

HOCHLEISTUNGSKERAMIK FÜR GAS-TURBINEN – VOM WERKSTOFF ZUM BAUTEIL

Dipl.-Ing. Willy Kunz, Dipl.-Ing. Johannes Abel, Dr. Tassilo Moritz, Dipl.-Ing. Jens Stockmann, Dr. Hagen Klemm

Rotor für eine Mikrogasturbine zur Stromerzeugung

Der Ausbau regenerativer Energien stellt eine der Hauptausrichtungen europäischer Umweltpolitik zur Verringerung des Verbrauchs fossiler Energieträger und zur Minderung von Schadstoffemissionen dar. Dabei kommt der sicheren Energiebereitstellung bei Spitzenlasten wachsende Bedeutung zu. Stationäre Gasturbinen können flexibel hohe Leistungen bereitstellen und sind aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads vergleichsweise saubere Wandler fossiler Energien. Mikrogasturbinen eignen sich besonders, um dezentral und unabhängig Energie zu wandeln und können mit einer Kraft-Wärmekopplung neben Elektrizität auch nutzbare Wärme bereitstellen. Die Kernpunkte aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bilden die Senkung der Schadstoffemissionen sowie die Minderung des Kraftstoffverbrauchs solcher Turbomaschinen. Dies kann hauptsächlich durch die Steigerung des Wirkungsgrads infolge einer Erhöhung der Arbeitstemperatur oder durch Minimierung der notwendigen Kühlleistung erreicht werden. Mit beiden Maßnahmen sind deutlich höhere Bauteiltemperaturen verbunden, bei denen metallische Werkstoffe an ihre physikalischen Grenzen stoßen. Aus diesem Grund besteht großes Zukunftspotenzial in der Substitution metallischer Komponenten durch keramische Hochleistungswerkstoffe im Heißgasbereich von Gasturbinen.

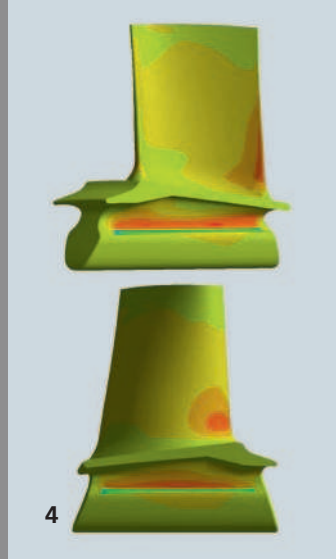
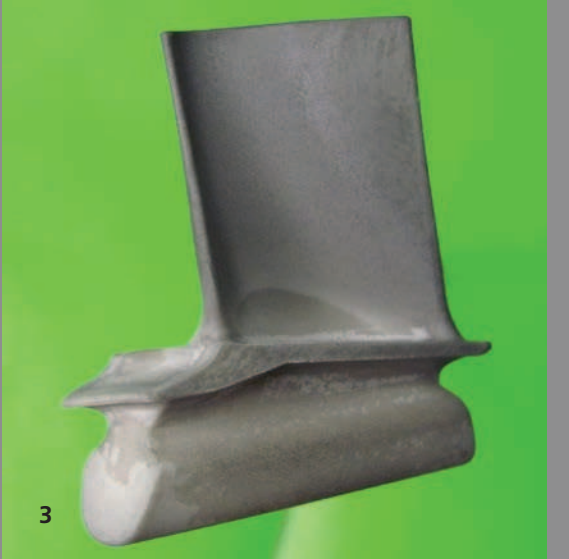
Im Rahmen eines Fraunhofer-Projekts wurde ein Radialturbinenrotor für eine Mikrogasturbine mit 30 kW_{el} aus Siliziumnitrid (Si₃N₄) entwickelt, der eine Langzeitstabilität bei bis zu 1200 °C und Vollastbetrieb aufweist und mit einem kostengünstigen Verfahren in großen Serien hergestellt werden kann.

An diesem Projekt waren die Fraunhofer-Institute IKTS (Werkstoffentwicklung, Formgebung), IPK (Werkzeugherstellung, Bauteilendbearbeitung), SCAI (Simulation, Bauteiloptimierung), IFF (Testbetrieb, Schwachgasuntersuchungen), IWS (Fügetechnik, Beschichtung) beteiligt.

Die Hochleistungskeramik Si₃N₄ eignet sich aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften von Raumtemperatur bis über 1400 °C bestens für bewegte Bauteile und höchste thermomechanische Beanspruchungen. Abhängig von der genauen Materialzusammensetzung, Sinterregime und Nachbehandlung lassen sich bestimmte Eigenschaften besonders beeinflussen. Um diese optimal auf das Beanspruchungsprofil einzustellen und gleichzeitig ein werkstoffgerechtes Bauteildesign zu erreichen, ist eine iterative Abstimmung der Materialeigenschaften mit der Bauteilkonstruktion unumgänglich.

Die Abbildung eines realitätsnahen Beanspruchungsprofils mittels simulativer Kopplung der thermischen und (strömungs-)mechanischen Beanspruchung durch das Fraunhofer SCAI bildete die Ausgangssituation für die Werkstoffentwicklung. Anhand dieser Daten wurden konkrete Entwicklungsziele definiert. Die Anpassung des Werkstoffs erfolgte durch gezieltes Design der Korngrenzenphase und führte zu einem Material mit sehr hoher Festigkeit sowie großer Oxidationsbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit bis 1200 °C.

Als ein endformnahes Fertigungsverfahren konnte der Keramikspritzguss (Ceramic Injection Molding CIM) zur Herstellung genutzt werden. Mit diesem Verfahren lassen sich große Stückzahlen mit hoher Materialausbeute effizient herstellen.



Werkstoffkennwerte Radialturbinenrotor

Einsatztemperatur	1200 °C
Bruchzähigkeit	6,8 MPa m ^{1/2}
Festigkeit	~ 1000 MPa
Ermüdungsfestigkeit bei 1200 °C	~ 500 MPa

Dabei wird eine thermoplastische Masse aus keramischen Pulvern und organischen Bindemitteln (Feedstock) bei erhöhter Temperatur und unter hohem Druck in eine Werkzeugkavität gepresst, wobei das Bauteil endkonturnah abgeformt wird. Aufgrund des großen Bauteilvolumens (etwa 148 cm³) bestehen hohe Anforderungen an das Werkzeug und den Feedstock, wobei das Entfernen des Binders die größte Herausforderung darstellte. Die Kombination aus chemischer und thermischer Behandlung des spritzgegossenen Bauteils ermöglichte im Anschluss das Sintern defektfreier Rotoren. Durch leichte konstruktive Anpassungen der am Fraunhofer IFF angebotenen und betriebsfähigen Turbine Capstone® C30 ist der Weg für den Einbau des keramischen Rotors nach Wucht- und Schleudertests geebnet.

Turbinenschaufeln für ein Hubschraubertriebwerk

Triebwerke von Flugzeugen und Helikoptern funktionieren nach der gleichen Wirkungsweise wie stationäre Gasturbinen. Die in der Turbinenstufe umgewandelte Energie wird jedoch nicht zur Strombereitstellung, sondern zur Schuberzeugung genutzt. Triebwerke werden stets in axialer Bauweise, das heißt ohne Umlenkung des Gastromes, produziert. In derartigen Turbinen ist der Rotor in der Regel kein kompaktes Bauteil, sondern ein Ring mit einzeln angebrachten Schaufeln. Innerhalb eines weiteren Projekts wurden keramische Schaufeln für die erste Turbinenstufe eines Hubschraubertriebwerks (Klimov GTD 350) entwickelt und hergestellt. Die angestrebte Einsatztemperatur des Materials betrug 1400 °C. Ähnlich der Materialentwicklung für den Radialrotor der Mikrogasturbine wurde zunächst in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPK der thermische und mechanische Belastungszustand der

Schaufel mit simulativen Methoden ermittelt und eine keramikgerechte Bauteilgeometrie entworfen. Aufgrund der außerordentlich hohen thermischen Belastung wurde ein Siliziumnitrid-Werkstoff entwickelt, der eine besonders hohe Kriech- und Korrosionsbeständigkeit aufweist.

Werkstoffkennwerte Triebwerksschaufel

Einsatztemperatur	1400 °C
Bruchzähigkeit	6,1 MPa m ^{1/2}
Festigkeit	~ 700 MPa
Ermüdungsfestigkeit bei 1400 °C	~ 450 MPa

Die filigrane Schaufel mit Freiformflächen war eine besondere Herausforderung bei der Herstellung durch 5-Achs-Simultanfräsen aus gepressten Keramikhalbzeugen. Die sehr guten mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs wie hohe Festigkeit und Härte führen dazu, dass die Fertigung durch Fräsen und Schleifen aus einem gesinterten Block sehr aufwendig und dadurch unwirtschaftlich ist. Durch die Grünbearbeitung, dem Spanen der Geometrie aus einem ungesinterten Pulverpressling, können Werkzeugverschleiß und Bearbeitungsdauer deutlich minimiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass dieses Verfahren die Fertigung derart komplexer Schaufelgeometrien ermöglicht. Nach dem anschließenden Sinterprozess mussten lediglich die Passflächen am Schaufelfuß geschliffen werden. Die so hergestellten Schaufeln werden nun durch Mitwirkung der EURO-K GmbH in ein Triebwerk eingebaut und getestet.

- 1 Radialturbinenrotor aus Siliziumnitrid.
- 2 Simulierte Temperatur- und Spannungsverteilung bei Maximalbelastung.
- 3 Triebwerksschaufel aus Siliziumnitrid.
- 4 Simulierte Spannungsverteilung bei Maximallast.

