

Hybridleichtbau leichtgemacht.

*Am Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen (ILH) der Universität Paderborn forschen mehr als 170 Wissenschaftler*innen an neuartigen Leichtbautechnologien. Im Rahmen des HyOpt Projektes widmet sich ein Team aus ILH Forscher*innen und Industrieunternehmen der Entwicklung eines automatisierten Ansatzes zur Auslegung und Fertigung von hybriden Mehrschichtverbunden mit maßgeschneiderten Funktionseigenschaften.*

Erneuerbare Energien und eine Steigerung der Energieeffizienz sind wesentliche Handlungsfelder heutiger Maßnahmenpläne zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Beim Letzteren steht insbesondere der Leichtbau im Fokus, denn durch eine Gewichtsreduktion und Funktionsintegration kann dieser zur Einsparung von Ressourcen und Verringerung von Emissionen beitragen. Eine Maßnahme, die zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen wird, denn vor dem Hintergrund einer raschen Industrialisierung von Schwellenländern sowie eines ununterbrochen hohen Konsums in entwickelten Märkten kommt es bis 2060, so die Prognose der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), zu einer nahezu Verdopplung des weltweiten Rohstoffbedarfs [1].

Einen nicht zu vernachlässigenden Faktor für die Ressourcenbindung stellt auch zukünftig der motorisierte Individualverkehr dar. Zwar bildet die Elektromobilität in Verbindung mit erneuerbaren Energiequellen eine Schlüsseltechnologie zur Senkung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor, doch aufgrund der schweren Antriebsbatterien und hohen Sicherheitsanforderungen bringen heutige Elektrofahrzeuge nicht selten mehr als zwei Tonnen auf die Waage, wodurch neue Leichtbauansätze mehr denn je gefragt sind.

Aufhebung von Nachteilen durch Werkstoffkombinationen

Der Bedarf nach leichteren Werkstoffen führte innerhalb der vergangenen Jahre zu einer bedeutenden Weiterentwicklung konventioneller Konstruktionswerkstoffe. Insbesondere spielen hoch- und höchstfeste Stähle sowie moderne

Aluminiumlegierungen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung sicherer und leichter Karosseriestrukturen. Doch die hohe Dichte von Stahl sowie der verhältnismäßig niedrige E-Modul von Aluminium limitieren das Leichtbaupotential dieser Werkstoffklassen. Eine Alternative zu Metallen bilden Faserverbundkunststoffe (FVK), die durch ihre herausragenden Leichtbaueigenschaften zunehmend in den Fokus der Automobilhersteller gerückt sind. Jedoch begrenzen hohe Werkstoff- und Produktionskosten sowie eine komplexe Bauteilauslegung den Einsatz von FVK zumeist auf Fahrzeuge des Premiumsegments. Eine aktuelle Studie des HyOpt Projektes ergab, dass bei lediglich 16 von 138 analysierten Karosserien Bauteile aus Faserverbundkunststoffen verbaut wurden. Der Gewichtsanteil von FVK pro Karosserie liegt dabei im Durchschnitt unterhalb von 2 Prozent.

Einen Paradigmenwechsel verspricht der Hybridleichtbau, der durch eine gezielte Kombination von Metall und FVK hohe gewichtsspezifische Bauteileigenschaften zu wirtschaftlich vertretbaren Mehrkosten beabsichtigt. Beispiele aus der Praxis belegen, dass Gewichteinsparungen durch eine gezielte Anpassung der Beanspruchbarkeit dünnwandiger Hohlstrukturen mittels lokaler FVK-Verstärkungen auch unter Serienbedingungen erzielt werden können. Der hybride Dachquerträger des Audi A6 von 2004 gilt als Vorreiter auf diesem Gebiet. Heute kommen hybride Strukturen speziell bei Karosserien von BMW zum Einsatz, wie beispielsweise im 7er, 8er oder auch bei dem neusten E-Fahrzeug von BMW, dem iX. Porsche setzt bei dem aktuellen Modell des 911 Cabrio ebenfalls auf eine A-Säule in Hybridbauweise. Tesla hingegen nutzt die Vorteile des Hybridleichtbaus bei Fahrwerksteilen des Model 3, X und Y.

Hybride Mehrschichtverbunde als neuartige Werkstoffklasse

Einen konsequenten Schritt zur Erschließung weiterer Leichtbaupotentiale bilden die aus der Luft- und Raumfahrt bekannten Mehrschichtverbunde. Diese kombinieren Werkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften zu einem flächigen Halbzeug und stellen eine besondere Ausprägung des hybriden Leichtbaus dar. Der wohl bekannteste Vertreter dieser Werkstoffklasse - *Glare* - kommt als Verbund



Fig. 1 Einsatz von Glare (gelb) im Rumpfbereich des Airbus A380, aus [1]

aus mehreren alternierenden Schichten aus Aluminium und glasfaserverstärktem Kunststoff für große Rumpfbereiche des Airbus A380 zur Anwendung, siehe Fig. 1. Ein direkter Technologietransfer in die Automobilfertigung ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da die notwendigen Fertigungstechnologien und Prozesszeiten den automobiltypischen Kosten- und Taktzeitvorgaben nicht genügen. Zudem bringt die Kombination von Werkstoffen mit teils konträren Eigenschaften neue Herausforderungen für den werkstoffgerechten Bauteilentwurf.

Der HyOpt Ansatz

Um die Vorzüge hybrider Mehrschichtverbunde zukünftig auch für Automobilanwendungen zugänglich zu machen, widmet sich das interdisziplinäre Forschungsprojekt HyOpt der optimierungsbasierten Entwicklung von flächigen Hybridwerkstoffen. Das HyOpt Projekt, welches im Mai 2019 am Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen gestartet ist und bis Mitte 2022 aus Mitteln des Landes Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union gefördert wird, setzt sich als Ziel den anforderungsgerechten Leichtbau mit verschiedenartigen Werkstoffen durch numerische Verfahren und Automatisierung voranzutreiben. Dafür entwickelt das Projektkonsortium eine

Toolbox, die dem Design und der Herstellung neuer Hybridwerkstoffe dient. Getreu dem Kredo „*der richtige Werkstoff an der richtigen Stelle*“ wird das Eigenschaftsprofil des zu entwickelnden Werkstoffes direkt aus Simulationen abgeleitet und berücksichtigt neben den Strukturanforderungen an das fertige Bauteil auch Fertigungsrestriktionen an das umzuformende Halbzeug. Die Vorteile dieser Strategie liegen in der einfachen Handhabung des Prozesses sowie in der Nutzung bereits aus der Blechumformung bewährter Anlagentechnik. Die erzielbare Senkung gegenüber konventionellen Blechformteilen liegt dabei zwischen 25 bis 30 %. Die konsequente Übertragung des Multi-Materialansatzes auf die Halbzeugebene erfordert jedoch eine ganzheitliche Betrachtung des Werkstoffverbundes. Hierzu zählen neben den Grundwerkstoffen auch entsprechende Oberflächeneigenschaften und Haftvermittlersysteme, ökologische Aspekte, Wirtschaftlichkeit und gesellschaftliche Akzeptanz, welche innerhalb von mehreren Querschnittsprojekten von den Wissenschaftler*innen entsprechend adressiert werden.

Von der Simulation zum Werkstoffverbund

Im Rahmen der CAE Prozess- und Methodenentwicklung wird in der Arbeitsgruppe Leichtbau im Automobil (LiA) die ganzheitliche Auslegung von Hybridwerkstoffen erforscht. Ausgehend von der Endgeometrie und den vorgegebenen Randbedingungen kann zunächst mit Hilfe von numerischen Optimierungsalgorithmen aus der Struktursimulation eine optimale Materialverteilung für die hybriden Mehrschichtverbunde ermittelt werden. Das umformtechnische Verhalten der werkstoffseitig optimierten Halbzeuge ist allerdings zunächst noch unbekannt. Deshalb wird anschließend die Umformbarkeit der hybriden Werkstoffkombinationen evaluiert. Im iterativen Optimierungsprozess wird durch die Auswahl von Materialverteilung und Faserorientierungswinkeln ein - hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und der Umformbarkeit - optimales hybrides Halbzeug entworfen.

Auf Grund der hohen Anzahl an möglichen Werkstoffparametern und strukturellen Lastfällen erfolgt die werkstoffseitige Auslegung mithilfe von Optimierungsalgorithmen und künstlichen neuronalen Netzen. Durch die effizienten numerischen Verfahren kann der Auslegungs-

prozess signifikant beschleunigt und automatisiert werden. Die Bewertung der Umformbarkeit erfolgt mit der Finite-Elemente-Methode (FEM), welche heutzutage ein weit verbreitetes Werkzeug in der Umformsimulation darstellt. Ausgehend von der Endgeometrie erfolgt die Ermittlung der abgewickelten Platine. Hierzu wird eine eigenständige inverse FE-Methodik entwickelt, die die Orientierung von Fasern in der Endgeometrie prognostiziert und somit Aussagen über die Umformbarkeit von hybriden Werkstoffsystemen trifft. Zur Vermeidung von Umformfehlern, wie Faltenbildung oder Materialversagen, werden die Faserorientierungen in umformkritischen Bereichen der einzelnen Laminatschichten angepasst, siehe Fig. 2. Die umformtechnisch optimierten Faserlagen werden in einem automatisierten Faser-Ablegungs-Verfahren anschließend auf den Blechplatinen abgelegt. Die einzelnen Teilaspekte der ganzheitlichen optimierungsbasierten Auslegung von Hybridwerkstoffen werden letztendlich in einer benutzerfreundlichen Software zusammengeführt – der HyOpt App. Die Software wird dabei so konzipiert, dass die Eingabe keine speziellen Anwenderkenntnisse benötigt und die einzelnen Funktionen im Hintergrund ablaufen. Die gewonnenen Forschungsergebnisse können somit einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung gestellt werden.

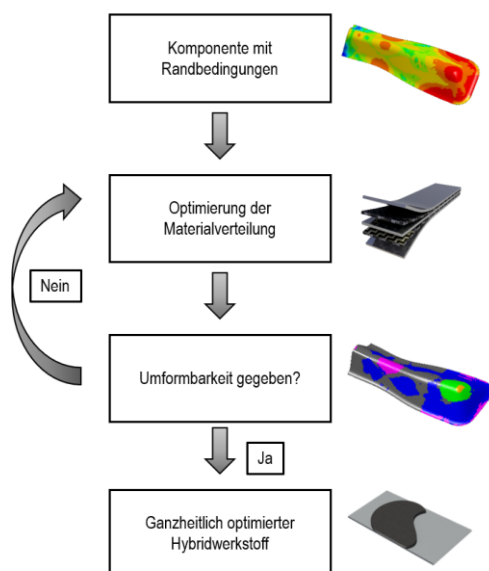


Fig. 2 Ablauf zur ganzheitlichen optimierungsbasierten Entwicklung von Hybridwerkstoffen (© LiA, Universität Paderborn)

Angepasste Fertigungstechnik

Am Lehrstuhl für Umformende und Spanende Fertigungstechnik (LUF) wird im Rahmen des Forschungsvorhabens HyOpt ein kombinierter Umform- und Aushärteprozess zur Herstellung von Bauteilen aus hybriden Platinen, basierend auf Faser Metall Laminaten (FML), entwickelt. Diese flächigen Hybridplatinen bestehen dabei aus zwei dünnen Stahldeckblechen und einem Kern aus unidirektionalem CFK-Prepreg (-Lagen) mit duromerem Matrixsystem. Die umformgerechte Auslegung der Faser Metall Laminaten und die Entwicklung die für deren Weiterverarbeitung notwendigen Fertigungsprozesse ist für die Herstellung hochfester, genauer und kosteneffizienter Bauteile von essentieller Bedeutung. Dabei stehen oftmals die Betriebsanforderungen der Hybridbauteile in Konflikt mit den umformtechnischen Fertigungsanforderungen.

Die umformtechnische Fertigung von Hybridbauteilen aus Faser Metall Laminaten hat je nach Spannungszustand unkontrollierte Faser-Verzerrungen und -verschiebungen, Stauchung von Fasern und Fasersträngen sowie Extrusion des Matrixmaterials der CFK-Patches (Prepeg) zur Folge. Diese Verformungsmechanismen führen zu verschiedenen Schadensfällen, in der Regel zu einer ausgeprägten Faltenbildung auf der Innenseite des umgeformten Hybridbauteils. Um diesen entgegenzuwirken, werden die Einflüsse von wesentlichen Prozessparametern auf das Umformverhalten von FML-Platinen erforscht sowie im Rahmen des Prozessdesigns verschiedene Maßnahmen entwickelt und realisiert.

Zum einen werden daher vorteilhafte Patchgeometrien entwickelt, die sich durch multiple Faserausrichtungen auszeichnen. Hierfür werden bspw. die Fasern der CFK-Patches in Abhängigkeit vom Spannungszustand in der Umformzone ausgerichtet. Diese Patchdesigns ermöglichen somit eine Steuerung des Materialflusses und der Faserverschiebung während des Umformprozesses. Durch Einsatz sogenannter Zwischenelemente, die eine ungewollte Verringerung des Abstandes der Deckbleche verhindern sollen, kann zum anderen ein weiteres limitierendes Problem, die Extrusion des Matrixwerkstoffes wirkungsvoll verhindert werden. Der Einsatz von prozessspezifischen Zwischenelementen und die Entwicklung von belastungsorientierten Patchdesigns haben bspw.



Fig. 3 Links: umgeformter Hybridverbund ohne gesonderte Maßnahmen, Rechts: Umformergebnis eines hybriden Mehrschichtverbunds mit HyOpt Technologie vor dem Besäumen (© LUF, Universität Paderborn)

eine signifikante Verringerung der Faltenbildung zur Folge und die Form und Maßgenauigkeit der hybriden Bauteile nehmen deutlich zu, siehe Fig. 3.

Schließlich wird gemeinsam mit der Firma ESM GmbH & Co. KG an einer automatisierten und robotergeführten Fertigung der maßgeschneiderten Hybridhalbzeuge geforscht, die eine industrielle und wirtschaftliche Nutzbarkeit des Verfahrens sicherstellen soll.

Klick-Chemie als Ansatz zur Entwicklung maßgeschneiderter Matrix- und Klebstoffsysteme

Werden artverschiedene Werkstoffe zu einem flächigen Hybridwerkstoff miteinander verbunden, so wird vor allem auf das Kleben als Fügetechnologie zurückgegriffen. Klebstoffe leisten in der Entwicklung von Leichtbaustrukturen einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtperformance des Bauteils. Werden solche Sandwichlamine zu einem Bauteil umgeformt, wirken anisotrope Kräfte, durch gezielte Strukturverformung, auf das Bauteil ein. In Zonen hoher Flächenpressung wird der Klebstoff, zwischen den Komponenten, in Bereiche niedriger Flächenpressung verdrängt. Dies führt letztendlich zu inhomogenen Wandstärken des Bauteils und erhöht das Risiko der Faltenbildung. Um diesen negativen Effekt entgegenzuwirken widmet sich der Arbeitskreis Coatings, Materials and Polymers (CMP) der Entwicklung von Klebstoffen mit einstellbarer Fließfähigkeit durch thermisch

reversible Vernetzung. Der Ansatz sieht vor, das Cross-Linking zwischen dem Epoxidharz und dem Härter über die sogenannte „Click-Chemie“ zu steuern. Schwerpunkt ist die Herstellung neuartiger aminische Härter.

Fig. 4 zeigt schematisch ein Epoxidmonomer sowie einen konventionellen Härter. Die Epoxidringe des Epoxidharzes werden durch ein H-Atom des aminischen Härters, bei Temperaturen zwischen 120 °C und 160 °C, geöffnet, sodass eine Additionsreaktion erfolgen kann (Fig. 4b). Anders als bei herkömmlichen Härttern wird am CMP ein Härter entwickelt, der aus zwei aminbasierten Komponenten besteht, die in einer Click-Chemie thermoreversibel verbunden oder getrennt werden können. Realisiert wird dieser Ansatz durch eine chemische Ringschlussmethode die als Diels-Alder-Verknüpfung bekannt ist.

Furane und Maleimide stellen für die Click-Chemie geeignete funktionelle Gruppen dar. Um die Fließfähigkeit einzustellen werden im Projekt mehrfach funktionalisierte Maleimide hergestellt die vielen Verknüpfungspunkte gleichzeitig öffnen und wieder schließen können. Wird der hybride Werkstoff nun bei Temperaturen zwischen 120 °C und 160 °C umgeformt, können die Verknüpfungspunkte schnell in einer Retro-Diels-Alder-Reaktion geöffnet und nach dem Umformen bei Temperaturen unterhalb wieder geschlossen werden. So erhält das Epoxidharz bei Raumtemperatur die Eigenschaften eines duroplastischen Systems mit dem Vorteil, der

thermischen Erweichung bei Temperaturerhöhung. Die Einstellung der Fließfähigkeit über die Click-Chemie ist auch für die polymere Matrix von Faserverbunden wichtig. Sie kann das Fasergleiten während eines Umformprozesses positiv beeinflussen.

Um den Härter effizient in der Verknüpfung auszulegen ist es vorteilhaft Maleimid-Strukturen einzusetzen, die mehr als eine Maleimideinheit aufweisen. Die Verfügbarkeit solcher Maleimide ist

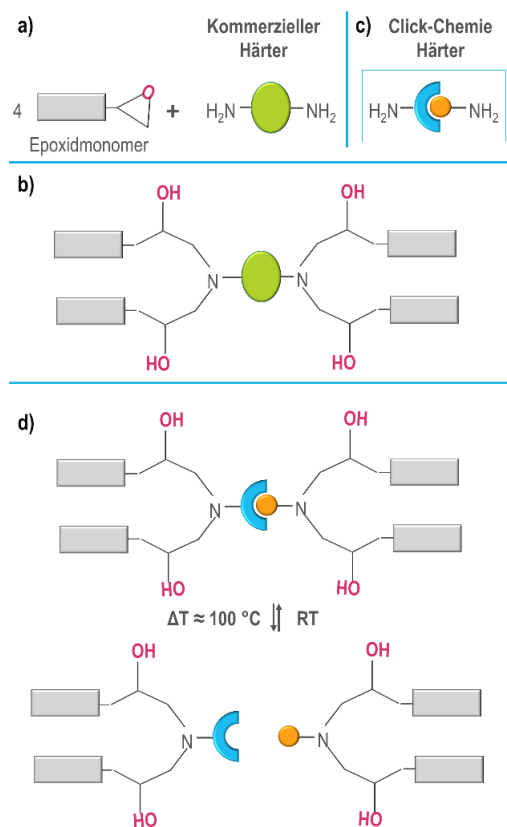


Fig. 4 Mechanismus der thermoreversiblen Vernetzung von Klebstoffen. a) Epoxidmonomer und Diamin (konventioneller Härter). b) Vernetzung der Monomere über das Diamin in einer Additionsreaktion. c) Neuentwicklung eines thermoreversiblen Härters. d) Vernetzung des neuen Härters mit den Epoxidmonomeren und die reversible Verknüpfung. (© CMP, Universität Paderborn)

jedoch begrenzt und industriell unerschwinglich. Das CMP widmet sich der Entwicklung kosten erschwinglicher Vernetzersysteme. Ein am CMP entwickeltes Bismaleimid ist das BMMP88 (Bismaleimidomethylpentan). Fig. 5 zeigt die Vernetzung des BMMP88 mit zwei Furfurylaminen. In einer Diels-Alder-Reaktion ([4+2]-Cycloaddition) bilden sie unter Sechsringbildung neue Kohlenstoffbindungen aus.

Je mehr Verknüpfungspunkte ein Multi-Maleimid zur Bindung bereitstellt, desto mehr Verknüpfungen können zeitgleich an einem Verknüpfungspunkt gebildet oder gelöst werden. Dies kann die Vernetzungs- und Trennrate erhöhen. Vorstellbar sind Strukturen mit bis zu sechs Maleimideinheiten wie Fig. 5c zeigt. Die Kettenlänge, die die Maleimideinheit mit dem Zentrum des Multi-Maleimids aufweist, kann entscheidend die Fließfähigkeit beeinflussen. Auf diese Weise lässt sich ein thermoplastisches Harz während der Umformung erreichen das duroplastische Eigenschaften bei Raumtemperatur aufweist.

Gradierte Oberflächen

Die Verarbeitung von Hybridwerkstoffen durch umformende Fertigungsverfahren kann durch eine gradierte Oberflächenstrukturierung der metallischen Komponente mit Verfahren wie Anodisieren, Laserstrukturieren oder Sandstrahlen optimiert werden. Durch Variation der Prozessparameter lassen sich verschiedene Oberflächenstrukturen auf Mikro- und Nanoebene erzeugen, die wiederum in unterschiedlichen Materialeigenschaften resultieren. Beispielsweise kann so beim Tiefziehen das Fließverhalten zwischen Stahl und Faserverbundkunststoff beeinflusst werden.

Der Lehrstuhl für Werkstoffkunde (LWK) entwickelt im Rahmen des HyOpt-Projekts verschiedene Prozessstrategien zur gezielten Gradierung der Oberflächenstrukturierung. Dies geschieht in experimentellen Studien, in denen auch die Zeiteffizienz der Verfahren und die Entstehung von Materialverzug durch fertigungsbedingte Eigenspannungen berücksichtigt werden.

In einer eigens für das Projekt entwickelten Anlage können verzinkte Stahlbleche mit Abmessungen von bis zu 640 x 380 mm² anodisiert werden. Als Ergebnis des Anodisierens bildet sich auf der Blechoberfläche bereits nach wenigen Minuten eine poröse Zinkoxidschicht (Fig. 6). Diese Schicht besitzt hervorragende Benetzungseigenschaften und eignet sich daher sehr gut für das adhäsive Fügen mit faserverstärkten Kunststoffen. Um gradierte Oberflächeneigenschaften zu erzeugen, ist es notwendig, die Ausprägung dieser Zinkoxidschicht über die Oberfläche variieren zu können, was durch die Weiterentwicklung der Anlage ermöglicht werden soll.

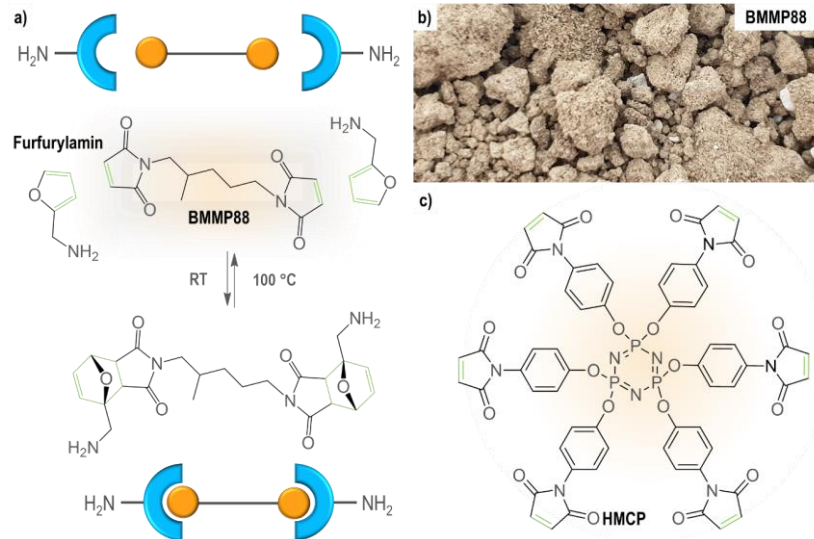


Fig. 6 a) Mechanismus der Diel-Alder- und retro-Diels-Alder Reaktion am Beispiel von einem am CMP entwickeltem Bismaleimid (BMMPP88). b) Pulverförmiges Bismaleimid (BMMPP88). c) Multi-Maleimid (Hexa(4-maleimidophenoxy)-cyclotriphosphazen. © CMP, Universität Paderborn)

Eine bereits etablierte Methode der Oberflächenbehandlung ist die Laserstrukturierung mit PulsLasem, welche in Zusammenarbeit mit der Firma Clean-Lasersysteme GmbH weiterentwickelt wird. Bei diesem Verfahren wird durch kurzes Aufschmelzen und Wiedererstarren sowie Verdampfen und Deposition des Grundmaterials eine völlig neue Oberflächenstruktur erzeugt, wie in Fig. 7 dargestellt.

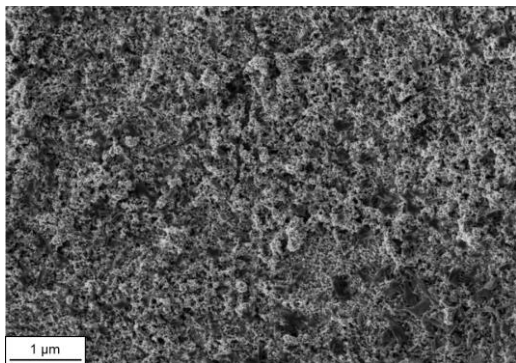


Fig. 5 Poröse Zinkoxidschicht nach dem Anodisieren. © LWK, Universität Paderborn)

Auch die Haftigenschaften von zeiteffizient laserstrukturierten Oberflächen werden im Rahmen des Projekts umfassend untersucht. Die Scangeschwindigkeit bei der Laserstrukturierung liegt zwischen 1,5 m/s und 42 m/s. Das gezielte Einstellen von Ausgangsleistung und Pulsfrequenz ermöglicht eine präzise Gradierung der Haftigenschaften bei gleichbleibender Zeiteffizienz.

Als weiterer Projektpartner bringt die Firma D&S Sandstrahltechnik GmbH & Co. KG ihr Wissen über

die Entwicklung gradierter Oberflächenstrukturierungen mittels Sandstrahlen

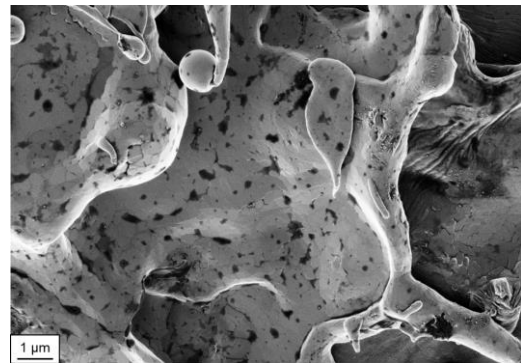


Fig. 7 Stahloberfläche nach dem Laserstrukturieren. © LWK, Universität Paderborn)

ein. Dabei wird als Strahlmittel scharfkantiger Edelkorund eingesetzt. Aktuell wird der Einfluss des Strahldrucks und der Körnung auf die Oberflächenstrukturierung, die daraus abgeleiteten Haftigenschaften und den möglicherweise entstandenen Materialverzug evaluiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen des HyOpt Projektes entwickelte Auslegungs- und Prozesstechnik machen die Vorzüge hybrider Mehrschichtverbunde auch für Anwendungen außerhalb der Luft- und Raumfahrt zugänglich und heben das Leichtbaupotential von Umformteilen auf ein neues Niveau. Dabei lassen sich mit den neuartigen Hybridverbunden neben der Automobilindustrie auch alle anderen Märkte erschließen, die von leichten Bauteilen profitieren. Eine zentrale Anforderung an neue

Leichtbautechnologien ist dabei neben dem Gewichtsvorteil auch die Kosteneffizienz und eine einfache Prozesshandhabung, denn kostengünstige und anwenderfreundliche Leichtbaulösungen versprechen einen flächendeckenden Einsatz und folglich weitreichende Emissionssenkungen. Daher

steht im Vordergrund aller Entwicklungen die Prämisse, dass die Anwendung keine speziellen Kenntnisse voraussetzt und die einzelnen Technologien einfach anzuwenden sind. Leichtbau leicht gemacht – für die Praxis!

Autor*innen:

Katja Engelkemeier, M.Sc. | Coatings, Materials & Polymers (CMP)

Dipl.-Ing. Thomas Heggemann | Lehrstuhl für Spanende und Umformende Fertigungstechnik (LUF)

Hüseyin Sapli, M.Sc. | Lehrstuhl für Spanende und Umformende Fertigungstechnik (LUF)

Dietrich Voswinkel, M.Sc. | Lehrstuhl für Werkstoffkunde (LKW)

Marcel Triebus, M.Sc. | Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, (LiA)

Moritz Ostermann, M.Sc. | Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, (LiA)

Alan A. Camberg, M.Sc. | Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, (LiA)

Am Projekt beteiligte Partner sind neben den Bereichen Leichtbau im Automobil (LiA), Werkstoffkunde (LWK), Umformende und Spanende Fertigungstechnik (LUF) Coatings, Materials & Polymers (CMP) sowie Technik & Diversity (T&D) der Universität Paderborn die Unternehmen D&S Holding GmbH aus Paderborn sowie ESM GmbH & Co. KG aus Borgentreich. Assoziierte Projektpartner sind thyssenkrupp Steel Europe AG, Duisburg, ERICHSEN GmbH & Co. KG, Hemer, Clean-Lasersysteme GmbH, Herzogenrath, und Kraiburg GmbH & Co. KG aus Waldkraiburg

Weitere Informationen: www.hyoft.de

Dieses Projekt wird durch die Europäische Union und das Land Nordrhein-Westfalen gefördert.



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Literatur

- [1] OECD (2019), Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris.
- [2] <https://www.flightglobal.com/creating-a-titan/60787.article>