

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](http://www.utz.de)

## **Vorwort**

Nachlaufwirbelsysteme, die auch Wirbelschleppen genannt werden, bestimmen den Staffelungsabstand 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 Staffelungsabstände 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
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung . . . . .	1
1.2 Stand der Forschung . . . . .	4
1.3 Beitrag dieser Arbeit . . . . .	10
<b>2 Grundlagen</b>	<b>11</b>
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

<b>3 Mess- und Versuchstechnik</b>	<b>41</b>
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
<b>4 Charakterisierung des Nachlaufwirbelsystems</b>	<b>70</b>
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

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>III</b>
<b>5 Instationäre Effekte</b>	<b>104</b>
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
<b>6 Abminderung des Nachlaufwirbelsystems</b>	<b>131</b>
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 Wirblerzeugende Elemente und spannweitige Laständerung .	161
6.2.2.1 Flügelfinnen 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
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>207</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>212</b>

<b>A Anhang</b>	<b>226</b>
A.1 Fluidmechanische Grundgleichungen	226
A.2 Tragflügeltheorie	230
A.2.1 Auftrieb und induzierter Widerstand	230
A.2.2 Spannweitige 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 Wirbelschleife eines vorausfligenden „Jumbo-Jets“ (B-747) geriet. Dabei war insbesondere das Seitenleitwerk heftigen Luftperturbulenzen 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 Flügel spitzen strömt daher Luft von der Unter- zur Oberseite, wodurch ein starker Wirbel entsteht, der sogenannte „Flügel spitzen“ 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  $360 \text{ km/h}$  aufweisen können. Die Wirbelschleife 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  $30 \text{ km}$  haben kann. Bei Hochauftriebskonfigurationen, d.h. bei Start und Landung, wenn Vorflügel und Hinterkantenklappen ausgefahren sind, gestaltet sich die Wirbelschleife 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 Flügel spitzenwirbel meist noch übertreffen [5].

Ein in eine Wirbelschleife 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 vorausfligenden 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 Wirbelschleife induzierte Rollmoment auszugleichen, vgl. Rossow [150] und Nelson [126].

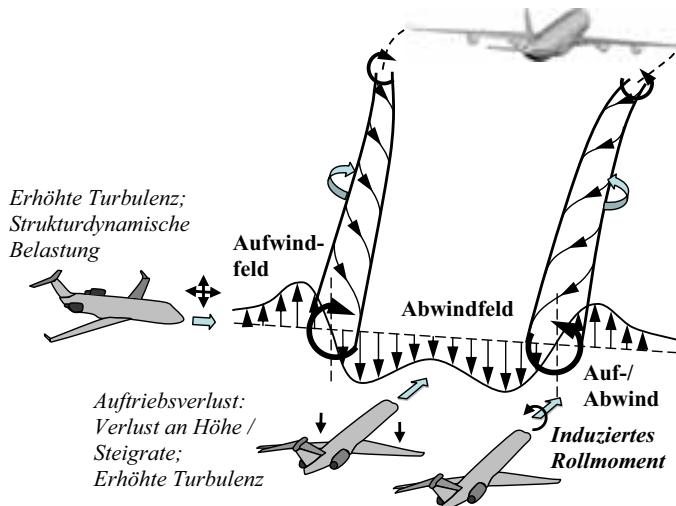


ABBILDUNG 1.1: Gefährdungspotenzial durch Nachlaufwirbelsysteme.

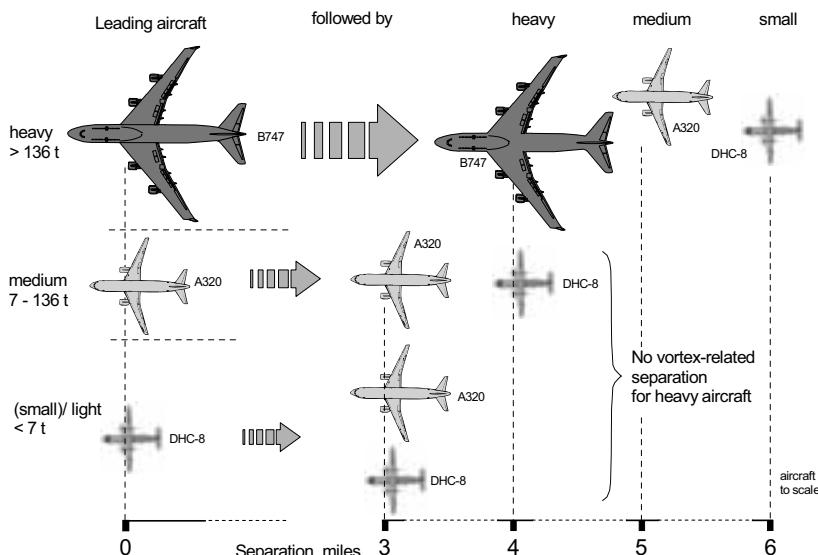


ABBILDUNG 1.2: ICAO Sicherheitsabstände.

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).

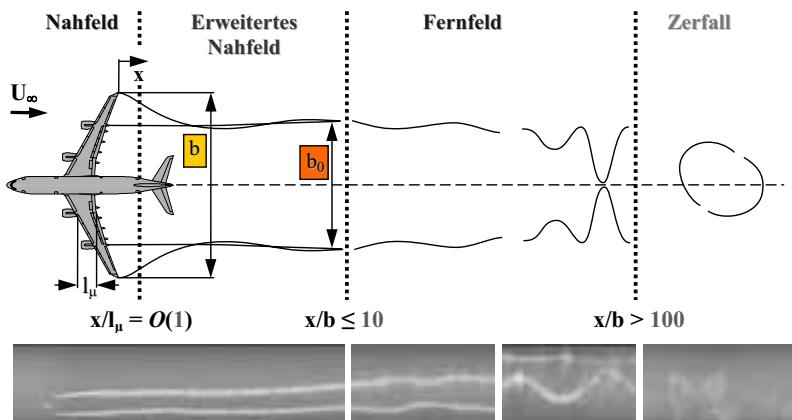


ABBILDUNG 1.3: Entwicklungsstufen des Nachlaufwirbelsystems.

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; Verdopplung 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 Verkehrsichte 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 Beaufschlagung 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 Abminderung. Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen bildet die Simulation und Vorhersage des Verhaltens und des Zerfalls der Wirbelschleppen 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