

VERGLEICH VON OPTISCHER DEFORMATIONSMESSUNG MITTELS IPCT MIT HERKÖMMLICHEN MESSVERFAHREN BEI STANDSCHWINGVERSUCHEN

T. Wolf, F. Boden,
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Abteilung Experimentelle Verfahren
Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem Vergleich von Standardmessverfahren bei Standschwingversuchen mit dem optischen Deformationsmessverfahren Image Pattern Correlation Technique (IPCT).

Eine Untersuchung in der Abteilung Experimentelle Verfahren des Institutes für Aerodynamik und Strömungstechnik in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Aeroelastik soll aufzeigen, ob optische Messverfahren bei Standschwingversuchen Verwendung finden und die herkömmliche Messtechnik ergänzen bzw. ersetzen können.

Es wird dabei anhand von Vergleichsmessungen unter Laborbedingungen evaluiert, inwieweit die IPCT bei zeitvarianten Schwingungen zur Erfassung der Schwingungsparameter eingesetzt werden kann. Von Interesse ist, in welchem Frequenz- bzw. Deformationsbereich die Technik vergleichbare Ergebnisse liefert. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Ausblick über weitere Optimierungs- und Einsatzmöglichkeiten der IPCT gegeben.

1. EINLEITUNG

Im Rahmen der Zulassung von Flugzeugen sind verschiedene Sicherheitsnachweise zu erbringen, wobei auch die Schwingungs- sowie Flattersicherheit nachgewiesen werden muss. Die Schwingungseigenschaften von Luftfahrzeugen werden in Standschwingversuchen ermittelt. Dies kann oftmals jedoch erst dann erfolgen, wenn das Fluggerät bereits kurz vor der Flugerprobung steht. Dadurch besteht bei diesen Versuchen ein hoher Kosten- sowie Zeitdruck.

Bei derzeitigen Standschwingversuchen werden zur Schwingungsmessung Beschleunigungssensoren sowie Dehnmessstreifen eingesetzt. Damit verbunden ist ein aufwendiges Applizieren der Sensoren und deren Verkabelung, was abhängig von der Flugzeuggröße mehrere Tage in Anspruch nehmen kann. Problematisch ist in diesem Zusammenhang auch, dass die Komplexität der numerischen Modelle zunimmt, was mit einer Erhöhung der Anzahl von erforderlichen Beschleunigungsaufnehmern einhergeht.

Eine viel versprechende Möglichkeit den Aufwand hinsichtlich des Einrüstens zu reduzieren, sowie ein flächiges Messergebnis zu erhalten, bieten optische Messsysteme. Am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR Göttingen wird zur Messung von dreidimensionalen Oberflächen und Deformationen die Image Pattern Correlation Technique (IPCT), genutzt. Diese könnte, optische Zugänglichkeit vorausgesetzt, bei Standschwingversuchen eingesetzt werden.

Die Anwendung der IPCT beschränkt sich derzeit auf phasenstarre Aufnahmen bei zeitinvarianten Schwingun-

gen. Da bei Standschwingversuchen auch transiente zeitvariant erregte Schwingungen vorkommen, bei denen keine Phasenkopplung möglich ist, ist es notwendig, die IPCT für diese Anwendungen zu erproben.

Im vorliegenden Beitrag soll anhand einer vergleichenden Messung mit Beschleunigungssensor und der IPCT ermittelt werden, inwieweit die IPCT, insbesondere bei zeitvariant erregten Schwingungen, einsetzbar ist. Von Interesse ist dabei, in welchem Frequenz- bzw. Deformationsbereich die Technik vergleichbare Ergebnisse liefert.

2. GRUNDLAGEN IPCT

Die IPCT ist ein optisches Messverfahren zur Ermittlung von Oberflächenkoordinaten bzw. Deformationen. Dabei wird ein Stereokamerasystem in Verbindung mit einem zufälligen Punktemuster eingesetzt. Die IPCT stellt eine Kombination der Stereo-Photogrammetrie mit den Kreuzkorrelationsalgorithmen der Particle Image Velocimetry (PIV) dar.

Bei der Stereo-Photogrammetrie werden Bildaufnahmen aus zwei Positionen genutzt, um dreidimensional Koordinaten von Punkten zu bestimmen. Dabei werden korrespondierende Messpunkte in den Bildern einander zugeordnet. Über Triangulation können die dreidimensionalen Koordinaten der Messpunkte berechnet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die äußeren und inneren Kameraparameter bei der Aufnahme der Messbilder bekannt sind [1]. Diese lassen sich über eine Kamerakalibrierung bestimmen.

Bei der IPCT werden die Messbilder von einem Stereoka-

merasystem aufgenommen. Im Unterschied zur Photogrammetrie finden keine expliziten Messpunkte Verwendung. Für die Zuordnung wird bei der IPCT ein auf dem Messobjekt appliziertes zufälliges Punktemuster genutzt. Es erfolgt weiterhin eine Unterteilung der Messbilder in Bildabschnitte, die Auswerte- bzw. Korrelationsfenster. Anschließend werden, mit Hilfe von Korrelationsalgorithmen aus der PIV [2], korrespondierende Punktemuster in den Auswertefenstern der Stereobilder einander zugeordnet. Es ergibt sich über Triangulation die dreidimensionale Position eines Auswertefensters, wobei die Höhenkoordinaten hier jeweils über ein Korrelationsfenster gemittelt sind. Dabei kann, um die räumliche Auflösung zu erhöhen, neben der Fenstergröße auch eine Fensterüberlappung eingestellt werden. Zu beachten ist, dass die Messbilder eine dreidimensionale Oberfläche abbilden, weshalb das Punktemuster durch die jeweilige Oberflächenform sowie durch die Kameraposition verzerrt ist (Bild 1). Es ist also erforderlich vor der Musterkorrelation eine Entzerrung der Messbilder vorzunehmen.

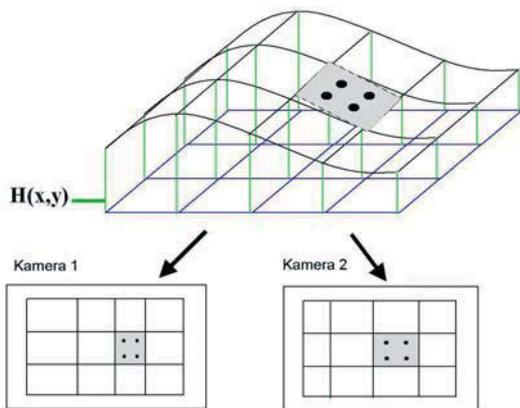


BILD 1. Messbilder aus verschiedenen Positionen [3]

Die Bildentzerrung wird zum einen mit der Abbildungsfunktion der Kameras, die während der Kalibrierung ermittelt wird, vorgenommen. Zum anderen erfolgt eine Bildentzerrung anhand der Höhenkoordinaten $H(x,y)$ der Messoberfläche. Bei der IPCT wird dies ausgehend von einer Startoberfläche iterativ durchgeführt [3].

3. VERSUCHSAUFBAU

Um die Eignung der IPCT für zeitvariante Schwingungen zu prüfen, wurde ein Laboraufbau für eine Vergleichsmessung erstellt. In dem Aufbau konnten IPCT- und Beschleunigungsmessungen mit Standardverfahren zeitgleich durchgeführt werden.

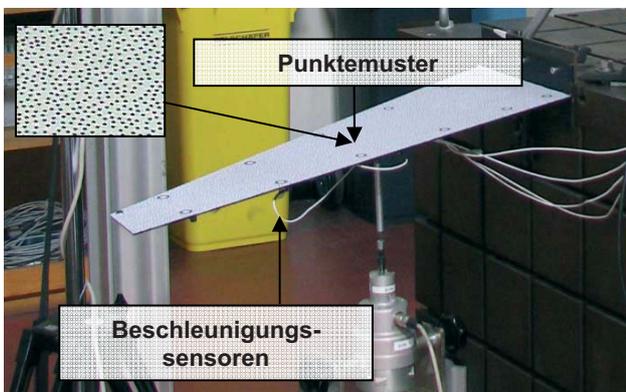


BILD 2. Modellflügel mit Punktemuster

Als Untersuchungsobjekt diente ein generisches Flügelmodell (Bild 2), wobei durch die geringe Dicke des Flügelmodells sichergestellt war, dass auf der Ober- sowie Unterseite die gleichen Beschleunigungen und Deformationen auftraten. An der Unterseite des Versuchsmodells waren Beschleunigungssensoren angebracht, auf der Oberseite erfolgte die Applikation einer, mit einem zufälligen Punktemuster, bedruckten Folie. Diese wurde mit dem IPCT-Kamerasystem beobachtet. Das Punktemuster wurde so ausgelegt, dass ein Punkt aus dem Muster in der Kameraabbildung ca. 2 bis 3 Pixeln entsprach. Dies stellt die optimale Punktgröße für eine Höhen- bzw. Deformationsberechnung mit der verwendeten Software dar.

Um verschiedene Schwingungen zum Vergleich heranzuziehen erfolgte die Erregung des Flügels mit monofrequenten Sinusanregungen, logarithmischen Gleitsinusanregungen und bandbegrenztem Rauschen. Diese Erregungsfunktionen wurden mit einem Signalgenerator erzeugt, wobei die Kraftregelung an einem Verstärker erfolgte. Für die Schwingungsanregung des Flügels fand ein elektromagnetischer Schwingungserreger Verwendung.

3.1. Kamerasystem

Der Abstand zwischen dem Stereokamerasystem und dem Flügel betrug ca. 1,2 m, wobei der Beobachtungswinkel der Kameras variiert wurde.

Es kamen zwei verschiedene Kamertypen zum Einsatz. Zum einen JAI CV M10¹ Kameras mit einer maximalen Bildfrequenz von 24 Hz (Auflösung von 760x580 Pixel) und zum anderen Photron-Fastcams² (Auflösung 1024x1024 Pixel) mit einer maximalen Bildfrequenz von 300 kHz. Die Versuche wurden bei den JAI CV M10 Kameras mit 24 Hz und bei den Fastcams mit 125 Hz Bildrate durchgeführt, wobei die Auflösung der Fastcams auf 512x512 Pixel eingeschränkt wurde, um eine längere Messzeit zu erhalten.

Für die Steuerung der JAI CV M10 Kameras wurde ein vom DLR entwickeltes System, das Videostroboskop [4], verwendet. Dabei handelt es sich um einen Messrechner, welcher bis zu 4 Kameras synchron steuern und deren Bilder aufzeichnen kann. Zusätzlich ist mit dem Videostroboskop eine Kameratriggerung mit verschiedenen Frequenzen durch integrierte Signalgeneratoren möglich. Die Signale der Signalgeneratoren sowie das Kameratrigger-signal wurden zum Zeitabgleich der Messsysteme herangezogen.

Beide Photron-Fastcams nahmen untereinander synchronisiert Bilder auf, wobei kein Zeitabgleich mit der Beschleunigungsmessung möglich war.

3.2. Beschleunigungsmessung

Auf der Unterseite des Flügelmodells waren 4 Beschleunigungssensoren (B-Sensoren), welche für Niederfrequenzanwendungen konzipiert sind, angebracht. Die verwendeten Sensoren basieren auf einer Piezokeramik, an die eine Masse angebracht ist. Wird der Sensor beschleunigt, wirkt aufgrund der Massenträgheit eine Kraft auf das Piezoelement, wodurch eine Spannung proportional zur Beschleunigung hervorgerufen wird. Die Spannungswerte wurden

¹ JAI CV M 10 CCD

² Photron Fastcam APX RS

im Versuch mit einem VXI-Bussystem³ erfasst. Die Messdaten werden bei diesem System mit 44 kHz abgetastet und mittels Signalprozessoren verknüpft mit einer Anti-Aliasing-Filterung auf eine wählbare Abtastrate gebracht. Anschließend werden die Daten in SI-Einheiten umgerechnet. Als Abtastrate wurde 1024 Hz gewählt, um einen ausreichenden Frequenzbereich bei der Beschleunigungsmessung zu erfassen. Des Weiteren war es durch diese Abtastrate möglich, die Verläufe der Videostroboskop-Signalgeneratoren mit einer für den Zeitabgleich ausreichenden Genauigkeit aufzuzeichnen.

3.3. Messdatenverarbeitung

Die Auswertung der Stereobilddaten wurde mit der Software DaVis von LaVision⁴ durchgeführt. In Bild 3 ist beispielhaft ein Ergebnis einer Auswertung gezeigt.

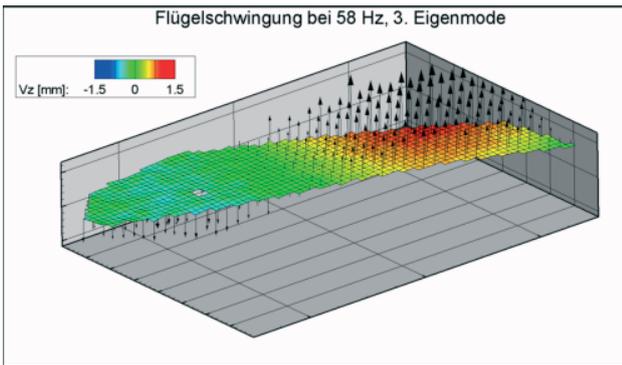


BILD 3. Exemplarisches Ergebnis einer Bildauswertung

Das Raster, welches in Bild 3 auf der Flügeloberfläche zu sehen ist, zeigt die sich aus der Korrelationsfenstergröße und deren Überlappung ergebende Auflösung der Verschiebungsvektoren.

Zum Vergleichen der IPCT-Deformationsvektoren mit den Beschleunigungsaufnehmerdaten war es notwendig, die Deformationen an den Aufnehmerpositionen aus der flächigen Information zu extrahieren. Die Beschleunigungssensorpositionen in den DaVis-Koordinaten konnten über ein Pointtracker-Tool bestimmt werden. Dabei wurden auf der Oberseite des Flügelmodells, an den Beschleunigungssensorpositionen, Punktemarken angebracht. Anhand der Punktepositionen wurden die DaVis-Koordinaten der Sensoren bestimmt.

Die weiteren Berechnungen erfolgten in Matlab. In einem ersten Schritt wurden dabei die IPCT-Verformungsdateien an der Beschleunigungssensorposition ausgelesen und zu einem Deformations-Zeit-Signal verknüpft. Anschließend wurden die Signale über eine bandlimitierte Interpolation auf identische Abtastraten gebracht [5]. Nach der Interpolation folgte die Synchronisation der Signale. Dies war nur bei den Aufnahmen mit dem Videostroboskop (VS) möglich, wobei der Zeitabgleich dort anhand eines, mit dem VXI-Bussystem mitgemessenen, Sinussignals durchgeführt wurde. Dabei erfolgte, jeweils nach dem Nulldurchgang des Sinussignals mit aufsteigender Flanke, eine Messbildaufnahme.

Die Umwandlung des Deformations-Zeit-Signals in ein Beschleunigungs-Zeit-Signal wurde, um keine Phasenin-

formationen zu verlieren, über eine Faltung mit der Impulsantwort eines Differentiatorfilters realisiert [6]. Nachteile dieser Vorgehensweise ergeben sich durch das zeitlich begrenzte Messsignal. Es werden aufgrund der Ordnung des Differentiatorfilters Fehler an den Signalenden hervorgerufen. Der hier verwendete Differentiatorfilter besaß eine Ordnung von 5, weshalb am Signal-Anfang und Ende jeweils 4 Abtaststellen des Signals nach dem Ableiten fehlerbehaftet waren und abgeschnitten wurden. Vorteile bei dieser Berechnungsart liegen im Erhalt der Phaseninformationen bei den differenzierten Daten.

Die Berechnung der Leistungsdichtespektren (LDS) wurde mit der Methode nach Welch [7] durchgeführt. Für die Fensterung wurde ein Blackman-Fenster verwendet.

4. ERGEBNISSE

4.1. Monofrequente Anregung

Um die Genauigkeit des Zeitabgleichs sowie die Eignung des Messaufbaus und der Messtechnik zu prüfen, erfolgten die ersten Tests mit zeitinvarianter Sinusanregung. Es wurde dabei mit 2; 3,8; 4; 6; 8; 10; 11 und 11,5 Hz ange-regt. Die Aufnahme-frequenz der Kameras betrug dabei jeweils 24 Hz.

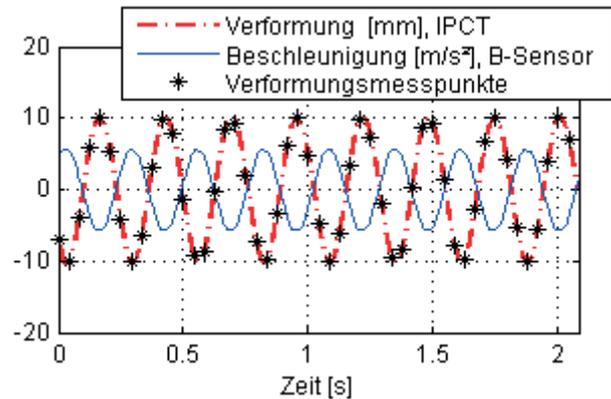


BILD 4. Zeitdaten bei 3,8 Hz Erregungsfrequenz

In Bild 4 ist der synchronisierte Datenverlauf für eine Erregung mit 3,8 Hz über der Zeit aufgetragen. Gut erkennbar ist der Phasenversatz zwischen Verformung und Beschleunigung von 180°. Zusätzlich dargestellt sind die Bildnahmepunkte des Kamerasystems sowie der interpolierte Zeitdatenverlauf der Verformung. Durch zweimaliges Differenzieren des IPCT-Verformungssignals ergibt sich das Beschleunigungs-Zeit-Signal des IPCT-Systems. Der Vergleich der Beschleunigungssignale ist in Bild 5 gezeigt.

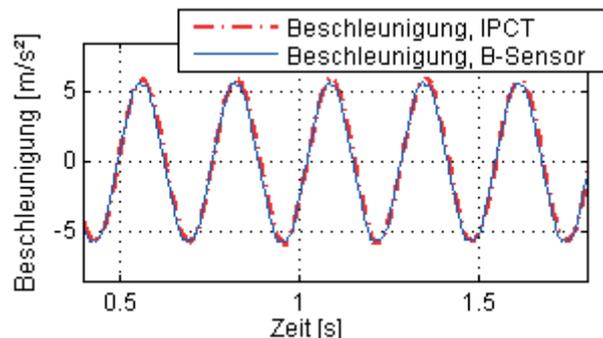


BILD 5. Vergleich Beschleunigung, IPCT und Beschleunigung, B-Sensor bei 3,8 Hz Erregung

³ VXI-Bus Mainframe CT 100C

⁴ LaVision DaVis, Version 7.3

Der Zeitbereich wurde hier, bedingt durch die Ableitung, am Signal-Anfang und -ende gekürzt. Es ist in Bild 5 weiterhin zu sehen, dass nur in den Umkehrpunkten Abweichungen auftreten und darüber hinaus die Signalübereinstimmung gut ist.

Die aus den synchronisierten Beschleunigungssignalen berechneten Leistungsdichtespektren sind in Bild 6 dargestellt. Das Spektrum der IPCT-Messung enthält aufgrund des Nyquist-Kriteriums nur Informationen bis 12 Hz. Es ist in Bild 6 zu sehen, dass die Erregungsfrequenz von 3,8 Hz von beiden Messtechniken gut aufgelöst wurde. Die Übereinstimmung beider Messverläufe ist in diesem Bereich sehr hoch. Alle anderen Frequenzen liegen um ca. 60 dB niedriger als im Peak bei der Erregungsfrequenz. Es ergeben sich bei dieser Messung Unterschiede bei 8 Hz sowie kurz vor der Nyquist-Frequenz der IPCT von 12 Hz.

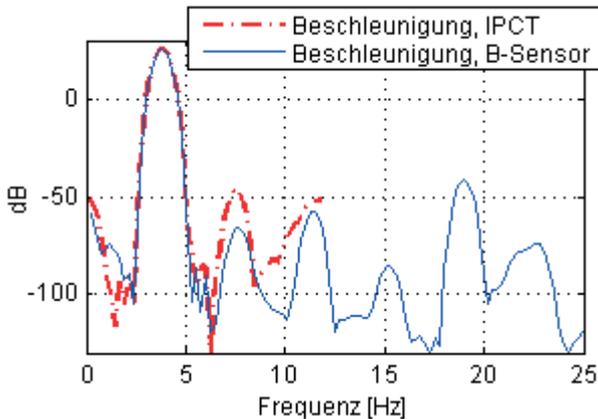


BILD 6. Leistungsdichtespektrum (LDS) bei 3,8 Hz Erregungsfrequenz

Des Weiteren ist zu sehen, dass im Beschleunigungssensorsignal noch Frequenzanteile über 12 Hz enthalten sind, welche mit der IPCT hier nicht erfassbar waren.

Dieses Verhalten verstärkt sich bei dem hier gewählten Aufbau mit Erhöhung der Erregungsfrequenz. In Bild 7 ist das Spektrum für eine Erregung mit 11 Hz gezeigt. Anhand des Verlaufs der Beschleunigungssensormessung ist zu erkennen, dass die Oberschwingung bei 22 Hz mit einem größeren Anteil im Signal enthalten ist als die Erregungsfrequenz. Bedingt durch diesen, auch in den Zeitdaten erkennbaren, Frequenzanteil oberhalb der Nyquist-Frequenz des Kamerasystems, wird ein Aliasing-Peak in dem IPCT-Signal bei 2 Hz hervorgerufen.

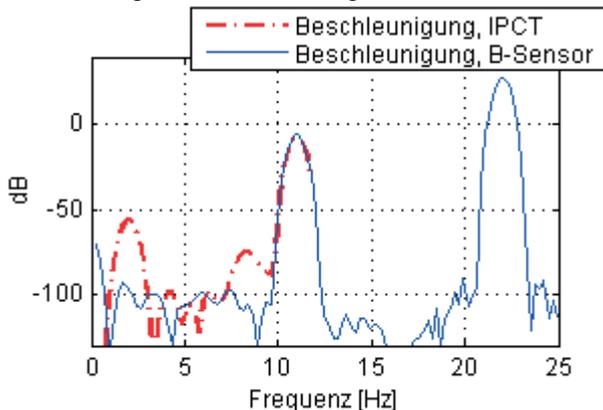


BILD 7. Leistungsdichtespektrum (LDS) bei 11 Hz Erregungsfrequenz

Die gezeigten LDS beschränken sich auf den Frequenzverlauf bis 25 Hz. Es sind darüber hinaus noch weitere, vom Betrag kleinere, Oberschwingungen bis zur Nyquist-Frequenz des Beschleunigungsmesssystems (512 Hz) vorhanden, welche neben dem Rauschen des jeweiligen Messsystems die Abweichungen zwischen den Messungen hervorgerufen haben können.

Neben den Zeitverläufen und Spektren wurden auch die Phasenbeziehungen der Signalverläufe bei den jeweiligen Erregungsfrequenzen bestimmt. Die berechneten Phasenwinkel zwischen Beschleunigung und Deformation liegen dabei in einem Bereich von 175° bis 180° und weisen somit einen maximalen Fehler von 5° auf.

Die Phaseninformation ist bei monofrequenter Anregung jeweils nur bei den Erregungsfrequenzen bestimmbar. Eine Gleitsinusanregung besitzt den Vorteil, dass ein Frequenzbereich angeregt wird und somit verwertbare Messdaten nicht nur bei diskreten Frequenzen gewonnen werden. Die Dauer der Anregung muss dabei so erfolgen, dass die Frequenzen lang genug gehalten werden, um ein Einschwingen der Struktur und damit einen ausreichenden Signal-Rauschabstand zu gewährleisten.

4.2. Gleitsinusanregung bei Verwendung von JAI CV M10 Kameras

Als zeitvariante Erregung wurde für die Vergleichsmessungen ein logarithmischer Gleitsinus (Sweep) verwendet. Dieser ist derzeit eine der gebräuchlichsten Erregungsformen bei Standschwingversuchen. Der logarithmische Gleitsinus ist durch eine über der Messzeit konstante Kraftamplitude gekennzeichnet. Dabei wird der angeregte Frequenzbereich mit einer, zu hohen Frequenzen gesteigerten, Geschwindigkeit durchfahren. Dadurch ergibt sich bei niedrigen Frequenzen eine große und bei hohen Frequenzen eine kleine Einschwingzeit. Ebenso wird der Energieeintrag in das System zu hohen Frequenzen hin kleiner [8].

Da bei den Messungen mit Gleitsinusanregung der Signalgenerator manuell gestartet wurde, decken die Messungen jeweils verschiedene Frequenzbereiche der Sweeps ab. Es wurden 5 Versuche mit Gleitsinusanregung durchgeführt, wobei neben den unterschiedlichen Frequenzbereichen auch die Kameraöffnungszeit sowie der Beobachtungswinkel verändert wurden. Im Folgenden werden die 5 Versuche mit Sweep 1 bis 5 bezeichnet. In Bild 8 ist der Kraftverlauf des Sweep 1 über der Frequenz dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass sich der Erregungsbereich von ca. 4 bis 10 Hz erstreckt. Die Zeitdaten des Sweep 1 sind in Bild 10 gezeigt

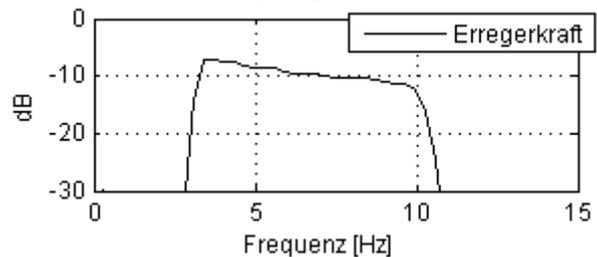


BILD 8. Spektrum der Erregungskraft bei Sweep 1

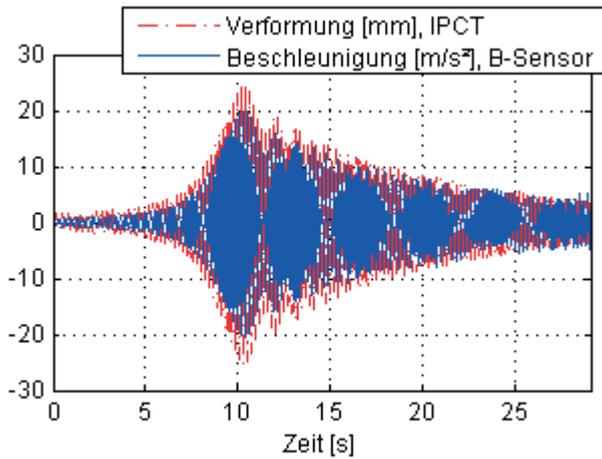


BILD 9. Zeitdaten, Sweep 1

Dort ist zu erkennen, dass sich trotz gleichbleibender Kraftamplitude die Deformations- bzw. die Beschleunigungsamplituden stark verändern. Zudem ist zu beobachten, dass sich das Verhältnis von Beschleunigung zu Deformation über dem Sweepverlauf ändert.

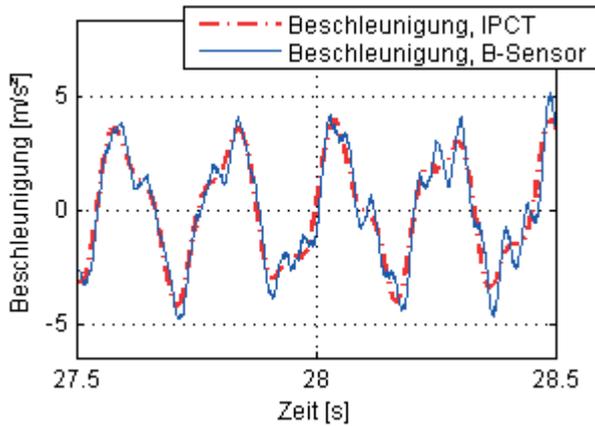


BILD 10. Vergleich Beschleunigung, IPCT und Beschleunigung, B-Sensor, Ausschnitt, Sweep 1

In Bild 10 ist ein Ausschnitt aus dem Vergleich der Beschleunigungszeitdaten gezeigt. Dort ist zu sehen, dass die Messung mit dem B-Sensor, bedingt durch die Abtastfrequenz, wiederum mehr Oberschwingungen als die IPCT-Messung enthält.

Dies ist auch im LDS des Sweep 1 in Bild 11 anhand der Oberschwingung bei 21,5 Hz zu sehen. Anhand des LDS ist auch ersichtlich, dass im Bereich unter 3,5 Hz die IPCT-Ergebnisse auf einem geringeren Grundniveau als die Beschleunigungssensoren liegen. Dies zeigt, dass die Beschleunigungssensoren bei sehr niedrigen Schwingungsfrequenzen ein hohes Rauschniveau besitzen.

Im Bereich der Gleitsinus-Erregung sind beide Signalverläufe sehr gut vergleichbar. Erst ab ca. 10 Hz stellt sich ein Unterschied ein, da die IPCT-Ergebnisse hier auf einem etwas höheren Grundniveau verbleiben.

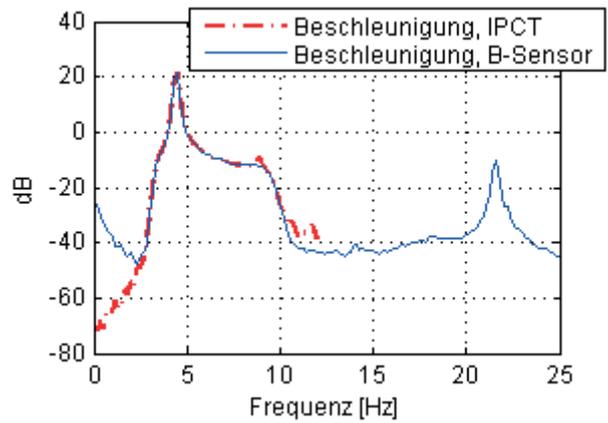


BILD 11. LDS Sweep 1 (bis 25 Hz)

Anhand der Abbildung 11 ist auch ersichtlich, dass die mit den B-Sensoren erfasste Frequenzkomponente bei 21,5 Hz kein Aliasing im IPCT-Signal verursacht. Weiterhin kann ausgesagt werden, dass dieses System bei ca. 4,5 sowie 21,5 Hz eine Resonanzstelle aufweist.

Bei der Messung von Sweep 5 wurde der Frequenzbereich von 5 bis 20 Hz angeregt, wobei der Signalgenerator noch einige Sekunden bei 20 Hz Erregungsfrequenz weiterlief. Das Spektrum dieses Sweeps ist bis 25 Hz in der Abbildung 12 zu sehen. Es ist hier ein Aliasing-Peak bei ca. 4 Hz in der IPCT Messung vorhanden. Aufgrund des geringen Rauschniveaus der IPCT in diesem Bereich ist die Aliasingsspitze jedoch noch unterhalb des Beschleunigungssignals. Zudem ergibt sich durch das kleiner werdende Verhältnis von Deformation zu Beschleunigung ein Tiefpassfiltereffekt der Aliasingeffekte zusätzlich minimiert.

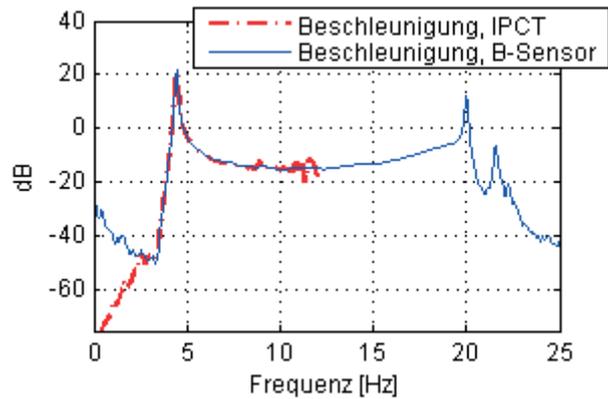


BILD 12. LDS Sweep 5 (bis 25 Hz)

Durch die Anregung über einen Frequenzbereich kann beim Gleitsinus auch die Phaseninformation über den angeregten Bereich berechnet werden. Die Phasenverläufe sind in Bild 13 dargestellt. Der Phasensprung von 180°, der beim Durchlaufen einer Resonanzstelle (an der Resonanz 90° Phasenwinkel) in den Phasen Beschleunigung-Kraft, sowie Deformation-Kraft auftritt, ist in der Darstellung gut aufgelöst.

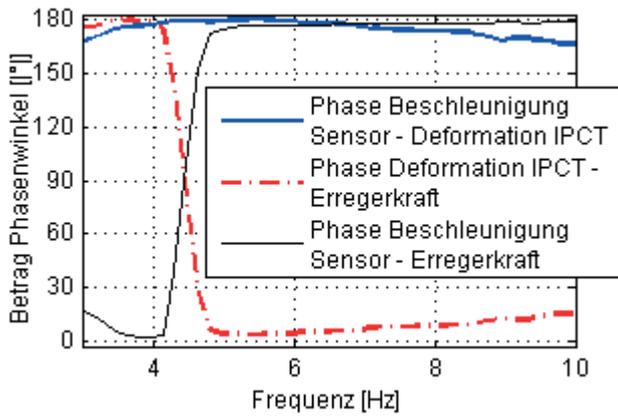


BILD 13. Phasenverläufe bei Sweep 1

Zusätzlich dargestellt ist die Phase zwischen der mit IPCT gemessenen Deformation und der mit Beschleunigungssensoren ermittelten Beschleunigung. Diese weicht geringfügig vom zu erwartenden Wert von 180° ab.

Die Abweichung ist im Bereich unter 4 Hz zum Teil mit dem hohen Rauschanteil des Beschleunigungssignals zu begründen. Von 4 Hz bis ca. 7 Hz beträgt die Abweichung weniger als 3°. Mit steigender Messzeit und somit steigenden Frequenzen nimmt der Phasenfehler bis auf 10° zu. Die Begründung dafür liegt im Zeitabgleich, da die Synchronisation der Messsysteme nur bei Messbeginn durchgeführt wurde. Dabei ist dort, bedingt durch die diskreten Abtastpunkte, bereits ein Zeitfehler entstanden. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass eine Abweichung von der eingestellten Bildrate (24 Hz) vorhanden war (Bildrate laut VXI-Systemuhr 23,996 Hz). Dadurch entsteht, mit steigender Messzeit, ein zusätzlicher zeitlicher Versatz zwischen den Signalen.

Um eine bessere Synchronisation zu gewährleisten ist es notwendig die Systemtaktraten anzugleichen bzw. eine Triggerung der Kameras oder des Videostroboskops mit dem Beschleunigungsmesssystem zu realisieren. die Beschleunigungsmessung liefert.

4.3. Gleitsinusanregung bei Verwendung von Photron-Fastcams

Um in einem größeren Frequenzbereich einen Vergleich der Deformationsermittlung mit IPCT und der Beschleunigungsmessung zu ermöglichen, wurden neben den Tests mit den JAI CV M10 Kameras auch Tests mit Photron-Fastcams durchgeführt. Die Aufnahmefrequenz betrug 125 Hz. Diese wurde so gewählt, da Flutteruntersuchungen von Flugzeugenflügeln im Bereich bis ca. 40 Hz erfolgen [9]. Zudem war bei einer maximal speicherbaren Bildzahl von 8000 Bildern je Fastcam (Auflösung 512x512 Pixel) eine Messzeit von 60 s möglich. Die Erregung erfolgte bei den Fastcam Versuchen mit zwei verschiedenen Gleitsinusanregungen. Bei dem ersten Gleitsinus wurde von 7 bis 70 Hz in 60 s, bei dem zweiten von 5 bis 50 Hz in ebenfalls 60 s angeregt.

Die Synchronisation der Messsysteme erfolgte hier anhand eines Vergleichs der Signalverläufe, da keine Synchronisierungssignale mitgezeichnet wurden.

Im Bild 14 ist ein IPCT-Deformationssignal dargestellt.

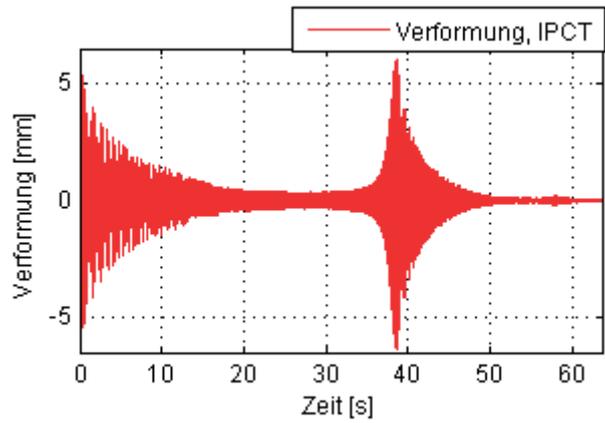


BILD 14. IPCT-Verformungssignal bei Fastcam Sweep 1

In der Darstellung ist zu sehen, dass die Verformungen zu hohen Frequenzen hin sehr kleine Werte annehmen (kleiner 0,05 mm) und damit an der Messgrenze des hier realisierten IPCT-Messaufbaus liegen.

Das Spektrum des Fastcam Sweeps 1 ist in der Abbildung 15 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass bedingt durch das hohe Rauschniveau der Beschleunigungssensoren im niederfrequenten Bereich unter 3 Hz, dort wiederum eine Abweichungen zwischen den Messsignalen auftritt.

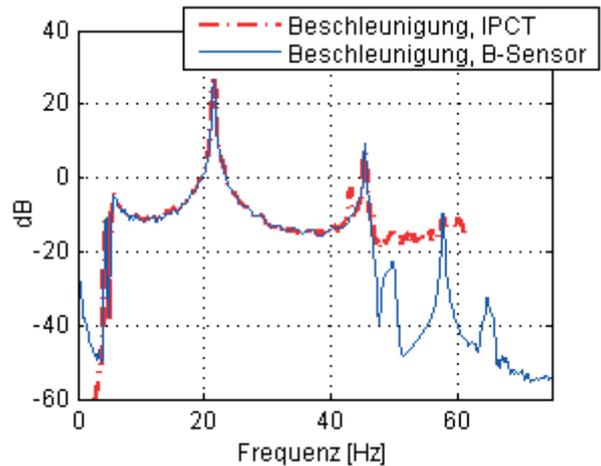


BILD 15. LDS Fastcam Sweep 1

Des Weiteren ist erkennbar, dass die IPCT-Messung ab ca. 40 Hz Abweichungen im Vergleich zum Beschleunigungssensor zeigt. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass bei 43 Hz ein zusätzlicher Peak in der aus den Verformungsdaten ermittelten Beschleunigung auftritt und sich ab ca. 48 Hz ein höheres Grundniveau bei der IPCT-Messung einstellt.

Bei der Berechnung der Verformungen mit DaVis ist es möglich sich die mittlere quadratische Messunsicherheit (RMS-Wert) der Verformungsvektoren ausgeben zu lassen. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass der Fehler bei der Positionsbestimmung unabhängig von der Frequenz ist und somit ein Grundrauschen für das Deformationssignal in das Spektrum eingezeichnet werden kann. In Bild 16 ist die in DaVis berechnete Messunsicherheit von 0,012 mm RMS (an der Sensorposition 1) für die Fastcam Messungen mit eingezeichnet. Durch das zweimalige Ableiten der Messunsicherheit ergibt sich der gezeigte quadratische Verlauf.

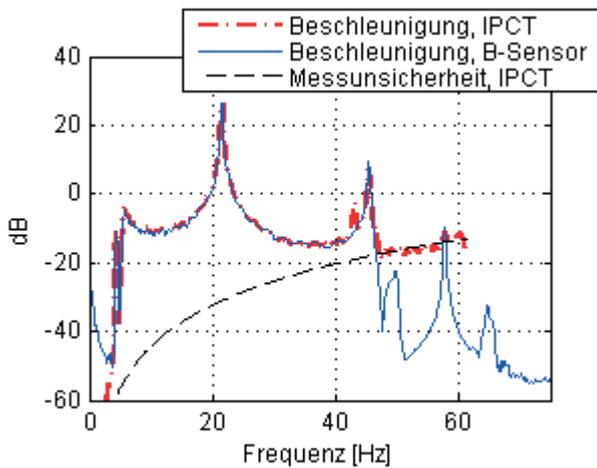


BILD 16. LDS, Fastcam Sweep 1 mit Messunsicherheit

Die Kurve zeigt sehr gut, inwieweit die Messdaten einen ausreichend großen Signal-Rausch-Abstand besitzen. Es ist weiterhin zu erkennen, dass dieser speziell bei hohen Frequenzen, bedingt durch die damit einhergehenden kleinen Verformungen, abnimmt und letztendlich das Rauschniveau größer als das Messsignal wird.

Im Bild 17 ist das Spektrum des Fastcam Sweep 2 dargestellt. Bei hohen Frequenzen ergeben sich auch hier Fehler, welche durch den geringen Signal-Rausch-Abstand verursacht werden. Diese sind, bedingt durch die Anregung in einem höheren Frequenzbereich etwas kleiner als bei Sweep 1, da dass IPCT-Messsignal bei hohen Frequenzen teilweise über der Messunsicherheit der IPCT liegt.

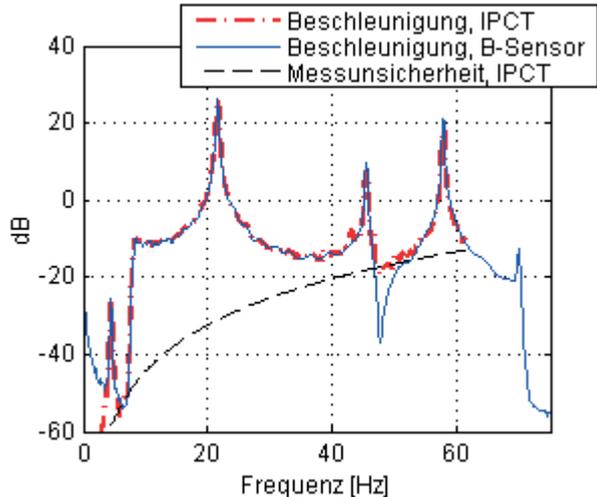


BILD 17. LDS Fastcam Sweep 2 mit Messunsicherheit

Für die Fastcam Messungen mit dem hier realisierten Messaufbau ergeben sich bis ca. 40 Hz gute Vergleichswerte. Es sollte, bei einer Anwendung der IPCT, jeweils das Rauschniveau und damit der Signal-Rausch-Abstand bestimmt werden, um ggf. Tiefpassfilter anzuwenden und die weitere Auswertung auf den fehlerfreien Bereich zu beschränken. Zudem wäre es durch Veränderung der Erregungsfunktion und damit der Strukturantwort möglich, einen durchgängig ausreichenden Signal-Rausch-Abstand der IPCT bei unverändertem Testaufbau zu erreichen. Es ist dabei für die Anwendung der IPCT vorstellbar, den

Gleitsinus mit konstanter Geschwindigkeit zu durchfahren, um damit auch bei hohen Frequenzen eine ausreichende Deformation bereitzustellen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages erfolgten vergleichende Messungen zwischen Beschleunigungen, die mit Beschleunigungssensoren ermittelt wurden und Deformationen gemessen mit dem optischen Verfahren IPCT. Es ist ein experimenteller Aufbau realisiert worden, mit dem ein zeitgleiches Messen von Strukturantworten eines Flügelmodells mit beiden Messsystemen möglich war. Dabei wurden zur Schwingungserregung zeitvariante sowie zeitinvariante Anregungsformen genutzt. Ferner wurden verschiedene Parameter wie der Beobachtungswinkel, die Kameraöffnungszeit, die Kamerabilrate und der angeregte Frequenzbereich variiert.

Zu den Messungen kann ausgesagt werden, dass sich die IPCT, speziell im Frequenzbereich unter 3 Hz, durch ein, verglichen mit den hier verwendeten Beschleunigungssensoren, geringeres Rauschniveau auszeichnet. Des Weiteren lieferte die IPCT mit dem umgesetzten Aufbau gute Vergleichswerte bis zu einer Frequenz von ca. 40 Hz.

Bei Schwingungsmessung mit Kameras mit einer geringen Aufnahme Frequenz wurde festgestellt, dass je nach Art der Strukturantwort des untersuchten Objekts Aliasing auftreten kann. Es ist dabei anhand der gewählten Bandbreite der Erregung keine Aussage über die Größe der auftretenden Aliasing-Komponenten möglich, da die Struktur nicht nur mit dem angeregten Frequenzband antwortet. Die Messdaten zeigen in den hier durchgeführten Versuchen zwar wenig bzw. gar kein Aliasing. Dies ist aber begründet in dem Nichterfassen höherer Frequenzen, bedingt durch die damit verbundenen kleinen Auslenkungen. Dieses Verhalten kann jedoch nicht auf alle Strukturen übertragen werden. Somit ist es für Messungen mit geringer Bildrate notwendig sicherzustellen, dass keine Strukturantworten mit großen Deformationen oberhalb der Nyquist-Frequenz angeregt werden.

Bei den Messungen mit hoher Aufnahme Frequenz (125 Hz) war es möglich im Bereich bis 40 Hz alle Schwingungen nahezu ohne Abweichung zur Beschleunigungsmessung zu erfassen. Aliasing-Effekte konnten hier in den Spektren nicht beobachtet werden. Einschränkungen im Bezug zur Verwendung von Kameras für die Schwingungsuntersuchungen sind hier durch das Rauschen des IPCT-Messsystems und mit der damit verbundenen Genauigkeit der Deformationsmessung gegeben. Es ist dabei über den gesamten Frequenzbereich der Strukturantwort darauf zu achten, dass ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand eingehalten wird. Dabei kann das Messsystem an die jeweilig erwarteten bzw. vorhandenen Deformationen mit der Einstellung des Pixel/mm Verhältnisses angepasst werden.

Die während der hier durchgeführten Versuche vorgenommenen Synchronisationen waren hinsichtlich der erreichten Genauigkeit unzureichend. Es sollte im Weiteren versucht werden, eine Triggerung der Kameras bzw. des Videostroboskops mit der Systemuhr des VXI-Bussystems vorzunehmen.

Während der Tests wurden Variationen der Kameraöffnungszeit sowie des Beobachtungswinkels vorgenommen.

Es zeigte sich, dass die Variation des Beobachtungswinkels von ca. 90° auf ca. 30° keine signifikante Auswirkung auf das Messergebnis hatte. Dahingegen ist bei der Kameraöffnungszeit darauf zu achten, dass kein Verschmieren des Punktemusters auftritt. Zudem ist bei der Beleuchtung zu berücksichtigen, dass keine Intensitätsschwankungen vorhanden sind, da nur bei gleich bleibender Beleuchtung angenommen werden kann, dass der Bildnahmezeitpunkt bei der Hälfte der Kameraöffnungszeit liegt. Gegebenenfalls wäre auch eine stroboskopische Beleuchtung möglich um den Bildnahmezeitpunkt genau festzulegen.

Aufbauend auf dem Labortest sollten weitere Untersuchungen erfolgen, um das System schrittweise für den Einsatz bei Ground Vibration Tests (GVT) bzw. Taxi Vibration Tests (TVT) zu validieren.

Bereits erfolgt und derzeit in der Auswertung, sind in diesem Zusammenhang Messungen im Rahmen des Projektes „Advanced In-Flight Measurement Techniques“ (AIM) an der Piaggio P 180 [11]. Dabei sollte die Flügeldeformation mit auf dem Rumpf montierten Kameras ermittelt werden. Es erfolgten neben Vibrationstests am Boden auch Flugversuche, wobei Kameras mit einer Aufnahme-frequenz von bis zu 40 Hz zum Einsatz kamen.

Zudem sind derzeit noch Parallelmessungen bei einem TVT mit dem Institut für Aeroelastik an einer Airbus A320 vorgesehen. In diesem Rahmen soll die Deformation der Flügeloberfläche während eines Rolltests am Boden aus der Kabine heraus gemessen werden. Neben der Validierung des Systems sollte zudem versucht werden, das Messsystem weiter zu optimieren. Für eine Anwendung bei Vibrationstests ist besonders eine Zeitoptimierung der Auswertung von Interesse. Zudem sind Optimierungen im Bereich der Auswertalgorithmen denkbar, um das Messsystemrauschen zu vermindern.

6. QUELLEN

- [1] Kraus, K. : Photogrammetrie Band 1, Walter de Gruyter Berlin New York, (2004)
- [2] Raffel, M.; Willert, C.; Wereley, S.; Kompenhans, J. : Particle Image Velocimetry – A Practical Guide, 2. Auflage, Springer Verlag, (2007)
- [3] La Vision : Software Manual for DaVis 7.1, LaVision GmbH, Göttingen, (2006)
- [4] Stasicki, B.; Boden, F. : Application of high-speed videography for in-flight deformation measurements of aircraft propellers, Conference Proceedings (7126-41) S 1 – 12, 28th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics , Canberra, (2008)
- [5] Crochiere, R.; Rabiner, L. ; Multi Rate Signal Processing, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, (1983)
- [6] Maia, N.; Silva, J. : Theroretical and Experimental Modal Analysis, Resarch Studies Press Ltd. (1997)
- [7] Hayes, M. : Statistical Digital Signal Processing and Modeling, John Wiley & Sons, (1996)
- [8] Gloth G.; Sinapius M. : Swept Sine Exitation During Modal Identification of Large Aerospace Structures, DLR, (2002)
- [9] Füllekrug, U.; Degener, M. : Current Ground Vibration Test Methods, Test Performance an Methods Applied on the Airbus A 321, DLR (1997)
- [10] Fuellekrug, U.; Boeswald, M.; Goege, D.; Govers, Y. : Measurement of FRFs and Modal Identification in Case of Correlated Multi-Point Excitation, Institute of Aeroelasticity, German Aerospace Center, DLR Goettingen
- [11] Boden, F.; Kirmse, T.; Stasicki, B.; Lanari, C. : Advanced optical in-flight-measurements on deformation of wings an propeller blades, Conference Proceedings Society of Flight Test Engineers-19th Annual Symposium, Manching (2008-09-22 – 2008-09-29)