

Bericht zum Falcon Messflug am 19. April 2010

U. Schumann, H. Schlager, B. Weinzierl, O. Reitebuch, A. Minikin, H. Huntrieser,
T. Sailer, H. Mannstein
DLR-Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung¹

Ein Messflug mit dem Forschungsflugzeug Falcon des DLR zur Charakterisierung von Partikelschichten über Deutschland vom Ausbruch des Eyjafjallajökull Vulkans wurde am 19. April 2010 erfolgreich durchgeführt. Schichten mit Vulkanasche konnten mit dem Lidar detektiert und in situ mit Partikelinstrumenten vermessen werden. Bei geeigneten Sichtbedingungen waren die Ascheschichten als bräunliche Schichten auch mit bloßem Auge sichtbar. Die horizontale und vertikale Verteilung der Vulkanasche-Schichten waren sehr inhomogen. In diesen Schichten wurden größere Partikel (Durchmesser größer $3 \mu\text{m}$) in Konzentrationen gemessen, die bei unverschmutzten Bedingungen in der freien Troposphäre nicht vorhanden sind. Die gemessenen Konzentrationen von großen Partikeln in den Vulkanschichten lagen bei Werten, die typisch in Sahara-Staubschichten beobachtet werden. Sie lagen jedoch niedriger, als die Konzentrationen von großen Partikeln, die in einer verschmutzten bodennahen atmosphärischen Grenzschicht gemessen werden. Eine Abschätzung der Partikelmassenkonzentration in der Vulkanascheschicht beim Durchflug in 4 km Höhe während der Profilmessung über Leipzig ergab einen Wert von $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die gemessene Vulkanasche war etwa 4-5 Tage zuvor emittiert worden.

Nach dem Flug wurde die Falcon einer Inspektion unterzogen. Dabei wurden keine Beschädigungen der Triebwerke (nach einer Boroskopie), Fenster oder anderer Bauteile festgestellt. Weitere Triebwerksinspektionen laufen noch. Silberfolien, die an Flügelbehältern befestigt waren, zeigten keine sichtbaren Einflüsse von den Vulkanaschepartikeln.

Flugweg und meteorologische Situation

Der Flugweg ist in Abbildung 1 dargestellt. Start und Landung in Oberpfaffenhofen bei München waren um 14:12 UTC (16:12 MES) beziehungsweise 17:53 UTC (MES). Der Flugweg führte von Oberpfaffenhofen nach Leipzig, Hamburg, Bilthoven (Niederlande), Stuttgart und zurück nach Oberpfaffenhofen. Die Falcon flog hauptsächlich in einer Höhe von 8 km für Lidarbeobachtungen. Vertikalprofile wurden bei Leipzig und Stuttgart geflogen. In der Nähe von Aachen stieg die Falcon bis 11 km Höhe für Messungen in der Stratosphäre.

Im südlichen und mittleren Teil von Deutschland wurden Luftmassen sondiert, die gealterte Vulkanemissionen enthielten (Abbildung 2). Diese Luftmassen sind am 16.

¹ Bericht vom 21. 4. 2010. Übersetzung des Berichts vom 20.4.2010, mit redaktionellen Änderungen und Ergänzungen.

April in Deutschland angekommen (von den ersten starken Vulkaneruptionen in Island am 14.-15. April), wurden dann um ein Hochdruckgebiet über Frankreich transportiert, bevor sie am 19. April zum zweiten Mal nach Deutschland geführt wurden (Alter der Vulkanemissionen ~4-5 Tage).

Visueller Eindruck von der Vulkanascheschicht und METEOSAT Beobachtung

Die Vulkanasche-Schichten waren beim Flug deutlich sichtbar. Abbildung 3 zeigt ein Photo aus der Falcon über Leipzig um etwa 15 UTC (17 MES), in einem Gebiet wo die Vulkanschicht eine vertikale Ausdehnung von etwa 2 km hatte. Die Vulkanasche-Schicht war auch mit dem METEOSAT- Satelliten erkennbar (Abbildung 4).

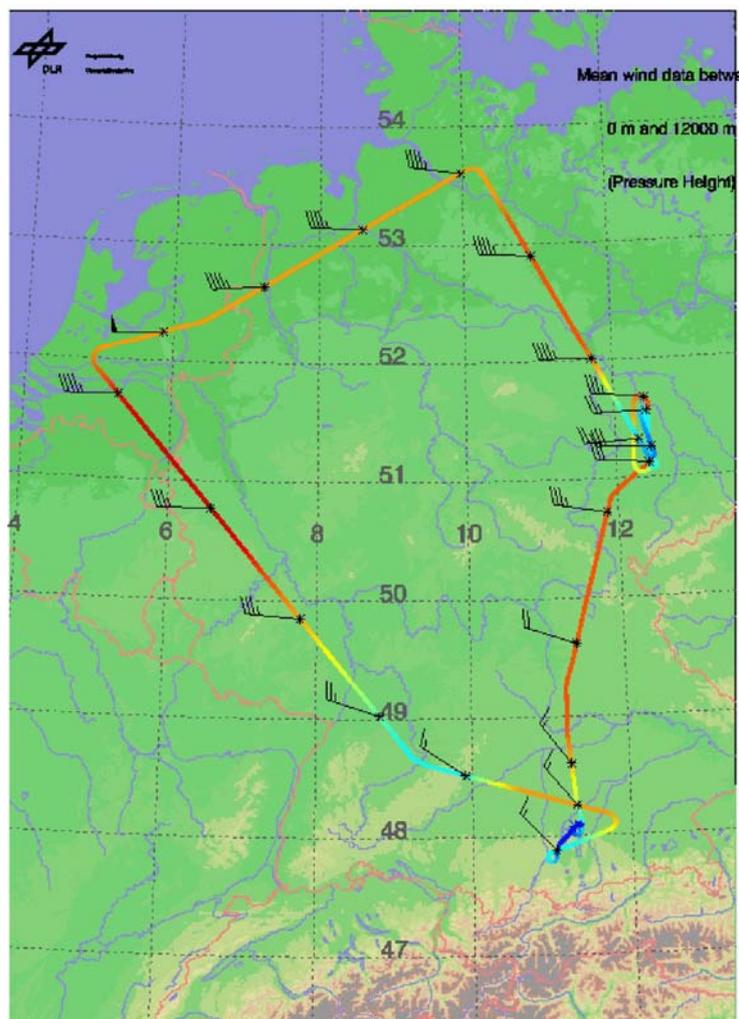


Abb. 1: Flugweg der DLR Falcon am 19. April 2010

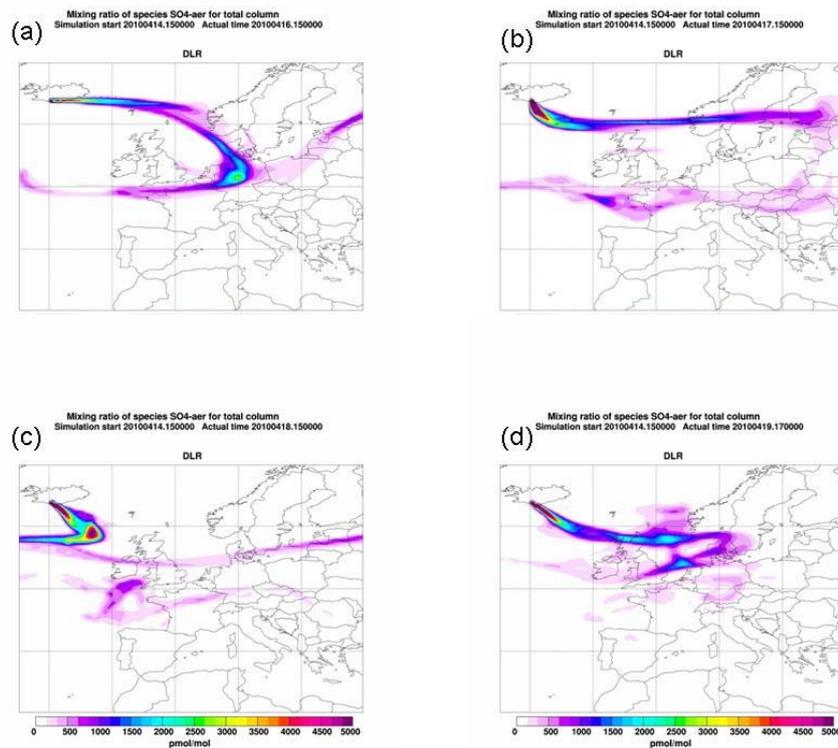


Abb. 2: FLEXPART Simulationen der zeitlichen Entwicklung und Ausbreitung eines Aerosol-Modelltracers, der am Vulkan in Island freigesetzt wird (die Emissionsrate wurde basierend auf MSG Satellitenbeobachtung zeitabhängig abgeschätzt) ab dem 14. April 2010. Gesamtsäulen (pmol/mol) sind gezeigt für die Tage 16. April, 15 UTC (a), 17. April, 15 UTC (b), 18. April, 15 UTC, und 19. April, 17 UTC (Verteilung während des Falcon Fluges).



Abb.3: Photo aus der DLR Falcon nahe Leipzig am 19. April 2010

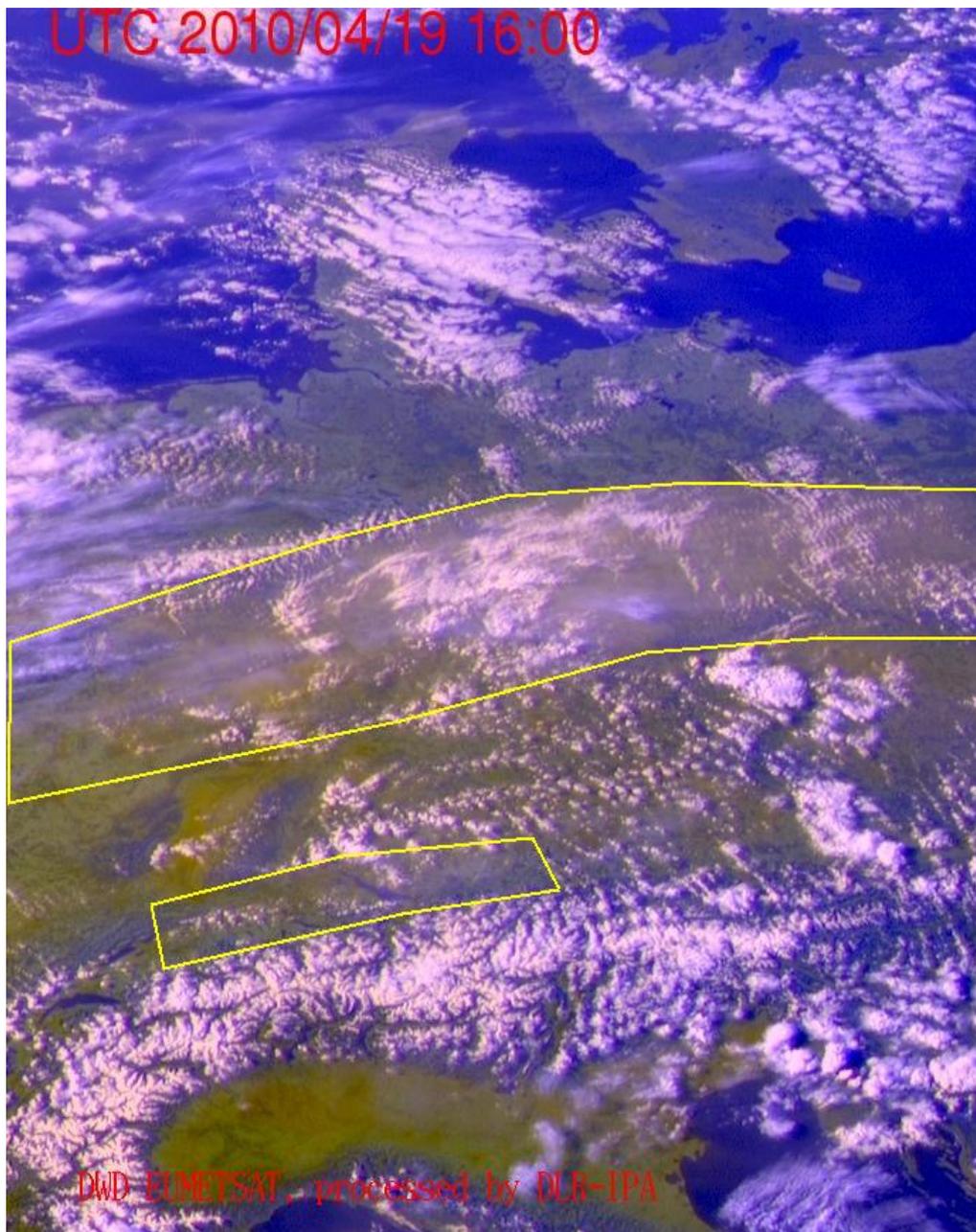


Abb. 4: METEOSAT-SEVIRI Falsch-Farben-Darstellung basierend auf dem hochauflösenden Kanal im sichtbaren Licht mit einer Auflösung von 1 km unterhalb des Satelliten. Aufgrund der niedrig stehenden Sonne um 16:00 UTC sind die Aerosolschichten hauptsächlich durch eine Reduktion des Kontrastes der Oberflächenkonturen erkennbar. Die gelben Polygone umschließen Gebiete, in denen eine Kontrastreduktion nicht nur in diesem Bild, sondern auch in der Bildfolge erkennbar ist. Eine Unterscheidung zwischen den Vulkanasche-Schichten und Verschmutzung in der bodennahen Grenzschicht ist nicht möglich. Analysen von Luftmassentrajektorien zeigen jedoch eine gute Übereinstimmung der Gebiete mit der vorhergesagten Verteilung des Aerosols vom Ausbruch des Eyjafjallajökull Vulkans am 14. April 2010.

Messungen des Lidar

Mit einem Lidar („Light Detection and Ranging“) wurden bei einer Laser-Wellenlänge von 2 μm Messungen des Vertikalprofils von Aerosol- und Partikelschichten (obere und untere Grenze, Höhe, horizontale Ausdehnung) und der horizontalen Windgeschwindigkeit und –richtung vorgenommen. Die Lidar-Signale zeigten schon während des Fluges in Echtzeit deutliche Signaturen von abgehobenen Partikelschichten oberhalb der atmosphärischen Grenzschicht. Das Lidar detektierte mehrere Schichten von höherem Partikelgehalt in Höhen zwischen 3.5 km bis 6 km. Nahe München wurden 2 Schichten mit einer Dicke von 500-1000 m beobachtet. Nahe Leipzig gehen diese beiden Schichten in eine Schicht von etwa 2 km Dicke über. Im allgemeinen waren diese Schichten sowohl in der vertikalen als auch in der horizontalen entlang des Flugweges inhomogen und haben ihre Eigenschaften auf Skalen von 100-200 km verändert. Die Signalstärke, die ein Maß für den Partikelgehalt ist, war in den abgehobenen Schichten (oberhalb von 3.5 km) geringer als in der atmosphärischen Grenzschicht (unterhalb von 3.5 km). Im Norden Deutschlands auf dem Flugweg zwischen Leipzig und Hamburg konnten keine Partikel oberhalb der atmosphärischen Grenzschicht beobachtet werden. Die Abbildungen 5 – 8 zeigen Lidar-Messungen der entfernungskorrigierten Signal-Stärke und der horizontalen Windgeschwindigkeit und –richtung (Abb. 8) entlang des Flugweges.

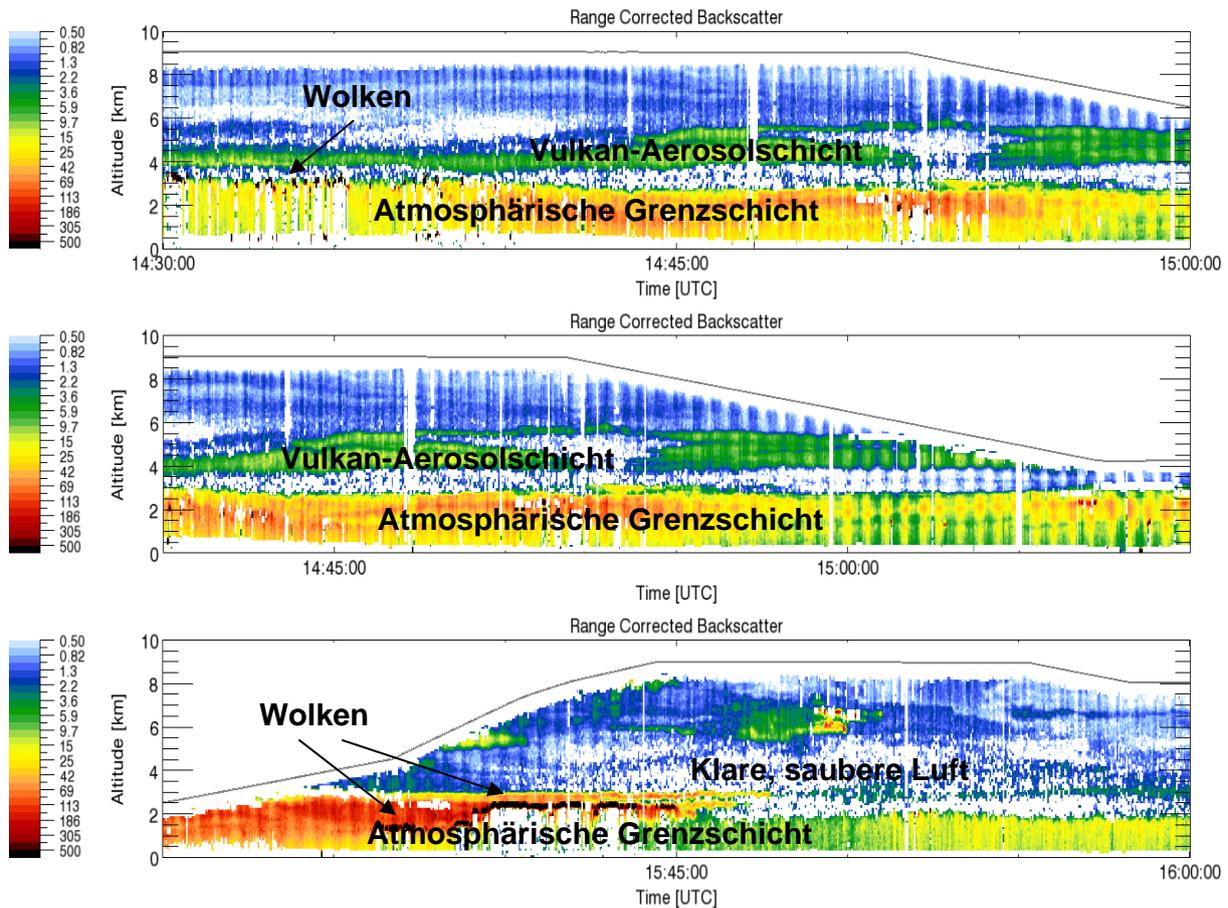


Abbildung 5: Lidar-Messung der Signal-Stärke entlang des Flugweges der Falcon am 19. April 2010; Oberes Bild zeigt Messungen kurz nach Start in Oberpfaffenhofen (14:30-15:00 UTC entsprechend 16:30-17:00 MESZ) auf dem Weg nach Norden Richtung bis Leipzig; Mittleres Bild zeigt Messungen südlich und um Leipzig; Unteres Bild zeigt Messungen auf dem Flugweg von Leipzig nach Hamburg; schwarze Farben zeigen hohe Signale von Wolken (bei etwa 3 km); rote/grüne/gelbe Farben zeigen Schichten mit Aerosolpartikeln in der atmosphärischen Grenzschicht (bis 3 km); grüne/gelbe Farben zeigen Vulkan-Aerosolschichten bei etwa 4 km und 5.5 km; weiß-blaue Farben zeigen Regionen in der Atmosphäre mit geringem Aerosol-Gehalt; Vulkan-Aerosol-Schichten sind im südlichen Bereich von München bis Leipzig zu erkennen (oben, Mitte), wohingegen zwischen Leipzig und Hamburg keine Schichten oberhalb von 3 km zu erkennen sind (unten).

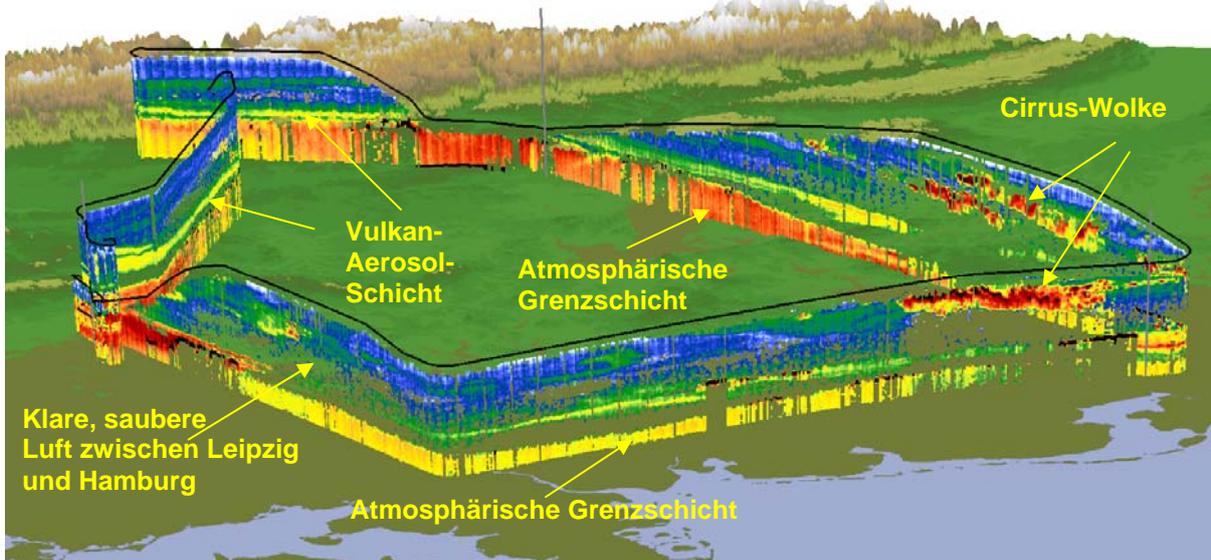


Abbildung 6: Lidar-Messung der Signal-Stärke entlang des Flugweges der Falcon am 19. April 2010; die schwarze Linie zeigt den Flugweg und die Flughöhe an; rote-schwarze Farben zeigen hohe Signale von Wolken (niedrige Wolken in 2-3 km und hohe Cirrus-Wolken) und Aerosol in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht; Vulkan-Aerosol-Schichten sind im südlichen Bereich von München bis Leipzig zu erkennen, wohingegen zwischen Leipzig und Hamburg keine Schichten oberhalb von 3 km zu erkennen sind.

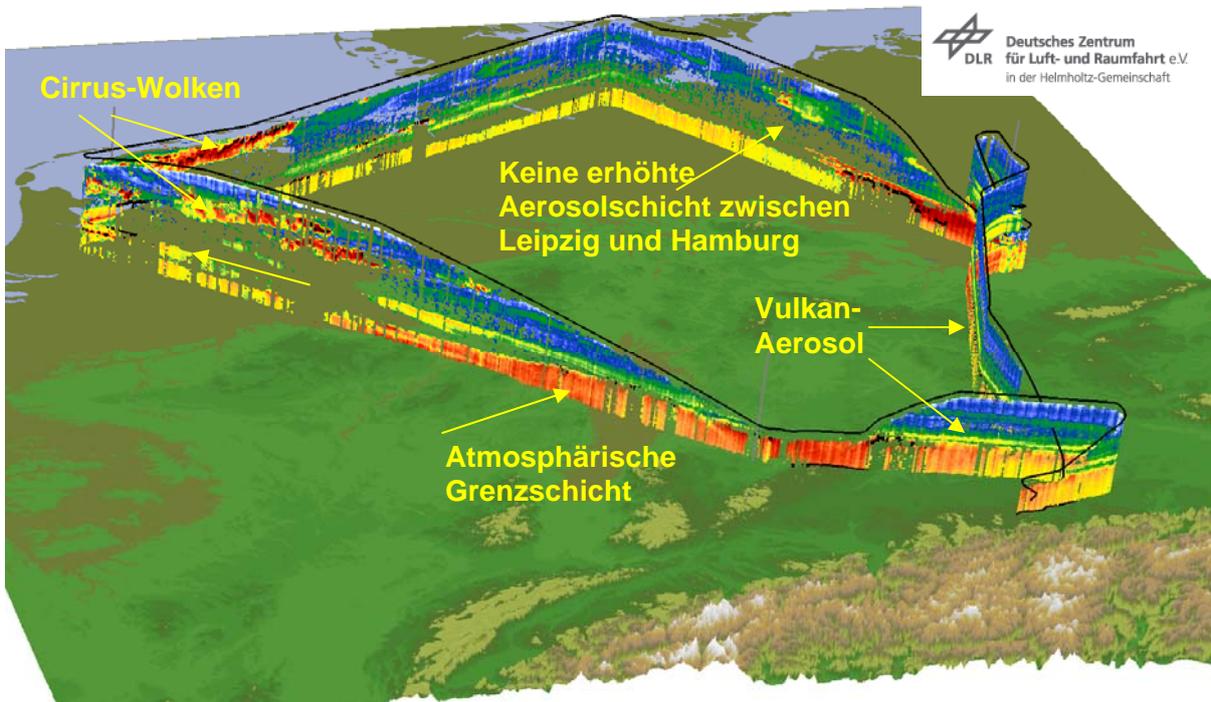


Abbildung 7: Gleiches Bild wie Abbildung 6 aus anderer Blickrichtung: Lidar-Messung der Signal-Stärke entlang des Flugweges der Falcon am 19. April 2010; die schwarze Linie zeigt den Flugweg und die Flughöhe an; rote-schwarze Farben zeigen hohe Signale von Wolken (niedrige Wolken in 2-3 km und hohe Cirrus-Wolken) und Aerosol in der bodennahen atmosphärischen Grenzschicht; Vulkan-Aerosol-Schichten sind im südlichen Bereich von München bis Leipzig zu erkennen, wohingegen zwischen Leipzig und Hamburg keine Schichten oberhalb von 3 km zu erkennen sind.

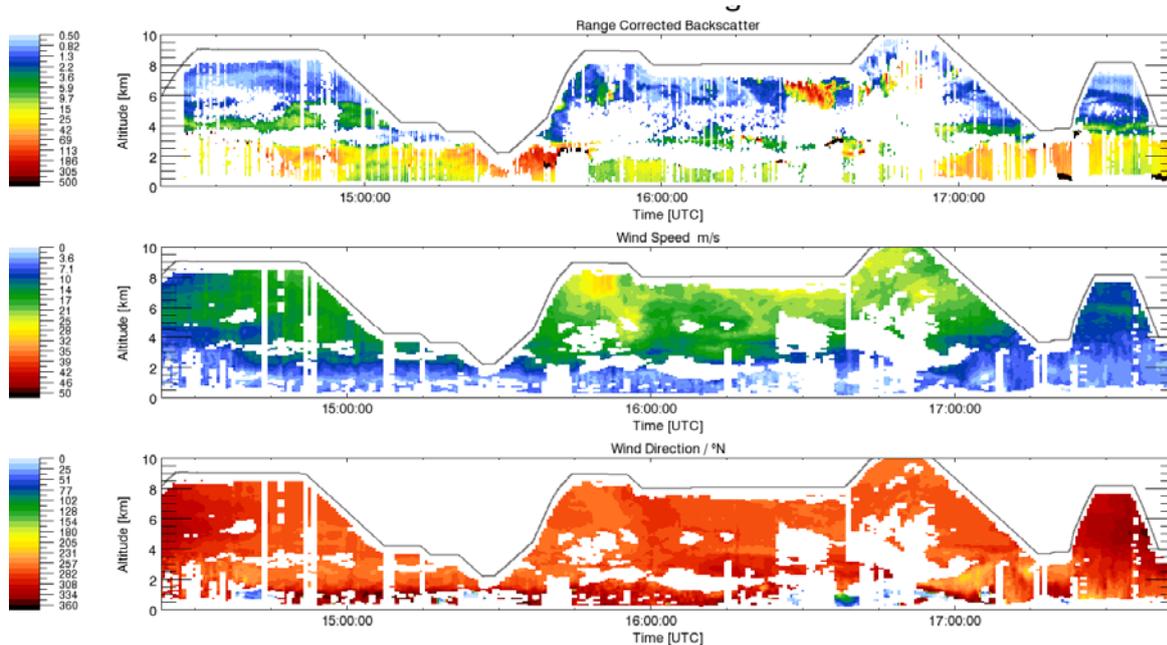


Abbildung 8: Lidar-Messung der entfernungskorrigierten Signal-Stärke (oben), der Windgeschwindigkeit (Mitte) und der Windrichtung (unten) entlang des Flugweges der Falcon am 19. April 2010; die schwarze Linie zeigt den Flugweg und die Flughöhe an.

Erste Ergebnisse der in-situ Messungen

Die Abbildungen 9-12 zeigen Zeitreihen der in-situ Messungen, die während des Messfluges am 19. April aufgezeichnet wurden: die schwarze Linie in Abbildung 9 repräsentiert die Anzahlkonzentration der Partikel im Größenbereich zwischen 10 nm und 2.5 μm , die rote Linie zeigt die Anzahlkonzentration der nicht-flüchtigen Partikel (Wüstenstaub/Asche, Ruß oder Seesalz) im Größenbereich zwischen 10 nm und 2.5 μm . Die Flughöhe ist in grün dargestellt. Abbildung 10 zeigt Volumenmischungsverhältnisse von Kohlenstoffmonoxid (CO) und Ozon (O_3). Abbildung 11 zeigt die Anzahlkonzentration der Partikel mit Durchmessern von 3 bis 20 Mikrometer („Supermikrometer-Partikel“). Wie die Lidarabbildungen zeigen, war Deutschland und die Niederlande teils von einer Vulkanascheschicht unterschiedlicher Dicke bedeckt. Die Aschewolke wurde nicht nur mit dem Lidar vermessen, sondern an einigen ausgewählten Orten (München/Maisach, Leipzig und Stuttgart) in-situ vermessen. Dazu ist die Falcon in die Aschewolke hineingeflogen (Vertikalprofil) und hat Luftproben analysiert. Zwischen 15:00 und 15:15 Uhr UTC wurde die Aschewolke über Leipzig in einer Höhe zwischen 3.8 und 5.8 km gesehen und vermessen. Gegen 17:20 Uhr UTC wurde sie über Stuttgart in einer Höhe von 3.8 km vermessen und gegen 17:40 Uhr UTC wurde die Vulkanaschewolke in einer Höhe von 3.9 km über München/Maisach vermessen. Zeitgleich zu den in-situ Messungen fanden auch Messungen mit den Bodenlidars des Institutes für Troposphärenforschung in Leipzig, der Universität Hohenheim und des Meteorologischen Institutes der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München statt.

In der Aschewolke war die Gesamtaerosolkonzentration erhöht. Darüber hinaus war die Anzahlkonzentration der Supermikrometer-Partikel im Vergleich zur unverschmutzten Atmosphäre stark erhöht. Die CO- und O₃-Konzentration war in der abgehobenen Aschewolke nicht signifikant erhöht. Die atmosphärische Grenzschicht erstreckte sich bis zu einer Höhe von 3 km mit hoher Luftverschmutzung (u. a. große Gesamtanzahlkonzentration der „Feinmode-Partikel“, d.h. der gemessenen Partikel von 10 Nanometer bis 2.5 Mikrometer, von mehr als 15.000 Partikel pro Kubikzentimeter; Kohlenstoffmonoxid (CO)-Erhöhung auf bis zu 200 Nanomol pro Mol). Auch in der Grenzschicht war die Konzentration der Supermikrometer-Partikel erhöht. Wegen der hohen CO-Werte in der Grenzschicht ist es wahrscheinlich, dass diese Luftverschmutzung vor allem auf anthropogene Quellen zurückzuführen ist. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, bzw. es ist sogar wahrscheinlich, dass auch in der Grenzschicht Vulkanaerosol vorhanden war.

Die Ascheschicht über Leipzig ist in den Profilmessungen über Leipzig gut erkennbar (Abbildung 12, links). Auch in den Profilmessungen über München/Maisach, dem Messstandort des Lidarsystems der LMU, ist die Ascheschicht sehr gut erkennbar (Abbildung 12, rechts). Über Leipzig war die Ascheschicht deutlich dicker (ca. 2 km) als über München, wo sie eine Dicke von etwa 500 m hatte.

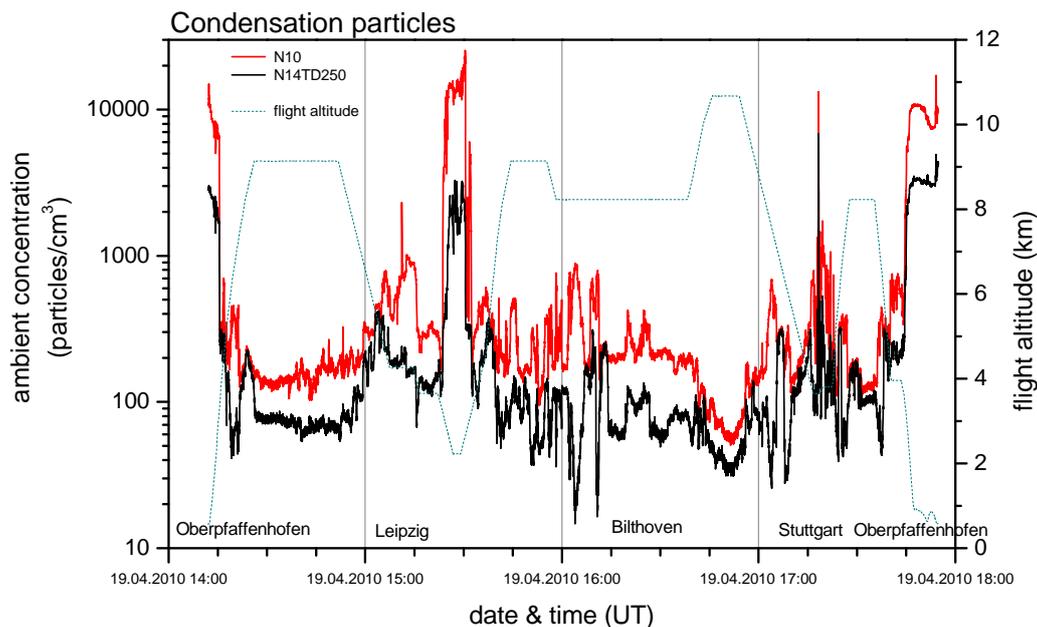


Abbildung 9: Zeitreihen der Gesamtanzahlkonzentration der Feinmode-Partikelkonzentration (Größenbereich 10 nm- 2.5 µm; N10) und der Gesamtanzahlkonzentration der nicht-flüchtigen Partikel in der Feinmode (Größenbereich 10 nm- 2.5 µm; N14TD250) gemessen während des Falcon-Fluges am 19. April 2010.

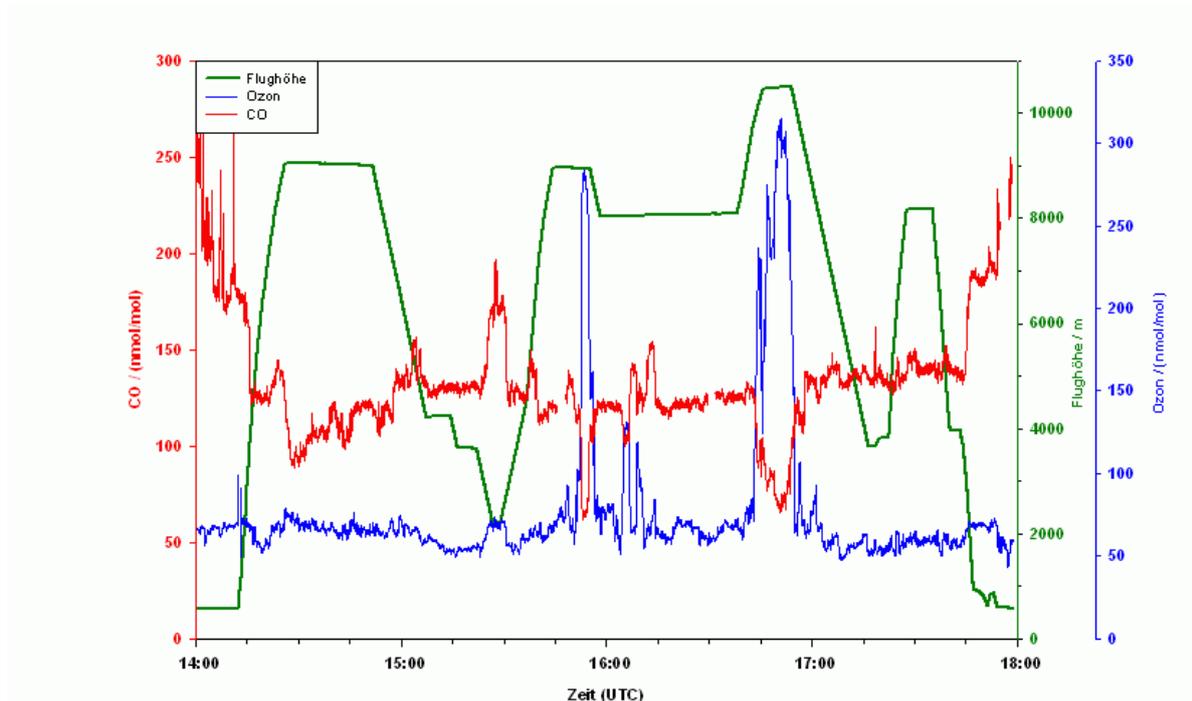


Abbildung 10: Zeitreihen der Volumenmischungsverhältnisse von Kohlenstoffmonoxid (CO) und Ozon (O_3) gemessen während des Falcon-Fluges am 19. April 2010.

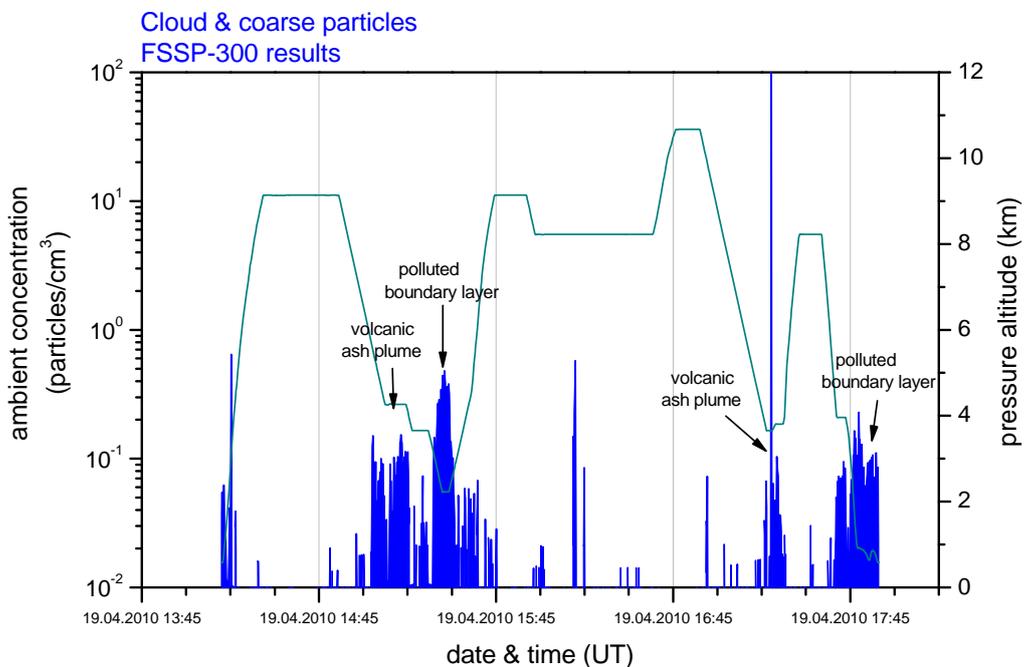


Abbildung 11: Zeitreihen der Supermikrometer-Partekelanzahlkonzentration (FSSP-300, Kanäle 18-31).

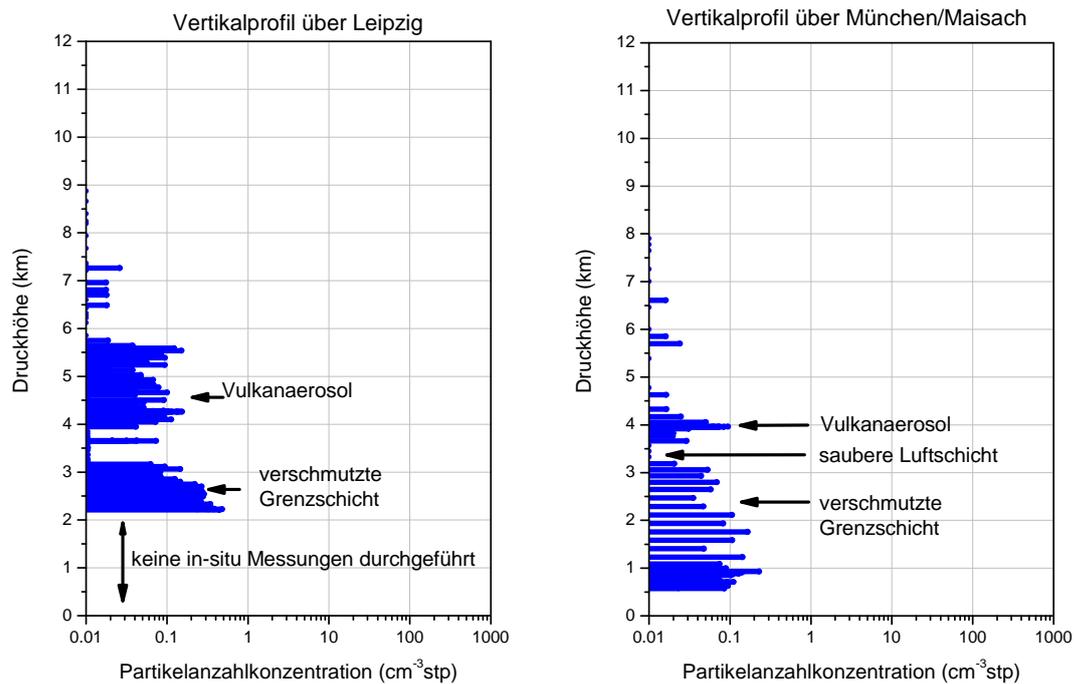


Abbildung 12: Vertikalprofile der Anzahlkonzentration der Supermikrometer-Partikel (3-20 μm) über Leipzig und München am 19. April 2010.

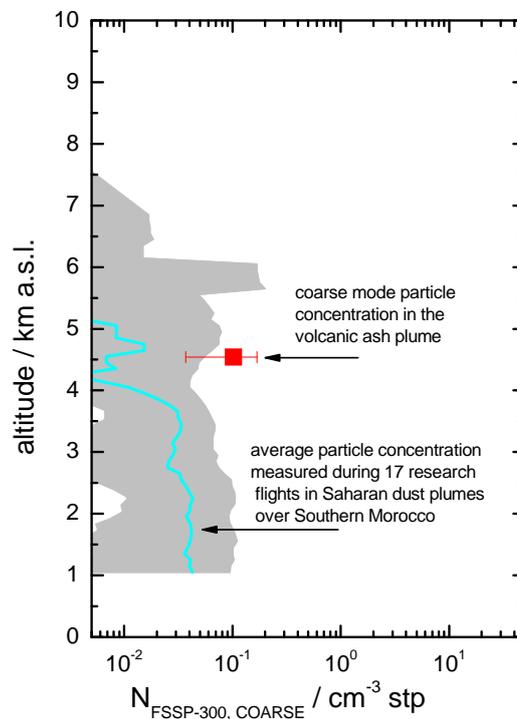


Abbildung 13: Vergleich der Anzahlkonzentration der Supermikrometer-Partikel gemessen in frischen Saharastaubschichten über Marokko (Aerosoloptische Dicke 0.4-0.6) und der Partikelanzahlkonzentration der Supermikrometer-Partikel im Vulkanaerosol über Leipzig. Die blaue Linie zeigt den Median der Partikelanzahlkonzentration gemittelt über 17 Messflüge in frischen Saharastaubschichten, der grau-schattierte Bereich repräsentiert die 10- und 90-% Perzentilwerte. Alle Angaben in dieser Grafik sind für STP Bedingungen (273.15 K, 1013.25 hPa) berechnet.

Abbildung 13 zeigt einen Vergleich der Anzahlkonzentration der Supermikrometer-Partikel gemessen in frischen Saharastaubschichten über Marokko (Aerosoloptische Dicke 0.4-0.6) und der Partikelanzahlkonzentration der Supermikrometer-Partikel im Vulkanaerosol über Leipzig. Die Supermikrometer-Partikelanzahlkonzentration, die am 19. April in dem 4-5 Tage alten Vulkanaerosol über Leipzig gemessen wurde entspricht etwa dem, was wir in frischen Saharastaubschichten gemessen haben.

Die Anzahl-Größenverteilung der Aerosolpartikel in der Vulkanascheschicht ist in Abbildung 14 gezeigt und überdeckt den Partikeldurchmesserbereich von 0.15 bis 20 μm . Diese Größenverteilung ist aus den Messdaten von drei Laser-Aerosolspektrometern bzw. optischen Partikelzählern zusammengesetzt, einer PCASP-100X und einer FSSP-300, die beide unter den Tragflächen montiert sind, sowie eines Grimm-OPC 1.129 als Teil der Messinstrumente in der Kabine. Die PCASP und OPC-Messdaten stimmen im überlappenden Größenbereich gut überein. Im Messbereich der FSSP-300 könnten die relativ hohen Werte bei 3-4 μm durch zu hohe Zählraten aufgrund von elektronischem Rauschen verursacht sein.

Die Umrechnung der physikalischen Rohmessdaten optischer Partikelzähler in eine Größeninformation erfordert die Kenntnis der optischen Eigenschaften der Aerosolpartikel, des Brechungsindex. Dieser Brechungsindex ist von der chemischen Zusammensetzung und dem internen Aufbau des Partikels abhängig und für die hier untersuchte Partikelschicht nicht bekannt. Grundsätzlich ist folgende Abhängigkeit zu erwarten: Enthält das untersuchte Aerosol Licht-absorbierendes Material, muss bei gleichem Rohsignal dem Partikel ein größerer Durchmesser zugeordnet werden. Dies ist wichtig insbesondere bei großen Partikel (mehrere μm Durchmesser), weil diese das Gesamtvolumen und damit die Masse der Aerosolpopulation kontrollieren. Für diese vorläufige Analyse wurde eine in der Literatur veröffentlichte Angabe eines Brechungsindex von Vulkanaschestaub verwendet. Es ist derzeit jedoch nicht bekannt, ob in der hier untersuchten Schicht die gleiche Art von Partikeln auftritt. Daher können systematische Fehler bei der Auswertung der Größenverteilungsmessungen nicht ausgeschlossen werden und die Ergebnisse sollten mit Vorsicht verwendet werden.

Mit diesen Einschränkungen kann aus der Anzahl-Größenverteilung die Gesamt-Volumenkonzentration der untersuchten Vulkanaschepartikel berechnet werden und daraus unter Annahme der Dichte der Aerosolpartikel auch die Massenkonzentration.

Unter der Annahme einer Partikeldichte von 2 g/cm^3 ergibt unsere Schätzung für die Partikelmassenkonzentration in der Vulkanascheschicht über Leipzig einen Wert von rund 60 $\mu\text{g/m}^3$. Der mögliche Fehler dieses Werts ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwer abzuschätzen, aber mit einem Faktor 2 Unsicherheit sollte mindestens gerechnet werden. Es ist gut möglich, dass in anderen Teilen des deutschen Luftraums und an den Vortagen die Vulkanascheschicht höhere Konzentrationen aufwies. Insbesondere kann die Konzentration in der Grenzschicht höher gewesen sein. In frischen Emissionen des Vulkans treten zudem deutlich höhere Konzentrationen auf.

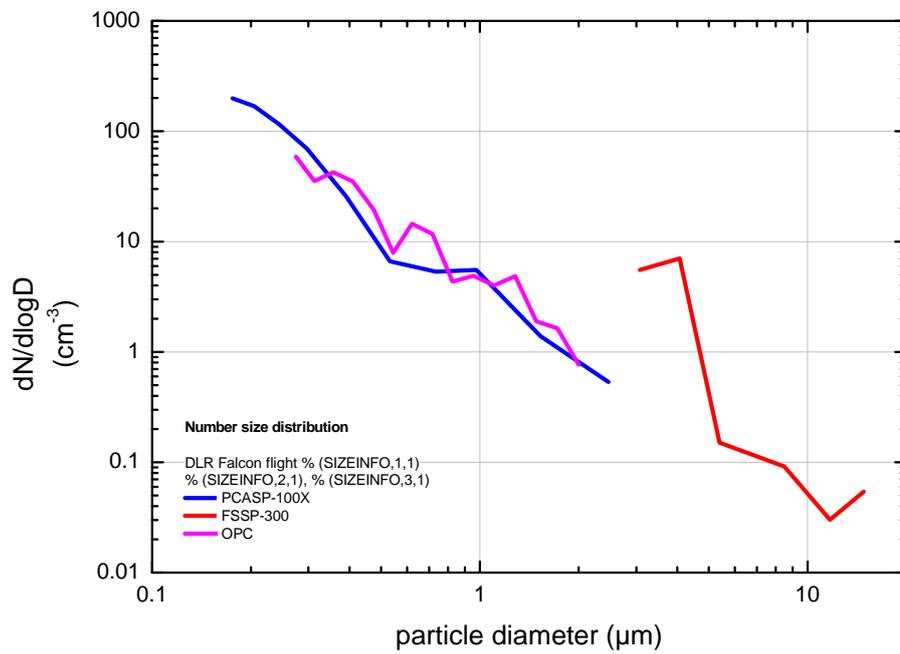


Abbildung 14: Vorläufige Aerosol-Anzahlgrößenverteilung (number size distribution) in der Vulkanascheschicht über Leipzig in 4.3 km Höhe (Druckhöhe), Partikeldurchmesser = particle diameter.