

per Pyrolyse – einer speziellen sauerstofffreien Verbrennung – aus den Gurten wieder Ruße und Stahlseile werden. Für Altreifen gab es das Verfahren bereits. Die Gurte versprechen sogar bessere Ergebnisse, weil sie weniger chemische Füllstoffe enthalten. Auch dieses Vorhaben fördert die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Forschungspartner ist ein Unternehmen, das sich erfolgreich auf Gummi-Pyrolyse spezialisiert hat.

„Es ist ein klar menschengemachtes Problem, da müsste man ansetzen.“

Eine generelle „Rückbaufunktionalität“ wäre ein guter Weg, Ressourcen zu schonen – soll heißen: Produkte würden grundsätzlich so geplant und produziert, dass sie in ihre Bestandteile zurückgebaut oder umgebaut werden können. Das halten die wissenschaftlichen Mitarbeiter der Runde

aber für wenig realistisch. Das sei zurzeit nicht wirklich gefragt. Das eigentliche Funktionieren im Betrieb spiele eine so überragende Rolle, dass man das im Prinzip ohne Kosten und Aufwand anbieten müsse. Grundsätzlich kann man Ressourcen natürlich am besten dadurch einsparen, dass Produkte langlebiger werden und damit effizienter. Aber das, so ein Fazit, sei gar nicht gewollt. „Es ist ein klar menschengemachtes Problem, da müsste man ansetzen“, sagt Stefan Jacob. Björn Richter glaubt, dass es erst richtig krachen muss, wenn sich in dieser Hinsicht etwas grundsätzlich ändern soll.

„Wir sind sicher alle keine Weltretter“, vermutet Felix Flöter **→ ReGenerate**, „aber irgendwann, egal ob in 50, 100 oder 1000 Jahren, werden wir definitiv keine neuen Rohstoffe mehr haben. Dann *müssen* wir in Kreisläufen denken und arbeiten, und dann werden wir mit all unseren Projekten ein kleines Stück dazu beigetragen haben.“

An diesem Sonderforschungsbereich aus dem Maschinenbau der Leibniz Universität sind viele Institute beteiligt. Sein Ziel ist es, wissenschaftliche Grundlagen für die Instandsetzung komplexer Investitionsgüter wie etwa Flugzeugtriebwerke zu erarbeiten – oder mit anderen Worten: wertvolle Komponenten nicht verschrotten zu müssen, wenn sie beschädigt sind, sondern sie wirtschaftlich wieder aufzuarbeiten und weiterhin sicher nutzen zu können.

Teilbereich Kapazitätsplanung: „Unser Fokus liegt nicht so sehr auf einem bestimmten Bauteil“, sagt Thorben Kuprat (links), der sich mit der Planung und Steuerung des Regenerationsprozesses beschäftigt. „Wir arbeiten letztlich daran, Ressourcenersparnis wirtschaftlich relevant zu machen.“ Das ist nicht ganz einfach, denn anders als beim gut kalkulierbaren Aufwand bei Neuproduktionen muss Kuprat Mitarbeiter, Kosten, Gestaltungsoptionen schon planen, bevor eine beschädigte Komponente überhaupt befundet ist.

Teilbereich Lichtbogenschweißen von Titanlegierungen: Demian Langen (Mitte) erforscht, wie sich ein energiereduziertes Lichtbogenschweißverfahren nutzen lässt, um die besonders beanspruchten Bereiche von Hochleistungsbauteilen aus Titanlegierungen – etwa Beschädigungen an Verdichterschaukeln – zu reparieren. „Wertschöpfung für die Kunden mit weniger Ressourceneinsatz“, so formuliert Langen den Antrieb des Teilprojekts.

Teilbereich Reparaturzelle: Felix Flöter (rechts) entwickelt eine „geschickte Reparaturzelle“, das ist eine Maschine, die die

Reparatur der Laufschaufeln – oder allgemeiner: schwingungsanfälliger Bauteile – individuell an den Schaden des einzelnen Bauteils anpassen kann. Verschiedene Regenerationstechnologien werden so entlang des jeweiligen „Reparaturpfades“ automatisch innerhalb einer Maschine verknüpft.

Sonderforschungsbereich „Regeneration komplexer Investitionsgüter“, gefördert durch die DFG



→ ReGenerate

Werkstoffe der Zukunft: Fünf Thesen

Zwei relativ neue Entwicklungen verändern die Werkstoffwelt: Die Werkstoffpulver für die additive Fertigung und die Verknappung vieler Rohstoffe.

Dazu kommen die bekannten Ziele:

Leichte Werkstoffe für all das, was später bewegt wird, um die für den Betrieb notwendige Energie und den entsprechenden CO₂-Ausstoß zu reduzieren; wirtschaftliche Prozesse für die neuen Werkstoffoptionen und maßgeschneiderte Eigenschaften.



1 Werkstoffe werden selbstständig: Sie kommunizieren, sie härten und heilen sich selbst.

Manche Werkstoffe sind so kreiert, dass sie wie „von selbst“ auf spezielle Anforderungen reagieren.

Aktuell macht zum Beispiel ein Werkstoff einen sehr selbstständigen Eindruck, der als Gesenkwerkzeug in Schmiedepressen eingesetzt wird. Er besteht aus einem neuartigen Stahl, der gemeinsam vom Institut für Werkstoffkunde (IW) und vom Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Am Institut für Montagetechnik werden neue Werkstoffe zwar nicht hergestellt, aber genutzt, zum Beispiel für Soft Robotics, die den risikoärmeren Umgang von Mensch und Roboter ermöglichen sollen. Gundula Runge beschäftigt sich damit. Sie setzt Hydrogele mit eingebetteten Mikro- oder Nanopartikeln ein. Solche neuen Materialien könnten es künftig etwa möglich machen, dass ein Greifer aus weichem Hydrogel-Material seine



„Viele dieser Gele haben auch Selbstheilungseigenschaften: Wenn man sie auseinanderreißt, fügen sie sich nach einiger Zeit wieder zusammen.“

entwickelt wurde und sich an den beanspruchten Stellen, dort wo Temperatur und Druck beim Umformen am höchsten sind, durch Gefügeumwandlungen beim Abkühlen ganz von selbst wieder härtet. Florian Nürnberger, Oberingenieur am IW, geht von einem erheblichen Standzeitgewinn aus, denn „klassischer Stahl bleibt bei hohen Temperaturen weich und verschleißt schnell.“

Formgedächtnislegierungen haben – wie der Name sagt – anscheinend ein Gedächtnis, da sie, wenn sie zuvor im erwärmten Zustand verformt wurden, nach dem Abkühlen in ihre ursprüngliche Form zurückkehren. Am IW weiß man mittlerweile, warum dieser Effekt bei bestimmten Legierungen immer nur einige Zyklen lang funktioniert: Es bilden sich „Ausscheidungen“ im Material. Dagegen helfen Regenerationszyklen, die diese Ausscheidungen auflösen. Das eigentliche Ziel heißt aber: Die Formgedächtnislegierungen für den Einsatz bei wirklich hohen Temperaturen – etwa in Turbinen – einsetzbar zu machen, und zwar mit Materialien, die bezahlbar sind. Etwa mit Titan und Tantal statt mit Palladium und Platin.

Farbe wechselt, sobald die zulässige Kraft überschritten ist. „Viele dieser Gele haben auch Selbstheilungseigenschaften: Wenn man sie auseinanderreißt, fügen sie sich nach einiger Zeit wieder zusammen“, sagt Runge. Polymerwissenschaftler aus Dresden, mit denen sie kooperiert, haben mittlerweile Elastomere entwickelt, mit denen sich Autoreifen selbst flicken. Der Terminator lässt grüßen ... Ein Ziel der Soft Robotics ist ein Roboter, der sich beim Zusammentreffen mit Menschen „weich“ schalten kann – mit dem gegenteiligen Effekt jener Motorradjacken, die sich beim Aufprall verhärten. Das ist nicht nur für eine gemeinsame Montage von Mensch und Roboter interessant, sondern wird auch die Service-Robotik – ob in der Pflege oder der Küche – beeinflussen.

Dass Werkstoffe auch kommunizieren können – etwas, was für die Industrie 4.0 unverzichtbar ist – ist am PZH schon lange ein Thema: Der Sonderforschungsbereich „Gentelligente Bauteile“ schreibt den Bauteilen zum Beispiel Informationen aus der Herstellung und der Nutzungsphase ein – und nutzt dazu auch Neuentwicklungen wie magnetisches Magnesium, das etwa den „sensorischen Radträger“ ermöglicht hat.

2 CFK gegen Leichtbau-Metall? Nein: Mobilitätswerkstoffe werden hybrid

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – auch CFK, FVK oder Carbon genannt – treiben die Wissenschaftler aus zwei Gründen um: eine Fertigung in industrierelevantem Takt ist noch nicht machbar, und es ist zusätzlich eine echte Herausforderung, CFK mit Metall zusammenzubringen. Dass gerade der Kombination des CFK mit Metall die Zukunft im Leichtbau gehört, ist Konsens bei den Wissenschaftlern am PZH: Metalle, insbesondere Stahl und Aluminium, sind erstklassige, gut recyclebare Werkstoffe, mit denen auch weiterhin im Leichtbaubereich geforscht wird (im PZH beispielsweise im Projekt „Leichtbaustahl“, über das wir im pzh2015 ausführlich berichtet haben). Sie komplett durch CFK ersetzen zu wollen, macht deshalb wenig Sinn. Faserverstärkte Werkstoffe aber könnten Metalle in vielen Fällen optimieren, denn sie verfügen entlang der Faser über eine weitaus bessere gewichtsspezifische Festigkeit.

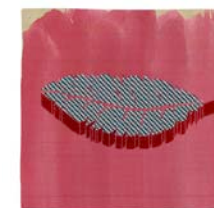
„Die Industrie hat großes Interesse daran, beides zu verbinden, aber noch hat sich kein Verfahren durchsetzen können“, sagt André Neumann, der das „Kompetenzteam FVK-Metall-Hybride“ am IFUM leitet. „Die Umformeigenschaften von Metallen und Kunststoff unterscheiden sich erheblich – darin liegt die Herausforderung. Wir arbeiten zum Beispiel gerade daran, die Umformung beider Materialien in der Simulation zu koppeln.“ „Kunststoff auf Metall geht ganz schlecht“, sagt auch Christopher Bruns. „Aber die Industrie ist sehr dahinterher, faserverstärkte Kunststoffe vor allem auch taktzeitgerecht zu fertigen – die Open Hybrid LabFactory (OHLF), in der wir mitwirken, verfolgt genau dieses Ziel.“ Bruns erforscht als Mitarbeiter des Instituts für Montagetechnik in einem OHLF-Projekt Methoden, wie sogenannte Organobleche in akzeptabler Taktzeit vollautomatisch in die Umformpresse eingelegt werden können. Das ist nicht ganz ohne, denn Organobleche, Faserverbundwerkstoffe mit rechtwinklig verwobenen Endlosfasern, verhalten sich im erwärmten Zustand „wie ein Geschirrtuch“, was die Handhabung, insbesondere das Greifen, wesentlich erschwert.

Ein weiterer Schwerpunkt der CFK-Forschung des PZH befindet sich – als Außenstelle des Instituts für Fertigungstechnik

und Werkzeugmaschinen – am Standort des CFK-Valley in Stade, in unmittelbarer Nachbarschaft zur Luftfahrtindustrie. Carsten Schmidt leitet diese Außenstelle. Sein 13-köpfiges Team will wirtschaftlich Bauteile fertigen, die sowohl Metall als auch CFK enthalten. „Eine Riesenherausforderung, denn Metall dehnt sich aus, CFK nicht. Bei der Herstellung und auch während der Nutzung.“ In Stade wird unter anderem an den Grundlagen von Metall-CFK Hybriden gearbeitet; sie sollen als Standardwerk und Anwendungshandbuch veröffentlicht werden.

Zurzeit beschäftigt sich das Team damit, klassische Verbindungstechnologien wie das Nieten oder Kleben der verschiedenen Verbundpartner durch einen Hybridisierungsvorgang zu ersetzen und es direkt in den Herstellungsprozess zu integrieren. Das Bauteil wird Schicht für Schicht aufgebaut und erst dabei wird – individuell an die Bauteilanforderungen angepasst – entschieden, ob man Metallfolien oder Kohlenstofffaserschichten einlegt; jede Schicht gerade mal 125 Mikrometer dick. Ein anderes Ziel ist es, im Prozess die Bauteileigenschaften individuell einstellen zu können. Dafür entwickelt das Team ein Fertigungsverfahren, das während der Ablage der Schichten zwischen Thermoplast, Duroplast oder Elastomer variieren kann; und das entlang ein und desselben Kohlenstofffaserstrangs.

Schmidts Eindruck ist, dass die Industrie noch sehr zurückhaltend mit dem neuen Material umgeht. Aber: „Vielleicht bringen additive Fertigungsverfahren wie der 3D-Druck noch mehr in Bewegung. Schließlich stellen die schichtweisen CFK-Verfahren genau wie der 3D-Druck durch die deutlich größere gestalterische Freiheit in der Produktgestaltung attraktive Alternativen zur klassischen Fertigung dar.“



3 Werkstoffe sind maßgeschneidert und ermöglichen Bauteile mit unterschiedlichen Funktionen

Auch ohne CFK sind hybride Materialien ein zentrales Thema: Der Sonderforschungsbereich „Tailored Forming“, der seit 2015 am IFUM unter der Leitung von Professor Bernd-Arno Behrens angesiedelt ist, beschäftigt sich mit der Herausforderung, Stahl und Aluminium oder auch zwei verschiedene Stähle in einem Schmiedebauteil zu kombinieren. Conrad Frischkorn vom SFB



Korrosionsverhalten der hergestellten Hybridbauteile“, erklärt Frischkorn die Herausforderungen. „Der Gewinn wären Bauteile, die einerseits sehr verschleißfest sind und gute Festigkeiten aufweisen – und die dennoch relativ leicht sind.“

Neue Werkstoffhybride werden insgesamt dazu führen, dass Strukturbauteile immer mehr Funktionen bekommen. Florian Nürn-

berger vom IW kann sich beispielsweise Fensterscheiben mit Photovoltaikfähigkeiten vorstellen, „die sich zudem beleuchten oder abdunkeln lassen und vielleicht auch noch eine tragende Funktion übernehmen.“

Ein ganz anderes, aber ebenfalls hybrides Beispiel ist Eisensilber. Eisen und Silber mögen sich nicht, eine Legierungsbildung ist nicht möglich. Mit der additiven Fertigung kann man diesem Nachteil begegnen und einfach aus dem Pulver beider Metalle Eisensilber-Bauteile drucken. „Werkstoffe mit Eisen und etwas Silber sind sehr interessant für Implantate, die vom Körper abgebaut werden sollen, denn ihre elektrochemischen Eigenschaften beschleunigen diesen Abbau.“

erklärt, warum: „Durch die gezielte Kombination der Werkstoffe Stahl und Aluminium kann ein Bauteil deutlich leichter werden, weil es nur in den Bereichen Stahl enthält, in denen der Stahl wirklich erforderlich ist. Wir verfolgen den Ansatz, dass die beiden Werkstoffe zunächst gefügt und anschließend gemeinsam umgeformt werden.“

Schon das Fügen von Stahl und Aluminium ist nicht ohne, und einige Fragen für die nächsten Jahre müssen heißen: Welche Werkstoff- beziehungsweise Legierungskombinationen lassen sich stoffschlüssig fügen und welche Verfahren sind dafür gut geeignet? Wie macht der erzeugte Materialverbund die spätere Umformung mit? „Wichtig sind auch die dynamische Belastbarkeit und das

4 Künftige Werkstoffe werden recycelt – mal besser, mal schlechter

Die Recyclingfähigkeit von Stahlwerkstoffen ist kaum zu übertreffen. Sie können einfach eingeschmolzen und wiederverwendet werden. Bei Stahl/Aluminium-Verbindungen ist das Recycling schon etwas schwieriger – man kann dafür aber die unterschiedlichen Schmelzpunkte der Werkstoffe nutzen. Ob sich das Trennen einer Stahl/Stahl-Kombinationen sinnvoll und kostengünstig realisieren lässt, kann man dagegen nur im Einzelfall prüfen.

Sicher ist: Die Rückführung der Werkstoffe nimmt eine immer wichtigere Rolle ein. Für die Grundlagenforschung formuliert Conrad Frischkorn aus dem Sonderforschungsbereich „Tailored Forming“ es so: „Wir werden uns in den kommenden Jahren schwerpunktmäßig mit der Herstellung

und Bewertung der hybriden Massivbauteile beschäftigen. Aber auch das Recycling dieser Bauteile wird einen hohen Stellenwert haben. Denn klar ist auch: Lässt sich ein Werkstoffverbund nicht ordentlich trennen und recyceln, dann wird er sich nur schwer durchsetzen können.“

Letztlich hat die Recyclingfähigkeit auch Einfluss auf den Rohstoffpreis, der über den Erfolg am Markt mitbestimmt. Das gilt zumindest für Serienprodukte. Für Luxusanwendungen, bei denen der Preis oft nur eine untergeordnete Rolle spielt, ist der Effekt vernachlässigbar.

Aber wie recycelt man Multimaterialien, insbesondere Verbunde von Metallen und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen? Die Antwort heißt: So genau weiß man es

noch nicht, dafür ist das Thema zu jung. Die OHLF will „die gesamte Wertschöpfungskette für hybride Bauteile abbilden; von der konzeptionellen Auslegung über die Kohlenstofffaserherstellung und den hybriden Fertigungsprozess bis hin zum Recycling“. In Stade ist das Unternehmen „CFK Valley Stade Recycling“ angesiedelt, das CFK über Pyrolyse-Verfahren recycelt – mit dem Ziel der Kreislaufwirtschaft und der Nutzung der preiswerteren C-Recyclingfasern als Sekundärrohstoff. Carsten Schmidt, der die Forschungsaußenstelle in Stade leitet, findet dennoch, dass das Recycling in den Überlegungen zu neuen Bauweisen und Materialkonzepten noch viel zu kurz kommt. „Wir überlegen jetzt, ein Projekt zu starten, in dem das recycelte Material Ausgangswerkstoff wird und wir uns Gedanken über ein neues Halbzeugkonzept und ein Produktionsverfahren machen, das den geringen Kosten des Materials gerecht wird. Das könnte CFK auch für den leichtbauaffinen Mittelstand attraktiver machen.“



Möglicherweise in etwas weitere Ferne führt ein Trend in Richtung Naturfasern, der aber nicht in die Arbeitsgebiete am PZH fällt: Die Idee ist, etwa Fasern aus Hanf oder Flachs in eine Matrix aus Polyamid-Bioplastik aus Pflanzenöl einzubinden. Dieser Werkstoff wäre biologisch abbaubar.

Kohlenstofffasern dagegen sind atemkritisch, und man muss bei der Herstellung und Handhabung hohe Sicherheitsvorkehrungen einhalten. Eine weitere Herausforderung ist die Kunststoffmatrix bei den Duromeren: CFK-Werkstoffe mit einer solchen Matrix kann man nie wieder aufschweißen. Aber gerade beim Auto-Interieur setzen viele Hersteller auf Duromere, weil sie günstig sind. „CFK mit Thermoplaste-Matrix dagegen“, erklärt Schmidt, „kann man zwar recyceln, aber die Kohlenstoffketten werden dabei immer kürzer. Es gibt dafür noch keine echten Anwendungen, weil sie noch nicht in relevantem Umfang auf dem Markt sind.“



Dass Recyclingfähigkeit bislang nicht immer ein notwendiges Kriterium für erfolgreiche Markteinführung war, zeigen CFK-Karosserien, die komplett aus Duromeren bestehen. Sie lassen sich nicht reparieren, nicht recyceln – und verlagern den CO₂-Ausstoß letztlich nur von der Straße in die Fabrik.

Noch mehr gilt das für das aktuell liebste Spielzeug der Menschheit. „Es enthält nahezu die Hälfte aller Elemente des Periodensystems“, sagt Florian Nürnberger, der Werkstoffwissenschaftler. Ein Smartphone sei, unter Ressourcen- und Recyclingaspekten, nicht besser oder schlechter, sondern „echt schlimm“.

5 Der Preis diktiert alles

„Das richtige Material an der richtigen Stelle“ ist das Mantra der Produktions- und Werkstoffwissenschaftler, zumindest das halbe. Denn immer kommt gleich der Zusatz „... zum richtigen Preis“.

Eine mögliche Zukunftsvision sieht so aus, dass Konstrukteure eine Liste mit Werkstoffen vorliegen haben, die sich jeweils gut miteinander fügen oder umformen lassen. Und dann passen sie ihre Werkstoffauswahl jeweils an die aktuellen Kosten der Rohstoffe an. „Wenn wir dann zum Beispiel einen sehr hochwertigen, kostenintensiven Stahl mit einem preisgünstigen Stahl kombinieren können, dann lassen sich Hybridbauteile herstellen, die gegenüber einem Monomaterialbauteil nicht nur wesentlich günstiger sein können, sondern auch



umweltverträglicher, weil teure Legierungselemente im Stahl eingespart werden“, sagt Conrad Frischkorn.

Für die Entwickler neuer Werkstoffe und Prozesse bedeutet das auf der anderen Seite natürlich auch ein unbarmherziges Diktat des Wettbewerbs, oder, mit den Worten von André Neumann: „Am Ende muss ein Bauteil wirtschaftlich produziert und verkauft werden können. Prozesse und Werkstoffe, die nicht wirtschaftlich sind, werden sich für die Großserie nicht durchsetzen können. Funktionsintegrierte Hybridbauteile sind bisher nur in Oberklasseprodukten, insbesondere Oberklassefahrzeugen denkbar. Dass sich das mit bezahlbarem Leichtbau verändert, daran arbeiten wir“.