

Ein radiometrisch kalibrierbares multispektrales abbildendes System hoher Dynamik

C. Hahlweg und H. Rothe*

Helmut Schmidt Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg
Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren wurde am Lehrstuhl für Meß- und Informationstechnik der HSU Hamburg ein experimentelles multispektrales Kamerasystem hoher Dynamik entwickelt, mit dem multispektrale Bilddaten über einem großen Wellenlängenbereich lückenlos und schnell erfaßt und auf für eine spätere schmalbandige Verarbeitung interessante Bereiche hin untersucht werden können. Das System basiert auf der Kombination von elektronisch abstimmbaren Filtern und hochdynamischen Kameras und erlaubt die Erfassung des Wellenlängenbereiches von $400nm - 1100nm$ mit einem Dynamikumfang von bis zu $22Bit$, wodurch eine lineare radiometrische Messung über 6.5 Dekaden möglich wird.

Einleitung/ Stand der Technik

Am Markt verfügbare multi- und hyperspektrale bildgebende Systeme basieren i.a. auf scannenden Verfahren, bei denen Prismen, Gitter oder Kombinationen aus beiden als disperse Elemente dienen. Die Bilder werden dann linienweise zusammengesetzt¹ und sind oft auf eine geringe Pixelzahl beschränkt. Höher auflösende Systeme sind z.B. mit einer Dynamik von $12Bit$ erhältlich². Auf dem Markt findet sich derzeit auch ein filterbasiertes Gerät, basierend auf CCD-Kameras³. Allgemein handelt es sich um sehr kostenintensive Geräte.

Am Lehrstuhl für Meß- und Informationstechnik der HSU wurde in den vergangenen Jahren ein multispektrales Kamerasystem hoher Dynamik entwickelt. Hintergrund der Entwicklung war primär die Erstellung eines preiswerten experimentellen Systems, mit welchem multispektrale Bilddaten über einem großen Wellenlängenbereich lückenlos und schnell erfaßt und auf für eine spätere schmalbandige Verarbeitung interessante Bereiche hin untersucht werden konnten. Das System basierte auf CCD-Kameras und erlaubte zunächst die Erfassung von 8-Bit-Bildern.

Im Zusammenhang mit der ebenfalls am Lehrstuhl vorangetriebenen multispektralen Streulichtmeßtechnik entstand der Bedarf, radiometrisch kalibrierte multispektrale Bilddaten sehr hoher Dynamik zu erfassen. Somit können nunmehr auch für Materialoberflächen das Streuverhalten über dem Raumwinkel und das optische Erscheinungsbild meßtechnisch zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Es erfolgte daher eine Umstellung auf CMOS-Kameras mit einem Dynamikumfang von bis zu $22Bit$, wodurch eine lineare radiometrische Messung über 6.5 Dekaden möglich wurde.

Als steuerbare Filter kommen sogenannte LCTF - Liquid Crystal Tunable Filter – zum Einsatz. Das System erlaubt die Erfassung von Bilddaten in einem Wellenlängenbereich von $400nm - 1100nm$. Die einzelnen Kanäle von $10nm$ Breite können in ihrer Mittenwellenlänge frei gewählt werden.

*correspondence: H. Rothe, e-mail: rothe@hsu-hh.de; C. Hahlweg, e-mail: hahlweg@hsu-hh.de

Da ein solches LCTF nur einen begrenzten Wellenlängenbereich abdeckt, wurde das Gerät als Zweikamera-System ausgelegt.

Die Anordnung erlaubt die Aufnahme einer kompletten Bildserie von 400nm - 1100nm in 10nm -Schritten bei 22Bit Dynamik und VGA-Auflösung in ca. 45s . Das System ist daher vorwiegend zur Untersuchung stationärer bzw. quasistationärer Szenen geeignet. Geschwindigkeitssteigerungen sind durch Beschränkung auf bestimmte Bildbereiche, Einschränkung des Wellenlängenbereiches und der Dynamik möglich.

Gerätekonzept

Randbedingungen

Die wesentlichen Randbedingungen sind durch die Spektralbereiche der verwendeten elektrisch abstimmbaren Filter gegeben. Diese sind 400nm - 720nm im Visuellen (VIS) und 650nm - 1100nm im Nahen Infrarot (NIR). Um den Bereich von 400nm - 1100nm ohne mechanische Änderungen abdecken zu können, müssen zwei getrennte Kamera-Filter-Systeme bereitgestellt werden.

Eine weitere Bedingung ist durch die optische Länge der Filter gegeben. Mit einer Länge von 50mm können das VIS- und das NIR-Filter vor ein Kameraobjektiv geschaltet werden.

Elektrisch abstimmbare Filter

Elektrisch abstimmbare Filter haben gegenüber mechanischen Filtern den Vorteil, schnell, einfach und präzise einstellbar zu sein. Hierfür kommen sogenannte LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter) zum Einsatz. Die Funktionsweise dieser Filter soll an dieser Stelle kurz erläutert werden.

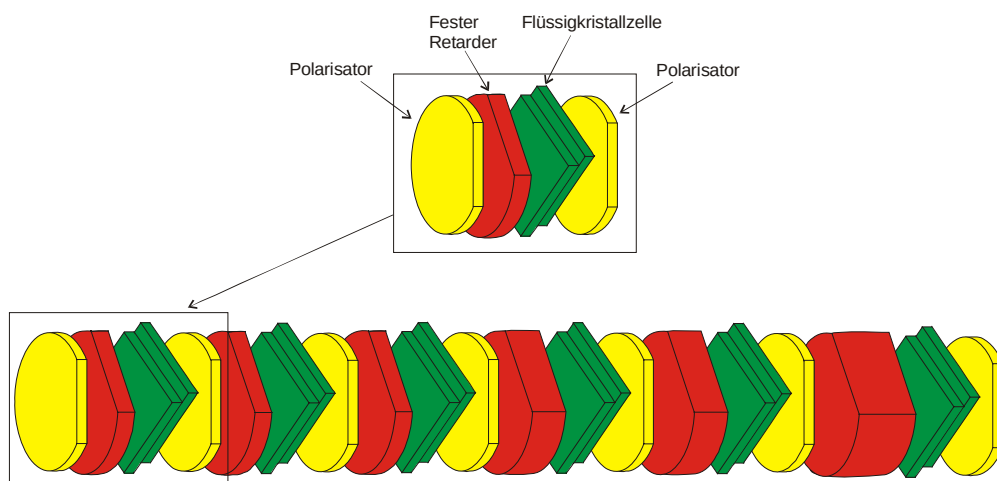


Abbildung 1. Aufbau des abstimmbaren Filters nach dem Lyot-Filterprinzip [CRI].

Ein Filter besteht aus einer Abfolge von mehreren einzelnen Filterelementen. Jedes Filterelement arbeitet nach dem von Bernard Lyot in 1933 beschriebenen Prinzip. Das Element setzt sich aus Polarisator, festem Retarder und Flüssigkristallzelle zusammen (Abbildung 1). Die Transmission jedes Filterelements ändert sich sinusförmig mit der Wellenlänge (Abbildung 2), durch eine geeignete Abfolge derartiger Filterelemente entsteht ein Bandpassfilter (Abbildung 3).

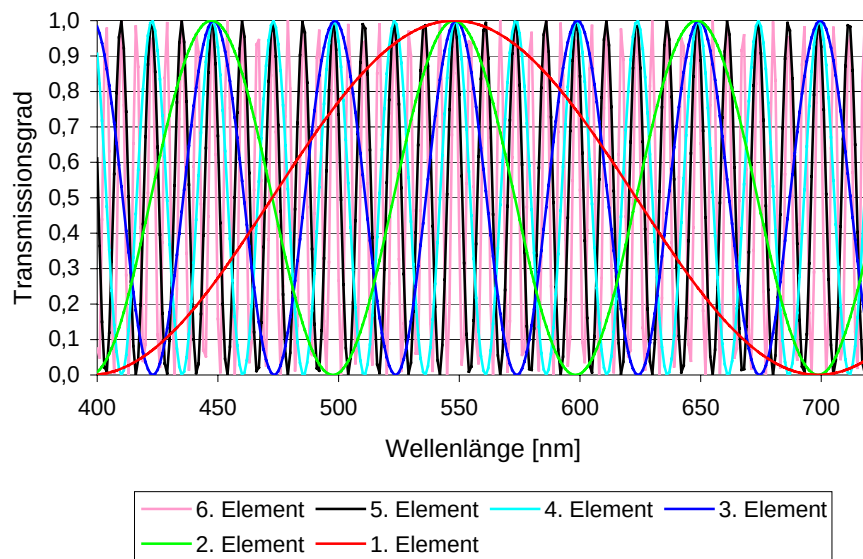


Abbildung 2. Zur Funktionsweise des LCTF [CRI].

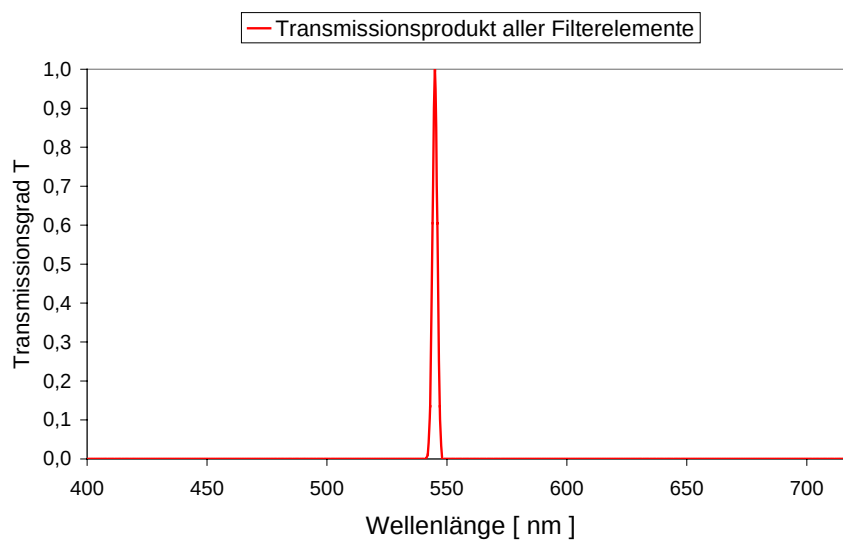


Abbildung 3. Transmissionsprodukt [CRI].

Die verwendeten Filter der Firma CRI werden über jeweils eine elektronische Steuerbox, die über die USB-Schnittstelle des Rechners angesprochen wird, abgestimmt, vgl. Abbildung 4. Jede Steuerbox stellt dabei einen virtuellen COM-Port zur Verfügung. Es besteht die Möglichkeit der bidirektionalen Kommunikation, so, daß einerseits die Filter gesteuert werden können, andererseits auch Statusabfragen möglich sind.

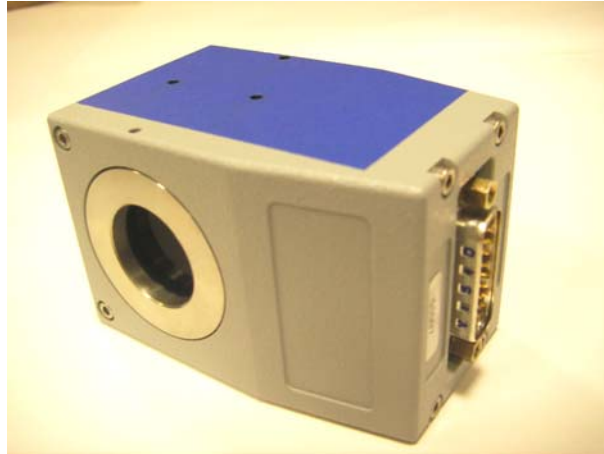


Abbildung 4. Das verwendete Filter CRI Varispec LCTF.

Die spektralen Transmissionskurven der verwendeten Filter sind in den Abbildungen 5a und 5b dargestellt.

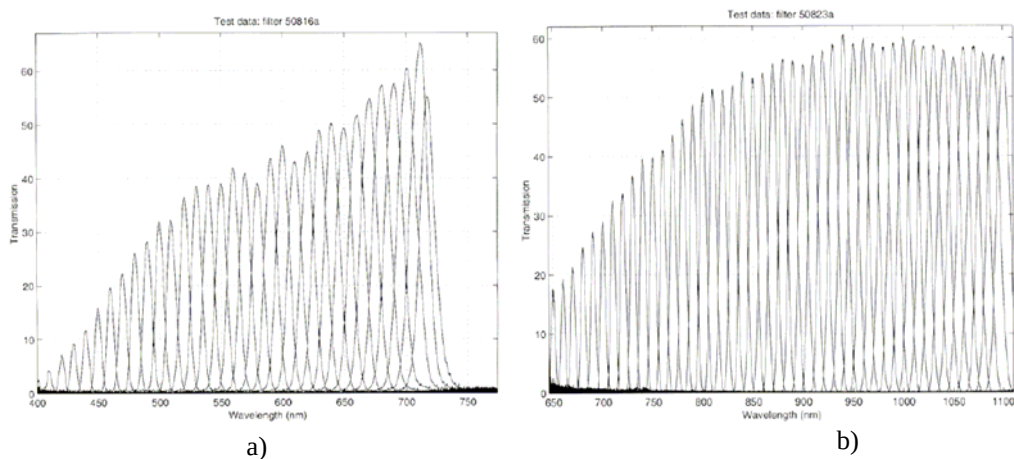


Abbildung 5. Spektralgänge von a) VIS- und b) NIR- Filter [CRI].

Jede Teilkurve stellt dabei die relative Transmission bei einer gegebenen Mittenwellenlänge dar. Insbesondere beim VIS-Filter (Abbildung 5a) fällt eine starke Änderung der maximalen Transmission über der Mittenwellenlänge auf. So fällt die Transmission bei 410nm auf unter 5% ab, was zu Dynamikeinschränkungen an der unteren spektralen Grenze des Systems führen kann.

Weiter sollte bei gemeinsamer Benutzung der Teilsysteme die Wahl der Wellenlänge des Übergangs vom VIS- zum NIR-System geeignet gewählt werden. Wie nachfolgend noch erläutert wird diese im hier realisierten System durch vorgeschaltete cut-off-Filter fixiert.

Teilsysteme

In Abbildung 6 ist die Funktionsweise des Zweikamerasystems schematisch dargestellt. Die Filtersteuerungen sind über USB, die Kameras über *fire-wire* mit dem Steuerrechner verbunden. Die Filter sind vor die Objektive der Kameras geschaltet (*front-of-lens*-Konfiguration). Ablaufsteuerung und Datenerfassung erfolgen vom Rechner aus. Die erfassten Daten werden in geeigneten Dateien auf dem Rechner abgelegt.

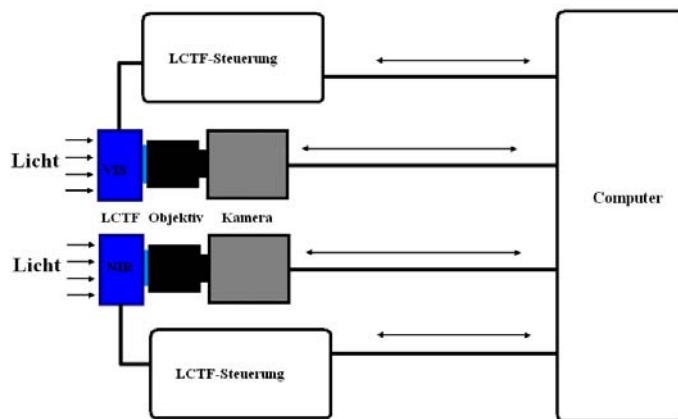


Abbildung 6. Schematische Darstellung des Kamera-Filter-Systems.

Es kommen handelsübliche CMOS-Kameras hoher Dynamik zum Einsatz. Damit ist eine Bildaufnahme ohne zusätzliche Helligkeitsregelung über den gesamten betrachteten Spektralbereich möglich, was direkt zu radiometrisch kalibrierbaren Daten führt.

Sperrfilter/Einschränkung Wellenlängenbereich

Auf Grund des physikalischen Prinzips der LCTF besitzen diese bei eingestellter Mittenwellenlänge weitere periodisch auftauchende Durchlaßbereiche außerhalb des spezifizierten Arbeitsbereiches, die u.U. noch in die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Kameras fallen. Es ist daher notwendig, die beiden Teilsysteme mit zusätzlichen Sperrfiltern auszurüsten.

Mechanischer Aufbau

Um die Justage der Objektive zu ermöglichen, werden die Kameras auf Schlitten montiert und mittels einer Feder schlüssig an die Filter gedrückt. Diese Art der Führung des Objektivs ermöglicht die optische Justage im verbauten Zustand (Schärfe etc.). Um den Parallaxenfehler zwischen den beiden Kameras zu minimieren, werden die beiden Teilsysteme auf schwenk- und kippbaren Grundplatten im Gehäuse montiert (Abbildung 7).



Abbildung 7. Kamera mit Objektiv und Zentrierring.

Das Gehäuse des Kamerasystems ist mit Sichtfenstern aus Borofloat™ für die Teilsysteme versehen. Dieses Material verfügt neben einer hohen und konstanten Transmission im

betrachteten Spektralbereich über eine hohe mechanische, thermische und chemische Stabilität. Damit können die empfindlichen Filter im Gehäuse weiter geschützt werden.

Als Steuerrechner dient ein handelsübliches Notebook. Steuerboxen und Stromversorgungen wurden in einer wetterfesten Transportbox installiert, welche auch Kamerakopf und Rechner aufnehmen kann. Abbildung 8 zeigt den Gesamtaufbau. Als mobile Spannungsversorgung dient ein Brennstoffzellenaggregat auf Wasserstoffbasis.

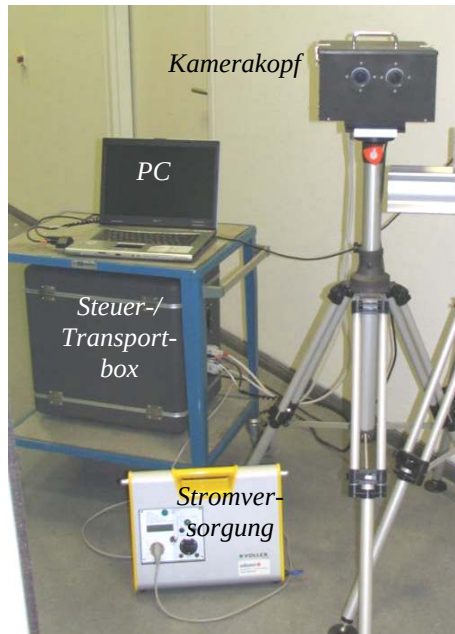


Abbildung 8. Gesamtsystem.

Das System ist damit mobil und für Feldversuche unter ungünstigen Witterungsbedingungen geeignet.

Steuer- und Datenerfassungssoftware

Systemkonzept

Ziel ist es, den Zeitaufwand für die Erfassung einer multispektralen Bilderserie so gering wie möglich zu halten. Dabei ist vor jeder Aufnahme das jeweilige Filter umzuschalten und die Einstellzeit des Filters abzuwarten, ehe die eigentliche Bildaufnahme erfolgen kann. Da – je nach gewünschtem Spektralbereich - ggf. beide Teilsysteme genutzt werden, wird für den Bildeinzug jedem Kamerateilsystem ein eigener Prozeß zugeordnet. Diese Prozesse können dann zeitnah gestartet werden und unabhängig voneinander quasiparallel ablaufen.

Die einzelnen Teilprogramme werden als Konsolenprogramme mit Kommandozeilenaufruf erstellt. Somit ist die Möglichkeit gegeben, den Bildeinzug sowohl aus einer DOS-Konsole als auch aus einer Programmumgebung wie MATLAB heraus zu starten. Ebenso kann problemlos eine geeignete graphische Benutzeroberfläche vorgeschaltet werden. Dabei können sowohl die Bildeinzugsprogramme unabhängig voneinander für die einzelnen Teilkamerasysteme verwendet, als auch gemeinsam aus einem Steuerprogramm heraus aufgerufen werden.

Teilprozesse

Auf Grund des identischen Aufbaus der Teilsysteme für VIS und NIR kann für beide das gleiche Bildeinzugsprogramm verwendet werden. Aufgabe der Ablaufsteuerungsprogrammes ist es, bei der parallelen Verwendung beider Teilsysteme entsprechend der übergebenen Kommandozeilenparameter die Teilprozesse zum Bildeinzug quasiparallel zu starten.

Die Zuordnung der einzelnen Kameras zu den Filtern und die COM-Port-Belegung der Filter sind in einer Konfigurationsdatei festgelegt. Diese Datei wird vom Ablaufsteuerungsprogramm eingelesen und interpretiert und kann sowohl manuell editiert werden, als auch mittels eines eigenen Konfigurationsprogramms automatisch erzeugt werden. Das Konfigurationsprogramm dient der automatischen Erkennung der Zuordnung der Filter zu den virtuellen COM-Ports sowie der Funktionsfähigkeit der Kameras.

SystemLeistung

Das System ermöglicht die Aufnahme einer kompletten Bilderserie mit einer Auflösung von bis zu 656×491 Pixel über einen Bereich von $400\text{nm} - 1100\text{nm}$ in Schritten von 10nm bei 22Bit Dynamik (6.5 Dekaden) ca. 45s. Damit ist das Gerät zunächst vornehmlich zur Untersuchung statischer und quasistatischer Szenen geeignet, z.B. zum Auffinden der für eine bestimmte schmalbandige Applikation optimalen Wellenlängenbereiche.

Anwendungsbeispiele

Beobachtung von Schweissprozessen

Ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Prozeßkontrolle ist die Überwachung von Schmelzbad, Nahtbildung, Elektrodenführung etc. bei MIG-Schweißprozessen. Hier ist es sinnvoll, einen Spektralbereich auszuwählen, in dem nach Möglichkeit die Strahlung des Lichtbogens ausgeschaltet und die zu untersuchenden Bereiche kontrastreich abgebildet werden. Mittels des vorgestellten Systems können auf Grund der hohen Dynamik Schweißprozesse auf einen für eine Prozeßüberwachung geeigneten Spektralbereich hin untersucht werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft zwei schmalbandige Aufnahmen eines Schweißprozesses.

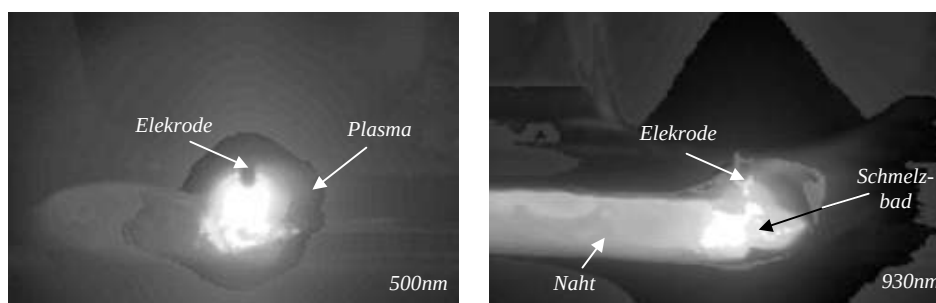


Abbildung 9. Schmalbandige Aufnahmen eines Schweißprozesses bei 500nm und 930nm .

Während bei einer Mittenwellenlänge von 500nm das Plasma des Lichtbogens die Szene überstahlt und die Naht nicht erkennbar ist, können bei 930nm Schmelzbad und Naht beobachtet werden, die Strahlung des Plasmas ist weitgehend ausgeschaltet.

Tarnmittelbewertung

Ein typisches Anwendungsgebiet ist die Bewertung von Tarnmitteln. Abbildung 10 zeigt die Unterscheidung künstlicher von echten Pflanzen mittels Diskriminanzanalyse multispektraler Daten über dem Bereich $440\text{nm} - 760\text{nm}$ (Schrittweite 20nm).

Abbildung 11 zeigt eine Gruppe von Soldaten als Grauwertbild und als Pseudofarbdarstellung nach einer Diskriminanzanalyse $420\text{nm} - 920\text{nm}$ (Schrittweite 20nm). Während im Grauwertbild der mittlere Soldat in der Vegetation fast unentdeckt bleibt, hebt er sich nach der Analyse deutlich ab. Weiterhin kann die Uniform des französischen Soldaten (rechts im Bild) von den Uniformen der deutschen Soldaten (links, Mitte) unterschieden werden.

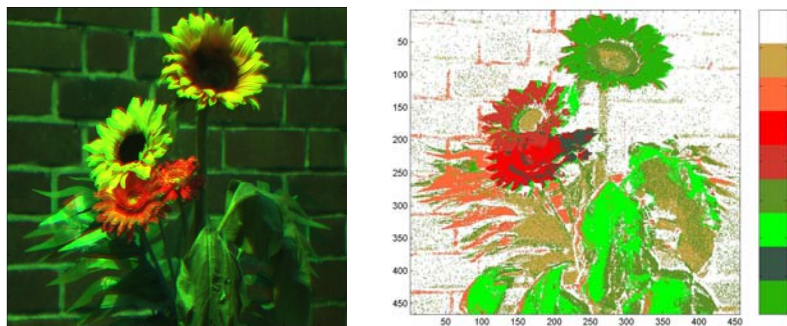


Abbildung 10. Unterscheidung künstlicher von echten Pflanzen.



Abbildung 11. Grauwertbild und Pseudofarbdarstellung Diskriminanzanalyse $420\text{nm} - 920\text{nm}$.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein abbildendes System zur Aufnahme multispektraler Datensätze im Wellenlängenbereich $400\text{nm} - 1100\text{nm}$ konzipiert und umgesetzt. Es handelt sich zunächst um ein experimentelles System zur Untersuchung statischer und quasistatischer Szenen. Besonderer Wert wurde dabei dem hohen Dynamikbereich von bis zu 22Bit beigemessen.

Zukünftige Entwicklungen zielen auf die Steigerung der Geschwindigkeit des Systems und die Integration geeigneter Analysemethoden in die Datenerfassungssoftware.

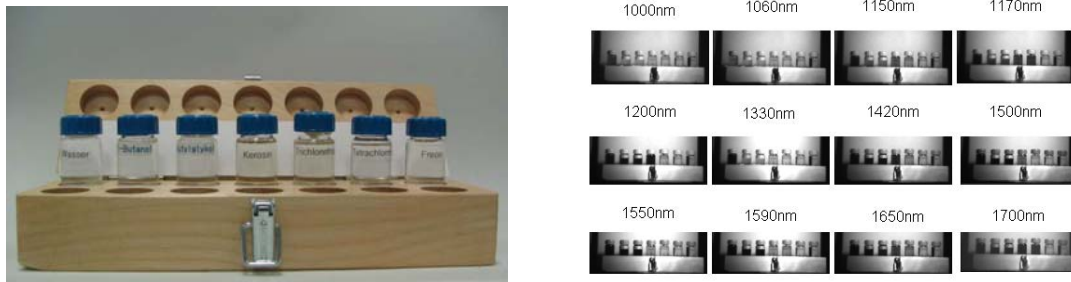


Abbildung 12. Proben verschiedener Flüssigkeiten, a) RGB-Bild, b) Auszüge im SWIR.

Erweiterungen des Spektralbereiches auf 1800nm werden derzeit im Rahmen von Drittmittelprojekten mit Wehrtechnischen Dienststellen der Bundeswehr untersucht.

So zeigt z.B. Abbildung 12 b) das Absorptionsverhalten verschiedener klarer Flüssigkeiten (Abbildung 12 a)) im SWIR, aufgenommen mit einem Prototypen eines in diesem Rahmen aufgebauten Kamerasystems für den Bereich von $850\text{nm} - 1800\text{nm}$ ⁴.

Referenzen

1. Zeutec, *Manual ImSpector*, www.zeutec.de; 2006
2. Surface Optics, *Manuals SOC 700 series*, www.surfaceoptics.com; 2006
3. CRI Inc., *Manual Nuance*, www.cri-inc.com; 2006
4. Rothe, H., Hahlweg, C., *Multispektrales Kamerasystem mit LCTF als programmierbaren Filterelementen*, Optik und Optronik in der Wehrtechnik III, Bonn 2005, ISBN 3-935938-37-3.