

*Materials change our future*

# WERKSTOFFE VERÄNDERN UNSERE ZUKUNFT



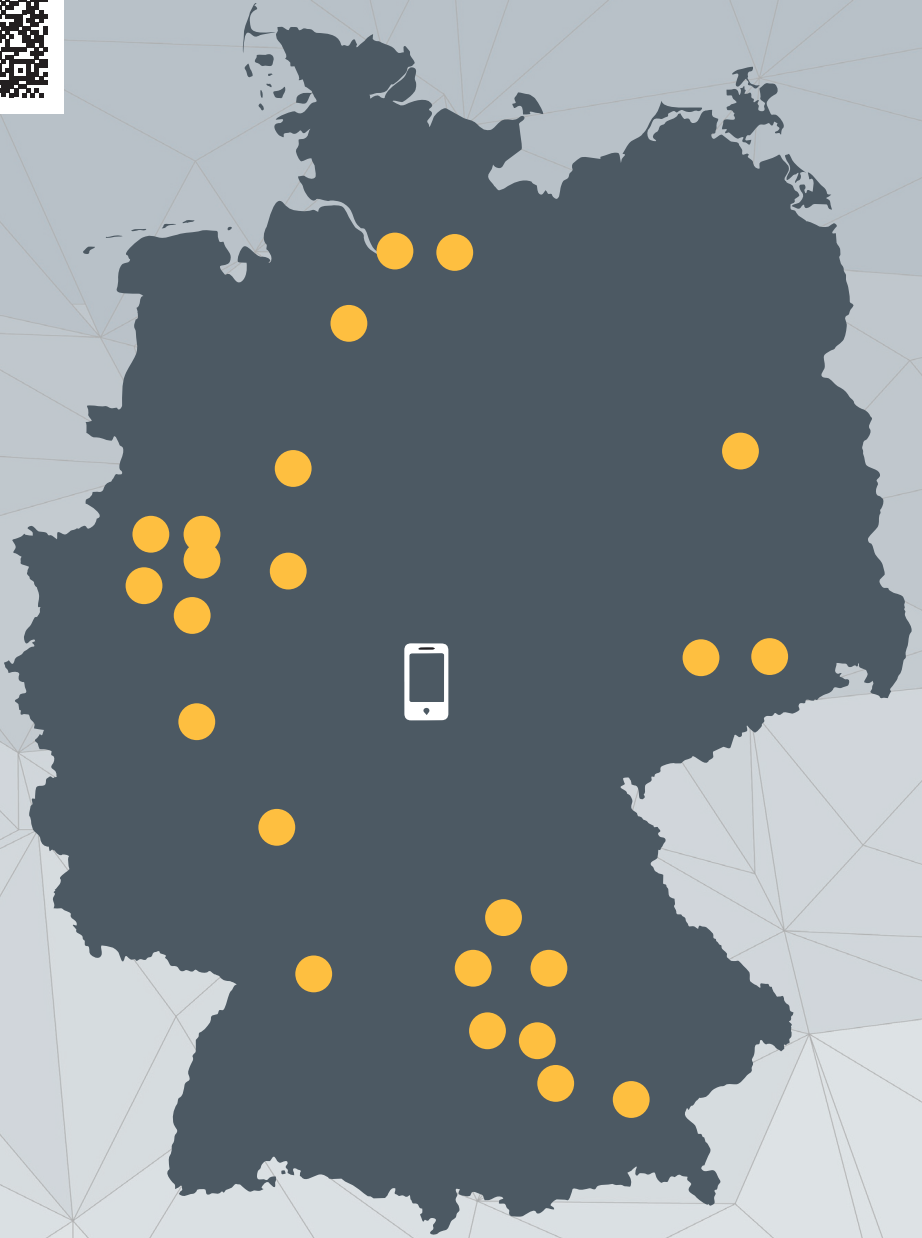
Online lesen/  
read online:



Bundesverband der Deutschen Luft-  
und Raumfahrtindustrie e. V. (BDLI)



Die Mitglieder des Unterforums Ausrüstung und Werkstoffe /  
*The members of the Subforum Materials and Components*



Wir danken allen an dieser Broschüre beteiligten Unternehmen / *Thanks to all companies involved in this brochure:*

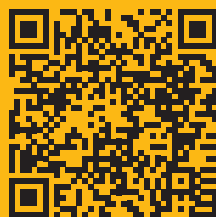


*Materials change our future*

# WERKSTOFFE VERÄNDERN UNSERE ZUKUNFT



Online lesen /  
read online:



## GRUSSWORT/ GREETING



Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie ist eine Hochtechnologie-Branche. Damit einher geht die Aufgabe, sich kontinuierlich neuen technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen in einem globalen Markt zu stellen.

Ihre internationale Spitzenstellung sichert die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie durch konsequent zielgerichtete Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um bestehende Produkte weiter zu optimieren und die Markteinführung künftiger Luft- und Raumfahrzeugmuster erfolgreich zu gestalten. Die fortlaufende Entwicklung neuer, innovativer Werkstoffe ist hierfür unverzichtbar. Die Industrieunternehmen werden bei dieser Aufgabe flankierend durch eine herausragende deutsche Forschungslandschaft unterstützt, die aus großen Forschungseinrichtungen, Universitäten und anderen Innovationstreibern besteht.

Die Luft- und Raumfahrt ist eine Branche, die nicht nur wächst, sondern sich zugleich rasant wandelt. Neue Märkte, neue Geschäftsmodelle, aber auch neue Konkurrenten entstehen überall auf der Welt. Hinzu kommen die großen Zukunftsaufgaben Umwelt- und Klimaschutz. Werkstoffe leisten einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der teils hochgesteckten Ziele, denn neue Werkstoffe unterstützen die Gestaltung unserer Zukunft in Richtung der politisch und gesellschaftlich gewünschten Ziele.

Das vorliegende Dokument wurde von den Unternehmen und Institutionen erarbeitet, die im Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V. (BDLI) in dem Gremium Werkstoffe und Komponenten zusammengeschlossen sind. Es veranschaulicht die Bedeutung der Werkstoffentwicklung für die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie und die damit verbundenen Chancen.



**ROLF PHILIPP** Geschäftsführender Gesellschafter Aircraft Philipp Group, Mitglied des Präsidiums des BDLI e.V., Vorsitzender des BDLI Unterforums Werkstoffe und Komponenten / Managing Partner Aircraft Philipp Group, Member of the BDLI Board of Directors, Chairman of BDLI Subforum Materials and Components



*The German aerospace industry is a high-tech sector. This goes hand in hand with the task of continuously facing up to new technological and economic challenges in a global market.*

*The German aerospace industry secures its leading international position through consistently targeted research and development in order to further optimize existing products and successfully shape the market launch of future generations of aircraft and spacecraft. The continuous development of new, innovative materials is indispensable for this. Industrial companies are supported in this task by an outstanding German research landscape consisting of large research institutions, universities and other innovation drivers.*

*Aerospace is an industry that is not only growing, but is also changing rapidly. New markets, new business models and new competitors are emerging all over the world. In addition, there are the major future challenges of environmental and climate protection. Materials make a significant contribution to the achievement of the sometimes ambitious goals, because new materials support changing our future in a direction politically and socially desired.*

*This document was prepared by the companies and institutions which are members of the German Aerospace Industries Association (BDLI - Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V.) in the Materials and Components Committee. It illustrates the importance of materials development for the German aerospace industry and the associated opportunities and risks.*

## INHALT / TABLE OF CONTENTS

Werkstoffe verändern unsere Zukunft / Materials change our future .....	6
Werkstoffe – die Basis nachhaltigen Erfolgs / Materials – the basis for sustainable success .....	11
Faserverbundwerkstoffe / Fibre Composites .....	11
Metalle / Metals .....	13
Metallische Hochtemperaturwerkstoffe / Metallic high temperature materials .....	15
Hybride Bauweisen / Hybrid design methods .....	17
Werkstoffe der nächsten Generation – Von der Idee zum wettbewerbsfähigen Produkt / Next generation materials – from the idea to the competitive product .....	18
Hocheffiziente Fertigungstechnologien für zukünftige Luft- und Raumfahrzeuge / Highly efficient manufacturing technologies for future aircraft and spacecrafts .....	20
Additive Fertigung – Sicherstellen und Ausbau einer nationalen Kernkompetenz / Additive manufacturing – ensuring and expanding a national core competence .....	26
Grüne Technologien für die Welt von Morgen / Green technologies for tomorrow's world .....	28
Simulation zur Leistungssteigerung und Verkürzung der Entwicklungszyklen / Simulation to increase performance and shorten development cycles .....	30
Luftfahrt-Supply-Chain 4.0 / Aviation Supply Chain 4.0 .....	32



# WERKSTOFFE VERÄNDERN UNSERE ZUKUNFT / MATERIALS CHANGE OUR FUTURE



Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie ist eine Hochtechnologie-Branche. Als solche hat sie das Privileg, führend an der Gestaltung unserer Zukunft mitzuwirken. Damit einher geht die Aufgabe, sich kontinuierlich neuen technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen in einem globalen Markt zu stellen. Ihre internationale Spitzenstellung sichert die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie durch konsequent zielgerichtete Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um bestehende Produkte weiter zu optimieren und die Markteinführung künftiger Luft- und Raumfahrzeuggenerationen erfolgreich zu gestalten.

Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie stützt sich auf eine hochentwickelte Wertschöpfungskette, bestehend aus kleineren und mittelgroßen Zulieferbetrieben, die zum Teil auf ihrem Gebiet Weltmarktführer sind („Hidden Champions“), aus großen Lieferanten für komplette Strukturen und Baugruppen, aus Herstellern von Flugzeugen, Hubschraubern, Satelliten und autonom fliegenden Systemen – in Deutschland z.B. Airbus, Airbus Helicopters und OHB – und aus Herstellern von Triebwerken für zivile, militärische und Raumfahrtanwendungen – in Deutschland z.B. MTU Aero Engines, Rolls-Royce Deutschland und ArianeGroup.

Die Industrieunternehmen bilden zusammen mit der hervorragend aufgestellten deutschen Forschungslandschaft – dazu gehörig große Forschungseinrichtungen wie z.B. das DLR, die Fraunhofer-Institute und Universitäten – ein hoch innovatives Netzwerk. Dieses Netzwerk bietet einzigartige Möglichkeiten der vertikalen Integration, d.h. die Vorbereitung „schlüsselfertiger“ Lösungen für die Aufgaben der Industrie.

Bei der Werkstoff- und Prozessentwicklung für die nächsten Generationen von Luft- und Raumfahrzeugen liegt ein besonderes Augenmerk auf der Steigerung der Energieeffizienz und der Gewichtseinsparung – d.h. der Nutzung neuer, hochinnovativer Leichtbaukonzepte und Werkstoffe. Gerade im Flugzeugbau ist ein geringes Leergewicht im Verhältnis zum maximalen Abfluggewicht die entscheidende Größe für den Aspekt der Wirtschaftlichkeit.



*The German aerospace industry is a high-technology sector. As such, it has the privilege of playing a leading role in shaping our future. This goes hand in hand with the task of continuously facing up to new technological and economic challenges in a global market. The German aerospace industry secures its leading international position through consistently targeted research and development work in order to further optimize existing products and successfully shape the market launch of future generations of aircraft and spacecraft.*

*The German aerospace industry is based on a highly developed value chain consisting of small and medium-sized suppliers – some of which are world market leaders in their field ("hidden champions"), of large suppliers of complete structures and assemblies, of manufacturers of aircraft, helicopters, satellites and autonomous flying systems – in Germany e.g. Airbus, Airbus Helicopters and OHB – and of manufacturers of engines for commercial, military and aerospace applications – in Germany e.g. MTU Aero Engines, Rolls-Royce Deutschland and ArianeGroup.*

*Together with the excellently positioned German research landscape – belonging to it large research institutions such as DLR, the Fraunhofer Institutes and universities – the industrial companies form a highly innovative network. This network offers unique opportunities for vertical integration, i.e. the preparation of "turnkey" solutions for the tasks of the industry.*

*In material and process development for the next generations of aircraft and spacecraft, special attention is increasingly been given to enhancing energy efficiency and weight savings – i.e. the use of new, highly innovative lightweight design concepts and materials. Especially in aircraft design, a low unladen weight in relation to the maximum take-off weight is the decisive factor for economic efficiency.*

Die kommerzielle Zivilluftfahrt ist ein globaler Wachstumsmarkt. Die deutsche Luftfahrtindustrie ist heute an allen internationalen Programmen, direkt oder indirekt, als wertgeschätzter Partner beteiligt und damit fester Bestandteil der global ausgerichteten Zulieferketten der großen Hersteller.



Von 1995-2018 hat sich die Luftverkehrsleistung weltweit um das 3-fache gesteigert. Der genannte Zeitraum bildet dabei auch mehr als 20 Jahre nationaler Förderung der vorwettbewerblichen Forschung im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo) der Bundesregierung ab. Während des genannten Zeitraums wuchs die Zahl der Beschäftigten in der deutschen Zivilluftfahrtindustrie um das 2,5-fache; der dementsprechende Umsatz wurde in Deutschland sogar um das 6-fache gesteigert.

Durch eine frühe, weitsichtige Entscheidung für eine ökoeffiziente Ausrichtung ihrer Produkte hat die europäische und die deutsche Luftfahrtindustrie die Marktentwicklung und das Marktwachstum signifikant mitgestaltet und sich in dem globalen Umfeld hervorragend behauptet. Diese Spitzenposition gilt es gegenüber dem Wettbewerb aus Nordamerika und zukünftig auch Asien zu sichern.

Das Wachstum des internationalen Luftverkehrs ist ungebrochen. Langfristig wird von einer globalen Steigerung von 4,4% pro Jahr ausgegangen. Ein entscheidender Faktor für die zukünftige Positionierung der deutschen Luftfahrtindustrie im Wettbewerb ist die Geschwindigkeit, mit der auf Leichtbauprinzipien basierende Innovationen entwickelt werden und damit die Luftfahrtprodukte einfließen.

Luftfahrt ist Synonym für Leichtbau, denn ein geringes Leergewicht ist fundamental für die Flugleistung, die Wirtschaftlichkeit und insgesamt die Ökobilanz eines Flugzeugs.

*Commercial civil aviation is a global growth market. Today, the German aviation industry is involved in all international programmes, directly and indirectly, as valued partner and is thus a firm element of the globally oriented supply chains of the major original equipment manufacturers.*

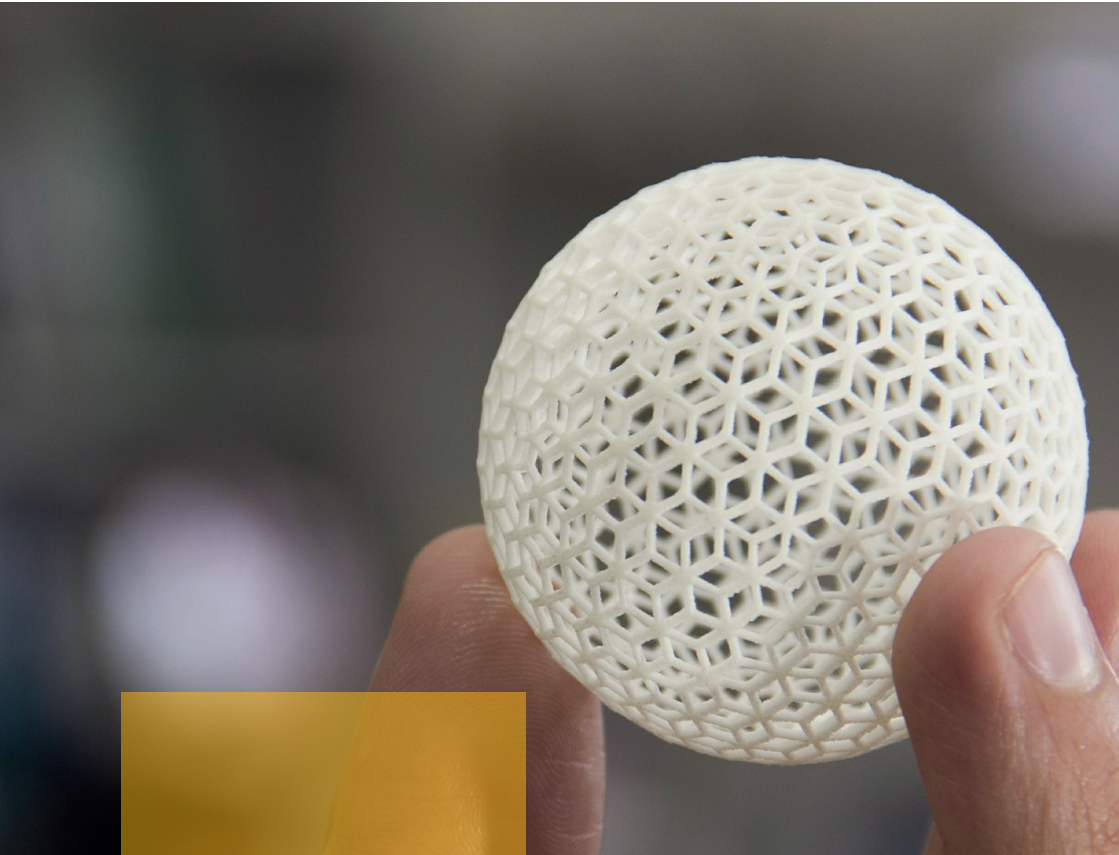


*Between 1995 and 2018, global air traffic performance increased by a factor of three. This period also reflects more than 20 years of national funding for pre-competitive research within the framework of the Federal Government's Aviation Research Programme (LuFo). During this period, the number of employees in the German civil aviation industry grew by a factor of 2.5; the corresponding turnover in Germany even increased by a factor of 6.*

*Through an early, far-sighted decision for an eco-efficient orientation of its products, the European and German aviation industries have significantly helped to shape market development and growth and have excellently held their ground in the global environment. It is imperative, that this leading position be secured in the face of competition from North America and, in the future, as well, from Asia.*

*The growth of international air traffic continues unabated. In the long term, an annual global increase of 4.4% is expected. A decisive factor for the future competitive positioning of the German aviation industry is the speed with which innovations based on lightweight design principles are developed and thus incorporated the aviation products.*

*Aviation is synonymous with lightweight design because a low unladen weight is fundamental for the flight performance, economy and overall ecobalance of an aircraft.*







Physikalisch geht es beim Fliegen darum, mit möglichst geringem Energieaufwand zwei widerstehende Kräfte zu überwinden: Luft-Widerstand und Gewichtskraft. Die Gewichtskraft resultiert bei einem Luftfahrzeug aus drei Komponenten: Strukturgewicht, Nutzlast und Gewicht des mitgeführten Treibstoffs. Um die Nutzlast (Passagiere, Fracht, Missionsausrüstung etc.) möglichst energieeffizient zu transportieren, verbleiben drei Stellschrauben: effiziente Aerodynamik, verlustarme Vortriebserzeugung und ein geringes Leergewicht (Flugzeugstruktur, Triebwerk, Fahrwerk, Avionik, sonstige Bau- und Ausrüstungsteile). Je geringer das Leergewicht, desto wirtschaftlicher kann z.B. ein Passagier- oder Frachtflugzeug durch Minimierung des Treibstoffverbrauchs oder Maximierung der Nutzlast, betrieben werden.



100kg Gewichtseinsparung bedeuten bei einem Flugzeug der Kategorie eines Airbus A320 für eine Airline eine Einsparung von ca. 10.000 Litern Kerosin pro Jahr und Flugzeug (entspricht ca. 25,5 to CO<sub>2</sub> pro Jahr und Flugzeug). Die herausragende Bedeutung des Leichtbaus für die Wettbewerbsfähigkeit der Luftfahrtprodukte erzeugt einen extrem hohen Innovationsdruck in der gesamten Zulieferkette. Schätzungen zufolge werden in der Luftfahrtindustrie 1.000-1.500 € Mehrkosten für jedes Kilogramm Gewichtseinsparung akzeptiert, während in der Automobilindustrie dieser Wert nur bei 5-10 €/kg liegt und in der Eisenbahnindustrie nur 1 €/kg.

*In physical terms, flying is about overcoming two resisting forces with as little energy consumption as possible: Air resistance and weight force. In an aircraft, the weight force results from three components: structure weight, payload and weight of the fuel carried. In order to transport the payload (passengers, cargo, mission equipment, etc.) as energy-efficiently as possible, three adjustments remain: efficient aerodynamics, low-loss propulsion generation and a low empty weight (aircraft structure, engine, landing gear, avionics, other components and equipment). The lower the empty weight, the more economically a passenger or cargo aircraft can be operated by minimizing fuel consumption or maximizing payload.*



*A weight saving of 100kg for an aircraft similar to the Airbus A320 means for an airline a saving of approx. 10,000 litres of kerosene per year and aircraft (equivalent to approx. 25.5 tons of CO<sub>2</sub> per year and aircraft). The outstanding importance of lightweight design for the competitiveness of aviation products creates an extremely high pressure to innovate throughout the entire supply chain. It is estimated that in the aviation industry 1,000-1,500 € extra costs are accepted for every kilogram of weight saving, while in the automotive industry this value is only 5-10 €/kg, and in the railway industry only 1 €/kg.*



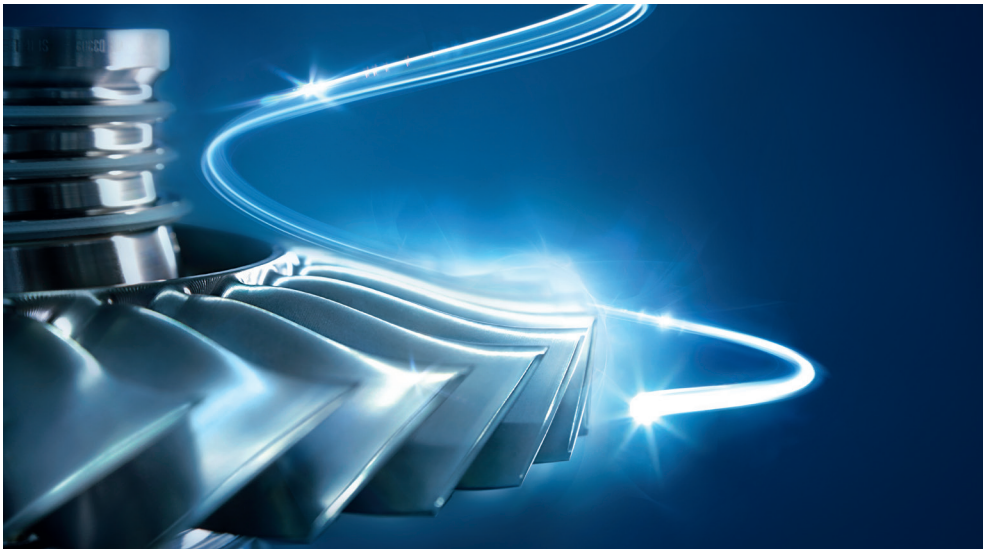
Innovative Bauweisen, Werkstoffe und Verfahren unterstützen das Ziel der kontinuierlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und der Öko-Bilanz der Produkte der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie. Sie sind integraler Bestandteil der nationalen Bemühungen zur raschen Nutzbarmachung der aus „Industrie 4.0“ resultierenden Perspektiven. Die Beiträge der deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie finden auch außerhalb der Branche Eingang in Bereiche wie z.B. Fertigungsautomatisierung, Prozesssimulation, Werkstoffkennwert- und Prozessdatenerfassung. Darüber hinaus liefert die Luft- und Raumfahrtindustrie Grundlagen für die erfolgreiche und effiziente Einführung wegweisender Technologien wie zum Beispiel 3D-Druck und Struktur-Zustandsüberwachung (SHM – structural health monitoring).

Die Luft- und Raumfahrtindustrie hat bereits langjährige Erfahrungen mit digitalen Produkt-Lifecycle-Management-Systemen (PLMS) gesammelt. Mit der „Fabrik der Zukunft“ bzw. „Industrie 4.0“ gehen die Ziele aber weit über die heutigen Lösungen hinaus. Die neuen Perspektiven beinhalten damit ein hohes Potenzial für Kostensenkungen sowie für die Steigerung der Produktqualität und der Flexibilität in der Produktion.



*Innovative design methods, materials and processes support the goal of continuously improving the economic efficiency and ecological balance of the products of the German aerospace industry. They are an integral part of the national efforts to quickly make use of the perspectives resulting from "Industry 4.0". The contributions of the German aerospace industry also find their way outside the industry into areas such as production automation, process simulation, material characteristic value and process data acquisition. In addition, the aerospace industry provides the basis for the successful and efficient introduction of ground-breaking technologies and procedures for example 3D Printing and SMH – structural health monitoring.*

*The aerospace and space industry has many years of experience with digital product lifecycle management (PLMS) systems. With the "Factory of the Future" or "Industry 4.0", however, the goals go far beyond today's solutions. The new perspectives thus contain a high potential for cost reductions as well as for increasing product quality and flexibility in production.*



# WERKSTOFFE – DIE BASIS NACHHALTIGEN ERFOLGS / MATERIALS – THE BASIS FOR SUSTAINABLE SUCCESS

## FASERVERBUNDWERKSTOFFE / FIBRE COMPOSITES

In Bezug auf Faserverbundwerkstoffe ist das aktuelle Ziel der Luftfahrtindustrie, dieser Werkstoffkategorie ein breiteres Einsatzspektrum zu eröffnen. Zu diesem Zweck arbeitet die Branche unter anderem an der Entwicklung von Harzsystemen mit höherer Zähigkeit und höherem Temperatureinsatzpotenzial. Dadurch ergeben sich zusätzliche Einsatzspektra, z.B. in impact-gefährdeten Bereichen der Flügelstruktur (Flügelvorderkanten) und im Triebwerksbau. Eine der Hauptanforderungen an zukünftige Faserverbundwerkstoffe ist darüber hinaus die Funktionsintegration. So werden z.B. Funktionen der Metall-Substruktur zukünftig in die Verbundwerkstoffstruktur integriert (Beispiel: Electrical Structure Network). In diesem Fall besteht die Herausforderung darin, die elektrische Leitfähigkeit der Faserverbundwerkstoffe so zu erhöhen, dass die Anforderungen an den Blitzschutz erfüllt werden.



Die Kommerzialisierung des in der Entwicklung befindlichen zukünftigen Fliegens mit elektrischem Antrieb benötigt extrem leichte Strukturen und Passagierkabinen mit einem hohen Grad an Crashesicherheit. Faserverbundwerkstoffe erfüllen die entsprechenden Anforderungen exzellent.

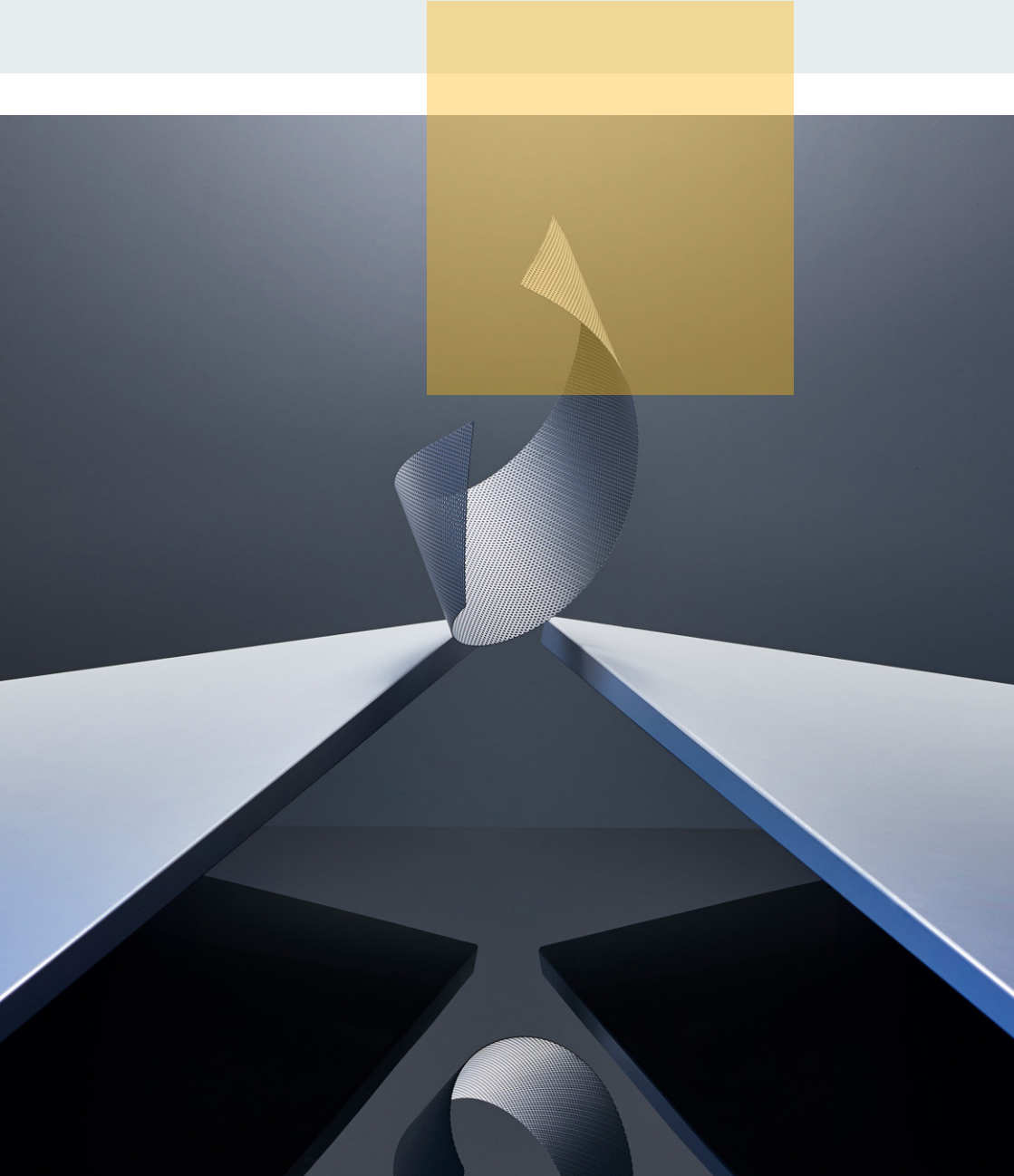
Thermoplaste bieten besondere Eigenschaften wie Schweißbarkeit und Recyclingmöglichkeiten und genießen daher besondere Aufmerksamkeit. Zurzeit werden intensive Anstrengungen unternommen, diese Werkstoffkategorie weiterzuentwickeln, um sie über das momentane Anwendungsspektrum – vornehmlich Befestigungselemente – hinaus auch für großflächige, integrale Strukturen im Flugzeugrumpf und im Kabinenbereich einsetzen zu können. Für die thermoplastischen Herstellverfahren zeichnet sich dabei schon heute, deutlich, eine günstige Perspektive zur Integration von zusätzlichen Funktionalitäten ab.

*With regard to fibre composites, the current goal of the aerospace industry is to open up a wider range of applications for this material category. To this end, the industry is working, among other things, on the development of resin systems with higher toughness and higher temperature application potential. This results in additional applications, e.g. in impact-prone areas of the wing structure (wing leading edges) and in engine design. In addition, one of the main requirements for future fiber composites is functional integration. For example, functions of the metal substructure will be integrated into the composite structure in the future (example: Electrical Structure Network). In this case, the challenge is to increase the electrical conductivity of composites in such a way that the requirements for lightning protection are met.*



*The commercialization of the future flying with electric propulsion, which is currently under development, requires extremely light structures and passenger compartments with a high degree of crash safety. Composites fulfill the corresponding requirements excellently.*

*Thermoplastics offer special properties such as weldability and opportunities for recycling and therefore enjoy special attention. Intensive efforts are currently being made to further develop this material category so that it can be used beyond the current range of applications - primarily fastening elements - for large integral structures in aircraft fuselages and cabins. For thermoplastic manufacturing processes, a favourable perspective for the integration of additional functionalities is already emerging.*

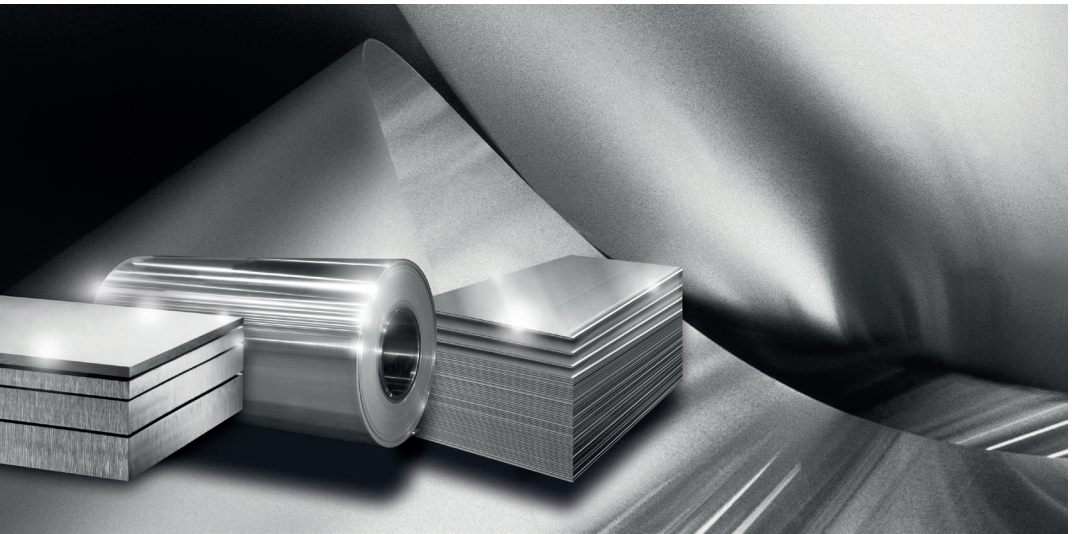


## METALLE / METALS

Die Weiterentwicklung von hochwarmfesten Aluminiumlegierungen und hochfesten Aluminiumgusslegierungen wird es in Zukunft ermöglichen, Flugzeug- und Hubschrauberstrukturen noch einfacher in integraler Bauweise herzustellen. Große Gesenkschmiedeteile im Strukturbereich (Flügel, Rumpf, Leitwerk) können dabei mittlerweile aufgrund der Verfügbarkeit leistungsfähiger Schmiedepressen (Presskraft >50.000 Tonnen) aus hochfesten, schadenstoleranten Aluminiumlegierungen hergestellt werden.



Für einen Einsatz im Bereich der Rumpfbeplankung und der Schalenfertigung für Flügelstrukturen werden fortschrittliche Aluminium-Lithium- (ALi) und Aluminium-Magnesium-Scandium- (ALMgSc) Legierungen unter Nachhaltigkeitsaspekten, d.h. entsprechender Berücksichtigung des Recyclings, weiterentwickelt.



*The further development of high-temperature aluminium alloys and high-strength cast aluminium alloys will allow in future the simplified manufacturing of aircraft and helicopter structures in integral design. Large drop forgings in the structural area (wings, fuselage, empennage) can now be produced from high-strength, damage-tolerant aluminium alloys due to the availability of high-performance forging presses (press force >50,000 tons).*



*Advanced aluminium-lithium (ALi) and aluminium-magnesium-scandium (ALMgSc) alloys are being further developed for use in fuselage planking and shell production for wing structures under sustainability aspects, i.e. appropriate consideration of recycling.*



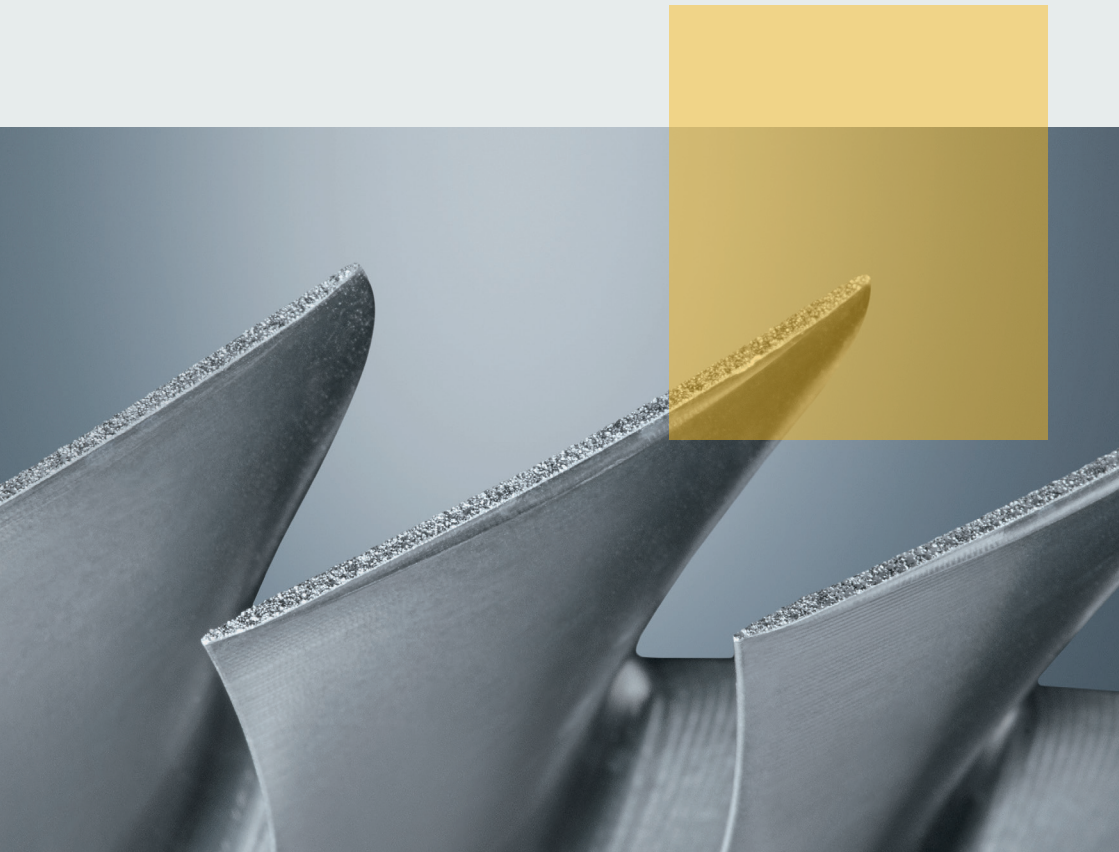
Titanlegierungen beinhalten ein hohes Leichtbaupotenzial. Durch die hohe Korrosionsbeständigkeit und die Möglichkeit der Kombination mit faserverstärkten Verbundwerkstoffstrukturen besitzen Titanlegierungen eine herausragende Bedeutung in der Luft- und Raumfahrt. Wie bei anderen Anwendungsbereichen, führt auch hier eine integrale Bauweise zu höheren Anforderungen an die Schadenstoleranz. Diese lässt sich für Titanlegierungen durch geeignete thermomechanische Behandlung bei der Rohteilherstellung erreichen.

Ein neues Anwendungsbeispiel für Titanlegierungen ergibt sich durch die Verwendung effizienterer Triebwerke mit größeren Durchmessern. Hierdurch werden die Strukturbauteile für die Triebwerksaufhängung thermisch stärker belastet, so dass warmfeste Titanlegierungen zum Einsatz kommen müssen.



*Titanium alloys have a high potential for lightweight design. Due to their high corrosion resistance and the possibility of combination with composite structures, titanium alloys are of outstanding importance in the aerospace industry. As in other applications, an integral design leads to higher demands on damage tolerance. For titanium alloys, this can be achieved by suitable thermomechanical treatment in the production of blanks.*

*A new application for titanium alloys is the use of more efficient engines with larger diameters. As a result, the structural components for the engine suspension are subjected to greater thermal stress, so that heat-resistant titanium alloys have to be used.*



## METALLISCHE HOCHTEMPERATURWERKSTOFFE / METALLIC HIGH TEMPERATURE MATERIALS

Im Heißbereich von Strahltriebwerken haben in den letzten Jahren neben Nickel-Basis-Legierungen neue intermetallische Legierungen mit geringerem spezifischen Gewicht wie Titanaluminide (TiAl) eine Schlüsselfunktion eingenommen. TiAl werden unter anderem im Feinguss oder im Near-Netshape-Guss mit und ohne Schmiedeumformung verarbeitet. Für einen nachhaltigen Erfolg der intermetallischen Legierungen müssen die aktuellen Herstellverfahren weiter in Richtung Wirtschaftlichkeit, Prozesssicherheit und Leistungsfähigkeit optimiert werden.



Die Weiterentwicklung hochwarmfester, korrosionsbeständiger Werkstoffe und Halbzeuge aus Nickellegierungen trägt im Triebwerksbau dazu bei, Effizienz und Langlebigkeit zu steigern. Neuartige Nickel-Kobalt-Legierungen, sogenannte Superalloys, bieten bereits heute Oxidationsbeständigkeit, Warmfestigkeit bis zu einer Anwendungstemperatur von über 750°C und zusätzlich eine gute Warmumformbarkeit und Schweißbarkeit. Innerhalb der Prozesskette der Herstellung von Halbzeugen aus Nickel- und Kobaltbasislegierungen werden aktuell die zukünftigen Anforderungen an neue, innovative Werkstoffe und Legierungen für höhere Anwendungstemperaturen im Triebwerk definiert.

*In the hot section of jet engines, new intermetallic alloys with a lower specific weight such as titanium aluminides (TiAl) have assumed a key function in recent years alongside nickel-based alloys. TiAl are processed in investment casting or near-netshape casting with and without forging. For the sustained success of intermetallic alloys, the current manufacturing processes must be further optimized in terms of cost-effectiveness, process reliability and performance.*



*The further development of high-temperature, corrosion-resistant materials and semi-finished products made of nickel alloys contributes to progress in engine design with regard to efficiency and longevity. Novel nickel-cobalt alloys, so-called super alloys, already offer oxidation resistance, heat resistance with an application temperature greater than 750°C and, in addition, good hot formability and weldability. Within the process chain of manufacturing semi-finished products from nickel and cobalt-based alloys, the future requirements for new, innovative materials and alloys including process development for higher application temperatures in the engine are currently being defined.*

Werkstoffe aus der Klasse der Eisenaluminide (FeAl) stellen mögliche Alternativen zu hochpreisigen Titan-, Nickelbasis- und Stahlliegierungen dar. Die Rohstoffe für die Produktion der Hauptelemente Eisen und Aluminium sind relativ einfach aus natürlichen Vorkommen zu gewinnen. Neben Nachhaltigkeitsaspekten und niedrigen Kosten zeichnet sich die Klasse der Eisenaluminide zusätzlich durch eine geringe Dichte sowie eine hohe Verschleißfestigkeit und ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit aus. Besonders ausgewählte Legierungen besitzen zusätzlich eine hohe Warmfestigkeit, wodurch sie sehr gut für Anwendungen in Hochtemperaturbereichen von Turbintriebwerken geeignet sind.



FeAl-Werkstoffe haben den weiteren Vorteil, dass sie mittels konventioneller Anlagentechnik hergestellt und verarbeitet werden zu können. Zu den derzeitigen Herausforderungen für eine Überführung in die industrielle Praxis gehören eine prozesssichere und wirtschaftliche spanende Bearbeitung ebenso wie die Verfeinerung der Verarbeitungstechnik und der Ermittlung auslegungsrelevanter Eigenschaften der FeAl-Legierungen neuester Generation.

Die Werkstoffklasse der Intermetalle bietet neben den heute verfügbaren Legierungen weitere Materialsysteme mit erheblichem Gewichtsreduktionspotenzial und der weiteren Verbesserung der Temperaturbeständigkeit. Ein wichtiger Aspekt für zukünftige Entwicklungen ist dabei ein werkstoffgerechtes Bauteildesign, welches optimal das Werkstoffpotenzial unter Berücksichtigung der erforderlichen Schadenstoleranz ausnutzt.



Materials from the class of iron aluminide (FeAl) represent possible alternatives to high-priced titanium, nickel-based and steel alloys. The raw materials for the production of the main elements iron and aluminium are relatively easy to obtain from natural resources. In addition to sustainability aspects and low costs, the class of iron aluminides is characterized by low density, high wear resistance and excellent corrosion resistance. Specifically selected alloys also have high heat resistance, making them well suited for applications in high temperature ranges of turbine engines.

FeAl materials have the additional advantage that they can be manufactured and processed using conventional plant technology. The current challenges for a transfer into industrial practice include a reliable and economical machining process as well as the refinement of the processing technology and the determination of design relevant properties of the latest generation of FeAl alloys.

In addition to the alloys available today, the material class of intermetals offers further material systems with considerable weight reduction potential and further improved temperature resistance. An important aspect for future developments is a material-specific component design which optimally exploits the material potential while taking into account the required damage tolerance.





## HYBRIDE BAUWEISEN / HYBRID DESIGN METHODS



Durch die Kombination metallischer und faserverstärkter Werkstoffe ergibt sich eine Reihe neuer Chancen im Hinblick auf moderne Flugzeugstrukturen. Ein bedeutsames Element sind in diesem Zusammenhang neue Materialien für Beschichtung und Isolierung. So wird z.B. die Lebensdauer von CFK-Strukturen durch metallische Anteile zum Erosionsschutz erhöht. Neue leistungsgesteigerte Wärmedämmschichten mit reduzierter Wärmeleitung verbessern die Widerstandsfähigkeit sensibler Strukturen sowohl im Zellenbereich als auch im Triebwerksbau. Flammhemmende Beschichtungen für Metall- und CFK-Strukturen gewährleisten eine weiter verbesserte Sicherheit im Flugbetrieb.



*The combination of metallic and fiber-reinforced materials opens up a number of new opportunities with regard to modern aircraft structures. An important element in this context are new materials for coating and insulation. For example, the service life of CFRP structures is increased by metallic components for erosion protection. New performance-enhanced thermal barrier coatings with reduced thermal conduction improve the resistance of sensitive structures, both in the airframe area and in engine design. Flame retardant coatings for metal and CFRP structures ensure further improved safety in flight operations.*

## WERKSTOFFE DER NÄCHSTEN GENERATION / NEXT GENERATION MATERIALS



### VON DER IDEE ZUM WETTBEWERBSFÄHIGEN PRODUKT / FROM THE IDEA TO THE COMPETITIVE PRODUCT



Erst die Verfügbarkeit neuer, technologisch hochentwickelter Werkstoffe ermöglicht die Umsetzung der in der Entwicklung befindlichen revolutionären Designkonzepte für die nächste Luft- und Raumfahrzeuggeneration. Als Voraussetzung dafür müssen auch neue Methoden zur Werkstoffprüfung, zur Auslegungsoptimierung und zur Bestimmung des Werkstoffverhaltens entwickelt werden. Nur dann besteht die Aussicht wettbewerbsfähige Produkte zu realisieren.

Für zukünftige Anwendungen werden derzeit in der Grundlagenforschung eine Reihe hochinnovativer Materialien wie Graphen, Aerogele, Smart Materials oder amorphe Metalle auf ihre Eignung für multifunktionale Leichtbaustrukturen untersucht. Für Deutschland bedeutet die Industrialisierung dieser Materialien die Erreichung eines bedeutenden technologischen Meilensteins und Zukunftssicherung.

Im Heißbereich der Triebwerke versprechen faserverstärkte Keramiken (Ceramic Matrix Composites) durch die einzigartige Kombination von geringem Gewicht (ungefähr 50% von vergleichbaren Nickelbasis-Legierungen) und höchster Temperaturbeständigkeit ein hohes Potenzial zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs. Der Schlüssel für eine breitere Einführung faserverstärkter Keramiken sind ein werkstoffgerechtes Design sowie die Verfügbarkeit einer wettbewerbsfähigen Prozesskette von der Faser bis zum fertigen Produkt inklusive erforderlicher Oberflächenbeschichtungstechnologie.

*Only the availability of new, technologically advanced materials makes it possible to implement the revolutionary design concepts currently under development for the next generation of aircraft and spacecraft. New methods for material testing, design optimization and determination of material properties must also be developed as a prerequisite for this. Only then is there the prospect of realising competitive products.*



*For future applications, a number of highly innovative materials such as graphene, aerogels, smart materials or amorphous metals are currently being evaluated in research projects for their suitability for multifunctional lightweight structures. For Germany industrializing these materials will result in achieving a significant technology milestone and safeguarding the future.*

*In the hot section of engines, fiber-reinforced ceramics (Ceramic Matrix Composites) promise a high potential for reducing fuel consumption due to their unique combination of low weight (about 50% of comparable nickel-based alloys) and maximum temperature resistance. The key to a broader introduction of fiber-reinforced ceramics is a design suitable for the material and the availability of a competitive process chain from the fiber to the finished product, including the necessary surface coating technology.*

Für den technischen Einsatz werden aktuell zwei Werkstoffgruppen faserverstärkter Keramiken entwickelt. Auf der einen Seite oxidfaserverstärkte keramische Verbundwerkstoffe mit oxidkeramischer Matrix (Ox/Ox), auf der anderen Seite Siliziumkarbid-faserverstärkte keramische Verbundwerkstoffe mit Siliziumkarbid Matrix (SiC/SiC).



Der Einsatz faserverstärkter Keramiken im Triebwerk ist eine richtungsweisende Entscheidung. Bereits heute werden erste Bauteile aus diesem Material von internationalen Wettbewerbern eingesetzt. Um faserverstärkte Keramiken auch in Europa bzw. in Deutschland für den industriellen Einsatz zu qualifizieren, laufen bereits mehrere darauf ausgerichtete Technologieprojekte.

Verbesserte numerische Auslegungsmethoden werden vor allem für Faserverbundwerkstoffe entscheidend dazu beitragen, das strukturmechanische Leistungspotenzial dieser Werkstoffe besser auszunutzen.

*Two material groups of fibre-reinforced ceramics are currently being developed for technical use. On the one hand oxide fibre reinforced ceramic composites with oxide ceramic matrix (Ox/Ox), on the other hand silicon carbide fibre reinforced ceramic composites with silicon carbide matrix (SiC/SiC).*



*The use of fiber-reinforced ceramics in the engine is a trend-setting decision. The first components made of this material are already being used by international competitors. In order to qualify fiber-reinforced ceramics for industrial use in Germany several specific technology projects are already ongoing.*

*Improved numerical design methods will make a decisive contribution to better exploiting the structural-mechanical performance potential of these materials, especially for fiber-reinforced composites.*



## HOCHEFFIZIENTE FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN FÜR ZUKÜNFTIGE LUFT-UNDRAUMFAHRZEUGE / HIGHLY EFFICIENT MANUFACTURING TECHNOLOGIES FOR FUTURE AIRCRAFT AND SPACECRAFTS



Für die Umsetzung innovativer Leichtbaukonzepte ist eine Verbesserung der bestehenden Verarbeitungsverfahren erforderlich. Ebenfalls wichtig sind unterstützende Auslegungs- und Prüfverfahren wie z.B. numerische Auslegungsmethoden für ein werkstoff- und fertigungsgerechtes Design und kosteneffiziente zerstörungsfreie Prüfmethode sowie moderne kosten- und zeiteffektive Reparaturverfahren.

Bei der Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen stehen automatisierte Produktionsmethoden mit höheren Ablegeraten im Fokus. Bereits heute werden große Strukturen wie z.B. Rumpfbeplankungen für den Airbus A350XWB in vollautomatisierten Legeverfahren realisiert. Weiterer Entwicklungs- und Optimierungsbedarf besteht beim Materialdurchsatz pro Zeiteinheit, beispielsweise für komplexe, doppeltgekrümmte Geometrien.

Um zukünftige Produktkategorien mit potenziell hohen Stückzahlen (z.B. im Bereich Urban Air Mobility) realisieren zu können, wird die Effizienz und Flexibilität der Fertigungstechnologien maßgeblich sein.



*For the implementation of innovative lightweight design concepts, an improvement of the existing processing methods is necessary. Also important are supporting design and testing methods, such as numerical design methods for a design suitable for materials and production, and cost-efficient non-destructive testing methods as well as modern cost- and time-effective repair methods.*

*When processing fibre composites, the focus is on automated production methods with higher lay-up rates. Already today, large structures such as fuselage planking for the Airbus A350XWB are realized in fully automated laying processes. Further development and optimization is required for material throughput per time unit, e.g. for complex, double-curved geometries.*

*The efficiency and flexibility of the manufacturing technologies will be decisive in realising future product categories with potentially high quantities (e.g. in the area of Urban Air Mobility).*

Während ein höherer Automatisierungsgrad eine effizientere Verarbeitung von duromeren Prepregmaterialien ermöglicht, müssen diese in der Regel abschließend in einem Autoklavprozess konsolidiert werden. Ein hohes Potenzial zur Kostenoptimierung kann sich deshalb durch den Einsatz von Infusionstechnologien oder anderer Out-of-Autoclave-Technologien ergeben. Hierbei werden mit Epoxidharz infiltrierte Trockenfaserhalbzeuge unter einem Standard-Vakuumaufbau in einem Ofen ausgehärtet. Die Infusionstechnologie eröffnet die Perspektiven für eine kostengünstige Realisierung großflächiger und dickwandiger Integralstrukturen im industriellen Maßstab (z.B. Flügelkästen und Hochauftriebskomponenten für A320neo mit Fertigungsraten >60 Flugzeuge im Monat).



Nicht für jede Struktur ist eine voll integrale Bauweise nutzbringend. Versteifungselemente (z.B. Stringer) können mit konventionellen automatisierten Prozessen in hohen Stückzahlen kostengünstig hergestellt und anschließend mit den Strukturelementen zu versteiften Schalen verbunden werden. In diesem Zusammenhang kommt dabei dem strukturellen Kleben von CFK eine besondere Bedeutung zu. Mit einem höheren Automatisierungsgrad für die Vorbehandlung von Klebeflächen unter Einbeziehung des Klebstoffauftrags könnte ein weiterer großer Schritt in Richtung einer hocheffizienten CFK-Verarbeitung realisiert werden. Zusätzliche wichtige Aspekte bei der Weiterentwicklung der Verfahren zum Strukturkleben sind parallel zum Fertigungsprozess ablaufende Qualitätssicherungsmaßnahmen, inklusive der Bestimmung der Oberflächengüte und der Detektion eventueller Fehl- oder Schädstellen.

*While a higher degree of automation enables more efficient processing of duromer prepreg materials, these usually have to be consolidated in an autoclave process. Therefore, the use of infusion technologies or other out-of-autoclave technologies can offer high potential for cost optimization. Here, semi-finished dry fiber products infiltrated with epoxy resin are cured in an oven under a standard vacuum structure. Infusion technology opens up prospects for the cost-effective realization of large-area and thick-walled integral structures on an industrial scale (e.g. wing boxes and high-lift components for A320neo with production rates >60 aircraft per month).*



*Not every structure benefits from a fully integral design. Stiffening elements (e.g. stringers) can be produced cost-effectively in large quantities using conventional automated processes and are then connected to the structural elements to form stiffened shells. In this context, the structural bonding of CFRP is of particular importance. With a higher degree of automation for the pre-treatment of bonding surfaces, including the application of adhesives, a further major step towards highly efficient CFRP processing could be achieved. Additional important aspects in the further development of the processes for structural bonding are quality assurance measures that run parallel to the production process, including the determination of the surface quality and the detection of any defects or damage.*



Als weiterer Werkstoff für die Realisierung von CFK-Komponenten gewinnen thermoplastische Halbzeuge immer mehr an Bedeutung. Als Besonderheit sind teilkristalline Thermoplaste schweißbar. Die Entwicklung entsprechender Prozesse zur Industrialisierung erfolgt in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Instituten sowie mit spezialisierten mittelständischen Unternehmen.

Das Fügen von Duromer und Thermoplast ist bei in hybrider Technologie hergestellten Bauteilen an den jeweiligen Nahtstellen allerdings noch zu meistern.

Deutsche Zulieferer sind technologisch führend bei der Halbzeugherstellung und der Bearbeitung von Titan und Titanaluminiden. Die große Herausforderung ist die Behauptung und der weitere Ausbau dieser Technologieführerschaft im Wettbewerb mit Niedriglohnregionen. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der ressourcensparenden Herstellung von Rohteilen durch Near-Net-Shape-Technologie, der Weiterentwicklung der Zerspanungsprozesse, der Optimierung der Werkzeugkonzepte in Verbindung mit einem hohen Automatisierungsgrad sowie in der Entwicklung effizienter Methoden zur Qualitätsüberwachung und -sicherung.



*Thermoplastics are becoming increasingly important as another material for the realization of CFRP components. The challenges for processing thermoplastics are similar to those for duromere materials. A specific feature is that semi-crystalline thermoplastics can be welded. The development of corresponding processes for industrialization is carried out in cooperation with research institutes as well as with specialized medium-sized companies.*

*The joining of duromers and thermoplastics at the respective seams of components manufactured using hybrid technology has to be mastered, yet.*

*German suppliers are technological leaders in the manufacture of semi-finished products and the processing of titanium and titanium aluminides. The major challenge is to maintain and further expand this technological leadership in competition with low-wage regions. The key to success lies in the resource-saving production of raw parts using near-net shape technology, the further development of machining processes, the optimization of tool concepts in conjunction with a high degree of automation, and the development of efficient methods for quality monitoring and assurance.*



Auf dem Gebiet der Fertigungstechnik für metallische Werkstoffe lässt sich ein bedeutendes Innovationspotenzial ausschöpfen. Moderne Schweißverfahren wie z.B. Friction Stir Welding oder Linear Friction Welding sowie fortschrittliche Umformverfahren wie das Relaxationsumformen (Creep Forming) für AlMgSc-Werkstoffe ermöglichen in Kombination mit modernen Aluminium-Legierungen eine signifikante Erhöhung von Fertigungsraten, um den industriellen Herausforderungen in Bezug auf immer höhere Bedarfe an metallischen Großstrukturen (z.B. für Rumpfschalen für Airbus A320neo) gerecht zu werden.

Für den Triebwerksbau gilt ein Hauptaugenmerk den hochpräzisen und wirtschaftlichen Fertigungstechnologien für die Verarbeitung von hochfesten Titan- und Nickel-Basislegierungen. Die für den Triebwerksbau relevanten Komponenten unterliegen im Einsatzbetrieb höchsten aerodynamischen, thermischen und strukturellen Anforderungen. Eine industrielle Fertigungskompetenz für die Herstellung solcher Bauteile sichert die Wettbewerbsposition der deutschen Industrie.

Die sich in der Entwicklung befindlichen neuartigen hochfesten Werkstoffsysteme sind schwieriger umformbar, so dass verbesserte Umformverfahren entwickelt werden müssen, um das volle Potenzial dieser neuen Legierungen auszuschöpfen. Neben der weiteren Optimierung der konventionellen Bearbeitungsverfahren Fräsen, Drehen, Schleifen stehen deshalb auch Neu- bzw. Weiterentwicklungen von alternativen Verfahren an. Dies sind zum Beispiel elektro-chemische-Verfahren, die ohne Temperatur- und Krafteinwirkung metallische Materialien hochpräzise abtragen. Neben lasergestützten Fertigungsverfahren müssen für neuartige Schichtsysteme zum Schutz vor Oxidation, Korrosion und Erosion, auch die bestehenden CVD- (Chemical Vapour Deposition) und PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) weiterentwickelt werden.

*Significant innovation potential can be exploited in the field of manufacturing technology for metallic materials. Modern welding processes such as Friction Stir Welding or Linear Friction Welding as well as advanced forming processes such as Creep Forming for AlMgSc materials, in combination with modern aluminium alloys, enable a significant increase in production rates in order to meet the industrial challenges related to ever increasing requirements for large metallic structures (e.g. for fuselage shells for Airbus A320neo).*



*The main focus in engine design is on high-precision and cost-effective manufacturing technologies for processing high-strength titanium and nickel-based alloys. The components relevant for engine design are subject to the highest aerodynamic, thermal and structural requirements during operation. Industrial manufacturing expertise for the manufacture of such components secures the competitive position of German industry.*

*The novel high-strength material systems under development are more difficult to form, so that improved forming processes must be developed in order to exploit the full potential of these new alloys. In addition to the further optimization of conventional machining processes such as milling, turning, grinding developments of alternative processes are also in the pipeline. These are, for example, electrochemical processes that remove metallic materials with high precision without the effect of temperature or force. In addition to laser-assisted manufacturing processes, the existing CVD (Chemical Vapour Deposition) and PVD (Physical Vapour Deposition) processes must be further developed for new coating systems to protect against oxidation, corrosion and erosion.*



Für hochtemperaturbeständige faserverstärkte Keramiken ist es notwendig, eine komplett neue Wertschöpfungskette vom Faserlieferanten über den Halbzeuglieferanten bis hin zu den OEM-Herstellern aufzubauen. Die Tatsache, dass keramische Materialien wie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oder SiC auch als Abrasivstoffe eingesetzt werden, macht die große Herausforderung für die Entwicklung wirtschaftlicher Bearbeitungsverfahren inkl. der dazu notwendigen Prüftechnologien für diese Werkstoffe deutlich.

Hybriden Bauweisen aus Aluminium, Titan oder Superlegierungen mit und ohne Faserverbundanteil wird ein hohes technologisches und wirtschaftliches Potenzial beigemessen. Das strukturelle Kleben und Fügen in hybriden Bauweisen stellt besondere Herausforderungen an die Aktivierung der Fügeflächen und deren Integrität unter Einsatzbedingungen im Flugbetrieb. Aktuell werden für Raumfahrtanwendungen, aber auch für spezielle Anwendungen in der Verteidigungstechnik (z.B. beim Bau von unbemannten Fluggeräten) automatisierte Ablegetechniken für die Herstellung dünnwandiger hybrider Strukturen entwickelt.

Neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Werkstoffe und der Herstellprozesse kommt der Forschung im Bereich der Oberflächentechnik eine herausragende Bedeutung zu. Hohe Umwelt- und Arbeitsschutzanforderungen sowie strenge Vorgaben aus der europäischen Chemikalienverordnung REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), erfordern den Ersatz bestehender Oberflächenschutzsysteme wie z.B. Beschichtungen und Lacke mit gesundheitsgefährdenden Inhaltsstoffen. Vorrangiges Ziel muss dabei die weiterhin volle Gewährleistung der notwendigen Funktionalitäten in Bezug auf Korrosions- und Erosionsschutz sowie Oberflächengüte sein.



*For high-temperature-resistant fiber-reinforced ceramics, it is necessary to establish a completely new value chain from fiber suppliers through semi-finished product suppliers to the original equipment manufacturers. Given, that ceramic materials such as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or SiC are also used as abrasives illustrates the great challenge for the development of economical machining processes including the necessary testing technologies for these materials.*

*Hybrid designs made of aluminum, titanium or superalloys with and without composite contents are considered to have high technological and economic potential. Structural bonding and joining in hybrid design methods poses special challenges to the activation of joining surfaces and their integrity under operating conditions in flight operations. Currently, automated laydown techniques for the production of thin-walled hybrid structures are being developed for aerospace applications, but also for special applications in defence technology (e.g. the design of unmanned aerial vehicles).*

*In addition to the continuous development of materials and manufacturing processes, research in the field of surface technology is of outstanding importance. High environmental and occupational safety requirements as well as strict requirements from the European chemicals regulation REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) will require the replacement of existing surface protection systems such as coatings and lacquers with hazardous ingredients. The primary goal must be to continue to fully guarantee the necessary functionalities with regard to corrosion and erosion protection as well as surface quality.*



In Deutschland, einem Hochlohnland mit hohen Energiekosten, verlagert sich der Fokus auf die systematische Steigerung der Produktionseffizienz. Ein wesentliches Element sind automatisierte Prozesse und die darauf aufbauende „Fabrik der Zukunft / Industrie 4.0“ in Verbindung mit einer umfassenden digitalen Vernetzung der Produktionsmittel innerhalb der Zulieferkette. Daraus resultiert die Fähigkeit der exakten Planung und Vorhersage robuster Produktionsabläufe bis hin zur Echtzeitsteuerung und -regelung.

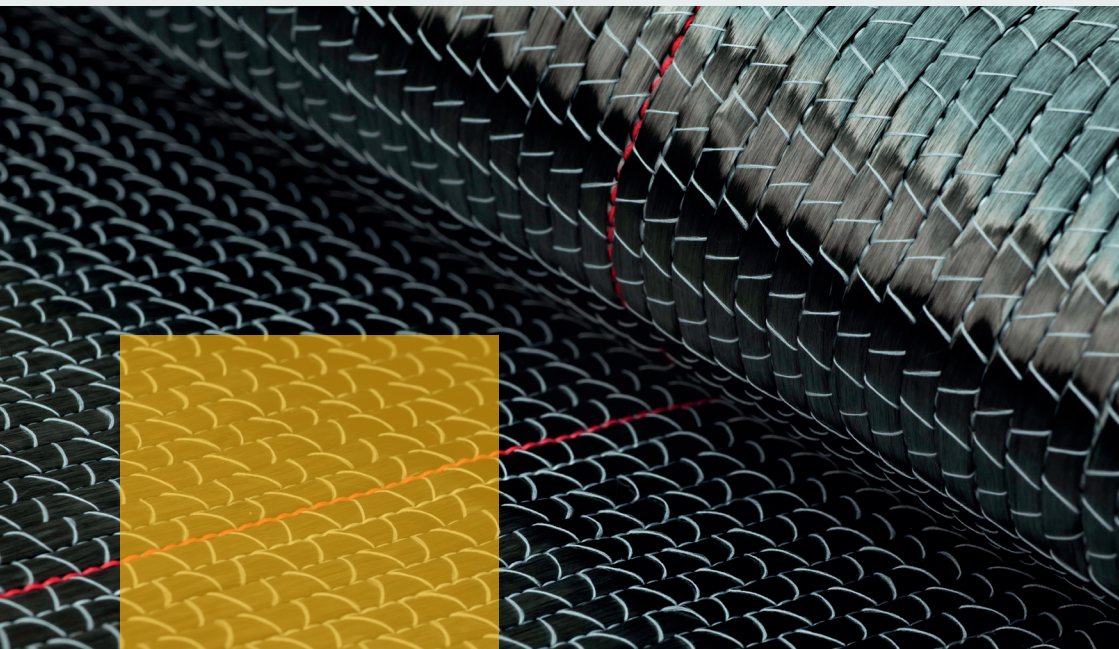


Produktionsabläufe müssen in der gesamten Prozesskette den Kriterien einer nachhaltigen Produktion entsprechen, um die ambitionierten Zielsetzungen der europäischen Luftfahrtindustrie im Rahmen der ACARE Vereinbarungen (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe) in Bezug auf Emissions- und Lärmvermeidung zu erfüllen. Die Unterstützung auf europäischer und nationaler Ebene durch entsprechend ausgestattete und strukturierte Forschungsförderprogramme hat sich in diesem Zusammenhang als zielführend und äußerst erfolgreich erwiesen.

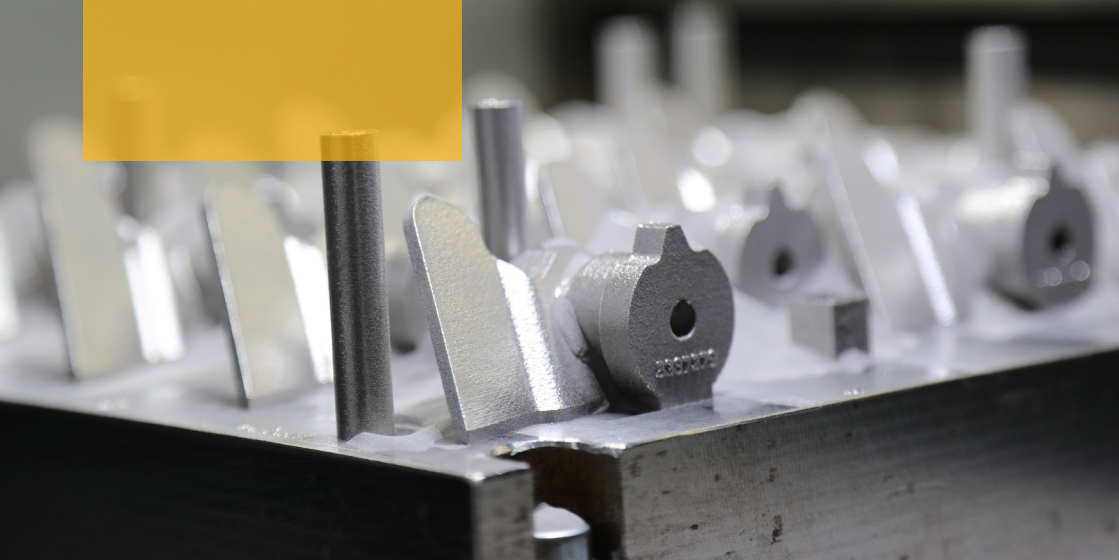
*In Germany, a high-wage country with high energy costs, the focus is shifting to the systematic increase in production efficiency. A key element are automated processes and in conjunction with comprehensive digital networking of production resources within the supply chain, the "factory of the future – Industry 4.0". This results in the ability to precisely plan and predict robust production processes, including real-time control and regulation.*



*Production processes must fulfill the criteria of sustainable production throughout the entire process chain in order to meet the ambitious goals of the European aviation industry within the framework of the ACARE agreements (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe) with regard to emission and noise reduction. Support at European and national level through appropriately equipped and structured research funding programmes has proven to be effective and extremely successful in this context.*



## ADDITIVE FERTIGUNG / ADDITIVE MANUFACTURING



### SICHERSTELLEN UND AUSBAU EINER NATIONALEN KERNKOMPETENZ / ENSURING AND EXPANDING A NATIONAL CORE COMPETENCE



Die sich rasant entwickelnden 3D-Druck-Verfahren haben das Potenzial, die industrielle Fertigung zu revolutionieren. Das Technologieportfolio für 3D-Druck in der Luft- und Raumfahrt ist breit gestreut. Es umfasst die Herstellung von Bauteilen aus metallischen und polymeren Pulvern und Drähten bzw. Filamenten durch schichtweises Verschmelzen mittels Laser- oder Elektronenstrahl bzw. Heißdüsen. Eine Vielzahl von Anwendungen sind bereits in den Bereichen Struktur, Systemkomponenten, Kabine und im Triebwerksbau zu finden.

Optimierte 3D-gedruckte Bauteile können kurzfristig über Substitutionen in bestehenden Flugzeug- und Triebwerksprogrammen Anwendung finden. Mittel- und langfristig wird dieser Optimierungsprozess zu komplett neuen Bauweisen für zukünftige Luft- und Raumfahrzeuge führen. Topologie-Optimierungsverfahren leisten hier einen wichtigen Beitrag.

Durch die Möglichkeit der schnellen Umsetzung von Designänderung und Designoptimierung können Kundenforderungen für komplexe Systeme flexibel und in einem kurzen Zeitrahmen realisiert werden. Bei der Qualitätssicherung ist für diese Technologie eine vollautomatisierte Echtzeitauswertung von Schlüsselparametern als nächster Schritt bereits in der Entwicklung.

*Rapidly evolving 3D printing processes have the potential to revolutionize industrial manufacturing. The technology portfolio for 3D printing in the aerospace industry is widely diversified. It comprises the production of components from metallic and polymer powders and wires or filaments by layered fusion using laser or electron beams or hot nozzles. A large number of applications can already be found in the areas of structure, system components, cabin and engine design.*



*Optimized 3D-printed components can be applied at short notice by substitutions in existing aircraft and engine programs. In the medium and long term, this optimization process will lead to completely new designs for future aircraft and spacecraft. Topology optimization processes make an important contribution here.*

*The possibility of rapid implementation of design changes and design optimization enables customer requirements for complex systems to be realized flexibly and within a short time frame. The next step in quality assurance for this technology is a fully automated real-time evaluation of key parameters.*

Deutschland hat beim Gesamtprozess der verschiedenen 3D-Druck-Verfahren eine führende Position im Weltmarkt inne. Ziel ist, die Technologie der additiven Fertigung am Standort Deutschland serienreif zu machen und damit bestehende Wettbewerbsvorteile weiter auszubauen.



Bei den für 3D-Druck notwendigen Ausgangsmaterialien steht die Entwicklung geeigneter Werkstoffe im Vordergrund. Diese umfassen sowohl hochwertige Kunststoffe als auch metallische Pulver und Drähte aus Aluminium-, Titan- und Nickellegierungen für das Pulverbettverfahren und für Verfahren höherer Produktivitätsrate (High Deposition Rate Additive Manufacturing). Die mechanischen Eigenschaften polymerbasierter 3D-Druck-Bauteile können durch Integration von Fasern (kurz, lang, endlos) verbessert werden.

Die Wirtschaftlichkeit der additiven Verfahren hängt in großem Maße von ihrer Prozessstabilität und der Kosteneffizienz vor- und nachgeschalteter Bearbeitungsprozesse ab. Daneben werden erhebliche Anstrengungen für die Entwicklung von Prozessen, Verfahren und Technologien zur Qualitätsüberwachung und -sicherung additiv hergestellter Bauteile unternommen. Bedarf besteht darüber hinaus an leistungsfähigen physikalisch basierten Simulationsverfahren für Werkstoffe und für den Druckprozess, um das Prozessverständnis weiter zu vertiefen. Mitentscheidend für den breiteren Einsatz der Technologie ist die Verfügbarkeit experimentell validierter Berechnungsverfahren. Diese müssen in der Lage sein, die Bauteillebensdauer und die Schadenstoleranz unter Berücksichtigung verfahrensbedingter Eigenspannungen sowie innerer und äußerer prozessbedingter Fehlstellen vorherzusagen. Bei 3D-gedruckten Bauteilen im Triebwerk ist zusätzlich der Einfluss der mechanischen, thermischen und chemischen Betriebslasten zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere auch bei Reparaturverfahren auf der Basis von 3D-Druckverfahren, bei denen die Betriebssicherheit und die erzielbare Lebensdauererweiterung numerisch abgeschätzt und experimentell validiert werden muss.

*Germany holds a leading position in the world market for the overall process of the various 3D printing processes. The aim is to make additive manufacturing technology ready for series production in Germany and thus to further expand existing competitive advantages.*



*The development of suitable materials for the raw materials required for 3D printing is a priority. These include high-quality plastics as well as metallic powders and wires made of aluminium, titanium and nickel alloys for the powder bed process and for processes with a higher productivity rate (High Deposition Rate Additive Manufacturing). The mechanical properties of polymer-based 3D printing components can be improved by integrating fibers (short, long, endless).*

*The economic efficiency of additive processes depends to a large extent on their process stability and the cost efficiency of upstream and downstream machining processes. Considerable efforts are made to develop processes, procedures and technologies for the quality monitoring and assurance of additive components. In addition, there is a need for efficient physically based simulation processes for materials and for the printing process in order to further deepen the understanding of the process. The availability of experimentally validated calculation methods is also decisive for the wider use of the technology. These must be able to predict the component service life and the damage tolerance, taking into account process-related residual stresses as well as internal and external process-related defects. In the case of 3D-printed components in the engine, the influence of mechanical, thermal and chemical operating loads must also be taken into account. This also applies in particular to repair procedures based on 3D printing processes, where the operational safety and the achievable service life extension must be numerically estimated and experimentally validated.*

## GRÜNE TECHNOLOGIEN FÜR DIE WELT VON MORGEN / GREEN TECHNOLOGIES FOR TOMORROW'S WORLD



Die Erhöhung der Effizienz sowohl der Werkstoffe als auch der Fertigungstechnologien stellen einen signifikanten Beitrag zum Umweltschutz dar. Energiebedarf, Wasserverbrauch und Emissionen werden in der kompletten Prozesskette weiter drastisch gesenkt. Modernste Fertigungsverfahren garantieren eine optimale Nutzung der hochwertigen Materialien, die in der Luft- und Raumfahrttechnik Verwendung finden.

Durch die konsequente Weiterentwicklung von Faserverbund- und metallischen Werkstoffen und den Technologien an den Schnittstellen dieser Materialgruppen werden hybride Strukturen (z.B. Metall/CFK) und ein hybrides Design ermöglicht. Dies führt auch zur Entwicklung neuer Werkstoffkonzepte für Anwendungen bei neuen innovativen elektrischen Antrieben und Energiespeichersystemen, wie sie für Unmanned Aerial Vehicle (UAV) und Urban Air Mobility (UAM) entwickelt werden.



*Efforts to increase the efficiency of both materials and manufacturing technologies make a significant contribution to environmental protection. Energy requirements, water consumption and emissions are drastically reduced throughout the entire process chain. State-of-the-art manufacturing processes guarantee optimum use of the high-quality materials used in aerospace.*

*Through the consistent development of composites and metallic materials and the technologies at their interfaces, hybrid structures (e.g. metal/CFRP) and a hybrid design are made possible. This also leads to the development of new material concepts for applications in new innovative electric drives and energy storage systems, such as those needed for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Urban Air Mobility (UAM).*

Eine zusätzliche Herausforderung für die Entwicklung neuer Werkstofftechnologien ergibt sich aus den Erfordernissen der bereits genannten europäischen Chemikalienverordnung REACH. Mit der Entwicklung einer komplett chromat- und cadmiumfreien Prozesskette erfüllt die deutsche Werkstoffindustrie im Verbund mit globalen Partnern die strengen Anforderungen hinsichtlich ökologisch verträglicher Prozesse.



Im Rahmen der mit den REACH-Anforderungen verbundenen Weiterentwicklungen aktueller Lacksysteme und Oberflächentechnologien, liegt ein besonderes Augenmerk auf der Entwicklung von Oberflächensystemen mit selbstreinigenden Eigenschaften, verbessertem Korrosionsschutz, einem aktiven Beitrag zur Minimierung des Oberflächenwiderstandes sowie einem vergrößerten Funktionsspektrum (Functional Coatings).

Weitere Anstrengungen werden auf dem Gebiet der Wiederverwendung unternommen. Ein geschlossener Materialkreislauf, wie er für Aluminium- bzw. Nickellegierungen bereits etabliert ist, ist auch für die strategisch wichtige Werkstoffgruppe der Titanlegierungen von herausragender Bedeutung. Auch bei den CFK-Werkstoffen liegt ein Fokus auf der Wiederverwendung. Technische Schwierigkeiten, Polymer und Carbonfaser zu trennen, führten lange Zeit dazu, dass Faserverbundverschnitt lediglich thermisch verwertet oder als Füllmaterial im Spritzguss eingesetzt wurde.

werden Abfälle mit geringem zusätzlichem Aufwand einer Wiederverwertung zugeführt, z.B. als neues Ausgangsmaterial für das Spritzgießen von Befestigungswinkeln im Kabinenbereich. Der zweite Pfad zielt darauf ab, die hochwertige Carbonfaser weitgehend ohne Eigenschaftseinbußen rückzugewinnen. Faser und Polymermatrix werden hierbei durch Pyrolyse voneinander getrennt und die so gewonnen Carbonfasern z.B. zu Filzmatten verpresst und danach wieder mit Polymermaterial imprägniert.

Eine nachhaltige Produktgestaltung und -herstellung zielt auf Recyclingraten von 95% bis 100% bis zum Jahr 2050 für das Gesamtsystem Verkehrsflugzeug.

*An additional challenge for the development of new technologies in the materials sector arises from the requirements of the European chemicals regulation REACH already mentioned. With the development of a completely chromate- and cadmium-free process chain, the German materials industry, together with global partners, is meeting the strict requirements of ecologically compatible processes.*



*Within the development of paint systems and surface technologies in connection with the REACH requirements, special attention is given to the development of surface systems with self-cleaning properties, improved corrosion protection, an active contribution to minimizing surface resistance and an extended functional spectrum (functional coatings).*

*Further efforts are being made in the field of recycling. A closed material cycle, as already established for aluminum and nickel alloys, is also of outstanding importance for the strategically important material group of titanium alloys. In the case of CFRP materials, too, the focus is on reuse. For a long time, technical difficulties in separating polymer and carbon fiber led to the fact that fiber composite blend was simply thermally disposed of or used as a filler material in injection molding.*

*Modern recycling approaches essentially follow two development paths. In the first case, waste is recycled with little additional effort, e.g. as a new starting material for injection molding of elbow joints in the aircraft cabin area. The second path aims to recover the high-quality carbon fiber largely without loss of properties. Fiber and polymer matrix are separated from each other by pyrolysis and the resulting carbon fibers are pressed into felt mats, for example, and then impregnated again with polymer material.*

*Sustainable product design and manufacture aims at recycling rates of 95% to 100% by 2050 for the entire commercial aircraft system.*

## SIMULATION ZUR LEISTUNGSSTEIGERUNG UND VERKÜRZUNG DER ENTWICKLUNGSZYKLEN / SIMULATION TO INCREASE PERFORMANCE AND SHORTEN DEVELOPMENT CYCLES



Simulation ist die Lösung für die Erreichung notwendiger kürzerer Innovationszyklen. Sie ermöglicht eine vorgeschaltete virtuelle Entwicklung und den Test von neuen Luftfahrzeugkonzeptionen bei gleichzeitiger zulassungsrelevanter Nachweisführung.

Im Bereich der Werkstoff- und der Herstellprozessentwicklung hat sich die computergestützte Simulation inzwischen zu einem wesentlichen Erfolgsfaktor entwickelt. Die strategische Bedeutung einer prozesskettenübergreifenden Simulation im Sinne eines Integrated Computational Materials Engineerings (ICME) wurde dabei frühzeitig erkannt. Es gibt eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf diesem Gebiet. Dennoch sind die zurzeit vorhandenen ICME-Werkzeuge für die Werkstoff- und Prozessentwicklung im Wesentlichen nur bei der Analyse spezieller Fragestellungen hilfreich. Eine übergreifende Prozesskettenbetrachtung ist noch nicht erreicht. Erst mit zunehmender Vorhersagegenauigkeit von Simulations-Werkzeugen, einer Standardisierung und der Verknüpfung von Simulationsplattformen wird der Nutzen der ICME für die Werkstoff- und Prozessentwicklung das notwendige Niveau erreichen.

Es ist unabdingbar, das Luftfahrzeug zunächst im Computer unter Beachtung aller Entwicklungs- und Herstellungsanforderungen konzeptionell zu simulieren und es unter softwaregenerierten realitätsnahen Bedingungen „fliegen zu lassen“. Auf diese Weise gelingt es, Bauteile lange vor der physischen Verfügbarkeit zuverlässig zu optimieren und Zeitvorteile zu realisieren. Das „Virtuelle Luftfahrzeug“ oder der „Digitale Zwilling“ muss als Abbild des realen Produktes alle benötigten Entwicklungsdaten in Bezug auf die Gesamtheit der Eigenschaften und Fähigkeiten zur Verfügung stellen.

Viele Voraussetzungen für das „Virtuelle Luftfahrzeug“ sind im Rahmen des deutschen Luftfahrt-Forschungsprogramms (LuFo) bereits erarbeitet worden. Deutschland ist mit seiner breit aufgestellten Erfahrung und Kompetenz im Bereich der Simulation prädestiniert, eine Führungsrolle in diesem Bereich einzunehmen.



*Simulation is the solution for achieving necessary shorter innovation cycles. It enables an upstream virtual development and testing of new aircraft concepts with simultaneous verification relevant to approval.*

*In the field of materials and manufacturing process development, computer-aided simulation has become a key success factor. The strategic importance of cross-process chain simulation in the sense of Integrated Computational Materials Engineering (ICME) was recognized early on. There are numerous research and development projects in this field. Nevertheless, the currently available ICME tools for material and process development are essentially*

*It is indispensable to first simulate the aircraft conceptually in a computer under consideration of all development and manufacturing requirements and to "fly" it under software-generated semi-realistic conditions. In this way it is possible to reliably optimize components long before they become physically available and to realize time savings. The "virtual aircraft" or "digital twin", as an image of the real product, must provide all the development data required with regard to all the properties and capabilities.*

*Many prerequisites for the "virtual aircraft" have already been developed within the framework of the German aviation research programme (LuFo). With its broad experience and competence in the field of simulation, Germany is predestined to assume a leading role in this field.*





Das virtuelle Modell bildet gleichzeitig die Brücke zwischen dem Produkt und der Zulieferkette. Es stellt im Entwicklungsprozess eine frühzeitige Vernetzung innerhalb der Zulieferkette, den Austausch von Daten und eine übergreifende Zusammenarbeit bei der Detailentwicklung sicher. In diesem Zusammenhang muss die IT-Standardisierung, Vernetzung und Verfügbarkeit von Hochleistungsrechnern gewährleistet sein. Darauf basierend werden industriespezifische Cloud-Anwendungen neue Möglichkeiten der transnationalen Interaktion und Kommunikation in der Industrielogistik und in Bezug auf automatisierungsgerechtes Design ermöglichen.

Für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Markt ist die Verkürzung der Produktentwicklungszeiten ein entscheidender Erfolgsfaktor. Durch eine stärkere Integration verschiedenster Ingenieursdisziplinen im frühen Produktentwicklungsstadium kann die Marktposition gestärkt werden. Die Integration der entsprechenden numerischen Simulationsfähigkeiten und der virtuellen Designwerkzeuge ist dafür der bestimmende Faktor. Die Simulation erfasst neben dem physikalischen Verhalten der Strukturen auch die Optimierung der Herstellprozesse und der Fertigungskosten.



*The virtual model forms the bridge between the product and the supply chain. In the development process, it ensures early networking within the supply chain, the exchange of data, and comprehensive cooperation in detail development. In this context, the IT-standardization, networking and availability of high-performance computers must be guaranteed. Based on this, industry-specific cloud applications will provide new opportunities for transnational interaction and communication in industrial logistics and with regard to automation-oriented design.*

*Shortening product development cycles is a decisive success factor for securing competitiveness in the global market. The market position can be strengthened by a stronger integration of various engineering disciplines in the early product development stage. The integration of the corresponding numerical simulation capabilities and virtual design tools is the determining factor for this. In addition to the physical behavior of the structures, the simulation also records the optimization of the manufacturing processes and the manufacturing costs.*

## LUFTFAHRT-SUPPLY-CHAIN 4.0 / AVIATION SUPPLY CHAIN 4.0



Die Umsetzung des Hightech-Strategieprojektes „Industrie 4.0“ in der Luftfahrtindustrie weist einen hohen Grad an Komplexität auf:

- Der Sicherheitsaspekt ist bestimmend für den gesamten Lebenszyklus des Luftfahrzeugs. Die Anforderungen an die Zulieferkette, stringente Sicherheitsanforderungen zu erfüllen, sind hoch.
- Ein Luftfahrzeug ist ein technisch hochkomplexes Produkt. Große Luftfahrzeuge bestehen aus weit mehr als 1 Million Einzelteilen.
- Der Markt fordert eine hohe Flexibilität zur Anpassung und Konfiguration des Basisflugzeugs und des Innenbereichs an die Kundenwünsche.
- Die Wertschöpfungskette ist international aufgestellt und umfasst eine große Anzahl Zulieferer. Entwicklung, Produktion, Service, Logistik und Instandhaltung sind in der Regel über viele Standorte verteilt.

Um die neuen Technologien im Zusammenhang mit der „Fabrik der Zukunft“ zu erproben und die Risiken einer Produktionsumstellung abzuschätzen, ist deren Beherrschbarkeit in einer Modellumgebung zu demonstrieren. Damit kann die Einführung neuer Technologien und Materialkonzepte bei gleichzeitig ansteigendem Hochlauf der Produktionszahlen – eine der zentralen, stetigen Herausforderungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie – mit überschaubarem Risiko erfolgen.



Zu den kurzfristigen Zielen gehören die Vernetzung von Produktionsmitteln und die automatische Erfassung und Erkennung von Bauteilen inkl. Position, Form und Abweichungen bzgl. der festgelegten Qualitätsmerkmale. Mittel- bis langfristiges Ziel ist die Implementierung automatisierter, fehlertoleranter Prozesse, die bei Auftreten von Abweichungen selbstständig Korrekturen vornehmen sowie die weiter verbesserte Zusammenarbeit von Mensch und mit intelligenter Sensorik ausgestatteter Maschine im Produktionsumfeld.

Eine digitale Fabrik beinhaltet die Fähigkeiten zur genauen Planung und Vorhersage der Produktionsprozesse bis hin zur Echtzeitverfolgung und Steuerung der Produktionsabläufe. Ziel ist die durchgehende Datenerfassung im Produktionsfluss inkl. Fertigungsmodellierung und Prozesssimulation sowie eine fortschrittliche Visualisierung bis hin zur Nutzung von „Augmented Reality“, der künstlichen Wissens- und Sinneserweiterung.

Bei den deutschen Unternehmen in der Luft- und Raumfahrt findet, entgegen dem Trend in manch anderen Branchen, ein großer Teil der Wertschöpfung im eigenen Land statt. Dies wird insbesondere durch Erhöhung des Automatisierungsgrades in der Fertigung sowie die fortwährende Optimierung der Prozessgestaltung und der Qualitätskontrolle ermöglicht.

*The implementation of the high-tech strategy project "Industry 4.0" in the aviation industry is highly complex:*



- *The safety aspect is decisive for the entire life cycle of the aircraft. The demands on the supply chain to meet stringent safety requirements are high.*
- *An aircraft is a technically highly complex product. Large aircraft consist of well over 1 million individual parts.*
- *The market demands a high degree of flexibility in adapting and configuring the basic aircraft and the interior to customer requirements.*
- *The value chain is internationally positioned and includes a large number of suppliers. Development, production, service, logistics and maintenance are generally spread across many locations.*

*In order to test the new technologies in connection with the "factory of the future" and to assess the risks of a change of production, their controllability must be demonstrated in a model environment. This means that the introduction of new technologies and material concepts with production figures increasing at the same time – one of the central and constant challenges in the aerospace industry – can be carried out with a manageable risk.*

*Short-term goals include the cross-linking of production resources and the automatic recording and recognition of components including position, shape and deviations with regard to the defined quality features. The medium to long-term goal is the implementation of automated, fault-tolerant processes, which independently make corrections in the event of deviations, as well as further improved cooperation between people and machines equipped with intelligent sensors in the production environment.*

*A digital factory provides the capabilities to accurately plan and predict production processes, including real-time tracking and control of production sequences. The goal is the continuous data acquisition in the production flow including production modeling and process simulation as well as an advanced visualization up to the use of "Augmented Reality", the artificial expansion of knowledge and senses.*

*Contrary to the trend in many other sectors, a large part of the value added by German aerospace companies takes place domestically. This is possible in particular by increasing the degree of automation in production and the continuous optimization of process design and quality control.*

IMPRESSUM / IMPRINT:

BILDNACHWEISE/FOTOS: ADOBE STOCK, AIRCRAFT PHILIPP GROUP, ALERIS, HEXCEL, DLR, MTU AERO ENGINES,  
KAI MYLLER, PIXABAY, ROLLS ROYCE, SIEMENS, NICK ROCHOWSKI

HERAUSGEBER / PUBLISHER:

**Bundesverband der Deutschen  
Luft- und Raumfahrtindustrie e.V. (BDLI)**

**German Aerospace Industries Association (BDLI)**

ATRIUM Friedrichstr. 60  
10117 Berlin  
+49 (0)30 206140-0  
kontakt@bdli.de  
**www.bdli.de**

Verantwortlich / Responsible: V.i.S.d.P.: Cornelia von Ammon  
Layout: Katja Zehe

November 2019



