

# **Feinbearbeitungsverfahren Schlüsseltechnologien für moderne Luftfahrtverdichter**

**Dr. Klaus Steffens  
Albin Platz  
Franz Buckl**

MTU Aero-Engines GmbH  
Dachauer Str. 665, 80995 München

## **Abstract**

Modern aero engines are designed for high fuel efficiency and reliability, low emissions and reduced maintenance and manufacturing cost. The compressor of an aero engine is a key component in achieving these engine requirements featuring high stage pressure ratios and high circumferential speed. Designs like the integrated bladed rotor (IBR) are applied to meet the challenging aerodynamic and mechanical demands of modern compressors. Special precision machining processes are used to get the required smooth surfaces of 3D shaped blades. Precision machining processes applied for aero engines are surface finishing processes as well as processes like shot peening to get defined surface hardening and material conditions. The paper presents and explains the typically applied precision machining processes for compressor parts in connection with the main IBR manufacturing technologies.

## **1 Einleitung**

Die Forderungen des Marktes nach Luftfahrtantrieben mit deutlich reduziertem Kraftstoffverbrauch, niedrigen Emissionen und wettbewerbsfähigen Herstell- und Wartungskosten, bei hoher Schubleistung und Zuverlässigkeit, treiben die Entwicklung neuer Antriebskonzepte und der zugehörigen Schlüsseltechnologien. Der Fortschritt bei der Entwicklung moderner Flugtriebwerke wird im wesentlichen durch leistungsfähigere Verdichter dargestellt. Die Verdichterkomponenten bestimmen etwa 50-60 % der Baulänge, 40-50 % des Gewichtes, 35-40 % der Herstellkosten und 30 % der Wartungskosten eines Triebwerkes. Die hohen

thermischen Wirkungsgrade von Fluggasturbinen wurden und werden im wesentlichen durch die Steigerung der Verdichterwirkungsgrade und Verdichterdruckverhältnisse erzielt. Eine Wirkungsgradverbesserung der Verdichterkomponenten um 1% reduziert den Treibstoffverbrauch eines Triebwerks im gleichen Maße. Die Kennfeldauslegung und Betriebsstabilität der Verdichterkomponenten bestimmt ganz entscheidend das Betriebsverhalten des Gesamtriebwerks.

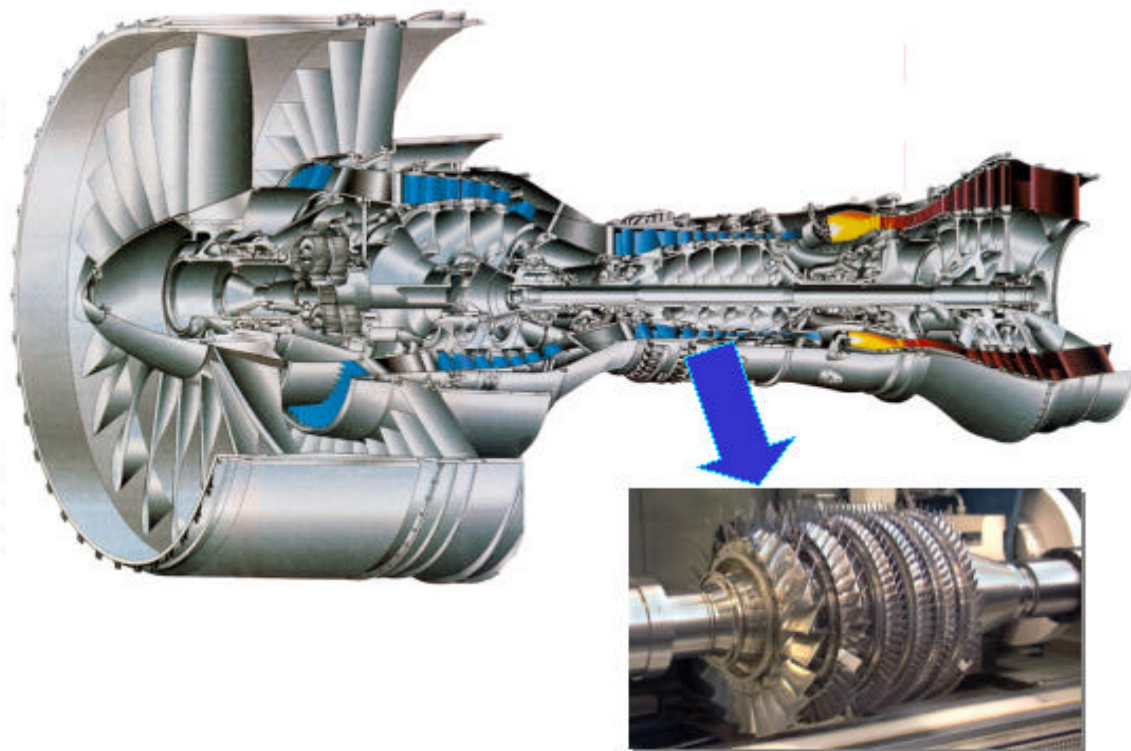


Abbildung 1: PW6000 Verdichter

MTU Aero Engines hat sich bei modernen Verdichtern eine große Kompetenz erworben. Anfängen mit der Entwicklung des Mittel- und Hochdruckverdichters für das Tornadotriebwerk RB199 erfolgte die gezielte Fortsetzung mit der Entwicklung des EJ200 Niederdruck- und Hochdruckverdichters für den Eurofighter Antrieb. Aktuell wird auf Basis langjähriger Technologieprogramme an der Entwicklung des PW6000 Hochdruckverdichters, siehe Abb. 1, für den Airbus A318 gearbeitet. Der Mitteldruckverdichter für den Antrieb TP400 des neuen Militärtransporters Airbus AM400 ist eine weitere laufende Entwicklung.

Zur Reduzierung der Herstell- und Wartungskosten von Verdichtern werden kompakte Bauweisen mit möglichst geringen Stufen- und Schaufelzahlen angestrebt.

Daraus resultieren deutlich größere Stufendruckverhältnisse, die über höhere Drehzahlen und Umfangsgeschwindigkeiten der Verdichterrotoren realisiert werden, was eine hohe aeromechanische und thermische Belastung der Verdichterbauteile zur Folge hat. Moderne Verdichter beanspruchen die eingesetzten Werkstoffe und Bauweisen bis an den Rand ihrer Belastbarkeit. Für die Beherrschung der hohen mechanischen Belastungen, wie auch für eine optimale 3D-Gestaltung der Verdichterlaufschaufeln erweist sich die Bliskbauweise (blisk = bladed disk) als Schlüsseltechnologie. Diese integrale Rotorbauweise vermeidet die kritische Schaufel/Scheibe Verbindung und erlaubt dadurch eine höhere mechanische Belastung des Bauteils. Damit lassen sich höhere Umfangsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig höheren Randlasten realisieren. Letzteres ermöglicht weniger, aber breitere Laufschaufeln, dadurch wird eine aerodynamisch optimierte 3D-Gestaltung dieser Schaufeln erleichtert. Die Blisk-Bauweise unterstützt damit die Erhöhung des Verdichterwirkungsgrades bei hoher mechanischer Bauteilintegrität und erlaubt eine Gewichtsreduzierung des Verdichters. Blisks kommen bereits in militärischen Verdichtern, aber zunehmend auch bei modernen zivilen Verdichtern zum Einsatz.

Eine wichtige Ergänzung findet die Bliskbauweise in den Feinbearbeitungsverfahren. Letztere sind Bearbeitungsverfahren zur Realisierung von extrem glatten Bauteiloberflächen, z.B. an den 3D-Schaufelprofilen und Kanalübergängen. Nur über diese Verfahren lässt sich die hohe aerodynamische Bauteilgüte erreichen, die zur Realisierung der angestrebten hohen Wirkungsgrade unerlässlich ist. Zu den Feinbearbeitungsverfahren werden nachfolgend aber auch Verfahren der Oberflächenverfestigung zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit und zur Reduktion von Oberflächenfehlern gezählt.

Im vorliegenden Papier wird auf die wesentlichen Feinbearbeitungsverfahren eingegangen, die in einer modernen Verdichterfertigung heute zum Einsatz kommen. Bei MTU werden diese Verfahren im wesentlichen bereits auf Bliskbauteile angewandt bzw. sind den Herstellverfahren zur Bliskfertigung nachgeschaltet. Aus diesem Grund werden einleitend die Herstellverfahren von Blisks beschrieben.

## **2 Herstellung von Blisks**

Blisks (= bladed disks) mit einfacher Geometrie sind seit vielen Jahren bei Kleintriebwerken im Einsatz. Zunehmend findet man Blisks auch in militärischen und größeren zivilen Triebwerken. Das EJ200 Triebwerk für den Eurofighter hat sechs Blisk-Stufen, einschl. einer Fan-Stufe und auch die Serienversion des BR700 weist mehrere Blisk-Stufen auf. Blisks werden heute nach drei verschiedenen Verfahren hergestellt:



Abbildung 2: Technologien zur Bliksherstellung

- Fräsen aus dem Vollen
- elektrochemisches Bearbeiten (Electro Chemical Machining = ECM)
- Anfügen von fertigen Schaufelblättern an die Nabe durch lineares Reibschweißen (Linear Friction Welding = LFW)

## 2.1 Fräsen

Dies ist das herkömmliche Fertigungsverfahren und immer noch das schnellste für die Herstellung von Prototypen und Erprobungsteilen. Für die Produktion ist das Fräsen kleiner Titan-Schaufelblätter wirtschaftlich, insbesondere wenn das Profil für „Flank Milling“, d.h. der Fräser hat bei der Bearbeitung Flächenkontakt mit der Schneidflanke, geeignet ist. Durch Hochgeschwindigkeitsfräsen erfolgt die spanende Bearbeitung mit Schnittgeschwindigkeiten von ca. 100 m/min beim Vorfräsen und von annähernd 350 m/min beim Fertigfräsen. Gegenüber dem konventionellen Fräsen wird die Bearbeitungszeit auf weniger als die Hälfte reduziert. Das Fräsen von HDV-Bliks aus Ni-Legierungen ist wegen der schlechten Zerspanbarkeit des Werkstoffs meist unwirtschaftlich und wegen der sehr dünnen, kleinen Schaufelblätter aufgrund der Schwingungen problematisch.

## 2.2 Elektrochemische Bearbeitung (Electro Chemical Machining ECM)

ECM ist ein besonders wirtschaftliches Verfahren zur Herstellung von Schaufelblättern mittlerer Größe an Bliks aus Titan sowie bei kleinen Blikschaufeln aus Nickelbasislegierungen. Die Reproduzierbarkeit des ECM-Verfahrens ist ausgezeichnet und die Werkzeuge mit denen die Kontur hergestellt wird, unterliegen nahezu keiner Abnutzung durch den elektrochemischen Prozeß.

Sehr zeitaufwendig ist bis heute die Entwicklung der Elektrodengeometrie, da wegen der unterschiedlichen Stromdichte (geometrischer Einfluß) und der durch die elektrochemischen Vorgänge sich ändernden Elektrolyteigenschaften die Abformung des Werkzeuges nicht 1:1 erfolgt. Die Elektrodenform wird deshalb normalerweise in mehreren Iterations-Schritten optimiert. Sind die ECM-Parameter einmal festgelegt, ist das Verfahren sehr produktiv. Aus einer vorbereiteten Form kann innerhalb von wenigen Minuten ein fertiges Schaufelblatt, einschl. der Ein- und Austrittskantenradien mit hoher Oberflächengüte hergestellt werden. Eine Blisk im Arbeitsbehälter (flowbox) der ECM-Anlage ist in Abbildung 2 zu sehen.

### **2.3 Lineares Reibschweißen (Linear Friction Welding LFW)**

Ursprünglich entwickelt, als Verfahren zum Auswechseln (Reparatur) schwer beschädigter Schaufelblätter, hat sich das lineare Reibschweißen auch zur Herstellung von Neuteilen etabliert. Beim Linearen Reibschweißen ist eines der zu fügenden Teile fest eingespannt, während das andere linear oszilliert und mit hohem Druck auf das fest eingespannte Teil gepresst wird. Die Reibung erwärmt den Bereich der Schweißzone auf Schmiedetemperatur und durch den Stauchdruck entsteht ein Schweißwulst im Fügebereich. Die Oszillierbewegung wird innerhalb von 0,2 Sekunden an einer definierten Position gestoppt.

Der Schweißbereich zeichnet sich durch ein sehr feinkörniges Mikrogefüge mit ausgezeichneter Festigkeit aus. Abbildung 2 zeigt MTU's LFW-Maschine. Die anzuschweißenden Schaufelblätter sind fertig geschmiedet. Nach dem Schweißen werden Überstände und der Schweißwulst durch eine Feinbearbeitung, das adaptives Fräsen abgearbeitet. Adaptives Fräsen ist wegen der engen Toleranzen der Schaufelblätter erforderlich. Bei großen Schaufelblättern ist das LFW für die Neuteilefertigung kostengünstiger als das Fräsen aus dem Vollen.

## **3 Feinbearbeitungsverfahren**

Feinbearbeitungsprozesse im Triebwerksbau sind, anders als im konventionellen Maschinenbau, nicht nur Verfahren um Oberflächen zu glätten, sondern auch die Verfahren um definierte Oberflächeneigenschaften herzustellen wie z.B. das Einbringen von Druckeigenstressungen durch Oberflächenverfestigen.

Zu den Feinbearbeitungsverfahren im Triebwerksbau zählen im wesentlichen

- Gleitschleifen
- Chemisch Unterstütztes Gleitschleifen (CUG)
- Druckfließläppen (DFL bzw. Abrasive Flow Machining AFM)
- Hochgeschwindigkeitsfräsen (High Speed Cutting HSC)

- Adaptives Fräsen nach dem Linearen Reibschweißen
- Elektrochemische Bearbeitung (Electro Chemical Machining ECM)
- Elektro-Chemisches Bohren
- Laserbohren von Trichterbohrungen
- Elektropolieren
- Rotorschleifen
- Verfestigungsstrahlen

Das Ziel kurze Durchlauf- und Fertigungszeiten kann nur erreicht werden, wenn die Fertigungsabläufe optimal aufeinander abgestimmt und die Fertigungsprozesse stabil sind. Eine wichtige Rolle nehmen hier Feinbearbeitungsprozesse der Oberflächen ein, da diese immer am Ende der Fertigungskette liegen und in der Regel sehr viel Zeit benötigen.

### 3.1 Gleitschleifen

Das Gleitschleifen ist wegen der eingesetzten Medien ein umweltfreundliches Verfahren zur Glättung von Oberflächen.



Schleifkörper



Laufschaufeln vor und nach dem Gleitschleifen

Abbildung 3: Gleitschleifanlage und gleitgeschliffene Verdichterschaufeln

In einer bewegten Schüttung von Schleifkörpern, sogenannten Chips, werden Werkstücke im Arbeitsbehälter der Maschine in eine Relativbewegung zueinander

gebracht, wobei durch Zugabe von Wasser und Schleifpaste die geforderte Oberflächenbearbeitung gesteuert wird. Von der Zusammensetzung und Größe der Schleifkörper hängen Metallabtrag, Schleifbild und Oberflächenrauheit ab, während maschinentechnische Faktoren den spezifischen Schleifdruck auf das Werkstück bestimmen.

Als Hilfsmittel zum Gleitschleifen werden Keramik- oder Kunststoff-Schleifkörper sowie Schleif- und Polierpasten oder -Pulver eingesetzt.

Das Gleitschleifen ist das kostengünstigste Verfahren zum Glätten metallischer Oberflächen, da sowohl die Investitionskosten als auch die Betriebskosten gering sind.

Es wird im wesentlichen eingesetzt um Verdichterschaufeln aus Titanlegierungen nach der elektrochemischen Bearbeitung zu glätten und das beim ECM-Prozeß entstehende und auf der Oberfläche anhaftende Metalloxid zu entfernen. Gleichzeitig erfolgt dabei eine gewünschte Verrundung der Ein- und Austrittskanten, die damit ihre zeichnungsgerechte Form erhalten.

### **3.2 Chemisch Unterstütztes Gleitschleifen (CUG)**

Beim chemisch unterstützten Gleitschleifen wird dem Gleitschleifprozeß zusätzlich ein Mittel (Compound) zugegeben, das den metallischen Werkstoff chemisch angreift. Durch Ätzen der metallischen Oberfläche findet ein Werkstoffangriff statt, der im oberflächennahen Bereich zu einer Oxidation führt. Das gebildete Metalloxid läßt sich durch den Gleitschleifvorgang leichter entfernen als das zähe Grundmaterial. Diese unterstützende Wirkung des Gleitschleifvorganges führt zu einer deutlichen Reduzierung der Gleitschleifzeiten.

Unebenheiten werden besser geglättet und die Kanten wegen der geringeren Bearbeitungszeit weniger stark abgetragen.

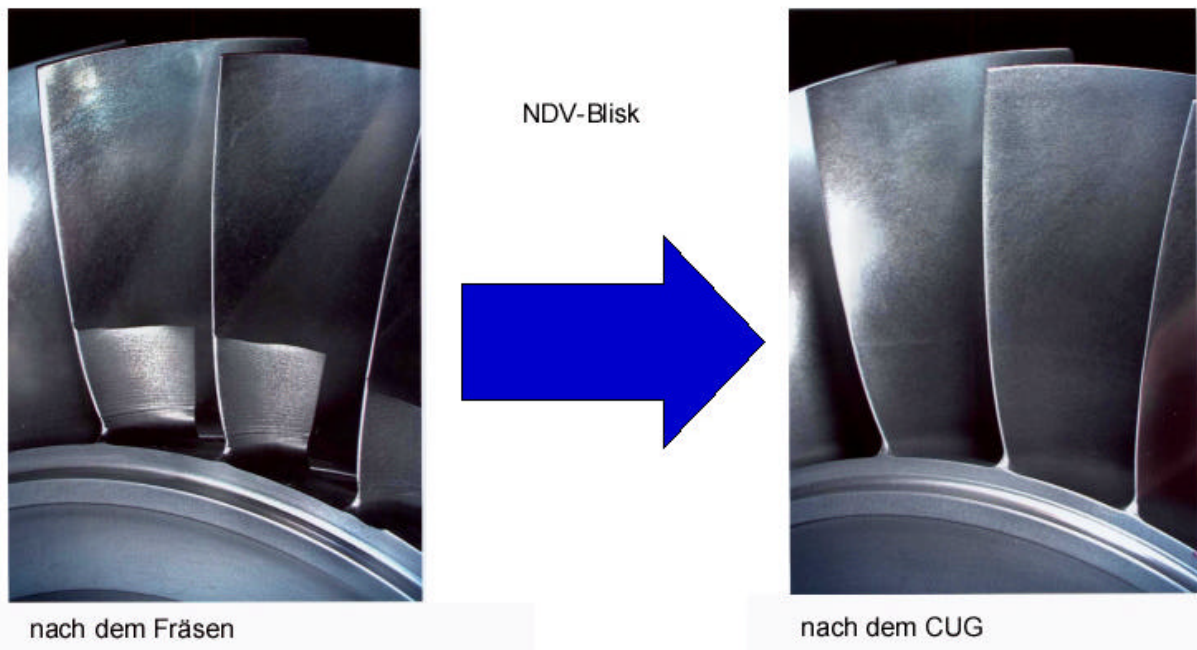


Abbildung 4: Änderung der Oberflächenqualität durch Chemisch unterstütztes Gleitschleifen

Das CUG wird bei MTU vorwiegend zum Glätten der Oberfläche gefräster Bliskschaufeln eingesetzt. Ein Kostenvergleich zwischen manuellem Polieren, Druckfließläppen und CUG zeigt, dass das CUG um den Faktor 2 bis 4 kostengünstiger ist.

### 3.3 Druckfließläppen (Abrasive Flow Machining AFM)

Druckfließläppen (DFL) ist ein nichtkonventionelles Bearbeitungsverfahren, dessen vielfältige Anwendungsmöglichkeit im Bereich der Oberflächenbearbeitung zum Einsatz kommt.

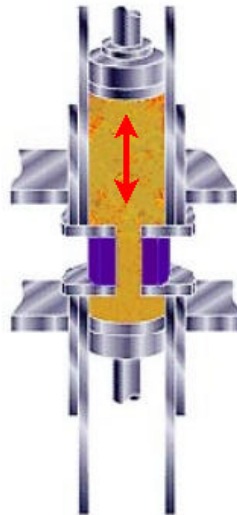
Bei MTU erfolgt mit DFL die Glättung von 3D-Schaufeloberflächen, die Verrundung von Bohrungseintritten und Kanten sowie das Glätten und Entgraten von Bohrungen und Profilen.

In der typischen Arbeitsweise, dem Zweiwegeverfahren, wird ein zu bearbeitendes Werkstück zwischen zwei Zylinder eingespannt, zwischen denen eine mit abrasiven Körnern versetzte Läpppaste hin und hergeschoben wird und damit an den zu bearbeitenden Oberflächen unter hohem Druck vorbeigeführt wird.



**Bliskbearbeitung**

### Prinzip



**Kanten verrunden**

Abbildung 5: Druckfließläppen

In Abhängigkeit der wesentlichen Prozessparameter Druck, Temperatur, Fließverhalten, Pastenviskosität und der zugesetzten Schleifkörner wird ein Abtrag erzeugt, der je nach Anwendung einen Grat entfernt oder die Oberfläche bis zum Hochglanz poliert.

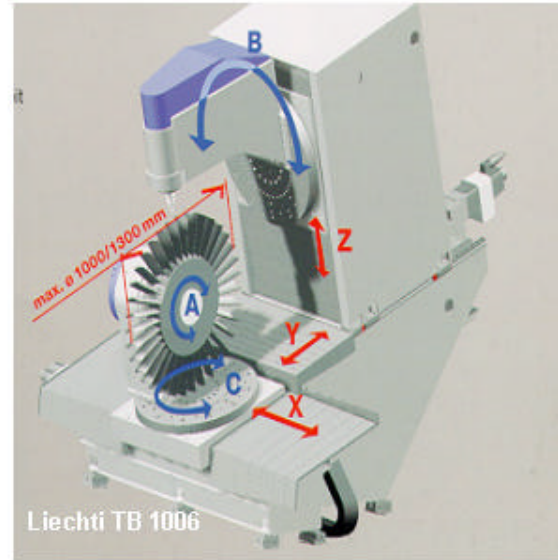
Die hohe Anzahl an beeinflussenden Parametern erfordert einen hohen Zeitaufwand mit vielen Iterationsschritten und große Erfahrung um eine neue Anwendung serienreif zu entwickeln.

### 3.4 Hochgeschwindigkeitsfräsen (High Speed Cutting HSC)

Hochgeschwindigkeitsfräsen an schwer zerspanbaren Titanwerkstoffen ist Stand der Technik bei MTU. Wesentliche Aufgabe ist die wirtschaftliche Herstellung von Schaufelprofilen an Blisks aus Titanwerkstoffen.



**Fräsen von HDV-Blisks**



**6-Achs-Flank-Milling**

Abbildung 6: Hochgeschwindigkeitsfräsen

Komplizierte Strömungsprofile im Verdichter werden mit Vollhartmetall-Schaftfräsern bei Schnittgeschwindigkeiten zwischen 350 und 450 m/min im Flank-Milling Verfahren erzeugt.

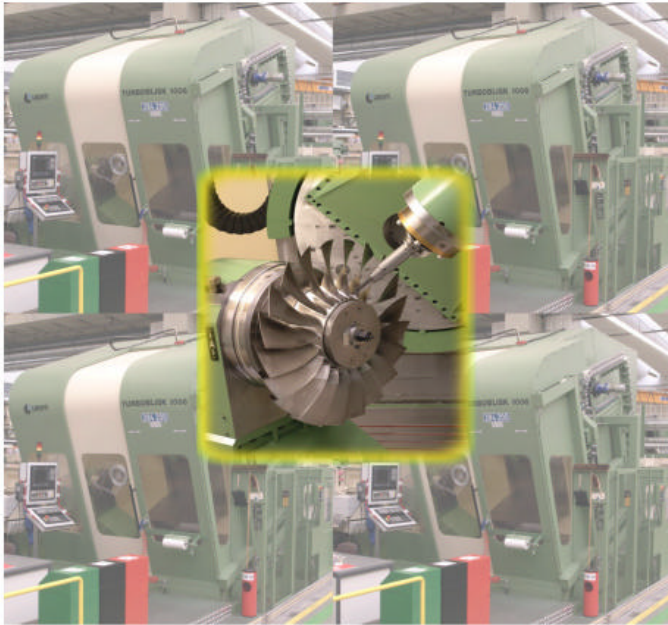
Auf diese Weise werden Oberflächengüten erzielt, die bei  $R_a = 1,2$  exzellente Voraussetzung für die nachgeschaltete Finish-Bearbeitung wie z.B. Gleitschleifen schaffen, durch die die guten aerodynamischen Eigenschaften mit Oberflächenrauigkeiten unter  $R_a < 0,6$  erzielt werden.

### 3.5 Adaptives Fräsen nach dem Linearen Reibschweißen

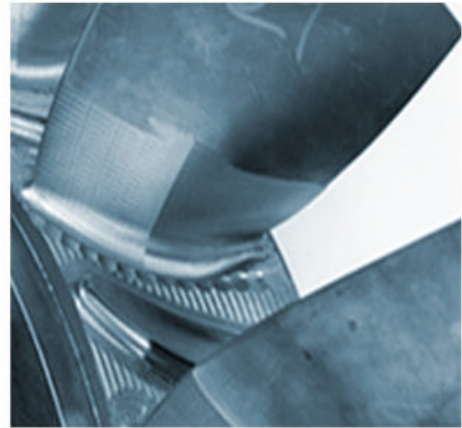
Das adaptive Fräsen wird sowohl für die Neuteilfertigung als auch für das Repair von gefügten Blisk benötigt. Die Bearbeitungsaufgabe besteht darin, einen aerodynamisch optimalen und repairtauglichen Übergang von Schaufel zum Ringraum herzustellen.

Dabei wird der Schweißwulst und Überstände an den Schaufeln so entfernt, daß ein definierter Übergang von der Strömungsgeometrie der Schaufel zum Ringraum des Scheibenkörpers entsteht.

Beim adaptiven Fräsen wird das Schaufelprofil der reibgeschweißten Schaufel gemessen und aus dem Vergleich der Istwerte mit dem Sollprofil ein NC-Programm zum Fräsen generiert.



**Adaptives Fräsen von NDV-Blisks.**



**Bearbeitete Schaufeln**

Abbildung 7: Adaptives Fräsen

MTU setzt zum adaptiven Fräsen 6-Achs-Hochgeschwindigkeits-Fräsmaschinen von LIECHTI ein. Jedes einzelne Schaufelblatt wird neben der Fügezone an 256 umlaufenden Positionen vermessen. Anschließend werden diese IST-Daten mit dem SOLL-Daten verglichen und daraus ein entsprechendes NC-Programm für die Fräsbearbeitung generiert.

Bei der Fräsbearbeitung wird darauf geachtet, daß ein bzgl. Aerodynamik und Bauteillebensdauer optimaler, d.h. absatzfreier Übergangsbereich erzeugt wird.

### **3.6 Elektrochemisches Bearbeiten**

Unter dem Oberbegriff der elektrochemischen Bearbeitung (ECM : Electro Chemical Machining) gruppieren sich Verfahren, bei denen das Abtragsprinzip auf der anodischen Metallauflösung während der Elektrolyse beruht. In der Regel wird hierbei ein kathodisch gepoltes Profilwerkzeug mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in das anodisch gepolte Werkstück eingesenkt. Zwischen Werkstück und Werkzeug bildet sich prozeßbedingt ein Arbeitsspalt, durch den die Elektrolytlösung mit hoher Geschwindigkeit hindurchströmt. Der Werkstoff löst sich nahezu entsprechend der Geometrie des kathodischen Profilwerkzeugs auf, so dass ein Abbild am Bauteil erfolgt.

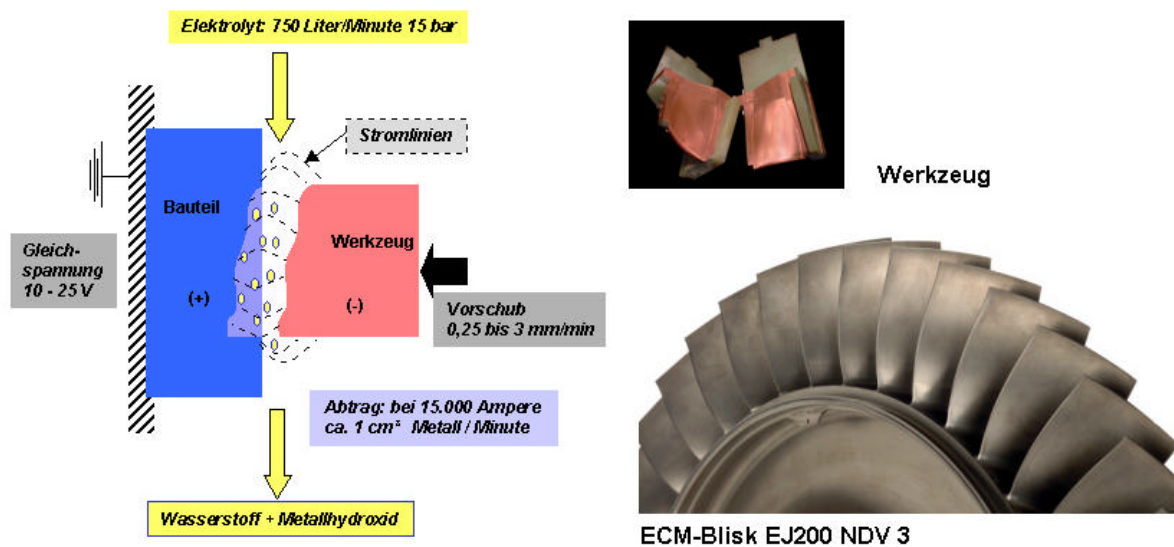


Abbildung 8: ECM Verfahren

Die positiven Eigenschaften des ECM sind

- Große Gestaltungsfreiheit für komplexe Raumformen, z. B. Verdichter- und Turbinenschaufeln, Turbinenscheiben
- Hohe Abtragsleistung
- Vorschubgeschwindigkeit bis 3 mm/min; die Fläche, die mit einem Hub abgesenkt werden kann, richtet sich nach der Generatorleistung; Stromdichten bis ca. 3 A/mm<sup>2</sup>
- Fertigbearbeitung in einem Arbeitsgang bei gleichzeitig hoher Maßgenauigkeit und Oberflächengüte
- Gute Wiederholbarkeit der Bauteilgüte
- Nahzu kein Werkzeugverschleiß
- Werkstoffhärte und Zähigkeit haben keinen Einfluß auf die Abtragsleistung
- Keine Gratbildung
- Keine negative Werkstoffbeeinflussung (eigenspannungsfreie Oberfläche ohne Wärmebeeinflussung)
- Keine Zerspanungskräfte

Einflußfaktoren und Prozeßparameter bestimmen in Wechselwirkung den Bearbeitungsablauf und damit das Arbeitsergebnis. Komplexe Stromdichteverteilungen an Kanten, Ecken und Radien haben erhebliche Auswirkungen auf die Ausbildung des Arbeitsergebnisses, was bei der Geometrie des Werkzeuges berücksichtigt werden muß.

Der ECM-Prozeß ist gekennzeichnet durch

- Hohe Anfangskosten (Werkzeuge, Vorrichtung, Erprobung)
- Besondere Aufwendungen für Sicherheit und Umweltschutz (Umgang mit Elektrolyt, Explosionsschutz für Wasserstoff, Elektrolytschlamm Entsorgung)
- Gefahr von Strömungsriefen durch ungleichmäßig fließenden Elektrolyt
- Gefahr der Interkristallinen Korrosion (IK) bei einigen Werkstoffen und ungünstigen Senkparametern oder Ätzangriff (Lochfraß, kornorientierungsabhängiger Abtrag)
- Nur elektrisch leitende Werkstücke sind bearbeitbar

Das Elektrochemische Bearbeiten wird im Triebwerksbau vorwiegend für schwer zerspanbare Werkstoffe aus Nickelbasis- und Titanlegierungen eingesetzt. Über 90% der heute eingesetzten Verdichterschaufeln werden durch ECM hergestellt.

### 3.7 Elektrochemisches Bohren

Die elektrischen Vorgänge beim EC-Bohrverfahren gleichen dem elektrochemischen Bearbeiten. Im Gegensatz zum ECM, wo meist neutrale Salzlösungen als Elektrolyte eingesetzt werden, wird beim elektrochemischen Bohren eine saure Elektrolytlösung (z. B.  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  in wässriger Lösung) verwendet. Im sauren Elektrolyt wird das Metall vollständig aufgelöst und kann aus den zum Teil sehr engen Spalten zwischen Werkstück und Kathode besser heraustransportiert werden.

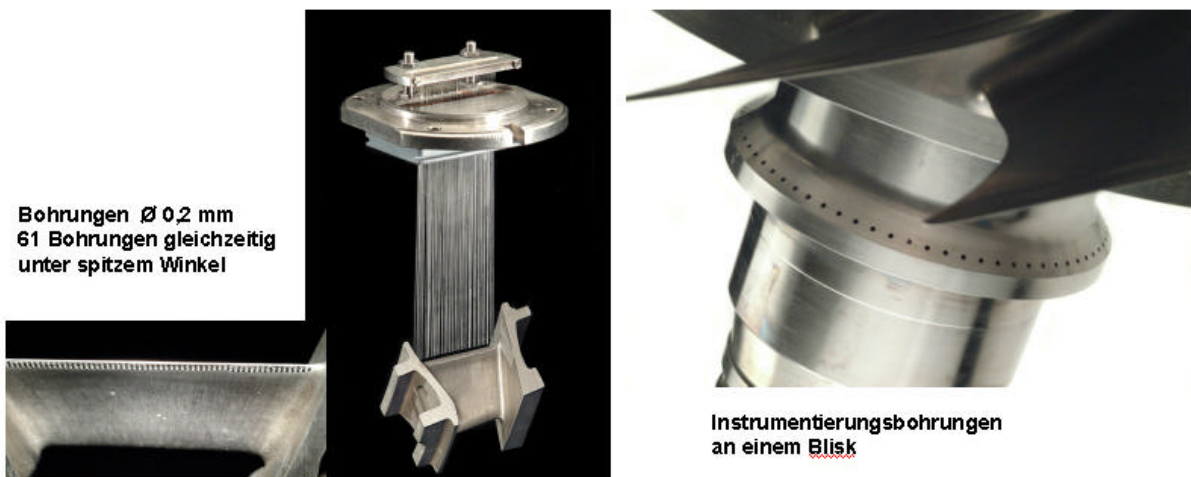


Abbildung 9: Elektrochemische Bohrverfahren

Neben den positiven Eigenschaften des ECM-Verfahrens zeichnet sich das Elektrochemische Bohren aus durch

- Bohrungsdurchmesser von mehreren Millimetern bis kleiner als 0,1 Millimeter
- Variable Beeinflussung der Bohrgeometrie durch Änderung der Bohrparameter (Trichter; Verrundungen, Erweiterungen im Bohrloch sind möglich)

- Formbohrungen (Ellipse; Rechteck; Langloch) sind herstellbar
- Mit Mehrfachwerkzeugen werden 61 Bohrungen  $\varnothing$  0,2 mm gleichzeitig gebohrt
- Mit dem EC-Bohrverfahren ist ein „Bohren um die Ecke“ an unzugänglichen Stellen möglich

Hauptanwendungen in der MTU sind

- Filmkühlungsbohrungen bei Schaufeln die Schaufelaustrittskanten
- Instrumentierungsbohrungen bei allen Triebwerksteilen
- Ölschleuderbohrungen bei Verdichterlaufscheiben

### 3.8 Laserbohren von Trichterbohrungen

Hohe Effizienz eines Triebwerkes erfordert den Einsatz der Werkstoffe an ihrer Belastungsgrenze. Um zusätzliches Potential für einen sicheren Betrieb und zur Verlängerung der Lebensdauer zu nutzen, werden Triebwerksschaufeln mit Filmkühlungsbohrungen versehen, die zur Absenkung der Oberflächentemperaturen der Bauteile während des Betriebes führen. Zylindrische Bohrungen werden schon seit Jahrzehnten durch Elektrochemisches oder Laserbohren unter flachem Winkel in die Schaufeln eingebracht. Eine Steigerung der Kühlwirkung wird durch Formbohrungen mit trichterförmigem Bohrungsaustritt erzielt.

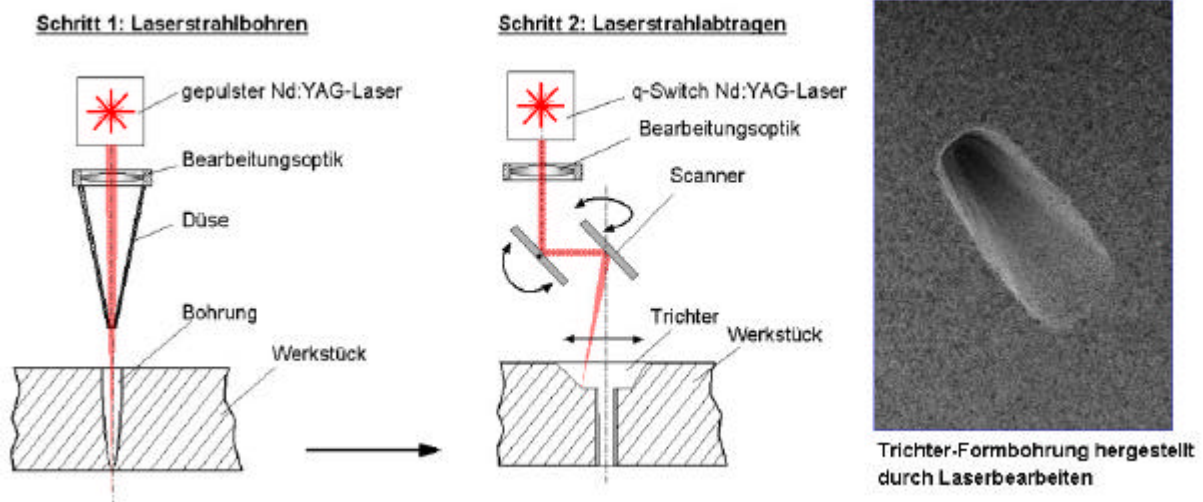


Abbildung 10: Laserbohren von Trichterbohrungen

Für solche Bohrungen eignet sich in besonderer Weise das Laserbohrverfahren, mit dem sowohl Durchgangsbohrungen als auch trichterförmige Bohrungsaustritte hergestellt werden können. Dabei wird in zwei Stufen vorgegangen, wobei im ersten Schritt die Durchgangsbohrung hergestellt und im zweiten Schritt durch Laserabtragen mit niedrigerer Laserenergie der Trichter erzeugt wird.

Die wesentlichen Vorteile des Lasers sind

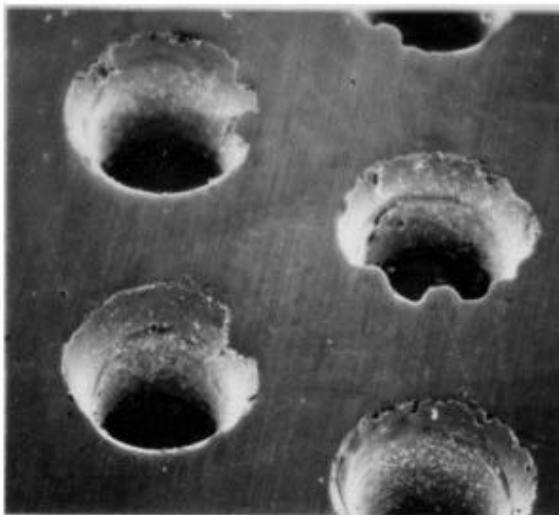
- hohe Flexibilität und Schnelligkeit
- Möglichkeit auch keramikbeschichtete Bauteile zu bearbeiten
- gute Prozessstabilität bei niedrigen Kosten
- keine Werkzeugkosten
- Linienfähigkeit der Laserbohrmaschinen

### 3.9 Elektropolieren und elektrochemisches Entgraten

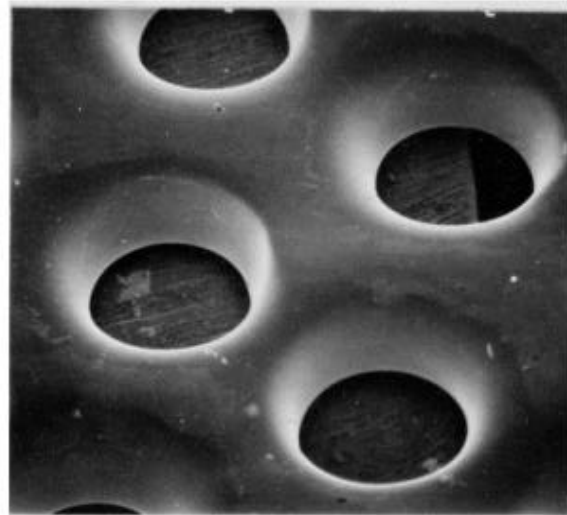
Das Elektropolieren wird zur „Verbesserung der Oberflächenfunktion metallischer Bauteile“ verwendet, wie z. B.

- Glätten und Einebnen rauher (bearbeiteter) Oberflächen
- Herstellen von Oberflächen, welche weitgehend frei sind von Bearbeitungsspannungen, eingelagerten Fremdstoffen und Mikrorissen
- Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und des Dauerfestigkeitsverhaltens
- Öffnen von Rissen für die Eindringstoffrißprüfung.

Das Entfernen von Graten mittels dieses elektrolytisch-anodischen Verfahrens ist ein erwünschter Nebeneffekt des Elektropolierens. Ziel des Verfahrens ist, Grate zu entfernen z. B. an nicht oder nur schwer zugänglichen Stellen oder bei sehr dünnwandigen Teilen. Die Elektrolytlösungen müssen auf die Werkstoffe abgestimmt sein.



**Nach dem  
Elektronenstrahlbohren**



**Nach dem  
Elektropolieren**

Abbildung 11: Elektrochemisches Entgraten der Bohrungen eines Dichtbleches

Als Anstreifdichtungen für Turbinenschaufeln werden sogenannte Honigwaben aus Nickelwerkstoffen in Gehäuse eingelötet und geschliffen. Die hierbei entstehenden Grate werden durch Elektrochemisches Entgraten entfernt.

Abbildung 11 zeigt ein Beispiel wo Grate von Elektronenstrahl gebohrten Löchern (0,5 mm Durchmesser) durch Elektrochemisches Entgraten entfernt wurden

Grenzen sind dem Verfahren gesetzt bei Werkstoffen mit Inhomogenitäten, Einschlüssen und Poren. Die ungünstige Geometrie eines Bauteiles kann bedingen, daß das Elektrochemische Entgraten nicht oder nur mit hohem Erprobungs- und Vorrichtungsaufwand durchführbar ist

### 3.10 Rotorschleifen

Sowohl konventionell gebaute, als auch als Blistk hergestellte Rotoren werden nach der Bearbeitung zu einem Modul komplettiert und anschließend bezüglich Rundlauf optimiert. Auf diese Weise wird eine optimale Spalthaltung gesichert, die sich für den Kunden durch geringe Leckageverluste und hohe Performance bezahlt macht.

Hierzu wird der montierte Rotorverband in einer speziellen Schleifmaschine aufgenommen und die Schaufelspitzen in einem Außenrundscheifprozess das Nennmaß mit einer Toleranz von weniger als 0,02mm eingestellt.

Das Schleifen sowie das anschließende Bürstentgraten erfolgt bei Schnittgeschwindigkeiten von ca. 160m/s mit Schleifscheiben und Bürstwerkzeugen auf Basis von Siliziumcarbid.

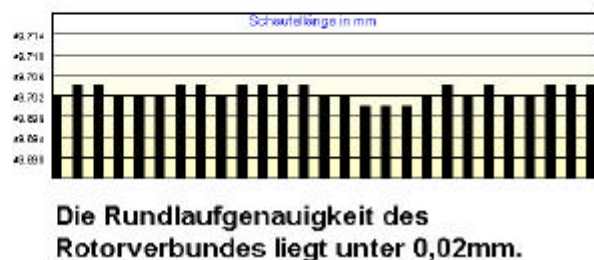
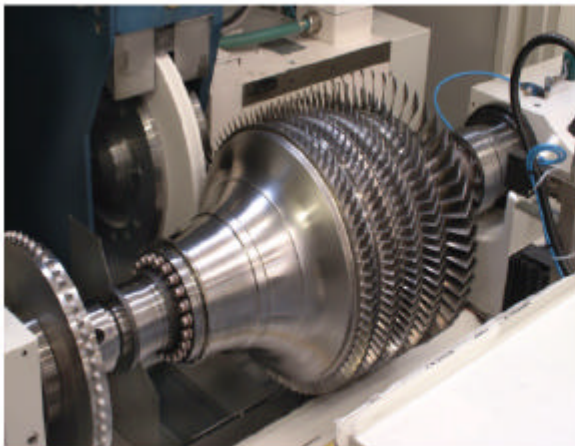


Abbildung 12: Rotorschleifen eines 5-stufigen HDV-Rotors

### 3.11 Verfestigungsstrahlen

Das Verfestigungsstrahlen mit Stahl- oder Keramikugeln dient der Einbringung von Druckeigenstress in die Bauteiloberfläche. Dazu werden meist NC-gesteuerte

Druckstrahlanlagen eingesetzt, die die Oberfläche eines Bauteils gezielt und gleichmäßig strahlen. Das mit hoher kinetischer Energie auftreffende Strahlmittel verformt die Oberfläche bis in eine Tiefe von 0,4 mm. Im Bereich der Verformung liegen hohe Druckspannungen vor. Die Verformung geht bis in die Höhe der Streckgrenze des Materials, so dass bleibende Änderungen entstehen. Kugelstrahlen hat an der Oberfläche von Bauteilen einen positiven Einfluss auf

- Festigkeit
- Härte
- Eigenspannung
- Rauigkeit
- Geometrie

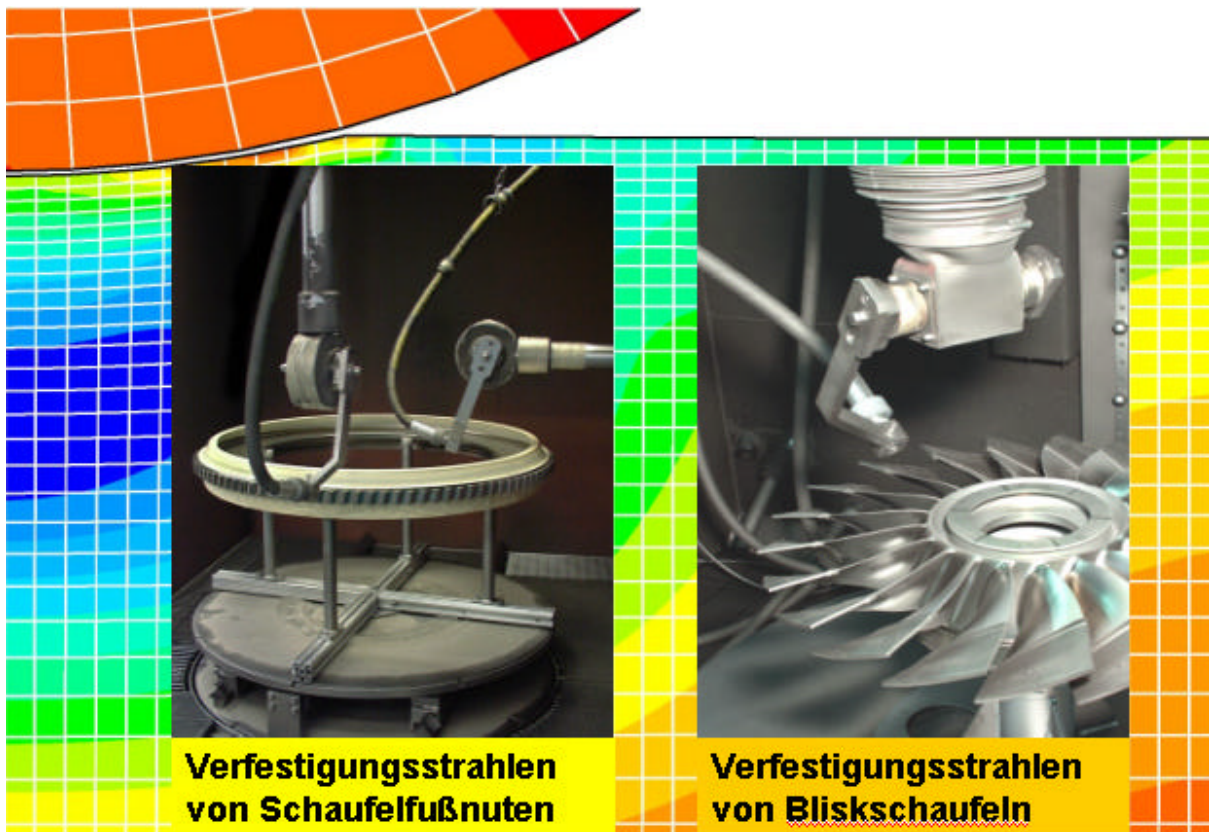


Abbildung 13: Kugelstrahlen in Simulation und Anwendung

Risse entstehen nur in den Bereichen, die durch Zugspannungen beansprucht werden. Weil Ermüdungsbrüche und Spannungskorrosionsschäden in der Regel von den Oberflächen ausgehen, wird die Bauteillebensdauer mit dem Einbringen von Druckspannungen durch Kugelstrahlen erhöht. Aufgrund der Kaltverfestigung durch das Kugelstrahlen wird zusätzlich die Oberflächenhärte des Materials angehoben

Die Vorteile des Kugelstrahlens durch die Druckeigenspannungen sind ein erhöhter Widerstand gegen Werkstoffermüdung, Korrosionsermüdung, alle Arten der Spannungsrisskorrosion und Reibkorrosion. Durch die Kaltverfestigung wird ein erhöhter Widerstand gegen interkristalline Korrosion aufgebaut.

Ein Nachteil des Verfahrens ist eine negative Beeinflussung der Oberflächentopographie. An Strömungsoberflächen von Verdichterbauteilen ist deshalb eine anschließende Feinbearbeitung wie chemisch unterstütztes Gleitschleifen oder Druckfließläppen notwendig, um die Rauheitsforderungen der Zeichnung zu erfüllen.

## 4 Ausblick

Feinbearbeitungsverfahren im Triebwerksbau nehmen aufgrund der Forderung nach weiterer Steigerung der Leistungsfähigkeit sowie der Reduzierung des Kraftstoffverbrauches eine wichtige Rolle ein. Ausgefeiltes 3D-Design von Schaufeln und integrierten Bauteilen wie Blisks zwingen die Hersteller zur Anwendung von Verfahren, die ein optimales Oberflächenfinish ermöglichen oder definierte Oberflächeneigenschaften erzeugen.

Von den heute zur Anwendung kommenden mehrstufigen Prozessen zur Herstellung von integrierten Verdichterbauteilen, wie

- Lineares Reibschweißen + adaptives Fräsen + chemisch unterstütztes Gleitschleifen
- Fräsen mit anschließendem Druckfließläppen
- Elektrochemisches Bearbeiten + Gleitschleifen

wird gefordert, dass Bauteilgeometrie und Oberflächenqualität bei gleichzeitiger Reduzierung der Produktionskosten verbessert werden.

Ziel künftiger Entwicklungen ist die bessere Abstimmung der Feinbearbeitungsverfahren auf die Vorbearbeitung, so dass zum Beispiel nach dem Fräsen bereits eine Kontur vorliegt, die durch eine weniger aufwändige Feinbearbeitung auf die gewünschte Toleranz und Oberflächenqualität hin bearbeitet werden kann.

Konkrete Entwicklungsarbeiten hierzu werden in folgenden Bereichen durchgeführt:

- Besser geglättete NC-Programme zum Fräsen von Schaufelprofilen
- Entwicklung von Parametern mit höherer Zerspanleistung zur Bearbeitung schwer zerspanbarer Nickelbasis- und Titanlegierungen
- Entwicklung präziser Schweißverbindungen zur Reduzierung des Aufwandes beim Adaptiven Fräsen
- Verbesserung der Abbildegenauigkeit Elektrochemischer Bearbeitungsverfahren

Zur Verringerung der Lebenswegkosten werden reparaturfähige Bauteile mit erneuerbaren Beschichtungen entwickelt. Dabei stellt insbesondere die gleichzeitige Oberflächenbearbeitung der Werkstoffpaarungen Metall-Keramik hohe Anforderungen an die Feinbearbeitung.

Bei Oberflächenbehandlungen wie Verfestigungsstrahlen werden die erwarteten Verbesserungen im Schwingverhalten und der Lebensdauer bereits in die Berechnungen der Bauteile einbezogen und damit das höhere Potential genutzt. Da die Eigenspannungen noch nicht zerstörungsfrei gemessen werden können, liegt hier das Hauptgewicht auf der Weiterentwicklung stabiler Prozesse bei gleichzeitiger Reduzierung des Prüfaufwandes.

Trichterförmige Kühlluftbohrungen zur Filmkühlung von Schaufeln erhöhen das Einsatzpotential bezüglich Temperatur und Lebensdauer. Immer wichtiger wird die Entwicklung der Bohrverfahren zur Herstellung von Formbohrungen in beschichtete Schaufeln. Das Bohren keramikbeschichteter Schaufeln (z.B. mit Wärmedämmschichten) wird ein Schwerpunkt künftiger Entwicklungen sein.

Die bei MTU eingesetzte Verfahrensvielfalt an Feinbearbeitungen eröffnet die Möglichkeit, das für das jeweilige Bauteil passende, kostengünstige Verfahren weiterzuentwickeln und einzusetzen. Dadurch können marktgerechte Kosten realisiert werden. Aufgrund der weiter steigenden Anforderungen an Designtreue, Performance und Effizienz werden die Feinbearbeitungsverfahren eine zunehmende Bedeutung im Triebwerksbau erlangen.

## **5 Literatur**

- [1] Dr. Klaus Steffens; Dr. Hans Wilhelm *Werkstoffe, Oberflächentechnik und Fertigungsverfahren für die nächste Generation von Flugtriebwerken – Welche Herausforderungen kommen nach 2000 auf uns zu*
- [2] Dr. Klaus Steffens; Artur Schäffler *Triebwerksverdichter – Schlüsseltechnologie für den Erfolg bei Luftfahrtantrieben*, DGLR Jahrbuch 2000