

# TRIEBWERKSVERDICHTER-SCHLÜSSELTECHNOLOGIE FÜR DEN ERFOLG BEI LUFTFAHRTANTRIEBEN

Dr.Klaus Steffens  
A.Schäffler

MTU Aero Engines GmbH  
Dachauer Str. 665, 80995 München

## 1. EINLEITUNG

Seit Beginn der Entwicklung der modernen Gasturbine mit Gleichdruckverbrennung war das Verdichtungssystem die Schlüsselkomponente, die den größten Entwicklungsaufwand auf besonders teuren Prüfständen erforderte. Der Verdichter war auch dafür verantwortlich, dass die Gasturbine erst spät – 1937 – als letzte Wärmekraftmaschine funktionsfähig wurde. Die Entwicklung effizienter Turboverdichter hoher Umfangsgeschwindigkeit und damit niedrigem Gewicht verlangte eine lange nicht verfügbare Kenntnis der Schaufelgitteraerodynamik und viel Mut in der schwingungstechnischen Beherrschung vielstufiger Maschinen mit dünnen, schwach gewölbten Schaufeln. Dass sich die Gasturbine zunächst als Flugantrieb durchsetzte und hier das Feld konkurrenzlos beherrscht, liegt an ihrer unerreichten Leistungsdichte, die etwa das 15-fache eines Pkw Motors beträgt.

## 2. DAS VERDICHTUNGSSYSTEM MODERNER TRIEBWERKE

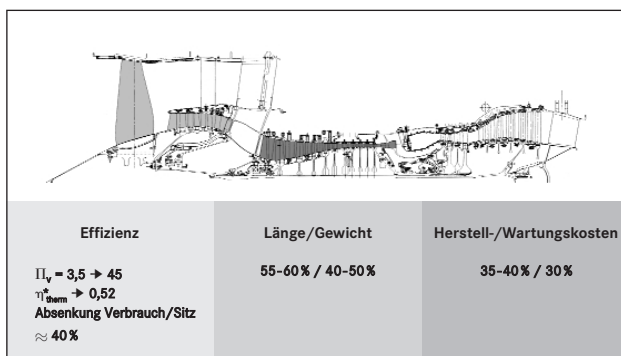


Bild 1: Das Verdichtungssystem – Schlüsseltechnologie der Fluggasturbine

Das zwei- oder dreiwellige Verdichtungssystem moderner Fluggasturbinen nimmt einen sehr hohen Anteil an allen wesentlichen technischen Parametern des Triebwerks ein. Wie in BILD 1 gezeigt, ermöglichen moderne transsonische Verdichter ein Gesamtdruckverhältnis bis zu 45 und damit – natürlich in Verbindung mit hohen Turbineneintrittstemperaturen – die Steigerung des thermischen Wirkungs-

grades in den Bereich von 50 %. Dies erlaubt eine Absenkung des Verbrauchs pro Sitzplatz um 40 % gegenüber den aus dem militärischen Bereich stammenden ersten Fluggasturbinen, die im ersten Jet Liner, der De Havilland Comet, eingesetzt waren.

Das Verdichtungssystem nimmt etwa 50-60 % der Baulänge, 40-50 % des Triebwerksgewichtes und 35-40 % der Herstellkosten ein. Nach wie vor entfallen ca. 30 % der Wartungskosten auf die Verdichter.

Das Verdichtungssystem beherrscht auch heute noch, trotz aller Fortschritte in der Aerodynamik und Schwingungsmechanik, die Entwicklung moderner Triebwerke, denn sowohl die Beschreibung der Strömungsphysik als auch die analytische Beherrschung der in Resonanzen auftretenden Schwingbelastungen der dünnen Schaufeln ist derzeit noch nicht ausreichend möglich, die Simulationsgüte wird aber stetig verbessert.

### 2.1 Anforderungen an das Verdichtungssystem

Der Anforderungskatalog an moderne Triebwerksverdichter ist lang und anspruchsvoll. Er spiegelt die drei in BILD 2 dargestellten wesentlichen Kriterien der Erfolgsgeschichte der zivilen Luftfahrt wieder:

- Sicherheit
- Leistungsdichte und Effizienz
- Tragbare Kosten

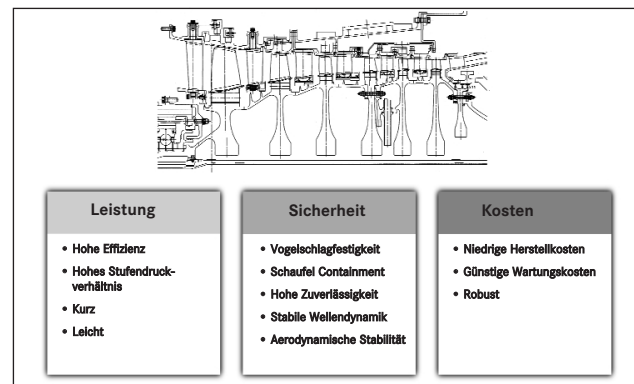


Bild 2: Anforderungen an das Verdichtungssystem

Die Entwicklung des schnelllaufenden Transsonik-Verdichters erlaubt eine bislang unerreichte Effizienz des Antriebs. Gleichzeitig sind aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkeiten die Anforderungen an die Sicherheit schwieriger zu erfüllen, sei es die Verträglichkeit gegen Vogelschlag, die Durchschlagfestigkeit des Gehäuses gegen eine, z. B. von einem besonders großen Vogel abgeschlagene Schaufel sowie eine robuste Wellendynamik mit ausreichender Eigendämpfung. Die Zuverlässigkeit ist das entscheidende Kriterium für den heutigen Flugverkehr und der erreichte Standard wird am eindrucksvollsten durch die große Zahl zweimotoriger Flugzeuge demonstriert, die täglich sicher über die Ozeane fliegen.

Triebwerke sind mit einem Kilogrammpreis von 3000 - 4000 DM/kg sehr teuer und im oberen Bereich serienmäßig hergestellter Industrieprodukte angesiedelt, z. B. vergleichbar mit digitalen Videokameras. Sie sind aber robust, langlebig und ihre Herstellkosten sinken trotz der großen Komplexität stetig.

## 2.2 Die Entwicklung der Triebwerksverdichter

In BILD 3 ist die Entwicklungsgeschichte des axialen Turboverdichters mit hohem Wirkungsgrad und hoher Leistungsdichte skizziert. Die Gasturbinenentwicklung hat ihren ernsthaften Beginn als Strahlantrieb für schnelle Flugzeuge und deshalb war trotz der anfänglichen Versuche mit den damals besser bekannten Radialverdichtern klar, dass nur der Axialverdichter eine weiterführende Zukunft mit sehr viel höheren Leistungen bieten kann. Bis in die Mitte der sechziger Jahre war der Unterschallverdichter mit maximalen Machzahlen um  $Ma = 0,80 - 0,85$  im Einsatz und erst die nächste Generation von zivilen und militärischen Triebwerken gegen 1968 - 1972 setzte konsequent den transsonischen Verdichter ein, dessen Entwicklung bereits 1953 begann und vorwiegend von der NACA, dem Vorläufer der NASA, in den USA getragen wurde.

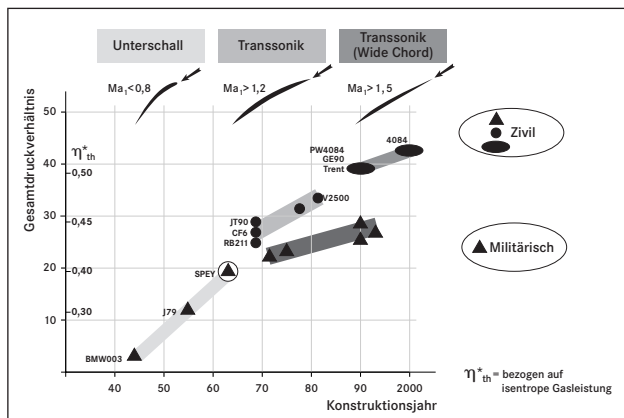


Bild 3: Entwicklung des Turboverdichters für Flugtriebwerke

Diese Verdichtergeneration verdoppelte die pro Stufe zugeführte spezifische Energie von 21 auf ca. 42 kJ/kg. Mit der neuen Generation der "Wide Chord" Verdichter, also

Maschinen mit kleinem Schaufelstreckungs-verhältnis, steigt dieser Energieumsatz pro Stufe auf 60 - 75 kJ/kg. Die Steigerung der spezifischen Energiezufuhr und damit des erreichbaren Stufendruckverhältnisses hängt von zwei Parametern ab:

- der Machzahl der Umfangsgeschwindigkeit
- der Strömungsumlenkung im Laufrad, d. h. der Druckziffer

BILD 4 zeigt den Zusammenhang und die Aufteilung in die beiden Parameter, wobei die Machzahl durch die proportionale Größe  $U/\sqrt{T}$  ersetzt ist.

Beide Größen sind im Laufe der Entwicklung stark gestiegen, zuerst die Umfangsgeschwindigkeit und neuerdings – ermöglicht durch die Entwicklung der Wide Chord Bauweise auch die Druckziffer.

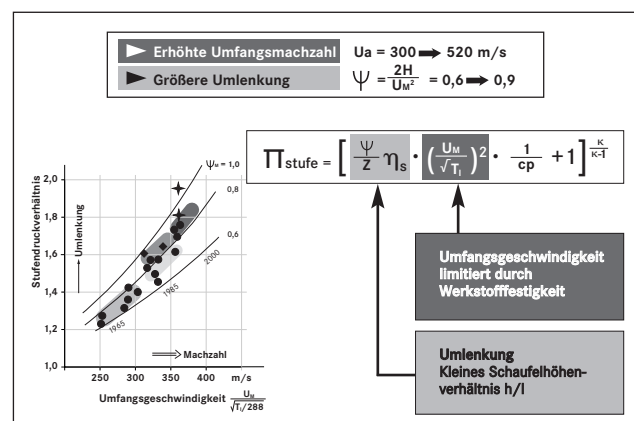
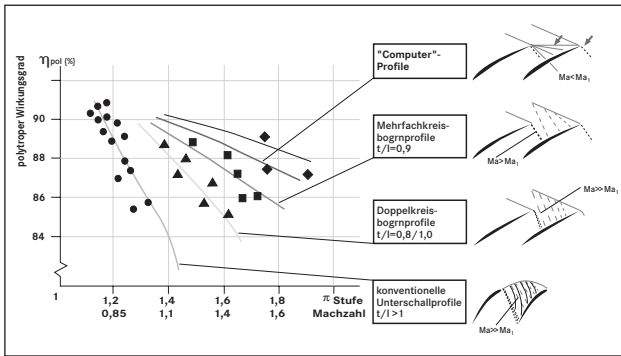


Bild 4: Einflussgrößen auf das Stufendruckverhältnis

Die Beherrschung hoher Machzahlen mit kleinen oder ertragbaren Strömungsverlusten verlief seit 1950 ziemlich stetig und resultierte in einem wesentlich vertieften Verständnis der transsonischen Gitterströmung. Wie aus BILD 5 erkennbar, verursachten die weit gestaffelten Unterschallgitter mit hohen Saugseitenkrümmungen unakzeptable Verluste bei höheren Anströmmachzahlen. Der Erkenntnisweg ging über eine wesentliche Abschwächung der Verdichtungsstoßverluste durch Verringerung der Saugseitenwölbung und eine starke Reduktion des Teilungsverhältnisses – beide Maßnahmen begrenzen die Überschall-expansion bis zum Stoß und damit die Stärke und Verluste des Verdichtungsstoßes.

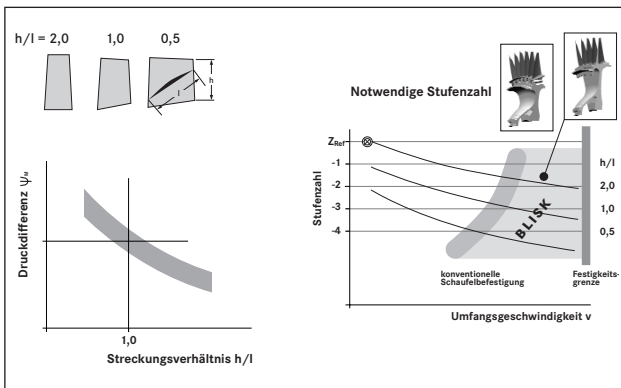
Eine empirische Weiterentwicklung dieser Erkenntnisse zum sogenannten Mehrfachkreisbogenprofil mit weiter reduzierter Wölbung im Überschallbereich der Schaufel führte nach der erfolgreichen Entwicklung analytischer Verfahren zum optimierten Computer-Profil mit ungewölbter Saugseite bzw. schwacher externer Verdichtung durch leicht konkave Krümmung im Überschallbereich. Profile dieser Art sind geeignet bis Machzahlen um 1,7 und Verdichterstufen mit Druckverhältnissen bis 1,9.

Der zweite Weg zum hohen Stufendruckverhältnis über erhöhte Strömungsumlenkung, i.e. Druckziffer, eröffnet sich durch eine Verringerung des Schaufelstreckungsverhältnisses. Obwohl die empirische Beobachtung lange zurück reicht (ca. 1960) wurde von der Möglichkeit, durch breite Schaufeln niedriger Streckung hohe Strömungsumlenkungen verwirklichen zu können, erst ab ca. 1985 konsequent Nutzen gezogen und dies zunächst bei militärischen Triebwerken. So ersetzen die 8 - 9 Verdichterstufen moderner Kampfflugzeugtriebwerke (EJ200, F119) 12 - 15 Stufen der früheren Generation.



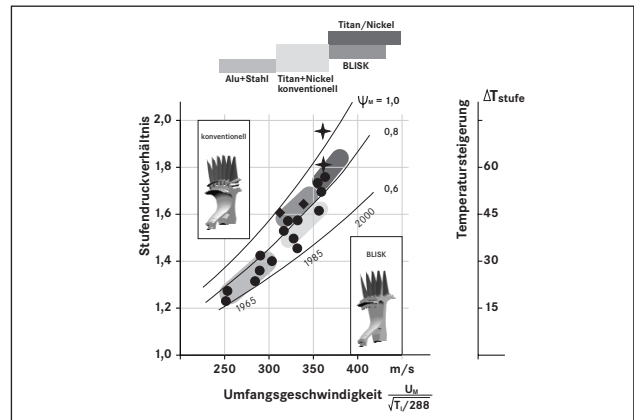
**Bild 5: Effiziente Beherrschung hoher Zuströmgeschwindigkeit**

Wie aus BILD 6 erkennbar, korrelieren die mit befriedigendem Stabilitätsabstand verwirklichtbaren mittleren Druckziffern klar mit dem Schaufelstreckungsverhältnis. Ebenso deutlich sind allerdings die Grenzen der Mechanik dieser breiten, aerodynamisch hoch überlegenen Schaufeln hinsichtlich ihres Gewichts und der daraus resultierenden Belastung auf die Befestigung der Schaufel in der Scheibe sowie der Festigkeit der Scheibe selbst.



**Bild 6: Einfluss des Schaufelstreckungsverhältnisses auf die Druckziffer**

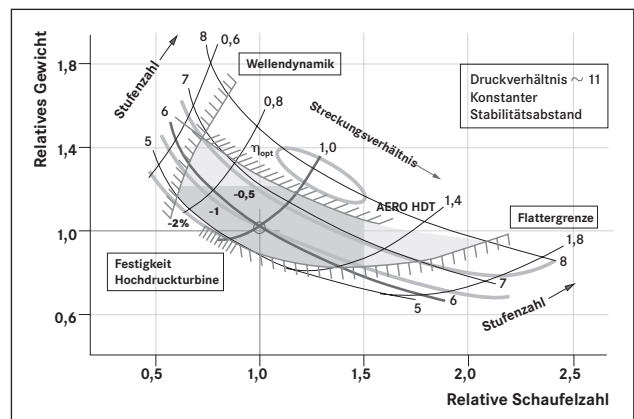
Die Kombination aus hoher Umfangsgeschwindigkeit und niedrigem Streckungsverhältnis erlaubt hohe Stufendruckverhältnisse und damit sehr viel weniger Bauteile. Allerdings erzwingt sie eine neue Bauweise, nämlich die integrale Scheibe-Schaukelbauform. BILD 7 zeigt den Stand der Entwicklung und die Festigkeitsgrenzen konventioneller und integraler Bauweisen mit den heute verfügbaren, sehr sicheren Werkstoffen, nämlich den Titan- und Nickelbasislegierungen.



**Bild 7: Erreichbare Stufendruckverhältnisse und notwendige Umfangsgeschwindigkeiten**

Wie sich die Gestaltung eines Hochdruckverdichters mit einem Druckverhältnis um 11, der von einer kostengünstigen, einstufigen Hochdruckturbine angetrieben werden kann, darstellt, zeigt BILD 8.

In der Studie wurden unter der Annahme konstanten mittleren Durchmessers und gleicher aerodynamischer Stabilität die Stufenzahl von 5 – 8 und das Schaufelstreckungsverhältnis zwischen  $h/l = 0,5 - 2$  variiert. Dabei ergeben sich wesentliche Unterschiede in der erforderlichen Drehzahl, dem Gewicht und der Schaufelzahl als einem einfachen Maß für den erforderlichen Bauaufwand. Mit den Gestaltungsgrenzen für akzeptables Gewicht, Flatterstabilität des ersten Rotors und der aerodynamischen und mechanischen Belastung der Hochdruckturbine lässt sich der technisch sinnvoll darstellbare Bereich eingrenzen. Die Attraktion der sehr schnelllaufenden fünfstufigen Lösung liegt in der ca. 30 % niedrigeren Laufschaufelzahl gegenüber dem effizienteren und leichteren sechs – oder siebenstufigen Verdichter.



**Bild 8: Optimierung von Gewicht und Bauaufwand für ein Hochdrucksystem**

### 2.3 Vorteile und Nachteile kleiner Streckungsverhältnisse

Die Beschauelung mit kleinem Streckungsverhältnis hat dem Verdichteraerodynamiker eine neue Dimension der zulässigen Gitterbelastung eröffnet und damit wesentlich höhere Stufendruckverhältnisse bei guter aerodynamischer Stabilität erlaubt. Dies hängt offensichtlich mit dem Druckanstiegsgradienten im Bereich des Schaufel/Wandübergangs zusammen – die Details sind bis heute nicht vollständig verstanden. Die jetzt verfügbaren 3D-Navier Stokes Rechenverfahren werden helfen, das zu klären - das Prinzip ist aber ausreichend anwendbar.

Niedrige Streckungsverhältnisse resultieren in weniger Stufen, breiteren und robusteren Schaufeln, die weniger erosionsempfindlich sind und relativ genauer hergestellt werden können. Sie liefern eine hohe aerodynamische Stabilität – auch gegen sektorartige Druck- und Temperaturstörungen – und sind bis zu hohen Umfangsgeschwindigkeiten flatterfrei. Als Nachteil erweist sich das hohe Gewicht der Beschauelung, das proportional der Sehnenlänge zunimmt, die Schaufel-Scheibe-Verbindung und die Scheibe stark belastet und in einem deutlichen Anstieg der Gesamtmasse resultieren kann.

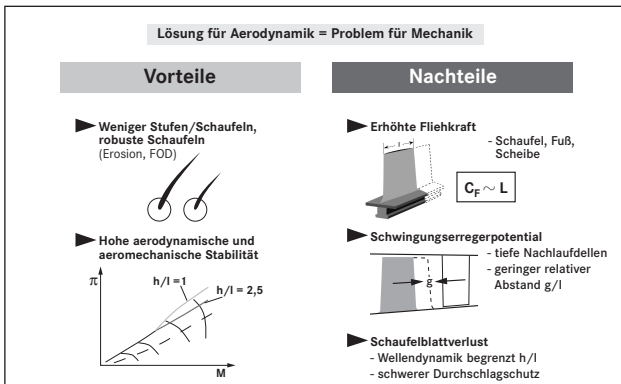


Bild 9: Vor- und Nachteile kleiner Schaufelstreckungsverhältnisse

Der hohe Energieumsatz dieser breiten, schnelllaufenden Schaufeln resultiert in tiefen Nachlaufdellen. Aufgrund der meist gedrängten Bauweise wird der relative Abstand zum nächsten Leitgitter und damit der Ausgleich der Nachlaufdelle vergleichsweise gering, d. h. die aerodynamische Schwingungserregung ist hoch. Unglücklicherweise treten bei Schaufeln niedriger Streckung eine Reihe von Plattenschwingungsformen auf, die bei schlanken Schaufeln nur geringe Bedeutung haben. Die Möglichkeiten gefährlichen Resonanzen durch entsprechende Gestaltung auszuweichen sind bei kleinen Streckungsverhältnissen stärker eingeschränkt und die aerodynamische Koppelung/Erregung über mehrere Gitter hinweg ist erhöht.

Ein weiterer Nachteil ist der schwere Durchschlagschutz für das sichere Zurückhalten einer gebrochenen Schaufel. BILD 9 fasst die Vor- und Nachteile zusammen.

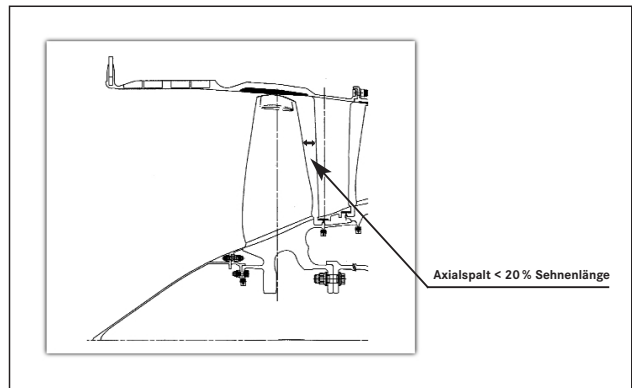


Bild 10: Mechanische Schwingungserregung an einem typischen Beispiel

Besonders hohe mechanische Erregungen müssen die Leitschaukeln militärischer Triebwerke aushalten, die wegen der strikten Gewichtsforderungen und aus wellendynamischen Gründen mit kleinen axialen Gitterabständen gebaut werden. In BILD 10 ist als Beispiel die erste Stufe des EJ200 Niederdruckverdichters gezeigt, dessen Leitgitter mit einem axialen Abstand von <20 % der axialen Sehnenprojektion des Rotors arbeitet und starken periodischen Beanspruchungen ausgesetzt ist. Die Erregungsenergie, die in den Nachlaufdellen solcher Hochleistungsstufen mit ca. 70 K Temperatursteigerung steckt hat die Größenordnung von 1000 kW und muss von der mechanischen Struktur der nachfolgenden Gitter dauerhaft ertragen werden, was eine sorgfältig ausgeklügelte Gestaltung bedingt.

Die Biege- und Torsionsbelastungen moderner Beschauelungen sind hoch und dies kommt bei integralen Schaufel/Scheibe-Rotoren, die sich ausschließlich auf die aerodynamische Dämpfung zur Limitation der Resonanzamplituden verlassen müssen – besonders deutlich zur Geltung. Als Beispiel ist auf BILD 11 die 2. Biegemode eines Blisk Rotors gezeigt.

### 3. KOMPETENZ IM VERDICHTERBAU

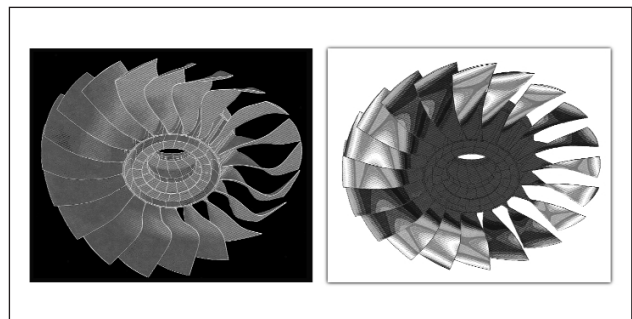


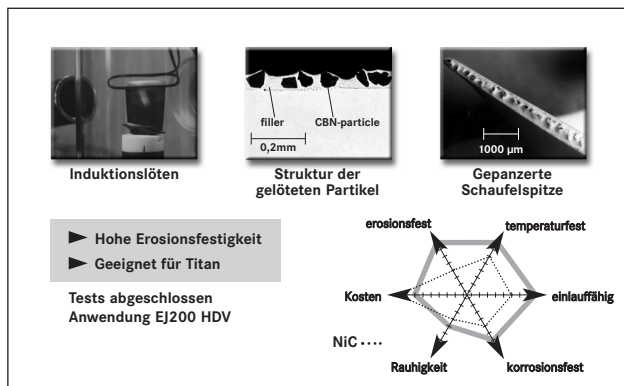
Bild 11: Beispiel einer Schwingungsform eines integralen Schaufel-Scheibe Rotors

### 3.1 Gestaltung

Zur Kompetenz im Verdichterbau gehören viele Fähigkeiten. Neben Aerodynamik, Schwingungsmechanik, Festigkeit und Wellendynamik sind lange Erfahrung und Fähigkeiten in der Fertigung, im Bereich der Anlaufsysteme Schaufel/Gehäuse und der Werkstofftechnik ebenso unerlässlich wie ein hochentwickeltes Versuchswesen.

Moderne Triebwerksverdichter beanspruchen die verfügbaren, sicheren Werkstoffe – Titan und Nickellegierungen – bis an den Rand ihrer Belastbarkeit. Die gestalterische Freiheit zwischen den Anforderungen der Aerodynamik und Mechanik ist sehr klein, die Suche nach einer Lösung zunehmend das Ergebnis von bis zu 60 Iterationsschritten geworden.

### 3.2 Anlaufbeläge



**Bild 12: Anlaufsystem Schaufel-Gehäuse: Titanschaukel mit CBN-Panzerung**

Die hoch ausgelasteten Werkstoffe müssen vor zusätzlichen thermischen Überlastungen geschützt werden. Ein seit langer Zeit typisches Problemgebiet sind die zum Schutz der Rotorschaukeln in das Gehäuse eingebrachten Anlaufbeläge, die im hinteren Teil des Verdichters aufgrund der hohen Temperaturen meist deutlicher Erosion unterliegen und damit zu Leistungsverlust führen. Mittlerweile werden die Beläge aus harten, metallgefüllten silikatartigen Belägen (z. B. Bentonit) hergestellt. MTU hat im Rahmen der Entwicklung des EJ200 ein Anlaufsystem aus hartem, erosionsfestem Bentonit Anlaufbelag und gepanzerten Schaufelspitzen für Titanschaukeln optimiert.

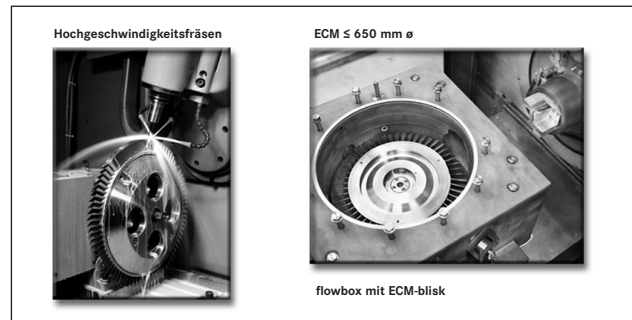
Die Panzerung besteht aus 0,15 mm großen Schneidpartikeln aus kubischem Bornitrid (CBN) die mit Hilfe eines Roboters auf die Blattspitzen verteilt und durch Induktionslöt befestigt werden. BILD 12 zeigt den Herstellprozess und die Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Nickel-Graphit Belägen.

### 3.3 Fertigungsverfahren

Die Entwicklung des letzten Jahrzehnts hat sehr deutlich gezeigt, dass die beiden Trends

- höhere Umfangsgeschwindigkeiten
- kleinere Schaufelstreckungsverhältnisse

mit dem Ziel, die Stufenzahl und damit die Kosten zu reduzieren, die integrale Schaufel-Scheibe Bauweise bedingt.



**Bild 13: Blistk Herstellung mit Hochgeschwindigkeitsfräsen und elektrochemischem Senken**

Was zunächst nur als Besonderheit militärischer Triebwerke, z. B. aus Gewichtsgründen, angesehen wurde, erweist sich zunehmend auch als Möglichkeit im zivilen Triebwerksbau.

Wenn die Ingenieure die heutige hohe Komplexität der Triebwerke mit bis zu 26 Turbomaschinenstufen stark vereinfachen sollen, dann müssen sie den Weg zum schnelllaufenden Verdichter mit niedrigem Schaufelstreckungsverhältnis einschlagen und damit die Blistk-Bauweise einführen. Dies zeigen alle intensiven Konstruktionsstudien bei MTU und bestätigen den frühzeitigen Einstieg in diese Technologie. Die MTU verfügt über alle drei typischen Herstellverfahren für integrale Laufräder entsprechend der Größe der Module:

- Hochgeschwindigkeitsfräsen
- Elektrochemisches Senken
- Lineares Reibschweißen



**Bild 14: Blistk-Herstellung durch lineares Reibschweißen und adaptives Fräsen**

Die BILD 13 und 14 zeigen diese Verfahren, die alle für die EJ200 Fertigung eingesetzt werden. Zum linearen Reibschweißen gehört auch der Nachbearbeitungsprozess des adaptiven Fräsens auf einer 6-Achsen-Fräsmaschine.

#### 4. WERKSTOFFE

Derzeit beherrschen metallische Werkstoffe auf Titan- und Nickelbasis den Triebwerksbau. Beide Werkstoffe haben den Vorteil einer gut beherrschten Herstell- und Verarbeitungstechnologie und einer hohen Bruchdehnung, d. h. eines toleranten Verhaltens bei Überbelastung. Die steigenden Umfangsgeschwindigkeiten haben die Möglichkeiten dieser konventionellen Werkstoffe ausgereizt und bereits zur genannten integralen Rotorbauweise als möglichen Ausweg zu einer weiteren Steigerung geführt.

BILD 15 zeigt die spezifische Festigkeit der klassischen und einiger neuer Werkstoffe, den Titan Aluminiden (TiAl) und den Metall-Matrix Verbundwerkstoffen (MMC). Beide haben ein hohes Potential, aber beiden fehlt die große Bruchdehnung der klassischen Materialien. Tatsächlich erreichen diese Werkstoffe ebenso wie die faserverstärkten Kunststoffe nur Bruchdehnungen um 1 %, d. h. Überlastung führt schneller zum Bruch.

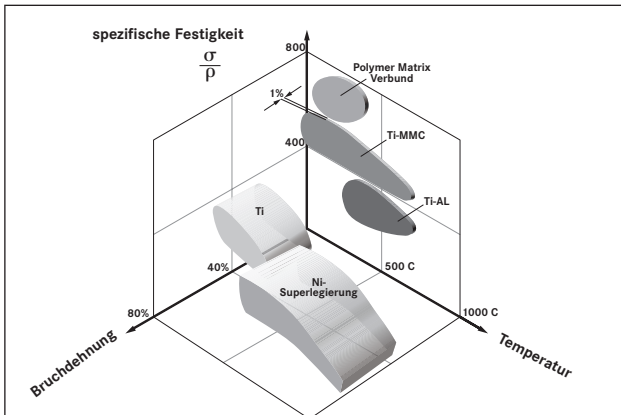


Bild 15: Vergleich der Eigenschaften der heutigen und künftigen Werkstoffe

Es bedarf großer Anstrengungen hochbelastete Bauteile aus diesen Werkstoffen so zu gestalten, dass eine für Luftfahrtgeräte unerlässliche Bedingungen erfüllt wird, nämlich ein berechenbares Schadensverhalten. Als erste Anwendung für TiAl sehen wir Gehäuse im hinteren Bereich von Hochdruckverdichtern, vielleicht als letzter Rotor oder als Austrittsleitgitter. Metall-Matrix Verbundwerkstoffe aus hochfesten Siliziumkarbidfasern als lasttragende Elemente in einer Titan-Matrix bieten sich für leichtere Rotorkonstruktionen in der sogenannten integralen Schaufel-Ring ("Bling") Bauform an. Bei Gewichtseinsparungen von 20-30 % ermöglicht diese Bauweise auch neue Möglichkeiten der Scheibenanbindung und eröffnet Gestaltungsfreiraum für die Wellendynamik. MTU beschäftigt

sich intensiv mit den Möglichkeiten der MMC Technologie für spätere weiterentwickelte Formen des EJ200. BILD 16 zeigt die Entwicklung vom vorhandenen EJ200 Blisk Rotor zum integralen Schaufel-Ring Rotor, für den erste Testscheiben erstellt und im Versuch sind. Rein keramischen Werkstoffen wird aufgrund ihres nahezu dehnungslosen Bruchverhaltens derzeit für Luftfahrtantriebe mit den besonderen Sicherheitsanforderungen keine Anwendung eingeräumt. Ihr Einsatz beschränkt sich auf Titanfeuerschutzschichten im Gehäuse.

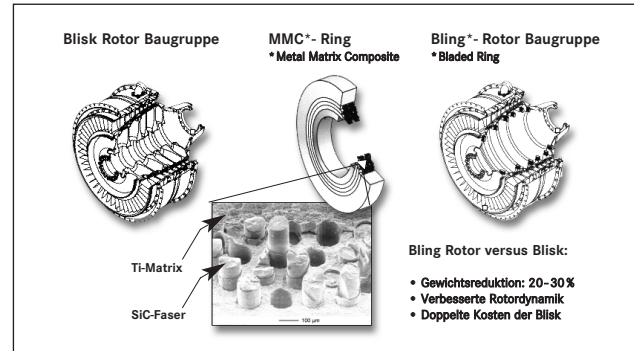


Bild 16: Hochdruckrotor in integraler Scheibe-Schaufel und integraler Ring-Schaufel-Bauweise

#### 5. DIE QUALITÄT DES AUSLEGUNGSPROZESSES

MTU hat im Rahmen eines großen Umstrukturierungsprozesses den Ablauf eines Projektes in typische Phasen eingeteilt und stellt vor Eintritt in eine neue Phase das Projekt im Rahmen eines sogenannten "Gate Reviews" auf den Prüfstand.

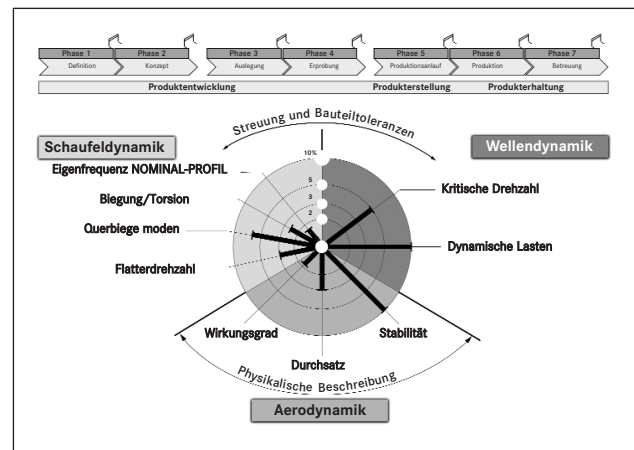


Bild 17: Genauigkeit des Auslegungsprozesses

Der Auslegungsprozess für einen neuen Verdichter stellt sich hinsichtlich der heute verfügbaren Prozessgenauigkeit für die wesentlichen Disziplinen Aerodynamik, Schwingungsmechanik und Wellendynamik entsprechend BILD 17 dar.

Im Bereich der Aerodynamik liegt unsere Verhersagegenauigkeit der letzten 8 Verdichter bei  $\pm 1,5\%$  im Wirkungsgrad,  $\pm 3\%$  im Durchsatz und  $-5\%$  bis  $+10\%$  Stabilitätsabstand. Die relativ große Ungenauigkeit in der Abreißgrenzenbestimmung liegt in der trotz der neuen 3D Navier Stokes Lösungsverfahren immer noch unzureichenden physikalischen Beschreibung der äußerst komplizierten Strömung. Es wird noch sehr großer Anstrengung bedürfen um hier zu wesentlichen Verbesserungen zu kommen. Ganz anders stellt sich das Problem bei der Schaufelschwingungsmechanik dar. Die Berechnung der Eigenfrequenzen für das geometrische Nominalprofil gelingt heute auf  $\pm 1,5\%$  genau; die Ungenauigkeiten ergeben sich als Folge der Geometrietoleranzen der Schaufeln und Streuungen in den Einspannbedingungen. Diese unbegrenzte Geometrievielfalt innerhalb der Fertigungstoleranzen ergibt für die Biege- und Torsionsschwingungsformen ein akzeptables Toleranzfeld von ca.  $\pm 2,5\%$ ; für die gefährlichen, weil nahezu ungedämpften Querbiege- oder Plattenschwingungsmoden jedoch ein viel breiteres Streuband von ca.  $\pm 7\%$ . Letzteres bedeutet eine massive Einschränkung der Gestaltungsfreiheit und erschwert die Abstimmung stark. Gute Fortschritte hat MTU in der Berechnung der Flutterstabilität gemacht. So weit uns der experimentelle Nachweis überhaupt möglich war, gelang die Vorhersage auf ca.  $\pm 3\%$ . Ähnlich wie bei der Schaufelschwingungsmechanik wird das Verhalten der Wellendynamik im Gesamtsystem durch Toleranzen und Streuungen in den Passungen zwischen den Bauteilen und daraus resultierenden Steifigkeitsänderungen beeinflusst. Das MTU System erlaubt die Vorherbestimmung kritischer Drehzahlen auf  $\pm 5\%$  und unsere Erfahrung mit der Berechnung dynamischer Lasten liegt bei sehr guten  $\pm 10\%$ .

Grundsätzlich anders orientiert sich die Berechnung der statischen und niederfrequenten Wechselfestigkeit von Scheiben. Da es sich hier um Bauteile handelt, die unter gar keinen Umständen im Betrieb zu Bruch gehen dürfen, muss ein umfassendes System von Berechnungsverfahren, Werkstoff- und Bauteilqualitätsprüfmethoden sowie fortschreitender Lebensdauerfreigabe über kontinuierlich fortgesetzte Schleuderprogramme installiert sein, das eine sichere Mindestlebensdauer zwischen den Inspektionsintervallen garantiert. Das MTU System hat in 51 verschiedenen Verdichter- und Turbinenscheibentypen über 36 Millionen Flugstunden hinweg lückenlos funktioniert.

## 6. DER VERDICHTER – EIN TEURES PRODUKT

Die Entwicklungskosten eines neuen Hochdruckverdichters bis zur Serienreife liegen im Bereich von DM 300 – 400 Millionen und damit in einer Höhe, die die Möglichkeiten einer kleineren Triebwerksfirma sprengt und auch die großen zu externen Finanzquellen drängt. Um in diesem Bereich Tritt zu fassen, müssen Technologien und Basiswissen aus fremdfinanzierten Programmen, z. B. militärischen, eingesetzt werden.

Wie geradezu bewundernswert konsequent z. B. General Electric Kenntnisse und Entwicklungsergebnisse aus militärischen Programmen in zivile Produkte umsetzt, ist auf BILD 18 zu sehen. So entstand aus dem TF39 in ganz kurzer Zeit das Hochdrucksystem des CF6-6, aus dem Kerntriebwerk des F101 Bombertriebwerks das derzeit erfolgreichste Ziviltriebwerk der Welt, das CFM56 und aus dem im Auftrag der NASA entwickelten E3-Programm der Hochdruckverdichter des GE90 Triebwerks.

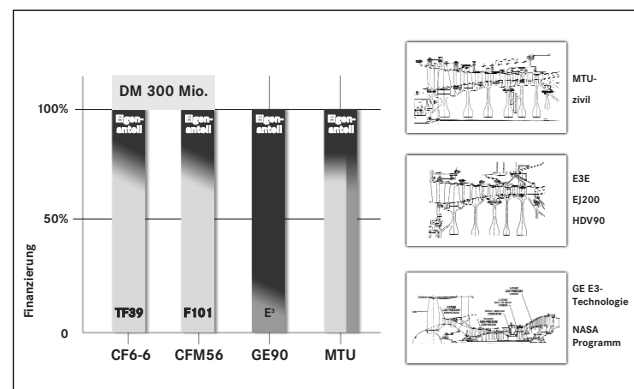
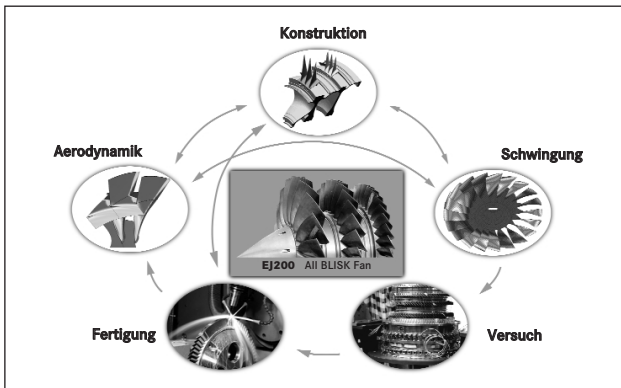


Bild 18: Entwicklungskosten eines Hochdruckverdichters

Die MTU bezieht ihre Verdichtertechnologie aus den militärischen Programmen RB199 und EJ200, dem E3E-Luftfahrtforschungsprogramm und eigenfinanzierten Entwicklungen. Der aus diesen Programmen hergeleitete Hochdruckverdichter für ein ziviles Kerntriebwerk wird zu rund 30 % eigenfinanziert sein.

## 7. EINE INTEGRATIVE ANSTRENGUNG

Entwurf und Entwicklung eines Triebwerk-Verdichters im Grenzleistungsbereich ist eine hochintegrative Anstrengung aller Beteiligten. Aufgrund der hohen Belastung aller Bauteile am Rand der Fähigkeiten verfügbarer Werkstoffe ist die Gestaltung nur noch im kontinuierlich interaktiven Prozess zwischen Aerodynamik, Schwingungsmechanik und Scheibenfestigkeit lösbar. Wie in Bild 19 gezeigt, sind dabei besonders die Aerodynamik und die Schwingungsmechanik gefordert.



**Bild 19: Verdichterentwicklung – eine integrative Herausforderung**

Anders als noch vor 20 Jahren, als mit der Einführung des Titans neue Freiräume entstanden und der Aerodynamiker mit gut tragbaren Einschränkungen die Verdichter gestalten konnte, hat heute die Mechanik einen dominierenden Einfluss gewonnen. Nur durch intensivste gemeinsame Anstrengung auf allen Seiten kann mit den verfügbaren Mitteln das kundenfreundlichste, preisgünstigste Produkt entstehen. Verdichterentwicklung war immer eine Herausforderung und eine Schlüsseltechnologie für jedes Triebwerk – sie wird es bleiben.