

Triebwerkswerkstoffe – „ Quo Vadis“

Dr. Wilfried Smarsly
MTU Aero Engines GmbH

1 Einleitung

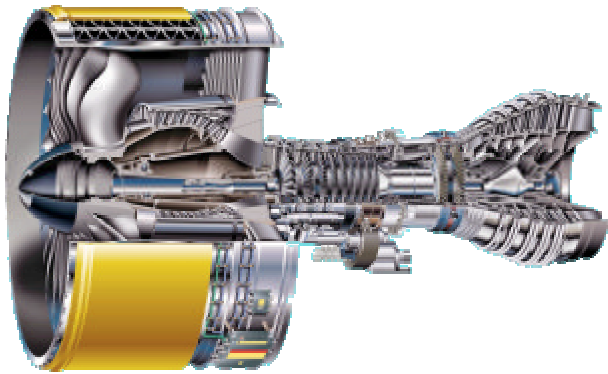
Moderne Flugtriebwerke müssen höchsten Ansprüchen im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Gewicht, Leistung, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer gerecht werden. Im Lauf der letzten vier Jahrzehnte wurden insbesondere auf dem zivilen Sektor Triebwerke entwickelt, die Marktanforderungen erfüllen und ein hohes Maß an technischer Perfektion erreicht haben. Gleichzeitig konnten Lärmpegel und Schadstoffemissionen reduziert werden. Seit der ersten Generation von zivilen Strahltriebwerken konnte die Zuverlässigkeit um ein Faktor 10 verbessert werden. Erhebliche Fortschritte wurden auch bei der Verlängerung der Inspektionsintervalle erzielt. Das Überholungsintervall heutiger Turbofans liegt zwischen 10,000 und über 20,000 Flugstunden, je nach den Einsatzbedingungen, z.B. für Kurz- oder Langstreckenflug. Wichtige Meilensteine auf diesem Weg waren: die Entwicklung von Zweiwellen- und Dreiwellentriebwerken mit einem Nebenstromverhältnis von mehr als 5, die Steigerung des Gesamtdruckverhältnisses auf über 40 und die Erhöhung der Verbrennungstemperaturen auf mehr als 1850 K. Weitere entscheidende Verbesserungen sowohl des thermischen Wirkungsgrads als auch des Vortriebswirkungsgrads werden möglich durch (Bild 1):

- ◆ die Erhöhung des Nebenstromverhältnissen von derzeit 8 auf Werte zwischen 12 und 15. Dies erfordert den Einsatz eines langsam laufenden Fan, der, über ein Untersetzungsgetriebe von einer schnelllaufenden, transsonischen Niederdruckturbine angetrieben wird.
- ◆ den Einsatz von rekuperativen Wärmetauschern zur Ausnutzung der Wärmeenergie des Abgases.

Die erste Maßnahme könnte gegen Ende dieses Jahrzehnts bis zur Serienreife gediehen sein, die Entwicklung der rekuperativen Wärmetauscher wird länger dauern. Das heißt, dass auch im nächsten Jahrzehnt überwiegend Triebwerke heutiger Auslegung im Einsatz sein werden. Was heute im Triebwerkbau Stand der Technik ist, ist neben den Verbesserungen der Auslegung sowie der Aero- und Thermodynamik in nicht unerheblichem Maß den Fortschritten auf den Gebieten der **Werkstoff-, Fertigungs- und Oberflächentechnik** zu verdanken. Wegen des ausgereiften Designs der Triebwerke findet der Wettbewerb hauptsächlich über die Preise statt, was Senkung der Betriebskosten bei gleichzeitiger Verbesserung der Triebwerkleistung bedeutet. Bei der Entwicklung neuer Triebwerke liegt der Schwerpunkt auf der Senkung der Herstellkosten, z. B. durch Reduzierung der Anzahl von Bauteilen. Dies stellt sowohl die **Werkstofftechnik** als auch die **Fertigungstechnik** vor neue Herausforderungen.

2 Herkömmliche Werkstoffe im Triebwerkbau

Die im Triebwerkbau verwendeten Werkstoffe zeichnen sich durch eine hohe spezifische Festigkeit und hervorragende Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften aus. Für alle Werkstoffe ist die Zulassung der Luftfahrtbehörden erforderlich. Sowohl die Hersteller des Rohmaterials als auch die Hersteller von Schmiede- und Gussteilen müssen von den Luftfahrtbehörden zugelassen sein und unterliegen einer strengen Überwachung. Die wichtigsten, heutzutage verwendeten Werkstoffe sind **Titanlegierungen und Nickellegierungen** (Bild 2).



- Fantriebwerk mit Nebenstromverhältnis 9 zukünftig > 10
- Verdichter in Bliskbauweise
- Innengekühlte Einkristall Turbinenschaufeln $T > 1850\text{K}$
- Aerodynamisch und – mechanisch hoch belastete Komponenten

Herausforderungen bis 2010:

- **20%** : Kraftstoffverbrauch und Gewicht
- **40%** : Wartungskosten
- **80%** : NO_x - Ausstoß
- **10dB** : Lärmpegel

Bild 1: Forderungen zukünftiger ziviler Triebwerksentwicklungen.

• Titanlegierungen

Auch heute noch ist Ti6Al4V die am meisten verwendete Ti-Legierung im Triebwerk- und im Zellenbau. Ti6Al4V zeichnet sich durch eine optimale Kombination von Werkstoffeigenschaften aus: unkritisch in der Bearbeitung, hohe Festigkeit bei niedrigen Temperaturen, hervorragende Zerspanbarkeit und gute Schweißbarkeit. Ti6Al4V wird in Form von Schmiedeteilen, Blechen und – seit etwa 1975 – auch Feingussteilen für statische Bauteile, wie z. B. Verdichtergehäuse, angeboten. Ti 6242 und Ti 6246 weisen eine höhere Festigkeit und Temperaturbeständigkeit auf. Die derzeit fortschrittlichste Ti-Legierung für Scheiben (für den Einsatz bis 550 °C) ist IMI 834. Diese Legierung ist aber doppelt so teuer wie Ti6Al4V, da das optimale Mikrogefüge und die hervorragenden Festigkeitseigenschaften nur durch eine aufwändige thermomechanische Behandlung erzielt werden können. Kosteneinsparungen sind derzeit möglich durch Reduzierung des Rohteilgewichts. Dies kann durch Prozesssimulation erreicht werden (Systeme sind z. B. ALPID oder DEFORM). Die Simulation ist ein bewährtes Instrument für die Analyse und Optimierung von Werkstofffluss, der Spannungen, Dehnungen, Temperaturen usw. Die heute verfügbaren Tools wurden soweit verbessert, dass auch metallurgische und physikalische Phänomene, wie z. B. die Rekristallisation und die Korngrößenverteilung simuliert werden können.

Titanlegierungen - Blisks (= integral beschauelte Scheiben) finden ihren Einsatz in zunehmendem Maße auch in großen militärischen und zivilen Triebwerken. Das Triebwerk EJ200 (Eurofighter) hat sechs Blisk-Stufen, einschl. einer Fan-Stufe. Auch die Serienversion des BRR700 weist mehrere Blisk-Stufen auf. Blisks können nach drei verschiedenen Verfahren hergestellt werden: Fräsen aus dem Vollen, elektrochemisches Senken, Anfügen (durch in-neares Reibschweißen) von fertigen Schaufelblättern an die Nabe. Das lineare Reibschweißen war ursprünglich als Verfahren zum Auswechseln schwer beschädigter Schaufelblätter, entwickelt worden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass das Verfahren nicht nur für die Instandsetzung geeignet ist, sondern auch wirtschaftlich in der Neuteilfertigung eingesetzt werden kann. Bei großen Schaufelblättern ist das Verfahren für die Neuteilfertigung kostengünstiger als das Fräsen aus dem Vollen.

- **Nickellegierungen**

Für Turbinenteile werden im wesentlichen zwei Gruppen von Superlegierungen verwendet: Knetlegierungen für Scheiben und Ringe und Gusslegierungen für Lauf- und Leitschaufeln. Superlegierungen für Scheiben sind im Hinblick auf ihre hohen statischen und dynamischen Festigkeitswerte optimal für den Temperaturbereich bis 730 °C. Dabei wird besonderer Wert auf optimale Kurzzeit-Ermüdungsfestigkeiten gelegt, die ein entscheidendes Kriterium für die Auslegung von Scheiben sind. Am meisten verwendet wird IN 718, eine Legierung, aus der zahlreiche Teile der hinteren Hochdruckverdichterstufen und der Turbine hergestellt werden. Hochwarmfestere Scheibenlegierungen, wie z. B. gatorized Waspaloy oder Udimet 720 LI erfordern reineres und homogeneres Vormaterial mit weniger Seigerungen, was durch Optimierung der Schmelz- und Schmiedeverfahren möglich wurde.. Aus heutiger Sicht ist Udimet 720 LI die fortschrittlichste Legierung für Scheiben, die auf konventionellem Weg hergestellt werden kann. Ihre maximale Einsatztemperatur liegt bei 730 °C und ist damit um 80 °C höher als die von IN 718. Eine Steigerung der Temperaturen und/oder Lebensdauern erfordert pulvermetallurgische Scheibenlegierungen, die in USA von Pratt-Whitney und GE und in Europa von Rolls-Royce entwickelt wurden, und z.Z. in der Erprobungs- und Serienreifmächungsphase stehen.

Heutzutage werden alle Lauf- und Leitschaufeln für die Turbine gegossen und nicht geschmiedet. Bauteile mit komplizierter Geometrie, wie z. B. Leitkränze für Turbinen, werden integral gegossen und weisen ein polykristallines Gefüge auf. Optimale Werkstoffeigenschaften werden dagegen mit der Einkristalltechnologie erzielt. Bei Einkristall-Schaufelblättern für die Hochdruckturbinen liegt der Schwerpunkt derzeit auf der Verbesserung der Maßhaltigkeit und des Kühlwirkungsgrads durch eine komplexere Kühlkonfiguration im Inneren. Leitkränze werden bald schon mit gerichtet erstarrten oder Einkristall-Schaufelblättern hergestellt werden. Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurden Legierungen für spezielle Einsatztemperaturen entwickelt . IN 713 wird seit langem verwendet, hauptsächlich für die Lauf- und Leitschaufeln der hinteren Niederdruckturbinenstufen. IN 100 kann bei höheren Temperaturen eingesetzt werden (+ 30 °C im Vergleich zu IN 713) und zeichnet sich durch eine geringe Dichte aus ($\rho = 7,75 \text{ g/cm}^3$) aus. Diese Legierung war als eine der ersten nicht nur mit polykristallinen Gefüge, sondern auch in der gerichtet erstarrten (DS) und einkristallinen (SX) Version verfügbar. Zweck des gerichteten Erstarrens ist die Vermeidung von Korngrenzen, die senkrecht zur Wirkrichtung der Zentrifugalkraft verlaufen, da diese das Kriechverhalten nachteilig beeinflussen. Einkristallgefüge weisen überhaupt keine Korngrenzen auf, deshalb sind ihre Kriecheigenschaften optimal. Beide Gefüge (DS und SX) werden durch spezielle Erstarrungstechniken erzeugt. Die am höchsten entwickelten Einkristalllegierungen, die heute verwendet werden, sind PWA 1484 und CMSX 10. Ihre Einsatztemperatur ist um etwa 100 °C höher als die von IN 100. Nachteile sind jedoch die hohe Dichte ($\rho \approx 9,0 \text{ g/cm}^3$) und die hohen Kosten.

3 Neue Werkstoffe und Bauweisen

Die klassischen Werkstoffe für Triebwerkbauteile, Ti-Legierungen und Ni-Legierungen, haben im Laufe der letzten Jahrzehnte ein hohes Maß an technischer Perfektion erreicht. Ihr Verbesserungspotential ist jedoch begrenzt. Neue Werkstoffe und Bauweisen sind deshalb in der Entwicklung, die eine Leistungsverbesserung bei vertretbaren Kosten ermöglichen. In Bild 2 ist die spezifische Festigkeit (Zugfestigkeit/Dichte) von herkömmlichen und neuen Werkstoffen über der Temperatur aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass die neuen Werkstoffe im Hinblick auf Temperaturbeständigkeit und Festigkeit attraktiv sind. Zwei vielversprechende Gruppen neuer Werkstoffe für künftige Triebwerkgenerationen sind **faserverstärkte Verbundwerkstoffe** und **intermetallische Werkstoffe**. Moderne Verbundwerkstoffe haben entweder eine Polymer-, eine Metall- oder eine Keramikmatrix. Bei den intermetallischen Werkstoffen sind es vor allem Werkstoffe auf der Basis der **Titanaluminide** attraktiv.

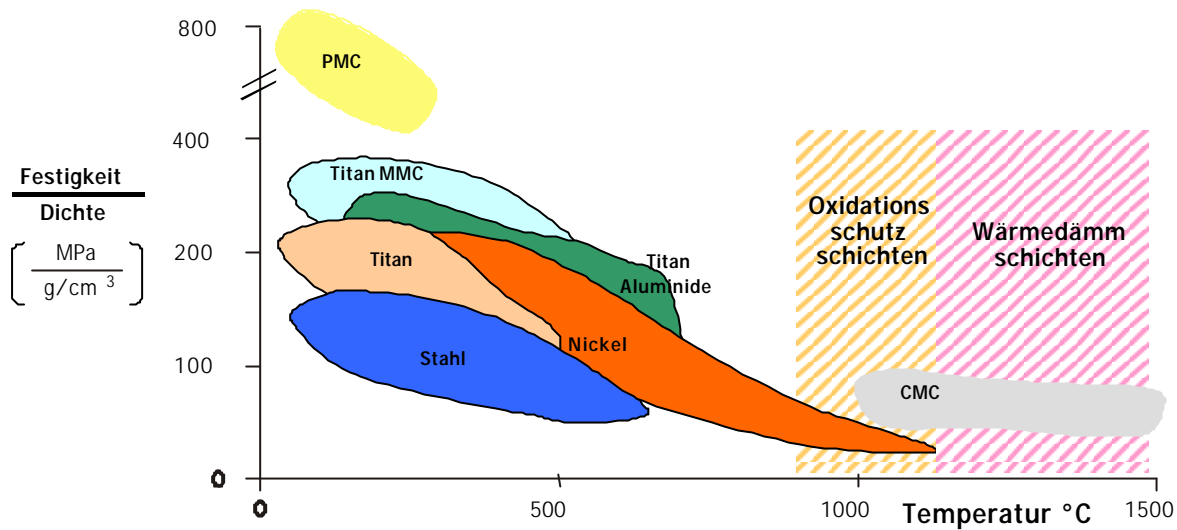


Bild 2: Spezifische Festigkeit und Temperaturpotential heutiger und zukünftiger Werkstoffe.

- **Polymermatrix-Verbundwerkstoffe**

Polymermatrix-Verbundwerkstoffe (PMC) kommen wegen ihres geringen Gewichts, ihrer hohen Festigkeit und der niedrigen Kosten als Werkstoffe für Bauteile mit komplexer Geometrie in Frage. Ihre Einsatztemperatur darf jedoch 150 $^{\circ}\text{C}$ bzw. bei moderneren Typen 200 $^{\circ}\text{C}$ nicht überschreiten, und die Bauweise ist „Vogelschlag anfällig“. Heute werden auch die Fan-Austrittsleitschaufeln der Triebwerke CF6-80 und CFM56 aus PMC-Material gefertigt. Einen Meilenstein in der PMC-Technologie stellt die Serienfertigung der Fanschaufeln für das Triebwerk GE90 dar, dessen Schaufelblätter eine Länge von etwa 1000 mm aufweisen. Wegen ihrer Erosionsanfälligkeit werden die Eintrittskanten der Schaufeln mit Blechstreifen geschützt. Da inzwischen Fasern in besserer Qualität zur Verfügung stehen, können heute auch dreidimensionale, mehrlagige Gewebe-Vorformen durch eine spezielle Nähetechnik, wie z.B. Stich-Bonding hergestellt werden. Ein neues Verfahren für die Fertigung qualitativ hochwertiger PMC-Teile ist das RTM-Verfahren (RTM = resin transfer moulding), das folgende Arbeitsschritte umfasst: Zuschneiden des Fasermaterials, Herstellung der Vorformlinge durch Stich Bonding, Schließen der Form, Einbringen der Harz-/Härter-Mischung und Aushärten. Es ist davon auszugehen, dass künftig wegen der niedrigeren Kosten und des geringeren Gewichts mehr Bauteile aus PMC-Werkstoffen eingesetzt werden. Ein Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung dieser Werkstoffe liegt auf der Steigerung der Temperaturfestigkeit.

- **Metallmatrix-Verbundwerkstoffe**

Mit hochfesten Verbundwerkstoffen auf Titanlegierungsbasis kann das Gewicht von Bauteilen um bis zu 20 % gegenüber herkömmlichen Titanlegierungen reduziert werden. Als Verstärkung werden Fasern mit hoher Festigkeit und hohem Elastizitätsmodul verwendet. Dieses Verfahren ist geeignet für die Herstellung sog. Blings (Bling = blades ring, integral beschauelter Ring), die gegenüber konventionellen Scheiben und sogar den heute verwendeten Blisks deutliche Vorteile im Hinblick auf konstruktive Flexibilität, Gewicht und Rotordynamik bieten. In den USA wurden Blings ($\varnothing \approx 400$ mm) und andere MMC-Teile, wie z. B. Wellen, Fanlaufschaufeln und -leitschaufeln bereits erfolgreich im Triebwerk erprobt. Ein Stellhebel für die Austrittsklappen des Triebwerks F414 wird in Serie gefertigt. Die Fertigungstechnik ist sehr anspruchsvoll. Da die Möglichkeiten der Feststellung von inneren Fehlern in Verbundstoffen durch zerstörungsfreie Prüfverfahren begrenzt sind,

muss die Qualität der Bauteile über stabile Fertigungsprozesse mit strenger Prozesskontrolle sichergestellt werden. Da die Fertigung solcher Teile aufwändig ist, können sie nicht billig sein. Eine Kostenschätzung zeigt, dass der Serienpreis eines in Serie gefertigten Ti-MMC-Bling etwa höher ist wie der einer konventionell durch Zerspanen eines Schmiederohlings hergestellten "Blink". Aus diesem Grund wird diese Technik in absehbarer Zukunft hauptsächlich im militärischen Bereich Anwendung finden.

- **Intermetallische Werkstoffe**

Seit einigen Jahren wächst das Interesse an intermetallischen Werkstoffen vom Typ TiAl, da sie eine geringe Dichte aufweisen und bezüglich Temperaturfestigkeit herkömmlichen Ti-Legierungen überlegen sind. Ihr Schwachpunkt ist jedoch die Sprödigkeit, insbesondere bei niedrigen Temperaturen. Durch geringfügige Änderungen der chemischen Zusammensetzung und durch Optimierung der Verfahrensparameter gelang es, die Duktilität von TiAl in etwa auf das Niveau der "normalen" im Triebwerksbau verwendeten Werkstoffe zu verbessern (Bruchdehnung bei Raumtemperatur 1,5 – 2 % und bei 750 °C etwa 3,5 %). TiAl-Bauteile können durch Feinguss und Präzisionsschmieden hergestellt werden. Als typische Serienanwendungen kommen Schaufeln für die hinteren Niederdruckturbinen Endstufen oder Hochdruckverdichtergehäuse in Frage, also Teile, die wegen der hohen Betriebstemperaturen nicht aus herkömmlichen Titanwerkstoffen gefertigt werden können. Die Gewichtseinsparung (im Vergleich zu gegossenen Nickellegierungen) ist mit ca. 40 – 50 % beträchtlich. In den USA wurden TiAl-Triebwerksschaufeln bereits erfolgreich erprobt. Trotz der positiven Testergebnisse müssen noch mehr Erfahrungen, insbesondere hinsichtlich der Prozessstabilität bei den Herstellverfahren und der zuverlässigen Auslegung für hohe Lebensdauern gesammelt werden, bevor eine endgültige Entscheidung über die Serienanwendung fällt. Die Entwicklung intermetallischer Nickelwerkstoffe wird nicht weiter verfolgt, da sie keinerlei Vorteile in Bezug auf Leistung oder Gewicht bieten.

- **Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe**

Aufgrund der hohen Temperaturfestigkeit und der geringen Dichte ($\rho \approx 1,5 - 3,0 \text{ g/cm}^3$) ist Keramik ein attraktiver Werkstoff für den Triebwerksbau. Die geringe Verformbarkeit von monolithischen Keramikwerkstoffen vom Typ SiC, Al₂O₃ und Si₃N₄ schränkt ihren Anwendungsbereich jedoch erheblich ein. Daher konzentriert man sich heute auf faserverstärkte Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe, bei denen SiC, Kohlenstoff und Al₂O₃ als Fasern und SiC, Al₂O₃ oder Gemische (Al₂O₃ + SiO₂) als Matrix verwendet werden. Setzt man heutige CMCs mehrere Hundert Stunden lang Temperaturen von über 1000 °C aus, können je nach Belastung und Faserwerkstoff, die nachstehenden Probleme auftreten: Oxidfasern, wie z. B. Al₂O₃, sind thermodynamisch stabil, jedoch sind ihre Kriecheigenschaften nicht optimal. Andererseits können bei Nichtoxidfasern, wie z. B. SiC, deren Kriechverhalten einwandfrei ist, chemische Reaktionen zwischen Faser und Matrix auftreten (trotz der Schutzschicht auf den Fasern), die dann die Eigenschaften beeinträchtigen. Daher sind heute verfügbare CMCs auf Dauer für Temperaturen über 1100 °C und zivile Triebwerksanwendungen nicht geeignet. In der nahen Zukunft wird es nur wenige Anwendungen für CMCs geben. So ist z. B. die Verwendung für statische Niederdruckturbinen-Bauteile (z. B. Austrittskegel, Austrittsklappen usw.) denkbar. Derzeit ist nur eine einzige Serienanwendung für CMC bekannt, nämlich die Austrittsklappen des Snecma-Triebwerks M88.

4 Beschichtungen

Die Leistung moderner Flugtriebwerke hängt in hohem Maße von der Qualität der Bauteiloberflächen ab. Die meisten Grundwerkstoffe sind für bestimmte Eigenschaften ausgelegt, z. B. Festigkeit oder Temperaturbeständigkeit. Sind für bestimmte Bauteile **spezielle Oberflächeneigenschaften** gefordert, müssen Verfahren wie **Beschichtungen oder Kugelstrahlen** angewandt werden.

Die Bedeutung der Oberflächenbehandlung wird noch zunehmen, und zwar aus folgenden Gründen: Zum einen ist das Verbesserungspotential der klassischen im Triebwerksbau verwendeten Werkstoffe begrenzt, und zum anderen werden Wirkungsgrad, Leistung und Lebensdauer der Triebwerke durch verbesserte Aerodynamik, höhere Verbrennungstemperaturen und höhere mechanische Beanspruchung der Bauteile gesteigert werden (Bild 2). Dies erfordert eine bessere Qualität der Bauteiloberflächen (vor allem für Schaufeln bei Verdichtern, verbesserte Dichtungs- und Anstreifsysteme, Wärmedämmschichten auf rotierenden Bauteilen und wirksamere Verschleißschutzschichten).

Die Zukunft wird also die Oberflächentechnik vor viele neue Herausforderungen stellen. Die allgemeinen Forderungen nach Kostenminimierung und Durchlaufzeitverkürzung und nach Verbesserung der Prozessstabilität und Qualitätssteigerung haben in der Beschichtungs-technik hohe Priorität, da viele Schichten teuer sind und die Stabilität einiger Verfahren nicht optimal ist. Kosteneinsparungen und/oder Qualitätsverbesserungen lassen sich bisweilen durch Einsatz alternativer Verfahren erzielen, wie z.B. Beispiel: Das Niederdruck-Plasmaspritzen von MCrAlY-Schichten kann teilweise durch die "billigen" Verfahren, wie Alitieren plus atmosphärisches Plasmaspritzen von MCrAlY ersetzt werden. Das atmosphärische Plasmaspritzen von MCrAlY-Schichten kann in Zukunft teilweise durch Schlickerverfahren ersetzt werden.

5 Ausblick

Obwohl in nächster Zukunft keine Änderungen im Grunddesign von Flugtriebwerken zu erwarten sind, wird es doch zu einer Leistungssteigerung kommen, und zwar durch Verbesserungen in der konstruktiven Auslegung und bei Werkstoffen, sowie Fortschritten in der Fertigungs- und Oberflächentechnik. Der Wettbewerb auf dem Triebwerksmarkt zwingt alle Hersteller, die Kosten zu senken, die Durchlaufzeiten verkürzen und gleichzeitig die Qualität zu verbessern. Obwohl das Verbesserungspotential der traditionell verwendeten, monolithischen Ti- und Ni-Legierungen begrenzt ist, werden diese Werkstoffe nach wie vor eine wichtige Rolle spielen. Werkstoffe mit besserem Verhältnis Festigkeit/Gewicht sind entweder intermetallische Werkstoffe auf TiAl Basis oder faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit Polymer-, Metall- oder Keramikmatrix. Von diesen konnten sich bisher nur die Polymermatrix-Verbundwerkstoffe etablieren. Trotz erfolgreicher Triebwerkversuche muss für die anderen "Kandidaten" erst noch nachgewiesen werden, dass Bauteile, aus diesen für den Triebwerksbau neuen Werkstoffen, mit stabilen, genau kontrollierten Prozessen und zu vertretbaren Kosten hergestellt werden können.