

OPTISCHE DEFORMATIONSMESSUNG AM PROPELLER UND HUBSCHRAUBERROTOR IM FREIFLUG

F. Boden, A. Torres, B. Stasicki
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Bunsenstrasse 10
37073 Göttingen
Deutschland

Zusammenfassung

Beim Entwurf von Fluggeräten aller Art stellt sich immer wieder die Frage nach den auftretenden Lasten und damit einhergehend nach den Deformationen der Tragstruktur im Flug. Des Weiteren ist die Sicherheit gegenüber Flattern zu überprüfen. Um diese Aufgaben zu erfüllen, wird das Fluggerät für den Flugversuch an den entsprechenden Stellen aufwendig mit einer großen Anzahl Sensorik und dementsprechender Verkabelung ausgerüstet. Eine Verringerung dieses Aufwandes, welcher oftmals mit einer starken Veränderung der Basisstruktur einhergeht, wird daher von den Fluggeräteherstellern stark forciert.

Im Falle rotierender Teile der Struktur (z.B. Hubschrauberrotorblätter und Propellerblätter) stellt sich die Applikation von ausreichender Sensorik als besonders schwierig und zum Teil sogar als nicht realisierbar heraus. Eine viel versprechende Lösung bietet hierbei die optische Messtechnik. Am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR Göttingen wurde ein optisches 3D-Messsystem zur Erfassung der auftretenden Deformationen im Flugversuch entwickelt. Das System basiert auf digitaler Bildkorrelation und wurde schon erfolgreich im Windkanal, sowie bei ersten Flugversuchen im Rahmen des EU-Projektes AIM-Advanced Inflight Measurement Techniques erprobt. Im vorliegenden Artikel soll das optische Messsystem kurz vorgestellt werden. Neben einer Systembeschreibung soll vor allem auf die Randbedingungen für optische Messungen im Flugversuch und die Lösung auftretender Probleme eingegangen werden. Bisherige Messkampagnen an dem Propellerflugzeug Piaggio P180 und am Hubschrauber EC-135 ACT/FHS sollen hierbei als praktische Beispiele dienen.

1. EINFÜHRUNG

Im Rahmen der Auslegung von Propellern und Hubschrauberrotoren sind die im Flug auftretenden Lasten und die daraus resultierenden Deformationen von großem Interesse. Da die Effektivität eines Flugzeugpropellers oder eines Hubschrauberrotorsystems, und damit letztlich auch die Effizienz des Fluggerätes, stark von dieser Deformation abhängig ist, sollte diese möglichst gering gehalten, bzw. durch ein optimales Design der Propeller- oder Rotorblätter ausgenutzt werden. Darüber hinaus ist die Kenntnis des momentanen, tatsächlichen Anstellwinkels über die gesamte Länge des Blattes im Flug sowohl für den Flugzeugentwickler, als auch für den Pilot von großem Interesse. Dieser Wert war bis jetzt im Flug nur schwierig, beziehungsweise nicht messbar. Zur hochgenauen flächenhaften Messung der Deformation am rotierenden Flugzeugpropeller und am Hubschrauberrotor entwickelt die Abteilung Experimentelle Verfahren am DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen deshalb ein geeignetes optisches Messsystem. Die optischen Messtechniken „Quantitative Video Technique“ (QVT) und „Image Pattern Correlation Technique“ (IPCT), welche hierbei eingesetzt werden, bieten die Möglichkeit der berührungsfreien Deformationsermittlung mit hoher Genauigkeit.

Im Rahmen des durch die EU geförderten Specific Targeted Research Projects „AIM – Advanced Inflight Measure-

ment Techniques“ [1] erfolgte die erste Erprobung der optischen Deformationsmessung mittels IPCT im Freiflug. Hierbei konnte das Messsystem unter den Bedingungen industrieller Flugversuche erprobt und an die Bedürfnisse der Industrie besser angeglichen werden.

Im Folgenden wird das Messsystem kurz beschrieben und anhand der durchgeführten Messungen eine erste Abschätzung der Einsetzbarkeit für den Flugversuch getroffen.

2. DAS MESSSYSTEM

Um ein hochgenaues berührungsfreies Deformationsmesssystem für Flugzeugpropeller und Hubschrauberrotoren im Flugversuch zu entwickeln, wurde von der Abteilung Experimentelle Verfahren am DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen die Messtechnik IPCT (Image Pattern Correlation Technique) [2] [3] zusammen mit bereits früher im DLR entwickelten und patentierten Videostroboskop [4] kombiniert und auf die hohen Anforderungen im Flugversuch angepasst.

2.1. Die Hardware

In BILD 1 sind die Komponenten eines IPCT-Messsystems am Beispiel einer Deformationsmessung an



BILD 1: Messequipment zur Durchführung einer IPCT – Messung (Beispiel: Hubschrauberrotor; 1 – Kamera 1; 2 – Kamera 2; 3 – Grundträger; 4 – Blitzlampe; 5 – Reflexlichtschranke; 6 – unregelmäßiges Punktmuster auf Rotorblatt; 7 – Videostroboskop)

einem Hubschrauberrotorblatt zu sehen. Die beiden Kameras (Position 1 und 2 in BILD 1), sind auf einer sehr stabilen Basis (Position 3 in BILD 1) am Hubschrauber angebracht. Die Basis besteht aus einem massiven Grundträger mit robusten Getriebeneigern zur komfortablen Einstellung der Kamerablickrichtung. Der Blickwinkel der Kameras auf das Rotorblatt liegt im optimalen Fall bei ca. 40° , der Stereowinkel zwischen den Kameras bei ca. 30° .

Der rund $1000 \times 300 \text{ mm}^2$ große und von beiden Kameras beobachtete Bereich auf dem Rotorblatt (Position 6 in BILD 1) ist mit einem zufälligen Punktmuster versehen. Die Steuerung der Kameras (synchrones Auslösen, Belichtungszeit, Verstärkung) sowie die Einstellung der gewünschten Phasenlage des Bildaufnahmepunktes im Bezug zum Messobjekt wird mit Hilfe eines am DLR entwickelten Messsystems - dem so genannten Videostroboskop (Position 7 in BILD 1) - durchgeführt. Das Videostroboskop [4] besteht aus einem PC mit eingebautem Framgrabber und integrierter Phasenschieberkarte [2] sowie einer speziellen Steuersoftware. Im Falle der Messungen am Hubschrauber wurde eine Reflexlichtschranke (Position 5 in BILD 1), welche auf einen Reflektorstreifen am Rotorkopf zielte, genutzt, um pro Umdrehung einen definierten Impuls (z.B. Rotormulldurchgang) zu erhalten. Dieser Impuls erlaubt es, mit dem Phasenschieber die Drehfrequenz des Rotors zu ermitteln, anschließend die Kameras zu einem definierten Phasenwinkel (z.B. 120° nach Passieren der Reflexmarke) auszulösen und damit eine phasenstarre Aufzeichnung des Rotorblattes zu ermöglichen. Der Phasenschieber arbeitet frequenzunabhängig. Dadurch wird die Lage des Objektes auf dem Bild von Drehzahländerungen nicht beeinflusst. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit, mit welcher das Blatt das Messvolumen passiert, sind sehr kurze Bildintegrationszeiten (Belichtungszeiten) erforderlich ($50 \mu\text{s}$ und weniger). Bei größeren Belichtungszeiten würde eine Bewegungsunschärfe auftreten, welche sich letztendlich negativ auf die Genauigkeit der Auswertung auswirkt.

Um bei den erforderlichen kurzen Verschlusszeiten noch genügend Belichtung zu gewährleisten, wird eine Blitzlampe (Position 4 in BILD 1) zum Aufhellen des Messbereiches verwendet. Diese Blitzlampe wird, wie auch die Kameras, vom Videostroboskop getriggert. BILD 2 zeigt eine Beispielaufnahme des vorbeieilenden Rotorblattes (Drehfrequenz des Hubschrauberrotors $6,6 \text{ Hz}$).

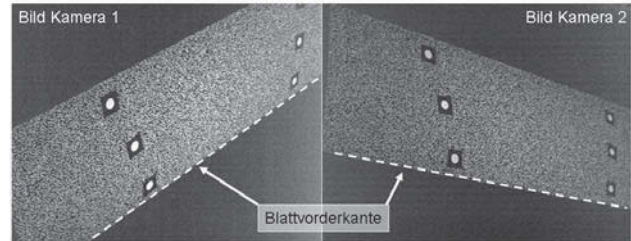


BILD 2: aufgenommene Bilder der Messkameras

Es ist zu sehen, dass die Bilder eine ausreichende Ausleuchtung besitzen aber keine Bewegungsunschärfe auftritt. Die aufgezeichneten Bilder werden im Anschluss an die Messung mit einer geeigneten IPCT-Software prozessiert, worüber sich die 3D-Oberfläche des untersuchten Objektes berechnen lässt.

2.2. Die Image Pattern Correlation Technique

Die „Image Pattern Correlation Technique“ dient der Messung der 3D-Geometrie und der 3D-Deformation von beliebigen Objekten. Die Messtechnik basiert auf der Anwendung photogrammetrischer Verfahren in Kombination mit Auswertalgorithmen der „Particle Image Velocimetry“ (PIV). BILD 3 zeigt schematisch die Funktionsweise der IPCT bei Verwendung eines Zweikamerasystems (Stereoanordnung) zur Messbilderfassung. Im ersten Schritt wird die zu untersuchende Oberfläche (in der Abbildung als Höhenverteilung $H(X,Y)$ bezeichnet), welche mit einem zufälligen Punktemuster versehen ist, mit den Kameras aus zwei verschiedenen Blickrichtungen aufgezeichnet.

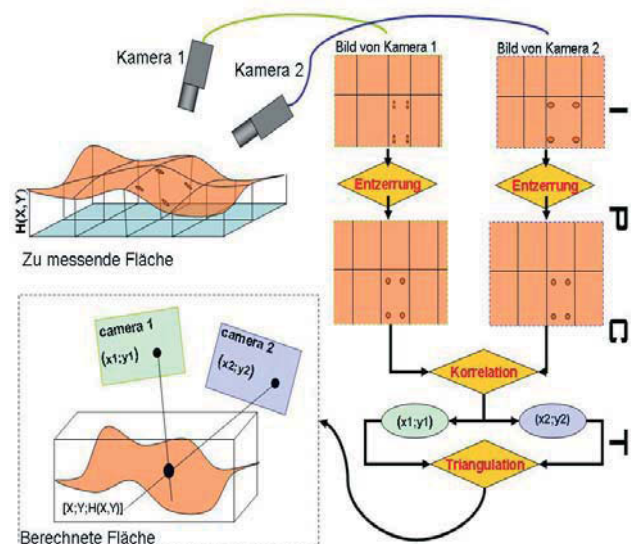


BILD 3: schematische Darstellung der 3D Image Pattern Correlation Technique

Die resultierenden Kamerabilder werden entzerrt und es erfolgt die Identifizierung ähnlicher Punktmusterbereiche in beiden Bildern mit Hilfe eines Korrelationsalgorithmus. Als Ergebnis liegen die Bildkoordinaten gleicher Punktmusterbereiche in Kamerabild 1 (x_1, y_1) und in Kamerabild 2 (x_2, y_2) vor. Bei bekannter innerer und äußerer Orientierung beider Kameras, lassen sich aus den ermittelten Bildkoordinaten über Zentralprojektion und Triangulation die 3D-Raumkoordinaten des identifizierten Punktmusterbereiches errechnen. Durch wiederholte Anwendung dieses Algorithmus auf alle Punktmusterbereiche lässt sich schließlich die komplette 3D-Oberfläche mit hoher Genauigkeit rekonstruieren.

Die Genauigkeit des Messverfahrens liegt in der Größenordnung von 0,01 % des Beobachtungsgebietes (z.B.: 0,1 mm auf 1 m Messbereich). In BILD 4 ist eine Genauigkeitsabschätzung nach [8] für den Messaufbau in BILD 1 über dem Rotordurchmesser für verschiedene Brennweiten $f=8\text{ mm}$, $f=12,5\text{ mm}$ und $f=16\text{ mm}$ dargestellt. BILD 4 a) gibt die Genauigkeit in Z-Richtung dz , also senkrecht zum Rotorblatt in Ruhe an. BILD 4 b) und BILD 4 c) stellen die Genauigkeiten in Spannweitenrichtung dx und Sehnenrichtung dy dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Genauigkeiten mit zunehmendem Abstand der Kamera zum Beobachtungsgebiet abnehmen (d.h. dz , dx und dy größer werden). Dies wird durch den flacher werdenden Blickwinkel verursacht. Weiterhin ist zu sehen, dass durch Verwenden einer größeren Kamerabrennweite die Genauigkeit verbessert werden kann. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich mit steigender Brennweite die Größe des Messbereiches verkleinert. Im Falle der ersten Messungen am Hubschrauber wurden eine Kamerabrennweite von 12,5 mm und ein Messbereich von ca. 1 m, beginnend bei 2 m Rotorradius (R), ausgewählt, wodurch eine Genauigkeit der Rotorblattdurchbiegung (dz) von 0,3 mm bis 0,6 mm erreicht werden konnte.

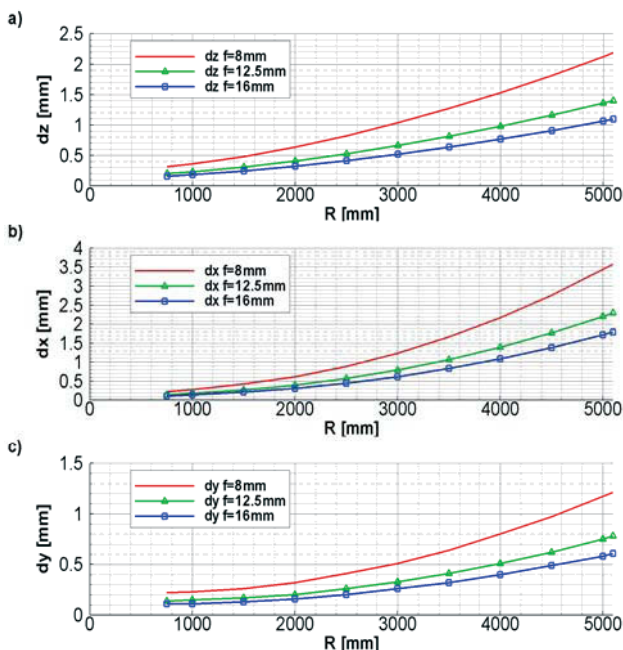


BILD 4: Genauigkeitsabschätzung nach [8] für Installation am Hubschrauber wie BILD 1

Anhand eines Vergleiches der berechneten 3D-Fläche in einem unbelasteten Referenzzustand mit einem belasteten Zustand (z.B. Durchbiegung aufgrund erhöhter Flächenlast) können Verschiebungsvektoren und somit Deformationen abgeleitet werden. Sind die Materialeigenschaften bekannt, lassen sich daraus die lokalen Spannungen errechnen.

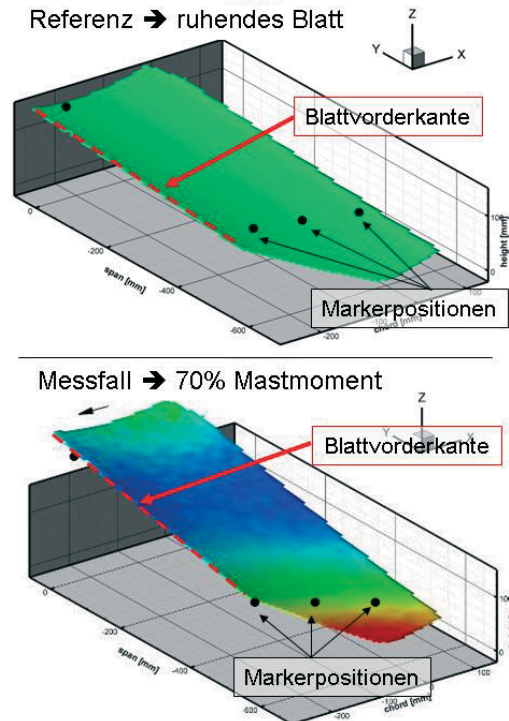


BILD 5: Beispielhafte IPCT-Auswertung unter Verwendung der Markerdetektion

Da der Korrelationsalgorithmus nur für relativ geringe Verschiebungen mit ausreichender Genauigkeit funktioniert und neben den lokalen Deformationen durchaus große Starrkörperbewegungen des beobachteten Bereiches¹ erfolgen können, wird neben der IPCT-Auswertung auch eine Markerdetektion durchgeführt. In BILD 2 sind deutlich 6 Punktmarker zu sehen, welche in beiden Kamerabildern detektiert werden und nach Berechnung ihrer 3D-Koordinaten als Stützpunkte für die IPCT-Fläche dienen. BILD 5 zeigt eine beispielhafte IPCT-Auswertung von Messbildern unter Verwendung der vorhandenen Marker. Die obere Fläche stellt die Unterseite des ruhenden Hauptrotorblattes dar und dient als Referenzfläche. Auf dieser Referenzfläche sind die Markerpositionen bekannt. Bei der Auswertung der weiteren Messbilder erfolgt zuerst die Detektion der Marker und die Berechnung deren neuer Lage im Raum. Anschließend wird die Referenzfläche so verschoben und gedreht, dass eine größtmögliche Übereinstimmung der Marker auftritt. Aus dieser Transformation lässt sich die Starrkörperbewegung berechnen. Ausgehend von der neuen Referenzfläche bestimmt die Software die deformierte Oberfläche und somit auch die lokale Verformung. In BILD 5 unten sind an der Oberfläche so-

¹ Diese Starrkörperbewegungen resultieren aus der Deformation des Rotorblattes im Bereich des Blattanschlusses. Beim EC-135 ist der Blattanschluss gelenklos durch einen elastischen Biegebalken realisiert, welcher eine gewisse Blattausslenkung ermöglicht [9].

wohl die Starkörperbewegung des Blattes (höhere Blattspitzenposition), als auch die lokale Deformation (Farbkodierung) zu erkennen. Da die Markerdetektion erheblich schneller und einfacher funktioniert als die IPCT-Auswertung, kann sie auch verwendet werden um eine zeitnahe Aussage über den aktuellen tatsächlichen Blattanstellwinkel zu geben. Damit optische Messtechniken wie die IPCT mit hoher Genauigkeit angewendet werden können, sind Messbilder mit ausreichend guter Qualität erforderlich. Um diese zu erhalten sind die Randbedingungen der Messumgebung und die Beschaffenheit des Messobjektes selbst maßgeblich beteiligt. Im Folgenden werden einige der Randbedingungen im Flugversuch kurz beschrieben.

3. RANDBEDINGUNGEN IM FLUGVERSUCH

Die Messtechnik IPCT wurde bisher mit sehr guten Ergebnissen im Labor und in verschiedenen Windkanälen angewendet. Die Randbedingungen in diesen Umgebungen erlauben es, die geometrische Anordnung der Kameras und der Beleuchtung zu optimieren. Außerdem sind die Kameras keinen nennenswerten mechanischen Störeinflüssen ausgesetzt. Erfolgt nun der Schritt vom Windkanal zum Flugversuch, ist der Experimentator mit völlig neuen Randbedingungen weitab vom optimalen Laborversuch konfrontiert. Im Folgenden sollen einige im Flugversuch auftretenden Probleme und deren Lösung beschrieben werden.

3.1. Hohe Beschleunigungen und Vibrationen



BILD 6: Kamerabefestigung in der Piaggio P 180

Ein Fluggerät bewegt sich bekanntlich frei im Raum. Aufgrund dessen können zum Teil sehr hohe Beschleunigungen in allen Raumrichtungen auftreten. Bei engen Kurven und bei Abfangmanövern, bei welchen die Deformationsmessung angewendet werden soll, treten leicht Beschleunigungen von 2 bis 3 g auf. Neben den hohen Beschleunigungen treten bei Hubschraubern und bei Propellerflugzeugen auch starke Vibrationen auf. Diese führen bei ungenügend steifer Befestigung der Kameras zu ungewoll-

ten Bewegungen selbiger. Im günstigsten Fall bewegen sich beide Kameras gemeinsam, sodass nur eine Verschiebung des Sichtbereiches auftritt. Im ungünstigen Fall bewegt sich das Beobachtungsgebiet hierbei aus dem Sichtbereich. Tritt jedoch eine Relativbewegung der Kameras zueinander auf, führt dies zur Dekalibrierung des Kamerasystems und damit zu hohen Messungenauigkeiten.

Um derartige Kamerabewegungen zu verhindern, oder zumindest in einem Minimalbereich zu halten, sollten sehr steif ausgeführte Kamerabefestigungen verwendet werden. Die freien Hebelarme sind dabei möglichst gering zu halten. BILD 6 zeigt ein Beispiel für eine geeignete Kamerabefestigung. Hierbei wurde aus massiven Aluminium Strangpressprofilen ein Grundrahmen gefertigt, welcher die verwendeten kleinen und leichten Kameras (Gewicht ca. 300 g) fest in der gewünschten Position hält. Lassen sich die Kamerabewegungen auf diese Weise nicht gänzlich unterbinden, so liefert die Markerdetektion eine weitere Möglichkeit zur Korrektur dieser Bewegung. Die Idee dabei ist die Verwendung der Marker auf steifen Bereichen der Objektoberfläche zur Rekalibrierung der Kameras und zum Ermitteln der Starrkörperbewegung. Das Verfahren wurde von [5] eingehend untersucht und von der Fa. La-Vision in Software umgesetzt.

Zum Vermeiden der Bewegungsunschärfe, welche aufgrund der Vibrationen auftreten kann, sind möglichst kurze Belichtungszeiten und die Verwendung einer Blitzlampe in Betracht zu ziehen. Um dies zu erreichen wurde zum einen das vom DLR entwickelte Videostroboskop zur genauen Synchronisierung der Bildaufnahme und der Blitzauslösung verwendet, zum anderen wurden die mit dem System kompatiblen Kameras vom Typ JAI CV-A1 und JAI CV-A2 so umgebaut, dass sie mit sehr kurzen Belichtungszeiten und mit stabiler Verschlussfunktion betrieben werden können [6]. Um einen Datenverlust während des Fluges zu verhindern, wurden vibrationsresistente Flash-Datenträger, sowie integrierte unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV), die im Falle von einer Unterbrechung noch bis zu 10 Minuten das gesamte System voll funktionsfähig erhält, eingesetzt.

3.2. Schwierige Sichtbedingungen

Aufgrund der geometrischen Bedingungen am Fluggerät treten zumeist sehr flache Blickwinkel zwischen Kamera und Messobjekt, sowie kleine Stereowinkel zwischen den beiden Kameras auf. Des Weiteren ist der Schwenkbereich der Kamera aufgrund der kleinen Fenster stark eingeschränkt. BILD 7 zeigt beispielhaft die Sichtbedingungen auf den P180 Propeller. Oftmals sind auch verdeckende Bauteile oder die starke Krümmung der Oberflächen begrenzende Faktoren. Stereowinkel von weniger als 15° sind oftmals der Fall. Die kleinen Blickwinkel gehen oft mit großen Beobachtungsabständen einher und resultieren in Genauigkeitseinbußen. Damit bei den großen Abständen das Muster gut genug aufgelöst werden kann sind oft hohe Brennweiten erforderlich, welche zumeist einen geringen Tiefenschärfebereich besitzen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, können zum einen spezielle Muster mit verschiedenen Punktgrößen [7] oder Kameras mit höherer Auflösung verwendet werden. Nach Möglichkeit bietet auch ein Verlagern der Kamerapositionen Potential zur Verbesserung der Sicht.

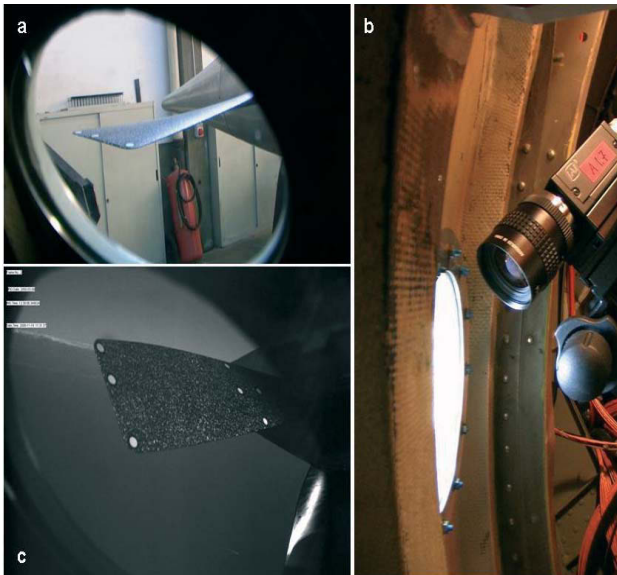


BILD 7 Kamerasichtbedingungen (a - Blick aus dem Gepäckfach; b - Kamera im Gepäckfach; c - Kamerabild im Flug)

Für den Test an der Piaggio P180 wurden die Kameras im Gepäckfach, welches sich direkt neben dem Propeller befindet und nicht in der Kabine, montiert. Die Gepäckfachtür wurde anschließend mit Fenstern versehen.

Beim Hubschrauber konnte hingegen ein Außenanbau mit freier Sicht auf den Rotor realisiert werden.

Als weitere Probleme in Hinblick auf die Sichtbedingungen sind störende Reflexe und ungleichmäßige Beleuchtung während des Fluges zu erwähnen. Hierbei schaffen optische Filter, eine matte Beschichtung der Oberflächen und Flugtage bei geeignetem Wetter Abhilfe. Ist der Einsatz einer Blitzlampe nicht möglich und treten dennoch stark schwankende Beleuchtungsverhältnisse auf, so bietet das Videostroboskop eine automatische Belichtungsanpassung, welche die Kameraparameter im Messbetrieb so variiert, dass der Dynamikbereich der Kamera optimal genutzt wird.

3.3. Zugänglichkeit, Datensynchronisierung, Umwelteinflüsse und Zertifizierung

Neben den flachen Blickwinkeln führen die geometrischen Abmaße der meisten Fluggeräte auch zu einem Problem der Zugänglichkeit der einzelnen Komponenten des Messsystems und der zu beobachtenden Bereiche. Befinden sich zum Beispiel die Kameras auf dem Rumpf, der Messrechner im Frachtraum und muss die Kalibrierplatte in den Bereich des Außenflügels gehalten werden, so erweisen sich die Einstellung der Kameras und die optimale Positionierung der Kalibrierplatte bei nicht vorhandener gleichzeitiger Sicht auf das Kamerabild schnell als große kommunikative und bewegungsintensive Herausforderung. Dieses Problem wurde durch die Verwendung eines Laptops mit einer „Remote Desktop Verbindung“ zum Steuern des Messrechners gelöst und ermöglicht eine schnelle und komfortable Kameraeinstellung und Kalibrierung. Ist die Zugänglichkeit der Kameras nicht gegeben, z.B. zum Nachstellen während des Fluges, ist eine Fernsteuerung der Kameras unerlässlich.

Aufgrund der hohen Kosten für Flugversuche ist es unabdingbar möglichst viele Parameter in wenigen Flugversuchskampagnen zu ermitteln. Damit diese gemessenen Parameter mit einander in Bezug gesetzt werden können, ist eine hochgenaue Datensynchronisierung unabdingbar. Eine gute Basis für die Synchronisierung bietet die GPS-Zeit oder in sofern an Bord angeboten ein IRIG-B Zeitstempel. Um eine Synchronisierung der Bilddaten mit der Flugmessanlage zu ermöglichen wurde deshalb ein GPS-Empfänger und ein IRIG-B-Dekoder in das DLR-System integriert [6].

Umwelteinflüsse spielen beim Einsatz von Messgeräten im Flugversuch eine große Rolle. Die Geräte müssen sowohl große Druck- als auch Temperaturunterschiede (z.B.: - 60 °C bis + 60 °C) unbeschadet überstehen können. Die großen Temperaturunterschiede können schnell dazu führen, dass sich Kondenswasser bildet. Das Messequipment muss deshalb auch in einer feuchten Umgebung zuverlässig funktionieren. Im Falle von Außenanbauten sind teilweise aerodynamische Umhausungen vorzusehen, wobei am Fluggerät vorhandene Befestigungspunkte bevorzugt werden sollten. Die Anbauten sind nach Möglichkeit klein und leicht zu halten.

Ein wichtiger Punkt, welcher bei der Durchführung von Flugversuchen nicht unterschätzt werden darf, ist die Zertifizierung der Messeinrichtung für den Einsatz im Fluggerät. So sind neben der elektromagnetischen Verträglichkeit der Geräte und der Festigkeit der Tragkonstruktion oftmals auch Nachweise der Brandsicherheit, Vibrationsresistenz und der nicht auftretenden Beeinträchtigung der Flugeigenschaften des Fluggerätes gefordert. Um den Zertifizierungsaufwand gering zu halten, wurde das System mit möglichst einfachen, leicht nachzuweisenden Konstruktionen bzw. bereits für die Luftfahrt zugelassenen Baugruppen aufgebaut.

4. MESSKAMPAGNEN

Im Folgenden sind einige Messungen und beispielhafte Ergebnisse, welche mit dem vorgestellten Messsystem erzielt wurden, kurz aufgeführt. Die Tests haben die gute Anwendbarkeit der Messtechnik IPCT mit der Aufzeichnung durch das Videostroboskop demonstriert.

4.1. EC-135 ACT/FHS - Bodentest

Bei diesem Versuch sollte das IPCT-Messsystem zum Ermitteln der lokalen Deformation eines Hauptrotorblattes am Hubschrauber erprobt werden. Das Hauptziel dieser Messung lag in der Eignungsprüfung des Messaufbaus für die Messaufgabe. Die optische Triggerung des Videostroboskops mittels einer Reflexlichtschranke, die Verwendbarkeit einer akkubetriebenen Blitzlampe und die mit dem Setup erreichbare Bildqualität wurden hierbei getestet.

BILD 8 zeigt den Aufbau für den Bodentest. Der Hubschrauber wurde hierfür an den Boden gefesselt um ein Abheben zu verhindern und somit eine Messung ohne Flugfreigabe des Messsystems zu ermöglichen. Der Kameraträger, welcher in BILD 1 zu sehen ist, wurde an den Seilwindenfixpunkten des Hubschraubers befestigt. Das Videostroboskop, welches der Steuerung und Stromversorgung der Kameras, der Blitzlampe und der Reflex-



BILD 8: Bodentest zur IPCT-Messung der Rotordeformation am Hubschrauber

lichtschranke diente, war außerhalb des Hubschraubers untergebracht und elektrisch vom Hubschraubersystem getrennt. Die bei dieser Messung zu bewältigenden Probleme lagen einerseits in der Zugänglichkeit des Messbereiches in 3 m Höhe, andererseits in der hohen Geschwindigkeit, mit der das Rotorblatt vorbeieilte.

BILD 9 zeigt die verwendete Traverse, welche zum einen der Positionierung einer Kalibrierplatte in Höhe des Messbereiches von 3 m und zum anderen der Auflage des Rotorblattes zur Referenzmessung diente. In BILD 10 sind jeweils ein Kalibrierbildpaar und ein Referenzbildpaar zu sehen. Die Kalibrierung der Kameras erfolgt bei der vom DLR angewandten IPCT-Auswertung mittels eines regelmäßigen Punktegitters, welches in verschiedenen Lagen im zu kalibrierenden Raum aufgenommen wird. Für das Bestimmen der Referenzoberfläche sollte das zu untersuchende Objekt möglichst spannungsfrei sein. Deshalb wurde das Rotorblatt für die Referenzaufnahme auf die Traverse aufgelegt. Da die Kameras nach oben gerichtet und somit dem Sonnenlicht ausgesetzt sind, waren auch für die Aufnahmen am ruhenden Rotor sehr kurze Belichtungszeiten (10 μ s) und die Blitzlampe erforderlich.

In BILD 2 sind die phasenstarr aufgezeichneten Bilder beider Messkameras zu sehen. Sie weisen ausreichend Ausleuchtung und Schärfe auf. BILD 5 und BILD 11 zeigen Beispiele aus der IPCT-Auswertung der bei diesem Test aufgenommenen Stereobildpaare. Hierbei sind die er-

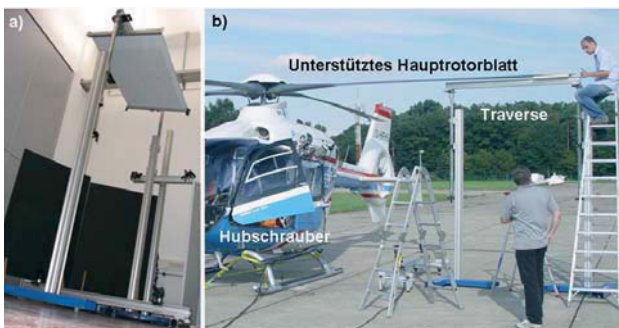


BILD 9: Halterung für Kalibrierung und Referenzmessung (a - Traverse mit Kalibrierplatte, b - Traverse zur Referenzmessung)

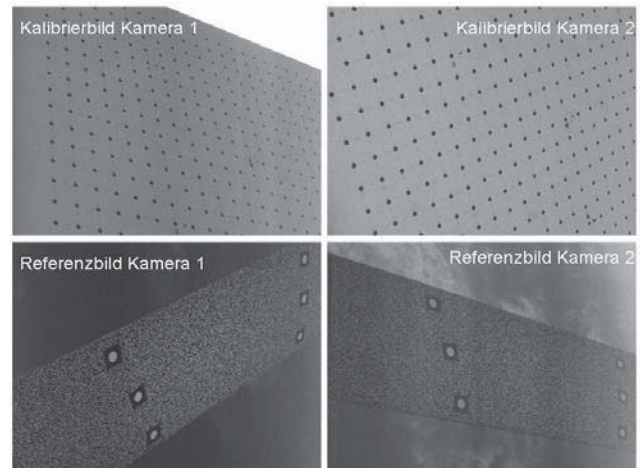


BILD 10: Kalibrier- und Referenzbilder

mittelten 3D-Oberflächen des Blattes bei unterschiedlichen Belastungsfällen dargestellt. Das Blatt, dessen Spannweitenrichtung der y-Achse entspricht, passiert den Messbereich in Richtung der negativen x-Achse. Es ist deutlich die unterschiedliche Auslenkung des Blattes bei unterschiedlichen Blattlasten (Nullschub; 60 % Schub, Nicken und Rollen) zu erkennen. Der variierende Anstellwinkel des Blattes ist ebenfalls zu sehen. Aus den berechneten Flächen lassen sich durch Vergleich mit der Referenzfläche (siehe BILD 5) und der Auswertung der Markerpositionen die lokalen Verschiebungen bestimmen und somit die lokalen Spannungen ableiten. Sowohl die Profilform, als auch das Verhalten des Rotorblattes passend sehr gut mit der Realität überein. Der Vorversuch, welcher zunächst einmal dazu dienen sollte, die erreichbare Bildqualität und die Funktionalität der Triggerung zu testen, hat gezeigt, dass die IPCT auch unter schwierigen Bedingungen (Vibrationen, schwierige Lichtverhältnisse, hohe Geschwindigkeiten) robust funktioniert und gute Ergebnisse liefern kann.

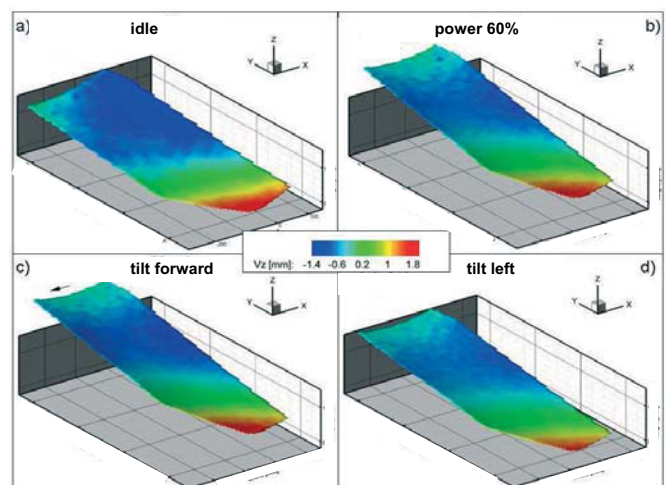


BILD 11: Ausgewertete Flächen des Bodentests mit EC-135 ACT/FHS → a - Nullschub, b - 60 % Leistung, c - Neigen der Rotorebene nach vorn, d - Neigen der Rotorebene nach links (Blattradiusbereich 1600 mm bis 2200 mm, Rotationsrichtung nach links, Spannweitenrichtung = +y, Profilsehne 300 mm in -x-Richtung, Fläche = Profilunter-seite, Vz = z-Durchbiegung relativ zur Referenzfläche (BILD 5))

4.2. Piaggio P 180

Eine weitere Messaufgabe, welche im Rahmen eines Flugversuches im November 2008 erfüllt wurde, war die Ermittlung der Propellerdeformation und die Messung des tatsächlichen Anstellwinkels der Propellerblätter im Freiflug mittels QVT und IPCT an der Piaggio P180. Der Messaufbau (BILD 12) ist ähnlich der Rotordeformationsmessung am Hubschrauber. Der Kameraträger, welcher auch in BILD 6 zu sehen ist, wird dabei im Gepäckraum des Flugzeuges untergebracht. Die Kameras schauen durch spezielle Fenster in der Gepäckraumklappe auf den Propeller, welcher bei 2000 U/min phasenstarr aufgezeichnet wird.

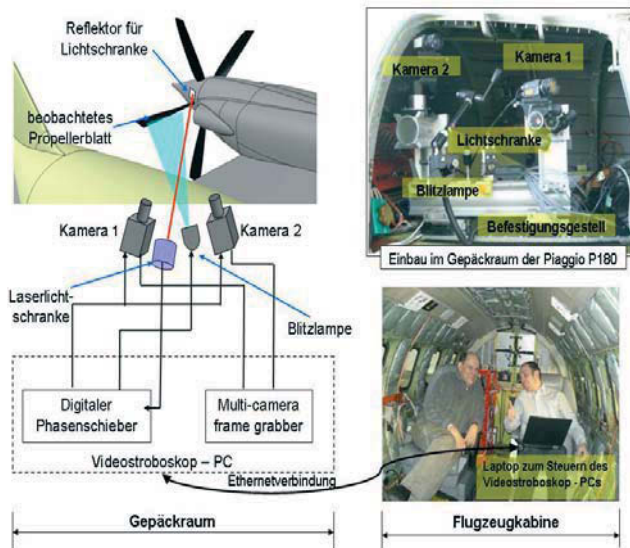


BILD 12: schematischer Aufbau des in der Piaggio P 180 integrierten Systems zur Propellerdeformationsmessung

Zur Synchronisierung der Bildaufnahme mit dem rotierenden Propeller diente die schon am Hubschrauber eingesetzte Reflexlichtschranke, welche auf einen am Spinner angebrachten Reflektor zielte. Der genaue Zeitpunkt der Bildnahme wurde über den aus der Kabine via „remote Desktop“ ferngesteuerten Phasenschieber eingestellt.

BILD 13 zeigt eine Aufnahme, welche während des ersten Flugversuches entstanden ist. Die Triggerung mit der Reflexlichtschranke ermöglichte es, die Position des gemusterten Propellerblattes im Sichtbereich der Kameras einzufrieren. Dieser Bereich entspricht der Blattposition kurz nach Passieren des Heißgasstrahls der Turbine. Bedingt durch die auftretenden Relativbewegungen zwischen Triebwerk und Rumpf kam es bei bestimmten Manövern zur Bewegung des Reflektors aus dem Laserstrahl und somit zu kurzfristigen Schwankungen der Triggerung. Diese zeigte sich darin, dass die Synchronisierung zwischen Propellerblatt und Bildnahme verloren ging und das Blatt sich im Bildbereich bewegte. Durch eine Aufnahme von längeren Bildsequenzen während der Manöver konnte sichergestellt werden, dass sich das zu messende Blatt mindestens einmal in der richtigen Position befand. Aufgrund der steifen Befestigung der Kameras untereinander konnte eine Dekalibrierung ausgeschlossen werden.

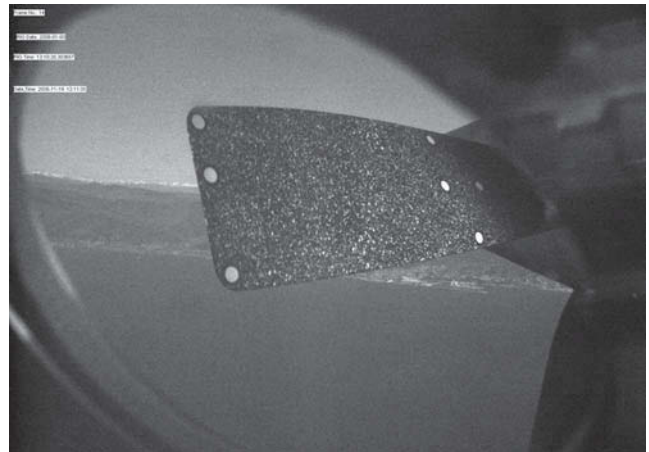


BILD 13: Messaufnahme vom Propeller im Flug

Nicht zu unterbindende verbleibende Bewegungen und die durch die Triggerprobleme auftretende Positionsänderung des Blattes wurden durch Marker, welche im Bild deutlich zu erkennen sind, weitestgehend ausgeglichen.

In der Darstellung lässt sich außerdem erkennen, dass die homogene Ausleuchtung des Messfeldes schwierig ist. Für diesen Versuch wurde das Licht der Blitzlampe über einen direkt hinter dem Fenster angeordneten Lichtleiter auf das Blatt gerichtet. Aufgrund des limitierten Öffnungswinkels des Lichtleiters und des kleinen Blickfensters konnte das Blatt nicht komplett ausgeleuchtet werden. Beim Ausfall der Blitzlampe in großer Höhe (das Gepäckfach war unbedruckt) zeigte sich, dass das Sonnenlicht durch geeignete Flugmanöver zur Beleuchtung des Propellerblattes genutzt werden kann. Bei den eingestellten kurzen Belichtungszeiten der Kameras trat dabei trotz Dauerbeleuchtung keine wesentliche Minderung der Bildqualität auf.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels war die Auswertung der aufgezeichneten Messbilder noch nicht abgeschlossen, deshalb ist in BILD 14 nur eine erste ausgewertete Oberfläche dargestellt. Die Fläche stellt die Blattform im Steigflug dar. Da die zweite Kamera nicht auf die Blattspitze eingestellt werden konnte, endet die Fläche schon kurz vor der Blattspitze.

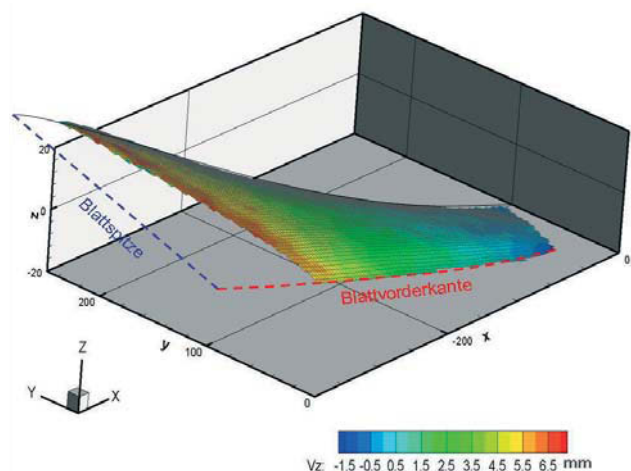


BILD 14: Erstes Vorergebnis der Auswertung der Propellerdeformationsmessung

Es ist deutlich die Durchbiegung des Blattes in Z-Richtung, welche in etwa der Flugrichtung entspricht, zu erkennen. Außerdem ist die konstruktionsbedingte starke Verwindung des Blattes zu sehen. Aus dieser Vorauswertung lässt sich auf eine gute Auswertbarkeit und eine Anwendbarkeit der IPCT auf diese Messaufgabe schließen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die ersten durchgeführten Messungen der Hubschrauberrotor- und Propellerdeformation mit den Messtechniken QVT und IPCT haben die prinzipielle Eignung dieser Verfahren für den industriellen Flugversuch deutlich belegt.

Die Versuche am Hubschrauber haben erstmals gezeigt, dass das Messsystem Videostroboskop auch unter den schwierigen Versuchsbedingungen am Hubschrauber stabil arbeitet und zuverlässig Bilder ausreichender Qualität liefert.

Die Flugversuche mit der Piaggio P 180 waren die ersten Messungen mit dem Videostroboskop in einer Umgebung mit niedrigen Temperaturen, niedrigem Druck und hohen Beschleunigungen. Die dabei entstandenen Schwierigkeiten und aufgetretenen Phänomene haben eine gute Grundlage für die weitere Optimierung des Messsystems für Flugversuche geschaffen. Die erste Vorauswertung der Daten hat gezeigt, dass IPCT auch in diesem Bereich einsetzbar ist.

Ausgehend von den Bodentests mit dem gefesselten Hubschrauber ist ein Flugversuch mit der Messeinrichtung geplant. Hierzu ist das Messequipment für den Einsatz im Freiflug noch zu zertifizieren. Dieser Prozess, welcher unter Umständen sehr lang dauern kann, soll in 2009 abgeschlossen sein, sodass in diesem Jahr auch noch Flugversuche stattfinden können. Um eine verlässliche Aussage über die mit IPCT erreichbare Genauigkeit bei Hubschrauberrotor- und Propellerdeformationsmessungen treffen zu können, werden diese Flugversuche mit einem speziell mit Dehnungsmessstreifen (DMS) instrumentierten Rotorblatt geflogen. Eine erste Parallelmessung von DMS und IPCT erfolgte bereits am Rotorprüfstand bei Eurocopter in Donauwörth und befindet sich noch in Auswertung.

Das vorgestellte Messsystem bietet den Vorteil der berührungslosen und flächenhaften Messung der Form und Deformation von schnell bewegten Objekten, wie Propellerblättern und Rotorblättern auch unter Flugversuchsbedingungen. Es kann neben der angedachten Aufgabe der Anstellwinkel- und Deformationsmessung an Flugzeugpropellern und Hubschrauberrotoren im Flugversuch auch für andere Aufgaben, z.B. Diagnostik von Turbinenschaufeln an Flugzeugtriebwerken oder Lüfterrädern in Fahrzeugen etc. eingesetzt werden. Ein weiterer denkbarer Einsatz ist die Vermessung der Blätter von großen Windkraftanlagen im laufenden Betrieb. Hierbei könnte eine verschlankte Version des Messsystems zum Vermeiden des Anschlagens der Blätter an den Masten durch kontrollierte Steuerung der Blattanstellwinkel beim Auftreten kritischer Deformationen verwendet werden.

6. LITERATUR

- [1] Boden, Fritz: AIM Newsletter No. 1., Newsletter (1), Göttingen, (2007)
- [2] Kompenhans, J.; Schröder, A.; Engler, R.; Klinge, F.; Stasicki, B. (2004): Development and application of image based measurement techniques for aerodynamic investigations in wind tunnels. International Scientific Conference High-Speed Flow Fundamental Problems, Zhukovsky, Russia, 21-24 September 2004
- [3] Michaelis, D., LaVision, Göttingen, Germany; Frahnert, H.; Stasicki, B. (2004): Accuracy of Combined 3D Surface Deformation Measurement and 3D Position Tracking in a Wind Tunnel. CD-ROM Proceedings of ICCEM12- 12th International Conference on Experimental Mechanics, Politecnico di Bari, Italy, 29 August - 2 September 2004
- [4] Stasicki, B.: Investigation of fast, repetitive events by means of non-standard video techniques. 7th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization (FLUCOME), Sorrento, Italy, 25-28 August 2003, paper No.231, 7 pages, CD ROM, ISBN 0-9533991-4-1 (2003)
- [5] Kirmse, Tania; Wagner, Alexander (2007): Advanced Methods for In-Flight Flap Gap and Wing Deformation Measurements in the Project AWIATOR. Conference Proceedings, CD-ROM (ceas 2007-206), S. 1 - 6 First CEAS European Air and Space Conference, Berlin (Germany), 10.-13. September 2007, ISSN 0700-4083
- [6] Stasicki, Boleslaw; Boden, Fritz (2008): Application of high-speed videography for in-flight deformation measurements of aircraft propellers. Conference Proceedings of 28th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSP 28), Canberra (Australia), 09.-14. November 2008, SPIE, Vol 7126 (2009)
- [7] Klinge, Falk; Stasicki, Boleslaw (2007): Messverfahren und Messanordnung mit einem stochastischen Punktmuster sowie stochastisches Punktmuster zur Verwendung dabei, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2007 056 777.6
- [8] Kraus, K: Photogrammetrie Band 1. Walter DeGruyter, Berlin, New York, 2004
- [9] Bittner, Walter: Flugmechanik der Hubschrauber. Springer, Berlin; Auflage: 2., aktualis. A. (13. April 2005)