

# Auswertung von LANDSAT-7 ETM+ und ASTER-Daten zur Erfassung von Temperaturanomalien der Landoberfläche

MICHAEL SCHÄFER<sup>1</sup> & CHRISTIAN FISCHER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Aufgrund des Kyoto-Protokolls können Länder weltweit mit Emissionen und so genannten CO<sub>2</sub>-Reduktionsanteilen handeln. Eine hohe Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emission verspricht die Eindämmung bzw. das Löschen von brennenden Kohleflözen. Es wurde untersucht, ob Daten der Sensoren LANDSAT-7 ETM+ und ASTER, die im Bereich des thermalen Infrarots die Wärmestrahlung der Erdoberfläche aufzeichnen, für eine Erfassung der durch Kohlebrände hervorgerufene Temperaturanomalien an der Tagesoberfläche genutzt werden können. Hierzu wurden zwei Verfahren entwickelt. In einem ersten Ansatz wurde unter Nutzung eines digitalen Geländehöhenmodells die natürliche Erwärmung der Erdoberfläche durch die Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf abgeschätzt und untersucht, ob unter Berücksichtigung der reliefbedingten Einstrahlungsverhältnisse lokale Temperatur-anomalien an der Erdoberfläche erfasst werden können. In einem zweiten Ansatz wurde ein Zwei-Kanal-Verfahren nach Dozier zur Erfassung von Temperaturanomalien so erweitert, dass drei und mehr TIR-Kanäle bei der Auswertung genutzt werden können.*

## 1 Hintergrund

Obwohl Kohlebrände auch natürliche Ursachen haben können, führen insbesondere wilder Abbau an der Tagesoberfläche oder untertägiger Abbau in Verbindung mit unkontrollierter Bewetterung zu einer Ausbreitung von brennenden Kohleflözen. Die meisten Kohlenfeuer sind auf spontane Entzündungen zurückzuführen, hervorgerufen entweder durch Ausgasungen der Kohle wie beispielsweise Methan oder durch exotherm ablaufende Oxidation bei einem Kontakt des Kohlenflözes mit Sauerstoff.

Die Nordprovinzen in China sind von dieser Problematik besonders betroffen. Allein in China verbrennen nach BÖKEMEIER (2002) jährlich circa 20 Millionen Tonnen Kohle. Die bis zu zehnfache Menge wird zudem durch die Brände für den Bergbau unbrauchbar. Zusammengekommen entspricht dieser Verlust in etwa einem Fünftel der chinesischen Jahresförderung von einer Milliarde Tonnen. Die chinesischen Kohlebrände verursachen dabei schätzungsweise 0,1 bis 0,2 Prozent des weltweiten durch fossile Brennstoffe erzeugten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Hinzu kommen andere parallel entstehende Treibhausgase wie zum Beispiel Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>), sowie toxische Gase wie Kohlenmonoxid (CO), Lachgas (N<sub>2</sub>O) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>). Nicht zu vernachlässigen sind auch die durch Kohlebrände entstehenden Landverluste und Gefährdungen für Gebäude und Infrastruktur durch Bodensenkungen und Spaltenbildungen.

Als Testgebiet für beispielhafte Auswertungen wurde die Umgebung der Oase Keerjian am Nordwestrand der Turfan-Senke in der autonomen Provinz Xingjiang im Nordwesten der Volksrepublik China ausgewählt (Koordinaten 88°15' E, 43°05' N; WGS 84). Die nächstgelegene größere Stadt ist Urumqi mit über 1,5 Million Einwohnern (etwa 95 Kilometer nordwestlich Keerjian).

---

<sup>1</sup> Cand. geol. Michael Schäfer, Institut für Geologie und Paläontologie, Technische Universität Clausthal, Leibnizstr. 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, e-mail: michael.schaefer@tu-clausthal.de

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Christian Fischer, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Technische Universität Clausthal, Erzstr. 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, e-mail: christian.fischer@tu-clausthal.de

## 2 Problemstellung

Fernerkundung bietet sich an, um aktuell und vergleichsweise genau Informationen über betroffene Gebiete erhalten zu können. Die Kenntnis über Lage und Flächenausbreitung vorhandener oder neu auftretender Brände ist eine wesentliche Voraussetzung für die Planung und Durchführung von Aktivitäten zur erfolgreichen Eindämmung oder umfassenden Löschung der brennenden Flöze. Dennoch ergeben sich oft Schwierigkeiten bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Erfassung von Kohlebränden. Als Hauptgründe können genannt werden:

- Kleine Ausmaße der eigentlichen Brandflächen. Die Größe der meisten Brandzonen beträgt an der Tagesoberfläche oft nur wenige Meter im Durchmesser (GIELISCH, mündl. Mitteilung, 2002).
- Beeinflussung der erfassbaren Brandtemperatur durch Tiefenlage des Kohlefeuers in Verbindung mit dem unterschiedlichen Wärmeverhaltens des Bodens und der Gesteine am Brandherd.
- Erwärmung des Erdbodens durch die Sonneneinstrahlung und weitere Modifikation der Einstrahlungsbedingungen durch das Relief.

Um die Vorteile moderner kommerziell verfügbarer Fernerkundungssensoren wie beispielsweise LANDSAT-7 ETM+ und ASTER, die im Bereich des thermalen Infrarots die Wärmestrahlung (Emission) der Erdoberfläche aufzeichnen, für eine Erfassung der durch Kohlebrände hervorgerufene Temperaturanomalien an der Tagesoberfläche nutzen zu können, wurden zwei Verfahren untersucht. Aufgrund der oftmals geringen räumlichen Ausdehnung offen brennender bzw. oberflächennah schwelender Kohlebrände, wird eine Auswertung der Fernerkundungsdaten auch im Subpixel-Bereich angestrebt.

## 3 Fernerkundungsdaten

Neben den hier aufgeführten Fernerkundungsdaten stand zusätzlich ein digitales Höhenmodell (DHM) zur Verfügung, welches den Bereich der ETM+-Szene und der verwendeten ASTER-Szenen abdeckt. Das DHM wurde interferometrisch aus SAR-Daten des European Remote Sensing (ERS) Satelliten der European Space Agency (ESA) berechnet und besitzt eine geometrische Auflösung von 25 Metern. Die Daten wurden georeferenziert und vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Verfügung gestellt. Das DHM bildet zudem die Grundlage für die Orthorektifizierung der LANDSAT-7-Szene.

### 3.1 ASTER

Der Fernerkundungssensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) befindet sich an Bord des Erdbeobachtungssatelliten Terra und besteht aus drei Sensoren. Der VNIR-Sensor (Visible and Near Infrared) besitzt drei Kanäle zwischen 0.5 und 0.9  $\mu\text{m}$  bei einer geometrischen Auflösung von 15 Metern, der SWIR-Sensor (Short Wave Infrared) hat eine geometrische Auflösung von 30 Metern in sechs Spektralbereichen zwischen 1.6  $\mu\text{m}$  und 2.43  $\mu\text{m}$  (beides Pushbroom-Sensoren). Der TIR-Sensor (Thermal Infrared) in Whiskbroom-Bauweise besitzt fünf Kanäle zwischen 8 und 12  $\mu\text{m}$  bei einer geometri-

schen Auflösung von 90 m. Eine Szene deckt eine Fläche von 60 zu 60 Kilometern ab. Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Level-2-Produkte von ASTER zeigt Tabelle 1.

**Tab. 1: Genutzte ASTER On-Demand Level-2-Produkte**

Kurz-Bezeichn.	ASTER Produkt-Bezeichnung	physikalische Einheit	Atmosphärenkorrektur
AST_04	Strahlungs-Temperatur am Sensor	°C	Nein
AST_08	Kinetische Temperatur der Erdoberfläche	K	Ja
AST_09	Ausstrahlung der Erdoberfläche im VNIR/SWIR	$W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$	Ja
AST_09T	Emittierte Ausstrahlung der Erdoberfläche im TIR	$W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$	Ja

Bei der Generierung der Level-2-Produkte wird teilweise eine einfache Atmosphärenkorrektur durchgeführt. Die Verwendung des zusätzlich erhältlichen Level-2-Produkts AST\_05 (mit fünf Emissivitäten der Erdoberfläche im TIR) erscheint problematisch, da der zugrunde liegende Algorithmus zur Trennung von Temperatur und Emissivität im Bereich von Kohlefeuern nicht fehlerfrei arbeitet (TETZLAFF, mündl. Mitteilung, 2003).

### 3.2 LANDSAT-7 ETM+

Der Whiskbroom-Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) an Bord von LANDSAT-7 besitzt neben sechs multispektralen Kanälen zwischen 0.45 und 2.35  $\mu m$ , bei einer geometrischen Auflösung von 30 m, einen thermalen Kanal (10.4 – 12.5  $\mu m$ ) mit einer Auflösung von 60 m und zusätzlich einen panchromatischen Kanal mit einer geometrischen Auflösung von 15 m. Eine Szene deckt dabei eine Fläche von ca. 185 zu 185 km ab. Für das Untersuchungsgebiet stand eine vollständige Szene vom 23. Aug. 1999 zur Verfügung (path 142, row 30), die vom DFD orthorektifiziert wurde.

## 4 Auswertungen

Die entwickelten Methoden beschränken sich auf die Nutzung des TIR-Bereiches des Elektromagnetischen Spektrums. Hierdurch werden Probleme der Überlagerung von emittierter Strahlung der Erdoberfläche mit der reflektierten Sonnenstrahlung im kurzwelligeren Spektralbereich unter 8  $\mu m$  vermieden. Die derzeit für die Problematik der Sonnenreflektion (vor allem im Bereich unter 5  $\mu m$ ) bestehenden Lösungsvorschläge sind nach WOOSTER & KANEKO (2001) nicht befriedigend. Eine Ausweitung der hier entwickelten Methoden auf den MIR- bzw. SWIR-Bereich ist jedoch einfach möglich, insbesondere bei Auswertungen von Nachtszenen, die für diese Arbeit leider nicht zur Verfügung standen.

### 4.1 TRINSIM (Thermal heating Removal by Insolation Simulation)

Der Ansatz TRINSIM basiert auf der Simulierung der Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf über einem digitalem Höhenmodell (DHM) der Geländeoberfläche. Darauf aufbauend wird die natürliche Erwärmung der Erdoberfläche von Sonnenaufgang (SR) bis zum Zeitpunkt der Satellitenbefliegung abgeschätzt. Die so gewonnenen Temperaturen werden mit den von Satelliten erfassten Temperaturen verglichen. Ziel ist es, die Einflüsse der Topographie auf die Erwärmung der Erdoberfläche zu ermitteln, um die Erfassung der durch Kohlebrände hervorgerufenen Temperaturanomalien zu ermöglichen.

Dieser Ansatz eignet sich insbesondere für Satellitensensoren, die nur in einem Wellenlängenbereich des thermalen Infrarots aufzeichnen.

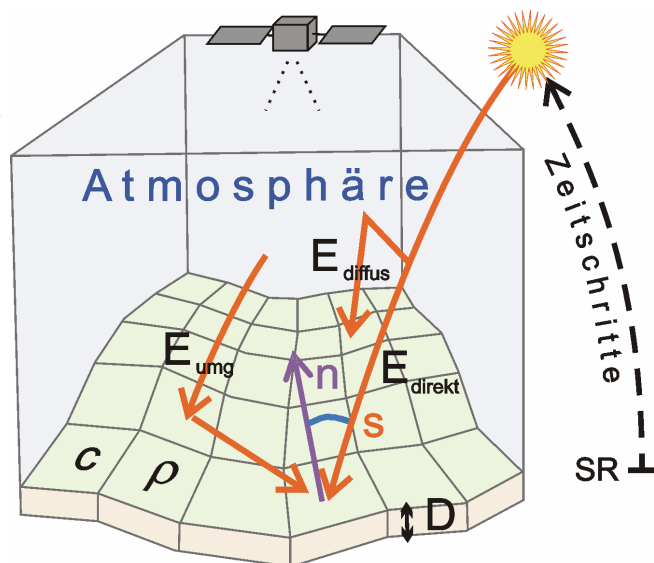
Die Berechnung der eingestrahlichten Energie (Globalstrahlung  $E_{global}$ ) erfolgt durch die Bestimmung des Winkels zwischen den Normalenvektoren  $n$  aller Flächen des DHM und dem zeitabhängigen Vektor der Sonneneinstrahlung  $s$  (s. Abb. 1). Die Berechnung der Sonnenposition erfolgt nach IQBAL (1983) in Abhängigkeit von Uhrzeit, Datum und geographischer Position für eine beliebige Anzahl von Zeitschritten und eine frei wählbare Zeitspanne. Mit berücksichtigt werden optische Parameter zur Beschreibung von fünf Transmissivitäten der Atmosphäre für die direkte Sonnenstrahlung ( $E_{direkt}$ ) und für die Einbeziehung der diffusen Himmelsstrahlung ( $E_{diffus}$ ) durch Streuung und Mehrfachreflektionen nach BIRD & HULSTROM (1981), zusammengefasst von BAEHR & STEPHAN (1998). Ebenfalls berücksichtigt wird ein einfacher Ansatz zur Beschreibung der Strahlung der Umgebung ( $E_{umg}$ ) nach IQBAL (1983). Die zur Atmosphärenkorrektur notwendigen Kenngrößen (Temperatur, Luftdruck, Sichtweite, Albedo, Höhe der Wasser- und Ozonsäule) können zum Teil aus Messdaten von lokalen Wetterstationen bezogen oder aus Tabellenwerken entnommen werden.

### Globalstrahlung:

$$E_{global} = E_{direkt} \cdot \cos \angle(n,s) + E_{diffus} + E_{umg}$$

### Einbezogene Atmosphären-Parameter:

- $E_{direkt}$
- Aerosol-Transmission
  - Rayleigh-Transmission
  - Absorption durch Wasserdampf
  - Absorption durch Ozon
  - Absorption durch sonstige Gase
- $E_{diffus}$
- Streuung durch Aerosole
  - Rayleigh-Streuung
  - Mehrfachreflektionen

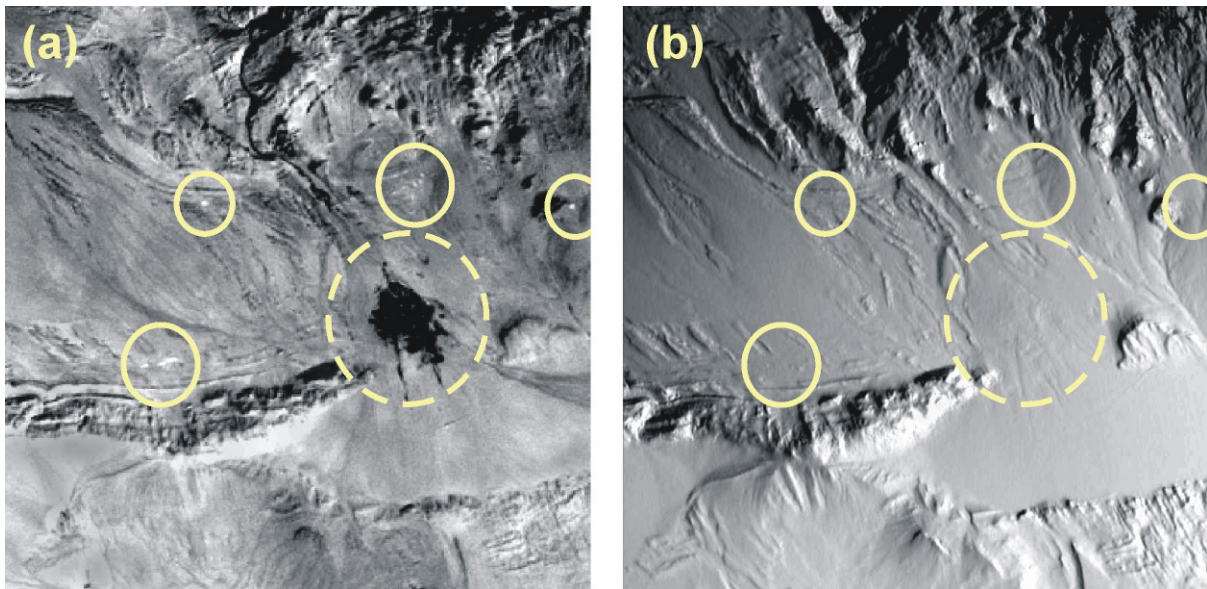


**Abb. 1: Schematische Darstellung zur Ermittlung der Globalstrahlungsenergie und der resultierenden reliefbedingten Erwärmung der Tagesoberfläche**

Die Ermittlung der simulierten Oberflächentemperaturen anhand der Energie der Globalstrahlung  $E_{Global}$  erfolgt nach Formel (1). Aufgrund fehlender Messwerte werden die physikalischen Parameter zur Beschreibung des Wärmeumsatzes des Erdbodens (Dichte  $\rho$ , spezifische Wärmekapazität  $c$  und die im Tagesverlauf durch Temperaturerhöhung beeinflusste Mächtigkeit  $D$  des Erdbodens) abgeschätzt. Die Berechnung der Temperaturerhöhung  $\Delta T$  beginnt bei einem zuvor ermittelten höhenabhängigen Startwert (Tagesminimum-Temperatur zur Sonnenaufgangszeit) und werden für jeden Zeitschritt der Länge  $\Delta Zeit$  für alle Flächen des DHM ausgeführt. Die Fläche  $A$  eines DHM-Pixels und die Masse  $M$  der sich erwärmenden Bodenvolumeneinheit (wobei  $M = D \cdot A \cdot \rho$ ) gehen nicht in die Berechnung mit ein.

$$\Delta T = \frac{E_{Global} \cdot \Delta Zeit}{c \cdot \rho \cdot D} \quad [\text{K}] \quad (1)$$

Durch die Anwendung von TRINSIM können kleinräumig Lokalitäten erfasst werden, an denen sich im Satellitenbild lokal erhöhte Temperaturen zeigen. Sofern diese keine Beziehung zu topographischen Phänomenen aufweisen, deuten sie offensichtlich auf künstliche Temperaturanomalien hin. Vier Beispiele hierfür zeigt Abbildung 2. Links dargestellt (a) sind durch ETM+ Kanal 6 gemessene Temperaturen, rechts (b) durch Simulation gewonnene. Die durchgezogenen Kreise stellen potentielle Feuerflächen dar. Der gestrichelte Kreis beschreibt die Lage der Oase Keerjian, welche durch ihre niedrigere Temperatur im Satellitenbild bemerkbar ist, jedoch nicht in der Simulation erscheint.



**Abb. 2: Beispiel für das Ergebnis einer Auswertung mit TRINSIM**

Die Methode TRINSIM liefert als Ergebnis Temperaturdifferenzen zwischen den vom Satelliten gemessenen und den simulierten Temperaturen. Eine direkte Beschreibung der Temperaturen der Brandstellen ist jedoch schwierig, da diese immer sehr viel kleiner als ein Pixel des Satellitenbildes im TIR sind. Für weitergehende Überlegungen zum Zusammenhang zwischen Feuergröße und Feuertemperatur bei der Verwendung eines einzelnen TIR-Kanals vgl. GENDEREN, V. & GUAN (1997).

Beim Vergleich der simulierten Temperaturen mit den aus den ETM+-Daten ermittelten Temperaturen zeigt sich, dass die von der Sonne beschienenen Hänge generell zu warm, die von der Sonne abgewandten Hänge zu kalt berechnet werden. Es ist daher zu erwarten, dass Brandflächen mit vergleichsweise geringem Temperaturunterschied zur Umgebung nur eingeschränkt erfasst werden können. Eine Verbesserung des Verfahrens kann durch folgende Erweiterungen erreicht werden:

- Unterscheidung mehrerer Oberflächentypen, beispielsweise durch Nutzung geologischer und bodenkundlicher Informationen, sowie unterschiedlicher Land- und Vegetationsbedeckungsklassen, unter Verwendung der jeweils spezifischen, den Wärmeumsatz beeinflussender Parameter und Koeffizienten.

- Physikalische Beschreibung und Modellierung eines Wärmeausgleichs zwischen kalten und warmen Flächen, einer Wärmeabgabe an die Atmosphäre, und vor allem Berücksichtigung lokaler Windsysteme (TETZLAFF, mündl. Mitteilung, 2003).
- Berücksichtigung der Beschattung von DHM-Pixeln durch die umgebende Topographie (vgl. z. B. SCHAAB, 2000). Dies ist nur notwendig in stark reliefierten Gelände, wie z. B. im Norden von Abbildung 2, wo jedoch lokal keine Kohlebrände auftreten. TRINSIM berücksichtigt momentan lediglich die Selbstbeschattung von Pixeln.

## 4.2 TRISTAR (Tri-Spectral Temperature Anomaly Recognition)

In einem zweiten Ansatz wurde unter Nutzung von multispektralen Satellitendaten des Sensors ASTER, der in mehreren Wellenlängenbereichen des thermalen Infrarots Daten erfasst, ein Ansatz nach DOZIER (1981) zur Erfassung von Temperaturanomalien angewendet und so erweitert, dass drei und mehr TIR-Kanäle bei der Auswertung genutzt werden können. Gleichzeitig erlaubt der Ansatz prinzipiell eine Erfassung von Temperaturunterschieden im Subpixel-Bereich.

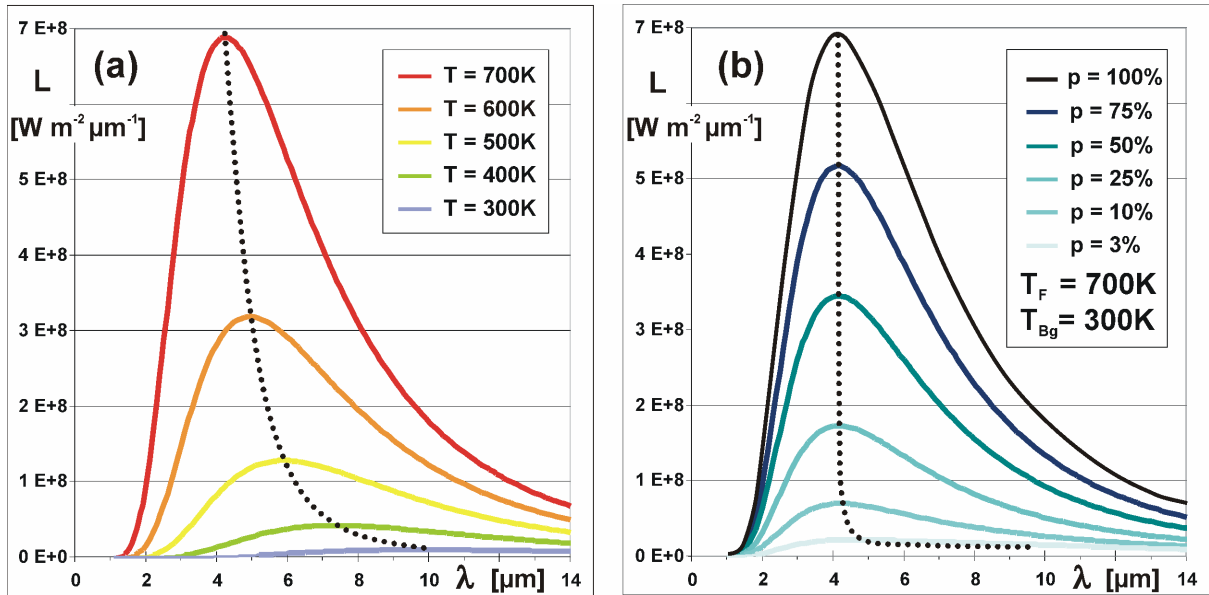
Die Methode nach Dozier verwendet die Strahlungswerte  $L_1$  und  $L_2$  von zwei Spektralkanälen (mit den mittleren Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ ) in einem System zweier Gleichungen (vgl. Formel 2). Gesucht sind die drei unbekannt Parameter Feuertemperatur  $T_F$ , Hintergrundtemperatur  $T_{Bg}$  und relative Feuergröße  $p$  (Prozentualer Anteil der Feuerfläche an der Pixelfläche).

$$\begin{aligned} L_1 &= p \cdot L(\lambda_1, T_F) + (1 - p) \cdot L(\lambda_1, T_{Bg}) \\ L_2 &= p \cdot L(\lambda_2, T_F) + (1 - p) \cdot L(\lambda_2, T_{Bg}) \end{aligned} \quad (2)$$

Für  $L(\lambda, T)$  ist Formel (3) auf Grundlage des Strahlungsgesetzes nach Planck einzusetzen (mit den Planckschen Strahlungskonstanten  $C_1$  und  $C_2$ ):

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T} - 1\right)} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}} \right] \quad (3)$$

Abbildung 3 zeigt links (a) Kurvenverläufe von Formel (3) über der Wellenlänge  $\lambda$  für verschiedene Temperaturen ( $T = 300, 400, 500, 600, 700$  K). Das Maximum der Ausstrahlung verschiebt sich bei steigender Temperatur nach dem Verschiebungsgesetz von Wien in Richtung kleinerer Wellenlängen (siehe gepunktete Linie in Abb. 3a). Der rechte Teil von Abbildung 3 (b) stellt anhand Formel (2) die Überlagerung der Ausstrahlung zweier Strahlungsquellen ( $T_F = 700$  K,  $T_{Bg} = 300$  K) nach Dozier bei verschiedenen Flächengrößen  $p$  dar. Bei  $p = 100\%$  (ganze Fläche strahlt mit Temperatur  $T_F$ ) und  $p = 0\%$  (kein Feuer, ganze Fläche hat Temperatur  $T_{Bg}$ ) ergeben sich die gleichen Kurvenverläufe wie in Abbildung 3 (a). Bei einem gleichzeitigen Auftreten von Feuer- und Hintergrundstrahlung innerhalb eines Pixels ergibt sich jedoch ein abweichender Kurvenverlauf (b). Die gepunktete Linie der maximalen Ausstrahlung ist hier im Vergleich zu (a) deutlich in Richtung kleinerer Wellenlängen verschoben. Dieses Phänomen nutzt die Dozier-Methode zur Gewinnung der drei gesuchten Pa-



**Abb. 3: Theoretischer Hintergrund von TRISTAR**

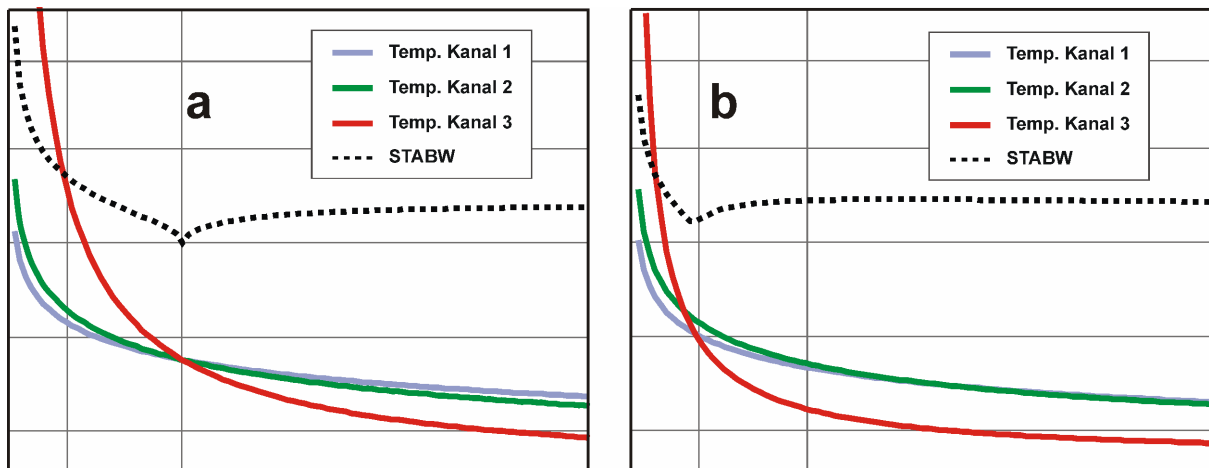
Das Dozier-Gleichungssystem ist analytisch nicht lösbar. Die Lösung erfolgt daher meistens auf graphischen Weg (vgl. z. B. MATSON & DOZIER, 1981), was eine rechnergestützte Auswertung ganzer Satellitenszenen unmöglich macht. Des Weiteren wird zur Lösung des Gleichungssystems oft die Hintergrundtemperatur  $T_{Bg}$  aus den Werten benachbarter Pixel abgeschätzt. Ein Problem hierbei ist, dass in den Nachbarpixeln ebenfalls Feuer auftreten können, wodurch das Ergebnis verfälscht werden kann.

Aus diesen Gründen wurde ein iteratives Rechenverfahren entwickelt, welches die gesuchten Werte für jeden Pixel näherungsweise bestimmt. Dieser Ansatz ermöglicht, drei und mehr Kanäle bei der Auswertung gleichzeitig zu nutzen. Hierdurch ist die eindeutige Bestimmung aller drei Parameter  $T_F$ ,  $p$  und  $T_{Bg}$  möglich.

Zur gleichzeitigen Darstellung der drei resultierenden Parameter in einer Abbildung wurden verschiedene Methoden zur Berechnung der Energiefreisetzung  $E_F$  (in Watt) eines Feuers untersucht. Die Energiefreisetzung beschreibt die Gesamt-Ausstrahlung einer Brandfläche über alle Wellenlängen. Die "Bi-spectral technique" nach OERTEL et al. (2002) liefert gute Resultate (vgl. Formel 4). Die Methode wird auch in Verbindung mit dem Feuerfernerkundungs-Satelliten BIRD (Bi-spectral InfraRed Detection) der DLR genutzt. Sie basiert auf dem Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann (mit der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$ ) in Abhängigkeit der Größe der Feuerfläche  $A_F$  (in  $m^2$ ).

$$E_F = \sigma \cdot (T_F^4 - T_{Bg}^4) \cdot A_F \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Abbildung 4 zeigt die Arbeitsweise der TRISTAR-Methode. Dargestellt ist jeweils die Feuertemperatur  $T_F$  über  $p$  für drei Spektralkanäle (durchgezogene Linien) und für zwei unterschiedliche Hintergrundtemperaturen  $T_{Bg}$  (a, b). In einem ersten Iterationsschritt wird die Hintergrundtemperatur variiert, und daraufhin in einer zweiten Iterationsschleife durch Verändern von  $p$  der optimale Schnittpunkt zwischen den drei Kurven bestimmt. Im rechten Bild ist der Schnittpunkt für die vorgegebene  $T_{Bg}$  noch nicht optimal, ersichtlich durch die Ermitt-



**Abb. 4: Darstellung der Arbeitsweise von TRISTAR**

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Methode fehlerfrei arbeitet. Zwecks einer Verbesserung der TRISTAR-Methode sind jedoch folgende Erweiterungen denkbar:

- Kalibrierung der ASTER-Daten anhand von "Look-Up"-Tabellen, um dadurch eine Verbesserung der Ausgangsparameter für die Berechnung zu erreichen.
- Klassifizierung unterschiedlicher Oberflächentypen um detaillierte Informationen über spektrale Emissivitätsunterschiede der Erdoberfläche im TIR-Bereich zu erhalten. Dadurch können die Lösungen des Dozier-Gleichungssystems verbessert werden.

Die Methode arbeitet bei Verwendung der TIR-Kanäle von ASTER aufgrund der geringen Temperaturen von Kohlebränden oftmals an der Grenze der Genauigkeit des Sensors. Wünschenswert wäre die Mit-Einbeziehung von Kanälen im MIR-Bereich, da eine Spreizung der verwendeten Kanäle über mehrere atmosphärische Fenster eine eindeutigere Lösung des Dozier-Gleichungssystems ermöglichen würde. Zudem sind Feuer im MIR-Bereich aufgrund des Wienschen Verschiebungsgesetzes aussagekräftiger als im TIR. Dies würde jedoch die Verwendung von Nacht-Szenen oder die Möglichkeit der genauen Ermittlung des Anteils der Sonnenreflektion erfordern, vgl. den Anfang von Abschnitt 4.

## 5 Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass eine Erfassung von thermalen Anomalien der Landoberfläche, hier hervorgerufen durch brennende Kohleflöze, möglich ist. Obwohl nur jeweils ein Bilddatensatz der beiden Sensoren zur Verfügung stand, konnten plausible Ergebnisse erreicht werden. Auf der Grundlage der bisherigen Untersuchungen wird eine Erweiterung der Verfahren angestrebt. Signifikante Verbesserungen der Ergebnisse, insbesondere beim Verfahren TRISTAR, sind bei einer Auswertung von Nachtaufnahmen zu erwarten, da dann auch die Kanäle des SWIR (MIR) in die Auswertung einbezogen werden könnten. Neben der hier gezeigten Anwendung besitzen die vorgestellten Verfahren ein hohes Potential, um auch für



andere Fragestellungen, beispielsweise für die Erfassung von Waldbränden und deren Veränderungen, genutzt werden zu können.

## 6 Danksagung

Die Autoren danken Hr. Dipl.-Geophys. Lutz Petrat und Hr. Dipl.-Geol. Ulrich Ziegler (Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen) für die Bereitstellung von Referenzdaten aus dem Untersuchungsgebiet im Rahmen dieser Diplomarbeit.

Besonderer Dank gilt Hr. Dr. Stefan Voigt und seiner "Kohlefeuer"-Arbeitsgruppe beim DFD des DLR für den fachlich anregenden Informationsaustausch, sowie für die Bereitstellung der ETM+-Daten und des DHM.

## 7 Literaturverzeichnis

- BAEHR, H. D. & STEPHAN, K., 1998: Wärme- und Stoffübertragung. - 3. Aufl., 686 S., Springer, Berlin.
- BIRD, R. E. & HULSTROM, R. L., 1981: A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. - US SERI Tech. Report TR-642-761, 38 S. - <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/PDFs/TR-642-761.pdf>
- BÖKEMEIER, R., 2002: Höllenfahrt durch China. Unterirdische Kohlenfeuer. - Geo. Das neue Bild der Erde, **9**: 100-124.
- DOZIER, J., 1981: A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution. - Remote Sensing of Environment, **11**: 221-229.
- GENDEREN, J. L. VAN & GUAN, HAIYAN, 1997: Environmental Monitoring of spontaneous combustion in the north China Coalfields. Final Report to European Commission. - 244 S., ITC, Enschede.
- GIELISCH, H., 2002: Deutsche Montan Technologie GmbH, Mines & More Division, Essen, mündl. Mitteilung.
- IQBAL, M., 1983: An Introduction to Solar Radiation. - 101 S., Academic Press, New York.
- MATSON, M. & DOZIER, J., 1981: Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **47**: 1311-1318.
- OERTEL, D., BRIESS, K., LORENZ, E., SKRBEB, W. & ZHUKOV, B. (2002): Fire Remote Sensing by the Small Satellite on Bi-spectral Infrared Detection (BIRD). - Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, **5**: 341-350, Schweizerbart, Stuttgart.
- SCHAAB, G. (2000): Modellierung und Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Einstrahlungsstärke mittels eines Geo-Informationssystems. Dissert. - 187 S., TU Dresden.
- TETZLAFF, A., 2003: Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), DLR, Abt. Umwelt und Geoinformation, mündl. Mitteilung.
- WOOSTER, M. J. & KANEKO, T., 2001: Testing the accuracy of solar-reflected radiation corrections applied during satellite shortwave infrared thermal analysis of active volcanoes. - Journal of Geophysical Research, **106** (B7): 13381-13393.