

VIS/NIR Spektroskopie zur Wertstoffsartierung und Qualitätsanalyse

Dirk Balthasar, Volker Rehrmann

TiTech Visionsort GmbH
Lohmannstrasse 27
D-56626 Andernach
{balthasar,rehrmann}@titech.com
URL: <http://www.titech.com>

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein System zur zweidimensionalen Messung von Spektraldaten im visuellen und nahen Infrarotbereich vorgestellt (VIS/NIR). Durch die Messung von mehreren Spektralbereichen können neue Spezialanwendungen im Bereich der Wertstoffsartierung und Qualitätsanalyse in einfacher Weise realisiert werden. Beispiele hierfür sind etwa die Sortierung von Altpapier und die Qualitätsanalyse von Lachs-Filets bezüglich Fettgehalt und Farbe oder die Sortierung von Kunststoffflaschen nach Material und Farbe. Das System wird von der Firma TiTech Visionsort im industriellen Einsatz verwendet.

Ein einzigartiges Merkmal des Systems ist die gleichzeitige Messung von Spektren in verschiedenen Frequenzbereichen (VIS/NIR) sowie die hohe Aufnahmeffrequenz bei geringem Lichtbedarf und gutem Signal zu Rausch Verhältnis. Die hierfür speziell entwickelte Hardware und das Gesamtsystem werden kurz vorgestellt. Auf allgemeine limitierende Faktoren beim Entwurf der Aufnahmehardware wird dabei eingegangen.

Es folgt ein kurzer Überblick, wie eine VIS-NIR Klassifikation realisiert werden kann, um den Beitrag mit Anwendungsbeispielen abzuschließen.

1 Einleitung

Die Nahinfrarot-Spektroskopie hat sich in den vergangenen zehn Jahren zu einer etablierten Technik zur Sortierung von Wertstoffen aus Abfall entwickelt. Wird bei einer Sortieraufgabe Farbe als zusätzliches Merkmal benötigt - beispielsweise zur Sortierung von PET-Flaschen nach Farbe - so war es in der Vergangenheit notwendig, NIR-Messungen mit den Bilddaten einer Farbkamera zu verknüpfen. Der Hard- und Softwareaufwand für ein solches kombiniertes System mit NIR-Spektrometer und RGB-Kamera ist hoch. Gründe hierfür sind die unterschiedliche räumliche Auflösung von NIR-Spektrometer und Kamera, sowie der unterschiedliche Aufnahmebereich von Kamera und NIR-Spektrometer bei den auf dem Markt befindlichen kombinierten Systemen. Die Integration der Daten wird zusätzlich erschwert, da sich die zu sortierenden Objekte zwischen den Messbereichen auf dem Förderband bewegen können.

Im Jahr 2003 wurde von TiTech Visionsort eine kombinierte VIS/NIR Detektoreinheit entwickelt, welche an einer Position auf dem Förderband eine zeitgleiche VIS/NIR Messung ermöglicht. Dadurch entfällt die Integration der Messergebnisse und gleichzeitig steigt die spektrale Auflösung, verglichen mit einem Kamerasystem. Die Detektoreinheit ermöglicht durch das visuelle Spektrometer neue Anwendungen wie etwa die Analyse der Druckfarben bei der Sortierung von Altpapier - was mit einer RGB-Kamera in dieser Form nicht möglich ist.

2 Zweidimensionale VIS/NIR Messung

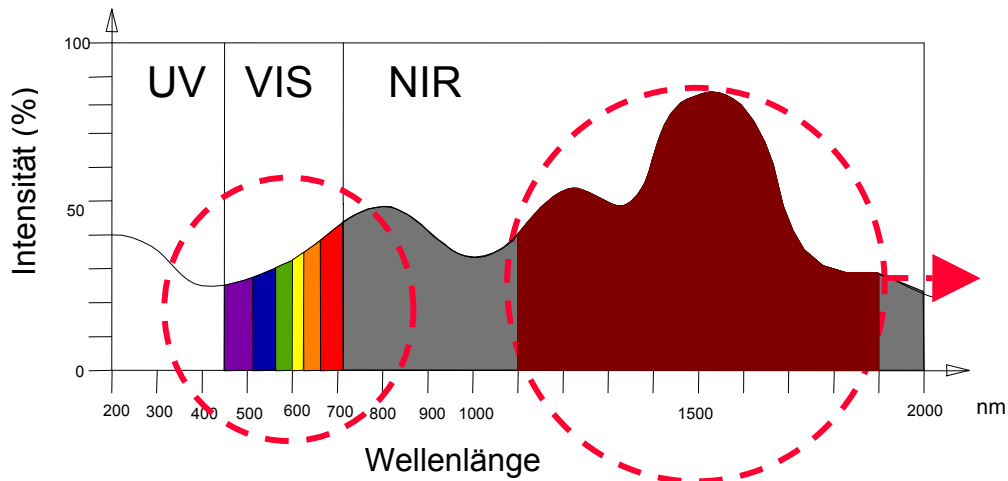


Abbildung 1 VIS/NIR - Überblick

Ziel der VIS/NIR Messung ist es, gleichzeitig und am gleichen Ort Spektren im visuellen und nahen Infrarotbereich aufzunehmen (Abbildung 1). Um eine zweidimensionale Messung zu erreichen, führt ein Förderband das zu analysierende Material an einer Scannereinheit vorbei, welche aus einer Detektoreinheit und einem Spiegel besteht. Das Material wird von einer Lichtquelle beleuchtet und das reflektierte Licht über einen rotierenden Spiegel in eine Detektoreinheit abgelenkt. Durch die Rotation des Spiegels werden alle Positionen auf dem Förderband nacheinander vermessen. Damit die Daten zeilenweise verarbeitet werden können, wird am Anfang eines jeden Spiegels ein Triggerimpuls ausgelöst. Der grundsätzliche Aufbau der TiTech PolySort Scannereinheit ist in Abbildung 2 dargestellt.

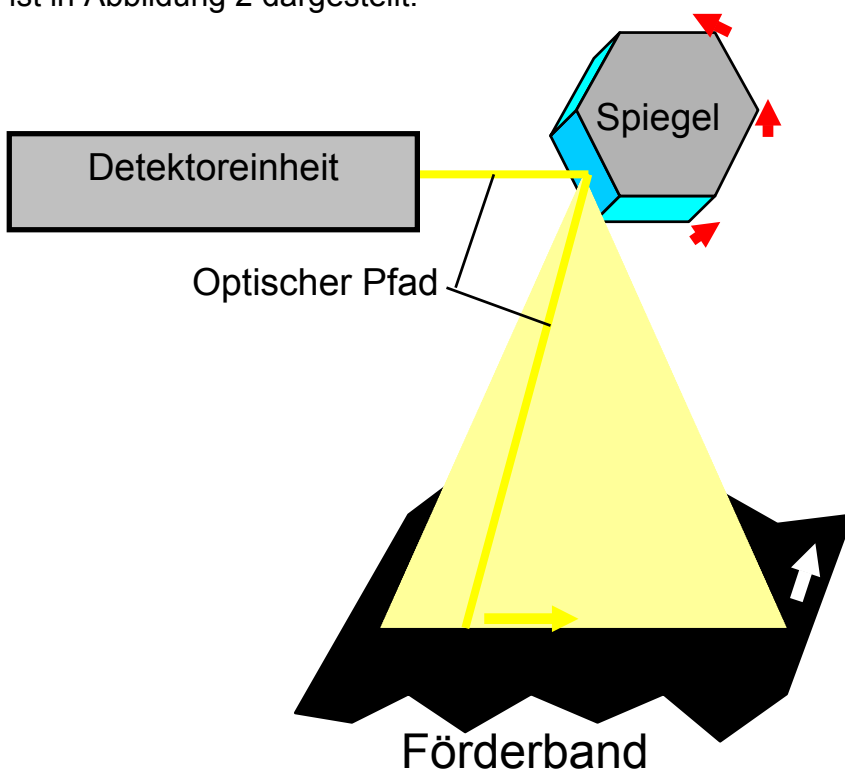


Abbildung 2 Messaufbau

In der Detektoreinheit wird das von dem Messpunkt reflektierte Licht durch eine Blende und eine Optik auf ein Beugungsgitter gelenkt (Abbildung 3). Die Größe des Messflecks wird dabei durch die eingesetzte Optik bestimmt. Das Beugungsgitter spaltet das Licht in die einzelnen Wellenlängen auf, welche vom Detektor gemessen werden. Die Auflösung, Empfindlichkeit und Größe der Sensorzeile sowie die Anordnung im Strahlengang bestimmt dabei die Anzahl der gemessenen Wellenlängen und die spektrale Auflösung des Spektrometers. Als Sensoren werden im NIR-Bereich üblicherweise Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) Sensoren eingesetzt, die besonders empfindlich im NIR-Bereich sind. Standard InGaAs Sensoren sind von 800 nm bis 1700 nm einsetzbar und Extended InGaAs Sensoren von 800 nm bis zu 2500 nm. Im VIS-Bereich wird ein speziell entworfener Sensor (ca. 400 nm – 700 nm) eingesetzt.

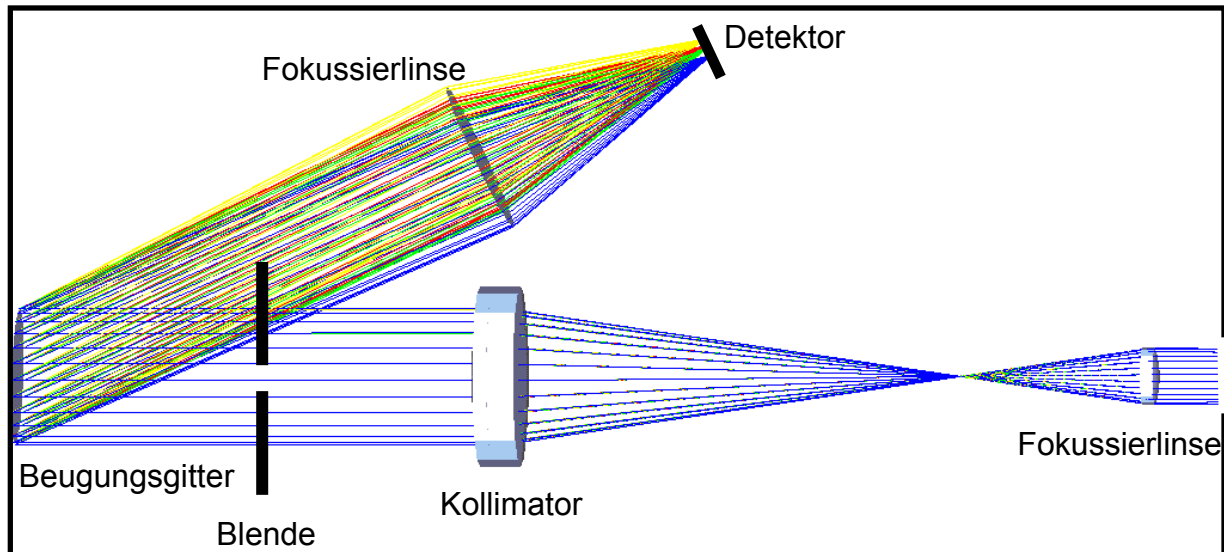


Abbildung 3 Strahlengang in Detektoreinheit (VIS oder NIR)

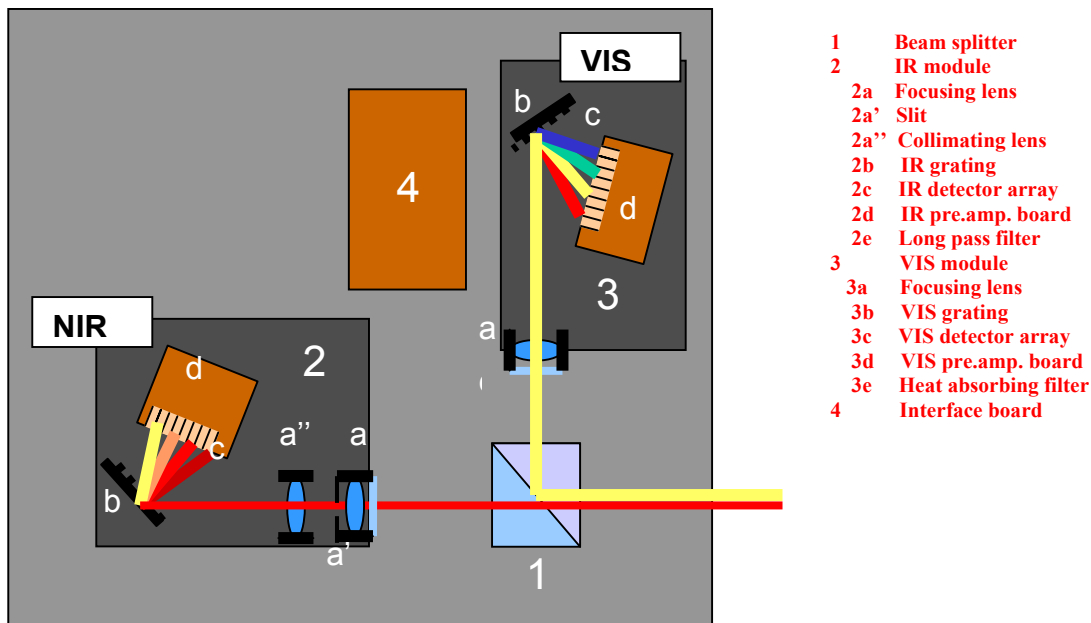


Abbildung 4 VIS/NIR Detektoreinheit

Damit die VIS/NIR-Messung an der gleichen Position vollzogen wird, teilt man den Strahlengang in der VIS/NIR-Detektoreinheit mit einem Strahlenteiler in einen VIS- und

einen NIR-Strahlengang auf. VIS- und NIR-Strahlengang werden jeweils über ein eigenes optisches System auf einen eigenen Detektor abgebildet. Es ergibt sich der in Abbildung 4 dargestellte Aufbau der VIS/NIR Detektoreinheit. Durch Verwendung spezieller Strahlenteiler gehen nur etwa 15% des einfallenden Lichtes im VIS- bzw. NIR-Bereich verloren.

Die an der Sensorzeile anfallenden analogen Messsignale werden jeweils von einer VIS- und NIR-Elektronik synchron ausgelesen und analog verstärkt. Das Signal wird schließlich in digitale Werte umgewandelt und zu einem Rechner zur Auswertung übertragen.

Beim Design eines VIS/NIR-Spektrometers, das zur Sortierung eines Massenstroms eingesetzt wird, gibt es zwei wesentliche Ziele, die in Einklang zu bringen sind:

- Maximierung der Geschwindigkeit
- Maximierung des Signal zu Rausch-Verhältnisses

Dabei müssen viele Parameter berücksichtigt werden und ebenfalls in Einklang gebracht werden. Beispielhaft erwähnt seien hier:

- Anzahl der Wellenlängen (Größe der Sensorzeile)
- Spektrale Auflösung (spektraler Bereich einer gemessenen Wellenlänge)
- Auflösung des A/D-Wandlers (z.B. 14 Bit)
- Empfindlichkeit und Dynamik
- Integrationszeit
- Auslesefrequenz

Die Besonderheit der VIS/NIR-Detektoreinheit ist, dass sie stabile Spektren in sehr guter Qualität bei einer hohen Geschwindigkeit liefert. Um hier ein hervorragendes Ergebnis zu erreichen, müssen alle Einzelkomponenten optimal aufeinander abgestimmt werden. Bei einem TiTech PolySort werden auf einem Meter Messbereich 160.000 VIS/NIR Spektren pro Sekunde aufgenommen und verarbeitet. Bei einer Bandgeschwindigkeit von etwa 2,5 m/s ergibt sich eine räumliche Auflösung von ca. 4x4 mm.

3 VIS/NIR Mustererkennungssystem

Mustererkennungssysteme können meist in die Komponenten Datenaufnahme, Merkmalsextraktion, Klassifikation und Nachverarbeitung eingeteilt werden [DHS01, S. 10].

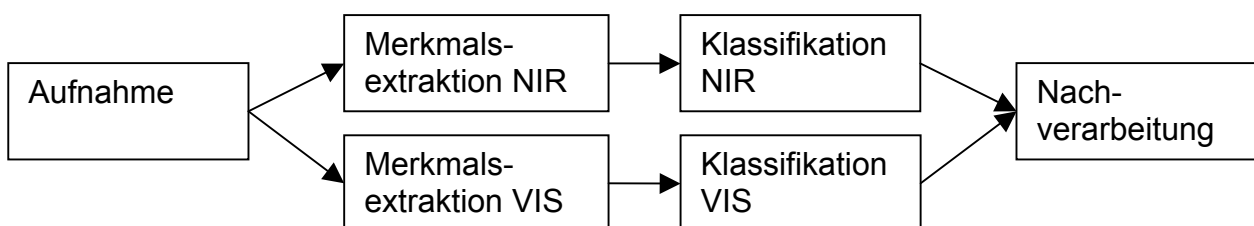


Abbildung 5 VIS/NIR Mustererkennungssystem

Die VIS/NIR Detektoreinheit liefert ein kombiniertes VIS/NIR-Spektrum, welches entsprechend der Anwendung klassifiziert werden muss. Da Farbe und Material der gemessenen Objekte in den Anwendungen häufig unkorreliert sind, werden die Spektren in einen VIS- und NIR-Bereich eingeteilt, welche unabhängig die Merkmalsextraktion und die Klassifikation durchlaufen (Abbildung 5). In der Nachverarbeitung werden die VIS/NIR-Klassifikationsergebnisse wieder zusammengefasst, um entsprechend der Systemkonfiguration mittels Druckluftdüsen die Massenströme in erwünschte und unerwünschte Materialfraktionen aufzuteilen.

Die Vorverarbeitung und Klassifikation im VIS-Bereich wird im Folgenden detaillierter betrachtet.

Aufgrund der Inhomogenität der Beleuchtung kann es je nach Aufgabenstellung sinnvoll sein, die Spektren eingangs zu normieren um den Einfluss der Beleuchtungsintensität zu eliminieren (z.B. mit einer Min/Max oder Mittelwertnormierung). Aus den Spektren werden durch Skalarprodukte mit Gewichtungsvektoren Merkmale extrahiert. Die verwendeten Gewichtungsvektoren sind anwendungsspezifisch und können durch statistische Methoden wie etwa Hauptachsentransformation und PCR (siehe [MN89, S. 101ff]) oder durch Nutzung von Expertenwissen generiert werden. Hierfür ist in der Regel eine repräsentative Stichprobe mit Spektren der zu sortierenden Objekte erforderlich.

Bei einer einfachen Farbklassifikation können etwa die CIE XYZ-Normspektralwertkurven [WS82, S. 137] als Gewichtungsvektoren verwendet werden, um einen an das visuelle System des Menschen angelehnten Farbraum zu erreichen. Um bei einem Qualitätsanalysesystem die Kommunikation mit dem Kunden zu erleichtern, ist es nahe liegend, anstelle der XYZ-Koordinaten andere Farbräume wie den $L^*a^*b^*$ - oder $L^*u^*v^*$ -Farbraum [WS82, S. 165ff] als Merkmalsraum zu verwenden.

Nach Abschluss der Merkmalsextraktion liegen Merkmalsvektoren vor, welche klassifiziert werden müssen. Automatisch lernende Klassifikationsverfahren benötigen in der Trainingsphase oftmals umfangreiche repräsentative Trainingsstichproben um sich an das Problem anzupassen. Verwendet man einen automatisch lernenden Klassifikator, kann dadurch die Anpassung des Systems an neue Sortieraufgaben im Feld erschwert werden.

Aufgrund der sehr problemspezifischen Merkmalsextraktion reicht es in vielen Fällen jedoch aus, Klassen durch einfache Schwellwerte in einzelnen Dimensionen oder durch Polygone in zwei Dimensionen zu definieren. Reicht diese einfache Klassifikation aus um das Klassifikationsproblem zu lösen, so kann im Feld der Klassifikator auch ohne repräsentative Stichprobe manuell an neue Sortier- und Qualitätsanalyseaufgaben angepasst werden. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist die Effizienz, da nur Schwellwertvergleiche und Tabellenlookups zur Klassifikation verwendet werden.

Die Nachbearbeitung der kombinierten VIS/NIR Klassifikationsergebnisse ist ebenfalls sehr anwendungsspezifisch und kann in punktorientierte und regionenorientierte Verfahren eingeteilt werden.

Bei den punktorientierten Verfahren können morphologische Operationen wie Erosion oder Dilatation verwendet werden, um die Sortierleistung zu optimieren [Soi98]. Punktorientierte Verfahren funktionieren insbesondere dann noch sehr gut, wenn sich die zu sortierenden Objekte auf dem Förderband überlappen.

Geht man von einer Totalvereinzelung der Objekte aus, so können die Objekte mittels Blob-Analyse als eine zusammenhängende Region erkannt werden. Für eine Region kann unter Verwendung der Verteilung der Klassifikationsergebnisse die Sortierung mit Heuristiken verbessert werden. Beispiel hierfür sind die Zählung von hellblauen PET-Flaschen oder die PVC-Entfrachtung zur Produktion von Ersatzbrennstoffen.

4 Anwendungsbeispiele

4.1 Sortierung hellblauer und klarer PET-Flaschen

Eine Anwendung für den kombinierten VIS/NIR-Detektor ist die Sortierung von PET-Flaschen nach Farben aus einem gemischten Materialstrom (Abbildung 6). Die durchschnittlichen VIS-Spektren einer Trainingsstichprobe sind in Abbildung 7 dargestellt. Man kann sehen, dass sich die Spektren im Durchschnitt stark unterscheiden, jedoch sind in der Praxis die Übergänge zwischen den Klassen fließend.

Durch eine Optimierung des Klassifikationssystems konnten bis zu 98% der hellblauen PET-Flaschen ausgebracht werden - bei Reinheiten bis zu 98%. Um diese Sortierquote zu erreichen ist es notwendig die Etiketten bei der Farbklassifikation auszublenden. Dadurch wird der Anteil an klaren Flaschen reduziert, welche wegen blauer Etiketten fälschlicherweise in der hellblau Fraktion ausgebracht werden können. Die Etiketten werden dabei über das NIR-Spektrum erkannt.



Abbildung 6 Leichtblaue PET-Flaschen (links), klare PET-Flaschen (rechts)
[Wol04]

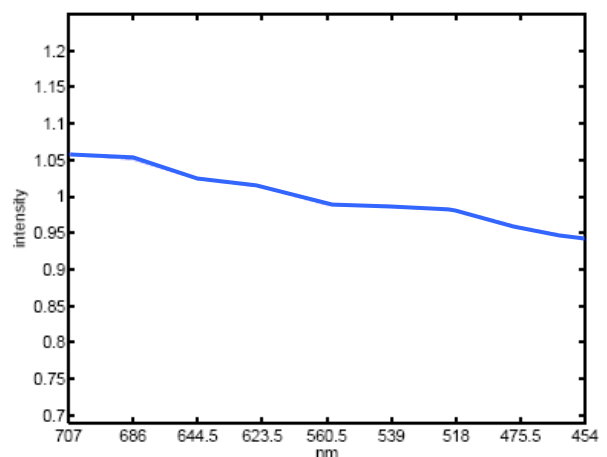
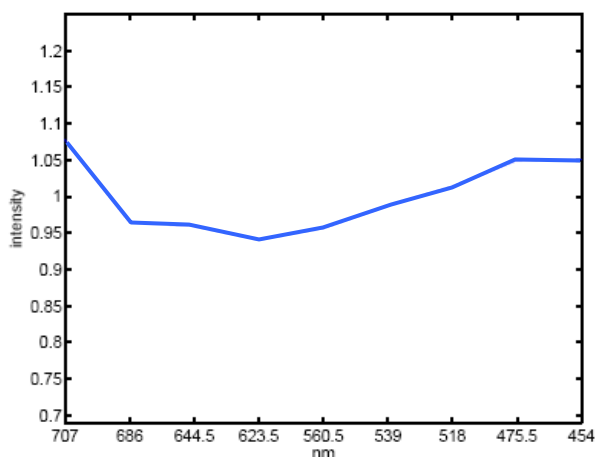


Abbildung 7 Durchschnittliche VIS-Spektren einer Trainingsstichprobe. (Links: hellblau, Rechts: klar) [Wol04]

4.2 Qualitätsanalyse von Lachsfilets

In der Fischproduktion wurde in der Vergangenheit offline im Labor Farbe und Fettgehalt von Fischfilets überwacht. Durch die Onlinemessung mit dem QVision-System [QV06] konnte bei der Fettmessung im Transfleksionsmodus eine Genauigkeit von $\pm 1\%$ und bei der Farbmessung im Reflektionsmodus eine Genauigkeit von ± 1 auf der SalmoFan® Skala erreicht werden. Dies übertrifft die Genauigkeit des menschlichen Auges.



Abbildung 8 Analyse der Farbe und des Fettgehalts von Lachsfilets

5 Zusammenfassung

Wir haben in diesem Artikel ein weltweit einzigartiges System zur gleichzeitigen zweidimensionalen Messung von VIS/NIR Spektren vorgestellt. Durch die Kombination der Sensoren und die Messgeschwindigkeit eröffnet das System neue Anwendungsfelder in der Sortierung von Wertstoffen und in der Qualitätsanalyse wie etwa die hier beschriebene Sortierung von PET-Flaschen nach Farben oder die Analyse von Lachsfilets. Das System wird weiterhin in der Papiersortierung erfolgreich eingesetzt.

Es gibt zahlreiche weitere Anwendungsfälle in denen die VIS-Spektroskopie eine untergeordnete Rolle spielt, die hohe räumliche Auflösung des Systems jedoch wichtig ist: Hierzu gehören beispielsweise die PVC-Entfrachtung, bei der PVC-Teile ab einer Größe von 10 mm ausgebracht werden. Weitere Anwendungsfälle liegen in der Sortierung von geschreddertem Elektronikschrott, bei dem ebenfalls kleine Korngrößen anfallen. International wird das System zur Reinigung von Glasfraktionen eingesetzt, die in so genannten Single Stream Märkten durch die mechanische Größenabsiebung nach vorheriger Zerstörung der Glasflaschen im Eingangsmaterial anfallen. Grundsätzlich eignet sich das System für alle Anwendungsfälle, bei denen kleine Korngrößen aufgrund ihrer Material- und Farbeigenschaften sortiert oder analysiert werden müssen.

6 Literatur

[DHS01] Richard O. Duda, Peter E. Hart und David G. Stork. *Pattern Classification*, 2nd ed. Wiley, New York [u.a.], 2001.

[MN89] Harald Martens and Tormod Naes. *Multivariate Calibration*. John Wiley & Sons, Inc., 1989.

[QV06] <http://www.qvision.no/>

[Soi98] P. Soille. *Morphologische Bildverarbeitung*. Springer, 1998.

[Wol04] A. Wolf. *Multispektrale Farbklassifikation in Echtzeit*. Diplomarbeit am Fachbereich Informatik, Institut für Computervisualistik. Koblenz: Universität Koblenz-Landau, Abteilung Koblenz, 2004

[WS82] G. Wyszecki und W. S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. Wiley, 1982.