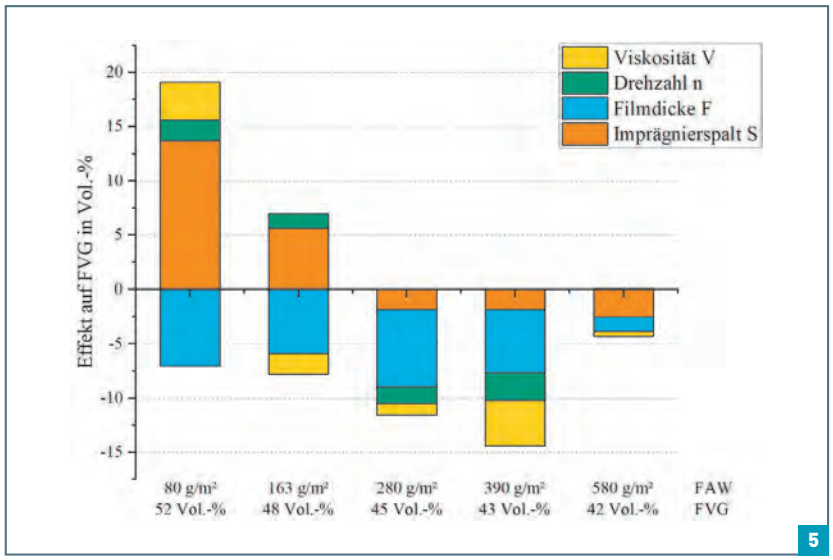


Abb. 5: Übersicht des Effekts der Einflussfaktoren auf den Faservolumengehalt (FVG)

Entwicklung flammgeschützter Harzsysteme

Auf dem Werkstoffmarkt finden sich bereits einige Polymere Matrixsysteme, die bereits einen gewissen inhärenten Flammschutz entsprechend der geforderten Brandschutzverordnung aufweisen. Durch Zugabe von entsprechenden Flammschutzadditiven und Füllstoffen, lassen sich allerdings auch neue flammgeschützte Polymere Werkstoffe formulieren. So weist das Epoxidharzsystem OXR4100 / OXH 4105 der Firma Olin keinen inhärenten Flammschutz auf und wurde im Folgenden zur Entwicklung eines eigenen flammschutzpartikelgefüllten Matrixsystems verwendet.

Als Flammschutzadditiv kommen nachfolgende partikuläre Füllstoffe zum Einsatz:

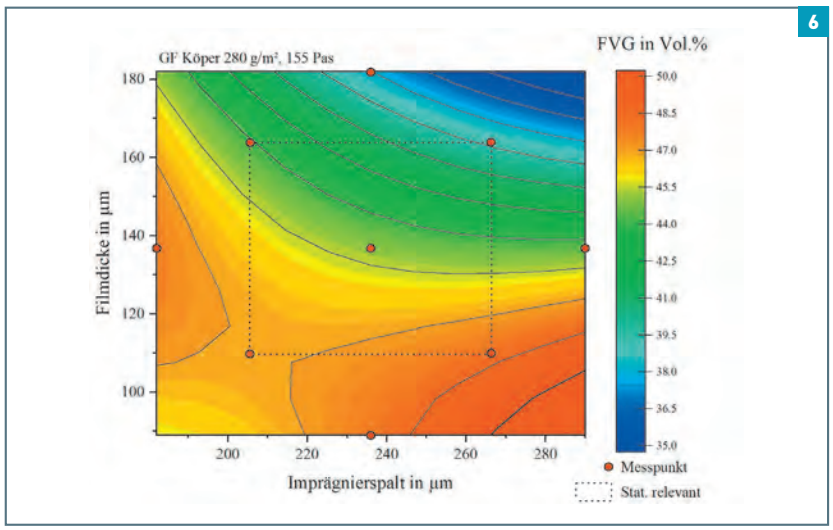
- Blähgraphit ES 700 F5 pH (EG), Graphit Kropfmühl GmbH
- Amonium Polyphosphat Exolit AP 422 (APP), Clariant AG
- Roter Phosphor Exolit RP 607 (RP), Clariant AG

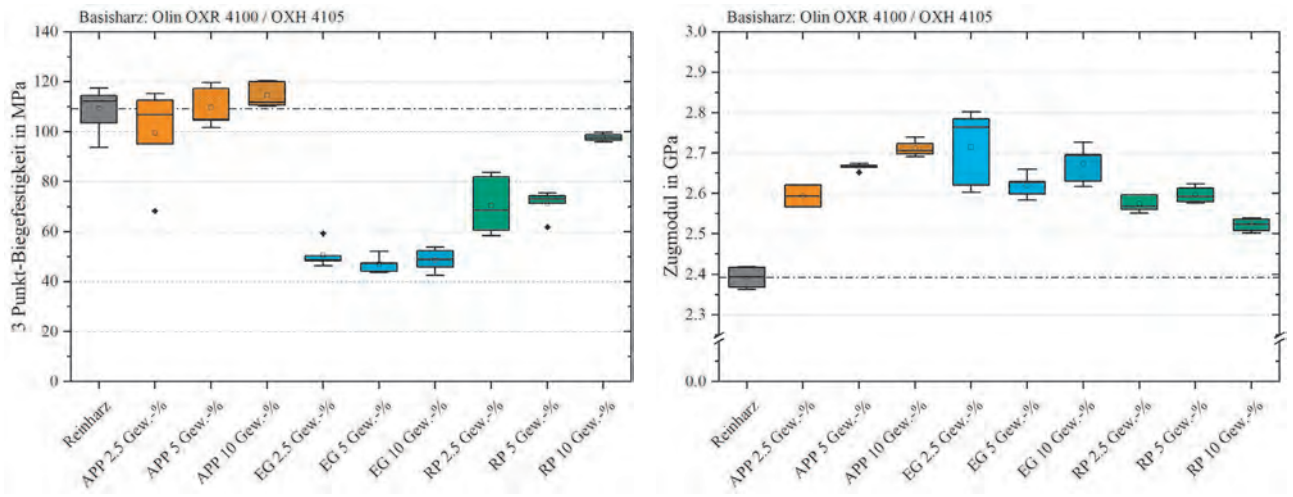
Die Füllstoffe zeichnen sich durch eine vergleichbar geringe Toxizität im Verbrennungsprozess aus und erlauben nach Herstellerangaben bereits bei geringen Füllstoffgehalten (< 10 %) einen effektiven Flammschutz, wodurch sich die Füllstoffe potentiell nicht nur für eine Anwendung in reinen Epoxidharzsystemen, sondern auch in Faserverbundsystemen eignen. Hierzu wurden Versuchsreihen zur Viskositätsänderung des Harzes und die Partikelgrößenverteilung sowie Rundheit analysiert. Neben der reinen Charakterisierung der Matrixeigenschaften, wurde auch die potentielle Verarbeitbarkeit der Harzsysteme analysiert. Hierzu wurden unter anderem die Reaktivität, Viskosität, Klebrigkeit (Tack) und das allgemeine rheologische Verhalten der polymeren Matrixsysteme untersucht.

Unter Variation der partikulären Füllgrade (0 %, 2,5 %, 5 %, 10 %) wurden Reinharzplatten gefertigt und verschiedenen mechanischen Tests (Zugversuch, Biegeversuch) unterzogen. Es zeigte sich wie in **Abbildung 7** dargestellt, qualitativ eine leichte Erhöhung der Steifigkeit, sowie Senkung der maximalen Festigkeit mit zunehmenden Füllstoffgehalt.

Zur Bestimmung der Flammschutzeigenschaften der Partikel wurden vertikale Brandtests nach dem UL-94 Standard zur Beurteilung und Klassifizierung der Brennbarkeit von Kunststoffen in einer Brandkammer unter Laborbedingungen durchgeführt. Zum Erreichen der angestrebten UL-94-V0 Zertifizierung müssen die brennenden Prüfkörper in definierter Zeit ohne Abtropfen von Brandgut von selbst erlöschen. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 8** zu erkennen. APP mit > 5 % und RP mit > 10 % Füllstoffgehalt erreichen die UL-94-V0-Einstufung

Abb. 6: Einstellkarte / Höhenliniendiagramm des Faservolumengehalts für ein Glasfasertextil mit Köperwebung (280 g/m² FAW).





7

Abb. 7: Zugfestigkeit und E-Modul des Polymers unter Flammschutzpartikeleinfluss

Abb. 8: UL-94 vertikaler Brandschutztest an einem partikelgefüllten Epoxidharzsystem **(links)**, Momentaufnahme des Brandversuchs und Aufnahme der flammschützenden intumeszierenden Schicht an der Probenoberfläche **(rechts)**

und sind somit potentiell flammschutzzertifizierbar. Die EG-Partikel zeigen sich im aktuellen Test als ungeeignet. Dies liegt voraussichtlich an der inhomogenen Verteilung der Partikel im Harzsystem, da es aufgrund der hohen Dichte von EG zu deutlichen Sedimentationseffekten der Partikel im Herstellungsprozess kommt.

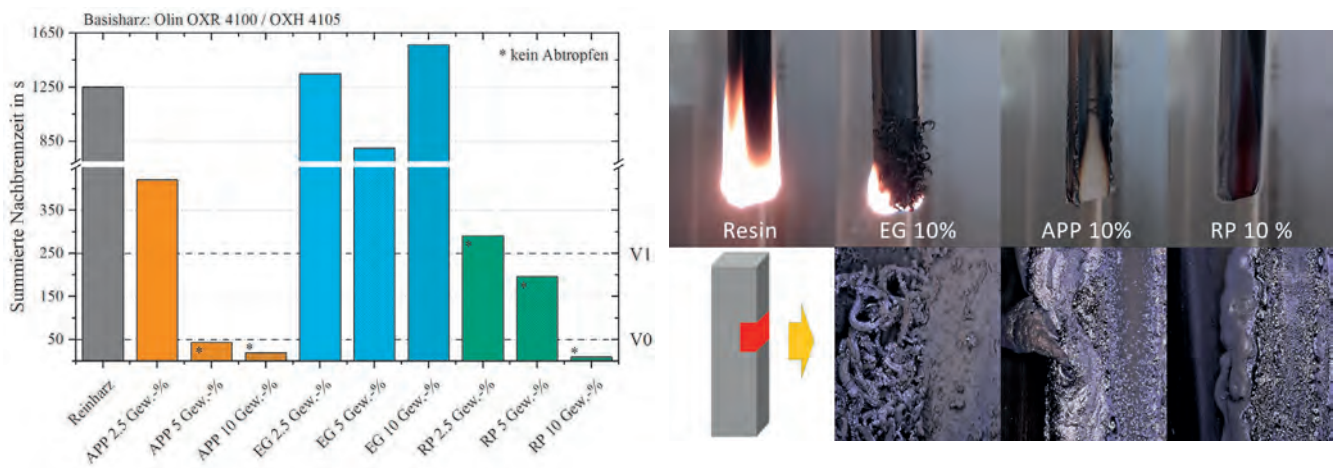
Die entwickelten Materialien und Technologien werden künftig zur Herstellung von Demonstrationsteilen für die Innenausstattung von Flugzeugen verwendet, die die erreichbaren Eigenschaften repräsentieren und gleichzeitig als Transferreferenz für weitere Anwendungen dienen und das technologische und wirtschaftliche Potenzial demonstrieren.

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Das Projekt „COMP-1633 – Flame retardant FRP systems for aircraft interior applications“ (FKZ 03INT-504BB) ist vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Besonderen Dank gebührt allen beteiligten Projektpartnern und dem wissenschaftlichen Nachwuchs der Technischen Universität Hamburg, dessen großes Engagement die erfolgreiche Umsetzung dieses Projekt erst ermöglichte.

8



LITERATUR

1. F. Touni, „Analyse des Imprägnierverhaltens von Glasfasertextilen im Imprägnierwalzwerkprozess," Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2020.
2. Europäisches Parlament und Europäischer Rat, „Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH-Verordnung)," 2006.
3. O. Yücel, „Einfluss partikulärer Füllstoffe auf das Brandverhalten und die mechanischen Eigenschaften von Epoxidharzen," Technische Universität Hamburg, Hamburg, 2020.

KONTAKT

TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG
Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe
Dr.-Ing. Hans Wittich, Dipl.-Ing. Julian Karsten
und Prof. Dr.-Ing. habil Bodo Fiedler
Denickestraße 15, D-21073 Hamburg
Tel.: +49 (0)40 42878-3238
Fax: +49 (0)40 427314513
wittich@tuhh.de, julian.karsten@tuhh.de,
fiedler@tuhh.de
www.tuhh.de/kvweb

SEINE MISSION: CLEVERE LÖSUNGEN FÜR DIE ARZNEIMITTELZUBEREITUNG

In seiner Jugend wollte Karl Martin Berg Arzt werden. Diesen Berufswunsch hat der 36-Jährige letztlich verworfen, aber dennoch trägt er dazu bei, die Gesundheit von Menschen zu schützen und zu verbessern. Er macht den Alltag von medizinischem Fachpersonal einfacher und sicherer: In der Entwicklungsabteilung von B. Braun arbeitet er gemeinsam mit seinem Team an innovativen Transfersystemen für Arzneimittel. Sterile Medizinprodukte aus Kunststoff, die für die Infusionstherapie von großer Bedeutung sind.

Karl Martin Berg

Millionen von Menschen erhalten jeden Tag eine Infusion. Ein Routinevorgang, der jedoch bei näherer Betrachtung komplex ist. Das medizinische Personal muss zum Beispiel das Medikament korrekt dosieren und mit der Infusionslösung vermischen. Doch wie bringt man beide Komponenten am besten zusammen? Die Lösung sind spezielle Medizinprodukte – zum Beispiel das clevere Transfersystem Ecoflac® Connect des Melsunger Medizintechnikherstellers B. Braun. Mit dessen Hilfe werden Medikament und Infusionslösung direkt miteinander verbunden. Dosierung und Zubereitung erfolgen so in einem Arbeitsschritt, ohne Gasaustausch mit der Umgebung. Das spart wertvolle Zeit, reduziert den Kontakt des Anwenders mit Präparaten wie Antibiotika und minimiert den Einsatz weiterer Kunststoffartikel – beispielsweise Spritzen für die Zubereitung.

Entwickelt wurde das Produkt im Development Center Pharmaceutical Admixture Tools von B. Braun – einer Entwicklungsabteilung, die sich auf solche Transfersysteme für Medikamente spezialisiert hat. Die Leitung des derzeit sechsköpfigen Teams hat Karl Martin Berg, der sich keine interessantere Aufgabe vorstellen könnte: „Medizintechnik ist ein spannendes Tätigkeitsfeld“, sagt er. Nicht nur, weil das Produktportfolio von B. Braun sehr vielseitig ist, sondern auch, weil man den eigenen Fortschritt immer direkt vor Augen hat. „Ein Produkt von der ersten Idee bis zur Marktreife verantwortlich zu begleiten, ist etwas Besonderes.“

Seine berufliche Laufbahn begann der 36-Jährige in der Automobilbranche. Bei einem Unternehmen in Niedersachsen studierte er Maschinenbau im Praxisverbund. Als er sich kurzfristig einen neuen Arbeitgeber für seine Abschlussarbeit suchen musste, kam er mit B. Braun in Kontakt – und blieb. Auch, weil er hier die Möglichkeit hatte, sich weiterzuentwickeln: „Nach meinem Abschluss habe ich zunächst bei Entwicklungsprojekten unterstützt und Erfahrungen gesammelt. Dann durfte ich selber Projekte leiten und führe heute mein eigenes Team“, sagt Karl Martin Berg, der zudem berufsbegleitend ein General-Management-Studium an der Universität Kassel absolviert hat. Die Kompetenzen, die hier vermittelt wurden, seien sehr wertvoll für seine leitende Tätigkeit.

Der Arbeitsalltag in der Entwicklungsabteilung ist geprägt von medizinischem Fortschritt: Viele Produkte sind komplette Neuentwicklungen. Andere wiederum müssen an neue Anforderungen angepasst werden. In beiden Fällen ist es die Skizze, die den Beginn des Prozesses kennzeichnet. „Häufig mache ich zunächst eine Bleistiftzeichnung. Das geht am schnellsten“, erklärt Karl Martin Berg. Später wird die Idee in eine 3D-Zeichung übertragen.

1

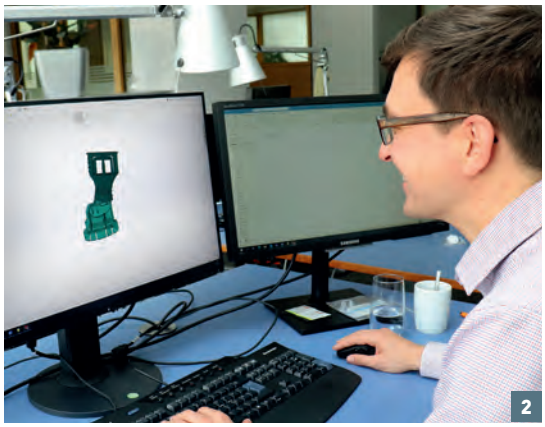
KONTAKT

B. BRAUN SE
Carl-Braun-Straße 1
D-34212 Melsungen
Tel.: +49 (0)5661 710
www.bbraun.de

Was dann folgt, ist eine echte Teamleistung. Denn an einem einzigen Produkt sind eine Vielzahl unterschiedlicher Fachabteilungen beteiligt. „Kooperationskompetenz ist eine wichtige Voraussetzung für meinen Job“, sagt Berg, der alle Arbeitsschritte intensiv begleitet. Im Labor arbeiten Wissenschaftler zum Beispiel am perfekten Material für das Produkt. Dichtigkeit, Flexibilität, Oberfläche: Je nach Einsatzfeld sind hier besondere Materialeigenschaften gefragt.

Gleichzeitig legen Konstrukteure am Computer die Eigenschaften des Produkts und seiner einzelnen Komponenten fest. Was hier eine besondere Rolle spielt? „Ein Artikel muss einfach in der Handhabung und zudem sicher für Anwender und Patienten sein.“ So werden die Risiken für eine Kontamination (chemisch oder mikrobiell), Medikationsfehler und Verletzungen minimiert. Ist der Entwurf fertig, geht es an den ersten Prototypen, der in kurzer Zeit auf dem 3D-Drucker entsteht. Erst danach werden aufwändigere Spritzguss-Werkzeuge gebaut.

Das Interesse an Medizin ist für Karl Martin Berg auch im Job ein wichtiger Antrieb: „Wir entwickeln


2

Produkte für die Gesundheitsbranche. Deshalb ist es wichtig zu verstehen, welche Anforderungen das Fachpersonal hat.“ Und wie funktioniert das am besten? Natürlich, indem man die eigenen Produkte in der praktischen Anwendung erlebt. Während eines Mentoring-Programms der B. Braun-Stiftung nutzte der Produktentwickler zum Beispiel die Gelegenheit, bei einem Anästhesisten zu hospitieren. „Hin und wieder seinen Blickwinkel zu verändern, erweitert den Horizont.“

B|BRAUN
SHARING EXPERTISE

FORTSCHRITT ERMÖGLICHEN – JEDEN TAG

Wirksame Lösungen entstehen bei B. Braun im konstruktiven Austausch mit unseren Kunden und Partnern. Ein Gedanke, der uns bei B. Braun bewegt. Der uns begeistert. Und der uns jeden Tag antreibt. Aus Leidenschaft finden wir Lösungen, die weiter gehen und weiter führen und schützen so die Gesundheit von Menschen weltweit.

Arbeiten Sie mit uns daran, das Leben von Menschen nachhaltig zu verbessern. Wir bieten Ihnen vielseitige Aufgaben und hervorragende Entwicklungsmöglichkeiten z. B. als Ingenieur für Kunststoff-, Verfahrens- oder Verpackungstechnik.

Besuchen Sie unseren globalen Stellenmarkt auf www.career-bbraun.com/globaljobmarket

B. Braun SE | www.bbraun.de

FUNKTIONENINTEGRIERENDE KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

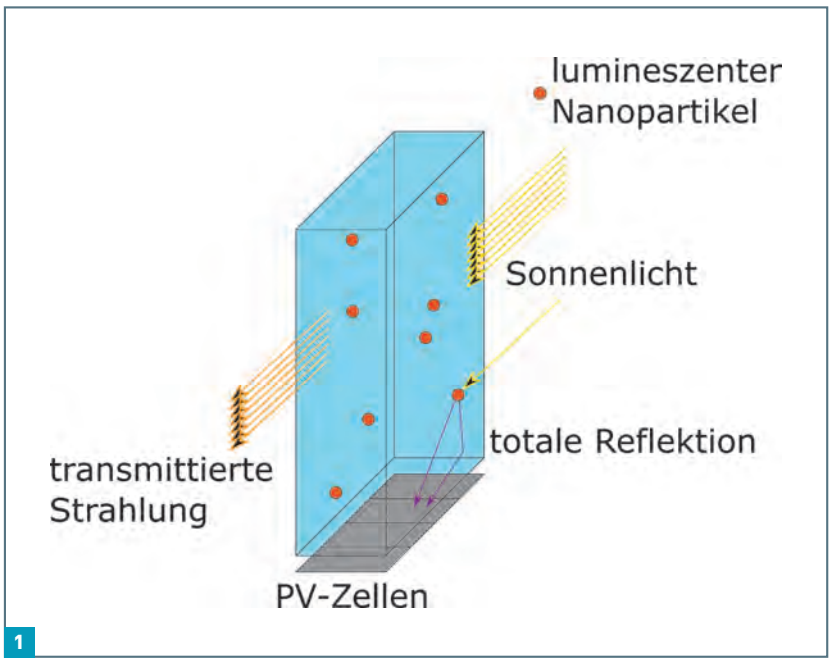
Autoren: **Matthias Koch M.Sc., Christopher Johannes M.Sc., Fabian Lins B.Sc.,** Universität Kassel / Institut für Werkstofftechnik, Kunststofftechnik

Am Fachgebiet Kunststofftechnik des Instituts für Werkstofftechnik unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim beschäftigt sich die Abteilung Funktionenintegration damit, im Rahmen von üblichen Kunststoffverarbeitungsverfahren bestimmte Erzeugnisse mit besonderen zusätzlichen Funktionen herzustellen – die Funktion also mittels üblicher Verarbeitungsverfahren zu integrieren. In den beiden folgenden Beispielen geht es um Sichtscheiben. Im einen Fall soll Energie geerntet, im anderen reguliert werden.

Fenster mit integrierten Solarzellen

Im Projekt „CoSoWin - Fenster mit integrierten Solarzellen basierend auf der Luminescent Solar Concentrator Technologie zur Energieversorgung“ wird auf Grundlage der Luminscent Solar Concentrator Technologie (LSC) eine smarte und effiziente, gebäudeintegrierende Photovoltaikanlage entwickelt. Mithilfe dieser soll eine innovative Möglichkeit geschaffen werden, Energiegewinnung in Gebäuden an Stellen zu integrieren, die vorher nicht zugänglich waren. Dies ist ein Schritt zu einer dezentralen Energieversorgung und hin zu Null- oder sogar Plusenergiehäusern. Die Gewinnung elektrischer Energie durch Sonnenlicht erfolgt in den meisten Fällen durch den Einsatz von Solarzellen. Diese arbeiten optimalerweise mit direktem Licht. Innerhalb von Wohngebieten wird das direkte Licht durch Reflektionen von Häusern oder Bäumen diffus und ist somit für Solarzellen schwierig zu nutzen. Speziell Hochhäuser verbrauchen viel Energie, bieten jedoch wenig Platz auf ihren Dächern oder in naheliegenden Gebieten, um Solarzellen zu installieren. [1, 2] Zusätzlich ist für eine optimale Ausbeute die Südausrichtung mit einer Neigung zwischen 30° und 45° notwendig, nicht aber wünschenswert. [3] Diese Einstrahlung ist zwischen Hochhäusern nicht zu gewährleisten. Mithilfe der LSC-Technologie lassen sich neue Flächen zur Energiegewinnung an der Fassade und an den Fenstern nutzbar machen.

Abb. 1:
Schema Luminescent Solar Concentrator (LSC)



1

Funktionsweise LSC und chromophorer Materialien

Die LSC Technologie besteht in einfachster Form aus einer Polymer- oder Glasplatte (hier ist auf die Transparenz und Kompatibilität des Matrixmaterials zum eingebrachten Material zu achten [1]).

In diese Platte werden lumineszente Materialien ein- oder aufgebracht. [4] Die eingebrachten chromophoren Materialien absorbieren direktes oder diffuses Licht und emittieren im Anschluss Licht mit größerer Wellenlänge. Durch Totalreflektion innerhalb der Platte werden diese emittierten Lichtstrahlen zum Rand transportiert. Das Licht einer Fensterfläche wird auf die Stirnflächen konzentriert und trifft dort auf Photovoltaikzellen. Diese wandeln das auftreffende Licht in Elektrizität um. [1, 2, 4, 5] Das Schema einer LSC-Einheit ist in **Abbildung 1** dargestellt.

Als chromophore Materialien werden Farbstoffe, Materialien aus der Gruppe der Lanthanoide oder Halbleiter Quantenpunkte, sogenannte Quantum Dots (QDs) eingesetzt. [1, 2] Diese Materialien sollten möglichst viele Photonen sammeln und eine hohe Stokes-Verschiebung (Differenz/Verschiebung der absorbierten zur emittierten Wellenlänge) besitzen, um eine kleinstmögliche Reabsorption zu gewährleisten. Bei kleinen Stokes-Verschiebungen absorbiert das chromophore Material die emittierte Wellenlänge und führt zu einer Färbung des LSC. [1, 4, 5] Die Effizienz des LSCs hängt ebenfalls stark von optimal auf die Wellenlängen angepassten Solarzellen ab. [1, 6] Um eine hohe Stokes-Verschiebung zu erreichen, wurden bisher zum Beispiel QDs durch einen Kern-Schale-Aufbau (PbSe/CdSe) oder mit dicker Schale (CdSe/CdS hier jedoch starke Einfärbung) verwendet. [5]

Umsetzung LSC

In diesem Projekt sollen neu entwickelte lumineszente QDs in eine polymere Matrix eingebracht und als Folie auf die innenliegende Seite einer Mehrfachverglasung aufgebracht werden. Das Fraunhofer IAP entwickelt in Potsdam nah-infrarot emittierende Kupfer-Indium-Sulfid ($CuInS_2$, (CIS)) QDs, die zur besseren Verarbeitung in Polymerwachs (PE) eingebracht und später compoundiert werden. Die dispergierten Partikel absorbieren die einfallenden Photonen vom UV- bis zum sichtbaren Spektralbereich, welche anschließend „rotverschoben“ wieder emittiert werden. An den Stirnflächen der beschichteten Gläser sind hocheffiziente Galliumarsenid (GaAs) Solarzellen angeordnet.

Um die QDs in eine Folie zu bringen, werden Polymer-Compounds (LDPE; PVB) an einem Haake MiniLab 2 hergestellt und anschließend als Folie extrudiert. Die erste Folie (LDPE) wurde mithilfe einer UV-Lampe einem ersten Funktionstest unterzogen (**Abb. 2**). Die rote Färbung ist ein erstes Indiz für eine funktionsfähige Folie. Die Optimierung der Konzentration der QDs in der Folie und die Dicke der Folie wird derzeit mittels Fluoreszenzspektroskopie vorgenommen. Außerdem muss für die Funktion des Fensters ein Lichttransmissionsgrad von 70-80% erreicht werden, was mittels Transmissionsmessung geprüft wird.

Die weiteren notwendigen elektrischen Komponenten sollen direkt in den Fensterrahmen integriert werden. Somit sind diese im Fensterverbund nicht mehr sichtbar. Das Ziel ist die Erweiterung des derzeitigen Standes der Technik im Bereich LSC, insbesondere im Bereich Effizienz, Leistung, Systemgröße und Herstellung in praxistauglicher Größe und die Kopplung und Integration der Einzelkomponenten. Um die neue Technik zu evaluieren, werden Prototypen gefertigt, welche im Einsatz in einem Wohnungsunternehmen getestet werden sollen.

Herausforderungen

Zur Auslegung des Gesamtkonzeptes ist eine enge Zusammenarbeit aller Beteiligten innerhalb des umfangreichen Verbundprojektes notwendig, um die Kompatibilität aller Teilsysteme zu gewährleisten und diese in einem Gesamtsystem koppeln zu können. Hierzu gehören das LSC-System inklusive aller elektrischen Systeme, der Glasrandverbund, das Fensterrahmensystem sowie Anforderungen an die praktische Nutzung der Fenster im Einsatz.

Um dies zu erreichen, müssen die CIS-QDs im Laborprozess skaliert und anschließend schonend (ohne Funktionsverlust) zu Folien verarbeitet werden. Diese sollen eine möglichst hohe Transparenz besitzen. Im Bereich der Solarzellen und der Elektronik muss neben der Wärmeableitung aufgrund verschiedener Wärmeausdehnung auch die optische Kopplung von Glasscheibe zur Solarzelle verbessert werden. Hierfür sollen optische Silikone verwendet werden, die zusätzlich zur Kopplung die mechanische Belastung der Solarzellen verringern. In diesem Bereich ist zusätzlich die Abdichtung des Fensterinnenraums angebracht, welche nicht zwingend kompatibel mit Silikonen ist. Dazu kommt, dass mit der Folie, den Solarzellen und der Elektronik neue Komponenten in den Innenraum hinzugefügt werden. Dies muss auf Serientauglichkeit getestet werden. Hierfür werden z.B. Standardrahmen verwendet. Dies ermöglicht zusätzlich das Testen des Demonstrators im Regelbetrieb und erleichtert den Einbau. Dabei dürfen die typischen Funktionen „Öffnen“, „Kippen“ und „Schließen“ sowie die Transparenz möglichst nicht beeinträchtigt werden. Zur Einbringung der Elektrik müssen Vorkehrungen gegen eindringende Feuchtigkeit im Rahmen getroffen werden. Die Verwendung des erzeugten Stroms z.B. als direkte Einspeisung in die Haustechnik (wie elektrische Rollläden und weitere Verbraucher in der Wohnung) ist im Gespräch.

Das CoSoWin-Verbundprojekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Die Verbundpartner sind die Fraunhofer Gesellschaft (Fraunhofer IAP, Fraunhofer ISE), Technoform, Vonovia, AzurSpace, Walter Fenster + Türen, Isolar Glas, xCave Technology sowie das Institut für Werkstofftechnik – Kunststofftechnik der Universität Kassel.

Abb. 2: Sichtprüfung der LSC-Folie (LDPE) mit Hilfe einer UV-Taschenlampe (Wellenlänge 395 nm)

Elektrochromie

Systeme mit elektrochromer Funktion zeichnen sich dadurch aus, dass sie bei Anlegen von elektrischen Gleichspannungen reversibel ihre Transmissionseigenschaften im sichtbaren Spektralbereich verändern. Es handelt sich dabei um elektrochemische Zellen, innerhalb derer eine Redoxreaktion stattfindet, wodurch die Farbe des elektrochromen Materials verändert wird. Das macht die Integration dieser Funktion insbesondere in Fensterscheiben von Gebäuden oder Fahrzeugen zur Licht- und Wärmeregulation interessant. Neben der Anwendung in der Gebäudeverglasung sind Produkte auch in anderen Bereichen seit längerer Zeit bekannt, z.B. als Rückspiegel im Automobil (Blendschutz), als einfache Segmentanzeige zur Preisauszeichnung (Display) oder als Augenschutz (Ophtalmik). Am Fachgebiet Kunststofftechnik wurde in der Vergangenheit ein elektrochromes Mehrschichtsystem (**Abb. 3**) weiterentwickelt, das auf einem in Lösungsmittel dispergierten, leitfähigen Polymer (PEDOT:PSS) mit elektrochromen Eigenschaften basiert. Im Allgemeinen besteht ein solches System des Batterietyps [7] aus zwei Halbzellen, die über einen Elektrolyten verbunden sind. Elektrolyte sind elektrisch isolierend, aber ionenleitend. Beide Halbzellen sind auf einem transparenten Substrat wie Glas oder Folie aufgebaut, auf das zunächst eine dünne elektrisch leitfähige Schicht, meist Indiumzinnoxid (ITO), aufgebracht wird. Die eine Halbzelle wird um die elektrochrome Schicht ergänzt und bildet die Arbeitselektrode, die andere Halbzelle wird um eine Ionen-Speicherschicht ergänzt und bildet die Gegenelektrode.

Die elektrochrome Zelle wird an den Elektroden der beiden Halbzellen kontaktiert und mit einer Spannungsquelle verbunden. Bei Anlegen einer Gleichspannung können sich im Elektrolyt gelöste Ionen zwischen der elektrochromen und der Ionen-Speicherschicht bewegen und damit auch den Elektronenhaushalt des elektrochromen Materials verändern. Diese Veränderung geht einher mit einer Änderung des Absorptions-/Transmissionsverhaltens des Materials. Vier Typen elektrochromer Materialien sind bekannt, Metalloxide (z.B. WO3, TiO2, V2O5), das unter Preußisch Blau bekannte Eisenpigment $Fe_4[Fe(CN)6]_3$, Viologene und organische leitfähige Polymere (z.B. Polyanilin, Polypirrol, PEDOT) [8]. Die Ionen-Speicherschicht kann sich im Schaltbereich neutral verhalten oder aber ebenfalls elektrochrome Eigenschaften besitzen, um z.B. die Einfärbung zu verstärken. Besondere Aspekte des Systems in **Abbildung 3** sind das Substrat aus Polycarbonat und der vernetzende Elektrolyt. Polycarbonat besitzt für optische Anwendungen besonders gute optische Eigenschaften, insbesondere im Vergleich zu den kommerziell verfügbaren PET Folien mit ITO-Beschichtung, die häufig für folienbasierte elektrochrome Systeme verwendet werden. Der vernetzende Polymerelektroyt (Gelelektrolyt) ist im Vergleich zu häufig eingesetzten flüssigen Elektrolyten mechanisch stabil, verformbar und muss nicht gegen Auslaufen abgedichtet werden.

Abbildung 5 zeigt eine elektrochrome Zelle in verschiedenen Schaltzuständen, wobei der so genannte Transmissionsschalthub bei ca. 24% liegt (69% Lichttransmissionsgrad im Hellzustand und 45% im Dunkelzustand).

Das Redoxverhalten einer elektrochromen Zelle kann anhand eines Cyclovoltammogramms untersucht werden. Hierbei wird ein Spannungsbereich abgefahren und der resultierende Strom aufgezeichnet. **Abbildung 6** zeigt beispielhaft ein Cyclo-

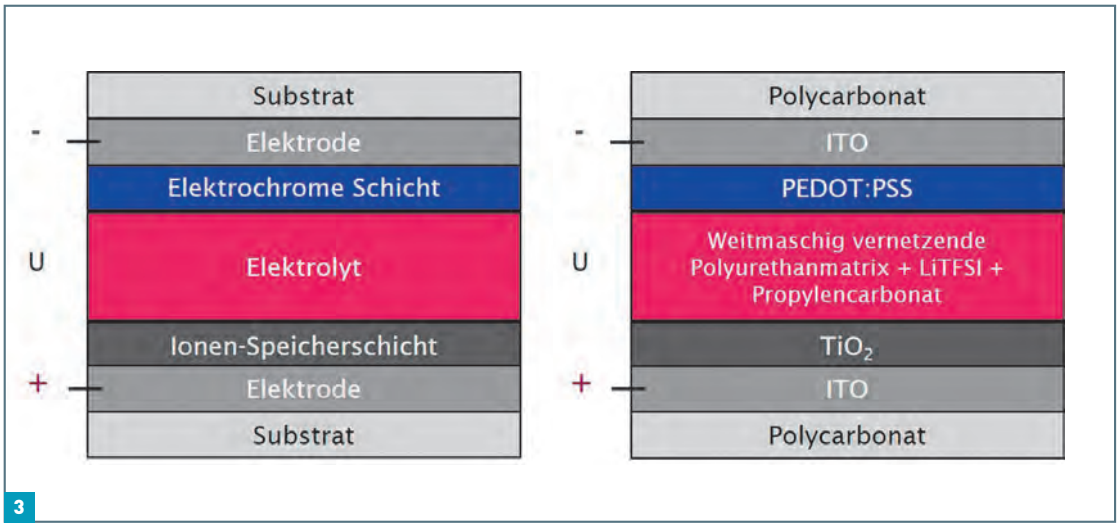


Abb. 3: Elektrochrome Zelle des Batterietyps **(links)** und aktuelle Konfiguration am IfW **(rechts)**

Abb. 4: Elektrochrome Zelle mit aktiver Fläche von 2 x 4 cm, im entfärbten Zustand bei +2V **(links)** und im eingefärbten Zustand bei -0,5V **(rechts)**

voltammogramm von -1,8V bis 4V mit ausgeprägten Strompeaks bei ca. 0V (Einfärbung) und 2,5V (Entfärbung).

Der Fokus des IfW liegt allerdings nicht auf der Entwicklung dieser Systeme selbst, sondern in deren Implementierung in die Kunststoffverarbeitungsprozesse (z.B. zur Weiterverarbeitung zu dreidimensionalen Scheiben), woraus sich hohe Anforderungen bzgl. der thermischen und mechanischen Belastbarkeit der elektrochromen Zellen ergeben [9, 10]. Dazu wurden bereits ein BMBF Forschungsvorhaben zum Thermoformen der Zellen (KELTOP) bearbeitet und ein weiteres BMBF Projekt zum Hinterspritzen dieser Systeme (ProTecK) in Kooperation mit den Firmen 3Pi und Plastic Design. Zurzeit sind zwei Projekte zum Thema in Bearbeitung. Zum einen werden Alterungsuntersuchungen im Rahmen von Bewitterungsversuchen am elektrochromen Mehrschichtsystem und dessen Komponenten, insbesondere des eingesetzten Elektrolyten, durchgeführt (DFG gefördert). Denn derartige Systeme sind im Außeneinsatz insbesondere schwankenden und hohen Temperaturen, Feuchtigkeit und UV-Strahlung ausgesetzt. Systeme für einen solchen Einsatz müssen entsprechend beständig sein, um eine ausreichende Lebensdauer zu gewährleisten.

Im zweiten Projekt sollen elektrochrome Mehrschichtfolien mit einem Kunststoff hinterprägt werden (**vgl. Abb. 6**), um dreidimensional geformte Scheiben mit elektrochromer Funktion zu erhalten (AIF/IGF gefördert). Das Hinterprägen als Kunststoffverarbeitungsprozess wird häufig für optische Anwendungen verwendet. Hierbei wird die Kavität mit einem geringen Druck partiell gefüllt und im zweiten Schritt der Prägehub aufgebracht, wodurch die Kunststoffschmelze die Kavität vollständig füllt. Das Spritzprägeverfahren wird bisher sowohl für die verzugsfreie Herstellung von dickwandigen Bauteilen mit hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit, als auch für sehr dünnwandige Teile mit langen Fließwegen eingesetzt [11]. Zusätzlich kann durch die Variation des Prägehubs die eingebrachte Energie in die verschiedenen Schichten reguliert werden. Besonders die elektrisch leitfähige ITO-Schicht ist hierbei sehr temperaturempfindlich,

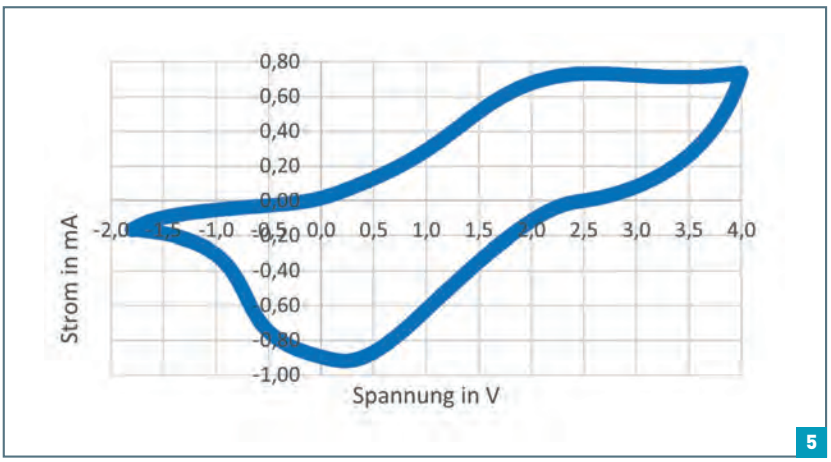
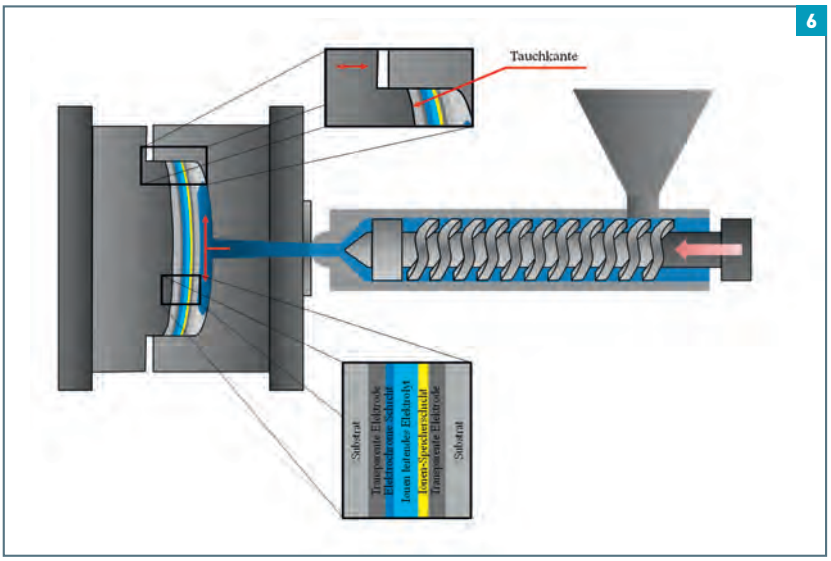


Abb. 5: Redoxverhalten einer elektrochromen Zelle im Cyclovoltammogramm mit dem Einfärbepeak bei ca. 0V und dem Entfärbepeak bei ca. 2V

wodurch bei zu hohen Temperaturen Risse in der Schicht entstehen. In dem Projekt werden die Prozess-Eigenschafts-Beziehungen zunächst an einem Bauteil mit aktiver Fläche von 4 x 4 cm untersucht. Später soll aufbauend auf diesen Erkenntnissen ein Upscaling auf ein Bauteil mit deutlich größerer aktiver Fläche von 100 – 150 cm² stattfinden.

Neben Untersuchungen zu mechanischen und thermischen Eigenschaften des Systems und dessen Komponenten wird auch der Spritzprägeprozess im Vorhinein simuliert, um Erkenntnisse

Abb. 6: Beispielhafte Darstellung eines Spritzprägewerkzeugs zum Hinterprägen einer elektrochromen Mehrschichtfolie



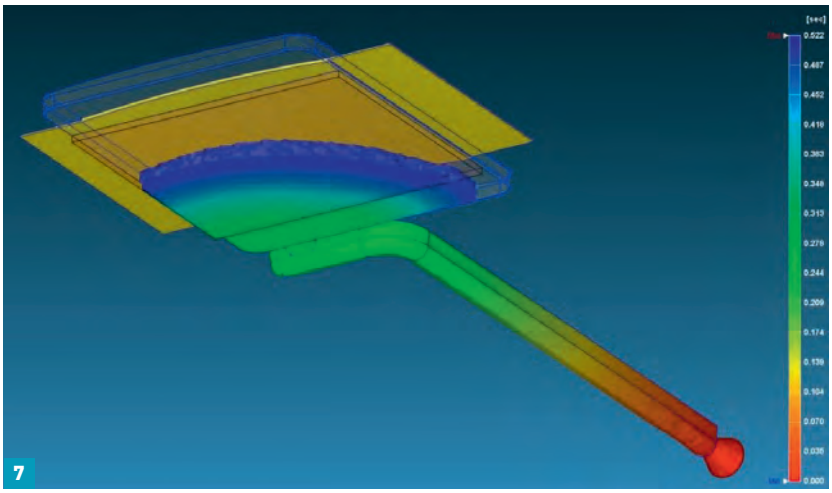


Abb. 7:
Simulationsergebnis einer Bauteilfüllung via Spritzprägen

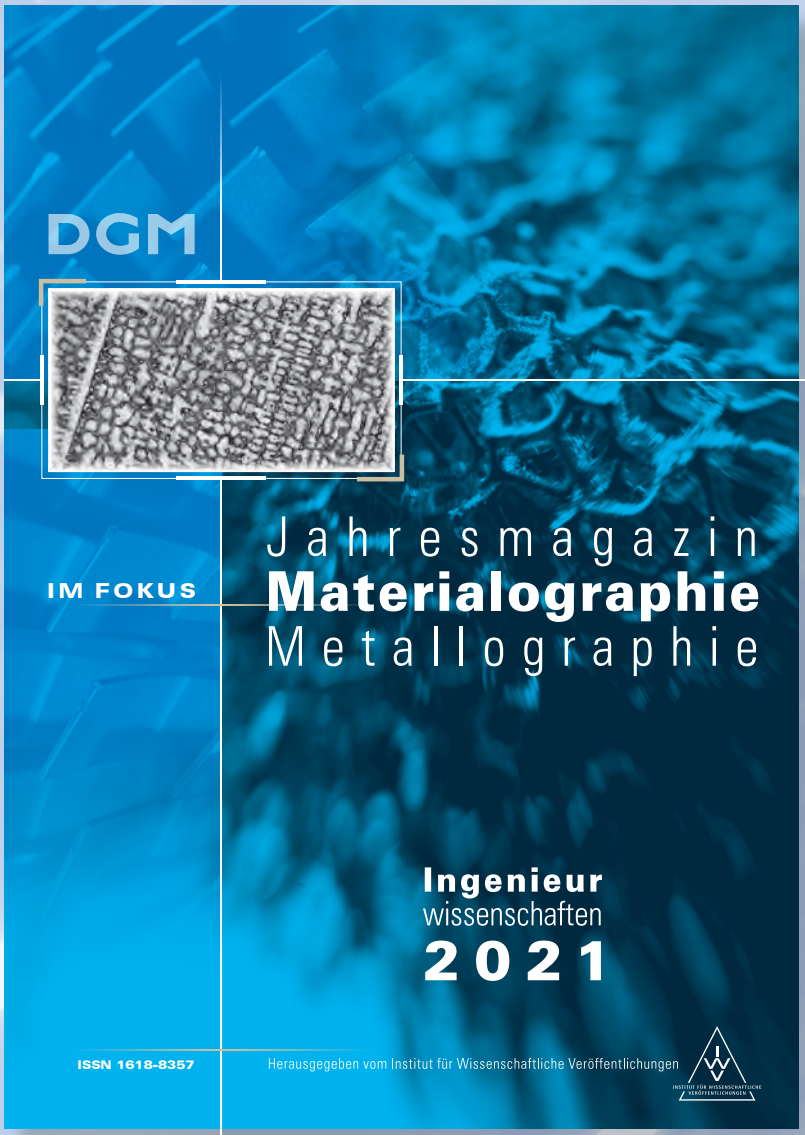
über die Belastung des Systems und dessen Auslegung zu erlangen. In der **Abbildung 7** ist eine partielle Füllung der Werkzeugkavität dargestellt. Gelb eingefärbt ist hierbei die elektrochrome Zelle, welche nach dem Prägen mit einem kleinen Radius versehen ist. Hervorzuheben ist dabei die hohe Schmelzetemperatur des verwendeten Spritzprägematerials Polycarbonat von etwa 300°C und deren Auswirkungen auf die verschiedenen Funktionsschichten. Die Simulationsergebnisse werden mit späteren Versuchsdaten verglichen. Zu diesem Zweck werden im Werkzeug Druck- und Temperatursensoren integriert.

LITERATUR

1. LI, Yilin; ZHANG, Xueqiao; ZHANG, Yongcao; DONG, Richard; LUSCOMBE, Christine K.: Review on the Role of Polymers in Luminescent Solar Concentrators. In: Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry 57 (2019), Nr. 3, S. 201–215
2. BERGREN, Matthew R.; MAKAROV, Nikolay S.; RAMASAMY, Karthik; JACKSON, Aaron; GUGLIELMETTI, Rob; MCDANIEL, Hunter: High-Performance CuInS 2 Quantum Dot Laminated Glass Luminescent Solar Concentrators for Windows. In: ACS Energy Letters 3 (2018), Nr. 3, S. 520–525
3. SCHLADER, W.; PFEIFER, A. (Mitarb.); SCHMIDT, L. (Mitarb.); ERBER, S. (Mitarb.); KONRAD, V. (Mitarb.): Solaranlagen planen und gestalten: Ein Leitfaden zur Errichtung von thermischen Solaranlagen und Photovoltaikanlagen. 5. Aufl., 2020
4. MORAITIS, P.; SCHROPP, R.E.I.; VAN SARK, W.G.J.H.M.: Nanoparticles for Luminescent Solar Concentrators - A review. In: Optical Materials 84 (2018), S. 636–645
5. MEINARDI, Francesco; MCDANIEL, Hunter; CARULLI, Francesco ; COLOMBO, Annalisa; VELIZHANIN, Kirill A.; MAKAROV, Nikolay S.; SIMONUTTI, Roberto; KLIMOV, Victor I.; BROVELLI, Sergio: Highly efficient large-area colourless luminescent solar concentrators using heavy-metal-free colloidal quantum dots. In: Nature nanotechnology 10 (2015), Nr. 10, S. 878–885
6. VAN SARK, Wilfried G. J. H. M.; BARNHAM, Keith W. J.; SLOOFF, Lenneke H.; CHATTEN, Amanda J.; BÜCHTEMANN, Andreas; MEYER, Andreas; MCCORMACK, Sarah J.; KOOLE, Rolf ; FARRELL, Daniel J.; BOSE, Rahul; BENDE, Evert E.; BURGERS, Antonius R.; BUDEL, Tristram; QUILITZ, Jana; KENNEDY, Manus; MEYER, Toby; DONEGÁ, C. De Mello; MEIJERINK, Andries; VANMAEKELBERGH, Daniel: Luminescent Solar Concentrators--a review of recent results. In: Optics express 16 (2008), Nr. 26, S. 21773–21792
7. RAUH, R.David: Electrochromic windows: an overview. In: Electrochimica Acta 44 (1999), Nr. 18, S. 3165–3176
8. MORTIMER, Roger J.; ROSSEINSKY, David R.; MONK, Paul M. S.: Electrochromic Materials and Devices. Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013
9. DESJEAN, Aline: Charakterisierung, Beurteilung und Modellierung des Langzeitverhaltens einer elektrochromen Kunststoffverscheibung. Dissertation. Kassel, 2014 (Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik/Kunststofftechnik)
10. GIESEN, Ralf-Urs: Beitrag zur Herstellung 3-dimensionaler Kunststoffscheiben mit integrierter Funktion zur Veränderung der Transparenz durch Elektrochromie. Dissertation. Kassel, 2017 (Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik/Kunststofftechnik)
11. HOPMANN, Christian; MICHAELI, Walter: Einführung in die Kunststoffverarbeitung. 7. Aufl. s.l. : Carl Hanser Fachbuchverlag, 2015

KONTAKT

UNIVERSITÄT KASSEL
Institut für Werkstofftechnik, Kunststofftechnik
Christopher Johannes M.Sc.
Mönchebergstraße 3, 34125 Kassel
Tel: +49 (0)561 804-2773
christopher.johannes@uni-kassel.de
www.ifw-kassel.de



Anfragen zur kostenfreien Übersendung von Belegexemplaren oder zwecks redaktioneller Mitarbeit richten Sie bitte an

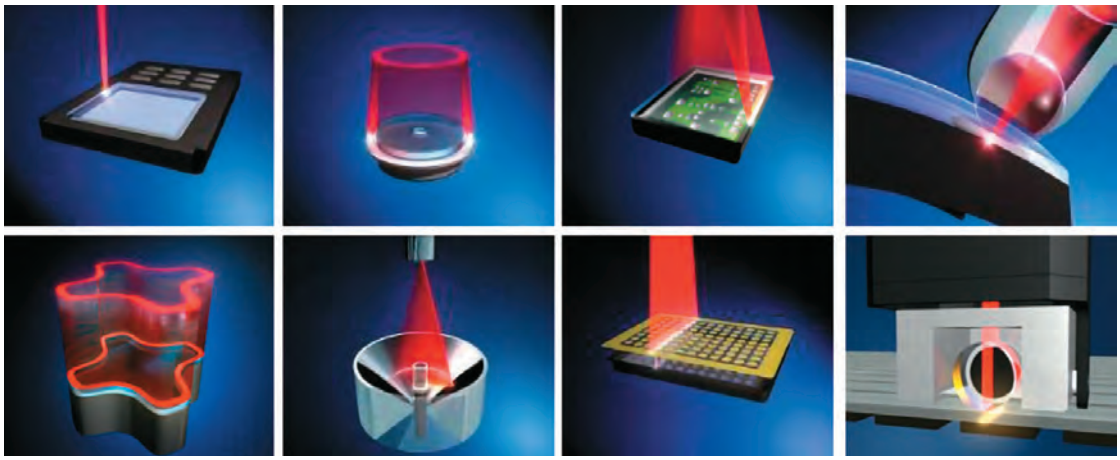
Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)
Finkenstraße 10 · D–68623 Lampertheim
www.institut-wv.de

Telefon 06206 939-0 · info@alphapublic.de

LASERSCHWEISSEN VON KUNSTSTOFFEN

LEISTER TECHNOLOGIES AG BIETET DIE GRÖSSTE VERFAHRENS-VARIANZ MIT EIGENS HIERFÜR ENTWICKELTEN LASERSYSTEMEN AN

Die Business Line Laser Plastic Welding (LPW) stellt Handarbeitsplätze und Integrationslösungen für das Laserschweissen von Kunststoffen her. Leister setzt dabei auf die kontinuierliche Weiterentwicklung von Verfahren und Schweisssystemen um auch spezifische Lösungen bieten zu können. Durch neue, speziell für Integrationslösungen, entwickelte Lasersysteme wird dies deutlich.



Laserschweissen von Kunststoffen hat sich als zuverlässiges Fügeverfahren im Markt etabliert. Besonders Komponenten, wo Dichtheit gefordert wird, werden immer häufiger mit dieser Fügetechnik geschweisst. Das Prinzip des Schweissens mit dem Laser ist denkbar einfach. Die Umsetzung ist jedoch komplexer, da die Wahl des Schweissverfahrens von Faktoren wie Produktdesign und Produktionsanforderungen abhängig ist.

Das Prinzip des Laserdurchstrahlschweissens beruht auf zwei optisch unterschiedlichen Kunststoffen, die im Überlapp geschweisst werden. Die Bauteile sind hierbei in einer Spannvorrichtung unter Druck gespannt und werden entlang der Kontur bestrahlt. Die Strahlungsenergie durchdringt den transparenten Partner und wird vom absorbierenden in Wärme umgewandelt. Dieser schmilzt auf und überträgt die Wärme in den Kontaktflächen in den transparenten Partner. Sobald dieser ebenfalls aufgeschmolzen ist, entsteht beim Abkühlen eine feste, optisch ansprechende Schweissnaht.

Leister ist einer der Pioniere, die diese Technologie zur Industriereife geführt haben. Über die Jahre sind hierbei Verfahren und Verfahrensvarianten entwickelt worden, welche sich hauptsächlich durch Strahlformung und –führung unterscheiden. Die Standardverfahren sind:

- **Konturschweissen**
  Ein punktförmiger Laserstrahl wird entlang der Schweisskontur über Bewegung der Optik oder des Bauteils abgefahren.

- **Simultanschweissen**
  Die gesamte Schweisskontur wird auf einmal bestrahlt.

- **Quasisimultanschweissen**
  Die Schweisskontur wird mit einem punktförmigen Laserstrahl mehrfach überfahren und somit bis zum gleichzeitigen Schmelzen erwärmt.

Weiterführende Varianten dieser Verfahren sind für spezielle Anwendungen entwickelt worden.

- **Globo-Schweissen**
  Globo-Schweissen ist eine Weiterentwicklung des Konturverfahrens, um grosse endlose

KONTAKT

LEISTER TECHNOLOGIES AG
Laser Plastic Welding
Riedstrasse
CH-6060 Sarnen
Tel.: +41 41 662 74 74
Fax: +41 41 662 74 16
E-Mail: leister@leister.com
www.leister.com

oder 3D-Bauteile zu schweissen. Eine luftgelagerte Kugel dient hierbei als letztes optisches Element und als Andruckwerkzeug. Sie ist in eine robotertaugliche Optik eingebaut und wird durch geschickte Programmierung entlang der Kontur geführt.

- **Rollenschweissen**
  Das Rollenschweissen ist eine Abwandlung vom Globo-Schweissen. Hiermit sind breitere Schweissnähte und somit grössere Festigkeiten erreichbar. Allerdings sind komplexe 3-D Konturen nicht abfahrbar.

- **Maskenschweissen**
  Ein linienförmiger Laserstrahl wird über eine Maske geführt, die entlang der Schweisskontur Strahlung transmittiert und ansonsten reflektiert. Dadurch sind sehr kleine Schweissnahtbreiten, aber auch komplexe Flächen abbildbar. Das Verfahren ist eine Mischung aus Kontur- und Simultanschweissen.

- **Radialschweissen**
  Dies ist ein Simultanschweissprozess für rotationssymmetrische Bauteile, das ohne Rotation von Optik oder Bauteil funktioniert. Eine ideale Lösung für Konnektoren an komplex geformten Schläuchen, die sich schlecht drehen lassen.

- **DOE-Schweissen (Diffractive Optical Element)**
  Mit einem DOE lassen sich komplexe Strukturen simultan abbilden. Es wird im Simultanschweissen verwendet oder als strahlformendes Element beim Konturschweissen.

Unabhängig welche Variante die beste Lösung bietet, wird das Verfahren entweder in einem Standalone- oder einem Integrationssystem betrieben.

Speziell für Integrationslösungen hat Leister die neue Baureihe Basic S entwickelt, die kostengünstig Diodenlaser bis zu 300 W Ausgangsleistung luftkühlt.

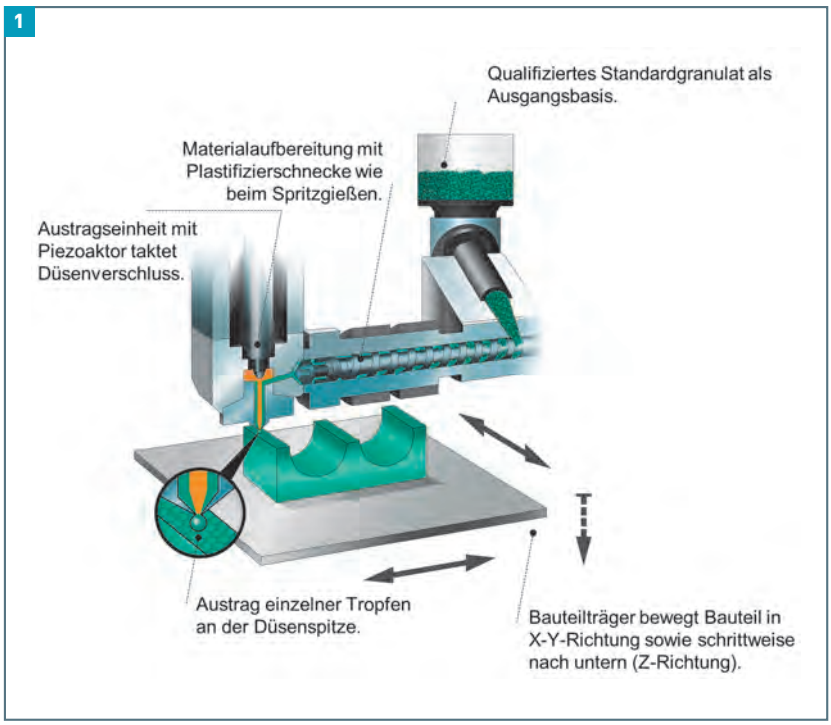
UNTERSUCHUNG DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN, HINTERGRÜNDE UND WEITERE ENTWICKLUNGEN IM KUNSTSTOFF FREIFORMEN

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer, Felix Hecker, Universität Paderborn / Kunststofftechnik Paderborn

Als additives Fertigungsverfahren ermöglicht das Kunststoff Freiformen Bauteile ohne formgebende Werkzeuge zu erzeugen. Der einzigartige Austragungsmechanismus erfordert bisher unbekannte Prozessparameter. Daher müssen für ein umfangreiches Prozessverständnis zunächst die Auswirkungen der Prozessparameter des Kunststoff Freiformens auf die mechanischen Eigenschaften untersucht werden.

In der Kunststofftechnik der Universität Paderborn (KTP) werden Kompetenzen in diversen Bereichen der Kunststofftechnologie und der Kunststoffverarbeitung gebündelt. Unter anderem wird in den Bereichen Extrusion, Spritzguss und einer Vielzahl an verschiedenen Fügetechniken geforscht und gelehrt. Neben den konventionellen und alt bekannten Herstellungsverfahren beteiligt sich das KTP am Direkt Manufacturing Research Center (DMRC) und dem Paderborner Institut für Additive Fertigung (PIAF). Dort ist das KTP für die Bereiche Fused Deposition Modeling, Digital Light Processing (DLP) und Kunststoff Freiformen (KF) verantwortlich.

Abb. 1: Darstellung des Aufbaus eines Plastifitzieraggregats [3].



Die Additive Fertigung und das Kunststoff Freiformen

Die Additive Fertigung, auch bekannt unter dem Begriff „3D-Druck“, bezeichnet Fertigungsverfahren, in denen Bauteile durch schichtweisen Aufbau erzeugt werden. Dies geschieht in der Regel durch definiertes Auftragen von Material. Der schichtweise Aufbau bietet aufgrund der uneingeschränkten Zugänglichkeit jeder Schicht eine große Gestaltungsfreiheit und das Potential für komplexe Geometrien (z.B. Hinterschneidungen, innenliegende Hohlräume, Gitterstrukturen und Freiformflächen). Zudem werden in der Additiven Fertigung für die Realisierung von Bauteilen keine formgebenden Werkzeuge benötigt. Somit ist es möglich, Bauteile mit Losgröße eins und losgelöst von der Bauteilkomplexität im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren wirtschaftlich herzustellen. Dies ist vor Allem in Bereichen in denen die Individualisierung der Bauteile im Vordergrund steht von Vorteil [1].

Das Kunststoff Freiformen mit dem „freeformer“ der Firma Arburg GmbH & Co. KG ist mit der Vorstellung der Anlage im Jahr 2013 eines der jüngeren additiven Fertigungsverfahren. Es verbindet ein aus dem Spritzguss bekanntes Plastifizieraggregat mit einer neu entwickelten Austragseinheit (**s. Abb. 1**). Diese ermöglicht die Erzeugung feiner Kunststofftropfen. Im Zusammenspiel mit einer beweglichen

Bauplattform werden die Tropfen definiert abgelegt. Ein bedeutender Vorteil des Kunststoff Freiformens ist, dass mittels des Plastifizieraggregats Standardgranulate verwendet werden. So können zum Beispiel für Prototypen die Serienmaterialien ohne eine vorherige Überführung in ein Filament oder Pulver verarbeitet werden [2].

Im Prozess rieselt das Standardgranulat aus dem Materialtrichter in die Einzugszone der Drei-Zonen-Schnecke im Plastifizieraggregat. Der Kunststoff wird durch die Rotation der Schnecke in das Materialreservoir gefördert und dabei plastifiziert. Am Ende des Materialreservoirs befindet sich die Düse, die von einem Nadelverschluss verschlossen wird. Nach dem Dosiervorgang wird durch die axiale Bewegung der Schnecke ein Druck in dem Materialreservoir aufgebaut. Durch wiederholtes Öffnen und Schließen der Düsenöffnung werden einzelne Tropfen aus der Düse ausgetragen. Die Bewegung des Düsenverschlusses wird dabei durch einen Vielschichtpiezoaktor realisiert. So ist es möglich, Tropfen mit einer Frequenz von bis zu 250 Hz auszutragen.

Der freeformer verfügte bei Markteinführung über zwei Plastifizieraggregate. Statt des Ablegens eines Stützmaterials kann das zweite Aggregat auch dazu verwendet werden eine zweite Baumaterialkomponente zu verarbeiten. Hierbei können nicht nur unterschiedliche Farben in einem Bauteil realisiert werden, sondern zum Beispiel auch Hart-Weich-Kombinationen. Dabei muss darauf geachtet werden, die Bauteile möglichst ohne Überhänge zu konstruieren, damit nicht mit Stützmaterial gearbeitet werden muss. Mittlerweile sind auch Anlagen mit drei Plastifizieraggregaten erhältlich, was diese Problematik löst.

Prozessparameter und Materialqualifizierung

Für die Fertigung von Bauteilen im Kunststoff Freiformen müssen zunächst materialabhängige Prozessparameter definiert werden. Zu Beginn werden die Prozesstemperaturen für die einzelnen Zonen der Schnecke, die Düse sowie den Bauraum festgelegt. Im Anschluss daran wird der so genannte Austrag ermittelt. Dieser Wert bestimmt die Tropfengröße und beschreibt den Weg, den die Schnecke je Tropfen axial bewegt wird. Auf Basis des Austragswerts wird auch der Druck im Materialreservoir geregelt. Im nächsten Schritt wird der Formfaktor definiert. Dieser legt den Abstand der Tropfen zueinander in X- und Y-Richtung fest und wird standardmäßig aus dem Quotienten der Tropfenbreite und -höhe beim jeweils eingestellten Austrag gebildet. Somit hat der Formfaktor einen großen Einfluss auf den Füllgrad der zu fertigenden Bauteile. Bei einem zu geringen Abstand zwischen den Tropfen kommt es zu einer Überfüllung, die sich in Wellenbildung auf der Bauteiloberfläche in der XY-Ebene äußert. Ist der Abstand zu groß treten Poren auf. Damit hat der Formfaktor einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von, mit dem Kunststoff Freiformen hergestellten, Bauteilen. Der Zusammenhang zwischen einzelnen Prozessparametern und deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Zugprüfkörpern des Typs 1B aus der DIN EN ISO 527-2 wurden in einer Untersuchung mittels eines statistischen Versuchsplans analysiert [4]. In der Untersuchung wurden folgende Prozessparameter berücksichtigt: Düsentemperatur, Bauraumtemperatur, Schichtdicke, Formfaktor und Überlapp. Mit dem Überlapp wird festgelegt, wie viel Prozent der Konturlinie des Bauteils von der Flächenfüllung überlappt wird.

Untersuchung der mechanischen Eigenschaften

Zielgrößen des statistischen Versuchsplans sind die Zugfestigkeit, der E-Modul und die Bruchdehnung. Die Auswertung des statistischen Versuchsplans zeigt, dass alle der fünf berücksichtigten Einflussgrößen einen Effekt auf die Bruchdehnung haben (**s. Abb. 2**). Die größten Effekte zeigen die Düsen- und

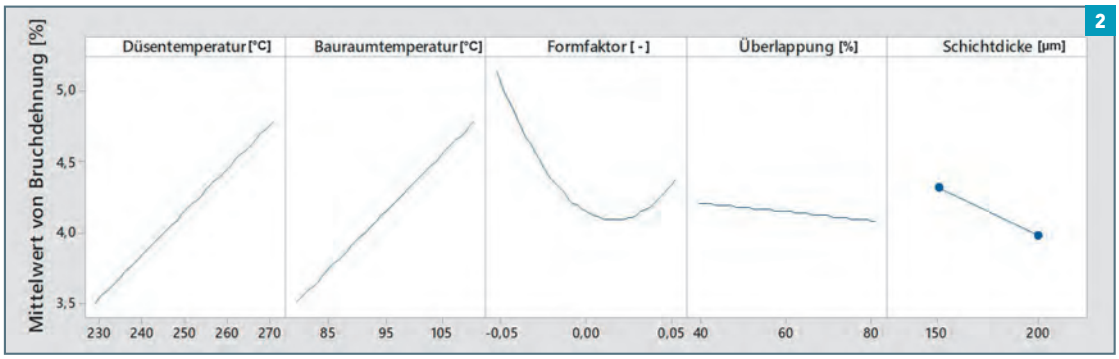


Abb. 2: Effekte der einzelnen Prozessparameter auf die Bruchdehnung.

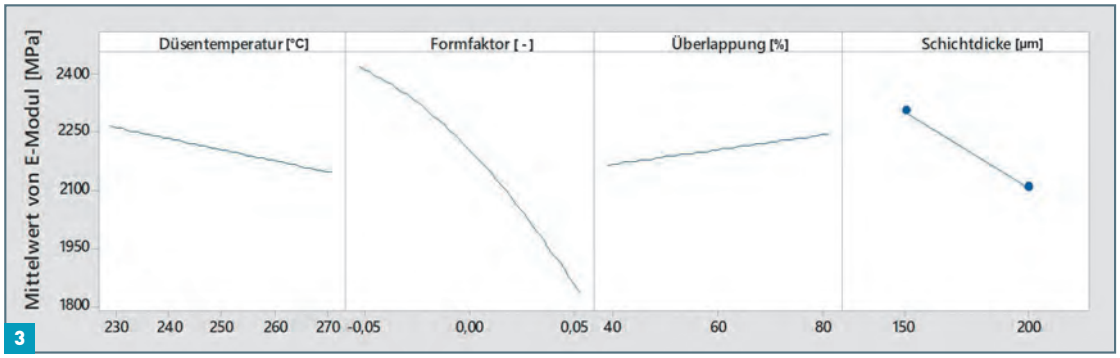


Abb. 3: Effekte der einzelnen Prozessparameter auf die Bruchdehnung.

Bauraumtemperatur, sowie der Formfaktor. Mit steigenden Düsen- und Bauraumtemperaturen nimmt auch die an den Zugprüfkörpern gemessene Bruchdehnung zu. Bei dem Formfaktor zeigt sich ein quadratischer Effekt. Bei einer optimierten Bauteilfüllung ist die Bruchdehnung geringer, als bei über beziehungsweise unterfüllten Zugprüfkörpern. Den nächstgrößeren Einfluss auf die Bruchdehnung zeigt die Schichtdicke. Die Schichtdicke von 150 µm liefert höhere Werte für die Bruchdehnung als die höhere Schichtdicke von 200 µm. Die geringste Auswirkung auf die Bruchdehnung hat der Überlapp. Mit steigender Überlappung der Kontur mit der Füllung nimmt die Bruchdehnung ab.

Für den E-Modul geben die Ergebnisse des statistischen Versuchsplans den Formfaktor, die Schichtdicke, die Düsentemperatur und die Überlappung als Faktoren mit einem Effekt an (**s. Abb. 3**). Der Formfaktor hat dabei den größten Effekt mit einem steigenden E-Modul bei zunehmender Bauteilfüllung resultierend aus einem geringeren Formfaktor. Wie bei der Bruchdehnung zeigen auch beim E-Modul geringere Schichtdicken bessere Werte. Eine zunehmende Düsentemperatur führt zu sinkenden E-Modulen, wohingegen ein größerer Überlapp zu höheren Werten führt.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung, dass der Formfaktor der Faktor mit dem größten Einfluss auf die Zugfestigkeit der Zugprüfkörper ist (**s. Abb. 4**). So nimmt die Zugfestigkeit mit steigendem Formfaktor und damit größer werdendem Abstand zwischen den Tropfen ab. Auf der anderen Seite führt ein geringer Formfaktor mit einem folglich kleineren Abstand zwischen den Tropfen aufgrund der höheren Füllung der Zugprüfkörper zu höheren Zugfestigkeiten. Auch die Düsentemperatur, der Überlapp und die Schichtdicke haben einen eindeutigen Einfluss auf die Zugfestigkeit. Lediglich die Bauraumtemperatur beeinflusst die Zugfestigkeiten nicht signifikant. Wie schon beim E-Modul und der Bruchdehnung führt die Schichtdicke von 150 µm zu höheren Werten als die Schichtdicke von 200 µm. Analog zum E Modul führt eine größere Überlappung zwischen Kontur und Füllung zu höheren Werten bei der Zugfestigkeit. Für die Düsentemperatur zeigt sich, dass sich eine höhere Düsentemperatur negativ auf die Zugfestigkeit auswirkt und diese damit geringer ausfällt.

Da eine abnehmende Zugfestigkeit mit steigender Düsentemperatur wider der Erwartung an die Ergebnisse ist, wurden im Nachgang weitere Untersuchungen zur Ursachenforschung für diesen Sachverhalt unternommen. Als möglicher Grund für die mit steigender Düsentemperatur abnehmende Zugfestigkeit wird eine mögliche thermische Schädigung des Materials in dem Prozess des Kunststoff Freiformens vermutet. Zu Beginn der Untersuchung

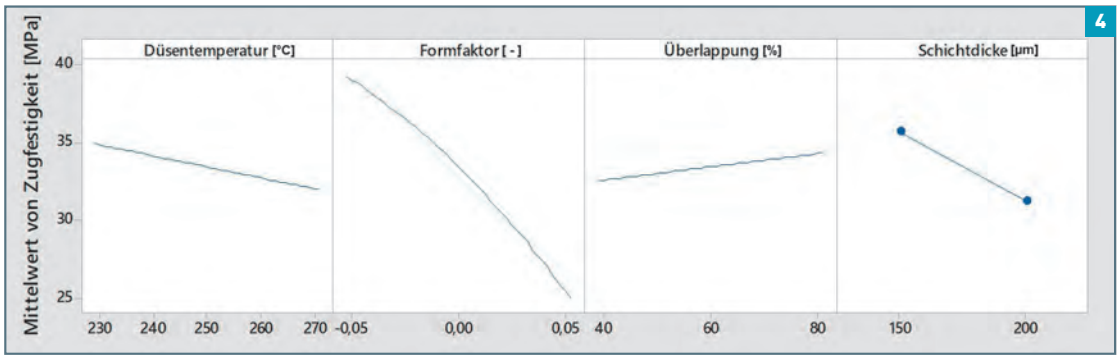


Abb. 4: Effekte der einzelnen Prozessparameter auf die Zugfestigkeit.

steht die Annahme, dass prozessbedingt die Verweilzeit des Materials bei Verarbeitungstemperatur im Vergleich zu konventionellen Herstellungsverfahren, wie zum Beispiel dem Spritzguss, sehr hoch ist. Bisher gab es jedoch keine Möglichkeit eine fundierte Einschätzung der Verweilzeit im Kunststoff Freiformen in Abhängigkeit von relevanten Prozessparameter zu treffen. Aus diesem Grund ist im Vorfeld der Untersuchungen eine Software entwickelt worden, die es durch Angabe der aufbereiteten Bauteildateien und einer breiten Auswahl an Prozessparametern (Schichtdicke, Austrag, Formfaktor, Überlapp etc.) ermöglicht, den Bauprozess virtuell präzise abzubilden. Die virtuelle Abbildung des Bauprozesses ermöglicht in der Theorie die Nachverfolgung der Verweilzeit eines jeden Tropfens. Um den Rechenaufwand zu reduzieren werden jedoch nicht einzelne Tropfen, sondern gesamte Rasterlinien betrachtet und ausgewertet.

Bei der Berechnung der Verweilzeit werden zunächst anhand der Prozessparameter Kontur- und Rasterlinien erzeugt und getrennt nach Bauteil- und Stützstruktur abgelegt. Die Funktion, welche die Berechnung der Verweilzeit durchführt, greift nun abhängig von der festgelegten Baureihenfolge und der aktuellen Schicht auf die Daten der Bauteil- und Stützstrukturen zu. Um aus diesen Daten die Verweilzeit bei kritischen Temperaturen bestimmen zu können, muss zunächst definiert werden, wie die thermische Schädigung berücksichtigt werden soll. Als Annahme ist in der Software daher das so genannte thermisch kritische Volumen definiert. Dieses umfasst das Volumen des Materialreservoirs, das direkten Kontakt zu den auf Düsentemperatur geheizten Elementen der Anlage hat (**s. Abb. 5**). Die Software berechnet wie lange jede einzelne Kontur- und Rasterlinie benötigt, dieses Volumen zu durchlaufen. Dabei werden Ablagegeschwindigkeit und Prozessunterbrechungen (Schichtwechsel, Wechsel zwischen Bau- und Stützmaterial, Dosiervorgänge etc.) berücksichtigt, um den Prozess möglichst genau abzubilden.

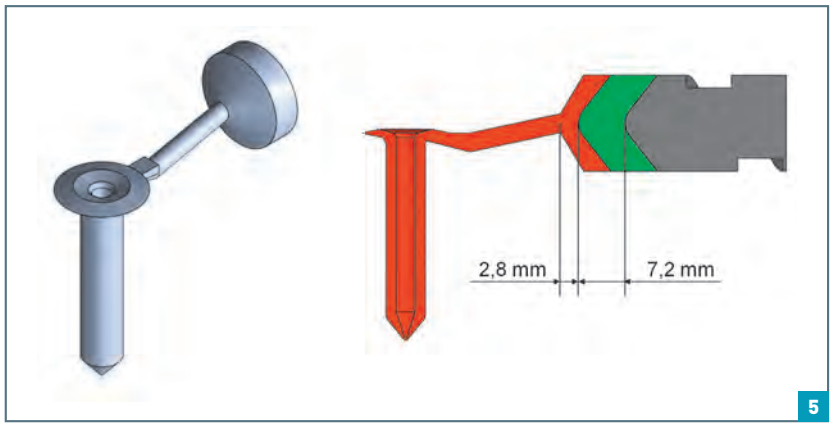
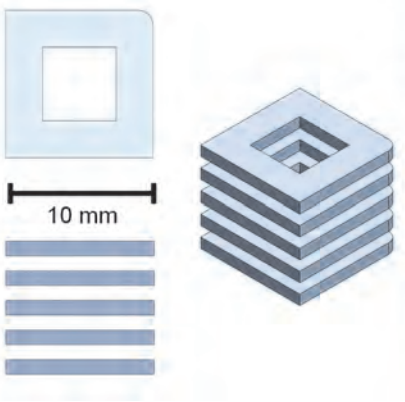


Abb. 5: CAD-Modell des angenommenen thermisch kritischen Volumens **(links)** und Schnitt durch das thermisch kritische Volumen **(rot)**, das thermisch unkritische Volumen **(grün)** und die Schnecke **(rechts)**.

Die Validierung wird anhand eines Demonstrators durchgeführt, der die Fähigkeit der Software bei der Verarbeitung komplexer Bauteile zeigt (**s. Abb. 6 links**). Für die Validierung wird der Demonstrator mit den Faktoren 1/1,5/3 skaliert und jeweils mit drei verschiedenen Formfaktoren gefertigt und berechnet. Als Bewertungskriterien werden die jeweils reale und berechnete Bauzeit und die Tropfenzahl aus der Summe der Bau- und Supportmaterialtropfen herangezogen. Die Ergebnisse der Validierung sind in **Abb. 6 (rechts)** mit der prozentualen und absoluten Abweichung zwischen den realen und den berechneten Werten angegeben.

Zur experimentellen Validierung werden Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-2 (Typ 1B) gefertigt. Um die Verweilzeit zu variieren wird ein weiterer Zugprüfkörper mit einem Supportanteil in den Stufen von 0,002 %, 50 % und 100 % des Volumens des Zugprüfkörpers parallel gefertigt. Daraus erge-

Abb. 6: Ansichten des Demonstrators mit der Skalierung x1 **(links)** und eine Übersicht der Abweichungen zwischen Real-Bauteil und Berechnung **(rechts)**.



Skalierung	Form-faktor	Abweichung Tropfen	Abweichung Tropfen [%]	Abweichung Bauzeit [s]	Abweichung Bauzeit [%]
x1	1,2334	3253	4,14%	-43	-4,40%
x1	1,2463	4102	5,26%	-49	-5,05%
x1	1,2554	2918	3,81%	-62	-6,47%
x1.5	1,2334	6594	2,89%	-32	-1,39%
x1.5	1,2463	8641	3,81%	-44	-1,92%
x1.5	1,2554	7791	3,47%	-57	-2,50%
x3	1,2334	48977	3,11%	-29	-0,25%
x3	1,2463	47783	3,05%	-27	-0,23%
x3	1,2554	60637	3,90%	-16	-0,14%

6

ben sich nach der Berechnung der Software durchschnittliche Verweilzeiten von 643 s, 772 s und 968 s für die Stufen 0,002 %, 50 % und 100 %. Die Ergebnisse der Zugprüfungen zeigen insgesamt einen leichten Abwärtstrend der mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, E-Modul und Bruchdehnung) mit steigender Verweilzeit des Materials im thermisch kritischen Volumen. Somit liegt nahe, dass die Verweilzeit ein Grund dafür ist, dass die mechanischen Eigenschaften mit steigender Düsentemperatur abnehmen.

Maßnahmen zur Verringerung der Verweilzeit

Eine Verringerung der Verweilzeit, um diesen Effekt zu vermeiden, ist nur durch eine Beschleunigung des Bauprozesses möglich, da eine Verringerung des thermisch kritischen Volumens nicht möglich ist. Eine signifikante Steigerung der Baugeschwindigkeit ist aktuell nicht möglich, da hierfür der Durchlauf des Materials durch die Anlage erhöht werden muss. Dieser ist jedoch durch die maximale Frequenz der Piezoaktoren beschränkt. Durch die Erhöhung der Tropfengröße bei gleichzeitiger Vergrößerung des Abstands zwischen den Tropfen ist eine schnellere Fertigung möglich. Diese Maßnahme resultiert jedoch in einer höheren Oberflächenrauheit. Eine weitere Möglichkeit bietet die Aufbereitung der Bauteile in der Art, dass die Rasterlinien möglichst lang sind, um Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge zu minimieren. Dies fördert allerdings unter Umständen die Anisotropie der Bauteile bzw. ist bei komplexen Geometrien mit dünnen, geschwungenen Wänden erst gar nicht umsetzbar. Optional kann bei der Materialqualifizierung eine Optimierung der Prozesstemperaturen vorgenommen werden. Ziel der Optimierung ist es, die Prozesstemperaturen, vor allem die Temperatur im Bereich des thermisch kritischen Volumens, so niedrig wie möglich einzustellen. Die wirksamste Methode zur Verringerung der Verweilzeit ist die Reduktion des Supportmaterialanteils im Baujob.

Softwareentwicklung zur Unterstützung der Anwender

Im Laufe der geschilderten Untersuchungen und weiteren Projekten wurde eine Vielzahl von Materialien verarbeitet. Diese reichen vom Standardmaterial ABS über TPEs und teilkristalline Materialien wie PA6 bis hin zu einzelnen Exoten. Für jedes dieser Materialien muss für jede Verarbeitungstemperatur eine Materialqualifizierung durchgeführt werden. Zudem hat sich im Laufe der Zeit gezeigt, dass auch nach einem Wechsel der Austragsdüse zum Teil eine Nachqualifizierung einzelner Parameter notwendig ist. Somit sind Standardparameter oder auch eigens qualifizierte Parametersätze nicht ohne eine Prüfung auf verschiedenen Anlagen des Typs freeformer anzuwenden. Zudem sind Materialqualifizierungen mit dem standardmäßigen Verfahren zeitaufwendig und für ungeschulte Anwender ohne Erfahrungswerte schwer umsetzbar. Als Beispiel ist hier der Formfaktor anzuführen. Dieser bestimmt den Abstand zwischen den Tropfen und damit letztlich wie viele Tropfen in einer Rasterlinie abgelegt werden. Bei der experimentellen Validierung des berechneten Formfaktors muss dieser erfahrungsgemäß angepasst werden. Eine Änderung des Formfaktors führt dabei jedoch auf Grund von Rundungsvorgängen in der Aufbereitungssoftware

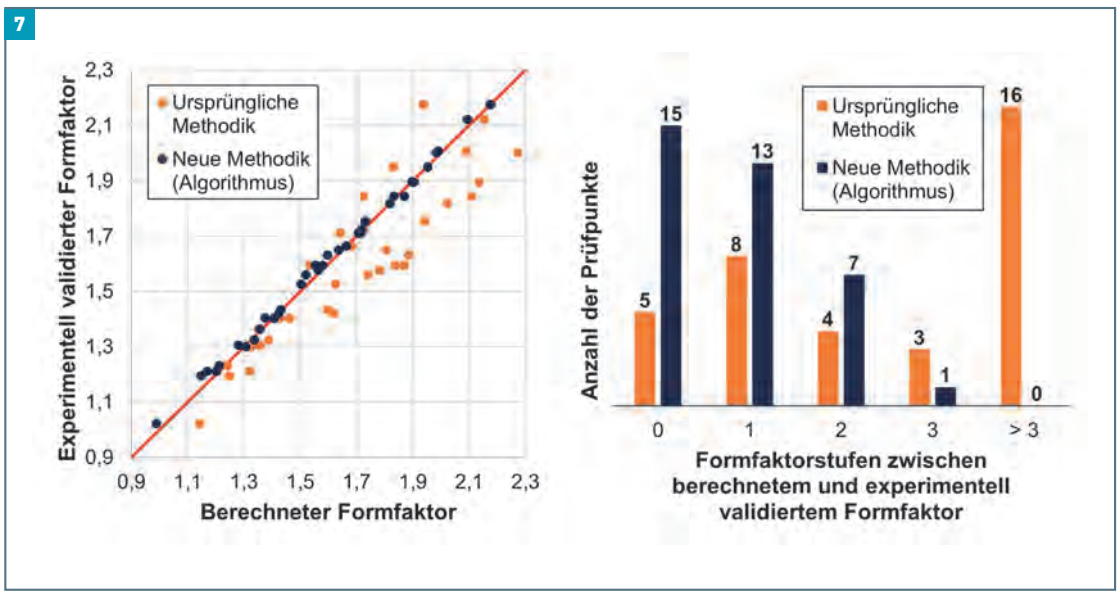


Abb. 7: Gegenüberstellung des berechneten und des experimentell validierten Formfaktors zum Vergleich der beiden Methodiken **(links)** und Darstellung der abweichenden Formfaktorstufen **(rechts)**.

nicht zwingend zu einer Änderung der Tropfenzahl je Rasterlinie. Die Kunststofftechnik Paderborn hat daher eine Software entwickelt, die dem Anwender Hilfestellung gibt. Hierfür müssen zunächst die Tropfenhöhen gemeinsam mit den dazugehörigen Austrägen in die Software eingegeben werden. Ein speziell entwickelter Algorithmus wertet die Daten aus und bestimmt automatisch den für die Fertigung einzustellenden Austrag und Formfaktor. Zusätzlich gibt er so genannte Formfaktorstufen an. Diese markieren die Formfaktoren bei denen sich in einem definierten Prüfkörper eine Änderung der Tropfenzahl je Rasterlinie einstellt. Somit kann die Materialqualifizierung effizient gestaltet und damit beschleunigt werden.

Zur Validierung der Berechnungsgenauigkeit des Formfaktors mit dem neu entwickelten Algorithmus werden die Daten von 36 Materialqualifizierungen herangezogen. Bewertungskriterium ist dabei die Differenz zwischen dem berechneten Formfaktor und dem schlussendlich experimentell validierten Formfaktor. Dafür werden zunächst die absoluten Werte angegeben (**s. Abb. 7 links**). Zudem wird die Verteilung der Formfaktorstufen zwischen den berechneten und experimentell validierten Formfaktoren aufgeschlüsselt (**s. Abb. 7 rechts**). Wie in der linken Grafik zu sehen, ist die Streuung der auf Basis des neu entwickelten Algorithmus berechneten Formfaktoren erheblich geringer. Die rechte Grafik zeigt, dass mit der neuen, am KTP entwickelten Methodik bei den 36 Materialqualifizierungen in nur einem einzigen Fall eine Abweichung um drei Formfaktorstufen vorliegt. Bei 15 Materialqualifizierungen war keine Anpassung des berechneten Formfaktors notwendig. Die Daten der ursprünglichen Methode zeigen hingegen bei 16 Formfaktoren eine Abweichung um mehr als drei Formfaktorstufen.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass die Formfaktoren mit der am KTP entwickelten Software präziser berechnet werden können. Zudem bietet das Konzept der Formfaktorstufen die Möglichkeit den Formfaktor gezielt zu variieren. Gemeinsam ist so, abhängig vom Material, eine Reduzierung der Materialqualifizierungsdauer um den Faktor 10 realisierbar.

Weitere Ziele und Ausblicke

Die Erkenntnisse und Fortschritte im Bereich des Kunststoff Freiformens, in die hier ein kurzer Einblick gegeben wurde, werden auch in Zukunft an der Kunststofftechnik Paderborn vertieft und weiterentwickelt. Hierfür wurden letztes Jahr die Kapazitäten mit einer zweiten Anlage erweitert. Ziel des KTP ist es, die Zugänglichkeit zur Herstellung von qualitativ hochwertigen Bauteilen aus verschiedensten Materialien für die breite Masse an Anwendern zu verbessern.

LITERATUR

1. Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. 5. Aufl. Hanser, München 2016
2. Kaut, F.; Cepus, V.; Grellmann, W.; Lach, R.: Struktur-Eigenschafts-Beziehungen additiv gefertigter thermoplastischer Polymere am Beispiel der ARBURG-Freeformer-Technologie. Proceedings of the 15th Rapid. Tech Conference Erfurt, Carl Hanser Verlag, München 2018, S. 217-235
3. Arburg GmbH & Co. KG
4. Hirsch, A.; Hecker, F.; Moritzer, M.: Process Parameter Optimization to Improve the Mechanical Properties of Arburg Plastic Freeformed Components. Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, USA, 2019, S. 705-714

KONTAKT

UNIVERSITÄT PADERBORN
Kunststofftechnik Paderborn
Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer
Warburger Straße 100
33098 Paderborn
Tel.: +49 (0)5251 60-2300
elmar.moritzer@ktp.uni-paderborn.de
www.ktp.upb.de

LEICHTBAULÖSUNGEN FÜR DIE SCHIENEN- UND NUTZFAHRZEUGTECHNIK

Die CG Rail GmbH aus Dresden deckt gemeinsam mit ihren einschlägig ausgewiesenen Partnern aus Wissenschaft und Industrie die gesamte Entwicklungskette für Leichtbaulösungen von der Konzeption über die Konstruktion und Simulation bis hin zum Bau und Test von Prototypen ab. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die Entwicklung von höchstbelasteten Leichtbau-Tragstrukturen für Schienen- und Nutzfahrzeuge durch den werkstoffgerechten Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK).

Aktuelle Entwicklungen in der Schienenfahrzeugtechnik wie etwa die Realisierung von Hybridantrieben für eine höhere Einsatzflexibilität auf teilelektrifizierten Strecken oder die Integration zusätzlicher Komfort- und Informationssysteme für Passagiere führen zu steigenden Strukturmassen, jedoch ist die Gesamtmasse der Fahrzeuge durch die maximal zulässigen Radsatzlasten limitiert. In der Nutzfahrzeugtechnik ergeben sich etwa durch den Trend zu batterieelektrischen Antrieben ebenfalls deutliche Mehrmassen, wobei die maximal zulässige Gesamtmasse der Fahrzeuge ebenso gesetzlich beschränkt ist.

Die Entwicklung von modernen CFK-Leichtbaulösungen für höchstbelastete Strukturen bietet hier eine attraktive Möglichkeit zur signifikanten Massereduzierung, wobei insbesondere die Schienenfahrzeugtechnik für CFK-Werkstoffe ein noch relativ junges Anwendungsgebiet darstellt. Das enorme Leichtbaupotential von CFK für Schienenfahrzeugtragstrukturen wurde bereits in diversen Benchmarkprojekten unter Federführung der CG Rail GmbH erfolgreich nachgewiesen – etwa bei der weltweit ersten U-Bahn in carbonintensiver Leichtbauweise, dem sogenannten CETROVO [1]. Die in diesen Projekten gewonnenen Erkenntnisse zur werkstoffgerechten Gestaltung und effizienten Fertigung von Großstrukturen in CFK-Leichtbauweise lassen sich synergetisch auch auf den Nutzfahrzeugbereich übertragen.

Ein eindrucksvolles Beispiel stellt die Entwicklung und technologische Realisierung von CFK-Mehrkammerprofilen mit multiaxialer Endlosfaserverstärkung und einer Länge von mehr als 20 Metern dar, die mithilfe des kontinuierlichen Pultrusionsverfahren gefertigt werden [2]. Dazu wurden eigens durch die CG Rail GmbH spezielle Vorrichtungen für die Zuführung der textilen Halbzeuge und geeignete Pultrusionswerkzeuge mit Kernsystemen gestaltet. Die damit gefertigten CFK-Mehrkammerprofile mit Wandstärken von bis zu 25 mm bilden die Hauptelemente der Leichtbau-Rahmenstruktur für die hochbelasteten Seitenwände des Leichtbau-Wagenkastens im CETROVO **(Abb. 1)**. Dort dienen sie maßgeblich zur Übertragung der hohen Längskräfte von bis zu 1.200 kN und zur Aufnahme der hohen Biegelasten. Derartige CFK-Profile können auch im Nutzfahrzeugbereich zur Realisierung ultraleichter Rahmentragwerke genutzt werden, wie etwa für Gitterrahmen bei Bussen oder für Sattelauflieger bei Lastkraftwagen. Das Leichtbaupotential der CFK-Profile im Vergleich zu metallischen Profilen liegt dabei erfahrungsgemäß zwischen 20 % und 50 %.

Abb. 1: CFK-Pultrusionsprofile für leichte Rahmentragwerke (Beispiel: Seitenwand)

Im Rahmen des CETROVO-Projekts wurde durch die CG Rail GmbH und ihre Partner ebenfalls ein Leichtbau-Drehgestellrahmen in einer weltweit einzigartigen CFK-Differentialbauweise entwickelt, der durch die europäische Bahnclusterinitiative ERCI mit dem europäischen „ERCI Innovation Award 2020“ ausgezeichnet wurde. Er weist gegenüber dem Stahl-Referenzrahmen eine Masseersparnis von fast 50 % auf und wurde in umfangreichen Tests unter statischer als auch zyklischer Belastung erfolgreich erprobt (siehe auch [2]).

KONTAKT

CG RAIL GMBH
Prof. Dr.-Ing.
Andreas Ulbricht
Geschäftsführer
Freiberger Straße 33
D-01067 Dresden
Tel.: +49 (0)351 416 730 00
andreas.ulbricht@cgrail.de
www.cgrail.de

Der Drehgestellrahmen repräsentiert eine äußerst sicherheitskritische und hochbeanspruchte Fahrwerkskomponente und muss deshalb höchste Anforderungen in Bezug auf die Bauteilqualität erfüllen. Ferner sind zumeist jeweils zwei Drehgestellrahmen pro Wagenkasten verbaut, was in einer höheren Anzahl von produzierten Gleichteilen resultiert. Diese beiden Faktoren sprechen für den Einsatz von automatisierten Herstellungsverfahren mit exzellenter Reproduzierbarkeit und hoher Effizienz. Diese Zielstellung wurde bereits bei der Gestaltung berücksichtigt. So sieht die CFK-Differentialbauweise eine intelligente Aufteilung in vier CFK-Einzelkomponenten mit im Vergleich zur integralen Ausführung deutlich einfacherer Geometrie vor, die eine Herstellung mithilfe hochautomatisierter Verfahren ermöglicht. Die textile Verstärkungsstruktur der doppelt gekröpften CFK-Längsträger wurde beispielsweise mittels Flechten auf einer CNC-gesteuerten Hochgeschwindigkeits-Radialflechtanlage an der TU Dresden gefertigt. Die in diesem Projekt gesammelten Erfahrungen zur Gestaltung und Fertigung sehr dickwandiger, gekrümmter CFK-Träger können vorteilhaft auch für ähnliche Strukturen im Nutzfahrzeugbereich verwendet werden, wie etwa für Achsträger in Fahrwerken.

Die CG Rail GmbH hat seit ihrer Gründung umfangreiches Know-how zur Entwicklung und technologischen Realisierung von CFK-Leichtbauweisen für hochbelastete Tragstrukturen in Schienenfahrzeugen aufgebaut und erweitert dies kontinuierlich im Rahmen von industriellen als auch geförderten Forschungsprojekten. Durch den Einsatz von CFK sind dabei Masseeinsparungen von bis zu 50 % erzielbar. Die gewonnenen Erkenntnisse können zudem – wie hier exemplarisch dargestellt – auch synergetisch auf den Nutzfahrzeugbereich übertragen werden.

LITERATUR

1. Ulbricht, A.: Schienenfahrzeug in CFK-intensiver Bauweise. Lightweight Design (2019) 2, S. 34-39.
2. Ulbricht, A.: Entwicklung und technologische Umsetzung eines Schienenfahrzeugs in neuartiger Faserverbund-Leichtbauweise. ZEVrail, Jahrgang 143 Ausgabe 6-7 (2019), S. 220-227.

Wir entwickeln Ihre maßgeschneiderte Leichtbaulösung!

Leichtbau-Drehgestellrahmen in CFK-Differentialbauweise

Ausgezeichnet mit dem
„ERCI Innovation Award 2020"
der europäischen Bahnclusterinitiative ERCI

- Konzeption, Konstruktion und Simulation von Leichtbaustrukturen
- Gestaltung und Auslegung von Fügeverbindungen für Leichtbausysteme in Multi-Material-Design
- Bau und Test von Prototypen
- Mechanische Werkstoffprüfung in eigenem Prüflabor
- Projektmanagement (IPMA® zertifiziert)

Freiberger Straße 33 · 01067 Dresden
E-Mail: info@cgrail.de
Web: www.cgrail.de

CG Rail

NACHHALTIGKEIT GEHT NUR MIT DIGITALISIERUNG

Autorin: **Susanne Zinckgraf**, **ENGEL AUSTRIA**

Digitalisierung und Nachhaltigkeit, so lauten zwei große Trends unserer Zeit, die zugleich zu den größten Herausforderungen zählen, denen sich die Kunststoffindustrie aktuell stellen muss. Beide Themen sind eng miteinander verknüpft, wie es auf dem Symposium 2021 des Spritzgießmaschinenbauers und Systemanbieters ENGEL deutlich wurde. „Was wir brauchen, ist eine Veränderung im Mindset", betonte dort Dr. Stefan Engleder, CEO der ENGEL Gruppe.

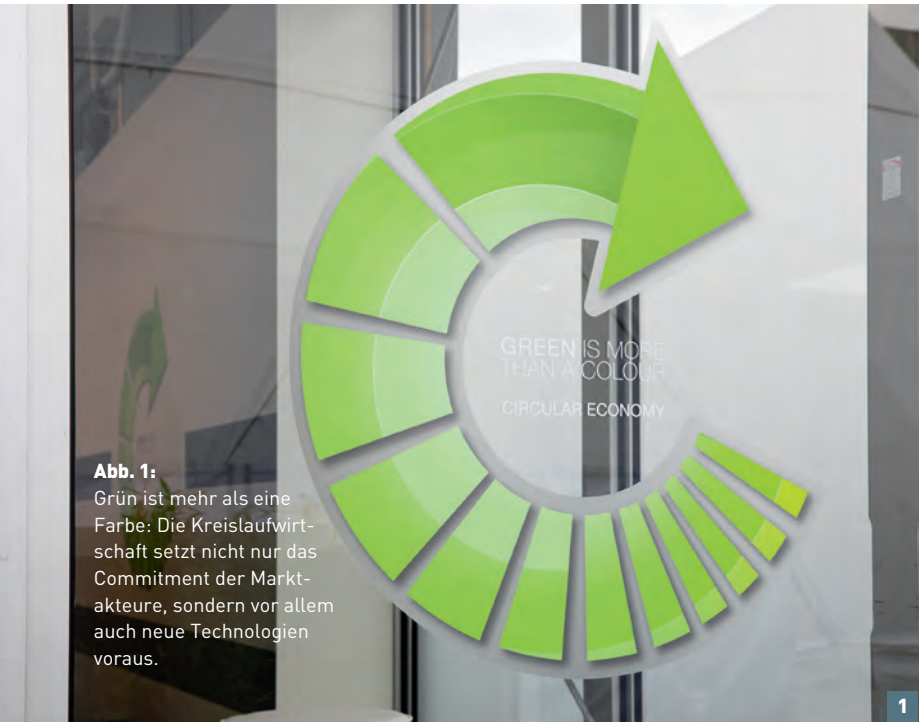


Abb. 1: Grün ist mehr als eine Farbe: Die Kreislaufwirtschaft setzt nicht nur das Commitment der Marktakteure, sondern vor allem auch neue Technologien voraus.

Nachhaltigkeit ist mehr als ein Hype, davon ist man bei ENGEL überzeugt. Die Anforderungen an eine nachhaltige Spritzgießproduktion sind hoch, können aber mit den richtigen Lösungen gemeistert werden. Die Digitalisierung eröffnet hier viele Chancen. ENGEL hat dabei den gesamten Produktlebenszyklus im Blick, vom Design über die Konstruktion und Produktion bis zum Recycling.

Mit Digitalisierung CO_2-Emissionen reduzieren

Eine aktuelle Studie, die Accenture im Auftrag von bitkom durchgeführt hat, prognostiziert, dass sich mithilfe der Digitalisierung die heutigen CO_2-Emissionen deutscher Betriebe um bis zu 58 Prozent reduzieren lassen. Der Fertigungsbereich hat daran mit 23 Prozent einen besonders großen Anteil. „Wenn wir die Digitalisierung wirklich nutzen, erscheinen uns die CO_2-Reduktionsziele, die uns von der Politik vorgegeben werden, auf einmal nicht mehr unmöglich", so Engleder. „Die Digitalisierung hilft uns, das volle Potenzial der Spritzgießmaschinen auszuschöpfen und damit effizienter zu produzieren."

Mithilfe von ENGEL sim link zum Beispiel lassen sich bereits beim Bauteildesign die Weichen für eine ressourcenschonende Herstellung und ein späteres Recycling stellen. Die Software verknüpft die Simulation mit der Produktion, um die in der Simulation ermittelten Einstellungen an die Spritzgießmaschinensteuerung zu übertragen, was die Musterung des Werkzeugs sowie die weitere Optimierung der Verarbeitungsparameter wesentlich beschleunigt.

Denn umgekehrt lassen sich auch Prozessparameter und Messergebnisse aus der Maschine sehr einfach in die Simulation übertragen. „Durch die Füllstudie bekommen wir bereits die richtigen Einstellparameter für die Maschine, ohne manuell eingreifen zu müssen", erklärt Dr. Gerhard Dimmler, Vice President Research and Development von ENGEL. „Die Übereinstimmung zwischen der Füllsimulation und der realen Füllstudie ist beeindruckend."

In der laufenden Produktion sind es die intelligenten Assistenzsysteme, wie zum Beispiel iQ weight control, die Ausschuss verhindern und den Energieverbrauch deutlich reduzieren. Mit iQ weight control werden selbst gravierende Schwankungen im Rohmaterial, wie sie für Rezyklate typisch sind, erkannt und das Einspritzprofil, der Umschaltpunkt und der Nachdruck für jeden Schuss einzeln an die aktuellen Produktionsbedingungen angepasst. Auf diese Weise wird eine konstante Einspritzmenge erzielt und höchste Produktivität gesichert.

KONTAKT

ENGEL AUSTRIA GMBH
Ludwig-Engel-Str. 1
A-4311 Schwertberg
Tel.: +43 (0)50 620-0
sales@engel.at
www.engelglobal.com

Horizontale Plattformen zur Etablierung von Re- und Upcycling

Der Produktlebenszyklus vom Design bis zum Recycling umfasst bei ENGEL nunmehr vier Phasen, die im Zentrum des Interesses der Kunststoffverarbeiter stehen: Design, Abmusterung, Produktion sowie Wartung und Service.

Gerade im Bereich Wartung und Service sind die Digitalisierung und Vernetzung nicht zuletzt durch Covid-19 stärker in den Fokus der verarbeitenden Unternehmen gerückt. Viele Verarbeiter befassen sich mit der Frage, wir sie ihre Produktivität und Lieferfähigkeit auch im Falle zukünftige Krisen absichern können. Digitale Servicelösungen wie Fernwartung und Online-Support sind hierfür wichtige Schlüssel. „Zahlreiche neu installierte Spritzgießmaschinen sind bereits online, und es werden stetig mehr“, berichtet Dimmler. „Durch die steigende Anzahl von digitalen Applikationen wird sich die Konnektivität der Maschinen automatisch erhöhen.“

Beispiele für diese Applikationen, wie ENGEL e-connect.24 für die Fernwartung und den Online-Support, laufen heute vor allem auf vertikalen Lösungen, wie dem ENGEL Kundenportal e-connect. Vertikal meint hierbei die digitale Abbildung einer Anlage oder Produktionszelle innerhalb einer einzelnen Wertschöpfungsstufe. Dieser digitale Zwilling beschreibt die Anlage und ihr Verhalten anhand von Daten und legt damit die Basis für Optimierungen.

Mit dem Übergang auf horizontale Plattformen, der von ENGEL und weiteren Unternehmen der Kunststoffindustrie aktiv vorangetrieben wird, rückt die gesamte Wertschöpfungskette in den Fokus. Applikationen und auch Unternehmen vernetzen sich entlang der Wertschöpfungskette, um Informationen und Daten auszutauschen. Davon profitiert die Kreislaufwirtschaft. „Unser Ziel ist, das bislang vorherrschende Downcycling von Materialien durch ein Re- oder sogar Upcycling abzulösen“, sagt Engleder, und das funktioniere nur, wenn Daten über den gesamten Produktlebenszyklus, das heißt entlang der Wertschöpfungskette, ausgetauscht werden.

So ermöglicht beispielsweise ein digitales Wasserzeichen, das unsichtbar auf Verpackungen angebracht wird, ein gezielteres Sortieren von Kunststoffabfällen und damit ein sortenreines, hochwertiges Recycling. Über das Wasserzeichen werden das Material, der Verpackungshersteller und der Verarbeitungsprozess identifiziert. Diese Daten stehen allen Teilnehmern und Nutzern der horizontalen Plattform zur Verfügung. So lassen sich der Recyclingprozess sowie die darauffolgende Verarbeitung des Rezyklats im Sinne einer maximalen Ressourceneffizienz steuern und aufeinander abstimmen.

Gut vorbereitet für die neuen Herausforderungen

In der LIT Factory, der Lehr-, Lern- und Forschungsfabrik für Smart Polymer Processing und Digitalisierung an der Johannes Kepler Universität in Linz, Österreich, beschäftigt sich ENGEL gemeinsam mit weiteren Unternehmen aus den unterschiedlichsten Bereichen der Kunststoffindustrie mit den neuen Möglichkeiten der horizontalen Vernetzung. Jeweils im Kontext der Kreislaufwirtschaft werden neue Prozesse, Produkte und Geschäftsmodelle entwickelt und evaluiert. „Wir wollen für die Herausforderungen der Nachhaltigkeit gut vorbereitet sein, denn wir sind davon überzeugt, dass die Digitalisierung und Plattformlösungen wichtige Schlüssel für mehr Nachhaltigkeit und den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft sind“, betont Engleder.

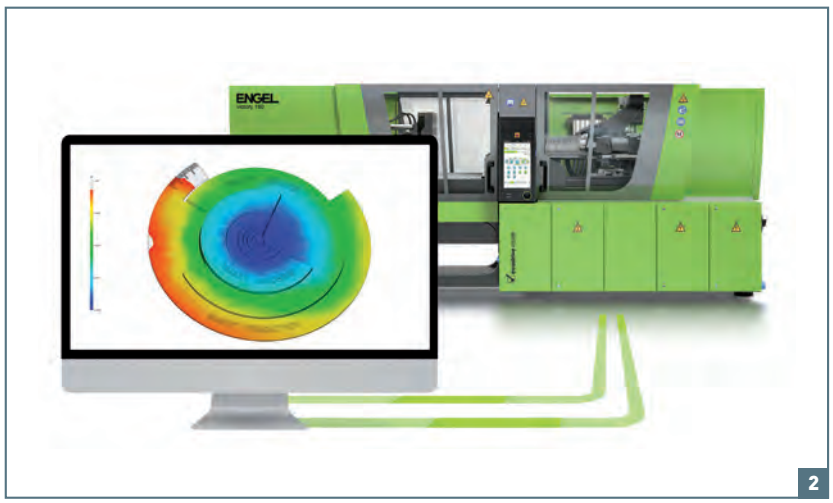


Abb. 2: ENGEL sim link macht es möglich, Simulationsdaten direkt in die Spritzgießmaschine zu übertragen und umgekehrt Messdatensätze aus der Maschinensteuerung in das Simulationsprogramm zu importieren. Bild: ENGEL

Stefan Engleder und Gerhard Dimmler machten auf dem ENGEL live e-symposium 2021 den Kunststoffverarbeitern Mut, sich für digitale Lösungen zu öffnen und an horizontalen Plattformen zu beteiligen. „Gemeinsam gestalten wir eine nachhaltige Kunststoffindustrie“, so Stefan Engleder.

Weitere Informationen unter
www.engelglobal.com

DER NACHWUCHS-FÖRDERUNG VERPFLICHTET

Der Wissenschaftliche Arbeitskreis der Universitäts-Professoren der Kunststofftechnik WAK prämiert jährlich die besten wissenschaftlichen Arbeiten der Kunststofftechnik.

Ziel ist es, sowohl wichtige Fortschritte in Wissenschaft und Technologie der Kunststoffe zu dokumentieren, als auch junge Ingenieurinnen und Ingenieure in ihrer wissenschaftlichen Arbeit zu motivieren und zu unterstützen.

Die Preise orientieren sich an den drei Schwerpunkten kunststofftechnischer Forschung und Ausbildung:

- Werkstoff,
- Konstruktion und
- Verarbeitung.

Seit 2015 gibt es einen vierten Preis:
- Hybride Werkstoffe, Systeme und Prozesse.

Ausgezeichnet werden in diesen Schwerpunkten jeweils die beste Diplomarbeit/Masterarbeit (EUR 3.500) sowie die beste Doktorarbeit (EUR 5.000).

Die Preise werden von vier innovativen Unternehmen der Kunststofftechnik zur Verfügung gestellt:

- **Wilfried-Ensinger-Preis** für die Entwicklung und Beschreibung technischer Kunststoffe für innovative Anwendungen
- **Oechsler-Preis** für Methoden und Ansätze zur Entwicklung und Konstruktion von Bauteilen aus Kunststoffen
- **Brose-Preis** für neue Verfahren und Techniken bei der Verarbeitung von Kunststoffen
- **Röchling-Preis** für neue hybride Werkstoffe, Systeme und Prozesstechniken auf Basis von Kunststoffen

Weitere Informationen finden Sie unter:
https://www.wak-kunststofftechnik.de/preise/

DER BROSE-PREIS:

WÜRDIGUNG HERAUSRAGENDER WISSENSCHAFTLICHER ARBEITEN

Brose ist der viertgrößte Automobilzulieferer in Familienbesitz. Jeder zweite Neuwagen weltweit ist mit mindestens einem Brose Produkt ausgestattet. Die intelligenten Lösungen des Unternehmens für den Fahrzeugzugang und Innenraum sorgen für mehr Komfort und Flexibilität. Innovative Konzepte für Thermalmanagement erhöhen die Effizienz und tragen zu Umwelt- und Klimaschutz bei. Das Systemverständnis von Brose ermöglicht neue Funktionen bei Fahrzeugen aller Art – ob auf vier oder auf zwei Rädern. Rund 25.000 Mitarbeiter an 65 Standorten in 24 Ländern erwirtschafteten 2020 einen Umsatz von 5,1 Milliarden Euro.

Vor über 100 Jahren hat Firmengründer Max Brose eine Innovationskultur geschaffen, die das Unternehmen bis heute prägt. Neue Produkte und die konsequente Weiterentwicklung des Angebots sind Wachstumsmotor der Brose Gruppe. Weltweit stellen sich Ingenieure und Techniker der Aufgabe, die Forderungen nach Leichtbau und Effizienzsteigerung mit dem Wunsch nach mehr Komfort und Sicherheit in Einklang zu bringen. Sein jahrzehntelanges Know-how in Mechanik, Elektrik und Elektronik nutzt der Zulieferer, um auf Kundenbedürfnisse zugeschnittene Lösungen zu finden. Neun Prozent des Umsatzes fließen in Produktentwicklung und zukunftsweisende Fertigungsmethoden. Seit 2007 verleiht das Familienunternehmen in Zusammenarbeit mit dem Wissenschaftlichen Arbeitskreis Kunststofftechnik den Brose-Preis für neue Verfahren und Techniken der Kunststoffverarbeitung. Die Auszeichnung belohnt Studierende für herausragende Dissertationen (Dotierung: 5.000 Euro) und Diplom-/Masterarbeiten (Dotierung: 3.500 Euro).

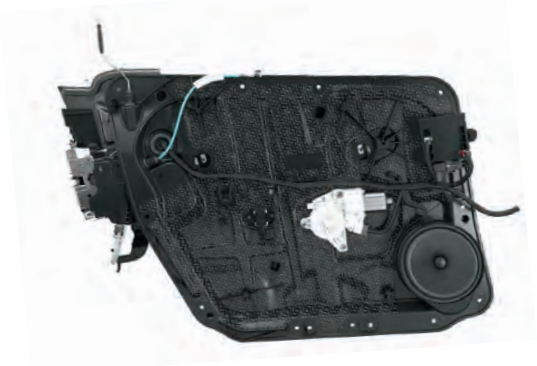


Abb.:
Leichtbau in Großserie: Brose setzt auf glasfasergewebeverstärkte Thermoplaste, zum Beispiel in Türmodulen und Durchladen für die zweite Sitzreihe.

„Unser Engagement im Wissenschaftlichen Arbeitskreis Kunststofftechnik fördert den engen Kontakt zu den Spezialisten des Fachbereichs. Wir können die zentralen Entwicklungstrends unseres Unternehmens darstellen und lernen vielversprechende Nachwuchskräfte kennen“, erläutert Prof. Dr. Peter Weidinger, Leiter Werkstofflabore der Brose Gruppe. „Durch die Preisvergabe erhalten wir zudem einen guten Einblick in aktuelle Entwicklungs- und Forschungsthemen“, so Weidinger.

Gründungsjahr: 1908
Anzahl Mitarbeiter: rund 25.000 (weltweit)

Geschäftsführung:
Ulrich Schrickel (Vorsitz Geschäftsführung)
Thomas Spangler (ZB Produktion)
Dr. Philipp Schramm (Kaufm. Leitung)
Dr. Olaf Gelhausen (ZB Organisation u. Personal)
Raymond Mutz (GB Antriebe)
Andreas Jagl (GB Interieur)
Christof Vollkommer (GB Exterieur)

Mitglieder der Gesellschafterversammlung:
Michael Stoschek (Vorsitzender) und seine Schwester Christine Volkmann sowie die Kinder der beiden Geschwister

Mitglieder des Beirats:
Franz-Josef Kortüm (Vorsitzender), Prof. Dr. Ing. Thomas Weber, Jan-Hendrik Goldbeck

Zielgruppen/Branche:
- Fahrzeugtüren und Heckklappen
- Sitzsysteme
- Elektrische Antriebe
- Elektronik, Sensorik und Software

brose
Excellence in Mechatronics

KONTAKT

BROSE FAHRZEUGTEILE SE & CO. KOMMANDITGESELLSCHAFT, COBURG
Max-Brose-Straße 1, D-96450 Coburg
Tel.: +49 (0)9561 21-0
Fax: +49 (0)9561 21-1429
info@brose.com
brose.com

WILFRIED-ENSINGER-PREIS

TECHNISCHE KUNSTSTOFFE FÜR INNOVATIVE ANWENDUNGEN

Wilfried & Martha
Ensinger Stiftung

Neue Werkstoffe spielen heute eine entscheidende Rolle für den industriellen Fortschritt. Ensinger stellt Compounds, Halbzeuge, Fertigteile, komplette Baugruppen und Präzisionsprofile aus Hochleistungskunststoffen her. Eingesetzt werden die Produkte in den unterschiedlichsten Industriebranchen, darunter im Maschinenbau, in der Automobil- und Luftfahrtindustrie und in der Medizintechnik. Auch in der Lebensmittelindustrie und in der Elektro- und Halbleitertechnik sind die technischen Lösungen auf Basis thermoplastischer Polymere sehr verbreitet.

Das international tätige Familienunternehmen wurde 1966 durch Wilfried Ensinger gegründet. Die Weiterentwicklung bewährter Fertigungsverfahren, neue Anwendungen und die internationale Expansion haben dem Kunststoffverarbeiter einen Platz in der ersten Reihe seiner Branche verschafft. Mit weltweit 35 Produktions- und Vertriebsstandorten ist die Ensinger Gruppe heute in allen wichtigen Industrieregionen vertreten. Hauptsitz ist Nufringen, Baden-Württemberg.

Die Wilfried und Martha Ensinger Stiftung hat das Ziel, soziale, wissenschaftliche und kulturelle Projekte langfristig zu unterstützen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Förderung des Nachwuchses in technischen Berufen. Die Stiftung prämiert ausgezeichnete Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Kunststofftechnik und trägt so dazu bei, diese Studienrichtung bekannter zu machen. Für sein Wirken erhielt Wilfried Ensinger verschiedene Auszeichnungen, unter anderem das Bundesverdienstkreuz. Die Universität Stuttgart verlieh ihm die Würde eines Ehrensenators.

Der Wilfried-Ensinger-Preis, WAK

Der WAK (Wissenschaftliche Arbeitskreis der Universitätsprofessoren der Kunststofftechnik) verleiht jährlich den Wilfried-Ensinger-Preis für die Entwicklung und Beschreibung technischer Kunststoffe für innovative Anwendungen. Mit dieser Auszeichnung honoriert die Wilfried und Martha Ensinger Stiftung

- herausragende Dissertationen (Dotierung: 5.000,– EUR) und
- herausragende Diplom-/Masterarbeiten (Dotierung: 3.500,– EUR)

Gründungsjahr: 1966

Anzahl Mitarbeiter: 2.700

Geschäftsführer:
Dr. Oliver Frey, Ralph Pernizsak,
Dr. Roland Reber

Ansprechpartner: Jörg Franke
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
joerg.franke@ensingerplastics.com

Zielgruppen/Branche:
Technische Kunststoffe von Ensinger werden u.a. in den folgenden Industriebereichen eingesetzt:

- Maschinenbau
- Automobil- und Luftfahrtindustrie
- Medizintechnik
- Lebensmittelindustrie
- Erdölgewinnung
- Elektrotechnik
- Halbleiterfertigung

KONTAKT

ENSINGER GMBH
Rudolf-Diesel-Straße 8, D-71154 Nufringen
Tel.: +49 (0)7032 8190
Fax: +49 (0)7032 819-100
info@ensingerplastics.com
www.ensingerplastics.com

DER OECHSLER-PREIS:

ANERKENNUNG FÜR HERAUSRAGENDE WISSENSCHAFTLICHE LEISTUNGEN

Die OECHSLER AG, im Jahre 1864 von Matthias Oechsler in Ansbach gegründet, gehört zu den führenden Unternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie. Der Fokus des Unternehmens liegt in der Entwicklung und Fertigung anspruchsvoller technischer Komponenten und Baugruppen.

OECHSLER besitzt mit sieben Standorten in Deutschland, China, Rumänien, Mexiko und Vietnam ein globales Produktionsnetzwerk. Dabei steht die Weiterentwicklung der Technologien entlang der gesamten Value-added-Chain Wertschöpfungskette von Forschung & Entwicklung, Fertigung, Montage und Qualitätssicherung im Fokus der Unternehmensaktivitäten. So konnte sich die OECHSLER AG beispielsweise in den vergangenen drei Jahren zu einem weltweit führenden Anbieter von kunststoffbasierter Additiven Fertigung (auch 3D-Druck genannt) etablieren.

Um diese großen Herausforderungen auch in Zukunft anzugehen, sucht die OECHSLER AG fortlaufend nach hochqualifiziertem Nachwuchs, egal ob in Hinblick auf Auszubildenden, oder „Young Professionals“. Seit 2002 spielt dabei der WAK-Preis für herausragende wissenschaftliche Leistungen eine wichtige Rolle.

Werk Ansbach

Gründungsjahr: 1864

Anzahl Mitarbeiter: 2.900 (weltweit)

Geschäftsführer:
Dr. Claudius Kozlik (CEO)
Christoph Faßhauer (COO)
Michael Meyer (CFO)

Ansprechpartner:
Winfried Schmidt (Leiter Vorentwicklung)
W.Schmidt@oechsler.com

Produktgruppen:
- Aktuatorik
- Additive Manufacturing
- Assistenzsysteme für autonomes Fahren
- Healthcare
- Sporting Goods
- Funktionales Design
- Keramik- & Metallpulverspritzguss
- Kunststoff-Metall Systeme

Der Oechsler-Preis, WAK

Der Preis für herausragende wissenschaftliche Arbeiten zur Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffbauteilen wird vergeben für
- herausragende Dissertationen (Dotierung: 5.000 Euro) und
- herausragende Diplom/Masterarbeiten (Dotierung: 3.500 Euro).

Die Preisträger werden von einer Fachjury ausgewählt. Nach der offiziellen Preisverleihung erhalten die Sieger die Möglichkeit ihre Arbeiten in der Firmenzentrale der OECHSLER AG in Ansbach einem ausgewählten Publikum vorzutragen.

OECHSLER

KONTAKT

OECHSLER AG
Julia Berger (j.berger@oechsler.com)
Matthias-Oechsler-Straße 9
D–91552 Ansbach
Tel.: +49 (0)981 1807-0
Fax: +49 (0)981 1807-2220
info@oechsler.com
www.oechsler.com

RÖCHLING-SONDERPREIS:

ANERKENNUNG FÜR NEUE KUNSTSTOFFENTWICKLUNGEN IM BEREICH HYBRID

Die Röchling-Gruppe gestaltet Industrie. Weltweit. Seit fast 200 Jahren.

Mit kundenindividuellen Kunststoffen verändert das Familienunternehmen heute den Alltag vieler Menschen – denn es macht Autos leichter, Medikamentenpackungen sicherer und verbessert industrielle Anwendungen. Die rund 11.100 Mitarbeiter arbeiten dort, wo ihre Kunden sind – an 90 Standorten in 25 Ländern.

Gründungsjahr: 1822

Anzahl Mitarbeiter: circa 11.100

Vorstand:
Rainer Schulz (Vorstandsvorsitzender)
Franz Lübbers (Vorstand)
Evelyn Thome (CFO)

Beirat:
Johannes Freiherr von Salmuth (Vorsitzender)
Dr. Carl Peter Thürmel (Stv. Vorsitzender)
Dr. Günter von Au
Georg Duffner
Gregor Greinert
Uta Kemmerich-Keil
Prof. Klaus Nehring, Ph.D.
Gisbert Rühl
Rainer Schulz

Industrien:
- Automobiltechnik
- Handel und Zerspaner
- Elektro- und Elektronikindustrie
- Chemie und Umwelt
- Maschinenbau
- Medizin- und Pharmatechnik
- Papierindustrie
- Bauindustrie
- Sonstige

Der Unternehmensbereich **Industrial** ist der Experte für den optimalen Werkstoff in jeder Anwendung. Röchling Industrial entwickelt und liefert individuelle Produkte aus Kunststoff für alle Industriebereiche. Das gelingt dank der umfangreichsten Produktpalette thermo- und duroplastischer Kunststoffe überhaupt. Seine Kunden beliefert der Unternehmensbereich mit Halbzeugen oder mit daraus spanabhebend hergestellten Komponenten.

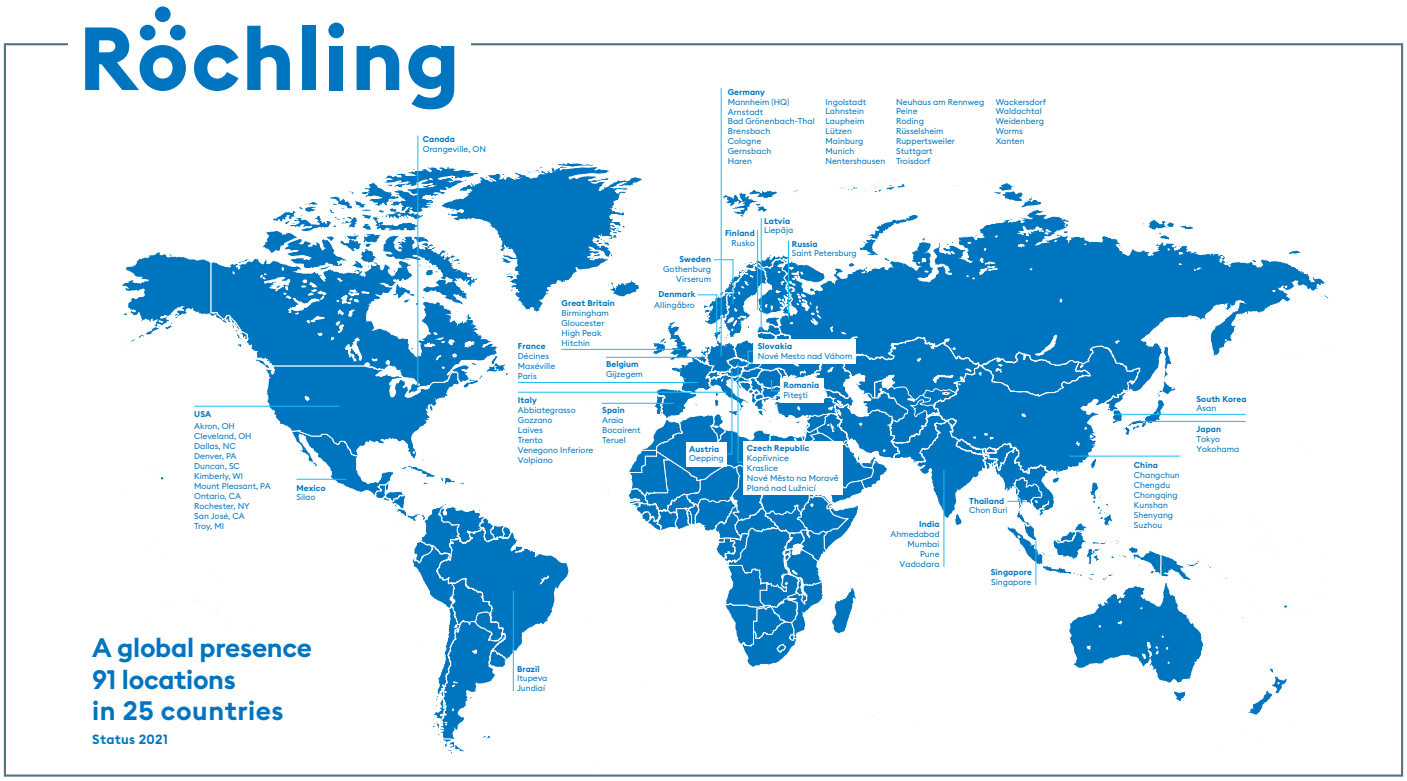
Röchling Automotive bringt Mobilität voran. Mit seinen Kunden weltweit gestaltet der Unternehmensbereich die Zukunft der Mobilität. Seine Systemlösungen helfen, die großen Herausforderungen zu meistern. Das heißt: Röchling Automotive schont die Umwelt und verbessert gleichzeitig das Fahrerlebnis.

Der Unternehmensbereich **Medical** bietet seinen Kunden eine breite Palette von hochwertigen, kundenindividuellen Komponenten und Baugruppen bis hin zu kompletten OEM-Produkten. Zum Produktportfolio zählen darüber hinaus Standardprodukte aus Kunststoff mit besonderer Expertise im Bereich Diagnostics, Fluid Management, Pharma, Surgery & Interventional und vieles andere mehr. Ergänzt werden diese Kompetenzen mit erweiterten Dienstleistungen hinsichtlich Entwicklung und Regulatory Affairs bis hin zur Zulassung eines kompletten Medizinproduktes.

Forschergeist gesucht

Zusammen mit dem Wissenschaftlichen Arbeitskreis Kunststofftechnik fördert die Röchling-Gruppe schlaue Nachwuchsköpfe. Neue Kunststoffentwicklungen, Verfahren und Produkte im Hybrid-Bereich haben Chancen auf den „Sonderpreis Röchling“. Er honoriert Studierende für ihre
- herausragenden Dissertationen (Dotierung: 5.000 Euro)
- oder herausragenden Diplom-/Masterarbeiten (Dotierung: 3.500 Euro).

In ihren wissenschaftlichen Projekten suchen die Talente nach neuen Wegen, technische Anwendungen zu gestalten. Damit helfen sie, Kunststoff als Werkstoff des 21. Jahrhunderts weiterzuentwickeln.



Röchling will diesen Forschergeist mit dem Sonderpreis erhalten und unterstützen. Daher bleibt der enge Austausch mit den Fachleuten des WAK und der Kontakt zu den engagierten Nachwuchskräften auch in Zukunft sehr wichtig.

Fit für das dritte Jahrhundert

Mit seiner Zukunftsstrategie „Fit for 3“ bereitet sich Röchling auf das dritte Jahrhundert der Unternehmensgeschichte vor. Das Prinzip, Wissen auszutauschen, und zwar nicht nur von Generation zu Generation, sondern auch über Ländergrenzen hinweg, gehört dabei zur Grundhaltung. Schließlich ist dies als Partner weltweit führender Unternehmen unerlässlich. Neue Verfahren und Werkstoffe helfen auch bei einem Thema, das Kunden in allen Industriebereichen umtreibt: die Nachhaltigkeit von Produkten, Prozessen und in der Zusammenarbeit. Das Familienunternehmen steht für wertebewusstes und nachhaltiges Handeln. Das heißt, Röchling begegnet der Umwelt und der Gesellschaft so, wie seinen Kunden, Partnern, Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern: mit gegenseitigem Respekt, mit großer Wertschätzung und Vertrauen.

Nachhaltiger Werkstoff

Das Thema Nachhaltigkeit gliedert das Unternehmen in drei Handlungsfelder: Es entwickelt innovative Produkte, die Kunden dabei helfen, ihre ökologischen Ziele zu erreichen (Kunststoff und Nachhaltigkeit). Außerdem leistet Röchling einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz, indem die Unternehmensgruppe die eigenen Prozesse konsequent optimiert (ökologische Verantwortung). Dazu übernimmt Röchling Verantwortung für die Sicherheit der Beschäftigten (soziale Verantwortung).

Als Kunststoffexperten wissen die Mitarbeiter um die besondere Verantwortung. Die Hochleistungskunststoffe, die Röchling verarbeitet, helfen mit ihrem geringen Gewicht, ihrer langen Lebensdauer und ihren vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten, Ressourcen zu schonen.

Eine entsprechende Unternehmenskultur fördert neue Entwicklungen. Das heißt, Röchling investiert konsequent in umweltfreundliche Produkte, Dienstleistungen und nachhaltige Prozesse und unterstützt seine Kunden dabei, ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

KONTAKT

RÖCHLING SE & CO. KG
People Communication
Richard-Wagner-Str. 9 , D-68165 Mannheim
Tel.: +49 (0)621 4402-0
Fax: +49 (0)621 4402-237 oder -207
info@roechling.com
www.roechling.com

Ingenieur wissenschaften 2021

Jahresmagazin Kunststofftechnik

Idee, Konzeption und redaktionelle Koordination:
Institut für Wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV)

Bildnachweis: Das jeweilige Institut;
Hauptmotiv Titel/Hintergrund: Prof. Schlarb, Kaiserslautern (WAK);
Einblendung Titel: Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Gottfried W. Ehrenstein (WAK);
Blickfang Titel: Sergey Ryzhov – stock.adobe.com

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 erfragbar. 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.

Lampertheim, Oktober 2021
© ALPHA Informationsgesellschaft mbH und die Autoren für ihre Beiträge

ISSN: 1618-8357
Projekt-Nr. 096-650

FACHKRÄFTEMANGEL

Mit Ihrer Anzeigenschaltung helfen Sie dem akuten Fachkräftemangel in Deutschland entgegenzuwirken. Weitere Informationen und Publikationen finden Sie online. Schalten Sie hier:

ALPHA Informationsgesellschaft mbH
Finkenstraße 10
D–68623 Lampertheim
Tel.: 06206 939-0
anzeigen@alphapublic.de
www.alphapublic.de

Gleiches Resultat.
Mit Rezyklat.

Rezyklate unterliegen naturgemäß stärkeren Chargenschwankungen als Neuware. Unsere intelligenten Assistenzsysteme und Technologien sorgen trotz schwankender Rohmaterialqualität für ein konstantes Schmelzevolumen und damit für eine konstant hohe Produktqualität.

GREEN IS MORE THAN A COLOUR
CIRCULAR ECONOMY

ENGEL
be the first

Erfahren Sie mehr zum Thema Kreislaufwirtschaft: