

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik

**Experimentelle Untersuchungen zur Reduzierung
der Buffetlasten am Seitenleitwerk
eines Luftfahrzeugs**

Dipl.-Ing. Christian Pickel

Vollständiger Abdruck der bei der
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichten Dissertation

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. M. Klein
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. C. J. Kähler
2. Berichterstatter:	apl. Prof. Dr.-Ing. C. Breitsamter

Diese Dissertation wurde am 13.01.2014 bei der Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 22.01.2014 angenommen.

Tag der Prüfung: 21.07.2014

Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik

Christian Pickel

**Experimentelle Untersuchungen zur Reduzierung der
Buffetlasten am Seitenleitwerk eines Luftfahrzeugs**

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3045-7

ISSN 0945-2214

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die hier vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik der Universität der Bundeswehr München entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Christian J. Kähler für die stets gewährte Unterstützung meiner Arbeit. Die konstruktiven Anregungen und Diskussionen waren für mich immer eine sehr gute Basis für die weiteren Ausführungen meiner Promotion.

Ebenfalls möchte ich Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Christian Breitsamter für die Übernahme des Amtes als zweiten Berichterstatter danken sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Klein für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Die aufwändigen Experimente wären alleine nicht realisierbar gewesen. Für die tatkräftige Unterstützung beim Versuchsaufbau möchte ich mich insbesondere bei den Herren Hptm. Dipl.-Ing. Dirk Sonnemann, Otto Christl, Johann Hofer, Ludwig Kasseker und Dipl.-Ing. (FH) Karl Fichtl ganz herzlich bedanken, die mit ihrer Erfahrung und Einsatzbereitschaft einen wichtigen Beitrag zum erfolgreichen Gelingen der Experimente beigetragen haben.

Übersicht

Im Flugbereich moderner, agiler Flugzeuge entstehen Lasten durch instationäre Strömungszustände an verschiedenen Bauteilen des Flugzeuges. Davon ist das Buffeting meist am kritischsten. Dies tritt häufig am Seitenleitwerk auf, da sich dieses Bauteil bei hohen Anstellwinkeln im Nachlauf von Vorderkantenwirbeln oder von Steuerklappen befindet. Extreme schwingungsinduzierte Materialermüdung tritt bei dem Betrieb eines Flugzeuges mit mittiger Airbrake und einfachem Seitenleitwerk auf. Ziel dieser Arbeit ist die Beeinflussung des Nachlaufgebietes durch geeignete Lochgeometrien in der Airbrake sowie das Verständnis der Auswirkung der veränderten Nachlaufströmung auf die Druckfluktuationen am Seitenleitwerk. Im Trisonischen Windkanal München wurden dafür umfangreiche Experimente in kompressibler Unterschallströmung bei $Ma_\infty = 0,3 - 0,8$ durchgeführt. Durch Verwendung von Particle Image Velocimetry (PIV), instationärer Druckmesstechnik und Widerstandsmessungen ergibt sich eine umfassende Analyse der Auswirkungen der Modifikationen. Mittels der PIV-Messungen in horizontalen Ebenen wird die Topologie der Nachläufe der verschiedenen Airbrakeausführungen erfasst. Dies ermöglicht die Ableitung von dreidimensionalen Wirbelmodellen der Airbrakes. Die Auswirkungen der Lochgeometrien werden zum einen in den Geschwindigkeitsfeldern der PIV-Messungen und zum anderen in den Spektralanalysen der instationären Druckmessungen am Seitenleitwerk nachgewiesen. Das Ausmaß des Widerstandsverlustes aufgrund der Schlitze in der Airbrake wurde durch die Waagenmessungen am Modell quantifiziert. Die Untersuchungen zeigen, dass die Modifizierungen eine effektive Methode darstellen die, durch Druckschwankungen im Nachlauf, induzierte dynamische Belastung des Seitenleitwerks zu verringern.

Abstract

In flight envelopes of modern and agile aircrafts, loads to various components of the aircraft occur, caused by unsteady flow phenomena. Buffeting is usually the most critical. This has been observed on the vertical tail, due to the fact that this component is in the wake of leading edge vortices or control flaps at high angles of attack. Extreme vibration-induced fatigue occurs in the operation of an aircraft with a central airbrake and single fin. The aim of this work is the influence of the wake by suitable hole geometries in the airbrake as well as understanding the impact of changes in the wake flow on the pressure fluctuations at the vertical tail. Extensive experiments were carried out at the Trisonischen Windkanal Munich in compressible subsonic flow at $Ma_\infty = 0.3 - 0.8$. By using particle image velocimetry (PIV), unsteady pressure measurements and resistance measurements a comprehensive analysis on the impact of these modifications can be made. The topology of the different types of airbrakes is determined by PIV-measurements in horizontal planes. This enables the derivation of three-dimensional vortex schemes of the airbrakes. The effect of the hole geometries are established by the velocity fields resulting from the PIV-measurements on the one hand and by the spectral analysis of the unsteady pressure measurements at the fin on the other hand. The extent of resistance loss induced by the slots of the airbrake are quantified by balance measurements at the model. The investigations show that the modification is an effective method for reducing the dynamic loads of the fin, which are induced by pressure fluctuations of the airbrake wake.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Bezeichnungen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	2
2 Stand der Forschung	5
2.1 Buffeting induziert durch Vorderkantenwirbel	7
2.2 Buffeting durch den turbulenten Nachlauf einer Airbrake	9
3 Strömungsmechanische Grundlagen	13
3.1 Topologie der Strömung am stumpfen zweidimensionalen Körper	15
3.2 Einfluss der Geometrie auf das Nachlaufgebiet	16
3.3 Reynoldszahlabhängigkeit der Wirbelablösung	17
4 Versuchsaufbau und -durchführung	21
4.1 Der Trisonische Windkanal München	21
4.2 Versuchsträger	22
4.2.1 Grundmodell	23
4.2.2 Integration des Modells in den Windkanal	28
4.3 Integration der Druck- und Kraftmesstechnik	29
4.3.1 Einbau der dynamischen Drucksensoren	29
4.3.2 Auslegung und Konstruktion der Waage	30
4.3.3 Einbau der Waage am Modell	32
4.4 Versuchsplanung	32
5 Strömungsvisualisierung und Messtechniken	35
5.1 Ölanstrichverfahren	35
5.2 Schlierenoptik	36
5.3 Particle Image Velocimetry	38
5.3.1 Versuchsaufbau am Windkanal für Particle Image Velocimetry	40
5.3.2 Grundlagen zur Berechnung der Geschwindigkeitsfelder	43

5.3.3	Auswertung der Messdaten	47
	Kalibrierung	47
	Berechnung der Geschwindigkeitsfelder	48
5.4	Dynamische Druckmesstechnik	51
5.4.1	Kalibrierung	52
5.5	Kraftmessung	53
5.5.1	Kalibrierung	54
5.6	Datenerfassung der Kraft- und Druckmessungen	54
6	Überprüfung des Modellaufbaus im TWM auf korrekte Anströmung	57
6.1	Die Modellanströmung	57
6.1.1	Die Umströmung der Airbrake	57
6.1.2	Die Umströmung des Seitenleitwerks	58
6.2	Die Ermittlung der maximalen Machzahl des Versuchsaufbaus	60
7	Die Topologie des Nachlaufs	65
7.1	Berechnung der relevanten Größen aus den PIV-Geschwindigkeitsfeldern	65
7.2	Charakterisierung der Nachlaufgebiete	68
7.2.1	Stromlinienverlauf des Nachlaufs	68
7.2.2	Geschwindigkeitsverteilung und deren Schwankung im Nachlauf	76
7.3	Beeinflussung der Scherschicht durch die Geometrie	82
8	Instationäre Lasten am Seitenleitwerk	91
8.1	Datenaufbereitung der Druckmessungen	91
8.2	Analyse des Druckbeiwertes	94
8.3	Frequenzanalyse der instationären Druckmessungen	96
8.4	Wirbeldetektion in den Geschwindigkeitsfeldern	106
9	Widerstandsmessung der Luftbremsen	111
10	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	121