

# Wie turbulent ist es an der Tropopause über dem Nordatlantik?

U. Schumann, R. Baumann, T. Dürbeck, P. Konopka, H. Schlager

DLR Oberpfaffenhofen, Institut für Physik der Atmosphäre, 82230 Weßling

## 1. Einleitung

Turbulenz an der Tropopause interessiert im Hinblick auf Stratosphären-Troposphären austausch, Ausbreitung von Schadstoffen aus den Triebwerken von Verkehrsflugzeugen und Belastungen von Flugzeugen im Flug. Es ist bekannt, daß der vertikale Diffusionskoeffizient für Spurenstoffe an der Tropopause ein Minimum annimmt. Direkte Messungen der Turbulenz an der Tropopause gibt es nur wenige. An der Tropopause nimmt die Stabilität der Schichtung der Atmosphäre stark zu, was Turbulenz dämpft. Allerdings werden hier gelegentlich starke Scherwinde, insbesondere in der Nähe des polaren Strahlstroms beobachtet. Scherung und Schwerewellen können Turbulenz anregen. Im Gegensatz zu Wellen führt Turbulenz zu einer raschen Energiekaskade von großen zu kleinen Skalen, insbesondere im sogenannten Trägheitsbereich nach Kolmogorov. Dieser existiert, wenn die Turbulenz in diesem Skalenbereich lokal isotrop ist und wenn die Skalen größer sind als die Kolmogorov-Skala  $\eta = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$  ( $\nu$  = kinematische Viskosität,  $\epsilon$  = kinem. Dissipationsrate) und gleichzeitig kleiner als die Ozmidov-Skala  $L_o = (\epsilon/N^3)^{1/2}$ , mit  $N$  = Brunt-Väisälä-Frequenz. Andernfalls wird der Trägheitsbereich durch viskose oder Auftriebskräfte unterdrückt.

## 2. Meßergebnisse

Im Oktober 1993 haben wir mit dem DLR-Forschungsflugzeug Falcon Messungen durchgeführt entlang 8°W, zwischen 56 und 60°N, in Höhen zwischen 9.4 und 11.3 km, ca. 1.4 km unterhalb bis 0.3 km oberhalb der lokalen Tropopause. Neben einer Reihe von Spurengasen wurden Schwankungen der drei Geschwindigkeitskomponenten  $u'$ ,  $v'$ , und  $w'$  sowie der potentiellen Temperatur  $\theta'$  im Skalenbereich von 64 km bis 10 m mit einer Auflösung von 0.03 m s<sup>-1</sup>, bzw. 0.03 K gemessen. Dies reicht aus, um einen Trägheitsbereich bei diesen Skalen für  $\epsilon > 10^{-8}$  m<sup>2</sup> s<sup>-3</sup> aufzulösen. Ergebnisse für kürzere Streckensegmente von ca. 11 km an drei Meßtagen haben gezeigt (Schumann et al., 1995), daß  $\epsilon < 10^{-7}$  m<sup>2</sup> s<sup>-3</sup>,  $\overline{u'^2/w'^2} \cong 10$ , mit Annäherung an lokale Isotropie erst bei Skalen kleiner 20 m,  $L_o < 0.2$  m,  $\eta > 5$  cm, also kein Trägheitsbereich. Die Messungen fanden statt bei Brunt-Väisälä-Frequenzen zwischen  $N = 0.014$  und  $0.019$  s<sup>-1</sup> und Scherungen des Windbetrages von  $S = 0.001$  bis  $0.006$  s<sup>-1</sup>, in den vertikalen Profilen bei 1.2 km vertikaler Auflösung, d.h. bei Richardson-Zahlen  $Ri = N^2/S^2$  zwischen 10 und 290. Bei den gemessenen Situationen war die Atmosphäre in der Nähe der Tropopause also praktisch frei von Turbulenz.

## 3. Vergleich mit Analysen und mit Messungen auf Linienflugzeugen

Um zu prüfen, wie typisch die Meßwerte an diesen drei Tagen im Vergleich zu klimatologischen Mittelwerten sind, haben wir weitere Auswertungen vorgenommen. Anhand von Level III ECMWF-Analyse-Daten für den Nordatlantik (Hoinka et al., 1993) wurden Häufigkeitsverteilungen von  $N$  und  $S$  im Jahresmittel in verschiedenen Höhen berechnet (Abb. 1). Sie zeigen Medianwerte von  $N = 0.018$  s<sup>-1</sup> und  $S = 0.002$  s<sup>-1</sup>. D.h., die Messungen fanden bei typischen Werten von  $N$  und  $S$  statt. Werte von  $S$  größer als  $0.005$  s<sup>-1</sup> werden in weniger als 10 % der Analysen gefunden. D.h., die Richardson-Zahl an der Tropopause ist zumeist deutlich größer als 1.

Vergleichswerte klimatologischer Art für Varianzen der turbulenten Schwankungen gibt es nur aufgrund von Messungen mit den Trägheitsplattformen und Drucksensoren auf Linienflugzeugen bei Frequenzen kleiner 0.25 Hz. Auswertungen von Nastrom et al. (1987) zeigen die Häufigkeitsverteilungen von  $u'^2$  und  $\theta'^2$  auf 64-km-Segmenten über dem Pazifik, über dem mittleren Westen der USA und über den Ebenen des Ostens der USA. Zum Vergleich haben wir ähnliche Auswertungen für alle Messungen der fünf Flüge am 14., 16., 17., 19. und 20. Okt. 93 über 50 Flugabschnitten mit 90 bis 190 km Länge mit 121 64-km-Segmenten (teilweise überlappend) ausgewertet. Abb. 2 zeigt die daraus errechnete Häufigkeitsverteilung. Die Werte für  $u'^2$  lassen sich unmittelbar mit Fig. 3 von Nastrom und Gage (1987) vergleichen. Sie stimmen bis auf ca. 10 % hinsichtlich der Varianz im Häufig-



keitsbereich 1 bis 90 % mit den über dem Pazifik und den westlichen Ebenen der USA gefundenen Werten überein. In seltenen Fällen (weniger als 8 %) zeigen die dort gefundenen Werte etwas größere (Faktor 3) Varianzen an. Dies belegt, daß die Falcon-Messungen bei Situationen stattfanden, die für 90 % aller Tage an der Tropopause typisch sind.

#### 4. Schlußfolgerungen

An der Tropopause über dem Nordatlantik ist die Atmosphäre zumeist in einem nicht turbulenten Zustand. Man findet geringe Varianzen, die vorwiegend wellenförmiger Natur sind mit sehr kleinen Dissipationsraten. Spurenstoffe werden in vertikaler Richtung durch diese Turbulenz nur sehr langsam vermischt. Emissionen aus dem Luftverkehr werden in vertikaler Richtung daher in den ersten Minuten durch die vom Flugzeug induzierte Wirbelschleife vermischt. Danach erlischt die vertikale turbulente Vermischung. Die horizontale Vermischung erfolgt in den ersten Minuten nach Abklingen der vom Flugzeug erzeugten Turbulenz aufgrund quasi zweidimensionaler „Turbulenz“ mit einer turbulenten Diffusivität von typisch 5 bis 20  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ . Nach Zeiten von ca. 30 bis 60 Minuten bestimmt die Scherung des mittleren Windes die weitere horizontale Ausbreitung.

- Hoinka, K. P., M. E. Reinhardt, and W. Metz, North Atlantic air traffic within the lower stratosphere: Cruising times and corresponding emissions, *J. Geophys. Res.*, 98, 23113-23131, 1993.  
 Nastrom, G. D., D. C. Fritts, K. S. Gage, An investigation of terrain effects on the mesoscale spectrum of atmospheric motions. *J. Atmos. Sci.*, 44, 3087-3096, 1987.  
 Schumann, U., P. Konopka, R. Baumann, R. Busen, T. Gerz, H. Schlager, P. Schulte, and H. Volkert, Estimate of diffusion parameters of aircraft exhaust plumes near the tropopause from nitric oxide and turbulence measurements, *J. Geophys. Res.*, in press, 1995.

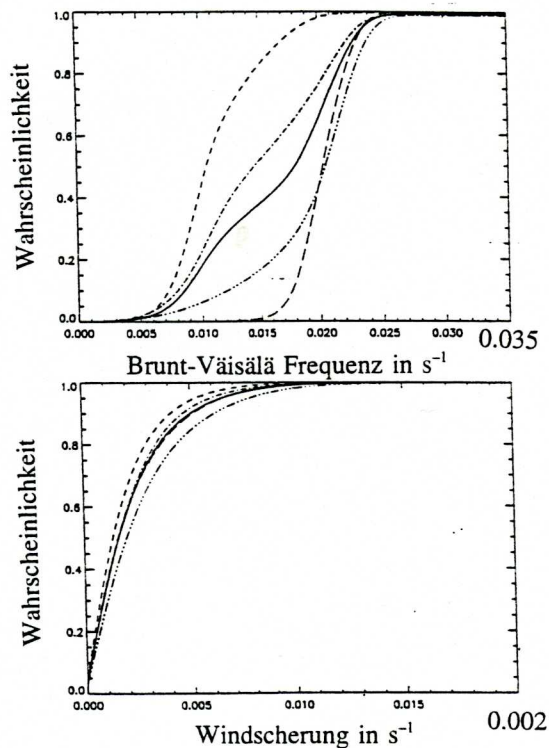


Abb. 1. Kumulative Wahrscheinlichkeit, d.h. Integral der Häufigkeit der Brunt-Väisälä Frequenz  $N$  (oben) und Scherrate  $S$  (unten) in Höhen  $z = 8.0$  (kurz gestrichelt), 9.6, 10.9 und 12.6 km (lang gestrichelt) sowie im Mittel dieser Höhen (volle Kurve).

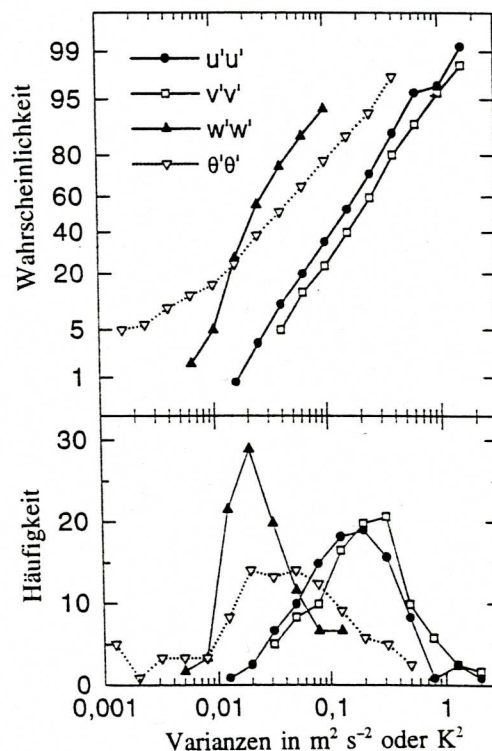
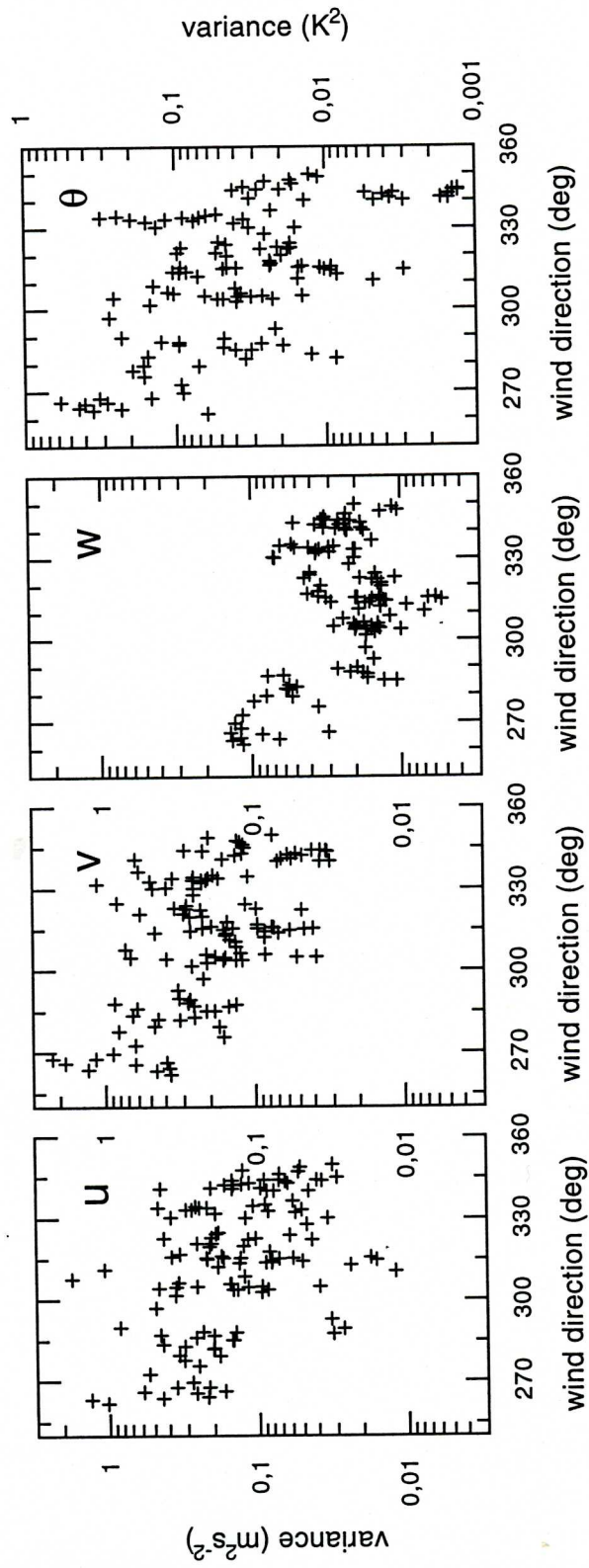


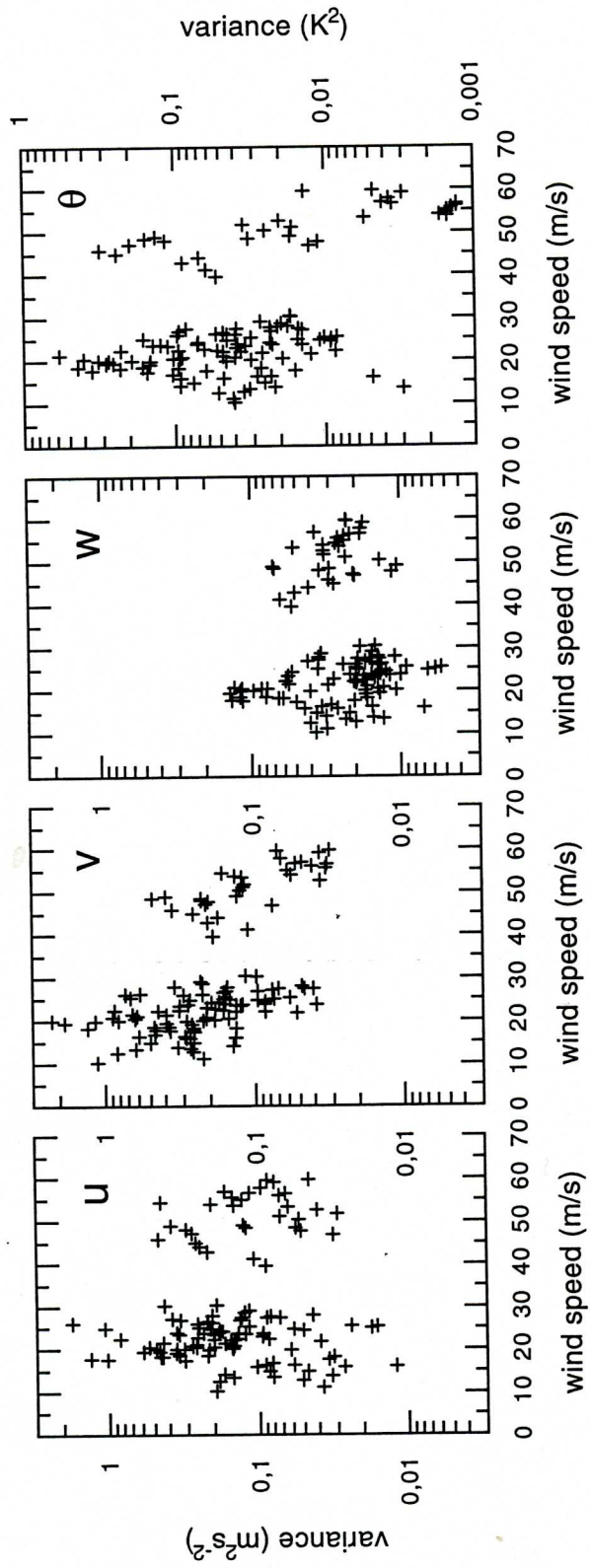
Abb. 2. Kumulative Wahrscheinlichkeit (oben) und Häufigkeitsverteilung (unten) von Varianzen im Mittel über 121 Segmenten von 64 km Länge an 5 Meßtagen.

Schumann, U., R. Baumann, T. Dürbeck, P. Konopka, H. Schlager: Wie turbulent ist es an der Tropopause über dem Nordatlantik? Ann. Meteorol. 31 (1995) 372-373.

FAN '93, Flights 2110, 2112-2115, 64-km segments:  
Correlation of variances with wind direction



FAN '93, Flights 2110, 2112-2115, 64-km segments:  
Correlation of variances with wind speed



FAN '93, Flights 2110, 2112-2115, 64-km segments:  
 Correlation of variances with height

