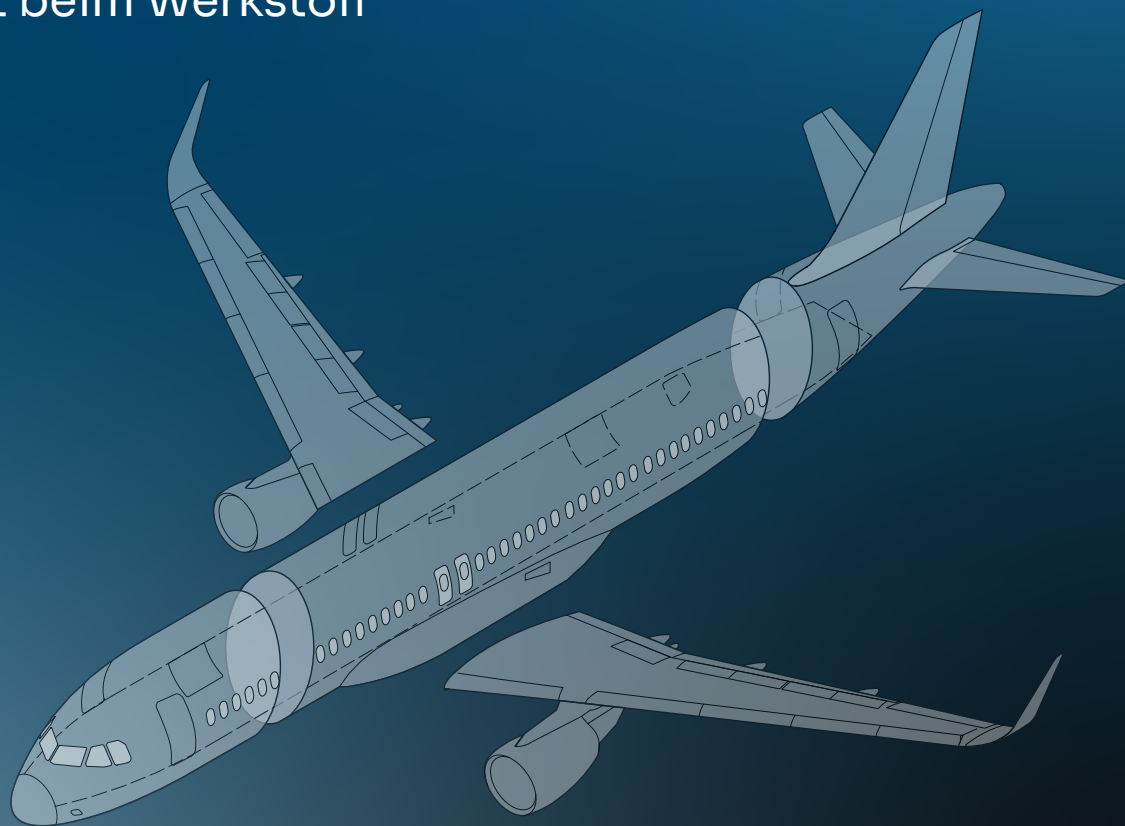


ZUKUNFT
BEGINNT
OBEN



Materials Matter

Technologische Souveränität
beginnt beim Werkstoff



Grußwort



Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie zählt zu den technologisch anspruchsvollsten und innovationsstärksten Wirtschaftszweigen unseres Landes. Ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit beruht maßgeblich auf einer kontinuierlichen Weiterentwicklung bestehender Technologien sowie der konsequenten Erschließung neuer Forschungsfelder. In diesem Kontext kommt der Werkstoffentwicklung eine zentrale Bedeutung zu: Sie bildet die Grundlage für die Realisierung zukünftiger Luft- und Raumfahrzeugmuster und trägt wesentlich zur Erreichung ambitionierter technologischer, ökologischer und wirtschaftlicher Zielsetzungen bei.

Die Entwicklung neuer Werkstoffe erfordert langfristig ausgerichtete, strategische Ansätze. Vom ersten Konzept bis zur industriellen Technologiereife kann ein neuer Werkstoff deutlich mehr Zeit in Anspruch nehmen als die klassische Produktentwicklung – Zeiträume von bis zu 20 Jahren sind dabei keine Seltenheit. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, dass die Werkstoffentwicklung der Produktentwicklung zeitlich vorgelagert ist: Die industrielle Reife eines neuen Werkstoffs muss erreicht sein, bevor die eigentliche Produktentwicklung beginnen kann.

Daraus folgt die Notwendigkeit einer vorausschauenden, langfristigen Werkstoffstrategie, in der zukünftige Anforderungen der Produktentwicklung frühzeitig antizipiert und bewertet werden. Eine solche Strategie kann nur im Zusammenspiel aller relevanten Akteure erfolgreich umgesetzt werden – von Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen über die gesamte Lieferkette bis hin zu industriellen Endanwendern.

Vor dem Hintergrund globaler Marktveränderungen, wachsender geopolitischer Unsicherheiten und zunehmender Anforderungen an Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz ist die strategische Sicherung leistungsfähiger Werkstoffe innerhalb nationaler und europäischer Lieferketten von entscheidender Relevanz.

Die strategische Ausrichtung der zukünftigen Werkstoffforschung muss über die klassischen Anforderungen an thermo-mechanische Eigenschaften hinausgehen und die gesamte Wertschöpfungskette ganzheitlich einbeziehen. Neben der reinen Werkstoffperformance sind die langfristige Verfügbarkeit von Rohstoffen sowie ökologische, soziale und geopolitische Rahmenbedingungen systematisch zu berücksichtigen.



AIRBUS



Leistritz



Novelis



TEIJIN CARBON



tigen. Insbesondere für Anwender in Deutschland und Europa sind wesentliche Teile der Werkstoff-Lieferketten außerhalb des Kontinents angesiedelt und damit potenziellen Abhängigkeiten und Risiken ausgesetzt. Die Grundlage zur Beherrschung dieser Herausforderungen wird bereits in der Werkstoffentwicklung gelegt: Sowohl die Auswahl der Legierungs- und Funktionselemente als auch die zugehörigen Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse definieren maßgeblich die Nachhaltigkeit, Resilienz und strategische Robustheit eines Werkstoffkonzepts.

Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie wird hierbei durch eine exzellente Forschungslandschaft unterstützt, die sich aus führenden wissenschaftlichen Einrichtungen, Hochschulen, freie Forschungseinrichtungen und industriellen Innovationspartnern zusammensetzt.

Vergangene Forschungsaktivitäten haben bereits bedeutende Fortschritte erzielt, insbesondere durch die Entwicklung neuer Materialien und Verfahren wie nachhaltige Metallrumpftechnologien und insbes. für die nächste Generation von single aisle Programmen oder Technologien für die industrielle Fertigung von Composite-Flügeln sowie bei additiven Fertigungsverfahren, die jetzt zunehmend in Anwendung kommen. Die LuFo-Förderung des Bundes hat sich als wirksames Instrument etabliert, um Schlüsseltechnologien gezielt zu unterstützen und die technologische Souveränität zu stärken.

Das vorliegende Dokument wurde von den im Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V. (BDLI) im Fachausschuss Werkstoffe & Komponenten zusammengeschlossenen Unternehmen und Institutionen erarbeitet. Es verdeutlicht die strategische Bedeutung der Werkstoffentwicklung für die Zukunftsfähigkeit der Branche und zeigt auf, welche Chancen sich aus einer zielgerichteten und koordinierten Innovationspolitik ergeben.

Dr. Matthias Miermeister

Director Technical Development Engineering Global Aerospace, Novelis
Vorsitzender des BDLI FA Werkstoffe & Komponenten

Inhalt

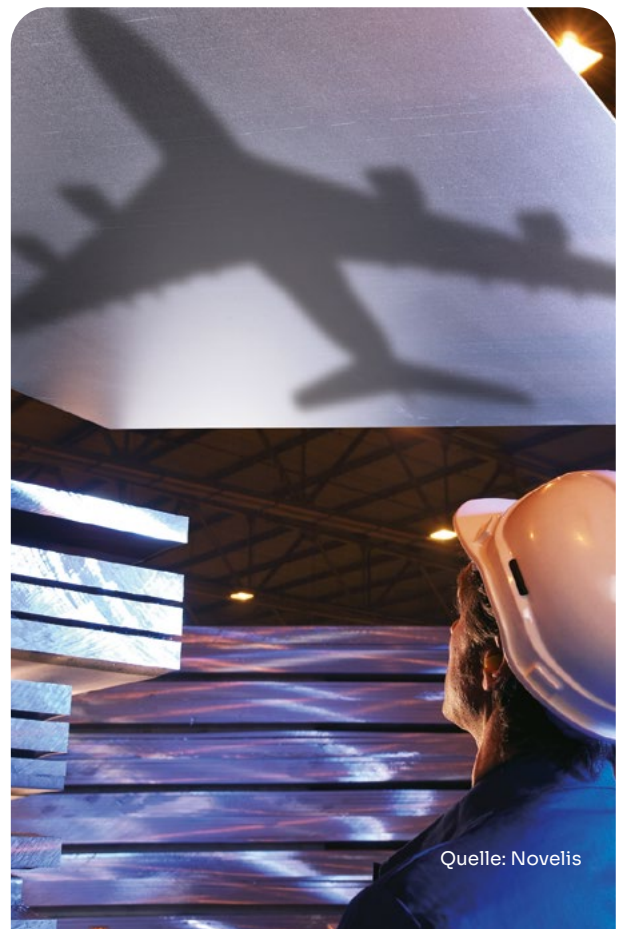
Grußwort	2
Executive Summary und Forderungen	5
Technologische Eckpfeiler	5
Bedeutung & Wirkung	6
Politische Forderungen	6
Werkstoffe sind unsere Zukunft	7
Werkstoffe – die Basis nachhaltigen Erfolgs	11
Faserverbundwerkstoffe	11
Metalle	13
Metallische Hochtemperaturwerkstoffe	15
Hybride Bauweisen	16
Werkstoffe der nächsten Generation – Von der Idee zum wettbewerbsfähigen Produkt	17
Hocheffiziente Fertigungstechnologien für zukünftige Luftfahrtanwendungen	18
Oberflächentechnik als entscheidende Querschnittstechnologie	20
Additive Fertigung – Sicherstellen und Ausbau einer nationalen Kernkompetenz	21
Ökoeffiziente Technologien für eine nachhaltige Welt von Morgen	23
Simulation zur Leistungssteigerung und Verkürzung der Entwicklungszyklen	24
Digitalisierung der Industrie und Werkstoffe	25
Digital Material Passports und Digital Product Passports – Transparenz über den gesamten Lebenszyklus	26

Executive Summary und Forderungen

Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie agiert in einem global zunehmend wettbewerbsorientierten Umfeld. Ihr Ziel: innovative Materialien und Technologien zur Steigerung von Effizienz, Sicherheit und Nachhaltigkeit einsetzen – entscheidend für das Erreichen revolutionärer Flugzeug- und Triebwerksdesigns der nächsten Generation.

Technologische Eckpfeiler

- **Leichtbauwerkstoffe** (Al-, Ti-Legierungen) und **faserverstärkte Verbundwerkstoffe** tragen zur erheblichen Gewichtsreduzierung bei, verbessern Korrosionsresistenz und ermöglichen neue Fertigungskonzepte und mehr Designfreiheit.
- **Metallische Hochtemperaturwerkstoffe** (z. B. Ni-Legierungen sowie pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe) fördern Effizienzgewinne im Triebwerksbereich, bedürfen jedoch Optimierung in Produktionskosten und Prozessqualität.
- **Hybride Bauweisen:** lokal optimierte Bauteileigenschaften durch Einsatz verschiedener Werkstoffklassen, damit verbunden komplexe Herausforderungen u.a. bei Prüfung und Oberflächenbehandlung
- **Keramische Faserverbundwerkstoffe** (CMC) gelten als Schlüssel zur signifikanten Treibstoffeinsparung.
- **Hocheffiziente Fertigungstechnologien für zukünftige Luftfahrtanwendungen**
- **Oberflächentechnologien:** Ersatz korrosions- und erosionsschützender Systeme gemäß REACH-Anforderungen, bei gleichzeitigem Funktionserhalt.
- **Additive Fertigung/3D-Druck:** Weltmarktführerschaft Deutschlands mit Fokus auf Automatisierung und Qualitätssicherung – wichtig für Anpassbarkeit und Effizienz.
- **Ökoeffiziente Technologien für eine nachhaltige Welt von Morgen:** Zirkularität für die Primärwerkstoffe sowie energieeffiziente Prozesse
- **Simulation zur Leistungssteigerung und Verkürzung der Entwicklungszyklen:** Rechnergestützte Material- und Prozesssimulationen sind essenziell, derzeit jedoch noch nicht integrierte Standardpraxis über Prozessketten hinweg.
- **Digitalisierung Industrie und Werkstoffe**



Bedeutung & Wirkung

Wettbewerbsfähigkeit sichern

Langfristig politische Rahmenbedingungen müssen innovative Werkstoffe und Fertigungstechnologien fördern.

Nachhaltigkeit & Klimaziele

Effiziente, emissionsarme Technologien und Recyclingstrategien sind Schlüssel zur Dekarbonisierung der Luftfahrt.

Souveränität & Resilienz

Wer kritische Werkstofftechnologien beherrscht, behält die Kontrolle über strategische Lieferketten und schützt Deutschland vor geopolitischer Abhängigkeit.

Politische Forderungen

F&E-Investitionen

Erhöhung der öffentlichen und privaten Fördermittel für Forschung und Entwicklung – dabei müssen die Werkstoffthemen angemessenen Anteil erhalten.

Fachkräfteoffensive

Ausbau von Ausbildungs- und Weiterbildungsprogrammen sowie Forschung zur Sicherung qualifizierter Fachkräfte und zur Erhaltung der Werkstoffkompetenz.

Verteidigungs- und Dual-Use-Kompetenz

Deutschland nutzt seine zivile Werkstoffexzellenz gezielt für militärische Anwendungen und stärkt damit seine Rolle als verlässlicher Partner in der europäischen Sicherheitsarchitektur.



Fazit

Materials Matter: Werkstoffe sind das Fundament für den Erfolg der nächsten Luft- und Raumfahrzeuggeneration. Damit Deutschland diesen Weg gehen kann, fordert der BDLI konsequente politische Unterstützung – ökologisch, ökonomisch und sicherheitspolitisch. Förderung von F&E, Ausbildungsinitiativen, industrielle Technologiepolitik müssen ineinandergreifen, um langfristige Innovations und Wettbewerbsstärke zu sichern – im Interesse einer souveränen, nachhaltigen und zukunftsfähigen Branche.

Werkstoffe sind unsere Zukunft

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

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.

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.



↑ Channel fitting, Titan

Durch eine frühe, weitsichtige Entscheidung für eine hochratenfähige und 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 China zu sichern.

Das Wachstum des internationalen Luftverkehrs ist ungebrochen. Langfristig wird von einer globalen Steigerung zwischen 3 und 5 Prozent pro Jahr ausgegangen. Ein entscheidender Faktor für die zukünftige Positionierung der deutschen Luftfahrtindustrie im Wettbewerb ist die Geschwindigkeit, mit der auf Leichtbauprinzipien basierende robuste und hochratenfähige 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.

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.

100 kg 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 t CO₂ 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.

Gewichtsreduktion durch Leichtbau: Der gezielte Einsatz fortschrittlicher Leichtbauwerkstoffe eröffnet im Triebwerksbau substantielle Potenziale zur Gewichtsreduktion. Obwohl diese Gewichtseinsparungen die thermodynamische Effizienz des Triebwerks nicht unmittelbar beeinflussen, wirken sie sich strategisch bedeutsam auf die Gesamteffizienz des Flugzeugs aus. Reduziertes Triebwerksgewicht führt zu geringerem Struktur- und Treibstoffbedarf auf Flugzeugebene und unterstützt damit, wie bereits oben dargestellt, zentrale

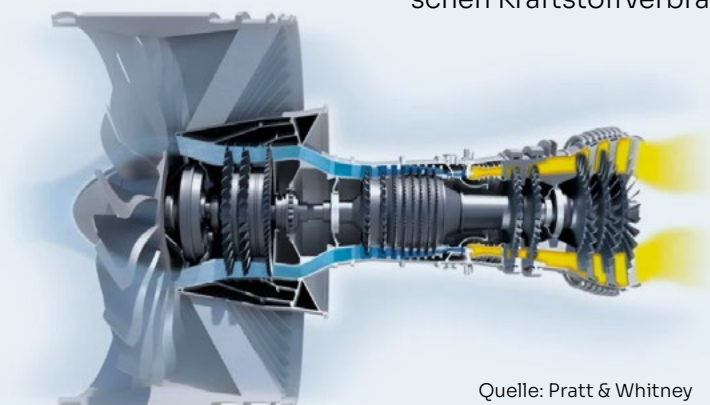
Ziele wie Emissionsreduktion, Reichweiten-erhöhung und Nutzlast-erhöhung.

Erhöhung der Lebensdauer durch verbesserte Hochtemperaturwerkstoffe: Die Weiterentwicklung hochtemperaturbeständiger Werkstoffe stellt einen wesentlichen strategischen Hebel zur Steigerung der Lebensdauer von Turbinenkomponenten dar. Bereits eine Erhöhung der zulässigen Einsatztemperatur um etwa 15°C – beispielsweise durch optimierte Ni-Basis-Superlegierungen, keramische Matrixverbunde (CMCs) oder innovative Wärmedämmschichtsysteme – kann bei unveränderter Triebwerksarchitektur eine Verdopplung der Turbinenlebensdauer ermöglichen. Eine Temperaturerhöhung um 50°C kann sogar eine bis zu achtfache Lebensdauersteigerung bewirken. Diese Zusammenhänge unterstreichen die zentrale Bedeutung der Werkstoffentwicklung für die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit und die Lebenszykluskosten zukünftiger Triebwerksgenerationen.

Steigerung der Triebwerkseffizienz durch Hochtemperaturwerkstoffe: Für neue Triebwerkskonzepte eröffnet eine erhöhte Temperaturbeständigkeit der eingesetzten Werkstoffe zwei strategisch relevante Entwicklungsoptionen:

Bei gleichbleibendem Kühlluftbedarf der heißen Bauteile ermöglicht die höhere Temperaturfähigkeit eine Verkleinerung des Kerntriebwerks. Dies erlaubt eine Erhöhung des Nebenstromverhältnisses und führt zu einer signifikanten Verbesserung des Vortriebswirkungsgrades.

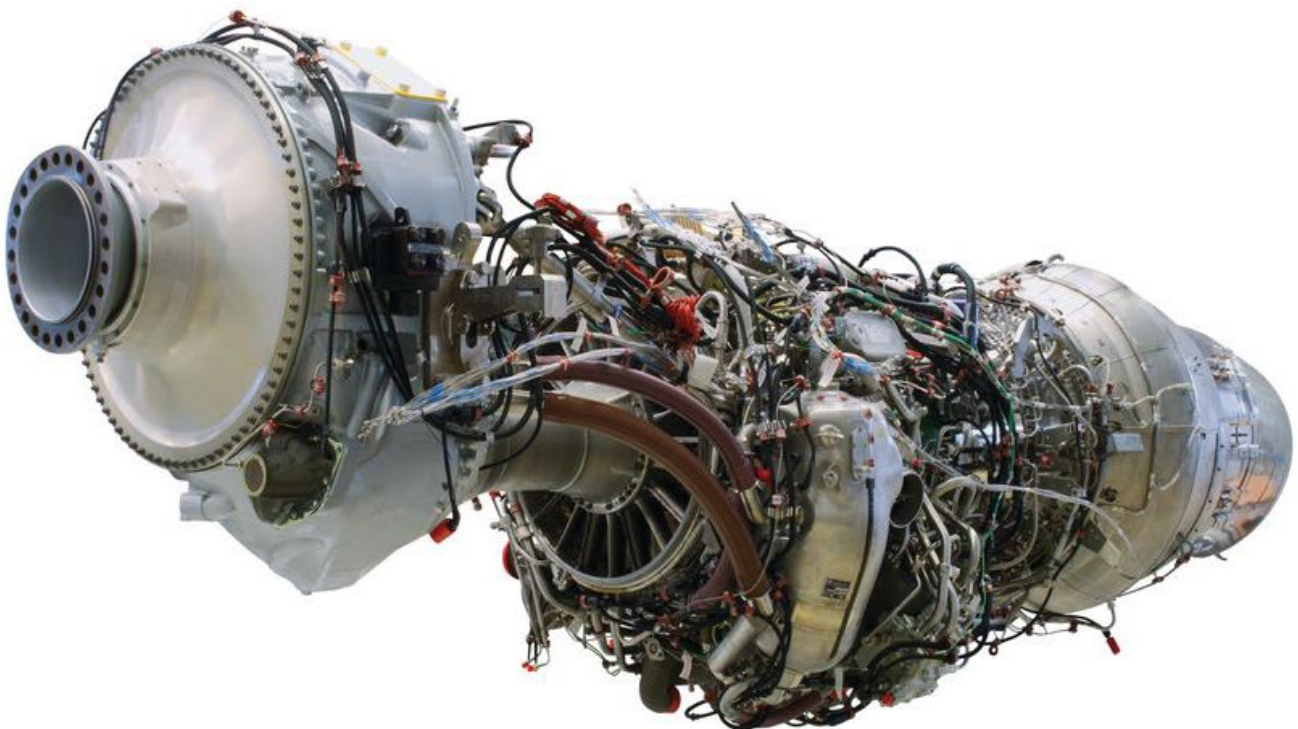
Alternativ kann bei unveränderter Kerntriebwerksarchitektur der Kühlluftbedarf reduziert werden. Die dadurch freigesetzte Luft steht dem thermodynamischen Prozess zur Verfügung und verbessert unmittelbar den Gesamtwirkungsgrad des Triebwerks, insbesondere durch eine Reduzierung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (SFC).



Quelle: Pratt & Whitney

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 der Digitalisierung der Industrie 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.

Die Luft- und Raumfahrtindustrie hat bereits langjährige Erfahrungen mit digitalen Produkt-Lifecycle-Management-Systemen (PLMS) gesammelt. Mit der „Fabrik der Zukunft“ 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.

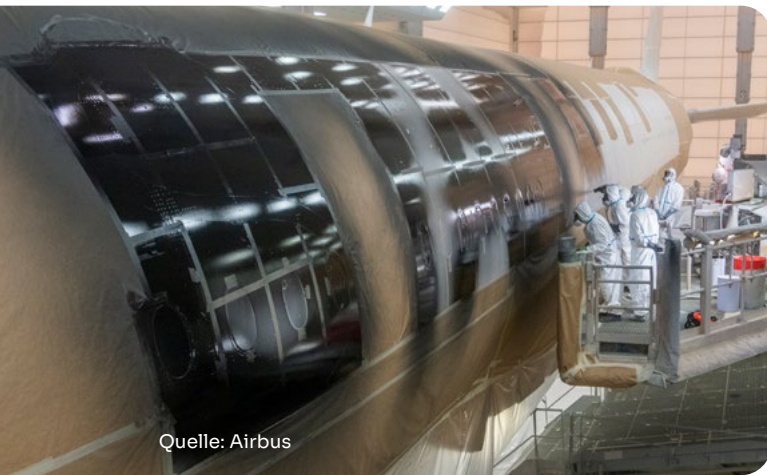


Quelle: MTU, Aero Engines

Werkstoffe – die Basis nachhaltigen Erfolgs

Faserverbundwerkstoffe

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) entwickeln sich zunehmend zu einem strategischen Hebel für die Luft- und Raumfahrtindustrie. Ihr größter Vorteil liegt in der signifikanten Reduktion des Leergewichts – ein direkter Beitrag zur Senkung des Treibstoffverbrauchs und damit der Betriebskosten. In einem Sektor, in dem der Treibstoffverbrauch einen Großteil der Lebenszykluskosten ausmacht, ist diese Eigenschaft wirtschaftlich wie ökologisch von zentraler Bedeutung.



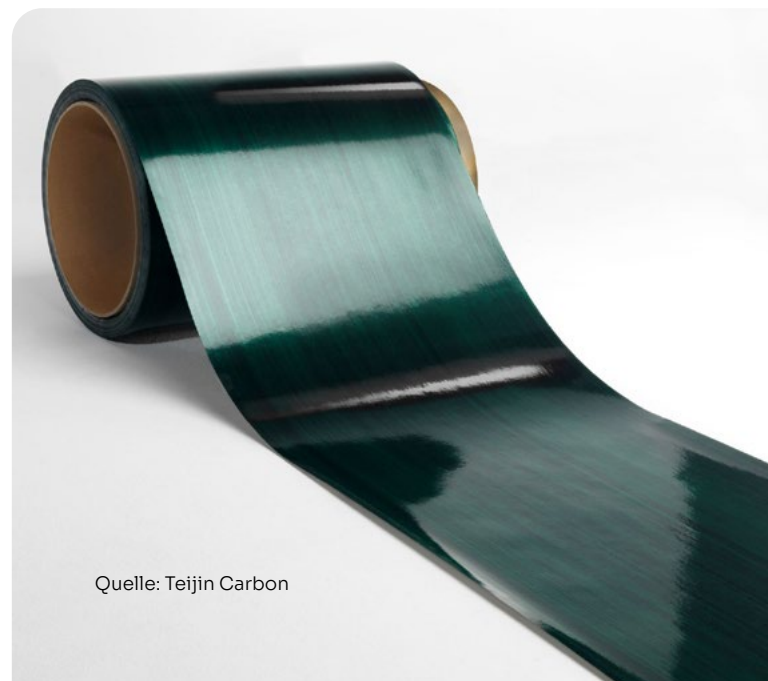
Quelle: Airbus

Aktuell konzentrieren sich Industrie und Forschung in Deutschland stark darauf, CFK wirtschaftlich skalierbar zu machen. Ziel ist es, modulare, automatisiert herstellbare Bauteile zu entwickeln, die auch in höheren Stückzahlen effizient produziert werden können. Damit wird CFK nicht nur für Langstreckenflugzeuge, sondern auch für Kurz- und Mittelstreckenmodelle sowie neue Mobilitätskonzepte wie Urban Air Mobility interessant.

Ein weiterer Fokus liegt auf der Schließung des Materialkreislaufs. Fortschritte im Recycling ermöglichen es zunehmend, CFK-Bauteile am Ende ihrer Lebensdauer wiederzuverwerten – ein entscheidender Schritt zur Erreichung der Klimaziele bis 2045. In Kombination mit dem reduzierten Treibstoffverbrauch ergibt sich eine deutlich verbesserte CO₂-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

Darüber hinaus liegt ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt auf der Optimierung der Kohlenstofffasereigenschaften sowie der Harzentwicklung, insbesondere im Hinblick auf schnellere Zykluszeiten. Diese Fortschritte sind entscheidend für die industrielle Serienfertigung und die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit von CFK-Komponenten.

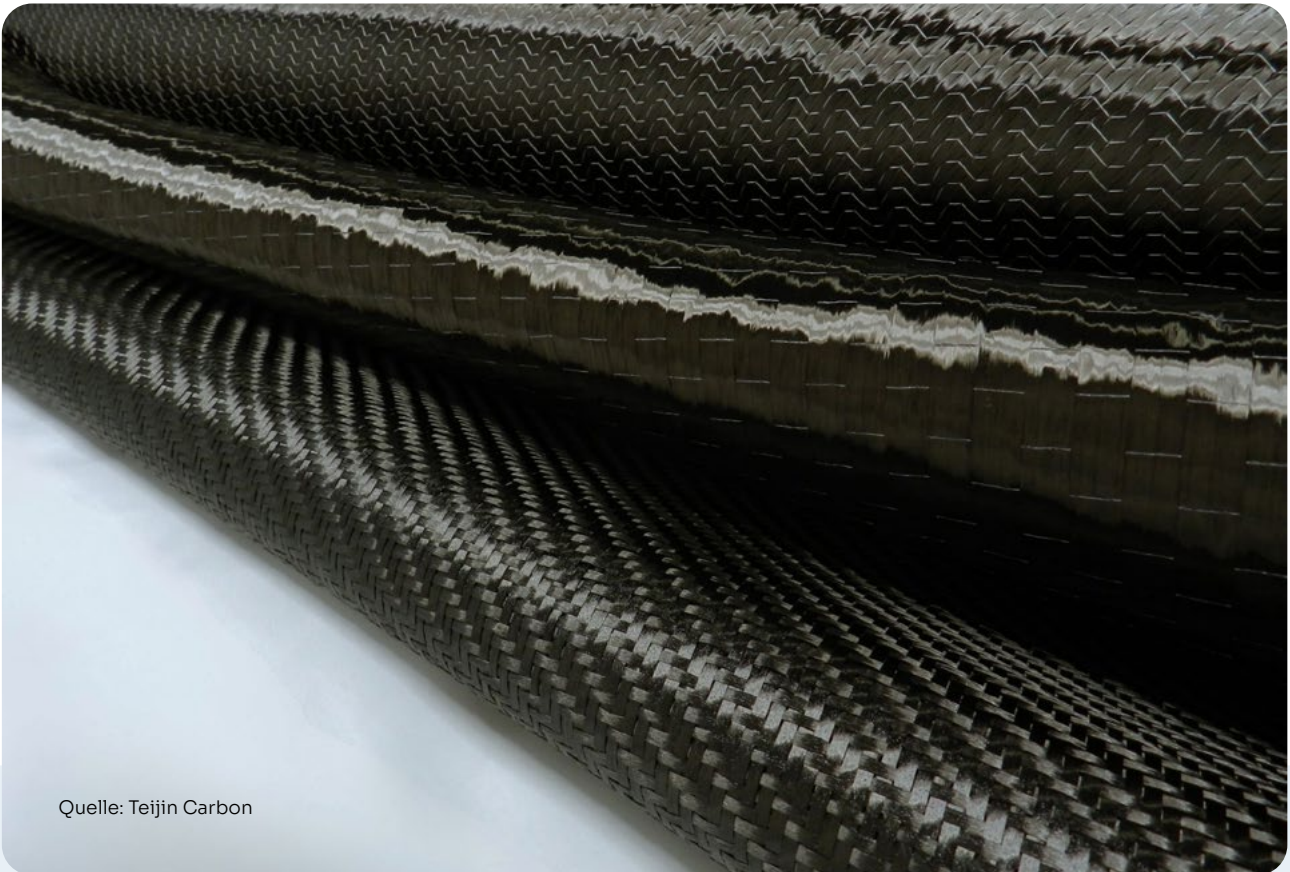
CFK ist zudem unverzichtbar für die Realisierung neuartiger Leichtbaustrukturen, bei denen aerodynamische Effizienz und strukturelle Leistungsfähigkeit im Vordergrund stehen. Besonders deutlich wird das beim Konzept des Blended Wing Body (BWB), das ohne CFK in dieser Form kaum umsetzbar wäre. Die Materialeigenschaften ermöglichen hier nicht nur eine radikale Gewichtsreduktion, sondern auch die Umsetzung komplexer, strömungsgünstiger Geometrien.



Quelle: Teijin Carbon

Zudem eröffnet der Einsatz digitaler Zwillinge neue Möglichkeiten im Materialmonitoring: Strukturelle Belastungen und Alterungsprozesse lassen sich in Echtzeit überwachen, was Wartungskosten senkt und die Betriebs-

sicherheit erhöht. Damit wird CFK nicht nur effizienter nutzbar, sondern auch intelligenter – ein entscheidender Schritt in Richtung einer datengetriebenen, nachhaltigen Luftfahrt.



Quelle: Teijin Carbon

Europäische Lieferkette und CSRМ – Critical Strategic Raw Materials:

Die Sicherstellung einer europäischen Lieferkette für Faserverbundwerkstoffe ist von strategischer Bedeutung – insbesondere für militärische Anwendungen. Als kritische Schlüsselmaterialien (CSRМ) sind diese Werkstoffe essenziell für die Herstellung moderner Luft-, Raumfahrt- und Verteidigungssysteme. Eine unabhängige, europäisch kontrollierte

Versorgung schützt vor geopolitischen Risiken, sichert technologische Souveränität und gewährleistet die Einsatzfähigkeit sicherheitsrelevanter Systeme. Der Aufbau und Erhalt dieser Lieferkette ist daher eine unabdingbare Voraussetzung für die Resilienz und Handlungsfähigkeit europäischer Streitkräfte.

Metalle

Die Weiterentwicklung von hochfesten Aluminiumlegierungen wird es in Zukunft ermöglichen, Flugzeug- und Hubschrauberstrukturen noch einfacher in integraler Bauweise herzustellen.

Neben der Entwicklung von Legierungen mit verbesserten Eigenschaften bietet auch die effizientere Nutzung der etablierten Werkstoffe ein erhebliches Potential zum Leichtbau und zur Ressourcenschonung. Durch den Einsatz neuer Simulationsmethoden, unter Einbeziehung neuer Werkstoffmodelle und KI, die auch die Anisotropie der Werkstoffeigenschaften berücksichtigen, können zukünftig komplexe Strukturbauteile noch kostengünstiger aus großen Schmiede- oder Gussteilen hergestellt werden, die zusätzlich auf Grund ihrer niedrigen Buy-to-Fly Rate einen deutlich niedrigeren CO₂-Fussabdruck aufweisen. Große Gesenkschmiedeteile im Strukturbereich (Flügel, Rumpf, Leitwerk) können dabei mittlerweile aufgrund der Verfügbarkeit

leistungsfähiger Schmiedepressen (Presskraft >50.000 Tonnen) aus hochfesten, schadens-toleranten Aluminiumlegierungen hergestellt werden.

Für Anwendungen in der Rumpfbekplankung und Schalenfertigung werden moderne Aluminium-Lithium- (AlLi) und Aluminium-Magnesium-Scandium-(AlMgSc) Legierungen sowie konventionelle 2XXX und 6XXX Legierungen mit geeigneter Korrosionsschutzplattierung weiterentwickelt. Diese ermöglichen den Einsatz hochproduktiver Fügetechnologien wie dem Reibrührschweißen (FSW), ohne dabei Leistungseinbußen zu verursachen.



Quelle: Novelis

Durch die Nutzbarmachung bewährter Fertigungsverfahren aus der Automobilindustrie – etwa dem Warmumformen von Luftfahrt-Aluminiumblechen – lässt sich die Produktivität signifikant steigern und ein weiterer Bauratenhochlauf effizient realisieren.

Eine weitergehende Funktionsintegration sowie die Reduzierung einzelner Bauteilkomponenten kann durch den verstärkten Einsatz von dicken und ultradicken Platten erreicht werden. In Kombination mit adäquaten Fertigungsprozessen wie dem Explosionsumformen (auch bekannt als High Energy Hydroforming) lassen sich komplexe Geometrien und multifunktionale Strukturen effizient herstellen.

Innovative Recyclingverfahren sowie darauf abgestimmte Konzepte zur Schrottseparierung gewährleisten die effiziente Wiederverwertung der bei der Herstellung von Flugzeugkomponenten in großem Umfang anfallenden Aluminium-Prozessschrotte. Darüber hinaus ermöglichen fortschrittliche End-of-Life-Strategien die Rückführung ausgedienter Flugzeugteile in den Materialkreislauf. So wird nicht nur die Verfügbarkeit von Rohmaterialien gesichert, sondern auch ein bedeutender Beitrag zu einer ressourcenschonenden und nachhaltigen Luftfahrtindustrie geleistet, und dies über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

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 Durchmesser. Hierdurch werden die Strukturbauteile für die Triebwerksaufhängung thermisch stärker belastet, so dass warmfeste Titanlegierungen zum Einsatz kommen müssen.



← Titanschmiedeteil für den Airbus A350, Otto Fuchs

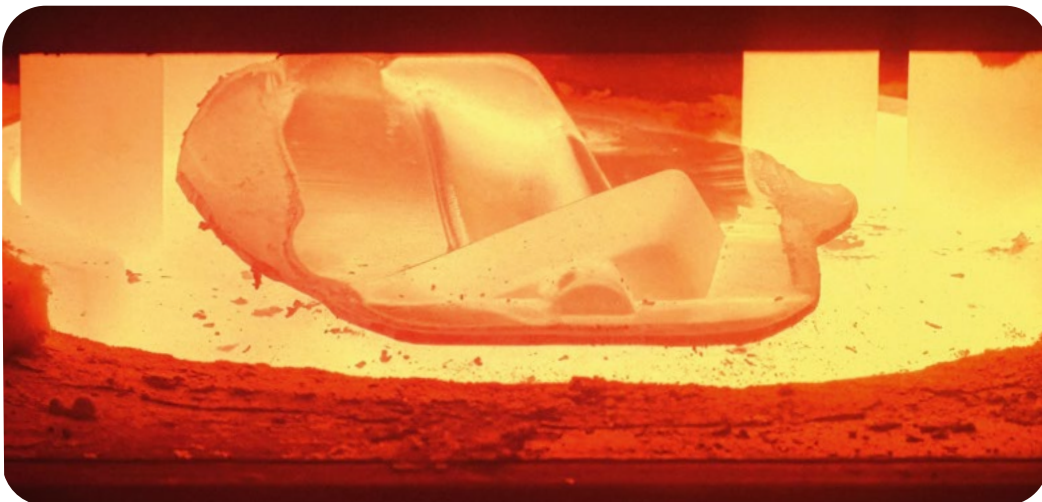
→ Hydraulische Schmiedepresse (Presskraft 30.000t) zur Herstellung großer Titan- und Aluminium Strukturteile und zur Herstellung geschmiedeter Triebwerksscheiben auf Basis Titan- und Superlegierungen, Otto Fuchs



Metallische Hochtemperaturwerkstoffe

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 Schmiedeuformung verarbeitet. Die Fertigungstechnologien für Triebwerksschaufeln aus TiAl sind in Deutschland hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Prozesssicherheit entwickelt und verfügbar.

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.



← Isothermschmieden einer Triebwerkschaufel aus Titanaluminid, Leistriz

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.



↑ Turbine Blades, Access

Hybride Bauweisen

Die Kombination metallischer und faserverstärkter Werkstoffe eröffnet neue Möglichkeiten für hochleistungsfähige, ressourceneffiziente Flugzeugstrukturen. Neben klassischen Anwendungen gewinnen innovative Materialien für Beschichtung und Isolierung zunehmend an Bedeutung. So verbessern metallische Schutzschichten nicht nur den Erosionswiderstand von CFK-Strukturen, sondern tragen auch zur Beherrschung galvanischer Korrosion bei.

Der Schlüssel zur weiteren Etablierung hybrider Bauweisen ist die Bereitstellung geeigneter, umweltgerechter Verfahren zur Oberflächenvergütung im Hinblick auf Korrosionsschutz.

Fortschrittliche Wärmedämmsysteme auf Basis keramischer Barrierschichten ermöglichen eine deutlich verbesserte thermische Isolation bei gleichzeitig reduziertem Gewicht – sowohl im Zellenbereich als auch in Triebwerkskomponenten. Flammhemmende, multifunktionale Beschichtungen, teils mit selbstheilenden Eigenschaften, erhöhen die Sicherheit und Lebensdauer moderner Hybridstrukturen und sind zunehmend digital modellierbar für optimierte Fertigungsprozesse.



Werkstoffe der nächsten Generation – Von der Idee zum wettbewerbsfähigen Produkt

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 hoch-innovativer Materialien wie Aerogele, Smart Materials 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.

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.

Hocheffiziente Fertigungstechnologien für zukünftige Luftfahrtanwendungen

Für die Umsetzung innovativer und hochratenfähiger 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 Prüfmethoden 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. Rumpfbepunktungen 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 AdvancedAir Mobility aber auch Drohnen im Bereich Defence) realisieren zu können, wird die Effizienz und Flexibilität der Fertigungstechnologien maßgeblich sein.

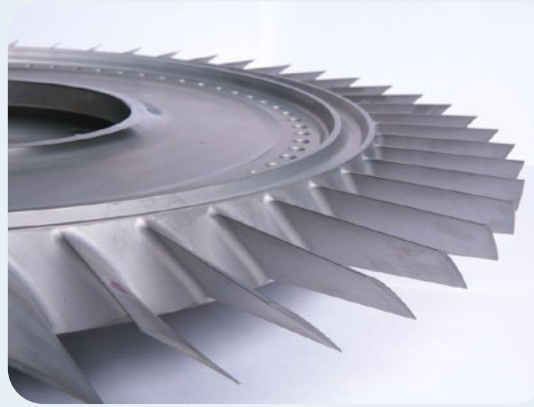
Während ein höherer Automatisierungsgrad die Verarbeitung duroplastischer Prepregmaterialien effizienter gestaltet, bleibt deren Konsolidierung meist an den energieintensiven Autoklavprozess gebunden. Neue Out-of-Autoclave-Technologien wie digital gesteuerte Vakuuminfusion mit integrierter Sensorik ermöglichen jedoch eine präzise, reproduzierbare Aushärtung unter Standard-Vakuumbedingungen im Ofen. Diese Verfahren eröffnen neue Perspektiven für die kosteneffiziente Herstellung großflächiger, dickwandiger Integralstrukturen – etwa für Flügelkästen und Hochauftriebskomponenten – bei gleichzeitig hoher Fertigungsrate und reduzierter Umweltbelastung.

Nicht jede Struktur profitiert von einer voll-integralen Bauweise. Versteifungselemente wie Stringer lassen sich weiterhin effizient

und kostengünstig in hohen Stückzahlen durch automatisierte Prozesse herstellen und anschließend mit Strukturelementen zu versteiften Schalen verbinden. Dabei gewinnt das strukturelle Kleben von CFK zunehmend an Bedeutung insbes. für ZEROe – insbesondere durch neue automatisierte Vorbehandlungsverfahren, die Reinigung, Aktivierung und Klebstoffauftrag in einem digital gesteuerten Prozess vereinen. Fortschritte in der inline-Qualitätssicherung, etwa durch sensorbasierte Oberflächenanalyse und zerstörungsfreie Fehlerdetektion, ermöglichen eine zuverlässige Bewertung der Klebverbindung bereits während der Fertigung und tragen entscheidend zur Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit bei.



Thermoplastische Halbzeuge gewinnen als Werkstoff für CFK-Komponenten zunehmend an strategischer Bedeutung – insbesondere im Hinblick auf automatisierte, ressourceneffiziente Fertigung. Teilkristalline Thermoplaste ermöglichen durch ihre Schweißbarkeit neue Fügeverfahren wie Laser- und Ultraschall-



→ Integrierte Triebwerkscheibe (Blisk) für den Airbus A400M: Die Abbildung zeigt das Schmiederohteil (links, Otto Fuchs) und das endbearbeitete Bauteil (rechts, MTU Aero Engines). Durch die integrale Ausführung als „Bladed Disk“ wird eine hohe strukturelle Effizienz erreicht. Eine schaufelnahe Konturierung bereits im Schmiedeprozess ermöglicht dabei zusätzlich eine substantielle Reduktion des Zerspanaufwands und steigert die Materialausnutzung. (BliDes_HDV, LuFo IV)

schweißen, die eine weitgehend nietfreie Bauweise erlauben. Die Industrialisierung dieser Technologien erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen, OEMs und spezialisierten KMUs. Projekte wie der „Multi Functional Fuselage Demonstrator“ zeigen, dass thermoplastische CFK-Strukturen nicht nur ökologisch vorteilhaft, sondern auch wirtschaftlich skalierbar sind – mit bis zu 40 % kürzeren Produktionszeiten und deutlich reduzierter Materialverschwendung.

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 Halbzeuherstellung und der Bearbeitung von Titan und Hochtemperaturwerkstoffen. 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.

Auf dem Gebiet der Fertigungstechnik für metallische Werkstoffe lässt sich ein bedeutendes Innovationspotenzial ausschöpfen. Moderne Schweißverfahren wie z. B. Friction Stir Welding, Laser Welding oder Linear Fric-

tion Welding sowie fortschrittliche Umformverfahren wie das Relaxationsumformen (Creep Forming) für AlMgSc-Werkstoffe ermöglichen in Kombination mit modernen und bewährten 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 die nächste Generation single aisle) 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 strukturmechanischen 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.

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_2O_3 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 Faseranteil 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 Fluggerä-

ten) automatisierte Ablegetechniken für die Herstellung dünnwandiger hybrider Strukturen entwickelt.

In Deutschland, einem Hochlohnland mit hohen Energiekosten, verlagert sich der Fokus auf die systematische Steigerung der Produktionseffizienz. Ein wesentliches Element sind automatisierte Prozesse mit integrierten Überwachungs- und Inspektionssystemen und die darauf aufbauende „Fabrik der Zukunft“ 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.

Oberflächentechnik als entscheidende Querschnittstechnologie

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 Lackhaftung, Korrosions- und Erosionsschutz sowie Oberflächengüte sein.



Weitere wesentliche Betätigungsfelder der Oberflächentechnik sind die Identifikation und zukünftige Vermeidung von kritischen Elementen oder Verbindungen aufgrund von Umwelt- und Gesundheitsgefährdung (z. B. PFAS - Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen "Ewigkeitsplastik") aber auch die Erarbeitung von Alternativen bzgl. Seltener Erden oder Elementen mit politisch fragilen Lieferketten.

Die umfassende Bearbeitung aller kritischen Aspekte in der Oberflächentechnik erfordert ein frühzeitiges, entschlossenes Handeln auf lange Sicht.

Die deutsche Industrie ist in diesem Bereich als weltweit führend zu betrachten mit international anerkannten Kapazitäten in Forschungseinrichtungen, Materialentwicklung- und Herstellung, Automatisierungstechnik und Qualitätskontrolle. Dennoch sind weitere, erhebliche Anstrengungen notwendig, um die zusätzlichen technischen Herausforderungen aufgrund einer zunehmenden Verwendung von Faserverbundwerkstoffen und hybriden Bauweisen CFK/Metall zu begegnen.

Additive Fertigung – Sicherstellen und Ausbau einer nationalen Kernkompetenz

Die additiven Fertigungsverfahren haben sich in den letzten Jahren von einer vielversprechenden Innovation zu einer etablierten Fertigungstechnologie entwickelt. In der Luft- und Raumfahrt ist die Technologie heute fester Bestandteil der Serienproduktion von strukturellen Komponenten über Systembauteile und Kabinenelemente bis hin zu Triebwerks-

komponenten. Das breite Technologieportfolio umfasst Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus metallischen und polymeren Pulvern sowie Drähten bzw. Filamenten. Diese werden schichtweise durch Laser- oder Elektronenstrahlverfahren sowie Heißdüsen verschmolzen.

Die additive Fertigung ermöglicht nicht nur die Herstellung komplexer Geometrien, sondern auch völlig neue Bauweisen etwa durch den Einsatz bionischer Designs. Inspiriert von natürlichen Strukturen entstehen dabei hochbelastbare, gewichtsoptimierte und funktionsintegrierte Komponenten, die sich ausschließlich additiv fertigen lassen und zur Effizienzsteigerung in der Luftfahrt beitragen.

Die Qualitätssicherung zählt zu den zentralen Herausforderungen der additiven Fertigung und ist ein multidimensionales Feld. Echtzeit-Prozessüberwachung, innovative zerstörungsfreie Prüfverfahren sowie simulationsgestützte Analysen entlang der gesamten Prozesskette tragen entscheidend zur Verbesserung von Prozessstabilität und Bauteilqualität bei. Deutschland nimmt in diesem Technologiebereich eine führende Rolle ein und sollte den Ausbau additiver Fertigungskompetenzen gezielt vorantreiben, mit dem klaren Ziel, komplexe Anwendungen in der Serienproduktion zuverlässig und wirtschaftlich umzusetzen.



↑ Bionisch optimiertes Bracket, MTU Aero Engines

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 Lebensdauererlängerung numerisch abgeschätzt und experimentell validiert werden muss.

Ökoeffiziente Technologien für eine nachhaltige Welt von Morgen

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.

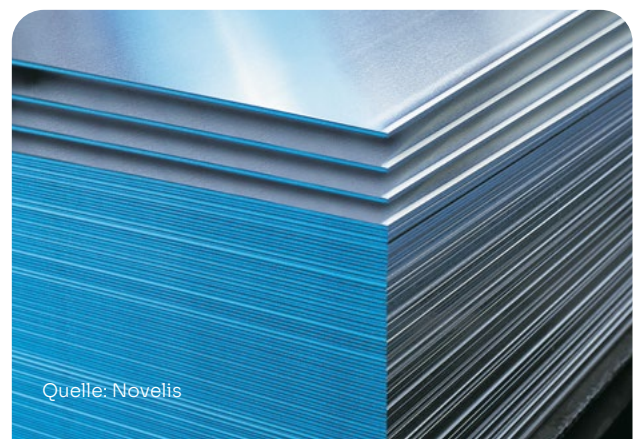
Im Rahmen der mit den REACH-Anforderungen verbundenen Weiterentwicklungen aktueller Lacksysteme und Oberflächentechnologien, liegt ein besonderes Augenmerk auf der Entwicklung von Oberflächensystemen mit selbstreinigenden Eigenschaften, verbessertem Korrosionsschutz, einem aktiven Beitrag zur Minimierung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

Weitere Anstrengungen konzentrieren sich auf den Aufbau geschlossener Materialkreisläufe. Während für Aluminium- und Nickellegierungen bereits etablierte Recyclingprozesse bestehen, gewinnt die strategisch bedeutende Werkstoffgruppe der Titanlegierungen zunehmend an Relevanz. In Deutschland laufen derzeit konkrete Bestrebungen zum Aufbau einer nationalen Ti-Recyclinganlage.

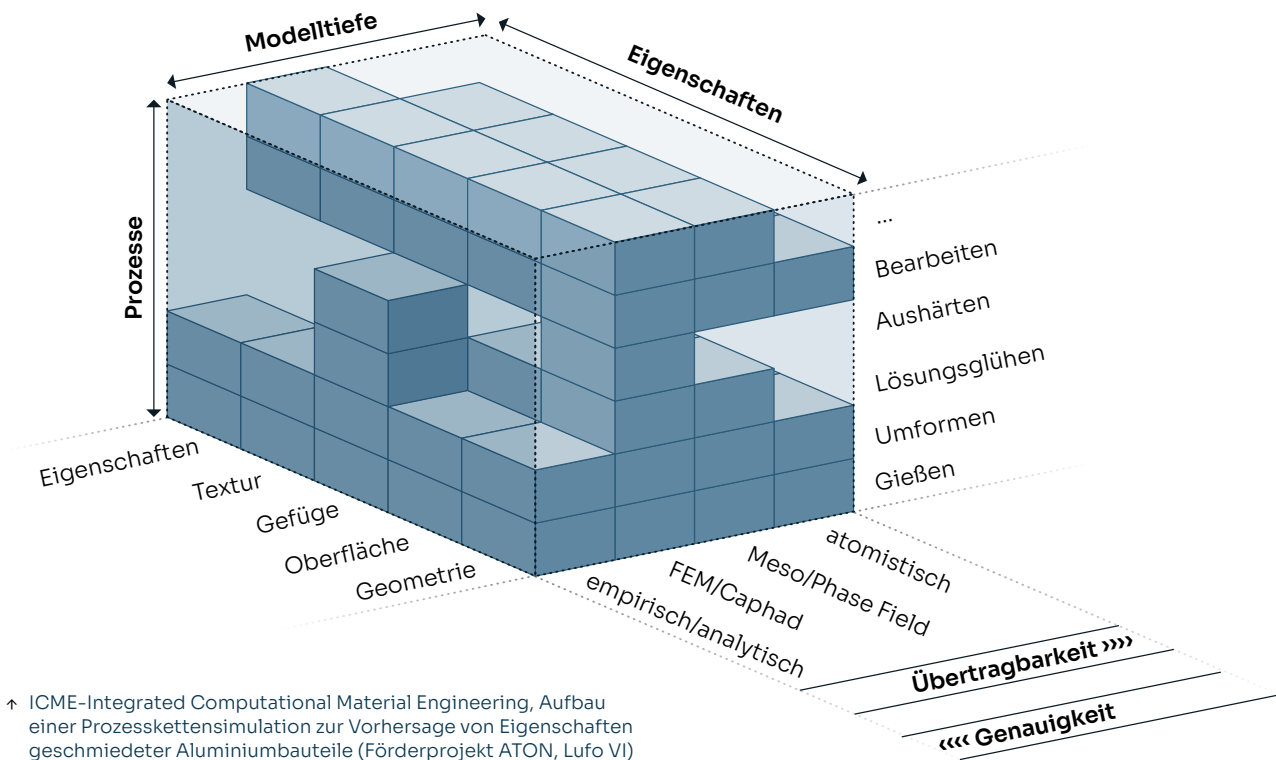
Hintergrund sind die Unsicherheiten auf den internationalen Märkten mit möglichen zukünftigen Handelsbeschränkungen und Zöllen sowie die Abhängigkeit von wenigen, geopolitisch kritischen Lieferquellen. Ziel ist es, die Resilienz der heimischen Luftfahrt- und Verteidigungsindustrie zu stärken und eine verlässliche Titanversorgung in Deutschland sicherzustellen. 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.

Moderne CFK-Recyclingverfahren folgen zwei Hauptansätzen: Einerseits werden Produktionsreste mit geringem Aufwand mechanisch aufbereitet und in weniger anspruchsvollen Anwendungen wie Spritzgussteilen wiederverwendet. Andererseits ermöglichen fortschrittliche Verfahren wie Pyrolyse oder Laserprozesse die nahezu verlustfreie Rückgewinnung hochwertiger Carbonfasern. Diese können zu neuen Halbzeugen verarbeitet und erneut mit Polymermaterialien imprägniert werden. Recycelte Fasern erreichen heute bis zu 88% der Festigkeit von Neufasern und leisten einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung.

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



Simulation zur Leistungssteigerung und Verkürzung der Entwicklungszyklen



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 computer-gestützte Simulation inzwischen zu einem wesentlichen Erfolgsfaktor entwickelt. Die strategische Bedeutung einer prozessketten-übergreifenden 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, bzw. werden sie nur für bekannte Werkstoffe

angewendet. Eine übergreifende Prozesskettenbetrachtung ist noch nicht erreicht und kann oft nicht für die Entwicklung neuer, verbesserter Werkstoffe verwendet werden. Eine schnelle Entwicklung von Prototypen basierend auf übergreifender Prozesskettenbetrachtung würde die Produktentwicklung stark beschleunigen. Erst mit zunehmender Vorhersagegenauigkeit von Simulations-Werkzeugen, unter Einbeziehung von KI-Tools oder Surrogate-Modellen, die eine schnellere Berechnung ermöglichen, wird der Nutzen des ICME für die Werkstoff- und Prozessentwicklung das notwendige Niveau erreichen. Besonders die neuesten Entwicklungen im Quantencomputing können die Leistung der ICME-Modelle auf ein neues Niveau heben, so dass ab initio Rechnungen im atomistischen Bereich möglich werden und somit eine Vorhersage von Werkstoffeigenschaften von bisher unbekanntem Legierungssystemen möglich werden.

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.

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 ermöglicht.

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.

Digitalisierung der Industrie und Werkstoffe

Die Digitalisierung der Luftfahrtindustrie insbes. im Bereich der Werkstoffe 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 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.

Digital Material Passports und Digital Product Passports – Transparenz über den gesamten Lebenszyklus

Die lückenlose digitale Dokumentation von Werkstoffen und Produkten entwickelt sich zu einem zentralen Instrument für die Luft- und Raumfahrtindustrie. Digital Material Passports (DMP) und Digital Product Passports (DPP) schaffen die notwendige Transparenz über den gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung bis zum Recycling.

Regulatorische Treiber und Compliance:

Die Europäische Union treibt mit verschiedenen Regulierungen die Einführung digitaler Produktpässe voran. Die EU-Batterieverordnung (2023) fordert bereits verbindlich digitale Pässe für Batterien. Die Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (ESPR) wird digitale Produktpässe

schrittweise für weitere Produktgruppen vorschreiben. Für die Luftfahrtindustrie ergeben sich daraus konkrete Anforderungen:

- **Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM):** Ab 2026 müssen CO₂-Emissionen von importierten Materialien wie Aluminium, Stahl und anderen Metallen nachgewiesen werden. Digitale Materialpässe ermöglichen die lückenlose Dokumentation des Product Carbon Footprint über die gesamte Lieferkette.
- **Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD):** Unternehmen müssen zunehmend detaillierte Nachhaltigkeitsinformationen ihrer Lieferkette offenlegen. DMPs liefern die erforderlichen Daten auf Bauteil- und Materialebene.

- **Critical Raw Materials Act (CRMA):** Die Dokumentation kritischer Rohstoffe (wie Scandium in AlMgSc-Legierungen, Rhenium in Ni-Superlegierungen, Kohlenstofffasern) wird zur Pflicht für Resilienz und Versorgungssicherheit.

Technische und wirtschaftliche Vorteile:

Digital Material Passports bieten weit mehr als nur regulatorische Compliance. Sie schaffen echten Mehrwert entlang der gesamten Wertschöpfungskette:

- **Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit:** Vollständige Dokumentation von Werkstoffeigenschaften, Chargenummern, Wärmebehandlungsprotokollen und mechanischen Prüfergebnissen. Bei Qualitätsabweichungen oder Vorfällen kann die betroffene Charge innerhalb von Minuten statt Wochen identifiziert werden.
- **Optimierte Instandhaltung und Lebensdauerverlängerung:** Durch die Kenntnis der tatsächlichen Materialhistorie und Belastungsprofile können Wartungsintervalle optimiert und die Lebensdauer von Bauteilen verlängert werden. Dies reduziert Kosten und erhöht die Verfügbarkeit.
- **Kreislaufwirtschaft und Recycling:** Für das effiziente Recycling hochwertiger Luftfahrtlegierungen ist die genaue Kenntnis der Legierungszusammensetzung und Vorbehandlung essentiell. DMPs ermöglichen sortenreines Recycling mit minimaler Qualitätsminderung und maximaler Werterhaltung.
- **Supply Chain Resilienz:** In Zeiten geopolitischer Unsicherheiten ermöglichen DMPs eine bessere Transparenz über die Herkunft kritischer Materialien und reduzieren Abhängigkeiten durch frühzeitige Identifikation von Risiken.

- **Dual-Use und Verteidigungsanwendungen:** Für militärische Anwendungen ist die lückenlose Dokumentation der Materialherkunft und -verarbeitung aus Sicherheitsgründen zwingend erforderlich. DMPs erfüllen diese Anforderungen digital und revisionssicher.

Herausforderungen und Lösungsansätze:

Die Einführung digitaler Materialpässe in der komplexen Luftfahrt-Lieferkette steht vor mehreren Herausforderungen:

- **Datenhoheit und Datensicherheit:** Sensible Werkstoff- und Prozessdaten müssen geschützt bleiben, während gleichzeitig definierte Informationen entlang der Lieferkette geteilt werden. Moderne Datentreuhänder-Konzepte und dezentrale Datenarchitekturen bieten hier Lösungen.
- **Standardisierung und Interoperabilität:** Unterschiedliche Systeme müssen miteinander kommunizieren können. Hier sind einheitliche Datenmodelle und Schnittstellen erforderlich.
- **Legacy-Systeme:** Viele Luftfahrzeuge haben Betriebszeiten von 20–30 Jahren. Die Integration von DMPs muss auch für bestehende Flotten praktikabel sein.
- **Internationale Zusammenarbeit:** Die globale Luftfahrt-Lieferkette erfordert internationale Abstimmung bei Datenformaten, Zugriffsrechten und Sicherheitsstandards.

Ansprechpartner:

Dr. Stefan Berndes

Leiter Ausrüstung & Werkstoffe

+49 30 2061 40-20 | berndes@bdli.de



Über die Luft- und Raumfahrtindustrie

Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie, vertreten durch den BDLI e.V., ist integraler Bestandteil der europäischen Luft- und Raumfahrtindustrie. Die Branche spielt als strategische Schlüsselindustrie eine entscheidende Rolle für die technologische und wirtschaftliche Souveränität der Europäischen Union. Sie befördert wirtschaftliches Wachstum, technologische Innovation und internationale Konnektivität. Allein in Deutschland trägt die Branche mit über 130.000 Beschäftigten und einem Jahresumsatz von über 62 Mrd. Euro erheblich zum BIP bei.

Über Dekaden hinweg hat sich Europa in gemeinsamer Anstrengung von Industrie, Mitgliedsstaaten und Europäischer Union eine Führungsposition in der Luft- und Raumfahrtindustrie erarbeitet. Diese gilt es gegenüber den internationalen Wettbewerbern zu erhalten und weiter auszubauen. Angesichts tiefgreifender technologischer, politischer und industrieller Veränderungen sind hierfür nachhaltige Investitionen in Forschung und Innovation notwendig.

Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V.

ATRIUM | Friedrichstr. 60 | 10117 Berlin
Tel. +49 30 2061 40-0 | kontakt@bdli.de