



Laserstrahl mit Kühleffekt

Um die Effizienz von Flugzeugturbinen zu verbessern, werden zunehmend leistungsfähigere Werkstoff-Komposite verwendet. Beim Fertigen der immer ausgefeilteren Kühlbohrungen zeigt der wasserstrahlgeführte Laser seine Stärken.

WÄRMEEINFLUSSZONEN werden so weitgehend vermieden.

Bild 1. Plattform zur
5-Achs-Bearbeitung
von Turbinenteilen



NITIN SHANKAR

Verkehrsflugzeuge tragen mit elf Prozent zu den Abgasausstößen im Transportsektor bei. Mit der steigenden Nachfrage nach Flugreisen werden die Emissionen von Flugzeugen bis zum Jahr 2050 um 50 Prozent zunehmen. Die Normen der ICAO (International Civil Aviation Organisation) schreiben eine vierprozentige Verringerung

> KONTAKT

HERSTELLER
SYNOVA S.A.
CH-1266 Duillier
Tel. +41 21 55 22 600
sales@synova.ch
www.synova.ch

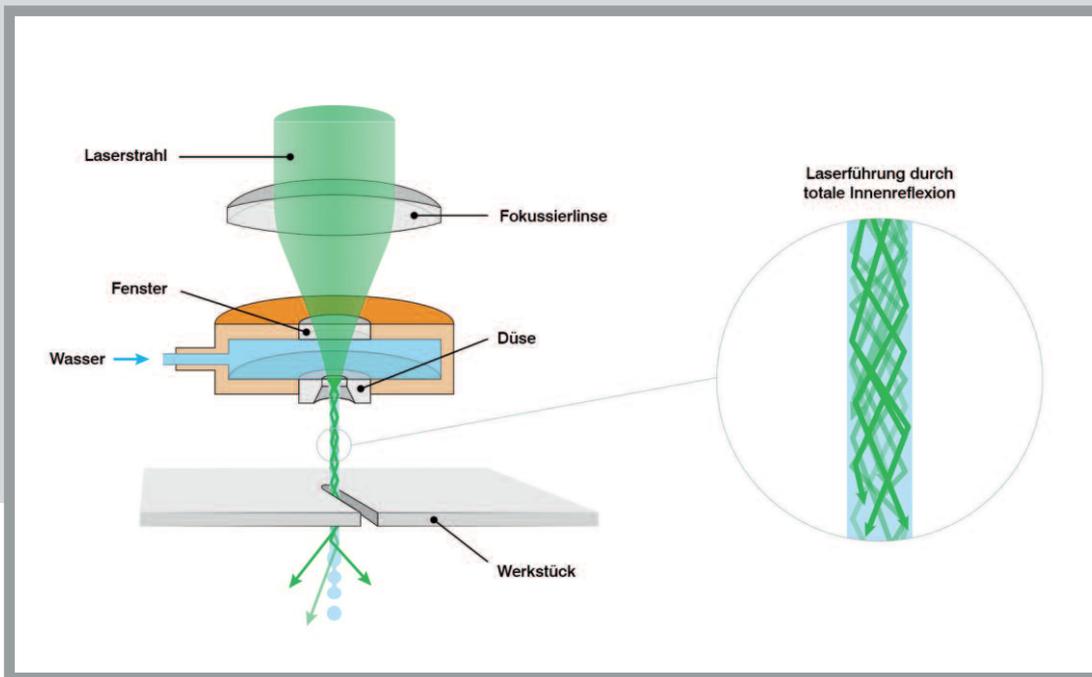


Bild 2. Der »Laser Micro-Jet« erzeugt einen Laserstrahl, der ganz von einem Wasserstrahl eingehüllt und an der Luft/Wasser-Schnittstelle vollständig reflektiert wird

des Kraftstoffverbrauchs einerseits bei neuen Verkehrsflugzeugen vor, die nach 2028 gebaut werden, und andererseits bei jenen, die sich zurzeit in der Produktion befinden und nach 2023 ausgeliefert werden. Lasertechnologien ermöglichen die Entwicklung und Herstellung von Flugzeugtriebwerken mit höheren Leistungen. Triebwerksentwickler wie GE Aviation und MTU Aero Engines sind daher auf der Suche nach verbesserten Konstruktionen und neuen Werkstoffen, um den Kraftstoffverbrauch zu verringern. Synova hat hierzu das System »Laser MicroJet« (LMJ) mit wasserstrahlgeführtem Laser entwickelt (**Bild 1**).

Triebwerke mit höheren Betriebstemperaturen

Die neue Generation von Triebwerken ist dafür konzipiert, bei Temperaturen von über 1600 °C zu arbeiten. Dabei kommt dem Luftstrom aus den Kühlluftbohrungen eine größere Bedeutung zu. Um diesen Temperaturen standzuhalten, werden die Schaufeln mit der sogenannten Filmkühlung umströmt. Hierbei gelangt die Kühlluft durch kleine Bohrungen an die Oberfläche der Turbinenschaufel und formt auf diese Weise einen schützenden Kühlungsfilm um das Schaufelprofil. Um die Kühlluft möglichst effizient zu nutzen, werden die in der Schaufel liegenden Kühlluftbohrungen immer komplexer ausgestaltet. Außerdem sind auf der Schaufel zusätzlich dünne Schutzschichten aus Keramik (Thermal Barrier Coatings, TBC) aufgebracht. Keramische Faserverbundwerkstoffe (Ceramic Matrix Composites, CMC) werden eingesetzt, um die Triebwerksleistungen mittels höherer Verbrennungstemperaturen weiter zu steigern. Diese Entwicklungen stellen neue Herausforderungen für das Fertigen von Kühlluftbohrungen dar.

Lasertechnik bei Triebwerken

Um die technischen Grenzen der konventionellen Bearbeitung von Triebwerkskomponenten zu überwinden, werden zunehmend Laser verwendet. Beim Fertigen einer Kühlluftbohrung kann der Laserstrahl die TBC-Beschichtung problemlos durchstechen. Im Falle der Funkenerosion (Electrical Discharge Machining, EDM) ist es hingegen erforderlich, die Kühlluftbohrungen schon vor dem thermischen Beschichten zu bohren. Bei bereits TBC-beschichteten Teilen muss die Keramikschicht vorher entfernt werden, was einen zusätzlichen Arbeitsvorgang mit sich bringt.

Obwohl Laser für die Bearbeitung von sehr harten Werkstoffen geeignet sind, kann die Wärmeeinbringung, die durch einen Laserstrahl erzeugt wird, unerwünschte Nebenwirkungen verursachen. Für Turbinenteile in der Luft- und Raumfahrt ist die metallurgische Qualität sehr wichtig. Zwei Effekte, die durch Laserwärme verursacht werden, können sich auf den Lebenszyklus eines Triebwerkbauteils negativ auswirken:

- Schmelzschicht (Recast Layer): Dabei handelt es sich um geschmolzenen Werkstoff, der an der Komponentenoberfläche haften bleibt.
- Wärmeeinflusszonen (Heat Affected Zone): Sie verändern die Struktur des Ausgangsmaterials durch Erhitzung während der Laserbearbeitung.

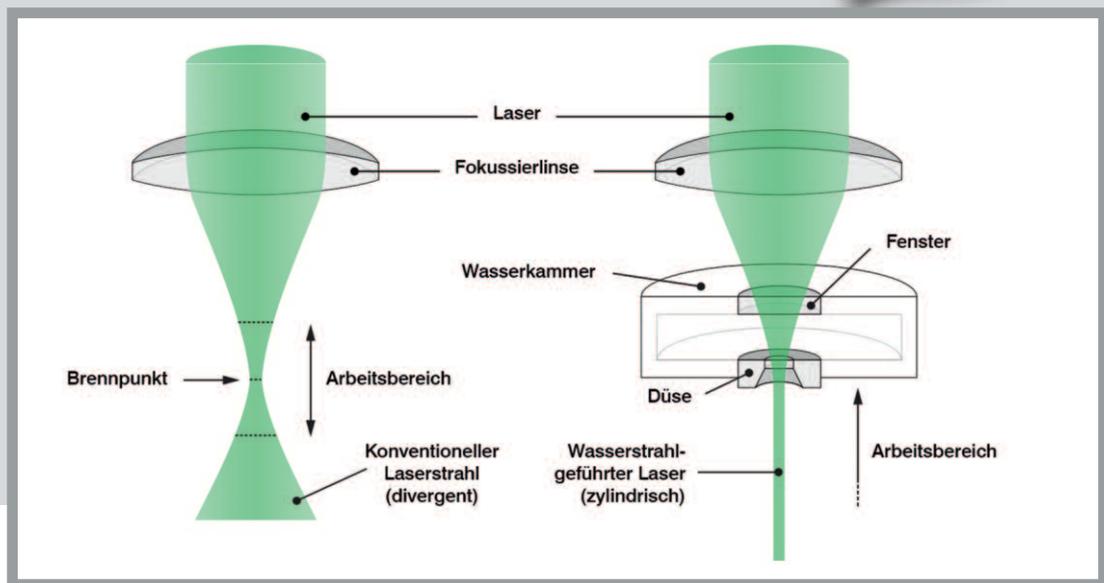
Zurzeit eignen sich verschiedene Laserprozesse für die Bearbeitung von sehr harten Werkstoffen.

Fusion von Wasser und Licht

Um Triebwerkskomponenten präzise und mit geringerer thermischer Beeinträchtigung als ein konventioneller Laserstrahl zu bearbeiten, verwendet das Unternehmen Synova aus der Schweiz das System



Bild 3. Links: Trockener Laserstrahl konvergiert zu einem Brennpunkt und divergiert anschließend. **Rechts:** Wasserstrahlgeführter Laserstrahl bleibt zylindrisch



Laser MicroJet (**Bild 2**). Hierbei wird der Laserstrahl durch eine Druckwasserkammer gelenkt und auf die Austrittsdüse fokussiert. Der aus der Düse tretende Niederdruck-Wasserstrahl führt – ähnlich einer konventionellen Glasfaser – den Laserstrahl durch Innenreflexion am Wasser/Luft-Übergang. Der Durchmesser des Wasserstrahls beträgt 30 bis 60 μm , und die Laserleistung liegt zwischen 5 und 150 W. Obwohl das Prinzip sehr einfach erscheint, erforderte es jahrelange Versuche im Labor, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten.

Der Laser MicroJet erzeugt einen Laserstrahl, der vollständig an der Luft/Wasser-Schnittstelle reflektiert wird. Dies geschieht aufgrund der unterschied-

lichen Brechzahlen von Luft und Wasser. Der Laser ist als zylindrischer Strahl vollständig vom Wasserstrahl eingehüllt, im Prinzip ähnlich wie bei einer optischen Faser.

Der LMJ-Prozess läuft in zwei Stufen ab: Die Energie der Laserpulse lässt den Werkstoff verdampfen, und zugleich kühlt und säubert das Wasser die Werkstückoberfläche in den Intervallen zwischen den Laserpulsen. Durch einen Scan-Prozess ergibt sich ein Graben, der sich mit jedem Vorschub vertieft. Im Gegensatz zu konventionellen »trockenen« Lasern schneidet der LMJ (»wasser« Laser) mit einem zylindrischen Strahl, der eine Schnitttiefe bis zu einigen Zentimetern erzeugen kann. Dies ist bei herkömmlichen Lasern nicht der Fall, wo der Laserstrahl wegen der Strahldivergenz einen begrenzten Arbeitsbereich von nur wenigen Millimetern hat. Der Strahl konvergiert zu einem Brennpunkt und geht dann auseinander (**Bild 3**). Dafür ist eine Kontrolle des Brennpunktabstands erforderlich; der Arbeitsbereich ist dennoch gering. Vorteilhaft beim LMJ ist, dass eine Fokuseinstellung entfällt und parallele Schnittfugenwände erzielt werden. Dank der Kühlwirkung des Wassers ist die Wärmeeinflusszone minimal. Dazu kommt eine hohe Abtragsrate, das heißt, der Abtrag wird sofort von der Schnittstelle weggespült.

Das »Wundermaterial«

GE Aviation und GE Power haben in der Entwicklung von keramischen Faserverbundwerkstoffen (CMCs) in Triebwerken Metallkomponenten ersetzt, die einem heißen Gasstrom ausgesetzt sind. Elemente aus keramischen Faserverbundwerkstoffen wiegen nur ein Drittel so viel wie diejenigen aus Metalllegierungen. Ihre chemischen Eigenschaften erlauben es, Triebwerke ohne Ausfallrisiko in höhere Temperaturbereiche zu bringen. Triebwerke mit CMC-Bauteilen arbeiten effizienter und tragen wesentlich zu Gewichtsreduzierungen bei. Dadurch können der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen gesenkt und die Effizienz der Flugzeugtriebwerke gesteigert werden. CMCs arbeiten bei höheren Temperaturen als Nickellegierungen, die in der Regel in Triebwerken verwendet werden. Die heutigen Metallteile erfordern umfangreiche Kühllufteinrichtungen. Diese reduzieren die Effizienz des Luftmengenstroms im Triebwerk. CMCs können mit wenig oder keiner Kühlung funktionieren, wobei zugleich die Energie effizienter umgewandelt wird. Ferner weisen sie nur ein Drittel des Gewichts von Nickel auf.

Geometrien für Kühlluftbohrungen

Eine wirksame Methode, um thermisch hoch belastete Bauteile in einem Triebwerk zu kühlen, ist die Filmkühlung. Die jetzige Forschung ist auf die optimale Gestaltung von Kühlluftbohrungen für die Kühlung von Turbinenschaufelflächen ausgerichtet. Filmkühlung wird oft über in Reihen gleichmäßig angeordneter Bohrungen angewendet, die austrittsseitig entweder rund oder geformt sind (**Bild 4**). Derartige Kühlluftbohrungen weisen eine vergrößerte Öffnung zur Oberfläche des Turbinenbauteils auf.



Bild 4. Turbinenschaufel mit Kühlluftbohrungen, die gleichmäßig und in Reihen angeordnet sind

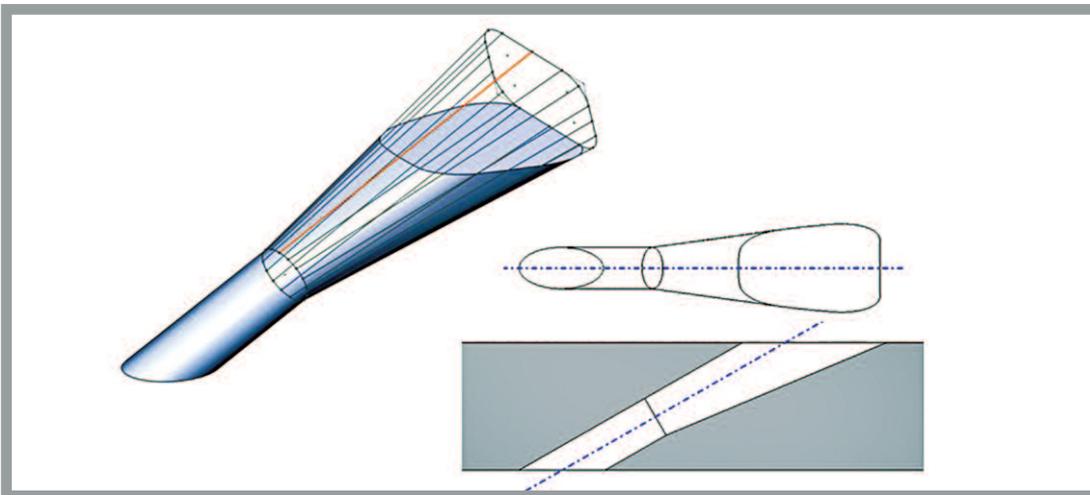


Bild 5. Kühlluftbohrung mit Durchgangsbohrung, die dezentral an der äußeren Diffusorform liegt

Im Allgemeinen verfügen alle geformten Kühlluftbohrungen über Öffnungen mit Divergenzwinkeln von 10° bis 15° auf jeder lateralen Seite sowie auf der Seite zur Oberfläche.

Verfeinerungen für Kühlluftbohrungen

Eine Weiterentwicklung betrifft den Übergang von runden Kühlluftbohrungen zu fächerförmigen. Obwohl der Einsatz von runden Kühlluftbohrungen überwiegt, verwenden die Entwickler von Turbinenschaufeln zunehmend komplexere Geometrien wie Diffusorformen. Um die Luftströmung zu verbessern, weichen Diffusorbohrungen in Form und Tiefe ab, sodass sie sich an die 3D-Form der Details eines Werkstücks anpassen. Ihre Geometrien können von konischen runden Kegeln über Quadrate bis zu Rechtecken variieren. Die Durchgangsbohrung liegt häufig nicht zentriert an der äußeren Diffusorform (**Bild 5**). Diese unterschiedlichen Kühlluftbohrungen können bestimmte Formen und Funktionen haben, müssen aber auch Machbarkeit, Funktionsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit gewährleisten.

»Die Fähigkeit, Kühlluftbohrungen, zylindrische wie Formbohrungen, wirtschaftlich und prozessstabil

Die Entwicklungspartner

GE Aviation betreibt eine langjährige Partnerschaft mit dem Triebwerkshersteller MTU Aero Engines AG. Dieser ist mit einem Anteil von vier Prozent am »GE9X«-Programm von GE Aviation für die Entwicklung des neuen Langstreckenflugzeugs Boeing 777X beteiligt. Es soll etwa 2020 auf den Markt kommen und vereint neueste Werkstoffe und Technologien. Der Kraftstoffverbrauch des Flugzeugs soll um zehn Prozent reduziert werden, und auch die CO_2 -Emissionen sollen deutlich niedriger ausfallen. MTU Aero Engines ist für die Entwicklung und Fertigung des Turbinenzwischengehäuses verantwortlich.

gemäß der Auslegung zu fertigen, ist eine Grundanforderung an eine Fertigungseinheit für Hochdruckturbinenschaufeln«, sagt Josef Kriegmair, Repräsentant in der Produktion von Turbinenschaufeln/Strukturteilen bei MTU Aero Engines. »Weiterhin ist Flexibilität sowohl beim Kühlluftkonzept als auch beim Fertigungsablauf durch die Fertigungstechnik für Kühlluftbohrungen zu ermöglichen. Bei



Bild 6. Eine »MCS 500« von Synova, die für eine 3D-Bearbeitung mit dem LMJ-System ausgestattet ist

Wasserstrahl-System zur 3D-Bearbeitung

Auf einer neu entwickelten Plattform des japanischen Werkzeugmaschinenherstellers Makino integriert die 5-achsige »MCS 500« von Synova das LMJ-System (**Bild 6**). Die Maschine wurde speziell für die 3D-Bearbeitung mittels LMJ und das Bohren von Kühlluftbohrungen ab 0,4 mm Durchmesser mit einem Länge-Durchmesser-Verhältnis bis 20:1 und einer Positionierungsgenauigkeit von 1,5 µm entwickelt. Die Bohrgeschwindigkeit in 8 mm dickem Material beträgt knapp 3 min für eine runde Kühlluftbohrung von 3 mm Durchmesser. Turbinenschaufeln aus Superlegierungen mit thermischen Schutzschichten (TBC) und Diffusoren können in einem einfachen Arbeitsvorgang ohne Risse in der Keramikbeschichtung und mit einer äußerst geringen Schmelzschicht an der

einem Laserverfahren sind dies unter anderem ein großer Arbeitsabstand, Bohrungen nah an einer Störkontur durch einen langen zylindrischen Laserstrahl platzieren zu können, ein Bohrprozess mit geringer Wärmeeinflusszone und Kühlluftbohrungen bei metallischen wie nicht metallischen Werkstoffen fertigen zu können.«

In der Vergangenheit haben Fertigungsbedingungen der Geometrie von Kühlluftbohrungen Grenzen gesetzt. Dazu zählen das Länge-Durchmesser-Verhältnis, der Achswinkel zur Tangente der äußeren Oberfläche und die Spezifikation der Bohrungsausgangsform. Die Laserbearbeitung mit einer 5-Achs-CNC-Steuerung überwindet diese Einschränkungen.

Um die hohen Effizienz- und Qualitätsanforderungen zu erfüllen, erfordert die Laserbearbeitung von Kühlluftbohrungen eine Maximierung der Bearbeitungsgeschwindigkeit bei Einhaltung der Form- und Positionsgenauigkeiten.

Metallstruktur bearbeitet werden.

GE Power hat eine MCS 500 in seiner Advanced-Manufacturing-Works-(AMW)-Anlage in Greenville (USA) installiert. Diese Maschine bohrt Kühlluftbohrungen und Diffusoren, um die Leistungen von Turbinenbauteilen zu verbessern. Das AMW-Team berichtet über Arbeitseinsparungen von bis zu sieben Stunden pro Bauteil. Aufgrund dieser guten Erfahrungen profitieren die beteiligten Unternehmen weiterhin bei der Bearbeitung von Komponenten für Triebwerke. ■ MI110496

AUTOR

NITIN SHANKAR ist selbstständiger Unternehmensberater und freier Fachjournalist in Ecublens/Schweiz; nitin@vtx.ch