

## 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

P. Brückner/N. Correns

# Spektralbildverarbeitung zur Detektion von Stoffen und Oberflächeneigenschaften

## 1. Physikalische Grundlagen

Als Spektrometer bezeichnet man ein Gerät, mit dem man ein Spektrum, die Energieverteilung einer Strahlung über der Wellenlänge, quantitativ bestimmen kann [1]. Im engeren Sinne wird darunter die Untersuchung eines kleinen Ausschnittes des elektromagnetischen Spektrums verstanden. Dieser umfasst das sichtbare Licht von 400-700 nm und die angrenzenden Wellenlängenbereiche der ultravioletten von 350-400 nm (UV) und der nahen infraroten Strahlung von 700-1100 nm (NIR), also insgesamt den Bereich von 350-1100 nm.

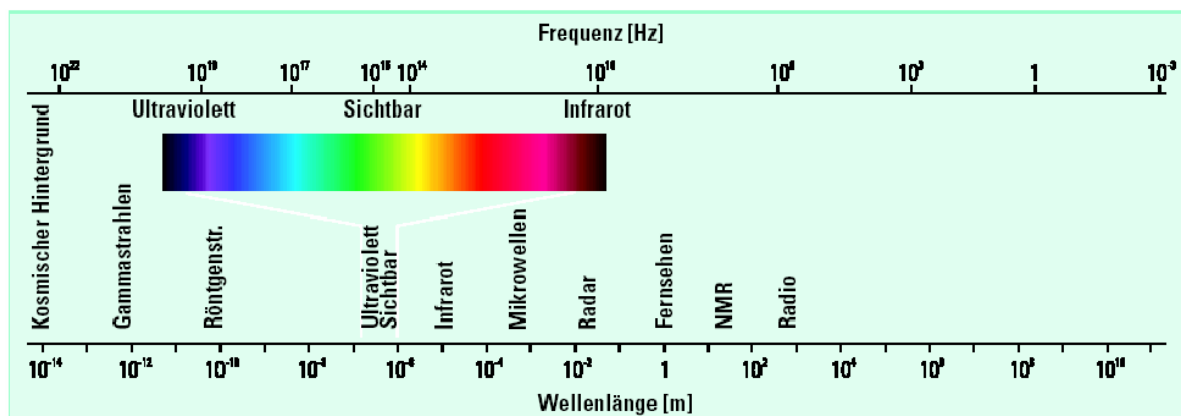
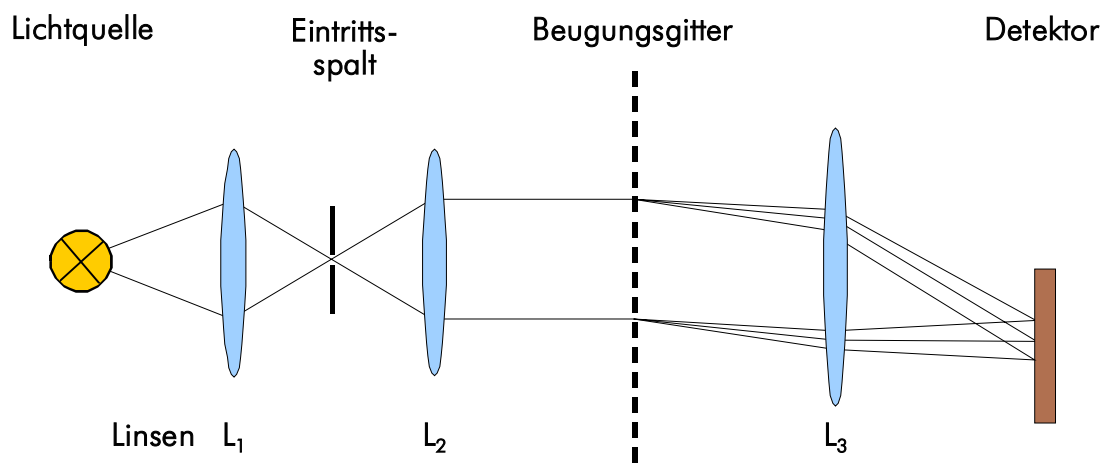


Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum

In Abbildung 1 ist dieser Bereich vergrößert dargestellt und in das gesamte elektromagnetische Spektrum eingeordnet. Die Spektralzerlegung des Lichtes geht auf Isaac Newton zurück, der 1706 erstmalig das weiße Licht als eine Mischung aus verschiedenen Spektralanteilen beschrieb. In der Natur gibt es die eindrucksvolle Erscheinung des Regenbogens für die Spektralzerlegung des weißen Lichtes. Jedoch gibt es im Gegensatz zur Farbbildaufnahme für die Spektralanalyse kein biologisches Vorbild.

## 2. Prinzipieller Aufbau von Spektrometern

Zur Analyse dieser Strahlungsarten verwendet man meist dispersive Spektrometer. Dispersive Spektrometer arbeiten nach dem Prinzip, Strahlungsanteile durch ein dispersives Element (Prismen, Beugungsgitter) räumlich nach der Wellenlänge zu trennen. Die Verteilung der Strahlungsleistung über der Wellenlänge liegt dann als örtliche Strahlungsverteilung vor. Strahlungsanteile verschiedener Wellenlängen können so getrennt voneinander detektiert werden.

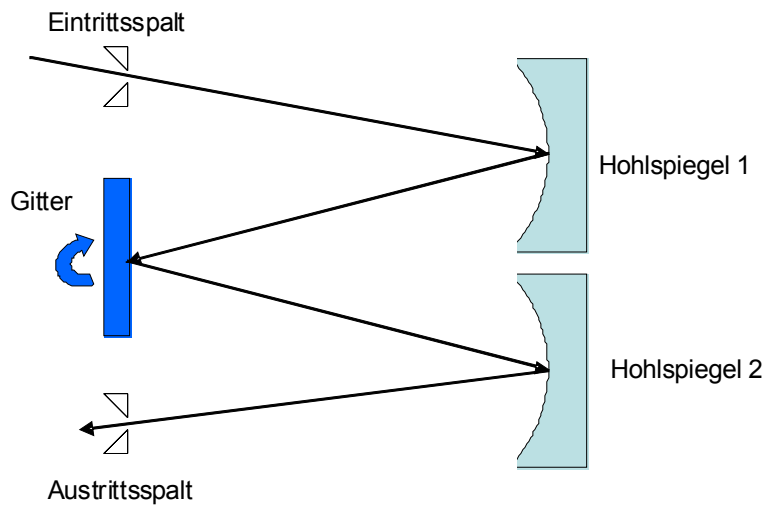


**Abbildung 2:** Prinzipieller Aufbau eines Spektrometers mit Beugungsgitter

Die grundlegenden Elemente eines typischen dispersiven Spektrometers sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Licht gelangt von einer breitbandigen Lichtquelle zu einer Sammellinse. In deren Brennpunkt befindet sich der Eintrittsspalt. Durch diesen Brennpunkt verlaufen alle Parallelstrahlen aus einem Bereich vom Durchmesser der Sammellinse, dem Leuchtfleck. Dadurch ist die dem Spektrometer zugeführte Strahlungsintensität viel größer, verglichen mit einer Konfiguration ohne Sammellinse. Mit Hilfe der Sammellinse  $L_2$  wird das Licht parallelisiert und gelangt auf ein Beugungsgitter, das in einer Richtung, der Dispersionsrichtung, die räumliche Trennung der spektralen Anteile bewirkt. Das hinter dem Gitter entstehende Fraunhofersche Beugungsmuster wird von der Sammellinse  $L_3$  auf den Austrittsspalt abgebildet. Dieser wird meist durch einen Fotodetektor, z.B. eine CCD-Zeile, dargestellt. Dadurch erfolgt auch gleichzeitig die optische Abbildung des Eintrittsspalt auf den Austrittsspalt in die Detektorebene. Das Bild des Ein-

trittsspalts entsteht dabei für jede Wellenlänge in einer anderen Richtung, jeweils mit einer Intensität, die davon abhängt, wie groß die Strahlungsleistung der betreffenden Wellenlänge ist. Durch Aneinanderreihung sämtlicher Spaltbilder gewinnt man den interessierenden spektralen Verlauf der Strahlungsleistung, das Spektrum. Dieses wird von der Fotodiodenzeile detektiert und mit Hilfe einer Auswerteelektronik in Zahlenwerte umgewandelt und ausgegeben. Die CCD-Zeile besteht aus einer diskreten Anzahl lichtempfindlicher Elemente, die jeweils einer bestimmten Wellenlänge zugeordnet sind. Das Spektrum wird somit nicht kontinuierlich aufgenommen, sondern nur an einer festen Anzahl von Stützstellen.

Voraussetzung für die Entstehung eines stationären Beugungsmusters ist die Bestrahlung des Gitters mit kohärentem Licht. Das Licht der dargestellten Lichtquelle ist aber inkohärent. Dennoch lässt sich ein stationäres Beugungsmuster beobachten, da die notwendige Kohärenz durch den Eintrittsspalt erzeugt wird. Neben der Anordnung mit einem Transmissionsgitter ist auch eine Spektrometerkonfiguration mit einem Prisma als dispersivem Element möglich. Am verbreitetsten jedoch sind Spektrometer in der Czerny-Turner-Anordnung, die in Abbildung 3 skizziert wird. Es werden ein Reflexionsgitter und zwei Konkavspiegel kombiniert. In der Seya-Namioka-Anordnung kann durch die Verwendung eines konkaven Gitters auf sekundäre abbildende Linsen oder Spiegel verzichtet werden. Das konkave Gitter realisiert optische Abbildung und spektrale Zerlegung in einem Funktionselement. Um das Absorptionsspektrum einer Probe zu ermitteln, wird die Probe in den Strahlengang gebracht und das Spektrum aufgenommen. Nun wird das Nullspektrum, das Spektrum ohne Probe im Strahlengang, ermittelt. Die Division der Koeffizienten des Probenspektrums durch die des Nullspektrums ergibt den gewünschten Verlauf des Absorptionsspektrums der untersuchten Probe. Spektrometer erforderten bis vor einiger Zeit einen hohen optischen und elektronischen Aufwand. Daher waren sie meist nur als ortsfeste Laborgeräte im Einsatz. Die Entwicklung der optischen Spektralbilderzeugung und der elektronischen Spektralbildauswertung ermöglicht jetzt den Aufbau kleiner kostengünstiger mobiler Geräte zur Spektralanalyse. Damit ergeben sich vielfältige neue Anwendungsbereiche von der Medizin über die Materialwissenschaft und die Lebensmittelindustrie bis zur Kraftfahrzeugtechnik.



**Abbildung 3:** Czerny-Turner-Anordnung mit einem ebenen Gitter

### 3. Monolithisches Miniaturspektrometer

Zur Miniaturisierung tragen alle Systemkomponenten bei. Die gesamte optische Einheit bildet einen monolithischen Block, der alle Elemente zur Dispersion und zur Abbildung auf den Sensor enthält. Der Aufbau entspricht der Czerny-Turner-Anordnung mit einem ebenen Gitter.



**Abbildung 4:** Direkte Abbildung

Am einfachsten und energetisch am günstigsten ist es, das Licht von der Messstelle direkt auf den Eintrittsspalt des Spektrometers abzubilden. Abbildung 4 gibt die optischen Komponenten für eine direkte Abbildung in demontierter Form wieder. Ist dies aus konstruktiven oder messtechnischen Gründen nicht möglich, muss das Licht von der Messstelle zum Eintrittsspalt geführt werden.



**Abbildung 5:** Lichteinkopplung über Faser

Dies ist gegenüber einer direkten Lichteinkopplung die flexiblere Lösung. Sie lässt sich auch den Anforderungen für den Einsatz in Mehrkanalspektrometern gut anpassen. Das Licht wird mit einem Lichtwellenleiter (LWL) aus Glasfasern oder Kunststoff von der Messstelle aus zugeleitet.

Um möglichst wenig Licht an der Spaltblende zu verlieren, wird ein Faserbündel aus 15 bis 30 Einzelfasern benutzt. Dabei wird der Querschnitt des LWL am Austritt in eine rechteckige, spaltähnliche Form verändert. Durch diese Querschnittswandlung kann auf eine Spaltblende verzichtet werden.

Ebenso wie der optische Teil trägt auch die Elektronik zur Miniaturisierung bei. Sie besteht aus dem Bildsensor, einer hochempfindlichen CCD-Matrix, dem Bildsignalverstärker, dem Analog-Digital-Umsetzer und der Interfaceeinheit mit dem Übergang vom parallelen 8 Bit Signal zum standardisierten seriellen Bus USB 2.0 [2].

Die innovativen Merkmale des elektronischen Teils fasst die nachfolgende Tabelle 1 zusammen. Besonders hervorzuheben ist der kompakte Aufbau des Spektrometers, den Abbildung 6 wiedergibt.



**Abbildung 6:** Monolithisches Miniaturspektrometer

Flächensensor	Die Verwendung eines Flächensensors schafft neue Möglichkeiten der Auswertung wie die mehrkanalige Analyse mit einem einzigen Gerät.
Super-HAD CCD	Die ExView Super-HAD Technologie besitzt eine extrem hohe Lichtempfindlichkeit von 0,001 Lux und erlaubt damit die Auswertung von schwachen Signalen.
Digitale Verarbeitung	Die Signalverarbeitung erfolgt digital mit intern 10 Bit und extern 8 Bit. Alle Parameter sind elektronisch steuerbar.
Weiter Spektralbereich	Die spektrale Empfindlichkeit der Matrix umfasst den gesamten interessierenden Bereich von 350-1100 nm.
Schnittstelle USB 2.0	Über die Schnittstelle werden 25 Bilder/s zum Host-Rechner übertragen. Der Wärmeeintrag ist minimiert.
Standardrechner	Einsatz von Standard PC's erlaubt eine schnelle und komplexe Auswertung bei einfacher Programmierung

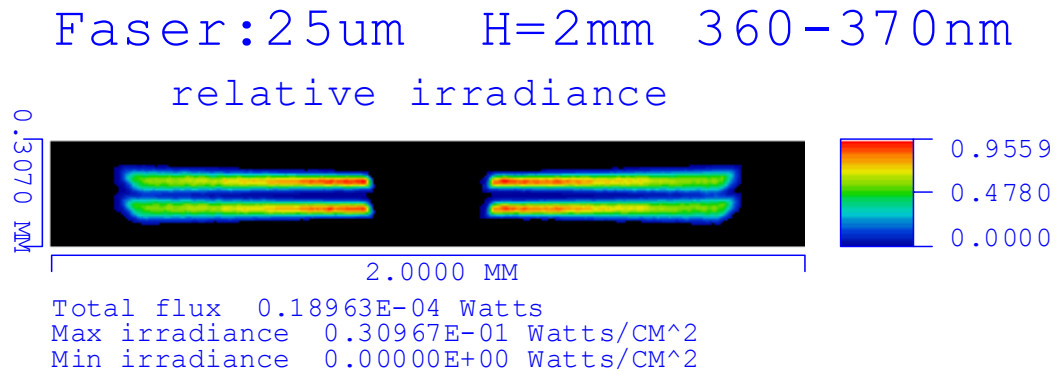
**Tabelle 1:** Innovative Merkmale des MMS-CCD

Bestimmend für die Gesamteigenschaften des Systems ist der Bildsensor. Dabei kommen neben den eindimensionalen Bildsensoren (Spektralzeilen) auch verstärkt zweidimensionale Bildsensoren (Matrizen) zum Einsatz. Der Verlauf der spektralen Empfindlichkeit des Sensors bestimmt dabei unmittelbar den erfassbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Es gibt verstärkt Bemühungen diese weit in den Bereich des Ultravioletten und vor allem des Nahen Infrarot auszudehnen. Mit dem Einsatz von Matrizen kommt gegenüber Zeilen eine geometrische Dimension hinzu, die auf drei Wegen genutzt werden kann, zur Mehrfachauswertung einschließlich Mittelung, zum Aufbau von Mehrkanalspektrometern und zur Imaging Spektrometrie.

Bei einem Mehrkanalspektrometer [3] können mehrere unterschiedliche Spektren gleichzeitig analysiert werden. So lässt sich mit einem Zweikanalspektrometer die spektrale Messung einer unbekannt Probe und der dazu festgelegten Referenz gleichzeitig erfassen. Dies ist vorteilhaft einsetzbar zur Verringerung der Messunsicher-

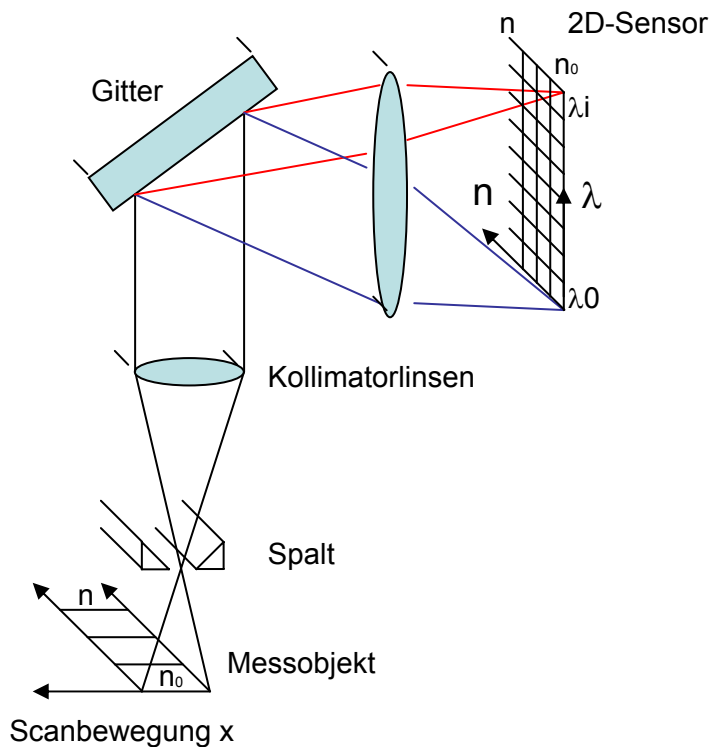


heit bei Messaufgaben mit wechselnder Beleuchtung. Abbildung 7 zeigt die Lage der Spektren für ein Vierkanalspektrometer.



**Abbildung 7:** Lage der Spektren eines 4-Kanal-Spektrometers

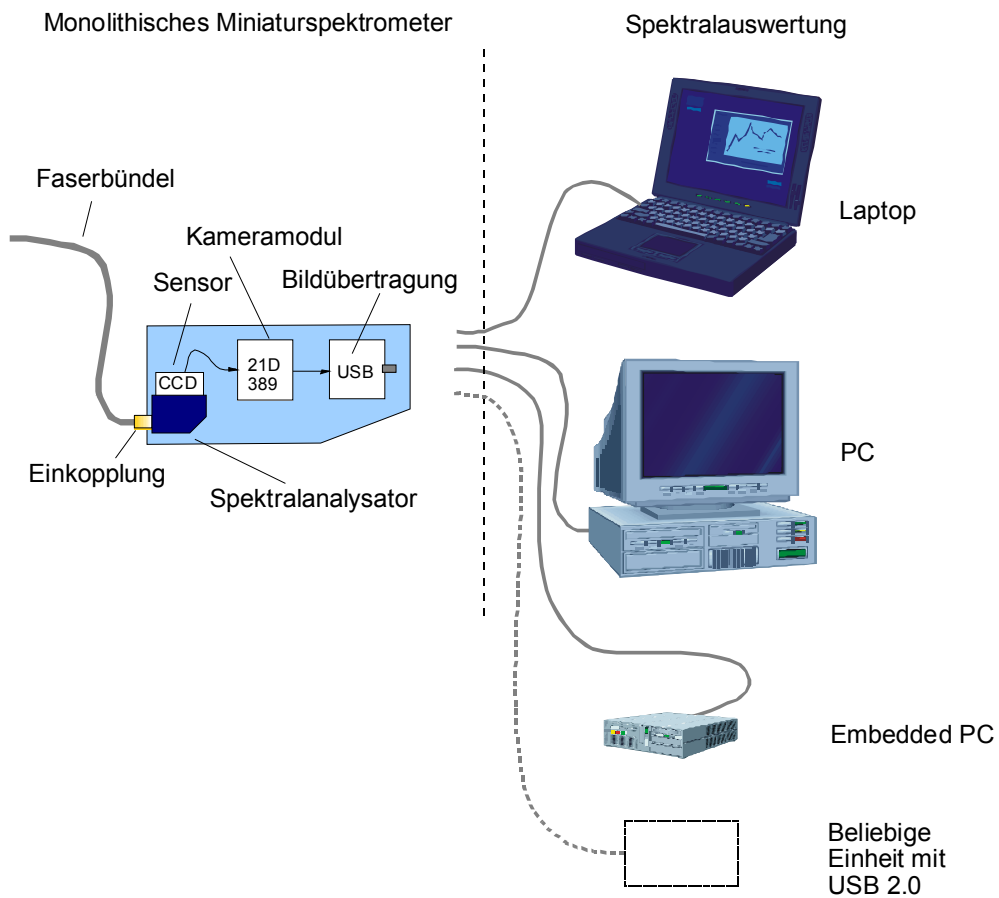
Das „Imaging Spectrometer“ arbeitet mit der maximal möglichen Anzahl gleichzeitig erfassbarer Spektren. Dies wird durch eine optische Anordnung gemäß Abbildung 8 erreicht. Die Anzahl der Spalten (768) bestimmt die Auflösung im spektralen Bereich. Die Anzahl der Zeilen (576) bestimmt die Anzahl der Spektren die gleichzeitig aufnehmbar sind. In Verbindung mit einer linearen Bewegung des Messobjekts oder einer Scanbewegung des Sensors entsteht die zweite geometrische Dimension. Man erhält ein 2D-Bild, dessen Farbinformation nicht nur, wie bei der Farbbildaufnahme, aus den drei Werten der Farbkanäle RGB besteht, sondern es steht für jeden Punkt der Fläche die vollständige Spektrale Information zur Verfügung. Die Bildrate der Matrix bestimmt die Geschwindigkeit des Scanvorganges.



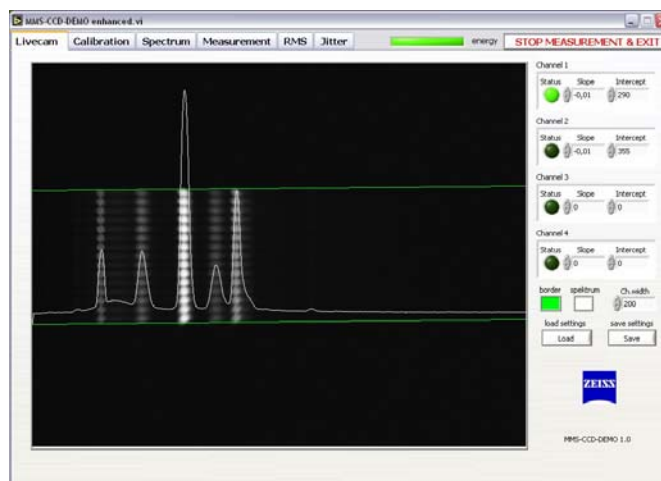
**Abbildung 8:** Imaging Spectrometer

Unabhängig von der Kanalzahl werden die vom MMS-CCD aufgenommenen Bilder über die, als Device ausgelegte, Schnittstelle USB 2.0 an eine Auswerterechner übertragen [4]. Als Auswerterechner können PC's in nahezu jeder beliebigen Form verwendet werden. Abbildung 8 zeigt eine Reihe typischer Systemkonfigurationen. Die Mindestanforderungen sind ein CPU Takt ab 1 GHz und wenigstens eine Schnittstelle USB 2.0 mit Host-Fähigkeit.

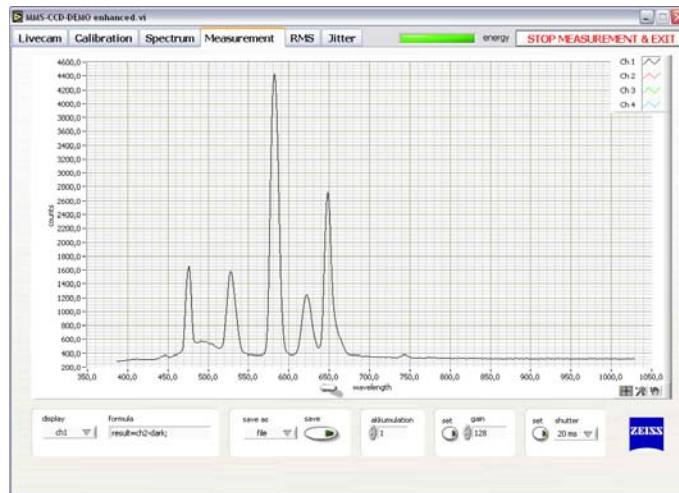
Im Host-Rechner erfolgt die Messung des Spektrums über die Auswertung der Bildinformation. Dabei kann auf erprobte Standardalgorithmen und Programme unter dem Betriebssystem MS-Windows®-XP, wie das Programmpaket „Aspect Plus“ von Carl Zeiss, zurückgegriffen werden. Notwendig ist eine Anpassung der Bilderfassung [4] über USB 2.0 und die Berücksichtigung des flächenhaften Bildformates der Matrix. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt das erfasste Spektralbild und die Abbildung 11 das daraus berechnete Spektrum.



**Abbildung 9:** Systemlösungen zur Spektralbildauswertung



**Abbildung 10:** Spektralbildauswertung- Livebild



**Abbildung 11:** Spektralbilddauswertung- Berechnetes Spektrum

#### 4. Anwendung zur Detektion von Eis- und Wasserschichten

Die Vereisung von Oberflächen, die der Atmosphäre ausgesetzt sind, stellt ein meteorologisches Phänomen dar. Die Erscheinungsformen sind Blitzeis, Glatteis, Reif, Raureif, Rauereis und Schneeglätte.

Trifft unterkühlter Regen, eine Form des flüssigen Niederschlags, bei dem die Regentropfen eine Temperatur unter der Schmelztemperatur, also unter  $0^{\circ}\text{C}$ , haben, am Boden auf eine Oberfläche, setzt spontan die Umwandlung in den festen Aggregatzustand ein. Dabei muss die Temperatur der betroffenen Oberfläche nicht unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegen. Der Regen friert an und bildet Glatteis, eine glatte, glasige Eisschicht. Diese Art der Glatt-eisentstehung wird oft auch als Blitzeis bezeichnet.

Glatteis entsteht dagegen, wenn Regen mit Temperaturen über  $0^{\circ}\text{C}$  auf sehr kalte Oberflächen mit Temperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  trifft und dort anfriert. Dies kommt vor allem bei winterlichen Inversionswetterlagen vor, bei denen oberhalb einer bodennahen Kaltluftschicht Temperaturen weit über  $0^{\circ}\text{C}$  vorliegen, durch die fallender Schnee zu Regen geschmolzen wird.

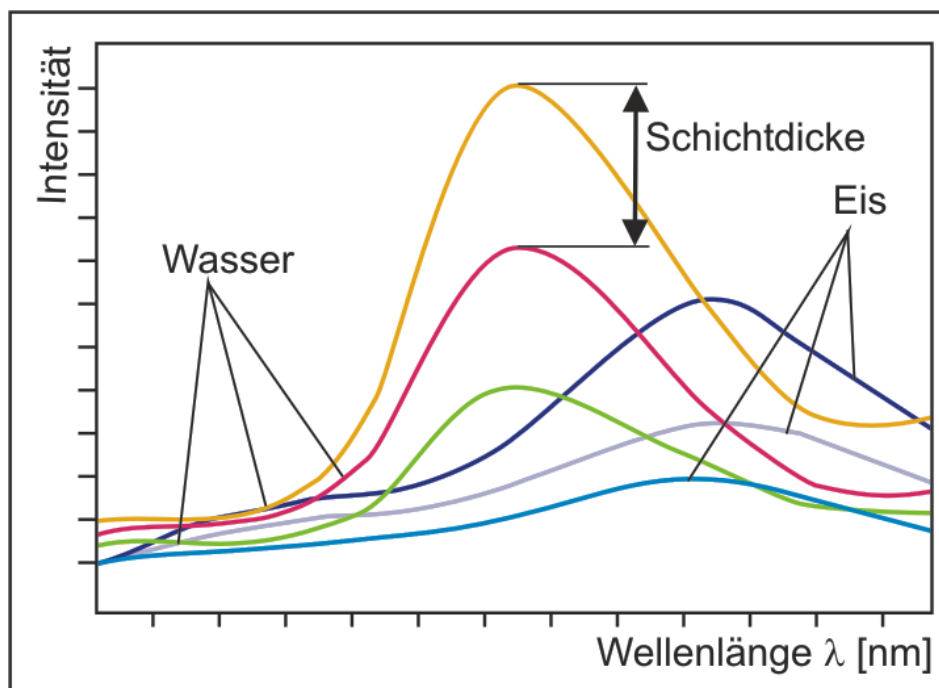
Schneeglätte entsteht, wenn eine Schneedecke unter Druck, z.B. durch Fußgänger oder Fahrzeuge, langsam immer weiter zu einer eisähnlichen Schicht verdichtet wird. Eine solche Schicht kann spiegelglatt werden, wenn die bereits angetaute Oberfläche bei neu einsetzendem Frost wieder gefriert.

Das Risiko besteht im Straßenverkehr vor allem in einer deutlichen Verringerung der

Haftung. Dafür ist eine, auch bei Temperaturen unter 0° C stets vorhandene, nur wenige Moleküle dicke Wasserschicht auf der Oberfläche des Eises verantwortlich, die durch den natürlichen Vorgang des Oberflächenschmelzens verursacht wird. Im Luftverkehr führt die Eisbildung zu einer Veränderung der Aerodynamik. Für ortsfeste Einrichtungen wie Windkraftanlagen und Freileitungen ist das Eigengewicht der Vereisung problematisch.

Voraussetzung für den rechtzeitigen und effektiven Einsatz von Gegenmaßnahmen ist stets die genaue Kenntnis des Vereisungszustandes.

Zur Detektion von Eis und Wasser gibt es eine Reihe von Ansätzen, wie die Messung der Oberflächentemperatur, die Auswertung der Reflexions- und Polarisations-eigenschaften oder die Bestimmung der Eindringtiefe von Mikrowellen. Entscheidend für die Wahl des Verfahrens sind die zu erwartende Erkennungssicherheit und das Preisniveau der Detektoren.



**Abbildung 12:** Absorptionsspektren von Eis und Wasser

Das spektrale Verfahren beruht auf der Bestimmung der typischen Absorptionsspektren von Eis und Wasser im infraroten Bereich. Das Infrarotspektrum stellt einen kleinen Ausschnitt des gesamten elektromagnetischen Spektrums dar. Von diesem Ausschnitt mit Wellenlängen von 870 nm bis 1 mm interessiert der Bereich des nahen Infrarot (NIR) mit Wellenlängen von 870 nm bis 2,5  $\mu\text{m}$  und hier ganz speziell der Spektralbe-

reich von 800 bis 1100 nm, der für die sichere spektrometrische Erkennung von Eis und Wasser genutzt werden kann. Die wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten  $\varepsilon_E(\lambda)$  für Eis und  $\varepsilon_W(\lambda)$  für Wasser liegen als Ergebnis experimenteller Messungen in tabellarischer Form für verschiedene ausgewählte Bereiche des Spektrums vor. Die Abbildung 12 zeigt, dass es mit einer entsprechenden Versuchsanordnung gelingt, die Absorptionsspektren von Eis (ca. 1030 nm) und Wasser (ca. 970 nm) deutlich zu trennen. Die Amplitude liefert gleichzeitig eine Information über die Schichtdicken des Eis- und Wasserbelages.

#### 4. Anwendung in der Nahrungs- und Futtermittelindustrie

Die Aufnahme und Verarbeitung von Farbbildern mit technischen Systemen basiert, in Analogie zur Funktion des menschlichen Auges, auf der Analyse von drei spektralen Kanälen Rot, Grün und Blau. Farbbildverarbeitungssysteme ermöglichen in Abhängigkeit von der Bittiefe eine genaue Farbmessung und gleichzeitig in Abhängigkeit von der Pixelanzahl die exakte Bestimmung des Farbortes. Der Nachteil dieser auf drei Kanäle gestützten Auswertung besteht in der begrenzten Auflösung für Signale, die nur in einem schmalen Wellenlängenbereich auftreten.

Die Spektralanalyse kann für jede Wellenlänge exakt die einfallende Strahlungsmenge bestimmen und damit gegenüber der Farbbildaufnahme wesentlich detailliertere Aussagen über die Zusammensetzung des aufgenommenen Lichtes liefern.

Dabei ist die Analyse des Lichtes oftmals nur eine Hilfsgröße. Es werden äußerst vielfältige Aufgaben wie die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung, der Oberflächeneigenschaften oder des biologischen Verhaltens gelöst.

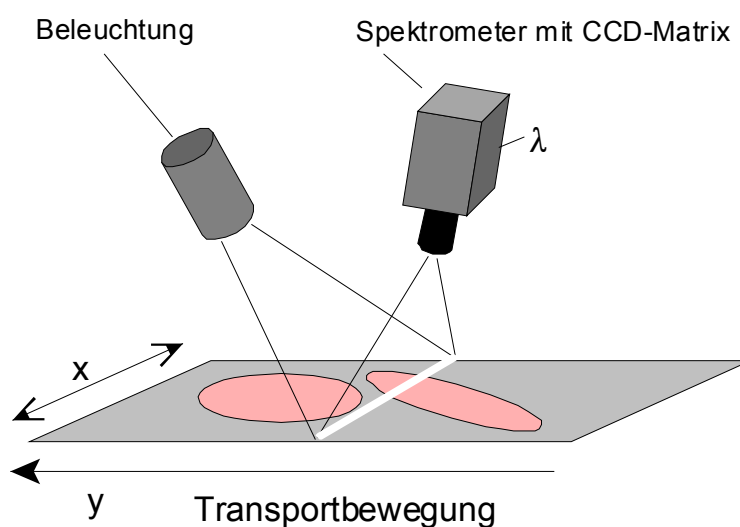
Ein „Imaging Spectrometer“ verbindet die Vorteile der flächenhaften Aufnahme von Farbkameras mit den Vorteilen der hohen spektralen Auflösung. Es ergeben sich folgende Merkmale:

- Wesentlich genauere Analyse von Farben, Verfärbungen und Farbnuancen im Bereich des sichtbaren Lichtes zur Erkennung von Veränderungen, Abweichungen und Fremdstoffen. Die Grenzen der Auflösung können bis in den Bereich von 0,1 nm gesteigert werden.

- Einbeziehung des anschließenden nahen Infrarots. Hier können Stoffe detektiert werden, die ein Signalbild ausschließlich oder vorwiegend im Infraroten Bereich haben. Ein Beispiel hierfür ist die Bestimmung der Feuchtigkeit oder die Detektion von Eis- und Wasserschichten.
- Erweiterung auf den Bereich des Ultravioletten Lichtes. Es wird zum Beispiel die Auffindung von im UV- Bereich fluoreszierenden Stoffen ermöglicht.

Die Analysen im Bereich des Ultravioletten (UV) und des Nahen Infrarot (NIR) bringen aber oftmals die entscheidenden Informationen über die Eigenschaften von Materialien und die Beschaffenheit von Oberflächen. Diesen Vorteilen stand bisher der deutlich höhere Aufwand der Spektralanalyse gegenüber. Durch die technische Entwicklung hat sich hier ein Wandel in Richtung kleiner kompakter Systeme vollzogen.

Die Nahrungs- und Futtermittelindustrie bietet ein sehr weites Anwendungsfeld für die Spektralbildverarbeitung, da es hier in hohem Maße auf stoffliche Reinheit und Sicherheit gegenüber biologischen Abbauprozessen ankommt. Eine typische Anwendung ist die Bestimmung der Qualität von Fleischerzeugnissen. Hier werden zum einen die Anteile von Fleisch, Fett und Wasser detektiert. Zum anderen ist es aber auch notwendig, ständig die mikrobiologische Qualität der Erzeugnisse zu überwachen. Die zelluläre Organisation und der Stoffwechsel der verschiedenen Stämme relevanter Mikroorganismen können über die spektroskopischen Eigenschaften ihrer Stoffwechselprodukte bestimmt werden.



**Abbildung 13:** In-Line-Spektralanalyse zur Beurteilung der Fleischqualität

Das Grundprinzip des „Imaging Spectrometers“ wird hier unter Ausnutzung der linearen Eigenbewegung des Messgutes durch ein Fließband umgesetzt. Mit der In-Line-Spektralanalyse wird die permanente Überwachung der mikrobiologischen Qualität der gesamten Fleischproduktion erstmalig technisch ermöglicht.

**Literatur- bzw. Quellenhinweise:**

- [1] Brückner, Klemens: Untersuchungen zur spektralen Analyse dünner Eisschichten; Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Ilmenau 2003
- [2] Rosenberger, Maik: Untersuchungen zur industriellen Anwendung des Universellen Seriellen Busses für die Übertragung von Bild- und Datensignalen spektroskopisch messender Systeme; Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Ilmenau 2004
- [3] Margraf, Jörg: Untersuchungen zur Mehrkanalspektroskopie; Diplomarbeit, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Ilmenau 2005
- [4] Klose, Holger; Rosenberger, M: „Quick Image Cam“; Gerätedokumentation CCD-Matrixkamera mit USB 2.0 Schnittstelle; Steinbeis-Transferzentrum Qualitätssicherung und Bildverarbeitung, Ilmenau 2005

**Autorenangaben:**

Dr. -Ing. Peter Brückner  
Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau  
Newton-Bau, Gustav-Kirchhoff-Platz 2  
98693 Ilmenau  
Tel.: 03677-69-3839  
Fax: 03677-69-3823  
E-mail: [peter.brueckner@tu-ilmenau.de](mailto:peter.brueckner@tu-ilmenau.de)

Dipl. -Ing. Nico Correns  
Carl Zeiss Jena GmbH, Geschäftsfeld Spektrolsensorik,  
Carl-Zeiss-Promenade 10  
07745 Jena  
Tel.: 03641-64-3215  
Fax: 03641-64-2485  
E-mail: [correns@zeiss.de](mailto:correns@zeiss.de)