

Christian Breitsamter

**Nachlaufwirbelsysteme
großer Transportflugzeuge**

Experimentelle Charakterisierung
und Beeinflussung



Herbert Utz Verlag · München

Aerodynamik

Zugl.: München, Techn. Univ., Habil., 2007

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2007

ISBN 978-3-8316-0713-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Vorwort

Nachlaufwirbelsysteme, die auch Wirbelschleppen genannt werden, bestimmen den Staffellungsabstand aufeinander folgender Flugzeuge, sowohl im Reiseflug als auch bei Start und Landung. Vor dem Hintergrund einer umweltschonenden und wirtschaftlichen Nutzung verfügbarer Flughafenkapazitäten erwächst die dringende Forderung nach einer Verkürzung der Staffellungsabstände ohne Beeinträchtigung der Sicherheitsstandards. Grundlegende Forschungsarbeiten sind daher von hohem Interesse, um den Kenntnisstand der Strömungsphysik von Nachlaufwirbelsystemen weiter zu verfeinern. Darauf aufbauend können Maßnahmen zur Wirbelschleppenbeeinflussung entwickelt und deren Wirksamkeit beurteilt werden. Hierzu präsentiert die vorliegende Arbeit eigene Forschungsergebnisse, die im Zeitraum 2000 – 2006 im Rahmen von Beteiligungen an nationalen und europäischen Verbundforschungsprogrammen und weiteren eigenen Untersuchungen entstanden sind.

An dieser Stelle bedanke ich mich sehr herzlich bei allen Personen und Institutionen, die zum Gelingen dieser Arbeit und zu einem erfolgreichen Abschluss meiner Habilitation beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Nikolaus A. Adams und Herrn Professor Dr.-Ing. Boris Laschka für die Begutachtung der wissenschaftlichen Arbeit und Herrn Professor Dr.-Ing. Horst Baier für die Übernahme des Vorsitzes des Sachverständigenrates.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	V
Bezeichnungen und Abkürzungen	XIV
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Stand der Forschung	4
1.3 Beitrag dieser Arbeit	10
2 Grundlagen	11
2.1 Entwicklungsstufen des Nachlaufwirbelsystems	11
2.2 Größen zur Beschreibung des Nachlaufwirbelsystems	19
2.2.1 Auftrieb und Zirkulation	19
2.2.2 Induktion	20
2.2.3 Geschwindigkeitsfeld, Zirkulation und Wirbelstärke	21
2.2.4 Wirbellage	25
2.2.5 Querströmungsenergie und induzierter Widerstand	26
2.2.6 Wirbelradien	26
2.3 Dimensionslose Kenngrößen	28
2.4 Gefährdungspotenzial	30
2.4.1 Induziertes Rollmoment	30
2.4.2 Rollsteuerpotenzial	32
2.4.3 Lastfaktor	33
2.5 Skalierung für eine Großausführung	33
2.6 Wirbelmodelle	35
2.6.1 Potenzialwirbel und Basisgrößen	35
2.6.2 Analytische Modelle	36
2.6.2.1 Rankine–Wirbel	36
2.6.2.2 Lamb–Oseen–Wirbel	37
2.6.2.3 Burger–Wirbel	38
2.6.2.4 Batchelor–Wirbel	38
2.6.2.5 Hallock–Burnham–Wirbel	39
2.6.3 Empirische Ansätze	39

3	Mess- und Versuchstechnik	41
3.1	Verwendete Messverfahren	41
3.1.1	Kraftmessung und Strömungsvisualisierung	41
3.1.2	Hitzdrahtmesstechnik	44
3.1.2.1	Übersicht	44
3.1.2.2	Sonden und Messkette	46
3.1.2.3	Kalibrierung und Auswertung	49
3.1.2.4	Statistische Beschreibung	53
3.1.2.5	Messgenauigkeit und Fehlerkompensation	53
3.2	Versuchsdurchführung	57
3.2.1	Ähnlichkeit und Kennzahlen	57
3.2.2	Windkanalmodelle	59
3.2.3	Versuchsanlagen	61
3.2.3.1	Windkanäle	61
3.2.3.2	Modell- und Sondeneinbau	63
3.2.4	Anwendung der Messverfahren	65
3.2.4.1	Messparameter	65
3.2.4.2	Messumfang	66
3.2.5	Auswertung der Strömungsfeldmessungen	68
4	Charakterisierung des Nachlaufwirbelsystems	70
4.1	Basisgrößen	70
4.2	Nahfeld	73
4.2.1	Axiale Wirbelstärkeverteilung	73
4.2.2	Turbulenzgrößen	75
4.3	Erweitertes Nahfeld	78
4.3.1	Geschwindigkeits- und Wirbelstärkeverteilung	78
4.3.2	Wirbelkerngrößen und induziertes Rollmoment	86
4.3.3	Turbulenzgrößen	92
4.3.4	Wirbelmodelle	97
4.4	Zusammenfassung	102

5	Instationäre Effekte	104
5.1	Wirbelverschmelzung	104
5.2	Instabilitäten	111
5.2.1	Grundlagen	111
5.2.2	Lang- und mittelwellige Instabilitäten	112
5.2.2.1	Zweiwirbelsystem und Crow-Instabilität	112
5.2.2.2	Vierwirbelsystem und Crouch-Instabilität	114
5.2.3	Kurzwellige Instabilitäten	119
5.2.4	Ergebnisse dieser Untersuchung	124
5.3	Mäandern	128
5.4	Zusammenfassung	130
6	Abminderung des Nachlaufwirbelsystems	131
6.1	Strategien	131
6.2	Wirbelstärkereduktion – Passive Maßnahmen	132
6.2.1	Turbulenzinduzierende Elemente	132
6.2.1.1	Klappenseiten- und -hinterkantenelemente	132
6.2.1.2	Delta-Spoiler-Konfigurationen	135
6.2.1.3	Außenspoiler-Konfiguration	152
6.2.2	Wirbelerzeugende Elemente und spannweitige Laständerung	161
6.2.2.1	Flügelrippen und segmentierte Hinterkantenklappen	161
6.2.2.2	Differentieller Klappenausschlag	163
6.2.3	Zusammenfassung	186
6.3	Anfachung des Wirbelzerfalls – Passive und aktive Maßnahmen	187
6.3.1	Passive Konfigurationselemente	188
6.3.1.1	Pylon-Zylinder	188
6.3.1.2	Differentieller Klappenausschlag	194
6.3.2	Aktive Konfigurationselemente	198
6.3.2.1	Ruder und Spoiler	198
6.3.2.2	Winglet-Steuerflächen	200
6.3.3	Zusammenfassung	206
7	Zusammenfassung und Ausblick	207
	Literaturverzeichnis	212

A. Anhang	226
A.1 Fluidmechanische Grundgleichungen	226
A.2 Tragflügeltheorie	230
A.2.1 Auftrieb und induzierter Widerstand	230
A.2.2 Spannweite Lastverteilung	231
A.3 Messdatenverarbeitung	234
A.3.1 Basisgrößen	234
A.3.2 Spektrale Leistungsschätzung	235

1 Einführung

1.1 Motivation und Problemstellung

„Flugzeug im Wirbel zerschmettert?“ So und ähnlich lauteten die Schlagzeilen, als im November 2001 ein Airbus A-300 in New York abgestürzt war und über die Ursache dafür gerätselt wurde. Es ist davon auszugehen, dass der kurz zuvor gestartete Airbus in die Wirbelschlepe eines vorausfliegenden „Jumbo-Jets“ (B-747) geriet. Dabei war insbesondere das Seitenleitwerk heftigen Luftturbulenzen ausgesetzt, was in Verbindung mit den zur Stabilisierung der Fluglage kommandierten Seitenruderausschlägen zu einem Seitenruderflattern und damit zum Verlust der Kontrolle über das Flugzeug führte [15] (vgl. Proctor et al. [136]).

Nachlaufwirbelsysteme, welche auch als „Wirbelschleppen“ bezeichnet werden, entstehen, wenn der für das Fliegen nötige Auftrieb erzeugt wird, vgl. Truckenbrodt [166]: Bei einem Flügel der Auftrieb erzeugt, ist der Druck auf der Unterseite höher als an der Oberseite. An den Flügelspitzen strömt daher Luft von der Unter- zur Oberseite, wodurch ein starker Wirbel entsteht, der sogenannte „Flügelspitzen-“ oder „Randwirbel“. Zudem fließen an der Hinterkante der Tragfläche die von Ober- und Unterseite kommenden Fluidschichten mit unterschiedlichem Richtungssinn aneinander vorbei, so dass eine freie Scherschicht entsteht, die in Spannweitenrichtung mit dem jeweiligen Randwirbel verbunden ist. Diese freie Scherschicht rollt sich infolge der Eigeninduktion zusammen mit dem jeweiligen Randwirbel in zwei gegensinnig drehende Einzelwirbel auf, die in ihrem Kern je nach Flugzustand und Flugzeuggröße Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 360 km/h aufweisen können. Die Wirbelschlepe bleibt bis zu mehreren hundert Spannweiten stromab nachweisbar, bevor sie sich infolge von Instabilitätsmechanismen und/oder durch atmosphärische Effekte wieder auflöst. Dies bedeutet, dass sie bei Großflugzeugen eine Lebensdauer von mehreren Minuten und eine Länge von bis zu 30 km haben kann. Bei Hochauftriebskonfigurationen, d.h. bei Start und Landung, wenn Vorflügel und Hinterkantenklappen ausgefahren sind, gestaltet sich die Wirbelschlepe im Nahfeld noch weit komplexer, da viele weitere energiereiche Wirbel hinzukommen. Insbesondere entstehen an den äußeren seitlichen Klappenrändern sehr starke Wirbel, die in ihrer Intensität die Flügelspitzenwirbel meist noch übertreffen [5].

Ein in eine Wirbelschlepe einfliegendes Flugzeug erfährt je nach Position eine Beaufschlagung durch ein Aufwindfeld, ein Abwindfeld (Auftriebsverlust) oder ein induziertes Rollmoment, verbunden mit mehr oder weniger starken Geschwindigkeitsschwankungen, vgl. [Abb. 1.1](#). Insbesondere für ein gegenüber dem vorausfliegenden Flugzeug nachfolgendes kleineres Flugzeug können sich dadurch schwerwiegende Konsequenzen ergeben: Diese äußern sich in einer erhöhten strukturdynamischen Belastung bis hin zum Verlust der stabilen Fluglage, wenn beispielsweise das kommandierte Rollmoment nicht mehr ausreicht, das von der Wirbelschlepe induzierte Rollmoment auszugleichen, vgl. Rossow [150] und Nelson [126].

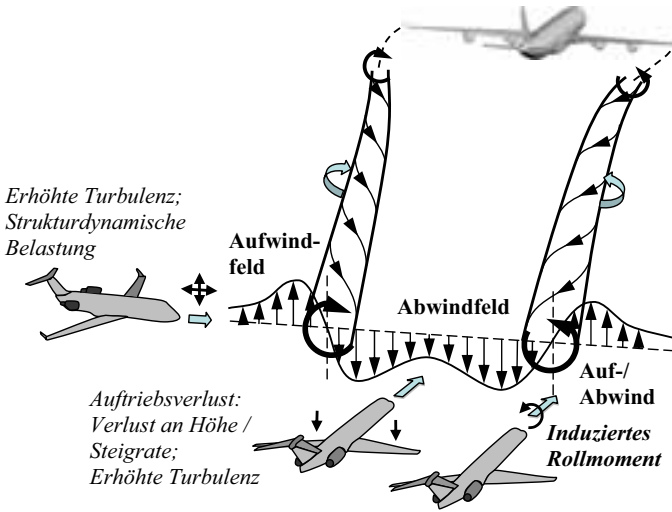


ABBILDUNG 1.1: Gefährdungspotenzial durch Nachlaufwirbelsysteme.

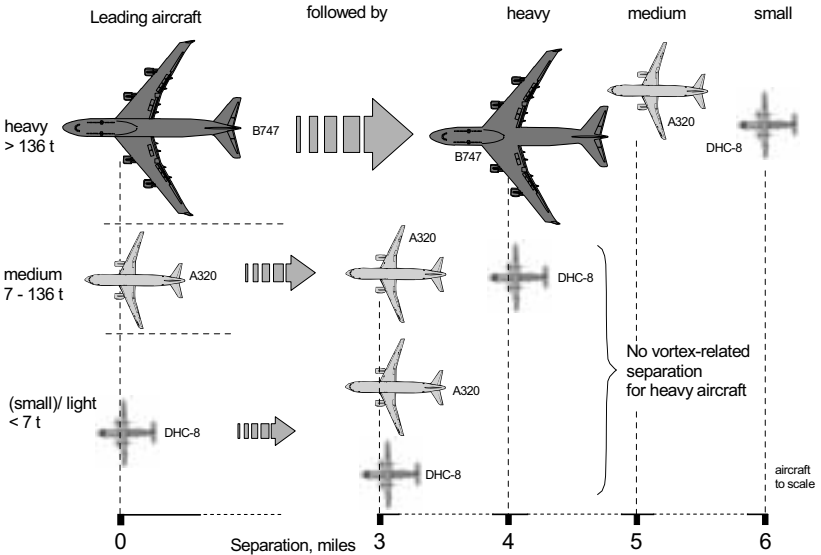


ABBILDUNG 1.2: ICAO Sicherheitsabstände.

Leader Aircraft (max. take-off weight)	Follower Aircraft	Separation [NM / km]	Time Delay [sec] (approach speed 70 m/s)
Heavy (> 136.000 kg)	Heavy	4.0 / 7.4	106
Heavy (> 136.000 kg)	Medium	5.0 / 9.3	132
Heavy (> 136.000 kg)	Light	6.0 / 11.1	159
Medium (\leq 136.000 kg) (\geq 7.000 kg)	Medium	3.0 / 5.6	79
	Light	4.0 / 7.4	106
Light (< 7.000 kg)	Medium	3.0 / 5.6	79
	Light	3.0 / 5.6	79

The minimum radar separation refers to 3 NM (79 sec) or 2.5 NM (66 sec).

TABELLE 1.1: ICAO Sicherheitsabstände bei IFR (Instrumental Flight Rules).

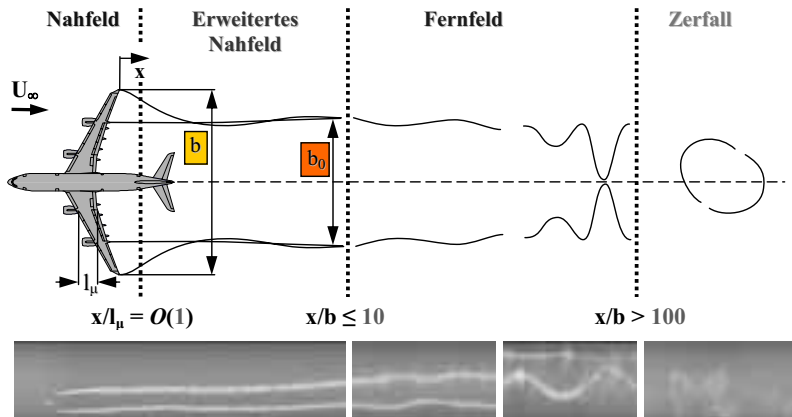


ABBILDUNG 1.3: Entwicklungsstufen des Nachlaufwirbelsystems.

Die Stärke der nach dem Aufrollvorgang verbleibenden beiden Einzelwirbel ist proportional zur Gesamtzirkulation und damit zum Auftrieb, welcher der Gewichtskraft des Flugzeugs entgegenwirkt. Die Sicherheitsabstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Flugzeugen richten sich daher nach deren maximalem Abfluggewicht (Abflugmasse). Dieses Kriterium wurde in den siebziger Jahren durch die internationale Zivilluftfahrtbehörde ICAO eingeführt [60], [61], [102]. Es existieren drei Gewichtskategorien: „light“ (unter 7000 kg), „medium“ (7000 kg bis 136000 kg) und „heavy“ (ab 136000 kg) [122]. Je nach Kombination von vorausfliegendem und nachfolgendem Flugzeug muss dann zwischen den Flugzeugen ein Abstand von 3 bis 6 nautischen Meilen (5.56 km bis 11.12 km) eingehalten werden, vgl. [Abb. 1.2](#) und [Tab. 1.1](#).

Diese Sicherheitsabstände begrenzen heute schon an vielen Flughäfen, wie beispielsweise Frankfurt am Main, die Kapazität der Start- und Landebahnen und damit des gesamten Flughafens. Dieses Problem wird sich angesichts der weiterhin sehr hoch geschätzten Wachstumsraten des zivilen Luftverkehrs (ca. 4% – 5% pro Jahr; Verdoppelung bis 2020 [57]) sowie knapper Flächen für den Bau neuer oder die Erweiterung bestehender Flughäfen weiter verschärfen. Betroffen sind zum einen die Hersteller großer Transportflugzeuge und zum anderen Flugsicherungen und Flughafenbetreiber, die bei zunehmender Verkehrsdichte und einer starken Mischung unterschiedlicher Flugzeugtypen und damit unterschiedlicher Wirbelschleppen die Flugzeugstaffelung unter Beibehaltung der Sicherheitsstandards verringern wollen.

Auch in der militärischen Luftfahrt haben Wirbelschleppen ihre Bedeutung und können bei unmittelbarer Luftschlagung zu beachtlichen strukturdynamischen Belastungen führen [20]. Von besonderer Relevanz sind dabei der dichtgestaffelte Formationsflug, die Annäherung an das Tankflugzeug bei der Luftbetankung oder das Durchfliegen des Nachlaufs des gegnerischen Flugzeugs im Luftkampf.

1.2 Stand der Forschung

Verschiedene Übersichtsbeiträge informieren über frühere und aktuelle Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Wirbelschleppenproblematik, vgl. Donaldson und Bilanin [55], Hoeijmakers [89], Spalart [155], Rossow [150] und Gerz et al. [71]. Die darin vorgestellten Arbeiten greifen grundlegende physikalische Fragestellungen in Bezug auf Modellbildung, Instabilitäten und Instationarität auf. Eine Vielzahl von Studien befasst sich mit Entwicklungen und Anwendungen von Methoden der experimentellen und numerischen Simulation zur Darstellung und Analyse aller Entwicklungsstufen eines Nachlaufwirbelsystems, bis hin zu Maßnahmen der Beeinflussung und Abmilderung. Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen bildet die Simulation und Vorhersage des Verhaltens und des Zerfalls der Wirbelschleppe in der Atmosphäre sowie die Entwicklung und Erprobung von Detektions- und Wirbelschleppenwarnsystemen. Im Folgenden soll ein Überblick über diese Forschungsfelder gegeben werden.

Die auf Basis des maximalen Abfluggewichts vorgenommene Drei-Klassen-Einteilung der Staffelungsabstände erfüllt aller Erfahrung nach die Sicherheitsstandards, verhindert aber andererseits eine dynamische Anpassung an das tatsächlich vorherrschende