

Informationsgehalt von Messungen von IR-Bildsensor und FTIR Spektrometer für die Bestimmung von CO₂ und CO Säulengehalten über Vegetationsfeuern

M.HESS, F.SCHREIER und A.DOICU

*Institut für Methodik der Fernerkundung,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Oberpfaffenhofen, Deutschland*

1 EINLEITUNG

Durch anthropogene und natürliche Vegetationsfeuer werden weltweit erhebliche Mengen CO₂ freigesetzt. Diesen Beitrag zum Treibhauseffekt versucht man bisher vor allem durch die Beobachtung der verbrannten Flächen zu bestimmen. Kennt man die Grösse einer solchen Fläche und die Art des verbrannten Bewuchses, lassen sich daraus mit Hilfe weiterer Annahmen und Informationen, wie zum Beispiel der Feuchtigkeit der Vegetation vor dem Brand, die Gesamtmenge des emittierten CO₂ und CO abschätzen. Der einzige der erforderlichen Parameter dieser Methode, der im globalen Massstab vom Satelliten aus gemessen werden kann, ist die verbrannte Fläche, alle anderen beruhen auf Schätzungen. Eine direkte satellitengestützte Messung der emittierten CO₂ Menge wäre daher eine wertvolle Ergänzung zur Verifizierung der bisherigen Methoden. Am DLR wurde aus diesem Grund das flugzeuggetragene System FASA zur Messung von Spurengaskonzentrationen über Feuern und Vulkanen entwickelt, das aus der Kombination eines FTIR Spektrometers (MIROR) und eines bildgebenden IR Spektrometers (ABAS) besteht.

Nadirmessungen mit einem FTIR Spektrometer vom Flugzeug oder vom Weltraum aus setzen ein grosses Gesichtsfeld des Gerätes voraus um ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen. Der Durchmesser dieses Gesichtsfeldes am Boden kann für ein Satellitensystem mehrere Kilometer betragen, und für ein flugzeuggetragenes System ca. 80 – 100 Meter. Für die Beobachtung von Vegetationsfeuern bedeutet das, dass sich das gemessene gemischte Signal immer aus unterschiedlichen Anteilen brennender Feuerlinien, dahinterliegender schwelender Flächen, ungestörten Hintergrundes und Rauchwolken über dem Hintergrund zusammensetzt. Wenn man daraus Spurengasemissionen, z.B. von CO₂ und CO ableiten und den jeweiligen Flächenanteilen zuordnen will, muss man die Grösse dieser Flächenanteile kennen, um entsprechende Modellrechnungen des gemischten Signals erzeugen zu können.

In dem hier untersuchten Fall wird vorausgesetzt, dass diese Flächenanteile und die zugehörigen Bodentemperaturen aus gleichzeitig gemessenen Daten eines räumlich hochauflösenden bildgebenden IR Spektrometers bestimmt werden und damit bekannt sind bevor die Inversion der Spurengassäulen beginnt. Das Retrieval erfolgt dann durch den Vergleich gemessener und modellierter Spektren mit Hilfe eines nichtlinearen least squares Algorithmus.

2 METHODE

Die Ableitung von Spurengaskonzentrationen aus IR Spektren setzt voraus, dass bekannt ist, in welchen Spektralbereichen die gesuchte Information enthalten ist und inwieweit sie sich von anderen Einflußgrößen trennen läßt. Eine solche Untersuchung wird in diesem Beitrag exemplarisch am Beispiel des brennenden Anteils eines Waldbrandes vorgestellt. Entsprechende Rechnungen für den schwelenden Teil des Feuers und für die Kombination aus beiden werden folgen.

Die hier verwendete Methode zur Bestimmung der invertierbaren Parameter besteht in einer direkten Analyse modellierter Spektren und ihrer Änderung aufgrund von Parameteränderungen (Jacobi-Matrix), und in einem zweiten Schritt in der Durchführung von Retrievalrechnungen, also der Ableitung von Spurengassäulen aus modellierten Spektren, wobei der Einfluß der einzelnen gesuchten Parameter auf die Ableitung der jeweils anderen Parameter bestimmt wird (Averaging Kernel Matrix).

2.1 AUSWAHL DER SPEKTRALBEREICHE

Für die CO_2 Bestimmung stehen prinzipiell v. a. die Spektralbereiche von $660 - 770 \text{ cm}^{-1}$ und $2350 - 2420 \text{ cm}^{-1}$ zur Verfügung und für CO der Bereich von $1950 - 2200 \text{ cm}^{-1}$. Alle diese Bereiche sind ausserdem stark von der Temperatur und der H_2O Konzentration abhängig.

Die Modellrechnungen wurden mit dem IR Strahlungstransportmodell MIRART (Schreier, 2003) durchgeführt, das die Ableitungen, d.h. Die Änderung des Spektrums aufgrund von Parameteränderungen, direkt berechnet. Als Modellatmosphäre wurden die Profile in Abbildung 1 (Schreier et al., 2002) kombiniert mit der Midlatitude Summer Atmosphäre verwendet.

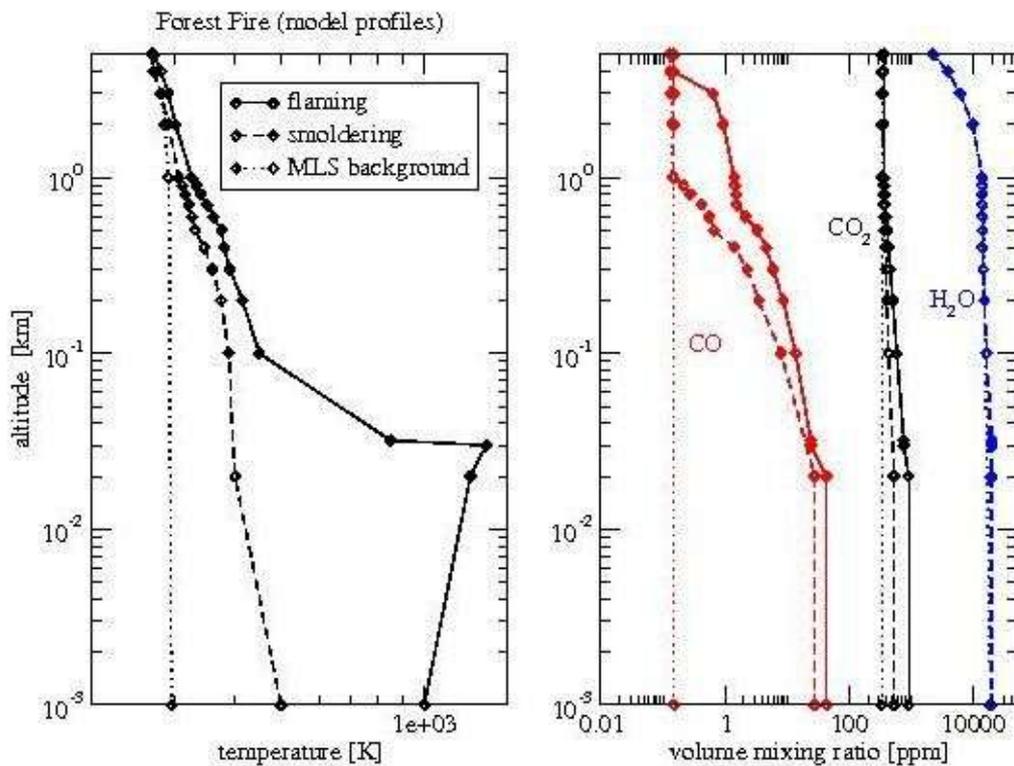


Abbildung 1: Modellatmosphäre über einem Waldbrand für den Fall einer Flugzeugmessung aus 5 km Höhe. Diese Profile liegen den Modellrechnungen zugrunde.

Die Auswahl der optimalen Spektralbereiche erfolgte subjektiv durch Betrachtung der Modellergebnisse. Ein objektiver Test dieser Auswahl wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die jeweils vielversprechendsten Ausschnitte aus den o.a. breiten Spektralbereichen für die Bestimmung der Gesamtsäulen von CO_2 , CO und H_2O , und der Bodentemperatur. In allen Fällen wird dabei angenommen, dass Änderungen der Gesamtsäule bzw. der Bodentemperatur durch eine Skalierung der Modellprofile entstehen.

Im unteren Teil der beiden Abbildungen ist jeweils die modellierte Strahlung dargestellt, wie sie vom Spektrometer gemessen würde. Der obere Teil zeigt die Ableitungen bezüglich der Temperatur und aller Gase, die in diesem Spektralbereich absorbieren. Sie sind als Absolutwerte der Strahldichteänderung für eine 1% Änderung des jeweiligen Parameters angegeben, um so eine Relation zum Geräterauschen (NESR) des MIROR Spektrometers herstellen zu können.

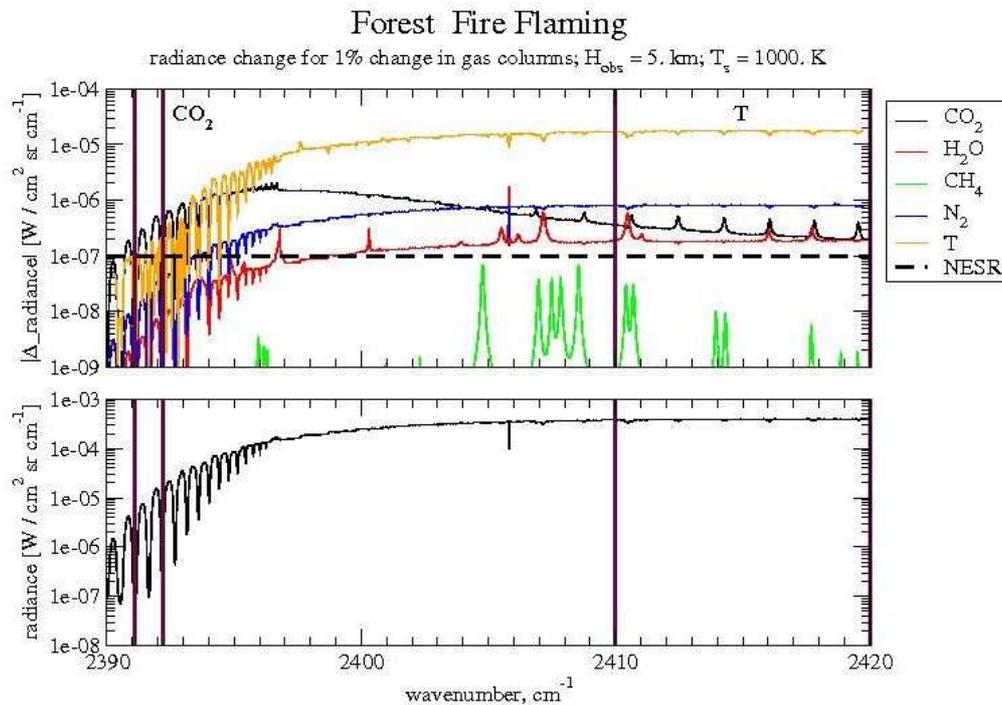


Abbildung 2: Änderung der modellierten Strahldichte am Spektrometer aufgrund einer jeweils 1% Änderung der angegebenen Parameter. NESR ist das Geräterauschen des MIROR Spektrometers. Die senkrechten Striche markieren die gewählten Spektralbereiche für das Retrieval von CO_2 Säule und Bodentemperatur.

Gesucht werden Teilbereiche, in denen die Sensitivität bezüglich eines gesuchten Parameters wesentlich größer ist als die bezüglich aller anderen Parameter. Am einfachsten ist die Situation für die Temperatur. Hier bietet sich der Spektralbereich $2410 - 2420 \text{ cm}^{-1}$ an. Die beiden CO_2 Linien um 2391 cm^{-1} sind die einzigen Stellen, an denen der Einfluß der CO_2 Säule stärker ist als der der Temperatur. Allerdings liegt das Signal relativ dicht am Rauschen und ist z.B. für den Fall des schwelenden Feuers mit 500 K Bodentemperatur nicht mehr nutzbar (hier nicht gezeigt). Im Bereich um 2142 cm^{-1} ist der H_2O Einfluß nur von der Temperatur überlagert und daher am besten zur Bestimmung der H_2O Säule nutzbar. H_2O hat so starken Einfluß auf die CO Linien, dass es als Hilfsgröße mitbestimmt werden muß. Die Ableitung der CO Säule ist die schwierigste Aufgabe, da hier die Einflüsse der anderen Gase am stärksten sind.

Das Retrieval der CO_2 und der CO Säule über einem Waldbrand wird demnach sequentiell in den angegebenen Spektralbereichen durchgeführt. Erst die Temperatur, dann CO_2 , H_2O und CO , wobei jeweils das Ergebnis des vorhergehenden Schrittes in den Vorwärtsrechnungen zu berücksichtigen ist.

2.2 ÜBERPRÜFUNG DER GEWÄHLTEN SPEKTRALBEREICHE

Die Spektralbereiche, die in 2.1 subjektiv ausgewählt wurden, werden hier einer objektiven Überprüfung unterzogen. Dazu wird die Averaging Kernel Matrix nach Rodgers (2000) direkt aus einer Reihe von Retrievalrechnungen berechnet.

Jeder der vier gesuchten Parameter wird um 10% erhöht. Mit der derart veränderten Modellatmosphäre wird ein Spektrum simuliert, aus dem dann die vier Parameter wie o.a. invertiert werden. Die Veränderungen der Retrievalergebnisse der Parameter gegenüber dem ungestörten Fall bilden die Elemente der Averaging Kernel Matrix, die demnach aus 4×4 Elementen besteht.

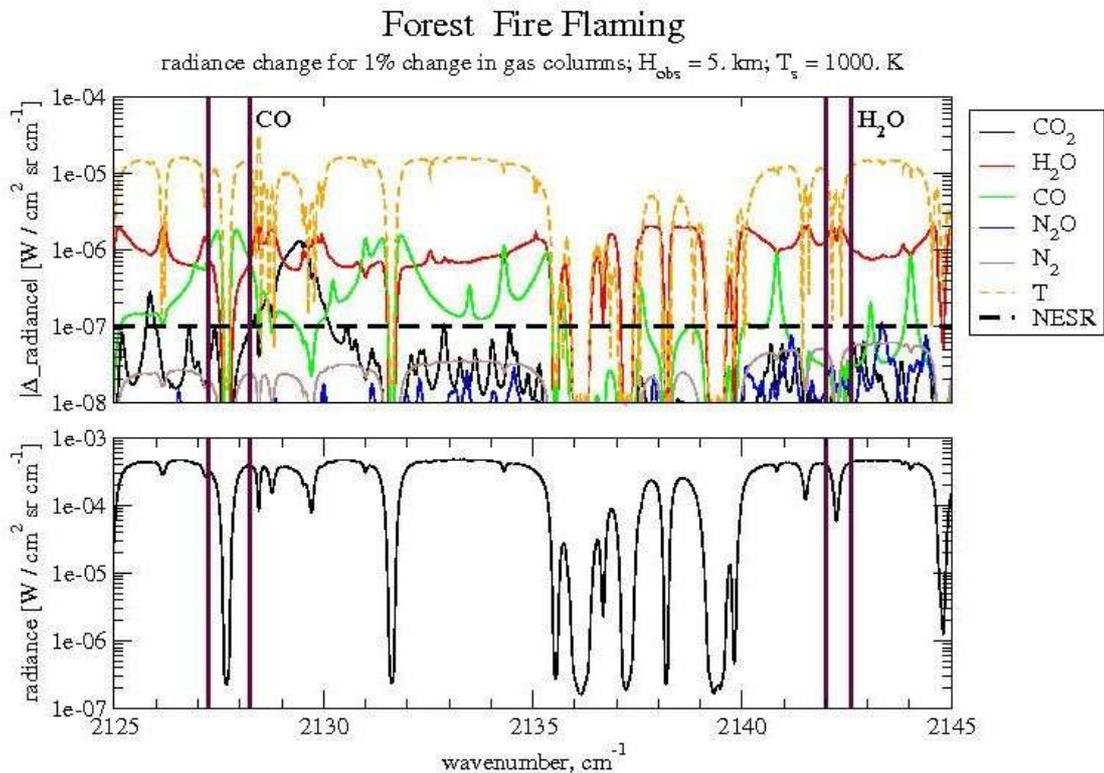


Abbildung 3: Änderung der modellierten Strahldichte am Spektrometer aufgrund einer jeweils 1% Änderung der angegebenen Parameter. NESR ist das Geräterauschen des MIROR Spektrometers. Die senkrechten Striche markieren die gewählten Spektralbereiche für das Retrieval von CO und H₂O Säule.

Da es hier darum geht, den Informationsgehalt von MIROR Spektren zu untersuchen, werden für diese Retrieval möglichst günstige Bedingungen gewählt, um den Einfluß weiterer Größen, die das Retrievalergebnis beeinflussen, weitgehend auszuschließen. Dabei ist v.a. an den Startwert des Retrievals gedacht, und an die Art, wie die Atmosphärenprofile für die Vorwärtsrechnungen gewählt werden. Diese Profile werden grundsätzlich durch Skalierung der „wahren“ Profile erzeugt. Der Startwert liegt jeweils 10% neben dem wahren Wert.

Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt. Die rote Kurve beispielsweise zeigt den Effekt der 10% Änderung der CO₂ Säule auf die Retrievalergebnisse. Das CO₂ Retrieval liefert, wie gewünscht, einen 10% höheren Wert, während Temperatur und H₂O kaum beeinflusst sind, und die CO Säule 1% geringer ausfällt. Die anderen Kurven sind ähnlich.

Es ist demnach prinzipiell möglich, CO₂ und CO Säulen über einem Waldbrand aus flugzeuggetragenen Messungen in den gewählten Spektralbereichen abzuleiten.

3. AUSBLICK

Rechnungen für einen schwelenden Waldbrand und für die Kombination eines brennenden und schwelenden Feuers zu einer gemischten Szene sind in Vorbereitung.

Forest Fire Flaming

total column retrieval - effect of 10% parameter change (normalized averaging kernels)

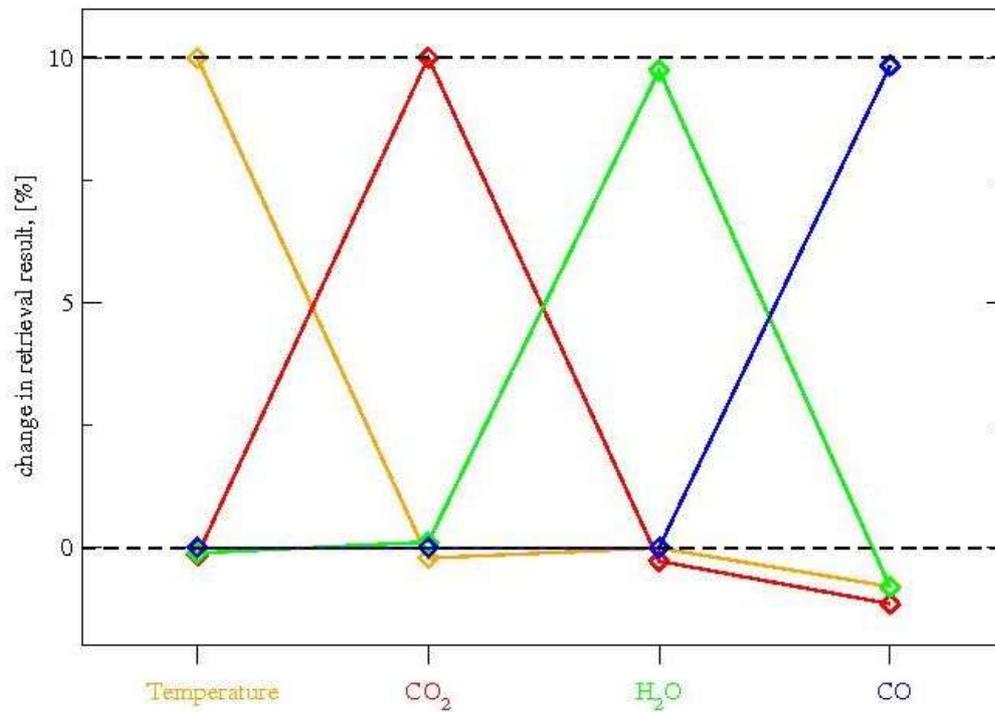


Abbildung 4: Auswirkungen einer jeweils 10% Änderung der Parameter Bodentemperatur (orange), CO₂ (rot), H₂O (grün) und CO (blau) Gesamtsäule in der „wahren“ Modellatmosphäre auf die invertierten Parameter.

DANKSAGUNG

Diese Untersuchung basiert auf der Arbeit der Beteiligten an den FOCUS Phase A / AX Studien.

LITERATUR

- Schreier, F. und Böttger, U. (2003). MIRART, a line-by-line code for infrared atmospheric radiation computations incl. derivatives, *Atmos. Oceanic Optics*, 16, 262-268.
- Schreier, F., Beier, K., Hess, M., Tank, V., Zhukov, B. und Oertel, D. (2002). FOCUS Data Fusion Algorithm Development – Final Report ESA CR (P)4384, Contract 14728/00/NL/JSC.
- Rodgers, C.D. (2000). *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. Singapore. World Scientific.