

Untersuchungsbericht

Der Untersuchungsbericht wurde gemäß § 18 FIUUG summarisch abgeschlossen, d.h. ausschließlich mit Darstellung der Fakten.

Identifikation

Art des Ereignisses:	Schwere Störung
Datum:	30. September 2005
Ort:	östlich Frankfurt/Main
Luftfahrzeug:	Flugzeug
Hersteller / Muster:	Boeing / B 737-300
Personenschaden:	keiner
Sachschaden:	keiner
Drittschaden:	keiner
Informationsquelle:	Untersuchung durch Mitarbeiter der BFU
Aktenzeichen:	BFU 5X018-05

Sachverhalt

Im Anflug auf den Verkehrsflughafen Frankfurt/Main führte das Flugzeug zunächst eine Rollbewegung von 23 Grad nach rechts und anschließend eine Rollbewegung mit einer Schräglage von 62 Grad nach links aus.

Ereignisse und Flugverlauf

Die folgenden Angaben ergaben sich aus den Aussagen der Crew, den Radaraufzeichnungen und Flugschreiberdaten.

Die mit fünf Besatzungsmitgliedern und 90 Passagieren besetzte Boeing 737-300 (B737) war auf einem Flug von Turin (Italien) nach Frankfurt/Main. Im Anflug auf die Piste 25L folgte das Flugzeug um 07:35 Uhr¹ einer Boeing 747-400 (B747), die sich ca. fünf nautische Meilen (NM) voraus im Anflug auf die Parallelpiste 25R befand. Dabei rollte das Flugzeug zunächst 23 Grad nach rechts und anschließend nach links, wobei es eine maximale Schräglage von 62 Grad erreichte. Zum Zeitpunkt der Störung war der Autopilot eingeschaltet, die Landeklappen waren auf Position 1 gefahren und das Flugzeug hatte eine Geschwindigkeit von 200 – 210 kt. Die Rollbewegung nach rechts wurde vom Autopiloten angesteuert. Bei der nachfolgenden, stärkeren Rollbewegung nach links wurde der Autopilot ausgeschaltet und das Flugzeug manuell in Normalfluglage gebracht. Der weitere Anflug wurde etwas über dem Gleitpfad bis zur sicheren Landung fortgesetzt. Der Vorfall ereignete sich in 2 700 ft Höhe ca. 9,8 NM von der Schwelle der Piste 25L entfernt.

Angaben zu den Luftfahrzeugen

Die Boeing 737-300 ist ein Verkehrsflugzeug in Ganzmetallbauweise, ausgestattet mit zwei Strahltriebwerken. Es wurde 1990 mit der Werknummer 24 565 gefertigt. Das Flugzeug ist 33,4 m lang und hat eine Spannweite von 28,9 m. Die maximale Startmasse beträgt 56 470 kg.

Die Boeing 747-400 ist ein vierstrahliges Verkehrsflugzeug in Ganzmetallbauweise. Es ist 70,6 m lang und hat eine Spannweite von 64,44 m. Die maximale Startmasse beträgt 396 893 kg.

Meteorologische Informationen

Zum Zeitpunkt der Störung kam nach Auskunft des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der Wind in ca. 1 000 m Höhe aus einer Richtung von etwa 280 Grad mit einer Windgeschwindigkeit von 10 bis 12 Knoten. Die Sicht am Boden betrug mehr als 30 km und es herrschte ein Luftdruck (QNH) von 1 024 hPa.

1 Alle angegebenen Zeiten, soweit nicht anders bezeichnet, entsprechen Ortszeit.

Navigationshilfen

Das Flugzeug nutzte für den Anflug das Instrumentenlandessystem (ILS) der Piste 25L.

Funkverkehr

Das Flugzeug stand in Funkkontakt mit der zuständigen Flugverkehrskontrollstelle. Der Funksprechverkehr wurde aufgezeichnet und stand der BFU als Tonbandumschrift zur Verfügung. Die Informationen hatten keine Relevanz für die Untersuchung.

Angaben zum Flugplatz

Der internationale Verkehrsflughafen Frankfurt/Main verfügte zu diesem Zeitpunkt über zwei Pisten mit einem Belag aus Asphalt. Die beiden Pisten mit der Ausrichtung 07L/25R bzw. 07R/25L hatten jeweils eine Länge von 4 000 m. Die Piste 07R/25L war 45 m und die Piste 07L/25R 60 m breit. Eine dritte Piste verlief in Richtung 18 und war 4 000 m lang und 45 m breit. Sie hatte einen Betonbelag.

Flugdatenaufzeichnung

Die Aufzeichnungen sowohl des Flugdatenschreibers (FDR) der B737 als auch die Daten des Flugsicherungsradars als Radarplot beider Flugzeuge standen für die Auswertung zur Verfügung.

Abbildung 1 (siehe Anlagen) zeigt anhand der FDR-Daten der B737 die Situation vor und nach dem Abschalten des Autopiloten. Zunächst rollte das Flugzeug 23 Grad nach rechts und dann, innerhalb von 11 Sekunden, 62 Grad nach links.

Versuche und Forschungsergebnisse

Die Untersuchung der Schweren Störung wurde durch das Institut für Flugsystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) unterstützt. Die Aufgabenstellung für das Institut bestand darin, anhand der vorliegenden Daten zu verifizieren, ob die B737 möglicherweise in die Wirbelschleppe der vorausfliegenden B747 eingeflogen war. Grundlage für die Analyse bildeten die Daten des Flugdatenschreibers der B737, die Radaraufzeichnungen beider Flugzeuge und die Wetterdaten.

Zunächst wurden die Flugwege anhand der Radardaten ermittelt. Die Radarpositionen der beiden Flugzeuge wurden in Zeitabständen von fünf Sekunden aufgezeichnet.

Die Anflugsequenz als 3-D-Darstellung und auch als Flugweg über Grund ist in den Abbildungen 2 und 3 (siehe Anlagen) dargestellt. Dabei sind die letzten 11 NM des ILS-Flugweges schwarz dargestellt. Der Ort der Schweren Störung wird durch die signifikante Flugwegabweichung der B737 zu Beginn des Endanfluges charakterisiert.

Der Abstand zwischen den beiden Flugzeugen wurde anhand der Radardaten berechnet. Als der Autopilot der Boeing B737 ausgeschaltet wurde, hatten die Flugzeuge einen Abstand von 4,6 NM. Zum Zeitpunkt der Bildung der angetroffenen Wirbelschleppes des vorausfliegenden Flugzeuges (B747), betrug der Abstand zum folgenden Flugzeug (B737) etwa 6 NM.

Die Geschwindigkeit und Höhe zum Zeitpunkt der Wirbelschleppenbildung der B747 wurden anhand der Radardaten ermittelt. Dabei wurde die Höhe, in der die Wirbel erzeugt wurden, mit der Radarhöhe gleichgesetzt. Die Geschwindigkeit wurde durch Differenzierung der Radarpositionen ermittelt. Dabei ergab sich, dass die Wirbelschleppes, von der die nachfolgende B737 getroffen wurde, in einer Höhe von 1 000 m bei einer Geschwindigkeit von 90 m/s (175 kt) gebildet wurde. Die Geschwindigkeitsinformation wurde genutzt, um die anfängliche Stärke der Wirbelschleppes zu bestimmen. Weiter wurde angenommen, dass die B747 eine Anflugmasse von 278 t hatte: Betriebsleermasse (OEW) 180 t, maximale Nutzlast 64 t und Kraftstoffmasse 34 t (20% der maximalen Kraftstoffmenge). Mit der Anfluggeschwindigkeit von 90 m/s ergab sich daraus nach der Gleichung von KUTTA-JOUKOWSKY (beschreibt in der Strömungslehre die Proportionalität zwischen dynamischem Auftrieb und Zirkulation) eine Anfangszirkulation von 490 m²/s. Mit den vorliegenden Daten wurde mithilfe eines Berechnungsmodells der Zerfall der Wirbelschleppes bei ruhiger Atmosphäre berechnet. Daraus ließ sich die angetroffene Wirbelstärke für ein bestimmtes Wirbelalter vorhersagen.

Noch ausstehende Größen waren die Winddaten, Geschwindigkeit und Richtung. Sie waren durch die meteorologischen Angaben und die FDR-Daten verfügbar. Wobei letztere nur unter einer Höhe von 1 300 m vorlagen und eine große Streuung aufwiesen. In der betreffenden Höhe zeigten die FDR-Daten für die Windgeschwindigkeit und -richtung hohe Spitzenwerte. Diese Spitzen sind, wie Beobachtungen bei Test-

flügen zeigten, typisch für das Auftreffen von Wirbelschleppen und ein Anzeichen für atmosphärische Störungen.

Basierend auf den Radarpositionen des vorausfliegenden B747 wurde das Verhalten der Wirbelschleppe simuliert. Darin eingegangen sind die Daten vom Wirbelzerfall, der Drift aus den Winddaten und das induzierte Absinken der Wirbelschleppe.

Abbildung 4 (siehe Anlagen) zeigt die 3-D-Darstellung der Flugwege beider Flugzeuge in dem Moment, in dem der Autopilot der folgenden B737 ausgeschaltet wurde. Die Wirbelschleppe des vorausfliegenden B747 ist grün dargestellt. Die dazu gehörende Seitenansicht und der Flugweg über Grund sind in den Abbildungen 5 und 6 (siehe Anlagen) dargestellt. Dabei war der unruhige Verlauf der Wirbelschleppendarstellung über Grund auf die Streuung der Winddaten zurückzuführen. Der Bereich der Wirbelschleppe, der sich zum Zeitpunkt der Abschaltung des Autopiloten am dichtesten an dem folgenden Flugzeug befand, ist mit einem „schwarzen Diamanten“ markiert. Ebenso ist der Bereich auf dem Flugweg der vorausfliegenden B747 markiert, wo dieser Wirbelschleppenbereich seinen Ursprung hat bzw. gebildet wurde.

Im vorliegenden Fall ist die Wirbelschleppe aufgrund der Windverhältnisse zum Flugweg der auf der Parallelpiste anfliegenden B737 gedriftet. Aufgrund der größeren Höhe der vorausfliegenden B747 (über dem ILS) sank die Wirbelschleppe auf die nachfolgende B737, die den Gleitpfad unterhalb des ILS anflug. Der Abstand zwischen der Wirbelschleppe und der B737 wurde anhand der Simulation mit etwa 48 m vertikal und 273 m lateral abgeschätzt. Die sich ergebende Zirkulation der Wirbelschleppe nach einer Alterung von 99 Sekunden betrug in diesem Moment rund $380 \text{ m}^2/\text{s}$. Das stellt für ein einfliegendes Flugzeug der Kategorie MEDIUM eine starke Wirbelschleppe dar, die bei einer entsprechenden Annäherung die vorliegende Reaktion hervorrufen kann. Aufgrund der Anordnung der Flugbahnen im Zusammenhang mit der vorherrschenden Windrichtung sowie der abgeschätzten Annäherungsdistanzen kann unter Berücksichtigung der vorhandenen (Wind-)Ungenauigkeiten davon ausgegangen werden, dass das nachfolgende Flugzeug einer starken Wirbelschleppe sehr nahe gekommen war bzw. sie getroffen hatte.

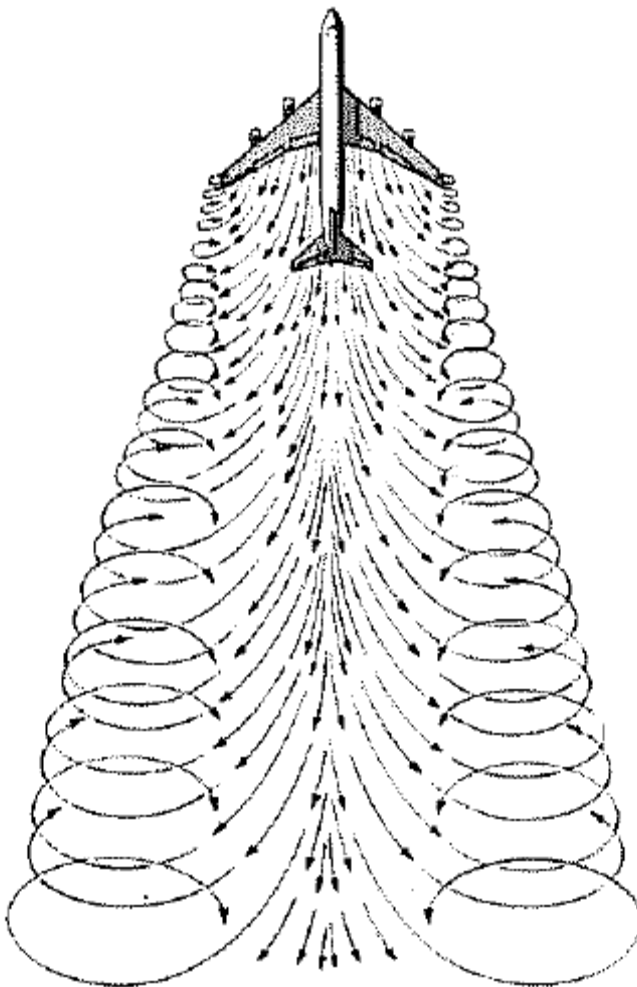
Zusätzliche Informationen

Wirbelschleppen

Jedes Flugzeug erzeugt während des Fluges einen Nachstrom in der Luft. Diese Störung besteht aus einem Paar von den Flügelenden ausgehenden, gegeneinander

drehenden, in der Luft hinterlassenen Wirbelschleppen. Verantwortlich für die Erzeugung der Wirbel und der daraus resultierenden Wirbelschleppen ist der Auftrieb.

Der Auftrieb wird durch die Schaffung einer Druckdifferenz über den beiden Flügeloberflächen erzeugt. Der tiefste Druck stellt sich dabei etwa in der Mitte der Flügeloberseite ein. Der Luftstrom auf der Flügeloberseite bewegt sich daher von der Flügelspitze in Richtung Rumpf. Der höchste Druck befindet sich demnach im Bereich der Mitte der Flügelunterseite, sodass dort die Luft zum Ausgleich des Drucks Richtung Flügelspitze strömt. Die resultierende Zirkulation und der Abwindeffekt des Luftstromes über dem Flügel führen beim Verlassen der Hinterkante zu einer Luftwirbelfläche, die sich hinter der Flügelspitze spiralförmig einrollt. Nach dem vollständigen Einrollen besteht der Nachstrom eines Flugzeuges aus zwei gegeneinander rotierenden Wirbeln.



Der Aufrollvorgang

Quelle: ICAO

Die Stärke der Wirbel ergibt sich aus dem Gewicht, der Geschwindigkeit und der Gestalt des Flügels des sie erzeugenden Luftfahrzeuges. Die Wirbelcharakteristik eines Luftfahrzeuges kann darüber hinaus durch das Ausfahren von Klappen und durch andere Vorrichtungen sowie durch Änderungen der Fluglage beeinflusst werden. Hauptfaktor ist aber die Masse; die Wirbelstärke vergrößert sich mit der Erhöhung der Masse und der Belastung in Richtung der Spannweite.

Wird ein Luftfahrzeug vom Nachstrom eines vorausfliegenden Flugzeuges erfasst, können strukturelle Beschädigungen die Folge sein. Die eigentliche Gefahr liegt aber darin, dass die zwingende und unwiderstehliche Rollbewegung die Steuerbarkeit erschwert. Flugversuche, bei denen ein Luftfahrzeug absichtlich in den Wirbelkern geflogen wurde, zeigten, dass ein Flugzeug dazu tendiert, mit dem Wirbel zu rollen. Die Möglichkeit, diesem aufgezwungenen Rollvorgang effektiv entgegenzuwirken, hängt von der Spannweite und der Gegensteuer-Wirksamkeit des erfassten Flugzeuges ab.

Staffelung von Luftfahrzeugen im Anflug

Grundlage für die Abwicklung des Luftverkehrs bildet das Dokument 4444-ATM/501 „Air Traffic Management“ der International Civil Aviation Organisation (ICAO). Darin wird beschrieben, dass im Anflug auf einen Flughafen die Staffelung der anfliegenden Flugzeuge nach ihrer Wirbelschleppenkategorie erfolgt. In Kapitel 4.9 Wake Turbulence Categories sind die drei Kategorien HEAVY, MEDIUM und LIGHT, die sich aus der maximalen Abflugmasse (MTOM) eines Flugzeuges ableiten, beschrieben. Es gilt die folgende Festlegung: HEAVY (H) – alle Luftfahrzeuge mit einer MTOM von 136 t oder mehr; MEDIUM (M) – alle Luftfahrzeuge mit einer MTOM von weniger als 136 t, aber mehr als 7 t und LIGHT (L) – alle Luftfahrzeuge mit einer MTOM von 7 t oder weniger.

Nach Kapitel 8.7.4 Radar Separation Minima sind die Abstände zwischen zwei Luftfahrzeugen wie folgt einzuhalten:

Folgendes Luftfahrzeug	Vorausfliegendes Luftfahrzeug		
	HEAVY ≥ 136 t	MEDIUM < 136 t > 7 t	LIGHT ≤ 7 t
HEAVY	7,4 km (4,0 NM)	5,6 km (3,0 NM)	5,6 km (3,0 NM)
MEDIUM	9,3 km (5,0 NM)	5,6 km (3,0 NM)	5,6 km (3,0 NM)
LIGHT	11,1 km (6,0 NM)	9,3 km (5,0 NM)	5,6 km (3,0 NM)

Im vorliegenden Fall folgte ein Flugzeug der Kategorie MEDIUM einem Flugzeug der Kategorie HEAVY, der Mindestabstand betrug somit 9,3 km (5,0 NM).

Weitere Informationen zum Umgang mit Wirbelschleppen im Luftverkehr finden sich auch im ICAO-Dokument „Air Traffic Services Planning Manual“ (Doc 9426 – AN/924) Part II, Section 5, Chapter 3 „Wake Turbulence“.

Nützliche oder effektive Untersuchungstechniken

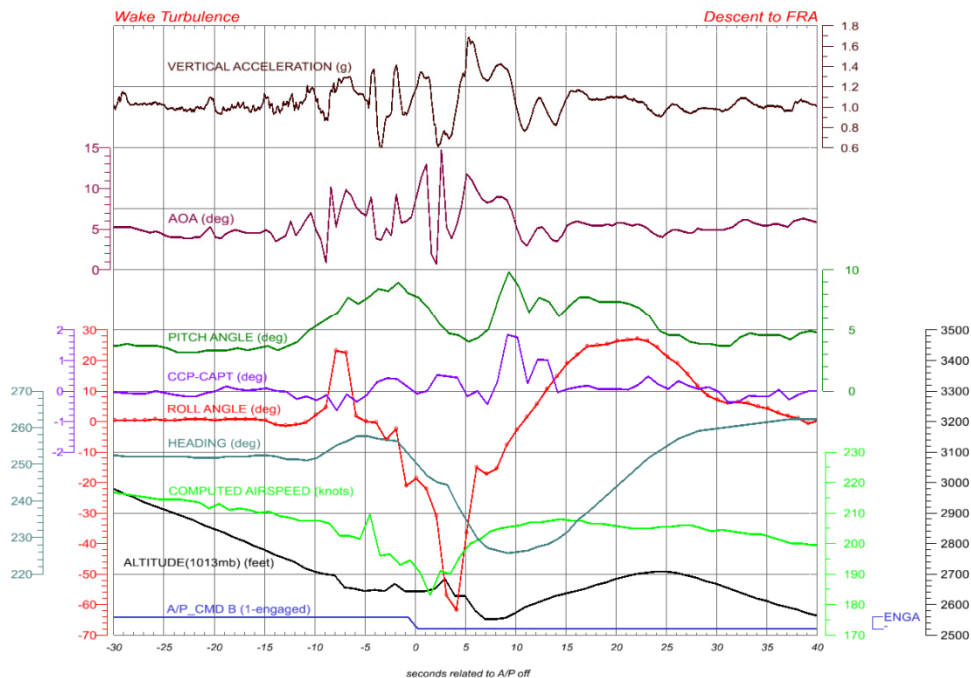
Für die Simulation der Wirbelschleppen des vorausfliegenden Flugzeugs wurde das vom DLR entwickelte „P2P Probabilistic Two-Phase WV transport & decay model“ verwendet.

Untersuchungsführer: Dietmar Nehmsch
 Mitwirkung: George Blau
 Dieter Ritschel
 Hans-Werner Hempelmann

Braunschweig, 25. Juni 2015

Anlagen

- Abbildung 1 FDR-Daten B737
- Abbildung 2 3-D-Flugwegübersicht, B737 hinter B747
- Abbildung 3 Flugweg über Grund, B737 hinter B747
- Abbildung 4 3-D-Ansicht der Flugwege und der Wirbelschleppenposition
- Abbildung 5 Seitenansicht Gleitpfade und Wirbelschleppenposition
- Abbildung 6 Flugwege und Wirbelschleppenposition über Grund



file: pitch_z

Created: February 12, 2014

BFU Germany

Abb. 1: FDR-Daten B737

Quelle: BFU

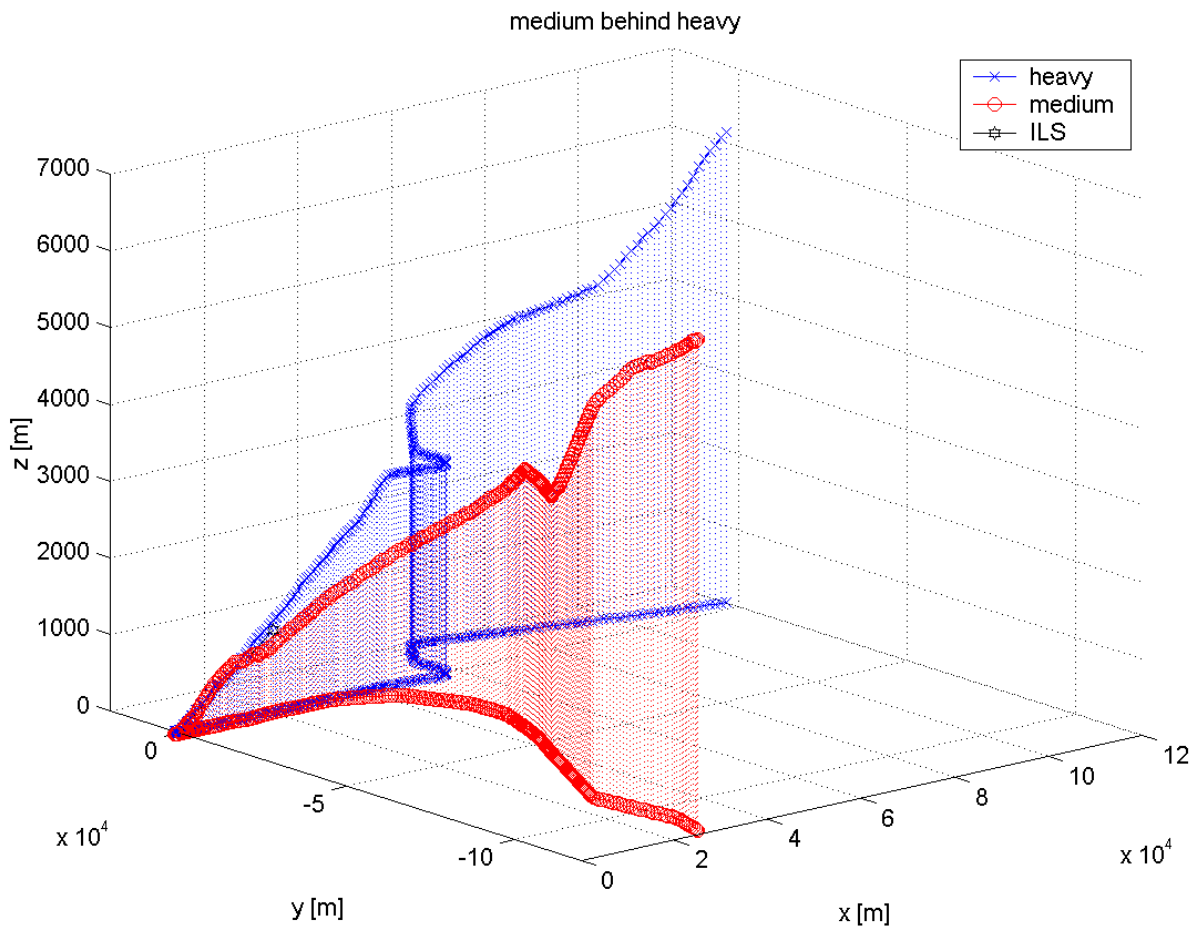


Abb 2: 3-D-Flugwegübersicht, B737 (rot o) hinter B747 (blau x)

Quelle: DLR

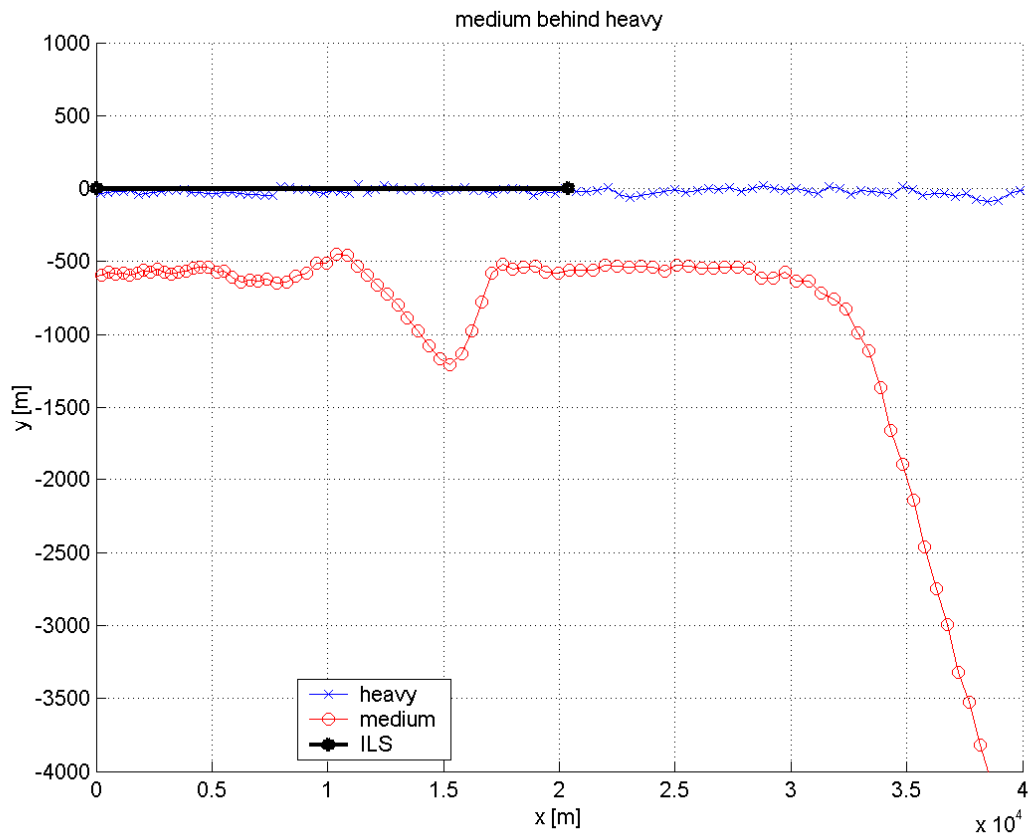


Abb. 3: Flugweg über Grund, B737 (o) hinter B747 (x), (ILS der B747 als Referenz in Schwarz)

Quelle: DLR

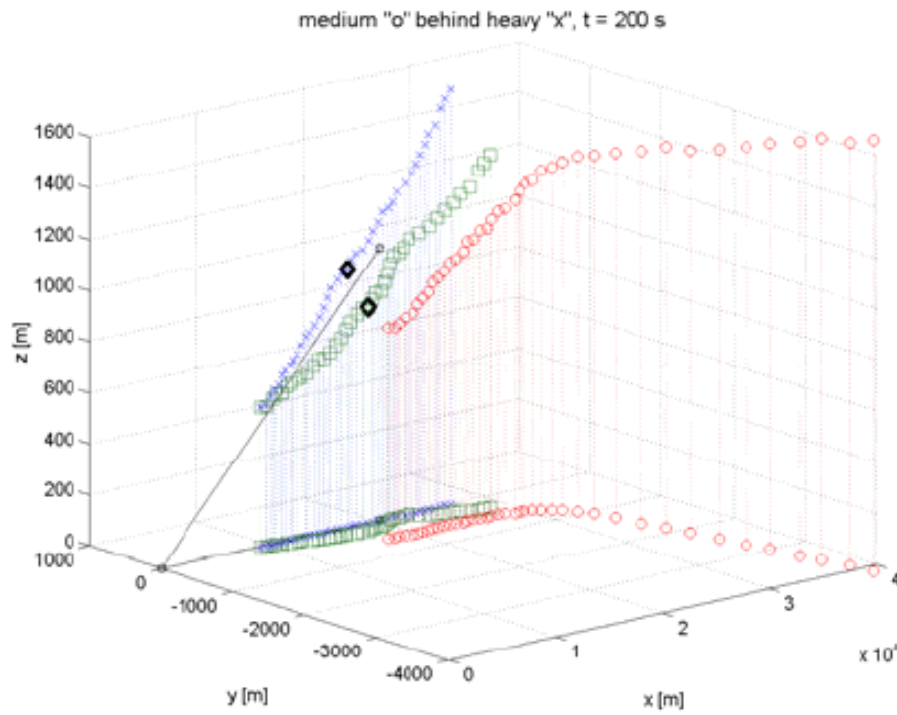


Abb. 4: 3-D-Ansicht der Flugwege und der Wirbelschleppenposition

Quelle: DLR

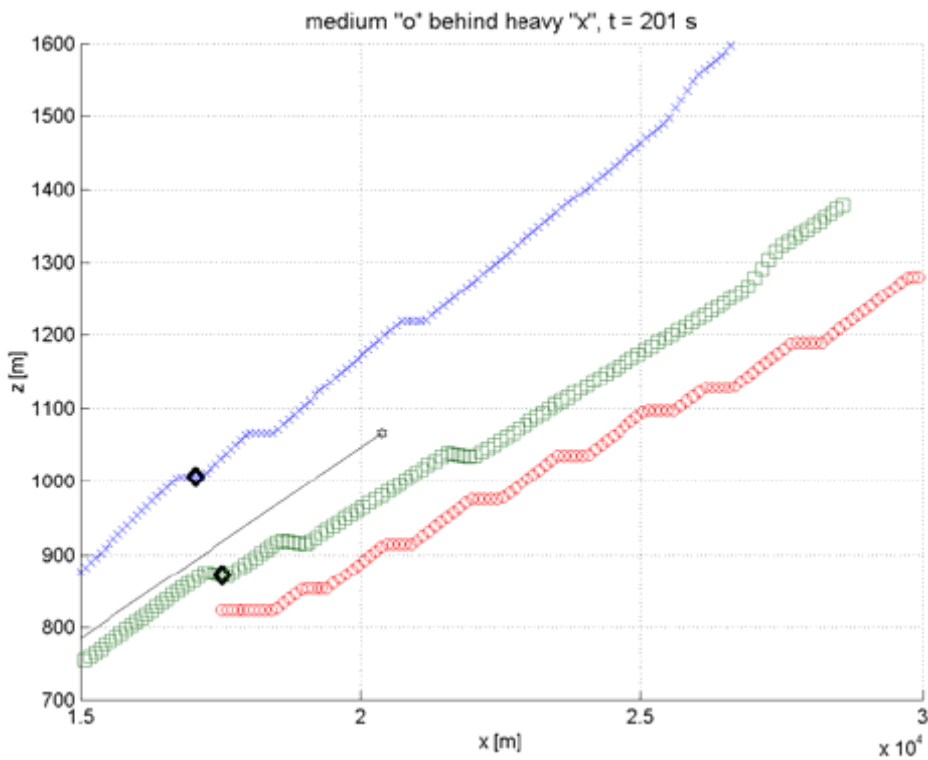


Abb. 5: Seitenansicht Gleitfahde und Wirbelschleppenposition

Quelle: DLR

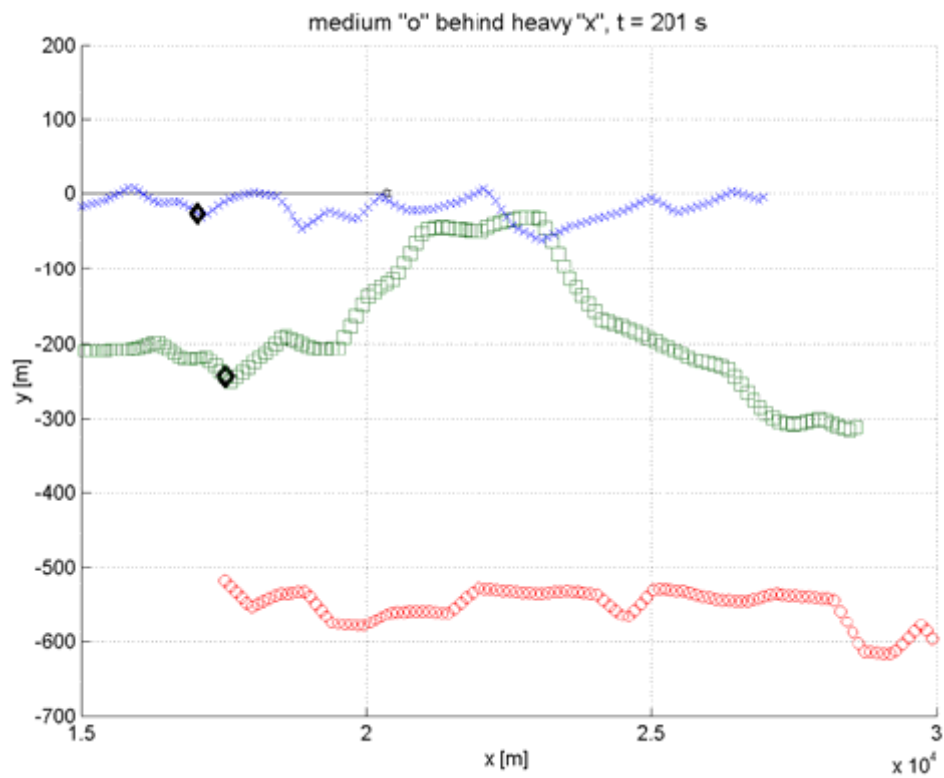


Abb. 6: Flugwege und Wirbelschleppenposition über Grund

Quelle: DLR

Die Untersuchung wurde in Übereinstimmung mit der Verordnung (EU) Nr. 996/2010 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Oktober 2010 über die Untersuchung und Verhütung von Unfällen und Störungen in der Zivilluffahrt und dem Gesetz über die Untersuchung von Unfällen und Störungen beim Betrieb ziviler Luftfahrzeuge (Flugunfalluntersuchungs-Gesetz - FIUUG) vom 26. August 1998 durchgeführt.

Danach ist das alleinige Ziel der Untersuchung die Verhütung künftiger Unfälle und Störungen. Die Untersuchung dient nicht der Feststellung des Verschuldens, der Haftung oder von Ansprüchen.

Herausgeber

Bundesstelle für
Flugunfalluntersuchung

Hermann-Blenk-Str. 16
38108 Braunschweig

Telefon 0 531 35 48 - 0
Telefax 0 531 35 48 - 246

Mail box@bfu-web.de
Internet www.bfu-web.de