

Zusammenfassung

Das ballongetragene, kryogene Fourierspektrometer MIPAS-B2 (Michelson-Interferometer für passive atmosphärische Sondierung – Ballonversion 2) mißt mit dem Verfahren der Horizontsondierung Emissionsspektren der Atmosphäre im mittleren infraroten Spektralbereich. Aus den Spektren werden vertikale Konzentrationsprofile vieler ozon- und klimarelevanter Spurengase abgeleitet. Die Messung der atmosphärischen Emissionsstrahlung stellt hohe Ansprüche an das Instrument und die Datenprozessierung. Da trotz der Kühlung des Optikmoduls seine thermische Eigenemission in derselben Größenordnung liegt wie der Strahlungsbeitrag der Atmosphäre, ist für eine hohe Genauigkeit der kalibrierten Spektren eine eingehende Charakterisierung des radiometrischen Verhaltens des Instruments erforderlich.

Ziel dieser Arbeit ist die Quantifizierung und Optimierung der radiometrischen Genauigkeit von MIPAS-B2. Dafür werden die verschiedenen Fehlerquellen untersucht, die zu einem systematischen Fehler in den kalibrierten Spektren führen. Hierzu zählen das Rauschen in den Kalibrierungsmessungen, die Änderung der Instrument-Eigenemission durch thermische Drift, Fehler in der Bestimmung der Basislinie des Instruments aufgrund atmosphärischer Restsignaturen, Unsicherheiten in der Temperatur und dem Emissionsvermögen des zur Kalibrierung verwendeten Schwarzkörpers, Fehler in der Phasenkorrektur und Restfehler nach der Korrektur der Detektor-Nichtlinearität.

Die Analyse von sieben Meßflügen, die im Zeitraum von 1997 bis 2002 im arktischen Winter und im Frühjahr/Sommer in mittleren Breiten erfolgten, zeigt, daß aufgrund der thermischen Drift des Instruments häufige Kalibrierungsmessungen notwendig sind. Für eine saubere Trennung atmosphärischer Restsignaturen von der Basislinie und eine gute Phasenkorrektur waren jedoch bei früheren Flügen lange Meßzeiten erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit konnten die bestehenden Verfahren so verbessert werden, daß die Kalibrierungsmessungen deutlich weniger Zeit in Anspruch nehmen und damit in kürzeren Zeitabständen durchgeführt werden können. Trotz der häufigeren Kalibrierungsmessungen bleibt insgesamt mehr Meßzeit für atmosphärische Messungen. Die verbleibenden Restfehler in der Kalibrierung wurden mit Hilfe von Simulationsrechnungen quantifiziert. Zur Korrektur der Detektor-Nichtlinearität wurde ein neues Verfahren entwickelt, das es erlaubt, die Nichtlinearitätsparameter für jeden Flug mit hoher Genauigkeit direkt aus Spektren abzuleiten, die während des Fluges gemessen werden.

Für den Flug vom 12. Februar 2002, der den aktuellen Zustand des Instruments wiedergibt, wird eine Abschätzung des Gesamtfehlers der kalibrierten Spektren angegeben. Die Programme, die im Rahmen dieser Arbeit für diese Fehlerberechnung entwickelt wurden, bieten die Möglichkeit, für künftige Flüge die systematischen Fehler in den kalibrierten Spektren operationell anzugeben.

Abschließend wird exemplarisch der Einfluß der systematischen Fehler in den Spektren auf die abgeleiteten Spurengasprofile untersucht. Es zeigt sich, daß zwischen multiplikativen und additiven Fehlerbeiträgen unterschieden werden sollte, da sich Skalierungsfehler und additive Fehler unterschiedlich auf die Ableitung der Spurengasprofile auswirken. Ein Skalierungsfehler in den Spektren führt zu einem etwa ebenso großen Skalierungsfehler in den Spurengasprofilen. Additive Fehler haben hingegen kaum einen Einfluß auf die abgeleiteten Profile, solange ein additiver Beitrag bei der Ableitung der Spurengasprofile als Anpassungsparameter freigegeben wird. Für die Interpretation von Korrelationen der Spurengase ist die Anforderung an die radiometrische Genauigkeit höher als für die Profile einzelner Gase, weil sich in diesem Fall die Fehler der einzelnen Profile verstärken können, so daß die radiometrische Genauigkeit an Bedeutung gewinnt.

Der Skalierungsfehler liegt zwischen 0,5 und 1,2% (2σ), abhängig von der Wellenzahl und vom zeitlichen Abstand zu den Kalibrierungsmessungen. Die Auswirkungen des Skalierungsfehlers sind mit ca. 1% deutlich kleiner als die Fehler in den spektroskopischen Liniendaten, die typischerweise im Bereich von 5 bis 20% (2σ) liegen. Der additive Fehler liegt zwischen 9 und 0,3 nW/(cm² sr cm⁻¹) (2σ) bei 770 bzw. bei 1950 cm⁻¹. Damit liegen die systematischen Fehler in den meisten Meßsituationen unterhalb des Rauschniveaus für Einzelspektren.

Mit den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Methoden zur Optimierung der radiometrischen Genauigkeit konnte somit der systematische Fehler in den kalibrierten Spektren so weit reduziert werden, daß er verglichen mit anderen Fehlerquellen von untergeordneter Bedeutung ist.

Abstract

Quantification and optimisation of the radiometric accuracy of the Fourier transform spectrometer MIPAS-B2

The cryogenic balloon-borne Fourier transform spectrometer MIPAS-B2 (Michelson-interferometer for passive atmospheric sounding - balloon version 2) is a limb sounder measuring emission spectra of the atmosphere in the mid-infrared. From these spectra, trace gas profiles of numerous species are deduced which are relevant to the ozone chemistry and the greenhouse effect. Measurements of atmospheric emission spectra demand a very good instrument performance and a precise data processing. Although the instrument is cooled, its thermal self-emission is of the same order of magnitude as the atmospheric signal. Therefore, a profound characterisation of the instrument's radiometric properties is necessary to obtain a high accuracy in the calibrated spectra.

The objective of this thesis is the quantification and optimisation of the radiometric accuracy of MIPAS-B2. For this purpose the various error sources leading to a radiometric error in the calibrated spectra are examined. These errors are: noise in the calibration measurements, changes in the instrument's self-emission and responsivity due to thermal drifts, errors in the baseline determination due to residual atmospheric signatures, uncertainties of the temperature and emissivity of the blackbody which is used for calibration, errors in the phase correction, and residual errors after correction of the detector non-linearity.

Between 1997 and 2002, seven balloon flights have been performed under arctic winter conditions and in mid-latitudes in spring- or summertime. The analysis of these flights reveals that due to the thermal drift of the instrument, frequent calibration measurements are mandatory for a high accuracy. However, a long measurement time was necessary in the earlier flights to properly distinguish residual atmospheric signatures from the instrument's self-emission and to provide a good phase correction. Within this thesis the instrument characterisation and data processing could be improved so that the time needed for calibration measurements is reduced significantly. This allows to calibrate more often. In spite of the more frequent calibration measurements, the overall time for calibration could be reduced compared to earlier flights. The remaining errors in the calibrated spectra have been quantified using simulated spectra. For the correction of the detector non-linearity, a new method has been developed, allowing a precise determination of the non-linearity parameters from spectra that are measured during flight.

An estimate of the total systematic error in the calibrated spectra is given for the flight on 12th February 2002, which represents the current state of the instrument. The software, that

has been developed within the framework of this thesis, will allow an operational determination of the systematic error in the calibrated spectra for future flights.

Finally, the influence of systematic errors in the spectra on the retrieved trace gas profiles is investigated. It is shown that one has to distinguish between multiplicative and additive error contributions, because their influence on the trace gas profiles is different. A scaling error leads to an error in the profiles in the same order of magnitude, whereas additive errors barely alter the retrieved profiles, as long as an offset is treated as retrieval parameter and the spectra are not affected by clouds or aerosols. For the interpretation of correlations between different trace gases, the requirements for the radiometric accuracy are higher than for isolated profiles.

The scaling error is in the order of 0.5 to 1.2% (2σ), depending on the wavenumber and the time distance to the calibration measurements. Thus the errors in the trace gas profiles due to systematic errors in the calibrated spectra are of about 1% and therewith significantly smaller than spectroscopic errors, which are typically between 5 and 20% (2σ). The offset error is between 9 and 0.3 nW/(cm² sr cm⁻¹) (2σ) at 770 and 1950 cm⁻¹, respectively. In most situations, the systematic error is smaller than the noise level for single spectra.

With the optimisation of the radiometric accuracy achieved in this thesis, the systematic error in the calibrated spectra could be reduced so much that it is now only of minor importance compared to other error sources.