



Christoph Damm



Andreas Gebhardt



Thomas Peschel

Einleitung

Wirbelschleppen, wie sie hinter startenden oder landenden Flugzeugen entstehen, können eine erhebliche Gefahr für nachfolgende Maschinen darstellen. Sie sind der Grund für die gegenwärtig bis zu 11 km (6,5 Meilen) großen Abstände zwischen den Flugzeugen. In dem europäischen Projekt I-WAKE wurden solche Wirbelschleppen erstmals von einem nachfolgenden Flugzeug aus mittels Lidar nachgewiesen. Die Projektpartner sind Thales Avionics (F) als Projektführer, Airbus (D), das Niederländische Nationale Laboratorium für Luft- und Raumfahrt NLR (NL), die Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt DLR (D), die Universitäten Hamburg (D) und Louvain (B), LISA Laser (D) und das Fraunhofer IOF.

Messung von Turbulenzen

Auf lange Sicht soll ein Sensor entstehen, der den Piloten vor gefährlichen Turbulenzen warnt. Detektiert wird das von Partikeln in der Luft zurückgestreute Licht. Turbulenzen führen aufgrund der Dopplerverschiebung zu einer Verbreiterung des Frequenzbereiches dieses Signals. Die geringe Signalstärke erzwingt eine große Öffnung des Detektionssystems von ca. 100 mm Durchmesser. Gleichzeitig soll ein bestimmter Winkelbereich vor der Maschine mit dem Laserstrahl in kurzer Zeit abgetastet werden.

Für diese Aufgabe wurde ein Scanner mit großer Apertur und gleichzeitig großer Ablenkgeschwindigkeit benötigt. Die Abtastung umfasst eine schnelle Vertikalbewegung mit 7,5 Hz und $\pm 1,5^\circ$ Amplitude verbunden mit einem langsameren Horizontalschwenk von 5 s Dauer und $\pm 6^\circ$ Amplitude. Dadurch ergeben sich Winkelbeschleunigungen von maximal 30 rad/s².

Bisherige Scanner setzen für die schnelle Bewegung meistens gegenläufig rotierende Prismen ein. Für die Horizontalablenkung dient ein Spiegel. Dieser Ansatz verhindert aber eine Kompensation der Flugzeugbewegungen, da die Strahlablenkung durch einen Prismenscanner einer im Wesentlichen durch die Konstruktion vorgegebenen Kurve folgt und das Prismensystem aufgrund seiner Trägheit nicht schnell und flexibel genug nachgeführt werden kann. Außerdem kommt es durch die Rollbewegung des Flugzeugs zu einer Verkippung des Bildfeldes. Um diese auszugleichen, muss auch die Horizontalablenkung schnell erfolgen können.

Scannen mittels Leichtgewichtsspiegeln

Für das von uns erstellte System wurde deshalb ein Aufbau gewählt, bei dem beide Ablenkbewegungen durch Spiegel realisiert werden. Für die vorgesehene Wellenlänge von 2 μm lassen sich solche Spiegel vorzugsweise als Metallspiegel ausführen. Die Herausforderung bei diesem Ansatz liegt in der Größe der benötigten Spiegel: Da die Detektion des Signals kohärent erfolgen soll, sind nur Abweichungen der Spiegeloberfläche von maximal 100 nm r.m.s. ($\lambda/20$ für 2 μm Wellenlänge) von der ideal ebenen Fläche zulässig. Gleichzeitig skaliert die durch die Winkelbeschleunigung induzierte Flächendeformation mit der dritten Potenz der Spiegelgröße, wenn man ein konstantes Aspektverhältnis Durchmesser/Dicke voraussetzt.

Light weight mirrors for fast Lidar-Scanners

Christoph Damm, Andreas Gebhardt, Thomas Peschel

Introduction

Wake vortices, which arise behind aircrafts, can be extremely dangerous for planes following, particularly during take-off and landing. Such vortices are the main reason for the large distances of up to 6.5 miles (11 km) that have to be kept between aircrafts. Within the European project I-WAKE such wake vortices were detected for the first time by lidar from aboard the following aircraft. The partners in this Project are Thales Avionics (F) as the consortium leader, Airbus (D), the Dutch National Aerospace Laboratory NLR (NL), the German Society for Aerospace Research (D), the universities of Hamburg (D) and Louvain (B), LISA Laser (D), and the Fraunhofer IOF (D).

Measurement of turbulences

In the long term, an onboard sensor shall be developed that warns the pilot in the case of dangerous turbulence. The sensor relies on light scattered back by aerosols. Velocity fluctuations due to turbulence cause a Doppler broadening of the frequency band of the signal. The small signal level requires a large detection system aperture with a diameter of approximately 100 mm. This beam must scan a specific area of interest in front of the aircraft.

This task required a relatively fast, large aperture scanner. Scanning is comprised of a fast vertical motion with an amplitude of $\pm 1.5^\circ$ at a frequency of 7.5 Hz and a slow horizontal sweep of $\pm 6^\circ$ within 5 s. The maximum angular accelerations are of the order of 30 rad/s^2 . Previous scanner systems mostly relied on counter-rotating prisms for the fast motion while the horizontal scan is done with a mirror. However, this approach does not allow compensation for the motion of the aircraft

because the fast scanning motion is predefined by the design of the prism system and cannot be changed fast enough because of prism inertia. Furthermore, the roll motion of the aircraft results in a tilt of the scanning area, and in order to compensate for this the horizontal scanner has to perform a fast motion.

Scanners based on light-weight mirrors

The system developed in the present project relies on mirrors to realize both scanning motions. Since the wavelength of the sensor is $2 \mu\text{m}$ such mirrors should preferably be manufactured from metal by single-point diamond turning. The challenge of this approach lies in the size of the mirrors: Since a coherent detection of the signal is used, the surface aberrations of the mirrors must be below 100 nm r.m.s. (i.e. $\lambda/20$ for $2 \mu\text{m}$ wavelength). On the other hand the surface deviations induced by the angular acceleration of the mirrors is proportional to the mirror size cubed, if one assumes a constant ratio of mirror diameter and thickness. For the required aperture and surface quality a massive mirror would possess an unacceptably high thickness and thus inertia. Consequently, a light-weight structure of maximum stiffness was necessary.

Für die vorgesehene Spiegelgröße und die geforderten geringen Oberflächen-deformationen wäre ein massiver Spiegel nur bei unakzeptabel hoher Dicke und damit großer Trägheit einsetzbar. Deshalb wurde eine möglichst steife Leichtgewichtstruktur gesucht. Der übliche Ansatz, Leichtgewichtstrukturen durch Ausfräsen der Rückseite des Spiegels zu erzeugen, hat sich in ersten Finite-Element-Berechnungen als nicht realisierbar erwiesen, da zu große Flächendeformationen auftraten. Gleichzeitig neigt ein solches Design zum Durchdrücken der Stützstrukturen bei der Bearbeitung der Vorderseite des Spiegels.

Deshalb muss die verbleibende Materialdicke relativ hoch gewählt werden, was die Masseersparnis durch die Leichtgewichtstruktur begrenzt. Zur Lösung des Problems wurde am Fraunhofer IOF ein neuartiges Verfahren zur Herstellung von Leichtgewichtstrukturen entwickelt. Dabei werden die Scannerspiegel mit Bohrungen versehen, die wie ein Gitter in zwei orthogonalen Richtungen parallel zur Spiegeloberfläche laufen.

Dadurch konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Gewichtsreduktion um 60 %.
- Die Rückseite des Spiegels bleibt als geschlossene Fläche erhalten und kann dadurch maximal zur Steifigkeit beitragen. Material wird vorzugsweise in der neutralen Fläche entnommen, wo es kaum zur Steifigkeit beiträgt.

- Vorder- und Rückseite können relativ dünn gehalten werden, da der Gewölbeeffect ein Durchdrücken der Fläche über den Bohrungen erschwert. Im konkreten Fall wurde eine verbleibende Materialstärke von 1,5 mm erreicht.
- Die geschlossene Rückfläche erleichtert das Aufspannen des Spiegels auf der Bearbeitungsmaschine.

Es wurden zwei Spiegel aus Aluminium (6061) gefertigt. Die Dicke der Spiegel beträgt jeweils 12 mm bei einem Bohrungsdurchmesser von 9 mm (Abb. 1). Es wurden die in Tab. 1 aufgeführten Parameter erreicht.

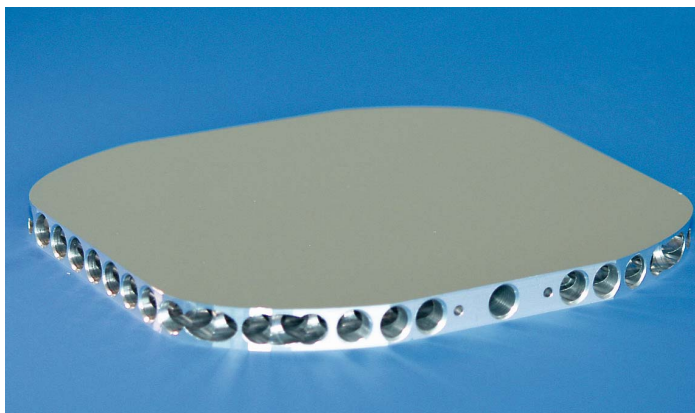


Abb. 1:
Leichtgewichtspiegel (Spiegel 1)
nach der Diamantbearbeitung.

Fig. 1:
Light weight mirror (mirror 1)
after single-point diamond turning.

Tab. 1:
Parameter.

Spiegel	1	2
Abmessungen [mm]	178 x 146	146 x 110
Masse [g]	359	208
Trägheitsmoment [g cm ²]	6960	2240
Flächenkipfung bei 30 rad/s ² (aus FEM-Berechnung s. Abb. 2) [Bogensekunden]	0,9	0,3
r.m.s. Flächenfehler bei 30 rad/s ² zur besten Fitebene (aus FEM-Berechnung) [nm]	18	5

Conventional manufacture of light-weight structures relies on milling pockets into the reverse side of the mirror. However, as initial finite-element calculations proved, this approach would result in unacceptable surface deformations for the given task. Furthermore, such a design tends to show a print-through of the light-weight structure when the mirror surface is machined. This requires that the remaining thickness of the front sheet of the mirror is relatively large but this in turn reduces the effect of light-weighting.

To solve this problem a new light-weighting technology was developed at Fraunhofer IOF. It relies on drilling holes in the form of an orthogonal grid. The holes run along the centerline of the mirror, parallel to its front surface.

Using this technology we obtained the following results:

- Weight reduction by 60 %.
- The back surface of the mirror remains untouched and can give a maximum contribution to stiffness. Material is preferably removed from the center of the mirror where it provides only marginal contributions to stiffness.

- Both, front and back sheets can be kept thin because the vault-like shape of the holes reduces print-through effects. The present design uses front and back sheets as thin as 1.5 mm in contrast to the 4 mm (minimum) thickness necessary in a conventional design.
- The intact back sheet makes machining of the mirror much easier.

Two mirrors were made from aluminium 6061. Their thickness is 12 mm while the bore diameter is 9 mm (see Fig. 1). The following parameters have been achieved (Tab. 1).

Tab. 1:
Parameters.

Mirror	1	2
Size [mm]	178 x 146	146 x 110
Mass [g]	359	208
Rotatory inertia [g cm ²]	6,960	2,240
Tilt of front surface at 30 rad/s ² (by FEM-calculation, see Fig. 2) [arc sec]	0.9	0.3
r.m.s. surface deviation wrt. an ideal plane at 30 rad/s ² (by FEM-calculation) [nm]	18	5

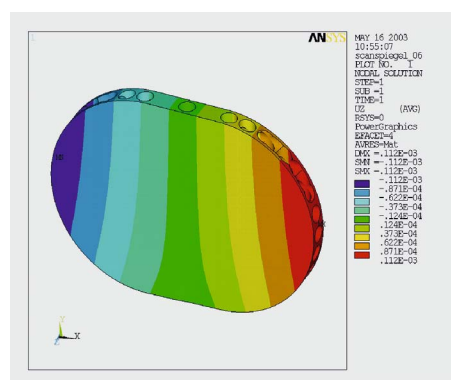


Abb. 2:
Finite-Element-Berechnung der Deformationen von Spiegel 2 unter einer Winkelbeschleunigung von 30 rad/s². Der Hauptanteil der Deformation entspricht einer Verkippung der optisch wirksamen Fläche um 0,3 Bogensekunden. Die Abweichung von der Ebene beträgt im Mittel 5 nm.

Fig. 2:
Finite-Element-calculation showing the surface deviations of mirror 2 under an angular acceleration of 30 rad/s². The majority of the deformation is due to a surface tilt of 0.3 arc sec which has no influence on the optical performance. The remaining surface deviation amounts to 5 nm r.m.s.

Die Oberflächenbearbeitung erfolgte durch Einkorn-Diamantdrehen. Es wurde ein Flächenfehler von 43 nm r.m.s. in einem Messfleck von 60 mm Durchmesser bei einer verbleibenden Rauigkeit von 7 nm Rq erreicht (Abb. 3).

Beide Spiegel wurden in jeweils ein Scannermodul (Abb. 4) eingebaut, die über Limited-Angle-Torque-Motoren der Firma Kollmorgen angetrieben werden. Die Positionsmessung erfolgt über optische Winkelencoder. Um Reibungseinflüsse weitgehend auszuschließen, wurde die Lagerung der Scannerwelle über Festkörpergelenke realisiert.

Beide Scannermodule wurden in den Experimentalaufbau integriert, der in das Versuchsflugzeug des Niederländischen Nationalen Laboratoriums für Luft- und Raumfahrt (NLR) eingebaut wurde (Abb. 5). Da der Horizontalspiegel außerhalb der Flugzeugkabine liegt, musste vom Projektpartner NLR eine spezielle Verkleidung realisiert werden. Weiterhin wurde durch die NLR die Flugtauglichkeit des Aufbaus zertifiziert.

Mit diesem Experimentalaufbau wurden im Juni 2004 erfolgreiche Messflüge im Raum Toulouse (F) durchgeführt (Abb. 6).

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung dieser Untersuchungen durch die Europäische Union im Rahmen des Projektes I-wake (Vertrag Nr.: G4RD-CT-2002-00778) sowie bei den Partnerinstitutionen im genannten Projekt für die gute Zusammenarbeit.

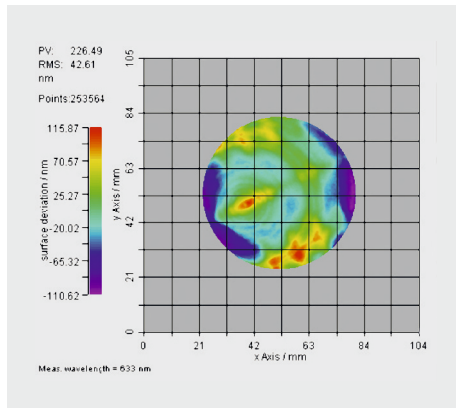


Abb. 3:
Interferometrische Messung
der Oberflächenqualität an Spiegel 1.

Fig. 3:
Interferometrical measurement of the
surface of mirror 1.

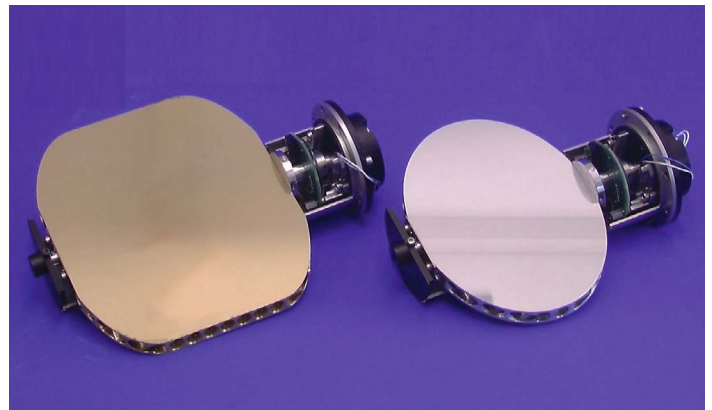


Abb. 4:
Scannermodule für den Einsatz im Flugzeug.

Fig. 4:
Scanner modules to be integrated in the demonstrator.

The mirror surfaces were produced by single-point diamond turning. A surface deviation of 43 nm r.m.s. was measured within a patch of 60 mm diameter. The remaining surface roughness amounted to 7 nm r.m.s. (see Fig. 3).

Both mirrors were integrated into scanner modules (see Fig. 4). They are driven by Limited-Angle-Torque motors made by Kollmorgen. The scanner position is monitored via optical angular encoders. To keep friction effects as small as possible, we used solid-state hinges for the scanner bearings.

Both scanner modules were integrated into a demonstrator of the sensor system which was flown on the Cessna research aircraft of the Dutch National Aerospace Laboratory (NLR). Because the horizontal scan mirror is located outside the aircraft cabin a special fairing was designed by NLR (Fig. 5). Furthermore the airworthiness of the demonstrator was certified by NLR. Using this demonstrator measurement flights were successfully performed in the Toulouse region in June 2004 (Fig. 6).

Acknowledgment

The authors would like to thank the European Commission for funding the research work of the I-WAKE project (contract number: G4RD-CT-2002-00778). Furthermore we would like to thank all partners in the project for their co-operation.



Abb. 5: Scanner nach dem Einbau in das Forschungsflugzeug des Niederländischen Nationalen Laboratoriums für Luft- und Raumfahrt (NLR). Der sichtbare Laserstrahl gehört zu einem Justierlaser.

Fig. 5: Scanner system after integration into the research aircraft of the Dutch National Aerospace Laboratory (NLR). The visible beam is generated by an adjustment laser.



Abb. 6: Das Versuchsflugzeug der NLR während der Flugtests.

Fig. 6: The NLR research aircraft during one of the measurement flights.