

Forschungsflugzeug DO128 – ein fliegendes Labor für die Umwelt- und Klimaforschung am Forschungszentrum

Ch. Kottmeier, U. Corsmeier, F. Fiedler, IMK; R. Hankers, Universität Braunschweig, IFF

Einleitung

Das Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Troposphäre (IMK) nutzt für Messprogramme zur Umwelt- und Klimaforschung seit langem das Forschungsflugzeug DO128 des Instituts für Flugführung (IFF) der Universität Braunschweig. Der Einsatz des Flugzeugs erfolgt im Rahmen einzelner Messprogramme, für die jeweils die geeignete Instrumentierung zusammengestellt, erprobt und betrieben wird. Die wissenschaftliche Leitung liegt bei den Wissenschaftlern des IMK, die Durchführung des Flugbetriebs und die Zuständigkeit für den Geräteinsatz beim IFF. Durch Nutzung von Kalibriereinrichtungen des IMK und durch Vergleichsmessungen mit anderen Forschungsflugzeugen im Rahmen größerer Messprogramme wird die geforderte hohe Messgenauigkeit auch für Spurengasmessungen in der Atmosphäre sichergestellt [4].

In diesem Beitrag werden das Flugzeug und seine Messinstrumentierung beschrieben. Anhand von Ergebnissen aus Forschungsvorhaben der letzten Jahre werden dann die Einsatzmöglichkeiten dieses „Fliegenden Labors“ aufgezeigt.

Das Flugzeug und seine Instrumentierung

Das zweimotorige Turboprop-Flugzeug vom Typ Dornier 128 (Abb.1) besitzt eine Reichweite von ca. 1500 km, kann bis zu 4 Stunden in der Luft sein und bei voller Messinstrumentierung außer den zwei Piloten noch 2 bis



Abb. 1: Das Forschungsflugzeug DO128, Rufzeichen D-IBUF: An der Spitze des Nasenmastes befinden sich Sensoren für die Messung der meteorologischen Parameter Wind, Temperatur und Feuchte.

3 Wissenschaftler mitnehmen. Es besitzt eine umfangreiche Messausrüstung, die teils von der Universität Braunschweig (meteorologische Basisausrüstung, Wind- und Turbulenzmessung, Bordrechner) und teils vom Forschungszentrum Karlsruhe (luftchemische Messausrüstung, Strahlungsmessgeräte, Digitalkamera, Fallsondenanlage) bereitgestellt wird [2]. Die Tabelle 1 zeigt die an Bord des Flugzeugs zu messenden Größen und die dazu verwendeten Instrumente. Die flugtechnischen Messgrößen dienen einerseits der kontrollierten Flugdurchführung, sie sind andererseits aber auch zur Berechnung und Interpretation der meteorologischen und luftchemischen Messwerte sowie der Erdoberflächendaten notwendig.

Aufnahme von Sturmschäden im Schwarzwald (Orkan Lothar)

Mit der DO128 erfolgte eine Aufnahme des Schadensbildes im Waldbestand des Schwarzwaldes nach dem Orkan Lothar vom 26. Dezember 1999. Die Befliegung mit einem Zeilenscanner [1] fand fünf Monate nach dem Ereignis statt (Abb. 2). Aus den Messwerten werden georeferenzierte Verteilungen des Vegetationsindex auf ca. 2 m x 2 m großen Bildpunkten am Boden berechnet [5]. Die geschädigten Flächen unterscheiden sich klar durch einen reduzierten Vegetationsindex von vitalen Waldbeständen und durch unterschiedliche Textur von sonstigen Flächen

| Messgrößen | Instrumente |
|--|--|
| Statischer Druck, dynamischer Druck, Druckdifferenzen | 5-Loch-Sonde und Druckwandler |
| Position und Geschwindigkeit gegenüber der Erde | GPS-Empfänger |
| Höhe über Grund | Laser Altimeter und Radar Altimeter |
| Fluglagewinkel, Drehraten, Beschleunigungen, Trägheitsnavigation, Geschwindigkeit gegenüber der Erde | INS-Lasernav |
| Ruderstellungen | Potentiometer |
| Luftfeuchte | Aerodata Humicap, Taupunktspiegel |
| turbulente Luftfeuchteschwankungen | Lyman-alpha Hygrometer |
| Lufttemperatur | PT 100 Temperatursensor, verglast |
| turbulente Lufttemperaturschwankungen | PT 100 Temperaturensor, offen |
| Wind (horizontal, vertikal) | 5-Loch-Sonde; GPS und INS |
| turbulente Windfluktuationen | 5-Loch-Sonde; GPS und INS |
| Solarstrahlung, oberer und unterer Halbraum | Kipp & Zonen Pyranometer |
| Infrarotstrahlung, oberer und unterer Halbraum | Kipp & Zonen Pyrgeometer |
| Ozonkonzentration | Environment O ₃ 41M (UV-Absorption) |
| turbulente Ozonschwankungen | Güsten Ozon Sensor (Chemilumineszens) |
| NO | NO _x TO _y -Sensor mit C _r O ₃ -Katalysator (Luminol-Chemilumineszens) |
| NO ₂ | NO _x TO _y -Sensor (Luminol-Chemilumineszens) |
| NO _y | NO _x TO _y -Sensor mit Mo/C _r O ₃ Katalysator (Luminol-Chemilumimeszens) |
| PAN | NO _x TO _y -Sensor mit C _r O ₃ Katalysator und Heizung (Luminol-Chemilumineszens) |
| CO | Aero Laser 5001 (Resonanzfluoreszens) |
| CO ₂ | LI-COR 6252 (IR-Absorption) |
| Luftprobenahme | Lufteinlass Kabinendach, bis zu 30 Proben |
| Spektrale Reflektivität der Erdoberfläche | AWI Spektral-Linescanner (3 Kanäle) |
| Reflektivität der Erdoberfläche | JVC CCD-Kamera |
| Oberflächentemperatur der Erde | Heitronics Radiometer KT19, abtastend |

Tab. 1: Instrumentierung der DO128, unterlegte Blöcke von oben: flugtechnische Daten, meteorologische Messgrößen, luftchemische Größen, Eigenschaften der Erdoberfläche.

mit geringer Vegetation (Abb. 3). Es wird offensichtlich, dass das Schadensbild erheblich von den orographischen Gegebenheiten abhängt. Große Schäden traten in Sattellagen zwischen Einzelbergen, an nordwestlich bis nördlich orientierten Bergflanken, in windparallelen Längstälern und am luvseitigen Hang von Berg Rücken auf. Erhebliche Schäden erlitten Waldbestände auf Bergkuppen, an exponierten Stellen im Flachland und an südlich bis südöstlich orientierten Flanken von Einzelbergen. Geringe Schäden sind in Windschattenzonen, d.h. an den östlichen Seiten von Bergen, in Mulden und Nischen sowie in Quertälern zu verzeichnen. Das komplexe Schadensbild wird derzeit durch eine kombinierte Analyse besser erklärt, bei der Vegetations- und Standortmerkmale berücksichtigt werden und die Strömungsmodellierung mit dem Modellsystem

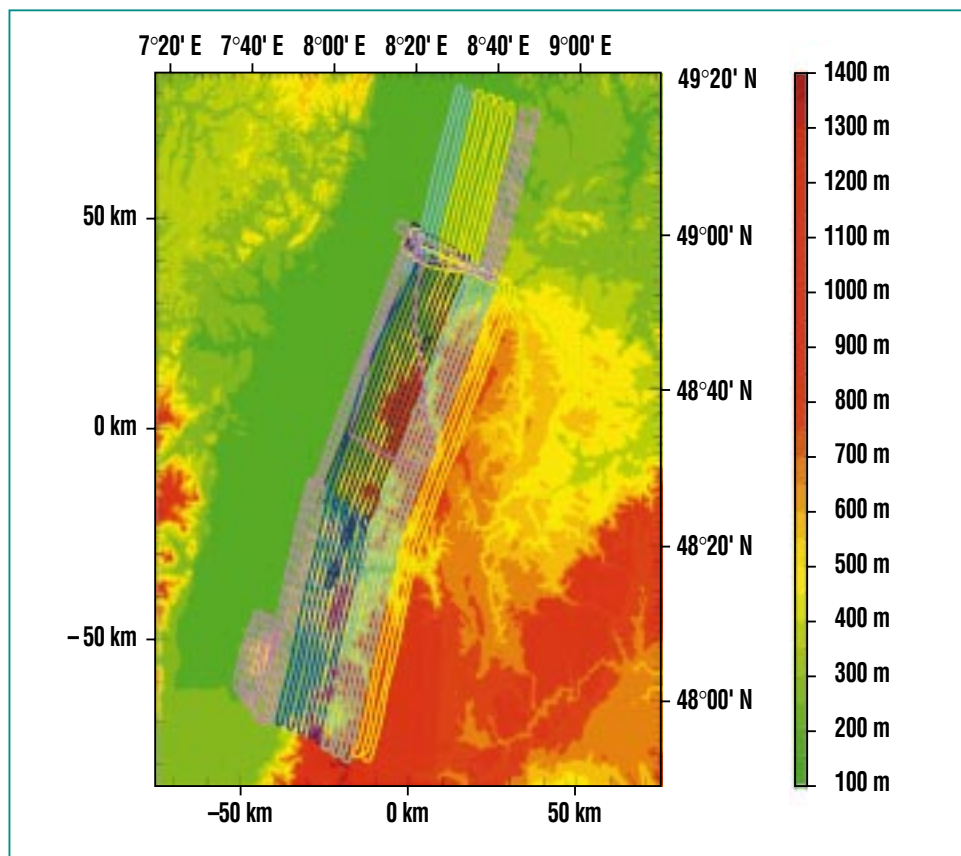


Abb. 2: Befliegungsmuster des Nordschwarzwaldes im Mai/Juni 2000 mit einem Zeilenscanner an Bord der DO128.

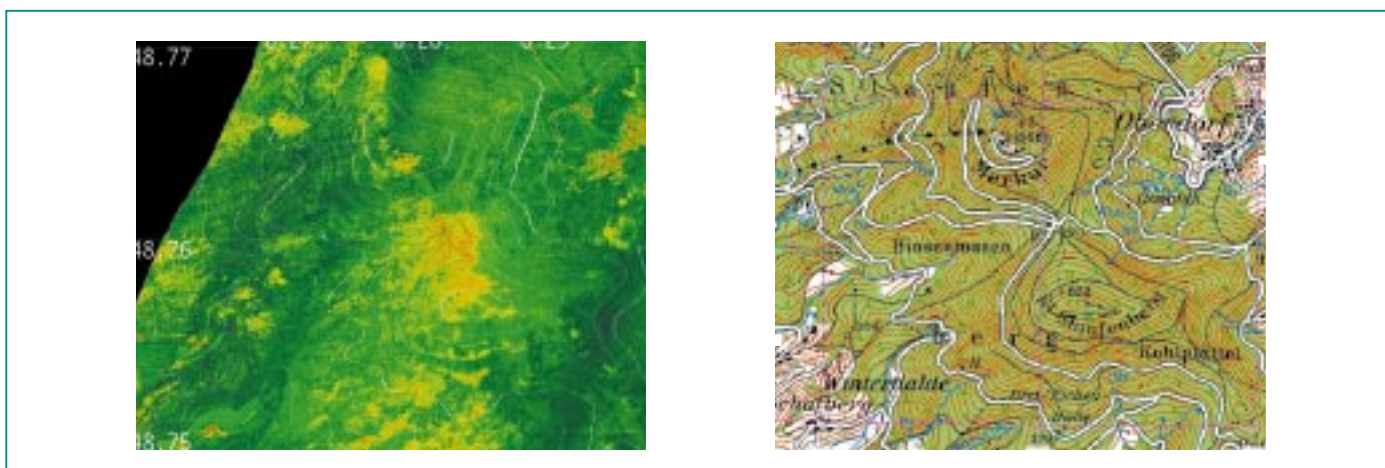


Abb. 3: Ergebnis der Befliegung östlich von Baden-Baden. Höhenlinienabstand 50 Meter, 200 m-Linien hervorgehoben, Datenauflösung 4 qm. In der Szene östlich von Baden-Baden ist der Waldschaden (gelb-braune Fläche) im Bereich eines Sattels zwischen Merkur und Staufenberg besonders markant. Der 200 m tiefer liegende Sattel mit dem Wegekreuz (Fußwege und Abräumspuren) und die südlich angrenzende Flanke des Staufenbergs sind total geschädigt, während der Gipfelbereich beider Berge weniger betroffen ist. Bereiche östlich von Erhebungen waren bei der Anströmung von Westen im Windschatten und blieben verschont.

KAMM (Karlsruher Atmosphärisches Mesoskaliges Modell) eine wichtige Rolle spielt.

Ziel der Schadensaufnahme und der Strömungsmodellierung ist es, eine räumlich hoch auflösende Risikokartierung für die Sturmgefährdung von Waldbeständen zu gewinnen. Hierbei werden besonders die orographischen Einflüsse, d.h. die Geschwindigkeitsänderungen beim Über- und Umströmen von Mittelgebirgen berücksichtigt.

Bestimmung der Emission von Luftschadstoffen aus dem Gebiet einer Großstadt (Augsburg)

Die Belastung der Luft mit Schadstoffen lässt sich mit numerischen Modellen, z.B. dem Modellsystem KAMM/DRAIS/MADE des IMK berechnen. Voraussetzung dafür sind verlässliche Daten über die Emissionen im Modellgebiet, die ihrerseits wieder mit Hilfe von Emissionsberechnungsmodellen bereitgestellt werden, welche alle

Emittenten aus den Bereichen Verkehr, Industrie und Privathaushalten enthalten. Die Qualität der Emissionsmodelle ist jedoch nicht genau bekannt und wurde deshalb in einem Feldmessprogramm unter Beteiligung des IMK untersucht. Das sogenannte Evaluierungs-Experiment Augsburg (Koordination IER, Univ. Stuttgart; IMK-IFU, Garmisch-Partenkirchen) war Teil des Troposphärenforschungsprogramms (TFS) der Bundesrepublik Deutschland. Ziel war es, durch Messung der Konzentrationen wichtiger Schadstoff-

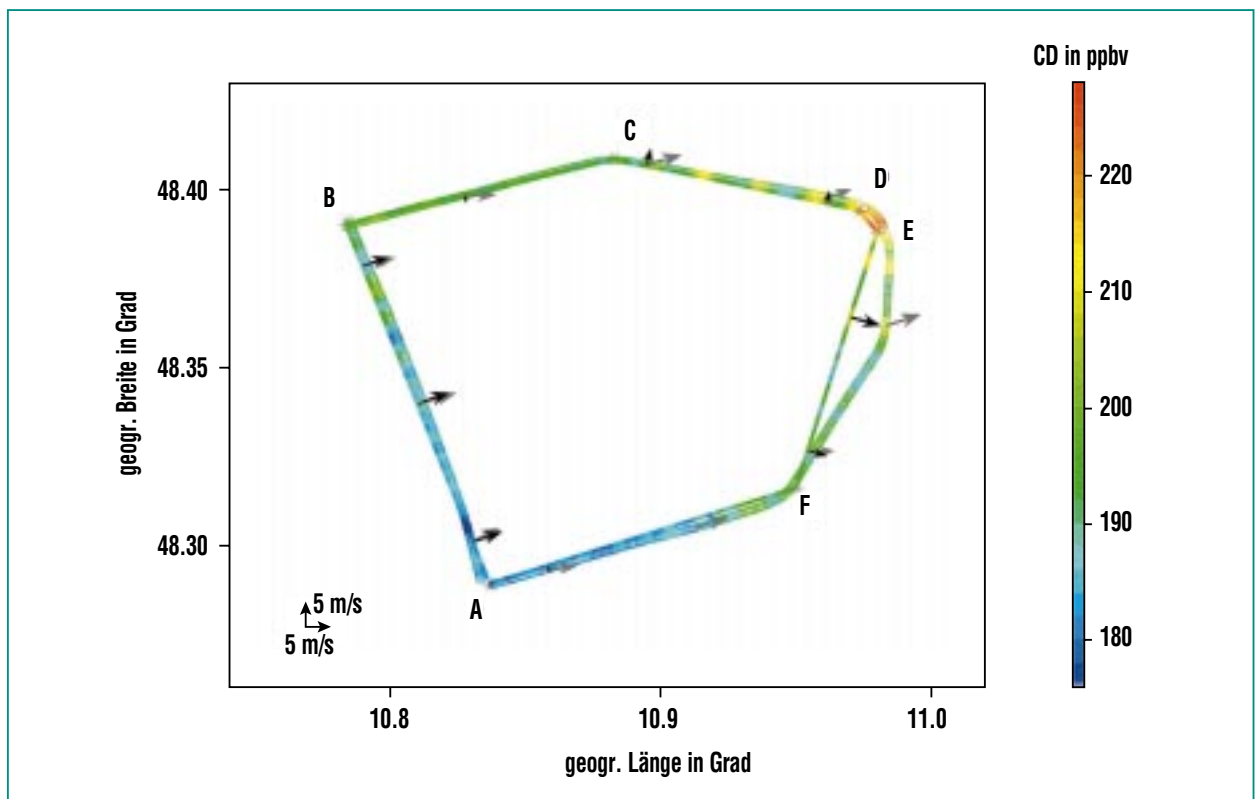


Abb. 4: Horizontalprojektion eines Flugwegs (Abb. 5) der DO128 beim Umfliegen des Stadtgebiets von Augsburg mit Messungen der Kohlenmonoxidkonzentration. Durch die genaue Kurseinhalten des Flugzeugs mit GPS und Trägheitsnavigation unterscheiden sich die Flugwege in insgesamt sieben verschiedenen Messhöhen kaum. Die Differenz zwischen Flugweg (dicke Kurve) und Kontrollfläche (dünne Kurve) auf der Strecke E-F tritt nur in den beiden unteren von 7 Flugniveaus wegen des Umfliegens eines Hindernisses auf. Graue Pfeile markieren den auf dem Flugweg gemessenen Wind und schwarze Pfeile die Windkomponente senkrecht zur berechneten Kontrollfläche.

fe (CO , NO_x) auf einer Kontrollfläche um ein Stadtgebiet herum die Emissionen innerhalb des Gebietes zu bestimmen [6]. Das messtechnische Konzept dafür ist die Massenbilanzmethode [3]. Dabei werden die Massenflüsse eines Spurenstoffs durch die Randflächen eines Kontrollvolumens bestimmt und aus der Bilanz der Massenflüsse über das Kontrollvolumen die Emissionen berechnet. Dieses Verfahren wurde eingesetzt, um die Emissionen für das Stadtgebiet von Augsburg zu bestimmen. Sie verursachen die erhöhten Schadstoffkonzentrationen auf der Leeseite der Stadt. Die DO128 wurde hierbei gemeinsam mit einem Flugzeug des IMK-IFU

[6] und weiteren Messstationen am Boden und an Ballonen eingesetzt.

Das Flugmuster (Abb. 4) wurde so geplant, dass der gesamte Transport durch eine senkrechte Kontrollfläche um das Stadtgebiet berechnet werden konnte. Der Transport erfolgt durch die Komponente des Windes senkrecht zur Kontrollfläche und erforderte deshalb eine hohe Genauigkeit der Windmessung. Das präzise Einhalten des Flugwegs und genaue Messungen der Spurenstoffkonzentrationen waren weitere Anforderungen für eine exakte Bestimmung der Emissionen.

Die Mischungsschichthöhe lag zum Zeitpunkt des Messfluges bei 1050 m, so dass diese Höhe als Obergrenze für das Kontrollvolumen angesehen werden konnte. Die Abbildung zeigt sehr deutliche Unterschiede zwischen dem Luv- (Wegpunkte A-B und F-A) und Leebereich (Wegpunkte C-F). Während die Werte im Luvbereich bei 180 ppbv liegen, treten im Leebereich der Stadt Maxima von 250 ppbv auf. Die wichtigsten CO-Emittenten in Augsburg sind der Verkehr mit 88 % und die Haushalte mit 8 %. Da CO-Emissionen hauptsächlich aus dem Fahrzeugverkehr stammen, sind sie verhältnismäßig homogen über den gesamten Stadtbereich verteilt.

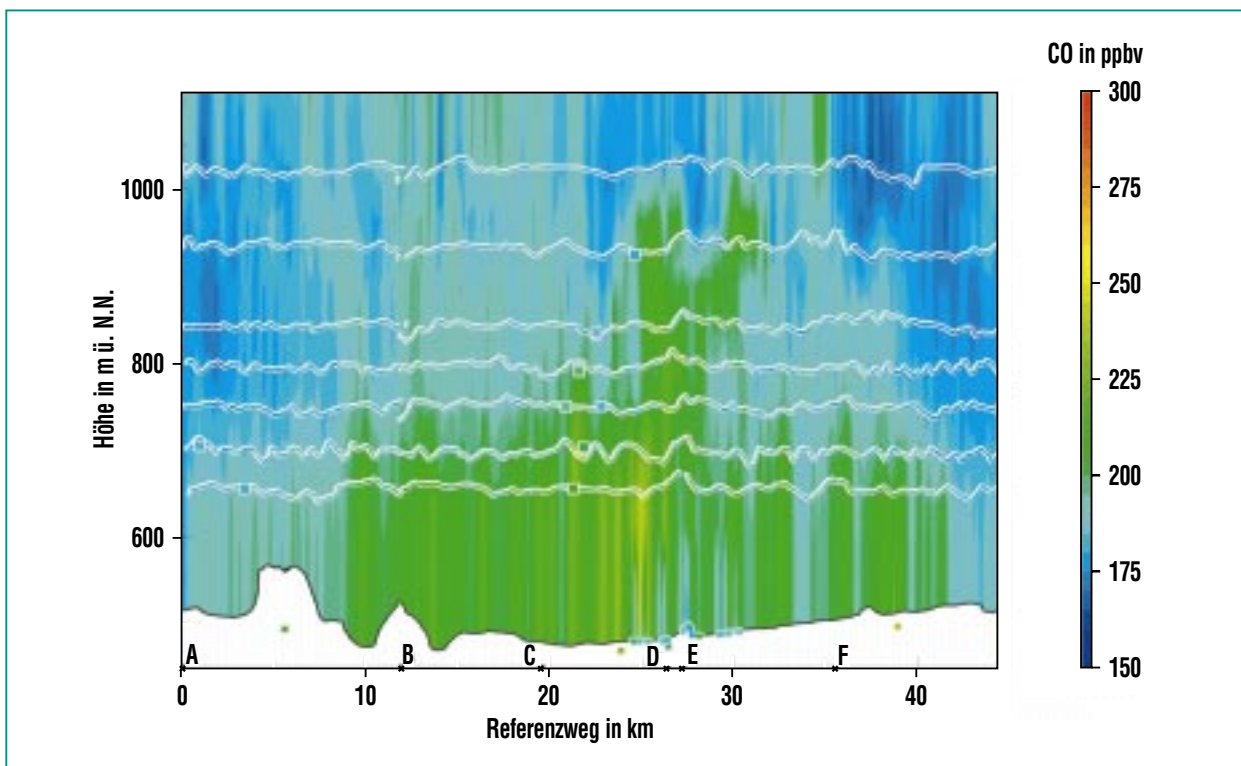


Abb. 5: Verteilung der Kohlenmonoxidkonzentration auf der aufgeklappten Gesamtkontrollfläche A-F-A (Abb. 4) um das Stadtgebiet für einen Flug vom 22.10.98. Die Interpolation zwischen den sieben Flugniveaus berücksichtigt auch Messpunkte am Boden (runde Symbole) und Luftproben, die an Bord des Flugzeugs in Stahlkanister gezogen und nach der Landung im Labor analysiert wurden (quadratische Symbole).

Man findet also eine vergleichsweise gute Durchmischung dieses Spurenstoffs in der gesamten Mischungsschicht, wobei eine leichte Erhöhung zum Boden hin zu verzeichnen ist.

Die Verteilung von Stickoxiden (NO_x) zeigt wie beim CO deutliche Differenzen zwischen dem Luv- und dem Leebereich der Stadt. Werten von 5 ppbv bis 8 ppbv im Luv stehen 15 ppbv bis 23 ppbv im Lee gegenüber. Im Gegensatz zum CO sind die höchsten NO_x -Konzentrationen auf einen engen Bereich begrenzt. Dies deutet darauf hin, dass es sich um die Abluftfahnen von Industrieanlagen handelt, die innerhalb des Stadtgebietes stehen.

Die Emissionsraten für Augsburg liegen an normalen Wochentagen über Mittag für CO zwischen 1600 kg h^{-1} und 1975 kg h^{-1} und für NO_x zwischen 300 kg h^{-1} und 435 kg h^{-1} . Im Gegensatz dazu sind die NO_x -Emissionen am Samstagmittag mit 110 kg h^{-1} deutlich niedriger, die CO-Emissionen dagegen jedoch nahezu gleich. Der Grund sind die am Samstag im Vergleich zum Wochentag niedrigeren industriellen Aktivitäten aber ein nahezu gleiches Verkehrsaufkommen. Punkt-

quellen, wie Industrieanlagen, machen nämlich 24 % der gesamten NO_x -Emissionen aus.

Die Emissionen wurden auf der Grundlage der Messdaten mit verschiedenen Verfahren und unter variierenden Annahmen über die Zufuhr von Luft durch die obere Begrenzungsfläche des Kontrollvolumens und unterhalb des niedrigsten Flugniveaus berechnet. Hierbei ergaben sich Abweichungen, die im Einzelfall 35% erreichen können. Während Emissionsmodelle an Werktagen während der Mittagszeit fast konstante Werte liefern, variieren die gemessenen Emissionen zwischen verschiedenen Tagen erheblich.

Ausblick und zukünftige Entwicklung

Die Nutzung des Forschungsflugzeugs DO128 mit getrennten Zuständigkeiten für Flugbetrieb (Universität Braunschweig) und wissenschaftliche Leitung (Forschungszentrum Karlsruhe) hat sich gut bewährt. Die mittlere Reichweite und Flugdauer und der Einsatzbereich bis 7 km Höhe machen das Messflugzeug für Messungen in der unteren Atmosphäre, für die regionale Klimafor-

schung und für die Umweltforschung bis zu Gebieten von der Größe eines Bundeslandes sehr gut geeignet. Die bewährte Kooperation mit dem IFF soll im Rahmen zukünftiger Programme weitergeführt und die Instrumentierung verbessert werden.

Für Messungen in der oberen Troposphäre, für Vergleichsmessungen mit bereits verfügbaren und geplanten Satelliteninstrumenten, zu Fragen interkontinentaler Spurenstofftransporte oder zur Konvektion in verschiedenen Klimazonen (Projekt TRACKS) wird ein Flugzeug größerer Leistungsfähigkeit benötigt, wobei die vorhandene Instrumente weiter genutzt werden können. Unter maßgeblicher Beteiligung der Helmholtz-Zentren, hierbei auch des Forschungszentrums Karlsruhe, wurde deshalb die Beschaffung eines großen deutschen Forschungsflugzeugs interkontinentaler Reichweite (HALO; High Altitude Long Range Aircraft) vorbereitet und beantragt. Zu dem Antrag liegt ein Votum des Wissenschaftsrates vor, das der Beschaffung höchste Priorität einräumt.

Literatur

- [1] A. Bochert, J.M. Hacker, K. Ohm, *Color Line Scanner as imaging NDVI Sensor. Second EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy. 2000*
- [2] U. Corsmeier, R. Hankers, A. Wieser *Meteorologische Zeitschrift, 10 (2001) 315-329*
- [3] N. Kalthoff, U. Corsmeier, F. Fiedler, M. Habram, Ch. Kottmeier, K. Schmidt, F. Slemr, *Atmospheric Environment 36 No. 1 (2002), 519-531*
- [4] H.-J. Kanter, V.A. Mohnen, A. Volz-Thomas, W. Junkermann, K. Glaser, C. Weitkamp, F. Slemr, *J. Atmos Chem. 42 (2002), 235-253.*
- [5] Ch. Kottmeier, C. Schmitt, J. Schmöckel, *Sturm Lothar: Schadensanalyse und Risikoanalyse aus meteorologischer Sicht. Tagungsband (Herausg. G. Tetzlaff, T. Trautmann, K.S.Radtke) Zweites Forum Naturkatastrophen (2002), 428 – 432*
- [6] F. Slemr, G. Baumbach, P. Blank, U. Corsmeier, F. Fiedler, R. Friedrich, M. Habram, N. Kalthoff, D. Klomp, J. Kuehlwein, K. Mannschreck, M. Moellmann-Coers, K. Nester, H.-J. Panitz, P. Rabl, J. Slemr, U. Vogt, B. Wickert, *Journal of Atmospheric Chemistry, 42 (2002), 207-233.*