

# Thermische Hyperspektralbildgebung im langwelligem Infrarot

Hannu Holma, Antti-Jussi Mattila, Aappo Roos, Timo Hyvärinen, Specim, Oulu, Finnland  
Oliver Weatherbee, SpecTIR LLC, Fairfax, Virginia, USA

**Hyperspektrale Bildgebung hat für Anwendungen in der Biomedizin, Chemie, Industrie, Luftfahrt und auf dem Verteidigungssektor stark an Bedeutung gewonnen. In diesem Fachaufsatz zeigen wir die Entwicklung der äußerst leistungsfähigen hyperspektralen Bildgebungstechnik im langwelligem Infrarot für neue und anspruchsvolle Anwendungen.**



Bisher mussten in der thermischen Hyperspektralbildgebung die Optiken mit Stickstoff gekühlt werden, um die eigene Wärmestrahlung der Geräte zu unterdrücken. Die Umsetzung war eine deutlich größere Herausforderung, als bei Breitband-Kameras. Grund ist, dass das optische Signal des Messobjekts spektral aufgeweitet ist, die Strahlung des Messgeräts aber nicht. Ohne jegliche Abschirmung kann die Gerätestrahlung die des Messobjekts um das tausendfache überschreiten. Nur durch neuartige Entwicklungen kann die Gerätestrahlung inzwischen hinreichend stark reduziert werden. Bei 10  $\mu\text{m}$  Wellenlänge kann ein Signal-Rausch-Abstand (SNR) größer 700 erreicht werden, wenn das detektierte Lichtsignal von einem Messobjekt in normaler Umgebungstemperatur von 300 K stammt.

Die Bauart des Empfängers bestimmt zum größten Teil die Leistung der thermischen Hyperspektralkamera und den Anwendungsbereich, in dem sie eingesetzt werden kann. Unser Beitrag demonstriert praktische Messmethoden in der Bildgebung mit Hyperspektralkameras im langwelligem Infrarot (LWIR, 7 bis 14  $\mu\text{m}$ ) unter Verwendung von Flächensensoren auf Basis Stirling-gekühlter (<70 K) Quecksilber-Kadmium-Tellurit Detektoren (MCT) oder ungekühlter Mikrobolometer.

Derzeit existieren nur wenige leistungsfähige Geräte, die gleichzeitig auch eine hohe Benutzerfreundlichkeit bieten. Das Sebass-Gerät der Aerospace Corporation, El Segundo, California, USA, ist immer noch ein Referenz-Bildgeber für LWIR-Experimente aus der Luft. Es ist jedoch sehr

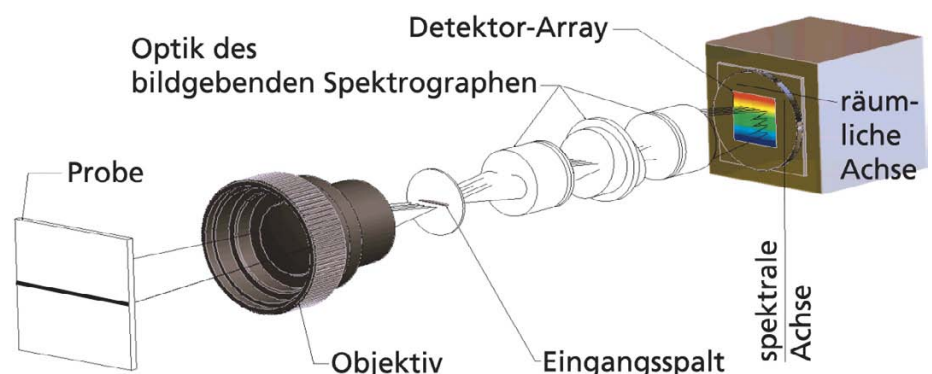
groß und benötigt spezielles Wissen für die Bedienung und Wartung [1,2]. Durch das steigende Interesse an thermischer Spektralbildgebung im Verteidigungssektor und im kommerziellen Bereich entwickeln die Hersteller bildgebende Spektrometer, die sowohl auf der Technik zeilenweiser Abtastung als auch auf Fourier-Transformation (FT) basieren und für Experimente im Labor-, Außen- und Lufteinsatz [3] geeignet sind.

## 1 Hyperspektrale Bildgebung

Der Zweck der hyperspektralen Bildgebung ist die Abbildung des Messobjekts, wobei jedes Pixel ein vollständiges Spektrum beinhaltet. Folglich kann sich die hyperspektrale Bildgebung den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Spektren benachbarter Bildpunkte zu Nutzen machen, was verbesserte räumlich-spektrale Modelle für

eine exakte Aufteilung und Klassifikation des Bildes ermöglicht. Da es sich um eine relativ neue analytische Methode handelt, ist das Potential der hyperspektralen Bildgebung noch nicht annähernd ausgeschöpft.

Es existieren mehrere Verfahren, um hyperspektrale Aufnahmen zu erstellen. Ein "push-broom"-Bildgeber nimmt einzelne Bildzeilen auf. Deshalb muss entweder das Messobjekt oder die Kamera bewegt werden, um das gesamte hyperspektrale Bild aufzunehmen. Das Gerät setzt sich aus drei Hauptbestandteilen zusammen: der vorderen Optik, einem Bild-Spektrographen und einem Kamerasensor (**Bild 1**). Die vordere Optik ist ein Kameraobjektiv, das für den gewünschten Spektralbereich, das Öffnungsverhältnis, das Sehfeld und die Sensorgröße optimiert wurde, bei gleichzeitiger Minimierung der Aberration und des Streulichts. Die aufzunehmende Objektzeile



**Bild 1: Prinzip eines hyperspektralen Bildgebers in Zeilenscan-Technik. Der bildgebende Spektrograph beinhaltet eine PGP-Optik (Prisma-Beugungsgitter-Prisma)**

wird auf einen schmalen Spalt abgebildet, der den Eingang des Spektrometers darstellt. Der Spalt dient als Bildblocker, der nur das Licht einer einzelnen Zeile des abzubildenden Objekts in das Spektrometer eindringen lässt. Je schmaler der Spalt, desto höher ist die spektrale Auflösung, die erreicht werden kann.

Das Licht, das durch den Spalt fällt, wird durch den Spektrographen zerlegt und auf ein zweidimensionales Detektor-Array (Kamerasensor) geworfen. Die Zeilenabbildung auf das Detektor-Array erfolgt parallel zum Spalt, und das Spektrum eines jeden Messpunktes wird orthogonal dazu auf der Detektorfläche abgebildet. Die vollständige Aufnahme ist am Ende ein dreidimensionaler „Daten-Würfel“.

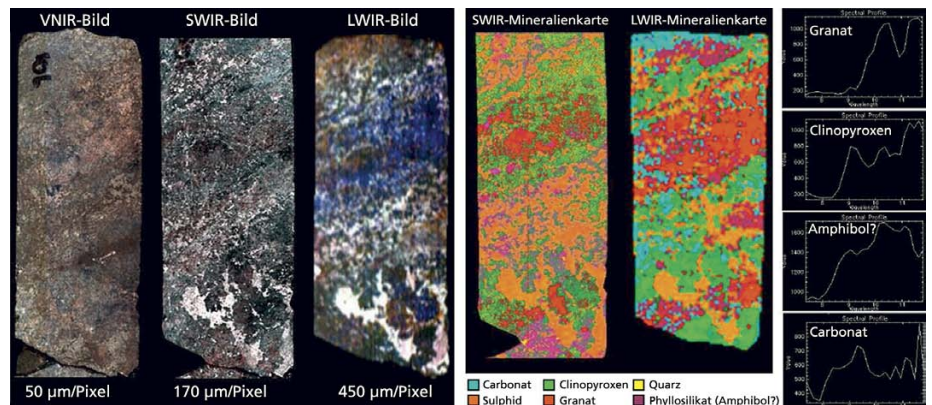
Die Methode der zeilenweisen Aufnahme ist immer noch die einzige Hyperspektraltechnik, die für jegliche Messungen im Labor-, Außen-, Luft- und Prozesskontrollereinsatz verwendet werden kann. Die Vorteile sind qualitativ hochwertige Aufnahmen bewegter Objekte und ein deutlich höheres Signal/Rausch-Verhältnis als bei optomechanischen Verfahren.

Das Ausgangssignal der Kamera korreliert mit der spektralen Helligkeit des Messobjekts, aber auch mit der Strahlung des Geräts, abhängig von dessen Temperatur. Deshalb setzen hyperspektrale Bildgeber eine spektrale und radiometrische Kalibrierung voraus, um die Wellenlänge und spektrale Bandbreite des Messobjekts mit der Bandbreite und dem Signal des Bildgebers abzugleichen. Ein neuer Ansatz hierfür macht es möglich, dass kein integrierter Schwarzkörper-Kalibrierstrahler mehr benötigt, sondern dieses Eichverfahren durch eine auf dem Chip integrierte Überwachung der Hintergrundstrahlung (BMC) ersetzt wird. Indem die Gerätestrahlung kontinuierlich gemessen wird, kann das Hintergrundsignal von jedem Einzelbild abgezogen werden.

## 2 Anwendungsbeispiele

### 2.1 Reflektive chemische Bildgebung in Labor und Industrie

Bisher war die chemische Bildgebung auf Basis hyperspektraler Verfahren im industriellen Umfeld auf das sichtbare Spektrum und das nahe Infrarot (VNIR) sowie das kurzwellige Infrarot (SWIR) beschränkt. Zahlreiche Messobjektmaterialien haben jedoch ihre deutlichste spektrale Signatur im LWIR-Bereich. Beispielsweise lassen sich geologische Proben wie Bohrkern durch Zusammenführung der spektralen Bildgebung im SWIR und LWIR schnell auf nahezu alle Mineralien hin untersuchen, die von kommerziellem Interesse sind. LWIR ist in



**Bild 2: Reflexionsmessungen.** VNIR-, SWIR- und LWIR-HS-Kameras von Specim wurden für die Abbildung von Mineralien verwendet. Eine LWIR-Kamera ist für Charakterisierung von Quarz, Granat und Feldspat unverzichtbar (Bild: AngloGold Ashanti)

der Praxis unverzichtbar für den Nachweis von Mineralien wie Feldspat, Quarz, Kalkspat, Granat und Olivingruppen.

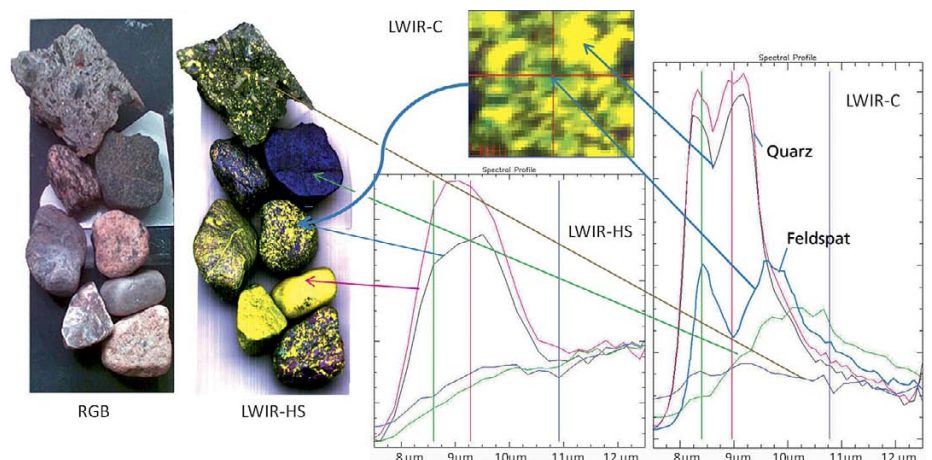
**Bild 2** zeigt den Teil einer Bohrkernprobe, die mit VNIR-, SWIR- und LWIR-Spektalkameras im Reflexionsmodus aufgenommen wurde. Halogenleuchten dienen als Lichtquelle für die VNIR- und SWIR-Kameras, während ein Quarz-Heizstrahler als Beleuchtung für die LWIR-Kamera eingesetzt wurde. Obwohl es sich bei der LWIR-Lichtquelle nur um einen Prototypen handelte, konnten verlässliche Mineralien nachweise erlangt werden. In der Gesteinskunde bieten die LWIR-Daten wertvolle Zusatzinformationen, die zuverlässige Mineralien nachweise ermöglichen.

**Bild 3** zeigt LWIR-Reflexionsmessdaten zur Identifikation der Mineralien. Für die Messungen wurde ebenfalls ein Quarz-Heizstrahler als Lichtquelle verwendet. Feldspat und Quarz können leicht voneinander

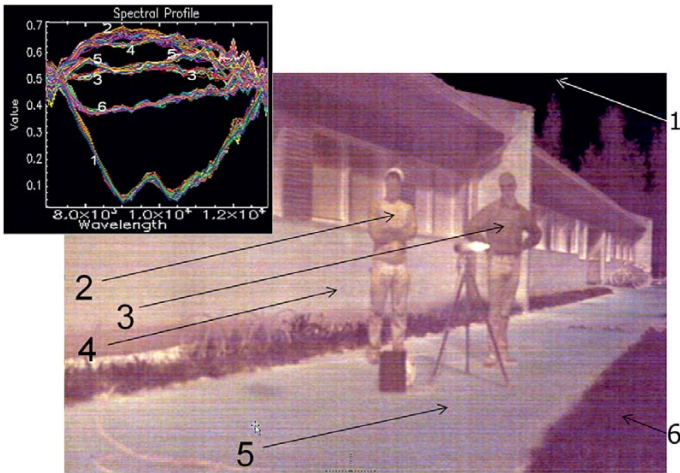
unterschieden werden. Anhand vorläufiger Studien wurde aufgezeigt, dass sogar Plagioklas-Feldspate abhängig von ihrer Zusammensetzung unterschieden werden können. Dies würde einen großen Nutzen in der Planung und Optimierung kommerzieller Mineneinsätze darstellen.

### 2.2 LWIR-Emissionsmessungen im Freien

Die Emissionsmessung in **Bild 4** wurde mit einem LWIR-Gerät aufgenommen, das für Reflexionsmessungen mit künstlicher Beleuchtung ausgelegt wurde. Die LWIR-Daten wurden normiert, indem 60°C und 3°C Schwarzkörper-Objekte als Referenzen verwendet wurden: normierte Daten = (Messdaten - kaltes Referenzobjekt) / (warmes Referenzobjekt - kaltes Referenzobjekt). In der Aufnahme sind u.a. folgende Details zu erkennen: Der Rahmen des Fensters zeigt eine leichte Temperaturdifferenz



**Bild 3: Reflexionsmessungen.** Eine Ansammlung von Steinen wurde mit LWIR-HS- und LWIR-C-Kameras aufgenommen. Die LWIR-C erreicht eine bessere Abtastung und Auflösung, was zu einer exakteren Identifikation der Mineralien führt. In der vergrößerten LWIR-C-Aufnahme ist das Feldspat-Spektrum deutlich erkennbar. Das LWIR-C-Gerät bietet eine außergewöhnlich hohe Empfindlichkeit, besonders im Spektralbereich von 10,5 bis 12,4 µm



**Bild 4: Emissionsmessungen. Ein Aufnahmeexperiment im Freien (August, 2010) mit der LWIR-HS-Kamera bei einer Umgebungstemperatur deutlich über  $+10^\circ\text{C}$ . Relative Spektren diverser Objekte in der Aufnahme sind dargestellt: 1. Die Ozonstrahlung der Atmosphäre, 2. Das T-Shirt der ersten Person, 3. Das T-Shirt der zweiten Person, 4. Steinmauer, 5. Gehweg, 6. Rasen**

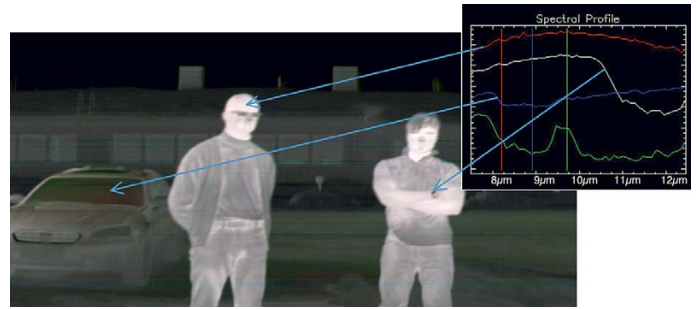
zu den Fensterläden und der Wand. Ein Heizlüfter ist als heller Fleck auf einem Stativ sichtbar, das schwarze Quadrat darunter ist ein gewöhnliches Heft aus Papier.

**Bild 5** zeigt eine LWIR-Aufnahme im Freien mit radiometrischer Korrektur unter winterlichen Bedingungen ( $-15^\circ\text{C}$ ). Das Bild wurde mit einem Gerät aufgenommen, das wesentlich besser für Emissionsmessungen geeignet ist. Trotz des signifikanten Temperaturunterschieds von nahezu 30 K sind die Messdaten denen aus Bild 4 deutlich überlegen. Die Spektren der verschiedenen Objekte haben klar unterscheidbare Merkmale. Beispielsweise kann das Emissionsspektrum des Uhrglases identifiziert werden.

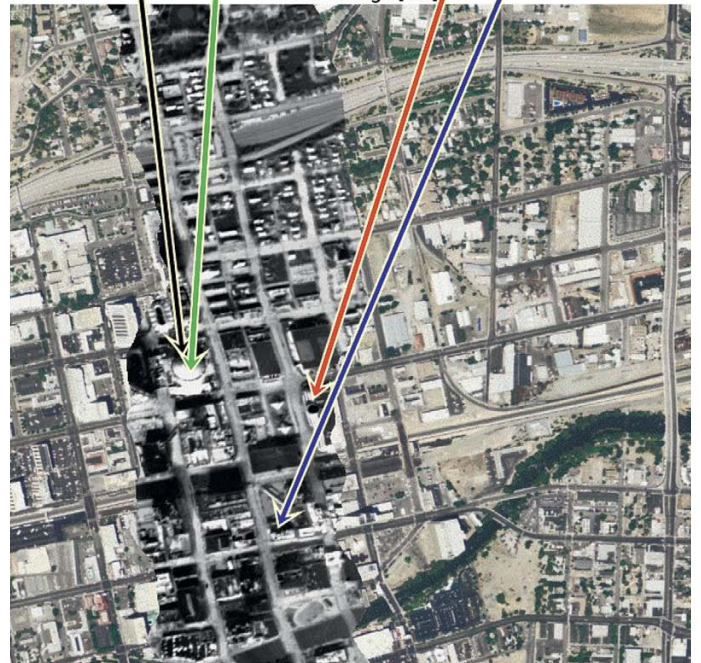
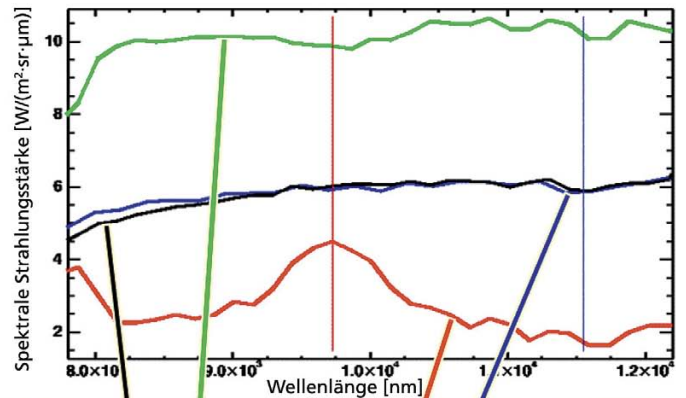
### 2.3 LWIR-C Flugexperiment

Ein thermisches Hyperspektral-Bildgebungssystem namens AisaOWL wurde für Luftaufnahmen mithilfe einer LWIR-Hyperspektralkamera realisiert. Die ersten Testflüge wurden im März 2011 durchgeführt. Messdaten mit einer Oberflächenauflösung von einem Meter pro Pixel wurden über Reno City und den Cuprite Hills, Nevada, USA, gesammelt. Der Stadtbereich wurde aufgenommen, um die Bildqualität der Kamera zu verifizieren, und um die Kamera und den GPS/INS-Sensor für präzise Georeferenzierung gegeneinander abzugleichen. **Bild 6** zeigt einen Ausschnitt der Flugroute über die Innenstadt Renos. Die Graustufen in der Aufnahme repräsentieren die Strahlungsniveaus im LWIR-Wellenlängenband. Die Messdaten wurden bei Tageslicht aufgenommen; Hitze und reflektiertes Sonnenlicht gehen mit in die Messungen ein. Die Spektren verschiedener Objekte zeigen sowohl den spektralen Emissionsgrad als auch Temperaturunterschiede. Das Wetter war sonnig aber kalt, mit Temperaturen etwas über  $0^\circ\text{C}$ , nach einer Nacht mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Auf den Straßen und Dächern liegt etwas Schnee.

Die Rotkupfererz-Region der Cuprite Hills ist eines der Gebiete, auf die weltweit in der Kartographie von Mineralienvorkommen am häufigsten Bezug genommen wird. Diese Region wurde schon mit mehreren LWIR-Geräten aufgenommen, u.a. mit dem Sebass, und sie ist deshalb eine geeignetes Referenzgebiet, um Kartographiedaten von Mineralienvorkommen zu erfassen, die zur Bewertung eines neuen Hyperspektralinstrumentes dienen können. Das Flugrouten-Mosaik in **Bild 7** wurde mittels digitalem Evaluationsmodell geore-

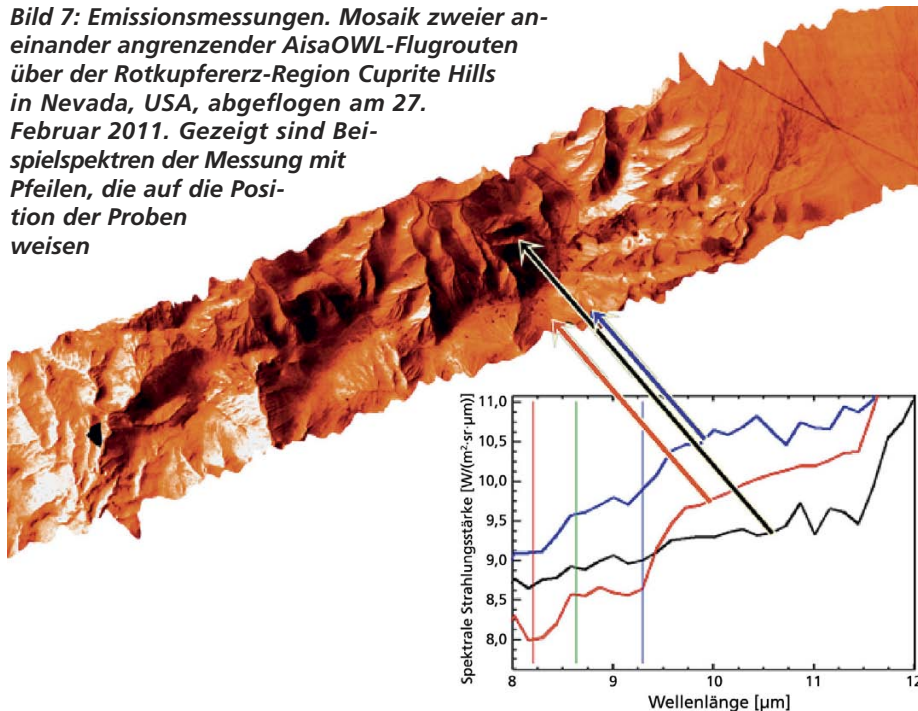


**Bild 5: Emissionsmessungen, ein Aufnahmeexperiment im Freien mit der LWIR-C-Kamera unter winterlichen Bedingungen (Februar 2011), Umgebungstemperatur  $-15^\circ\text{C}$ . Relative Spektren diverser Objekte der Aufnahme sind mit Pfeilen markiert. Das grüne Spektrum zeigt klaren Himmel, die Strahlung der Ozonschicht ist eindeutig erkennbar**



**Bild 6: Emissionsmessungen. Ein AisaOWL-Flug am 27. Februar 2011 über die Innenstadt von Reno, Nevada, USA. Die Messdaten sind als schwarz-weißer Streifen in der Mitte des Bildes dargestellt, das in eine Aufnahme im sichtbaren Spektrum eingebettet ist, um die räumliche Übereinstimmung zu belegen. Die blaue Messkurve stammt vom schattigen Hof eines Gebäudes. Die rote Kurve kommt von einer kreisförmigen, sehr kalten Konstruktion in der Nähe des Silver Legacy Casino. Die grüne und schwarze Kurve sind die Spektren der sonnigen bzw. schattigen Seite des Doms des Silver Legacy Casino**

**Bild 7: Emissionsmessungen. Mosaik zweier aneinander angrenzender AisaOWL-Flugrouten über der Rotkupfererz-Region Cuprite Hills in Nevada, USA, abgeflogen am 27. Februar 2011. Gezeigt sind Beispielspektren der Messung mit Pfeilen, die auf die Position der Proben weisen**



ferenziert und kartographiert, die Oberflächenaufösung beträgt 1 m. Das Wetter war sonnig, und die Temperaturen lagen etwas über 0°C, in der Nacht zuvor gab es Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Auf dem Boden ist kein Schnee sichtbar. In **Bild 7** sind Beispielspektren einiger Formationen dargestellt. Vorläufige Vergleiche zeigen eine exzellente Übereinstimmung mit den vorhandenen Referenzdaten. Die neuen Messdaten werden derzeit (April 2011) im Detail analysiert, die Ergebnisse werden zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht.

## Fazit

In zahlreiche Anwendungen der Industrie, in der Wissenschaft und im Verteidigungssektor, in denen hohe spektrale Auflösung und ein hohes Signal/Rausch-Verhältnis ausschlaggebend ist, hat sich der Einsatz hyperspektraler Bildgebung in der LWIR-Region deutlich vereinfacht und ist somit praktikabler durchführbar.

Übersetzung: M. Gerlach

## Literaturhinweise:

- [1] E. Kirkland, K.C. Herr, E.R. Keim, P.M. Adams, J.W. Salisbury, J.A. Hackwell, A. Treiman, *First Use of an Airborne Thermal Infrared Hyperspectral Scanner for Compositional Mapping*, Remote Sens. Environ. 80, 447–459, (2002)
- [2] A.G. Mares, R.C. Olsen, P.G. Lucey, *LWIR Spectral measurements of volcanic sulfur dioxide plumes*, Proceedings of the SPIE, Volume 5425, pp. 266–272 (2004)
- [3] M. Chamberland, C. Belzile, V. Farley, J.-F. Legault, K. Schwantes, *Advancements in field-portable imaging radiometric spectrometer technology for chemical detection*, Proc. SPIE, Vol. 5416, 63 (2004)

- [4] E.L. Dereniak, G.D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems*, John Wiley & Sons, (1996)
- [5] P.W. Kruse, *Uncooled Thermal Imaging*, SPIE Tutorial Texts in Optical Engineering Vol. TT51, (2001)
- [6] H. Holma, T. Hyvärinen, J. Lehtomaa, H. Karjalainen, R. Jaskari, *Advanced pushbroom hyperspectral LWIR imagers*, Proc. SPIE, Vol. 7319, 731907 (2009), DOI:10.1117/12.818557
- [7] *World First Thermal Hyperspectral Camera for Unmanned Aerial Vehicles*, Frost&Sullivan, Aerospace and Defense Technology Insight, February 2011

## Ansprechpartner:

Aappo Roos  
Geschäftsführer  
Specim, Spectral  
Imaging Ltd.  
P.O.Box 110  
90591 Oulu  
Finnland  
Tel. +358/104244435  
Fax +358/8388580  
eMail: aappo.roos@specim.fi  
Internet: www.specim.fi



## LASER 2011: Stand B1.641

Oliver Weatherbee, PhD  
Technischer Leiter  
SpecTIR LLC  
11781 Lee Jackson  
Memorial Highway,  
Suite 210  
Fairfax, Virginia 22033  
USA  
Tel. +1/703/8770777  
Fax +1/703/8770788  
eMail: oweatherbee@spectir.com  
Internet: www.spectir.com

