

Der nachfolgende Bericht erscheint auch in den **Mitteilungen der DMG**.

Fortbildungsveranstaltung des Zweigvereins Leipzig am Leibniz-Institut für
Troposphärenforschung in Leipzig

Aktuelle Aspekte der Wolkenforschung

Organisation Dr. Birgit Wehner

Am 3.11.2009 führte der Zweigverein Leipzig eine Fortbildungsveranstaltung zum Thema ‚Aktuelle Aspekte der Wolkenforschung‘ am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (IfT) durch. Die Bandbreite der vier Vorträge reichte dabei vom Klimamodell über Satelliten und Fernerkundung sowie Laborexperimente bis hin zu in-situ Messungen in realen Wolken. Im Anschluss an die Vorträge zu den verschiedenen Bereichen gab es eine Führung durch das Wolkenlabor, das seit einigen Jahren am IfT betrieben wird. Abbildung 1 zeigt das Gebäude von außen.



Abbildung 1: Das IfT-Wolkenlabor des IfT in der Außenansicht.

Die Inhalte der einzelnen Vorträge werden hier zusammengefasst wiedergegeben:

1. Wolkenstudien auf globaler Skala: Klimamodelle und Satelliten.

Dr. Johannes Quaas, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Wolken sind aus vier Gründen von hoher Relevanz im globalen Klimasystem. Sie beeinflussen erstens maßgeblich den Energiehaushalt des Systems Erde, indem sie mit Strahlung interagieren – Wolken reflektieren kurzwellige Solarstrahlung, und sie bewirken im langwelligen terrestrischen Spektralbereich der **Strahlung** einen starken Treibhauseffekt. Je nach Typ überwiegen der abkühlende kurzwellige oder der erwärmende langwellige Effekt, ersterer für tiefe, dicke Wolken, und letzterer für hohe, dünne. Da bei der Bildung von Wolken durch Kondensation zweitens die **latente Wärme** freigesetzt wird, die bei der Verdunstung hauptsächlich an den Ozeanoberflächen in feuchter Luft gebunden wird, bewirken Wolken einen Vertikaltransport von Energie. Die latente Wärme koppelt Energie- und Wasserkreislauf. Für diesen sind Wolken insbesondere deswegen von Bedeutung, weil sie drittens die Bildung und Verteilung von **Niederschlag** auf dem Globus bestimmen. Schließlich treiben viertens hochreichende konvektive Wolken die **atmosphärische Zirkulation** an und transportieren Wasserdampf und Luftmassen vertikal. Für Klima- und Wettervorhersagemodelle stellt diese Relevanz von Wolken ein großes Problem dar, da sich Wolkenprozesse auf viel kleineren Skalen abspielen als durch die übliche Maschenweite der numerischen Modelle aufgelöst. Die Prozesse müssen statistisch abgebildet oder “parametrisiert” werden. Die Ungenauigkeit dieser Parametrisierungen ist eine Hauptursache für die Schwierigkeiten in Wetter- und Klimaprognosen.

Der Einfluss von Wolken auf die Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre bildet die Grundlage für Satellitenfernerkundung von Wolkeneigenschaften. Mittels spektral aufgelöster Messungen von reflektierter Solarstrahlung oder emittierter Wärmestrahlung kann auf Wolkenverteilungen, -höhen, -wassergehalt und mikrophysikalische Eigenschaften geschlossen werden. Diese Satellitenmessungen, die in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte gemacht haben, was räumliche und spektrale Auflösung, und was Algorithmen betrifft, liefern Datensätze, die besonders nützlich zur Evaluierung von Klimamodellen sind. So kann mit den neuen Satellitendaten eine prozessorientierte Analyse der Darstellung von Wolkenprozessen in den Klimamodellen durchgeführt werden. Eine wichtige Parametrisierung bildet beispielsweise die Bestimmung der Phase des kondensierten Wassers – flüssig oder eisförmig – anhand der Temperatur. Für die Wolkenobergrenzentemperatur und -phase ließ sich aus Daten des französischen POLDER¹-Instruments eine statistische Beziehung herleiten². Für das Klimamodell wurde ein sogenannter “Satelliten-Simulator” entwickelt, der quasi den Flug des Satelliten im Modell nachbildet, und Wolkeneigenschaften entlang der Umlaufbahn an der Wolkenobergrenze diagnostiziert. Mit Hilfe von Sensitivitätsstudien konnten die Parameter im Modell so angepasst werden, dass die beobachtete Relation von Wolkenobergrenzentemperatur und -phase reproduziert werden konnten. Diese Simulation wurde mit Hilfe von unabhängigen Satellitendaten getestet, wobei die neue Parameterwahl ein besseres Ergebnis erzielte. In einer zweiten Studie wurde der Einfluss von Aerosolen, die als Kondensationskeime dienen, auf Wolken untersucht. Bei höherer Aerosolkonzentration erhöht sich die Wolkentröpfchenkonzentration, so dass die einzelnen Tröpfchen kleiner werden. Die negative Relation zwischen Wolkentröpfchenradius und Aerosolkonzentration wurde aus Satellitendaten statistisch berechnet. Wieder konnten im Modell die Parameter angepasst werden, so dass die beobachtete Relation reproduziert wurde³. Diese Studie

1 POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances, <http://smc.cnes.fr/POLDER/>.

2 Doutriaux-Boucher, M., und J. Quaas, Evaluation of cloud thermodynamic phase parameterizations in the LMDZ GCM by using POLDER satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06126, doi:10.1029/2003GL019095, 2004.

3 Quaas, J., und O. Boucher, Constraining the first aerosol indirect radiative forcing in the LMDZ GCM using

war besonders relevant für Berechnungen zum Klimawandel, da der Effekt von anthropogenem Aerosol auf Wolken einen wichtigen negativen Strahlungsantrieb des Klimawandels darstellt. Mit der neuen Parameterwahl wurde ein geringerer Wert für diesen Strahlungsantrieb berechnet. Wie diese beiden Beispiele zeigen, liefern Satellitendaten, neben wichtigen boden- und flugzeuggestützten Messungen, eine wichtige Grundlage, um Wetter- und Klimamodelle zu verbessern.

2. Wolken und atmosphärische Strahlung

Prof. Manfred Wendisch, Leipziger Institut für Meteorologie (LIM), Universität Leipzig

Wolken sind wichtige Regulatoren im Strahlungsenergiehaushalt der Atmosphäre. Im solaren Spektralbereich (Wellenlängen zwischen ungefähr 0.3-5 μm) reflektieren Wolken einen im globalen und jährlichen Mittel ungefähr 20% der an der Obergrenze der Atmosphäre von der Sonne ankommenden Strahlungsenergie zurück ins Weltall. Dieser Anteil der einfallenden Sonnenstrahlungsenergie ist somit für Energieumsetzungen innerhalb der Atmosphäre und am Erdboden nicht mehr verfügbar. Die Absorption von solarer Strahlung durch Wolken und eine entsprechende Erwärmung sind eher gering. Deshalb wirken Wolken im solaren Spektralbereich im Allgemeinen abkühlend auf die Schicht unterhalb der Wolken (Atmosphäre plus Erdoberfläche). Im terrestrischen Spektralbereich (hier definiert als 5-50 μm) absorbieren und emittieren Wolken ebenfalls einen signifikanten Anteil der Strahlungsenergie. Die von der Erde emittierte terrestrische Strahlung wird von Wolken absorbiert und entsprechend den Kirchhoff'schen und Stefan-Boltzmann Gesetzen (proportional zur vierten Potenz der Wolkentemperatur) wieder in Richtung Erde (sogenannte Gegenstrahlung) und Weltall zurück emittiert. Diese Emission erfolgt allerdings bei der meist niedrigeren Wolkentemperatur verglichen mit der Erdbodentemperatur. Durch diese Differenz in der emittierten Strahlung von Erdboden und Wolke erwärmt sich die Schicht unterhalb der Wolke und somit wirken Wolken im terrestrischen Spektralbereich erwärmend und damit physikalisch ähnlich wie die Treibhausgase.

Die Netto-Wirkung (solar plus terrestrisch) von Wolken (Abkühlung oder Erwärmung) hängt von ihrer Höhe (Temperatur) über Grund und ihrer optischen Dicke ab. Bei niedrigen (< 2 km Höhe, warm) und optisch dicken Wolken überwiegt der abkühlende Effekt durch die Reflexion von solarer Strahlung den erwärmenden Effekt durch die Absorption und Emission von terrestrischer Strahlung. Bei hohen (8-12 km Höhe, kalt) und optisch dünnen Wolken ist die Erwärmung der Schicht unterhalb der Wolke im terrestrischen Spektralbereich größer als die Abkühlung durch die Reflexion von solarer Strahlung. Die thermische Gesamtwirkung von Wolken gemittelt über den Globus und über das Jahr zeigt, dass die solare Abkühlung durch niedrige, optisch dicke Wolken eher stärker ist als die Erwärmung durch optisch dünne und hohe Wolken (Zirren) im terrestrischen Spektralbereich.

All diese Effekte von Wolken hängen von mikrophysikalischen (insbesondere der effektiven Wolkenpartikelgröße), optischen und geometrischen Wolkeneigenschaften sowie von ihrer globalen und Jahresverteilung ab. Im ersten Teil des Vortrages wurde auf die prinzipielle Wirkung einer erhöhten Anzahlkonzentration von Aerosolpartikeln auf die Strahlungseigenschaften, die zeitliche Entwicklung und die Niederschlagsbildung von Wolken eingegangen während im zweiten Teil Fernerkundungsmethoden und die damit verbundene Probleme beschrieben werden.

Aerosolpartikel und tiefe Wolken

Prinzipiell sind Aerosolpartikel, die als feste oder fest-flüssige Materie als Suspension in der Atmosphäre (Trägergas) vorhanden sind, unabdingbar für die Bildung von Wolken unter atmosphärischen Bedingungen. Eine homogene Tropfenbildung (ohne das Vorhandensein einer zweiten Phase) wäre nur bei unrealistisch hohen Übersättigungen (mehrere hundert Prozent) des gasförmigen Wasserdampfes im Vergleich zur flüssigen Phase von Wasser möglich. Aerosolpartikel setzen den zur Phasenumwandlung (flüssige Tropfenbildung) notwendigen Sättigungsdampfdruck stark herab und wirken somit als Kondensationskerne für die Wolkenbildung. Wenn nun eine erhöhte Anzahlkonzentration von Aerosolpartikeln durch z.B. anthropogene Aktivitäten in der Atmosphäre existiert (verschmutzte atmosphärische Verhältnisse), dann verteilt sich der kondensierbare Wasserdampf auf mehr Kondensationskerne und die entstehenden Tropfen sind im Mittel kleiner, verglichen zu dem Fall wenn weniger Aerosolpartikel als Kondensationskerne zur Verfügung stehen (z.B. unter maritimen, sauberen Bedingungen). Wenn die Wolke nun aus zahlenmäßig mehr, dafür aber kleineren Tropfen besteht, dann erhöht sich das Reflexionsvermögen (Albedo) der solaren Strahlung am Oberrand der Wolke, d.h. die kühlende Wirkung der Wolken verstärkt sich, verglichen zur Wolke, die sich unter sauberen Umgebungsbedingungen (weniger Aerosolpartikel, d.h. weniger verfügbare Kondensationskerne, weniger aber größere Tropfen) bildet. Dies gilt natürlich nur für den Fall, dass die verschmutzte und die saubere Wolke insgesamt den gleichen Wasserdampf kondensiert haben. Diese Wirkungskette ist als Twomey-Effekt bekannt (auch Wolkenalbedo-, oder erster indirekter Effekt). Der Twomey-Effekt wurde mehrfach in Flugzeug-Feldexperimenten verifiziert. Problematisch bleibt dabei, dass die Messungen mit Flugzeugen als Geräteträger idealerweise gleichzeitig innerhalb (zur Bestätigung der kleinen Tropfen) und über der Wolke (für die Verifikation der erhöhten Wolkenalbedo) realisiert werden müssen, was sich praktisch auch bei gleichzeitigem Einsatz mehrerer Flugzeuge als schwierig herausstellt.

Kombiniert mit dem Twomey-Effekt werden noch Auswirkungen der erhöhten Aerosolpartikel-Anzahlkonzentration auf die vertikale Wolkendicke, ihre Lebenszeit und die Niederschlagsbildung diskutiert (Albrecht-Effekt, auch Wolkenlebenszeit Effekt oder zweiter indirekter Effekt genannt). Durch das behinderte Tropfenwachstum (bedingt durch das limitierte Wasserdampfangebot) mit dem Ergebnis von im Mittel kleineren Tropfen treten Tropfen-Koagulationsprozesse (Koagulation = Kollision von Tropfen plus Koaleszenz [Zusammenfließen]) später auf wodurch die Niederschlagsbildung verzögert wird. Dadurch kann die Wolke vertikal höher Wachsen und die Lebenszeit der Wolke verlängert sich, eben durch die behinderte Niederschlagsbildung.

Ein dritter Aspekt entsteht dadurch, dass die zusätzlichen, zumeist anthropogen bedingten Aerosolpartikel oftmals stark absorbierend wirken. Dadurch können lokale Erwärmungen (durch verstärkte Absorption von solarer Strahlung) entstehen, die zu Tropfen-Verdunstung und damit zur vorzeitigen Wolkenauflösung führen können (sogenannter semi-direkter Effekt). Gleichzeitig reduzieren stark absorbierende Partikel die Wolkenalbedo, und zwar am wirkungsvollsten wenn diese Partikel als Kondensationskerne in den Wolkentropfen existieren und nicht als interstitielle Partikel im den Tropfenzwischenräumen. Allerdings sind die für eine merkliche Wirkung dieses Effektes notwendigen Massenkonzentrationen an absorbierenden Partikeln (z.B. Ruß) unrealistisch hoch.

Hier nur am Rande erwähnt sei, dass durch den zunehmenden Flugverkehr ähnliche Effekte auch auf hohe Eiswolken und die Bildung von Kondensstreifen diskutiert werden.

Fernerkundung

Bei der notwendigen globalen und langzeitlichen Fernerkundung von Wolkeneigenschaften sind Messungen mit Satelliten-basierten Geräten notwendig. Im Vortrag wurde ein gängiges Verfahren (sowie damit verbundene Probleme) vorgestellt und diskutiert. Es handelt sich dabei um die gleichzeitige Ableitung von effektiver Größe der Wolkenpartikel (flüssige Wassertropfen, oder feste Eiskristalle) sowie optischer Wolkendicke aus bi-spektralen Wolken-Reflektivitätsmessungen. Die beiden verwendeten Wellenlängen befinden sich jeweils in einem Spektralkanal, in welchem solare Strahlung durch die Wolkenpartikel hauptsächlich gestreut wird (z.B. $0.67 \mu\text{m}$, sichtbar), sowie einem zweiten Kanal mit starker Absorption der solaren Strahlung durch die Wolkenpartikel (z.B. $1.6 \mu\text{m}$, nahes Infrarot). Aus entsprechenden Strahlungsübertragungsrechnungen werden bi-spektrale Wolkenreflektivitäten für variierende Wertepaare der effektiven Wolkenpartikelgröße und der wolkenoptischen Dicke berechnet und in sogenannte Look-Up-Tables (LUTs, Wertetabellen) abgespeichert. Aus gemessenen Paaren der Wolkenreflektivitäten werden dann aus den LUTs die dazu gehörenden Wolkenparameter (effektive Wolkenpartikelgröße, optische Dicke) herausgesucht. Dieses weitverbreitete Fernerkundungsverfahren beruht auf Strahlungsübertragungsrechnungen, wobei zwei Annahmen prinzipielle Probleme bereiten. Zum einen muss die Kenntnis der Form der Wolkenpartikel vorausgesetzt werden. Für warme Wasserwolken kann problemlos die Kugelform in den Berechnungen angenommen werden. In Eiswolken treten verschieden Kristallformen auf, die wesentlich von der Kugel abweichen. Berechnungen zeigen, dass die Unsicherheiten, die bei der Fernerkundung von effektive Wolkenpartikelgröße und optische Dicke durch die Unkenntnis der Partikelform in Eiswolken entstehen, nicht vernachlässigt werden können. Die Formeffekte können bis zu 50% Unsicherheiten in den abgeleiteten Werten für effektive Wolkenpartikelgröße und optische Dicke verursachen. Weitere Unsicherheiten werden dadurch erzeugt, dass in den Strahlungsübertragungsrechnungen horizontal homogenen Wolken angenommen werden. Da Wolken im allgemeinen inhomogen sind, werden dadurch Fehler bei der Fernerkundung von effektive Wolkenpartikelgröße und optische Dicke von ebenfalls bis zu 50% verursacht. Abschließend wurde in dem Vortrag ein neues Verfahren zur Ableitung des Eisgehaltes in Mischphasenwolken vorgestellt, welches in dieser Zusammenfassung nicht diskutiert wird.

3. Die Wolke im Labor: Hygroskopisches Wachstum, Aktivierung und Gefrieren

Dr. Frank Stratmann, Institut für Troposphärenforschung (IfT), Leipzig

Atmosphärische Wolken sind sehr komplexe Gebilde und treten sporadisch und an in der Regel schwer zugänglichen Orten auf. Daher ist es prinzipiell sehr schwierig atmosphärische Wolken, d.h. ihre Bildung und die in ihnen ablaufenden Prozesse (z.B. die Niederschlagsbildung), vor Ort zu studieren, was dazu führt, dass viele Wolkenprozesse heute noch nicht vollständig verstanden bzw. noch nicht mit ausreichender Genauigkeit vorhersagbar sind. Um den menschlichen Einfluss auf Wolken zu studieren und besser zu verstehen, müssen deshalb weiterhin und verstärkt Wolken bzw. Wolkenprozesse in geeigneten Feld- und Laborexperimenten untersucht werden. Da atmosphärische Wolken in der Regel schwer zugänglich und in vielerlei Hinsicht Unikate sind, kommt Laboruntersuchungen unter wohl definierten und wiederholbaren Bedingungen in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu. Sie erfolgen unter anderem unter Verwendung so genannter Wolkenkammern, d.h. tank- oder rohrförmiger Behälter verschiedener Größen, in denen Wolkenprozesse gezielt nachgebildet und vermessen werden können.

Hochaktuelle Forschungsthemen der Wolkenforschung in Feld und Labor sind z.B. die Untersuchung der Bildung von Wolkentropfen aus natürlichem und anthropogenem Feinstaub und

das Gefrieren von Wolkentropfen. Das Verständnis der Wolkenbildung ist existentiell zur Vorhersage des menschlichen Einflusses auf die Anzahl und Größe von Wolkentropfen und damit auf das zukünftige Klima bzw. die zu erwartenden Klimaveränderungen. Der Prozess des Gefrierens von Wolkentropfen ist speziell in unseren geographischen Breiten ein Schlüsselprozess bei der Niederschlagsbildung. Somit ist das Verständnis von Tropfengefrierprozessen unabdingbar zur Vorhersage der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Niederschlägen und der zu erwartenden Niederschlagsintensitäten.

Anhand von Beispielen und aktuellen Forschungsergebnissen wurden im Rahmen des Vortrages:

- die physikalischen Mechanismen und Hintergründe des hygrokopischen Wachstums, der Bildung von Wolkentropfen (Aktivierung) und des Tropfengefrierens erläutert
- zwei Verfahren (Hyroskopizität-Tandem-DMA, H-TDMA; „Leipziger Aerosol Cloud Interaction Simulator“, LACIS) zur experimentellen Untersuchung des hygrokopischen Wachstums und der Aktivierung von Wolkentropfen diskutiert
- zwei Versuchsaufbauten (AIDA, LACIS) zur Simulation und Untersuchung des Gefrierens von Wolkentropfen im Labor vorgestellt.

Im Anschluss an den Vortrag erfolgte eine Führung durch das Wolkenlabor des IfT. Der besondere Schwerpunkt lag hierbei auf der Vorstellung des aktuellen Versuchsaufbaus und der Diskussion der vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Forschungsschwerpunkten am „Leipziger Aerosol Cloud Interaction Simulator“, LACIS.

4. Die Bedeutung kleinskaliger Turbulenz für die Wolkenentwicklung

Dr. Holger Siebert, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (IfT), Leipzig

Turbulenz spielt bei nahezu allen Prozessen die bei der Wolkenbildung und -entwicklung beitragen eine bedeutende Rolle. Dies beginnt bei großräumiger Konvektion auf räumlichen Skalen von etwa 100 bis 1000 m, geht über Mischungsprozesse an z. B. Wolkenrändern (Entrainment) bis hin in den Millimeterbereich wo turbulente Energie in Wärme dissipiert. Die Bandbreite der beteiligten Skalen beträgt damit bis zu sechs Größenordnungen und eine realistische Beschreibung aller beteiligten dynamischen Prozesse im Labor oder aber auch in numerischen Modellen ist damit extrem schwierig bis unmöglich!

Bis vor kurzem beschränkten sich direkte Untersuchungen in Wolken auf flugzeuggestützte Messungen deren räumliche Auflösung für Turbulenzmessungen auf den Meterbereich beschränkt blieben. Mit Hilfe der hubschraubergetragenen Messplattform ACTOS (Airborne Cloud Turbulence Observation System, siehe Bild) sind nun seit einigen Jahren räumlich hochaufgelöste Turbulenzmessungen in Wolken möglich.

Ergebnisse von Untersuchungen in einem Stratocumulusfeld über der Ostsee liefern dabei erste Einblicke in die Welt der kleinskaligen Wolkendynamik im cm-Bereich. Selbst in einem als eher gering turbulent angenommenen Wolkentypus zeichnet sich z.B. die Turbulenz durch hohe Fluktuationen auf engem Raum und Intermittenz, d.h. das sporadische Auftreten von räumlich und zeitlich begrenzten „Extremereignissen“ aus - eine Eigenschaft die für Koaleszenzprozesse von Wolkentropfen von großer Bedeutung ist und in numerischen Modellen bisher kaum Berücksichtigung findet.

Als zweites Messbeispiel wurden Messungen an der Oberkante des Wolkenfeldes gezeigt bei der kleinskalige, scherungsinduzierte Turbulenz zur Ausbildung einer flachen tropfenfreien Schicht führte die den Übergang von der Wolke zur freien Atmosphäre charakterisiert und letztendlich zur Wolkenauflösung geführt hat.

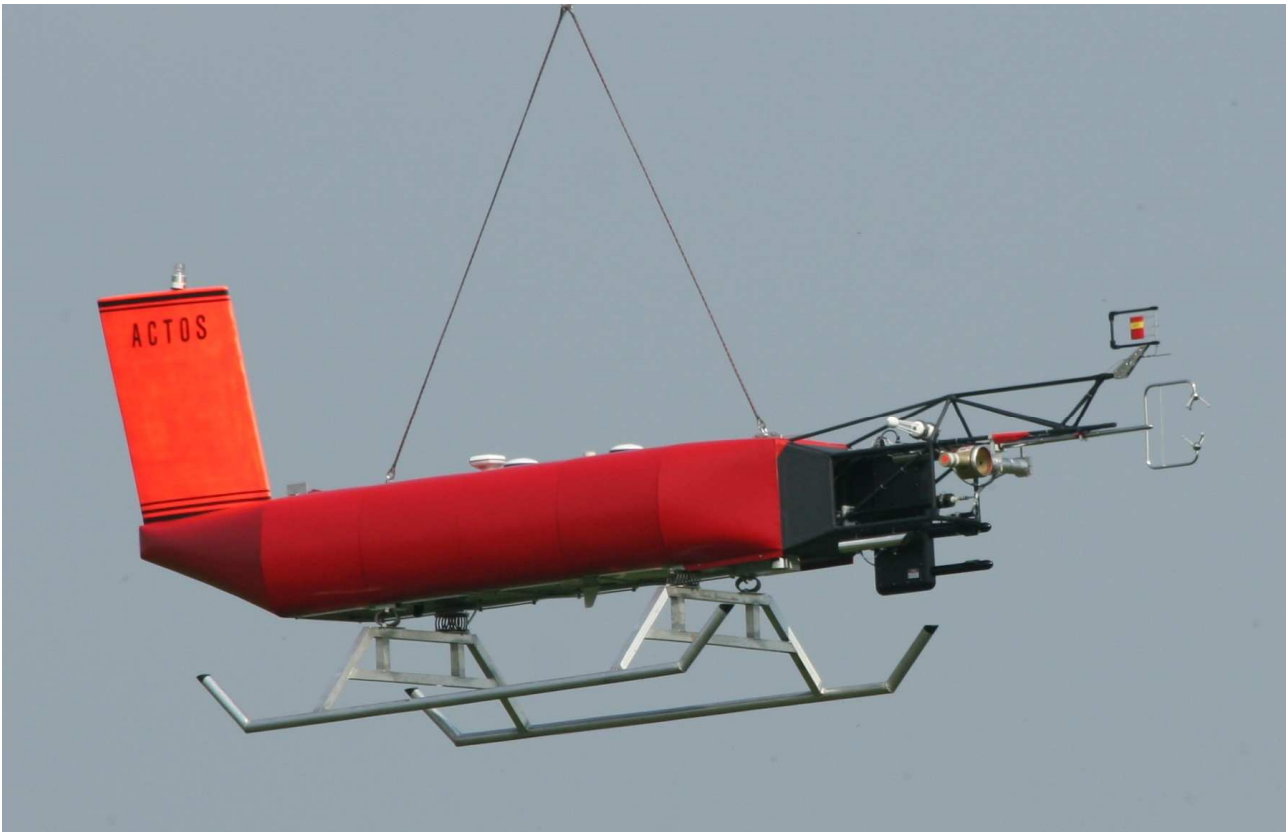


Abbildung 2: Hubschrauberschleppsonde ACTOS während eines Wolkenmessfluges.