

INTEGRATION DES ABC-ROTORS AUF DEM ROTORPRÜFSTAND DES DLR IN VORBEREITUNG DER DNW-WINDKANALVERSUCHE

F. Hoffmann, R. Bartels, O. Schneider, B. G. van der Wall, H. Mainz
DLR / Institut für Flugsystemtechnik / Abteilung Hubschrauber
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig
Deutschland

1. ÜBERSICHT

Im Rahmen einer Kooperation zwischen DLR und ONERA begann 1999 die gemeinsame Arbeit an dem ABC-Forschungsprojekt. Das Projekt ist der Untersuchung des Einflusses von Hinterkantenklappen auf das Vibrations- und Lärmverhalten eines Rotors gewidmet. Dazu plant das DLR Braunschweig Windkanalversuche im großen Niedergeschwindigkeitskanal des DNW in der offenen 6mx8m Messstrecke. Im Folgenden werden laufende Aktivitäten zur Vorbereitung der Windkanalkampagne erläutert. Der Rotorversuchsstand ROTEST wird in seinen wesentlichen Komponenten beschrieben sowie für den Betrieb des Versuchsstandes essentielle Aspekte wie die Waagenkalibrierung, Sensorik, Datenerfassung und -aufzeichnung erläutert.

Des Weiteren wird der Aufbau des ABC-Rotorblattes, in das piezo-elektrisch angetriebene Hinterkantenklappen integriert sind, beschrieben. Es wird die Funktionsweise der Piezo-Aktuatoren sowie des Klappenantriebes veranschaulicht und auf die prinzipielle Ansteuerung der Klappen eingegangen.

In einer vorangegangenen Windkanalkampagne der ONERA im Hochgeschwindigkeitswindkanal S1 in Modane wurden infolge von Fliehkrafteinflüssen in Zusammenwirkung mit aerodynamischen Lasten lediglich geringe Klappenausschläge erreicht. Aus diesem Grund findet eine erneute Untersuchung des Aktuator-Klappe-Systems statt, um Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz des Systems zu identifizieren.

Abkürzungen

ABC	A ctive B lade C ontrol
HHC	H igher H armonic C ontrol
IBC	I ndividual B lade C ontrol
CFK	C arbonfaserverstärkter K unststoff
ATR	A dvanced T echnology R otor
ROTEST	R otor T est S tand
TEDAS	T ransputerbasiertes e rweiterbares D atenaufzeichnungssystem
TTL	T ransistor- T ransistor- L ogik

Symbol	Variable	Einheit	Wert
ρ	Luftdichte	kg/m ³	1.225
$C_{a\alpha}$	Auftriebsanstieg des Profils	-	2 π
F	Kraft	N	-
x, y, z	Koordinaten	m	-
R	Rotorradius	m	2.1
c	Profiltiefe	m	0.14
Ω	Rotordrehfrequenz	rad/s	103.15
β	Rotorblattschlagwinkel	deg	-

m_f	Klappenmasse	kg	0.0156
r_f / R	Relative radiale Klappenposition	-	0.85
$\Delta r_f / R$	Relative Klappenlänge	-	0.1
c_f / c	Relative Klappentiefe	-	0.15
x_{ac} / c_f	Relativer Luftkraftangriffspunkt auf der Klappe, bezogen auf das Gelenk	-	0.25
x_{cg} / c_f	Relativer Klappenschwerpunkt, bezogen auf das Gelenk	-	0.333
r_h	Hebelarm Anlenkung	m	0.0016
η_f	Klappenamplitude	deg	-
ω_f / Ω	relative Klappensteuerfrequenz	-	-
U	Aktuatorspannung	V	-
$U_{Hall1,2}$	Spannung Hall-Sensor 1,2	V	-
A_{Hall}	Amplitude der Hall-Sensor-Spannung	V	-
φ	Phase der Hall-Sensor-Spannung	deg	-
A	Steueramplitude des Aktuators	V	-

Indizes

Zen	Zentrifugal
L	Luft
T	Massenträgheit
r	radial
n	normal

2. EINLEITUNG

Umfangreiche Untersuchungen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass durch aktive Rotorsteuerung das Lärm- und Vibrationsniveau von Hubschrauberrotoren deutlich gesenkt werden kann. Entwicklungen im Bereich der höherharmonischen Steuerungen (HHC) und der individuellen Blattwurzelsteuerung (IBC) wurden erfolgreich in Windkanalversuchen [1] sowie im Flug [2, 3] erprobt. Bedingt durch Sicherheits- und Redundanzprobleme stellte sich die Zulassung von aktiven Rotorsteuerungssystemen jedoch als schwierig dar. Durch eine hohe Anzahl zusätzlicher Systeme für den Betrieb solcher Anlagen, den entsprechenden Zusatzmassen und den damit verbundenen Kosten arbeiteten die Anlagen zudem unwirtschaftlich, so dass für keines der untersuchten Konzepte die Vermarktung gelang. Aus diesem Grund bemüht man sich nun auf Basis einer Klappensteuerung um die Entwicklung eines effizienteren Systems [4].

Ein Klappenrotor ist bereits in Originalgröße gebaut worden und befindet sich derzeit bei Eurocopter Deutschland in der Flugerprobung [5]. Das System wird als erfolgreiche Weiter-

entwicklung der früheren IBC-Anlagen betrachtet, weshalb man über die Realisierung eines kommerziellen Klappenrotors nachdenkt. Dem entsprechend wichtig ist eine grundlegende Untersuchung der physikalischen Effekte, die der Wirksamkeit einer integrierten Hinterkantenklappe zugrunde liegen.

Während der DNW-Windkanalversuche sollen mittels einer Variation von Steuerfrequenz, -phase sowie ggf. der -amplitude für unterschiedliche Flugzustände die Effekte einer aktiven Klappensteuerung hinsichtlich einer Vibrations- und Lärmreduktion analysiert werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Versuche liegt in einer detaillierten Untersuchung der Wirbelentstehung sowie der Analyse von Blatt-Wirbel-Interaktionen.

3. ABC-ROTORBLATT

3.1. Aufbau des Klappenrotors

Der ABC-Rotor ist ein 38% Machzahl skalierter Modellrotor. Bei dem ABC-Rotorblatt handelt es sich um eine Carbonfaserverbundkonstruktion [6] basierend auf dem von ECD entwickelten ATR-Blatt [7, 8]. Das ATR-Blatt wurde ausgewählt, um ein modernes, bereits lärmreduziertes Rotorblatt hinsichtlich des Potenzials einer Lärm- und Vibrationsminderung durch Hinterkantenklappen zu untersuchen [9]. Zum anderen sollten die Ergebnisse aus den Windkanalversuchen mit denen der Flugversuche der Industrie mit dem Originalblatt vergleichbar sein. Modell- und Originalrotor unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer Blattdynamik und verwenden unterschiedliche Rotorkopftypen. Für das Modellblatt wird ein vollgelenkiger Rotorkopf genutzt, während das Originalblatt mit einem gelenklosen Rotorkopf zum Einsatz kommt. Die verwendete Blattgeometrie sowie die Blattprofile sind jedoch identisch.

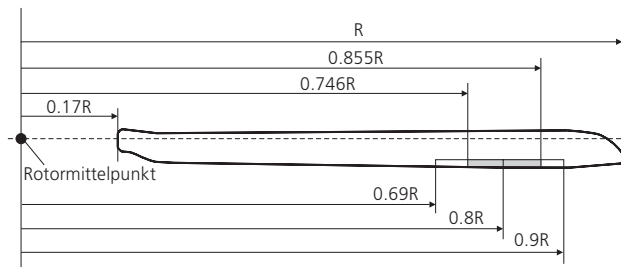


BILD 1. ABC-Rotorblatt mit unterschiedlichen Klappenpositionen

Für die Klappen sind drei mögliche Positionen entlang der Blatthinterkante vorgesehen (BILD 1). Die innere Klappenposition erstreckt sich über einen Bereich von 0.69R-0.8R, während sich die mittlere bei 0.746R-0.855R und die äußere Position bei 0.8R-0.9R befinden.

3.2. Piezo-Aktuator und Klappenantrieb

Der Antrieb der Klappen erfolgt über piezo-elektrische Aktuatoren, die sich aus jeweils zwei Hauptelementen zusammensetzen (BILD 2). Das aktive Element besteht aus mehreren piezo-elektrischen Einzelkeramiken, die zu Paketen zusammengefasst sind, so genannten Stapelaktuatoren.

Den zweiten Hauptbestandteil des Aktuators bildet ein Stahl-

rahmen, der den Stapelaktuator umschließt. Die Hauptmaße des Rahmens betragen in etwa 150mmx50mmx10mm. Der Rahmen bringt einerseits die für den Betrieb des Stapelaktuators notwendige Vorspannung auf, zum anderen dient er zur geometrischen Verstärkung der vom aktiven Teil erzeugten kleinen Stellwege. Somit ergeben sich vom Rahmen erzeugte Stellwege von ca. 0.5mm bei Betriebsspannungen des Aktuators von $-20V \leq U \leq 150V$. Die Masse des gesamten Aktuators beträgt ca. 200g [10].

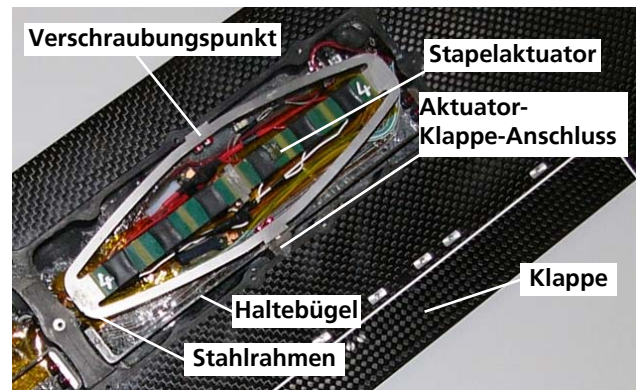


BILD 2. Piezo-Aktuator montiert im ABC-Rotorblatt

Der Aktuator wird an der der Nasenkante zugewandten Seite an einem Halteelement, das in den Holm geklebt ist, verschraubt. Auf der gegenüber liegenden Seite wird der Aktuator durch einen Metallbügel gehalten, der in Richtung der Zentrifugal- und Vertikalkraft steif ist und somit lediglich Bewegungen in Stellrichtung zulässt. Der eigentliche Antrieb der Klappen erfolgt über zwei Schubstangenelemente, die ebenfalls mit der beweglichen Seite des Aktuatorrahmens verschraubt sind (BILD 3).

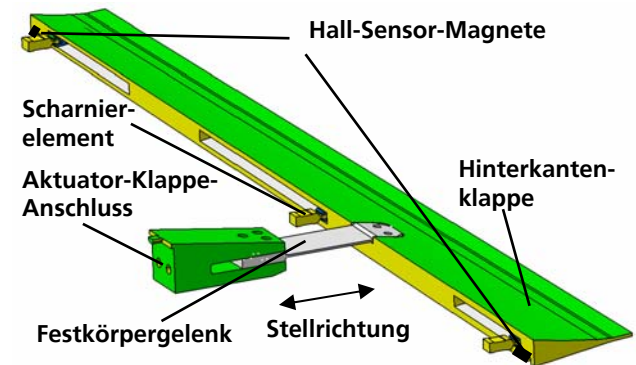


BILD 3. Aufbau der Hinterkantenklappe mit Aktuator-Klappe-Anschluss

Bedingt durch die geringen Stellwege ergeben sich sehr kleine Hebelverhältnisse für den Klappenantrieb. Demzufolge ist eine möglichst spielfreie und steife Konstruktion des Antriebsstranges essentiell. Die Spielfreiheit des Antriebs wird durch die Verwendung eines Festkörpergelenks aus Stahl gewährleistet.

In den vorangegangenen Windkanalversuchen haben sich die Festkörpergelenke unter Luft- und Zentrifugallasten jedoch als zu weich erwiesen. Daraus resultierend konnten nur geringe Klappenausschläge erreicht werden [11]. Das DLR prüft derzeit einen überarbeiteten Antriebsstrang, der einen Ersatz des Festkörpergelenks durch ein kugelgelager-

tes Scharniergelenk vorsieht.

3.3. Ansteuerung der Klappen

Die Ansteuerung der Klappen erfolgt über ein dSPACE-System. Das System besteht aus einer Prozessorkarte sowie diversen I/O-Karten, über die die Anbindung der externen Hardware erfolgt. Die Ein- und Ausgänge der dSPACE-Karten können in ein Matlab-Simulink-Modell eingebunden und entsprechend angesteuert werden. Mit Hilfe des Matlab-Real-Time-Workshops in Verbindung mit einem dSPACE-Compiler kann anschließend ein echtzeitfähiger Code erstellt werden, der auf dem dSPACE-System geladen wird. Die Steuerung des Systems erfolgt über eine programmierbare Bedienoberfläche, die auf einem PC betrieben und mit deren Hilfe die Einstellung der verschiedenen Systemparameter möglich ist. Um einer Verfälschung des eingesteuerten Sollsignals durch das Übertragungsverhalten des Aktuator-Klappe-Systems zu verhindern, ist ein Hardware-Regler vorgesehen. Dieser gleicht Amplitude und Phase des Ist-Signals der Klappe an das Soll-Signal an. Eine schematische Darstellung des geschlossenen Regelkreises zur Ansteuerung der Klappen zeigt BILD 4.

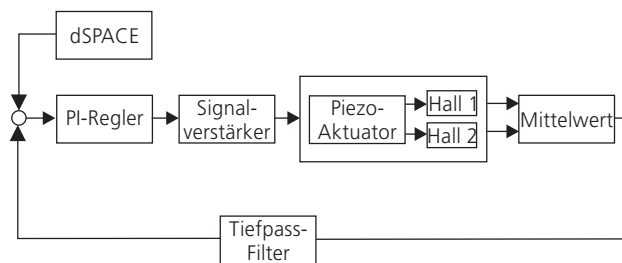


BILD 4. Geschlossener Regelkreis zur Ansteuerung der Hinterkantenklappen

Die Eingangsspannungen des Systems sind auf einen Bereich von $-1V \leq U \leq 7.5V$ limitiert. Das Reglersignal wird für den Betrieb der Piezo-Aktuatoren (APA500L) von einem Signalverstärker um den Faktor 20 verstärkt. Die Messung der Klappenwinkel erfolgt mit Hilfe von jeweils zwei Hall-Sensoren pro Klappenposition. An den beiden radialen Enden der Klappe sind die Hall-Sensor-Magneten montiert (Bild 3), während die eigentlichen Sensoren in der gegenüber liegenden Blatthinterkante integriert sind. Die Hall-Sensor-Spannungen werden mit einer Grenzfrequenz von 500Hz tiefpass-gefiltert, um hochfrequentes Messrauschen zu eliminieren und die Funktionalität des PI-Reglers sicher zu stellen. Der arithmetische Mittelwert der Hall-Sensor-Spannungen wird am Eingang des Reglers mit dem Steuersignal des dSPACE-Systems verglichen und entsprechend nachgeregelt.

4. ANALYSE AKTUATOR-KLAPPE-SYSTEM

Im Folgenden werden Ergebnisse aus den Messungen der Klappenausschläge bei fester Einspannung des Rotorblattes dargestellt. Dies beinhaltet sowohl statische als auch dynamische Anregungen der Hinterkantenklappe. Des Weiteren finden eine Abschätzung der im drehenden System wirksamen Klappenlasten und deren Einfluss auf den Klappenausschlag statt.

4.1. Statische Messung der Klappenwinkel

Die radial äußere Klappenposition stellt die kritische der drei möglichen Positionen dar, da sie im drehenden System den stärksten Fliehkrafteinflüssen unterworfen ist. Folglich beziehen sich die gezeigten Ergebnisse auf diese Klappenposition. Die Messung der Klappenwinkel erfolgt zunächst durch einen Laser, der auf einem Schienensystem relativ zum Rotorblatt ausgerichtet werden kann (BILD 5). Der verwendete Laser LLT 2810-25 arbeitet nach dem Laserschnittprinzip. Über eine Linien-Optik wird eine Laserlinie auf die Messoberfläche projiziert und das diffus reflektierte Licht dieser Laserlinie über eine Matrix abgebildet und zweidimensional ausgewertet. Um die für die Abbildung der Laserlinie nötige Messebene zu realisieren, wurde auf der Klappe ein ebenes Föhnchen spielfrei montiert.

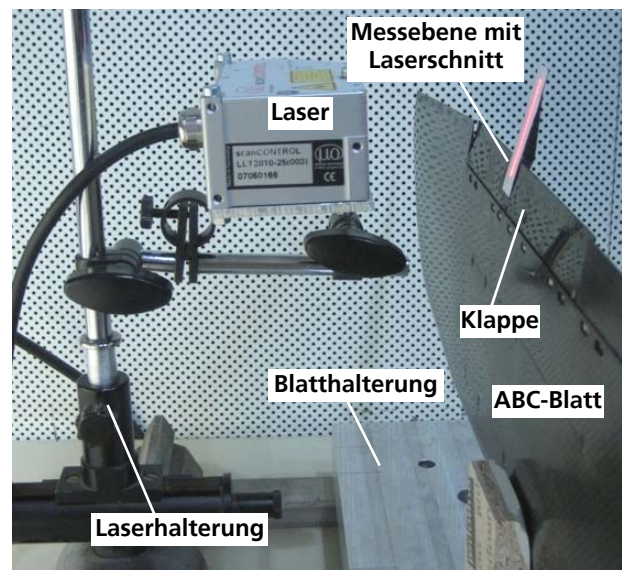


BILD 5. Klappenwinkelmessung mittels Laser

Zur Untersuchung des Aktuator-Klappe-Systems wurde der gesamte Spannungsbereich der Piezo-Aktuatoren statisch durchlaufen und die Hysteresekurven des Systems erfasst. Dabei wurde für jede Aktuatorspannung U das Lasersignal sowie die Spannungen der beiden Hall-Sensoren U_{Hall1} bzw. U_{Hall2} gemessen. BILD 6 zeigt am Beispiel der Klappenwinkel die resultierenden Aktuator-Hysteresen bezogen auf die Aktuatorspannung U . Die Klappenwinkel sind bezogen auf den Mittelwert der gemessenen Winkel dargestellt. Positive Winkel sind als Klappenausschlag nach unten definiert.

Aufgrund des asymmetrischen Spannungsbereiches der Piezo-Aktuatoren ($-20V \leq U \leq 150V$) sind die Klappen so zu montieren, dass sich die Nulllage der Klappen im drehenden System für eine Aktuatorspannung von $U = 65V$ ergibt. Zudem ist der Fliehkrafteinfluss im drehenden System, der eine Auslenkung der Klappe nach unten bewirkt (s. Kapitel 4.4), zu kompensieren. Daraus resultiert ein negativer Vor-einbauwinkel für die Klappen im stehenden System bei Anlegen der mittleren Betriebsspannung.

Anhand der geschwungenen Form der Hysteresen lässt sich ein nicht-lineares Verhalten des Aktuator-Klappe-Systems erkennen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit des bereits erläuterten Hardware-Reglers, der die Reaktion der Klappe entsprechend der Anregung sicherstellt.

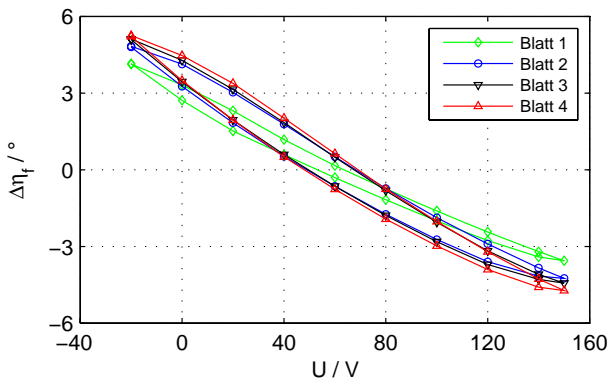


BILD 6. Statische Klappenwinkel-Hysteresen

4.2. Kalibrierung der Hall-Sensoren

Aus den statisch gemessenen Klappenwinkeln und den zugehörigen Hall-Spannungen lassen sich Kalibrierungsgleichungen für die Hall-Sensoren erstellen. BILD 7 und BILD 8 zeigen die Kalibrierungskurven für die Hall-Sensoren an der äußeren Klappenposition für die unterschiedlichen Rotorblätter.

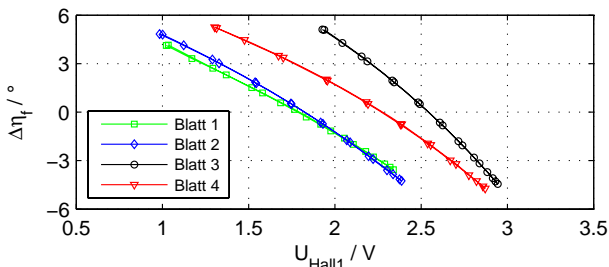


BILD 7. Kalibrierungskurven für Hall-Sensor 1

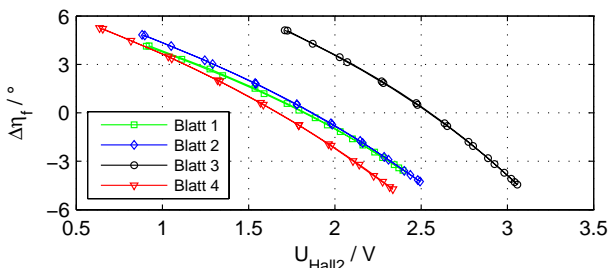


BILD 8. Kalibrierungskurven für Hall-Sensor 2

Die auf- bzw. absteigenden Hysteresezweige liegen nahezu aufeinander. Die Kalibrierungskurven können folglich als unabhängig von der Richtung, in der die Hysterese durchlaufen wird, betrachtet und durch eine polynomische Interpolationsfunktion dritter Ordnung angenähert werden.

4.3. Dynamische Messung der Klappenwinkel

Die Reaktion des Aktuator-Klappe-Systems auf dynamische Steuereingaben ist für Frequenzen von 1Hz sowie des 2-5fachen der Rotordrehfrequenz (16Hz) untersucht worden. Um den asymmetrischen Spannungsbereich der Aktuatoren voll ausnutzen zu können, erfolgt die Einsteuerung mit einem Spannungsoffset von $U_{\text{off}} = 65\text{V}$. Die Klappenwinkel für dynamische Steuereingaben werden mit Hilfe der kalibrier-

ten Hall-Sensoren bestimmt. BILD 9 zeigt die ermittelten Klappenwinkel-Hysteresen beispielhaft für Anregungsfrequenzen von 1, 48 und 80Hz für Blatt 3 bei der maximalen Steueramplitude von $A = 80\text{V}$.

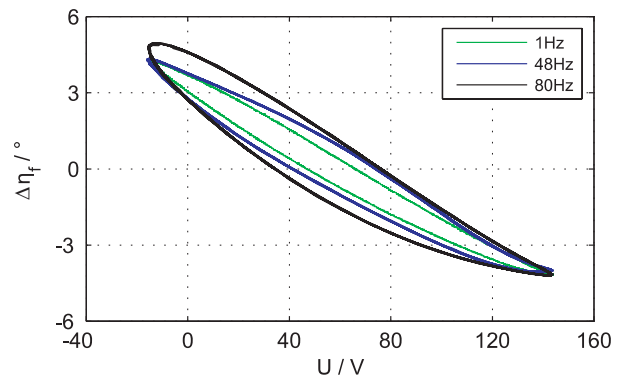


BILD 9. Dynamische Klappenwinkel-Hysteresen, Blatt 3, $A = 80\text{V}$, $U_{\text{off}} = 65\text{V}$, 0-400Hz tiefpass-gefiltert

Mit steigenden Frequenzen weiten sich die Hysteresen auf. Dieser Effekt resultiert aus steigenden Wärmeverlusten bei Umordnungsvorgängen in den Piezokristallen. Die auftretenden Verluste sind äquivalent zur Fläche, die von den Hysteresen umschlossen wird.

Die Bestimmung der Eigenfrequenzen des Systems erfolgt durch einen Frequenzsweep mit einer sinusförmigen Anregung für Frequenzen von $f = 0 \div 500\text{Hz}$ und einer Amplitude von $A = 5\text{V}$ an Blatt 3.

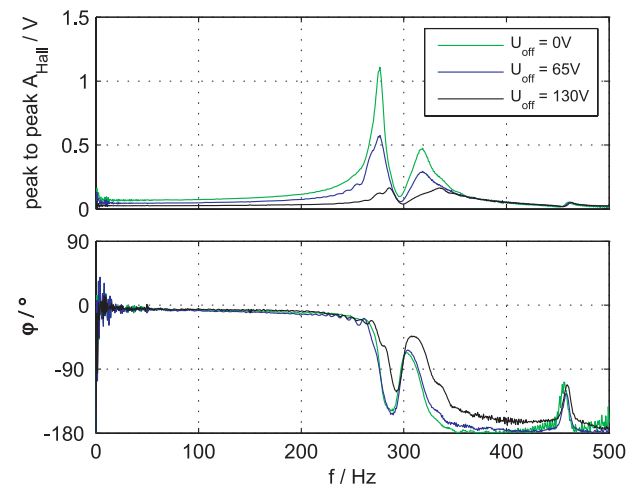


BILD 10. Frequenzantwort des Aktuator-Klappe-Systems, Blatt 3

BILD 10 zeigt die ermittelten Hall-Sensor-Spannungen in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz. Demnach liegt die erste Eigenfrequenz des Aktuator-Klappe-Systems bei ca. 280Hz. Eine schwächere, zweite Eigenfrequenz des Systems ist für eine Frequenz von ca. 320Hz zu erkennen. Bei einer Frequenz von 460Hz zeigt sich eine dritte Eigenfrequenz, mit jedoch deutlich geringerem Einfluss. Um die aus der direkten Einsteuerung resultierenden Klappenwinkel zu erhöhen, wäre eine Absenkung der Eigenfrequenzen des Systems wünschenswert. Damit wäre es möglich, den Effekt der Resonanzüberhöhung bei Annäherung an die Eigenfrequen-

zen auszunutzen. Da die höchste für eine aktive Steuerung sinnvolle Anregungsfrequenz jedoch bei 5/rev (80Hz) liegt, findet die Anregung weit entfernt von der Resonanzüberhöhung statt. Entsprechend lässt sich in BILD 9 kein Verstärkungseffekt für den erreichbaren Klappenwinkel mit steigender Frequenz erkennen.

Zusätzlich ist der Einfluss unterschiedlicher Spannungsoffsets auf die Lage sowie die Stärke der Eigenfrequenzen untersucht worden. Für einen Offset von $U_{\text{off}} = 0V$ im unteren Betriebsbereich des Aktuators ergeben sich die höchsten Amplituden in der Frequenzantwort. Bei ansteigendem Offset sinken die Amplituden, wobei für $U_{\text{off}} = 130V$ eine Verschiebung der Eigenfrequenzen auftritt.

Für die Phase der Systemantwort zeigen sich die charakteristischen Phasendrehungen bei Erreichen der Eigenfrequenzen.

4.4. Klappenlasten am ABC-Rotorblatt

Unter Fliehkrafteinfluss sowie wirksamen Luftkräften muss mit einer Reduzierung der im stehenden System ermittelten Maximalausschläge der Klappen gerechnet werden. Im Folgenden werden die auftretenden Klappenlasten, denen der Aktuator entgegen wirken muss, näher erläutert.

Einfluss der Fliehkraft

Durch den Schlagwinkel des Rotorblattes aufgrund des erzeugten Rotorschubes ergibt sich eine Fliehkraftkomponente, die die Klappe aus ihrer Nulllage auszulenken versucht (BILD 11).

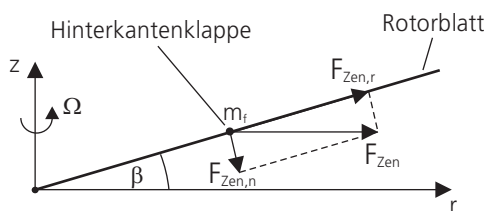


BILD 11. Einfluss der Fliehkraft auf den Klappenausschlag

Die Kraft auf den Aktuator berechnet sich aus dem Moment um das Klappengelenk, welches die Fliehkraft verursacht, dividiert durch den Hebelarm, mit dem die Klappe angesteuert wird. Die Fliehkraft wird bei mittlerer radialer Position der Klappe und in deren Schwerpunkt angenommen. Der Abstand des Klappenschwerpunktes vom Gelenk wird mit 1/3 der Klappentiefe hinter dem Gelenk angesetzt ($x_{CG} = c_f / 3$).

$$(1) \quad F_{Z_{en,n}} = m_f r_f \Omega^2 \sin \beta \cdot \frac{x_{CG}}{r_h} \approx 68N$$

Einfluss der Klappenträgheit

Die maximale Rückstellkraft bei dynamischer Auslenkung der Klappe erhält man bei der höchsten Steuerfrequenz $\omega_f = 5\Omega$ mit einer minimal benötigten Klappenamplitude von $\eta_f = 3^\circ$ aus der Beschleunigung der Klappenmassen.

Die Klappenmasse wird als Punktmasse mit Abstand x_{CG}

zum Drehgelenk wie oben angenommen.

$$(2) \quad F_T = \frac{m_f x_{CG}^2 \omega_f^2 \eta_f}{r_h} \approx 7N$$

Einfluss der Luftkräfte

Bei Annahme linearer Aerodynamik sind die stationären Kräfte aufgrund Klappenantriebes durch den Staudruck an der mittleren radialen Klappenposition, der Klappenfläche, dem Auftriebsanstieg in Verbindung mit dem Klappenwinkel und der Lage des Luftkraftangriffspunktes relativ zum Drehgelenk gegeben ($C_{aa} = 2\pi, \eta_f = 3^\circ$).

$$(3) \quad F_L = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot (r_f \Omega)^2 \cdot (\Delta r_f c_f) \cdot C_{aa} \cdot \eta_f \cdot \frac{x_{ac}}{r_h} \approx 99N$$

Einfluss der Massenreduktion

Die Fliehkkräfte haben einen Einfluss auf die Aktuatorkräfte in der Größenordnung der Luftkräfte. Durch Reduktion der Klappenmasse kann der Einfluss der Fliehkraft entsprechend reduziert werden, so dass die Aktuatorleistung weniger durch die Kompensation der Fliehkraftanteile gemindert wird. Da die Klappenmasse linear in die Fliehkkräfte eingeht, ist diese so weit wie möglich zu reduzieren, um den größtmöglichen Effekt zu erzielen.

5. ROTORVERSUCHSSTAND DES DLR

Im folgenden Abschnitt soll auf wesentliche Elemente des Rotorversuchsstandes, wie beispielsweise das Windkanalmodell, eingegangen werden. Ein wichtiges Element des Windkanalmodells stellt die Rotorwaage dar, deren Kalibrierung hier ausführlich erläutert wird. Des Weiteren wird auf die Datenerfassung und -aufzeichnung als entscheidende Aspekte für die Funktionstüchtigkeit des Versuchsstandes eingegangen.

5.1. Aufbau des Rotorversuchsstandes

BILD 12 zeigt das Windkanalmodell ROTEST [12], das für die ABC-Windkanalversuche zum Einsatz kommt mit einseitig abgenommener akustischer Verkleidung.

Im vorderen Teil des Modells befindet sich ein Hydraulikmotor mit einer maximalen Leistung von 135 KW, der die Rotorwelle und somit den Rotor antreibt. Die Rotorwaage zur Messung der am Rotor auftretenden Kräfte befindet sich im Kern des Modells.

Die Daten- und Stromübertragung für die Blätter zwischen drehendem und festem System geschieht mit Hilfe eines Datenschleifringes mit 329 Ringen bzw. eines Versorgungsschleifringes mit 24 Ringen. Die Sensorsignale der einzelnen Rotorblätter sowie des Rotorkopfes werden auf einer Platine auf dem Rotorkopf zusammen geführt. Die Signalleitungen werden gebündelt durch die Rotorwelle geführt und anschließend verstärkt. Die Datenaufzeichnung erfolgt über zwei TEDAS-Anlagen [13], wobei eine Anlage die Drucksensorsignale erfasst und vom DLR Göttingen betrieben wird.

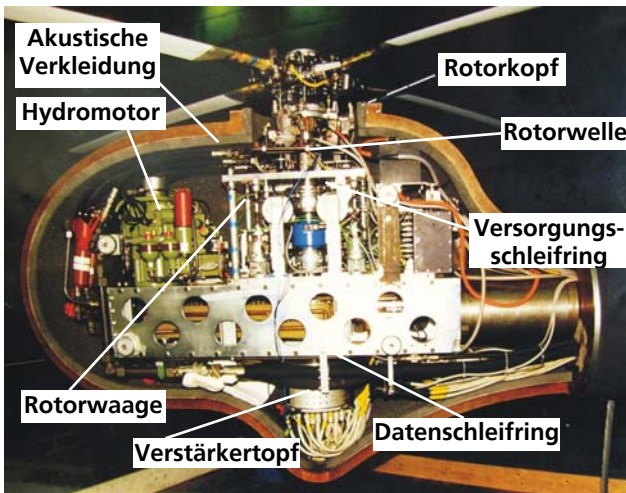


BILD 12. Windkanalmodell ROTEST

Die TEDAS-Anlagen sind Vielkanal-Messanlagen auf Transputer-Basis mit bis zu 240 Messkanälen und einer Abtastfrequenz von 80kHz. Die einzelnen Messkanäle werden vom Rotornulldurchgang getriggert. Für Rotordrehzahlen unterhalb einer bestimmten Grenzdrehzahl erzeugt eine TTL-Schaltung automatisch einen künstlichen Trigger-Impuls, so dass eine ständige Taktung des Messsystems gewährleistet ist.

5.2. Rotorkopf- und Blattsensorik

Der Rotorkopf verfügt für die Messung von Schlag-, Schwenk- und Steuerwinkeln über Potentiometer, die als Winkelgeber dienen. Die Überwachung der Mastmomente erfolgt über Dehnmessstreifen (DMS) ebenso wie die Messung der Steuerstangenkräfte. Beschleunigungsmesser erfassen die am Rotorkopf auftretenden Vibrationen.

Die ABC-Rotorblätter sind mit einer Vielzahl von Drucksensoren sowohl in Spannweiten- als auch in Tiefenrichtung des Blattes ausgestattet. Drucksensoren sind zusätzlich auf den Klappen der Blätter 1-3 integriert. Die Messung der Schlag-, Schwenk- und Torsionsdeformation erfolgt hier über Dehnmessstreifen. An der Blattspitze von Blatt 2 sind außerdem Beschleunigungssensoren für eine direkte Erfassung der Blattspitzenauslenkung implementiert. Für die Messung der Klappenauslässe sind pro Blatt sechs Hall-Sensoren vorgesehen, die entlang der Hinterkante des Aktuator-Rahmens angeordnet sind. Die zugehörigen Hall-Magneten sind in der Klappenvorderkante integriert. Hall-Sensoren und -Magneten sind so positioniert, dass für jede der drei möglichen Klappenpositionen jeweils zwei Sensoren zur Verfügung stehen. Insgesamt sind die ABC-Rotorblätter mit 180 Drucksensoren, 24 Hallsensoren, 51 DMS sowie 2 Beschleunigungsmessern ausgestattet.

5.3. Rotorwaage

Zur Messung der am Rotor auftretenden Kräfte und Momente während des Windkanaltests wird eine 6-Komponenten-Waage verwendet. Die Waage besteht aus sieben identischen Einzelmesssystemen (Kraftmessdosen). Jede Kraftmessdose ist eine Kombination, bestehend aus einem piezoelektrischen Kraftaufnehmer zur Messung der dynamischen Kräfte und einem vorgespannten Kraftaufnehmer auf Basis von Dehnmessstreifen zur Erfassung der statischen

Kräfte. Die an den Kraftmessdosen anliegende Spannung verhält sich proportional zur aufgebrachtten Kraft.

Jede Messdose wird zunächst einzeln mit Hilfe eines Referenzmesssystems kalibriert. Die durch eine lineare Regression ermittelten Koeffizienten werden in die Auswertung übernommen.

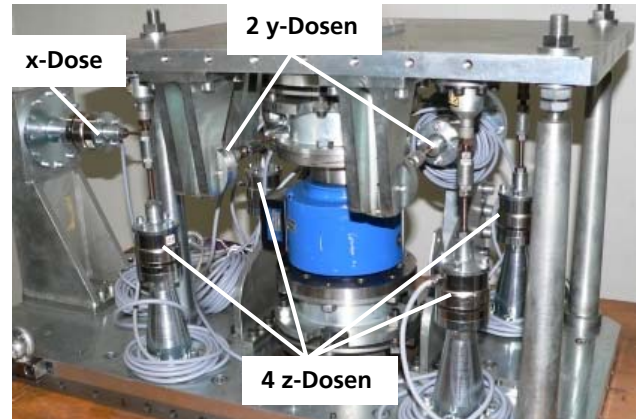


BILD 13. Rotorwaage ROTEST

Aus den Signalen der sieben Kraftmessdosen können die am Rotorkopf auftretenden Kräfte und Momente berechnet werden. Aufgabe der Kalibrierung ist es, die entsprechende Kopplungsmatrix zu ermitteln, deren Koeffizienten den Einfluss der angreifenden Kraft- und Momentenkomponenten auf die einzelnen Messdosen angeben.

Die Kraftmessdosen sind so angeordnet, dass ihre Wirkrichtung denen des Rotorkoordinatensystems entspricht. Dabei werden für die Messung der Kräfte in z-Richtung (Schub) vier Dosen, für die Kräfte in y-Richtung (Querkräfte) zwei Dosen und für die Kräfte in x-Richtung (Längskräfte) eine Dose verwendet (BILD 13).

5.4. Kalibrierung der Rotorwaage

5.4.1. Messaufbau

Zur Kalibrierung der Rotorwaage wird diese in ein spezielles Kalibriergestell eingebaut. Der Rotorkopf und der Rotormast sind hier durch einen massiven Zylinder ersetzt, dessen oberes Ende der Rotorkopfposition entspricht (BILD 14).

Zur Belastung des Systems mit Kräften in x- und y- Richtung werden an der Rotorkopfposition Stahlseile eingehängt, an denen über jeweils eine Umlenkrolle Gewichte aufgelegt werden. Kräfte in z-Richtung (Schub) werden durch eine über dem Teststand angeordnete Gewindespindel mit Handrad eingeleitet. Zur Aufbringung von Momenten ist ein Momentenkreuz an der Position des Rotorkopfes befestigt, an dessen Arme wiederum Gewichte angehängt werden können.

Zur Messung der aufgebrachtten Kalibrierlasten werden zusätzliche Kalibriermessdosen verwendet. Diese sind bei den Messungen der x- und y-Kräfte zwischen dem Seilende und dem Auflageteller angebracht, bei den Messungen der z-Kräfte zwischen Rotorkopfposition und Gewindespindel.

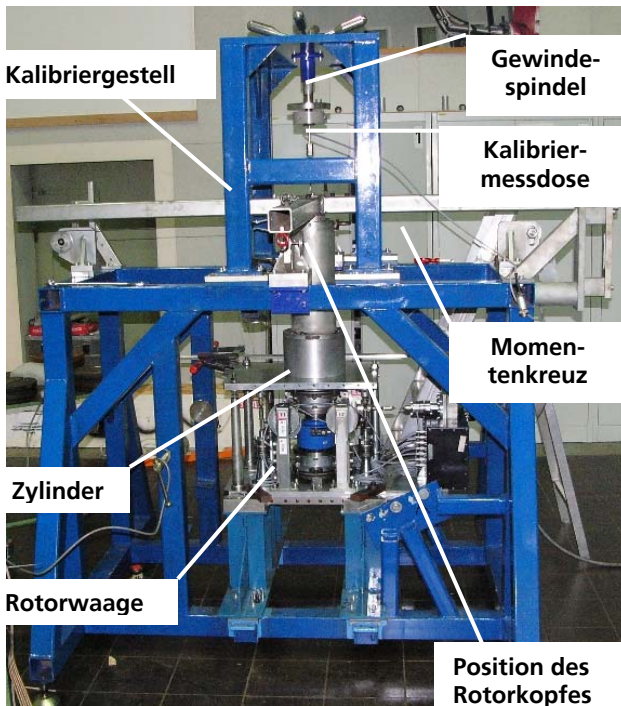


BILD 14. Rotorwaage im Kalibriergestell

5.4.2. Kalibrierung

Zu Anfang jeder Messung werden alle Kalibriermessdosen und Kraftmessdosen auf Null abgeglichen, so dass die Tara-lasten kompensiert sind. Für die Erstellung einer Kalibrierungsmatrix werden die Abhängigkeiten der gemessenen Kräfte der Rotorwaage von den eingeleiteten äußeren Kräften und Momenten durch lineare Regression bestimmt. Aus den linearen Faktoren ergeben sich die Koeffizienten einer 7x5 Matrix. In einer Vergleichsmessung [14] hat sich gezeigt, dass es nicht notwendig ist, Glieder höherer Ordnung für die Regressionsfunktionen zu berücksichtigen.

Zur Berechnung der fünf Komponenten (drei Kräfte, zwei Momente) kann folgender Ansatz gemacht werden:

$$(4) \quad A\vec{F} = \vec{X} \quad \text{mit} \quad \vec{F} = [Z1, Z2, Z3, Z4, Y1, Y2, X]^T \\ \vec{X} = [F_z, F_y, F_x, M_y, M_x]^T$$

Dabei ist \vec{F} der Vektor der sieben Kraftmessdosen (innere Belastung), \vec{X} der Vektor der Kräfte und Momente (äußere Belastung). A stellt die Kopplungsmatrix, die die Beziehungen zwischen innerer und äußerer Belastung angibt, dar. Da die 7x5 Matrix nicht direkt invertiert werden kann, wird das Gleichungssystem mit der transponierten Matrix von A multipliziert.

$$(5) \quad (A^T A)\vec{F} = A^T \vec{X}$$

Der Term $(A^T A)$ ist eine quadratische 7x7 Matrix und kann invertiert werden. Die Multiplikation mit der Inversen liefert:

$$(6) \quad \vec{F} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{X} = C\vec{X}$$

Die so gewonnene Kalibriermatrix C wird als Pseudoinverse von A bezeichnet. Ihre Koeffizienten repräsentieren prinzipiell die geometrischen Beziehungen bzw. Kopplungen, die

aus der Waagenkonstruktion hervorgehen. \vec{F} repräsentiert die Kräfte und Momente am Ort des Rotorkopfzentrums, die aus den gemessenen Kräften am Ort der Waagen-Kraftmessdosen resultieren.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Das DLR Braunschweig ist derzeit intensiv mit der Verbesserung des bestehenden Aktuator-Klappe-Systems in Vorbereitung der DNW-Windkanalversuche beschäftigt.

Für die Untersuchung des Einflusses von Hinterkantenklappen hinsichtlich einer Lärm- und Vibrationsreduzierung am Rotor ist es notwendig, die derzeit maximal realisierbaren Klappenausschläge zu erhöhen. Um den Einfluss der Fliehkräfte zu verringern, werden momentan Klappensätze mit reduzierter Masse gebaut. Zusätzlich werden modifizierte Klappenantriebe entwickelt und getestet. Mögliche Modifikationen bestehen unter anderem im Bau von kürzeren Festkörpergelenken bzw. dem Ersatz der Festkörpergelenke durch Gleit- bzw. Kugellager.

7. AUSBLICK

In einem nächsten Schritt soll das Aktuator-Klappe-System im drehenden System und damit der Einfluss von Fliehkräften auf den Klappenausschlag an bestehenden sowie modifizierten Aktuator-Klappe-Systemen untersucht werden.

8. LITERATUR

- [1] B. G. van der Wall, B. Junker, C. L. Burley, T. F. Brooks, Y. Yu, C. Tung, M. Raffel, H. Richard, W. Wagner, E. Mercker, K. Pengel, H. Holthusen, P. Beaumier, Y. Delrieux, „The HART II Test in the LLF of the DNW – a Major Step towards Rotor Wake Understanding“, 28th ERF, Bristol, England, 2002
- [2] D. Teves, V. Klöppel, P. Richter, „Development of active control technology in the rotating system, flight testing, and theoretical investigations“, 18th ERF, Avignon, France, 1992
- [3] B. Enenkl, D. Roth, G. Kuntze-Fechner, H. Barnerssoi, V. Klöppel, „Hubschrauber-Rotorsysteme mit aktiver Steuerung bei Eurocopter Deutschland“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, München, Deutschland, 2003
- [4] P. Jänker, F. Hermle, S. Friedl, K. Lentner, B. Enenkl, C. Müller, „Advanced Piezoelectric Servo Flap System for Rotor Active Control“, 32nd ERF, Maastricht, The Netherlands, 2006
- [5] D. Roth, B. Enenkl, O. Dieterich, „Active Rotor Control by Flaps for Vibration Reduction - Full Scale Demonstrator and first flight test results -, 32nd ERF, Maastricht, The Netherlands, 2006
- [6] H. Mainz, B. G. van der Wall, P. Leconte, F. Ternoy, H. des Rochettes, „ABC rotor blades: design, manufacturing and testing“, 31st ERF, Florence, Italy, 2005
- [7] M. Bebesel, G. Polz, E. Schöll, „Aerodynamic and aeroacoustic layout of the ATR (Advanced Technology Rotor)“, 55th Annual Forum of the AHS, Montreal, 1999

- [8] S. Emmerling, B. Enenkl, G. Kuntze-Fechner, „Die Entwicklung eines neuen Hubschrauberrotors (ATR)“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Dresden, Germany, 1996
- [9] P. Leconte, M. Rapin, B. G. van der Wall, „Main rotor active flaps: numerical assessment of vibration reduction“, 57th Annual Forum of the AHS, Washington, DC, USA, 2001
- [10] P. Leconte, H-M. des Rochettes, „Experimental assessment of an active flap device“, 58th Annual Forum of the AHS, Montreal, Canada, 2002
- [11] P. Crozier, P. Leconte, Y. Delrieux, B. Gimonet, A. I. Pape, H-M. des Rochettes, „Wind-Tunnel Tests of a Helicopter Rotor with Active Flaps“, 32nd ERF, Maastricht, The Netherlands, 2006
- [12] W.R. Splettstoesser, K.-J. Schultz, B. Junker, W. Wagner, B. Weitemeier, D. Protopsaltis, D. Fertis, „The HELINOISE Aeroacoustic Rotor Test in the DNW“, 1993
- [13] B. Gelhaar, B. Junker, „Rotoren im Windkanal. Erfassung und Verarbeitung hochfrequenter Messdaten“, DGLR Fachtagung, Braunschweig, 1999
- [14] S. Ehr, „Kalibrierung der Rotorwaage ROTEST, DLR IB 111-98/16, Braunschweig, Germany“, 1998