

Zusammenfassung

Die Rekonstruktionstheorie der Fernerkundung umfasst die Methodik, mithilfe derer aus indirekten Messungen von entfernter Stelle Informationen über unbekannte Parameter des zu erkundenden Mediums hergeleitet werden. Die Anwendung auf die atmosphärische Infrarotspektrometrie führt zur inversen Lösung der Strahlungsübertragungsgleichung der Atmosphäre. Deren erfolgreiche Inversion hängt ab von (1) einem geeigneten Vorwärtsmodell zur Simulation der atmosphärischen Strahlungsübertragung, (2) einem geeignet definierten Parametervektor, (3) einem optimierten Messvektor, (4) einer angemessen formulierten Zwangsbedingung, und (5) einem stabilen Inversionswerkzeug. Rekonstruktionsschemata für verschiedene Fernerkundungsexperimente werden diskutiert am Beispiel von Spektrometern, die die Emission der Erdatmosphäre in Horizontsondierungsgeometrie messen, und von Emissions- und Absorptionsspektrometern, die unter positiven Elevationswinkeln in beziehungsweise durch die Erdatmosphäre blicken.

Im Bereich der Rekonstruktionstheorie wurden die folgenden Fortschritte erzielt und die folgenden neuen Erkenntnisse erarbeitet:

- Ein Anforderungsprofil für ein optimiertes Strahlungsübertragungsmodell zum Einsatz in Verbindung mit Inversionsprogrammen wurde entwickelt. Dieses Modell vereint Rechengeschwindigkeit und hohe Genauigkeit. Die durch dieses Modell beschriebenen physikalischen Prozesse umfassen alle für die Anwendung atmosphärischer Infrarotspektrometrie wichtigen Phänomene, einschließlich Brechung, Absorption, Emission, Streuung, unter Berücksichtigung von Kopplung von Übergängen und Störung des lokalen thermodynamischen Gleichgewichts.
- Die objektive Auswahl der zur Auswertung zu berücksichtigenden Messpunkte kann zur Reduktion des Rekonstruktionsfehlers und zur Effektivierung des Rekonstruktionsprozesses beitragen. Je mehr Messpunkte berücksichtigt werden, um so mehr Information trägt zur Rekonstruktion der gesuchten Größe bei. Andererseits hängen viele Messwerte von mehr als nur dem einen gesuchten Parameter ab. Unsicherheiten dieser Störparameter können den Rekonstruktionsfehler erhöhen. Der Versuch, diese Störparameter auch aus der Messung zu rekonstruieren, führt oft zu einer unpraktikabel großen Anzahl von Rekonstruktionsparametern. Deshalb wurde eine objektive Methode zur optimierten Auswahl der Messpunkte entwickelt.
- Für Horizontsondierungsmessungen mäßiger spektraler Auflösung wurde gezeigt, dass die direkte Lösung des Inversionsproblems instabil ist, wenn das Höhenprofil der gesuchten atmosphärischen Zustandsgröße mithilfe von Stufenwerten an Stelle von

Schichtmittelwerten diskretisiert wird. Wenn Stufendarstellung bevorzugt wird, ist Regularisierung erforderlich, während die Inversion im Schichtmittelwertmodell in der Regel stabil ist.

- Die Lösbarkeit schlecht gestellter Inversionsprobleme im Rahmen von Rekonstruktionsaufgaben aus der Fernerkundung durch geeignete implizite oder explizite Regularisierungsmaßnahmen wurde demonstriert. Als explizite Regularisierungsmaßnahmen wurden insbesondere glättende Zwangsbedingungen untersucht und für gut befunden. Unter impliziter Regularisierung verstehen wir die Reduktion des Parametervektors durch geschickte Diskretisierung von Höhenprofilen atmosphärischer Parameter.
- Es wurde gezeigt, dass die simultane Auswertung mehrerer Spektren einer Horizontsondierungssequenz der sequentiellen Auswertung keinesfalls immer überlegen ist, wie gemeinhin angenommen wird. Insbesondere im Fall spektral nur mäßig aufgelöster Messungen verschwindet der Vorteil der simultanen Auswertung hinsichtlich der Genauigkeit, und der Rechenzeitvorteil der sequentiellen Auswertung kommt zum Tragen.

Die entwickelte Methodik wurde auf folgende Experimente angewendet:

- Das MIPAS (*Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding*) Ballonexperiment; hierbei handelt es sich um die ersten Horizontsondierungsmessungen mit einem hochauflösenden Emissionsspektrometer im winterlichen Polarwirbel. Hierdurch konnten Vertikalprofile von Spurengasen, die für die Ozonforschung relevant sind, erstmals in der Polarnacht nachgewiesen werden.
- Das MIPAS Flugzeugexperiment; mit dem MIPAS-FT (Flugzeug Transall) Gerät wurden die ersten wissenschaftlich auswertbaren hochaufgelösten spektroskopischen Messungen unter positiven Elevationswinkeln durchgeführt. Dies ermöglichte die Messung von Säulengehalten atmosphärischer Spurengase als Schnitt längs der jeweiligen Flugroute, unabhängig vom Sonnenlicht.
- Das bodengebundene MIPAS Experiment; mit dem MIPAS-LM (Labormodell) Gerät wurden Zeitreihen verschiedener stratosphärischer Spurengase im Polarwinter mittels Absorptionsspektrometrie gemessen. Erstmals wurde die Bedeutung der Variabilität der troposphärischen Anteile zum Gesamtsäulengehalt untersucht.
- Mit hochauflösenden Spektrometern wurden erstmals Zeitreihen stratosphärischer Spurengase auch während der Polarnacht gemessen, indem der Mond als Hintergrundquelle für Absorptionmessungen verwendet wurde.

Die folgenden Erkenntnisse über Prozesse in der Atmosphäre wurden durch Anwendung der Rekonstruktionstheorie auf diese Experimente gewonnen:

- Die herausragende Rolle des "Chlornitrats" als Reservoirgas für reaktive Chlor- und Stickstoffverbindungen in der arktischen winterlichen Stratosphäre wurde erstmals empirisch quantifiziert. Außerdem wurden Erkenntnisse über den zeitlichen Verlauf der wichtigsten Chlorreservoirs während des arktischen Polarwinters gewonnen.

- Das Absinken des arktischen stratosphärischen Polarwirbels wurde bestätigt durch Messungen chemisch langlebiger Substanzen. Dieses Absinken der Luft bewirkt geringe Mischungsverhältnisse organischer Chlorverbindungen auch in der niedrigen Stratosphäre, und damit einen erhöhten Anteil an reaktivem oder in Reservoirgasen gebundenem Chlor.
- Die Lösung von HNO_3 in Partikeln oder Tröpfchen polarer Stratosphärenwolken, sowie Denitrifizierung und Dehydrierung wurden nachgewiesen.
- Es wurde gezeigt, daß die gemessene Konzentration von Distickstoffpentoxid in der nächtlichen Stratosphäre mit dem heutigen Verständnis der chemischen Prozesse in Einklang steht.
- HOCl wurde in der nächtlichen Stratosphäre durch direkte Messung nachgewiesen, und die Konsistenz der Messung zu Modellrechnungen im Rahmen des Messfehlers gezeigt.
- Die Bildung des Chlormonoxid–Dimers in der Nacht wurde indirekt durch Messung niedriger Konzentrationen von molekularem Chlormonoxid bestätigt. Übereinstimmung zu Modellrechnungen wurde im Rahmen der Messgenauigkeit festgestellt.

Nach den wissenschaftlichen Erfolgen der bisherigen infrarotspektroskopischen Fernerkundungsexperimente kommt dieses Messprinzip auch beim MIPAS–ENVISAT Weltraumexperiment der *European Space Agency* (ESA) zur Anwendung. Hierbei handelt es sich um das erste spektral hochauflösende *Michelson* Interferometer, das in Horizontsondierungsgeometrie Infrarot–Emissionsmessungen von einer Weltraumplattform aus durchführen wird. Ein speziell für dieses Experiment entwickeltes Auswertekonzept wird vorgestellt und im Vergleich zu alternativen Auswertestrategien diskutiert. Die Hauptmerkmale unseres Konzeptes sind ein von der Messung unabhängiges Höhengitter zur Darstellung der zu rekonstruierenden Zustandsparameter, der moderate Einsatz von Regularisierung und die optimierte Auswahl der zur Auswertung herangezogenen Messwerte. Diese Strategieüberlegungen mündeten in einem Prozessor zur Datenauswertung, der zahlreiche wissenschaftlich relevante Spezialanwendungen unterstützt, die bei der Rekonstruktion der Vertikalprofile von weit über 30 Spurengasen notwendig sind, insbesondere die Rechnungen außerhalb der Gültigkeitsbereichs des lokalen thermodynamischen Gleichgewichts, die Berücksichtigung von Kopplung von Übergängen, die Simulation des Strahlungsbeitrags von Aerosolen, sowie vielfältige Regularisierungsansätze. In einem Blindtest auf Basis simulierter Messungen hat sich unser Auswerteprozessor bestens bewährt. Aufgrund seiner flexiblen Spezifikation ist er nicht nur auf MIPAS–Daten anwendbar, sondern er unterstützt auch die Auswertung von Daten spektrometrischer Experimente anderer Messgeometrie und spektraler Auflösung.