

NIR - SPEKTROSKOPIE

Sortiermesstechnik im Vergleich



Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines	3
1.1. Materialanalyse mittels NIR-Spektroskopie	3
1.2. NIR-Spektrometersysteme KUSTAx.xMSI	7
2. Stand der Technik	8
2.1. NIR-Hyperspektralkamera / LLA Instruments GmbH.....	8
2.2. NIR-Spektrometereinheit / Hersteller A	10
2.3. NIR-Spektrometereinheit / Hersteller B	10
3. NIR-Prozessmesstechnik im Vergleich	11
3.1. Prozessabbildvisualisierung / LLA Instruments GmbH.....	12
3.2. NIR-Prozessmesstechnik für unterschiedliche Sortieraufgaben.....	13
3.3. NIR-spektroskopische Bewertung von Altpapier	14
3.4. NIR-Identifikationstechniken für das Altpapierrecycling.....	17

1. Allgemeines

1.1. Materialanalyse mittels NIR-Spektroskopie

Die Infrarot-Spektroskopie (IRS) ist eine der leistungsfähigsten Analysetechniken zur Identifikation und quantitativen Bestimmung organischer Substanzen, die auf der Anregung von Energiezuständen in Molekülen mittels IR-Strahlung basiert. Sie ermöglicht direkte Aussagen über Vorhandensein und gegebenenfalls Konzentration infrarotaktiver funktioneller Gruppen. Die Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) beruht ebenfalls auf der Anregung von Molekülschwingungen durch elektromagnetische Strahlung, wobei die Strahlungsdetektion nur im Spektralbereich der kurzwelligen Infrarotstrahlung (Wellenlängenbereich von 780 nm bis 2500 nm) erfolgt. In diesem Bereich befinden sich Oberton- bzw. Kombinationschwingungen der Molekülgrundschwingung. Die von den Schwingungen verursachten Absorptionsbanden werden bei der Analyse von Proben nicht direkt interpretiert, sondern mit Hilfe von statistischen Verfahren ausgewertet.

Die NIR-Spektroskopie dient häufig zur schnellen Untersuchung von Stoffen und Stoffgemischen in der Prozessanalytik. Hierzu wird die von Halogenglühlampen erzeugte Infrarot-Strahlung auf die Probenoberfläche gerichtet, die von dort reflektierte Strahlung spektral zerlegt und als Funktion der Wellenlänge detektiert (Beispiel siehe Abbildung 3). Je nach Art des Werkstoffes werden bestimmte Wellenlängenbereiche besonders stark absorbiert. Dies geschieht bei Wellenlängen, die der Resonanzfrequenz der angeregten Moleküle entsprechen. Aus diesem für den jeweiligen Werkstoff signifikanten Spektrum wird über eine mathematische Auswertung und einem Vergleich mit hinterlegten Referenzspektren zuverlässig der gemessene Werkstoff bestimmt. Ein Material kann somit identifiziert oder die stoffliche Zusammensetzung von Stoffgemischen bestimmt werden.

Um ausreichende Informationen über die stoffliche Zusammensetzung einer Probe zu erhalten, ist es notwendig, diese in einem relevanten Wellenlängenbereich mit hoher spektraler Auflösung zu vermessen. Zur Identifikation von Polymeren hat sich besonders der Bereich der ersten Obertöne der CH-Streckschwingungen als geeignet herausgestellt, der zwischen 1400 nm und 1900 nm liegt. Die Anzahl der Messpunkte innerhalb des Wellenlängenbereiches ist abhängig von der gewählten Messtechnik. Vereinzelt in der Bildebene eines Polychromators angeordnete Fotodioden erzeugen nur eine geringe Anzahl von Messwerten für zuvor diskret festgelegte Wellenlängen (minimal 8 Stück, maximal 32 Stück). Der Verlauf eines Spektrums mit den charakteristischen Absorptionsbanden kann daher nicht erfasst werden. NIR-Zeilenspektrometer sind hier deutlich flexibler. Der gesamte Wellenlängenbereich wird auf einer Detektorzeile abgebildet, wobei jeder einzelne Detektor jeweils einen kleinen spezifischen Wellenlängenbereich abdeckt. Die Anzahl der Detektoren ist abhängig vom Typ der Zeilenkamera und kann 128, 256, 512 und mehr betragen.

In Abbildung 1 bis 3 sind jeweils drei Reflexionsspektren verschiedener Papierprodukte dargestellt, die im ausgewählten Wellenlängenbereich mit 8, 32 und 256 äquidistanten Messpunkten erfasst wurden. Die Qualität und der Informationsgehalt der Spektren verringern sich mit abnehmender Anzahl von Messpunkten erheblich.

Papierspektren werden durch die Wasserbanden bei 1440 nm und 1920 nm dominiert. Der Cellulose-, Lignin- und Aschegehalt sowie der Gehalt an weiteren Additiven verursachen eine feine Modulation dieser dominanten Wasserbanden, die erst bei 256 Messpunkten klar erkennbar werden und deren Auswertung in der ersten oder zweiten Ableitung erfolgt. Mit nur 32 Messpunkten ist eine Bewertung von Papier somit ausgeschlossen. Für eine zuverlässige stoffliche Identifikation ist neben einer hohen spektralen Auflösung, einer ausreichenden Signalstärke sowie einem ausreichenden Dynamikbereich auch eine zuverlässige spektroskopische Kalibrierung des Messsystems notwendig. Bei der spektralen Analyse der Stoffe überlagern sich die spektralen Informationen der zu messenden Stoffe mit den spektralen Eigenschaften der Strahlungsquellen und des Messsystems. Zusätzlich verändern sich letztere mit der Zeit. Um jederzeit eine von der Messtechnik unabhängige spektrale Information der Stoffe und damit eine sichere Identifikation zu sichern, wird das Messsystem in definierten Abständen mit einem Referenzstandard kalibriert.

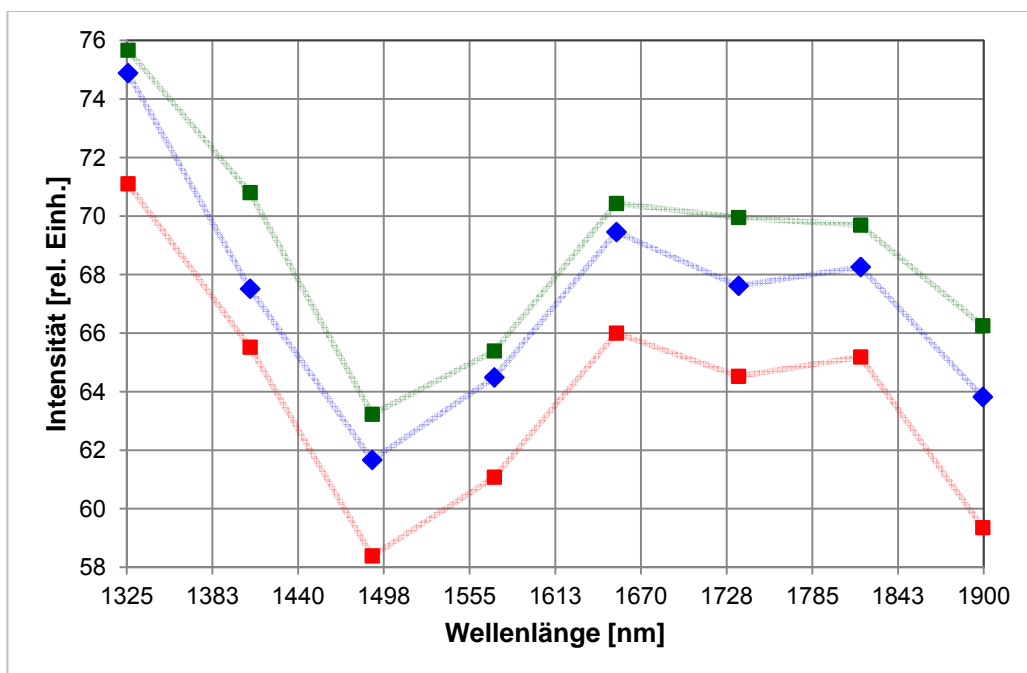


Abbildung 1

Drei Papierspektren mit je 8 Messpunkten im Wellenlängenbereich von 1325 nm bis 1900 nm (Büropapier, Magazin, Faltschachtel). Es lässt sich nur der grobe Verlauf der Spektren abschätzen.

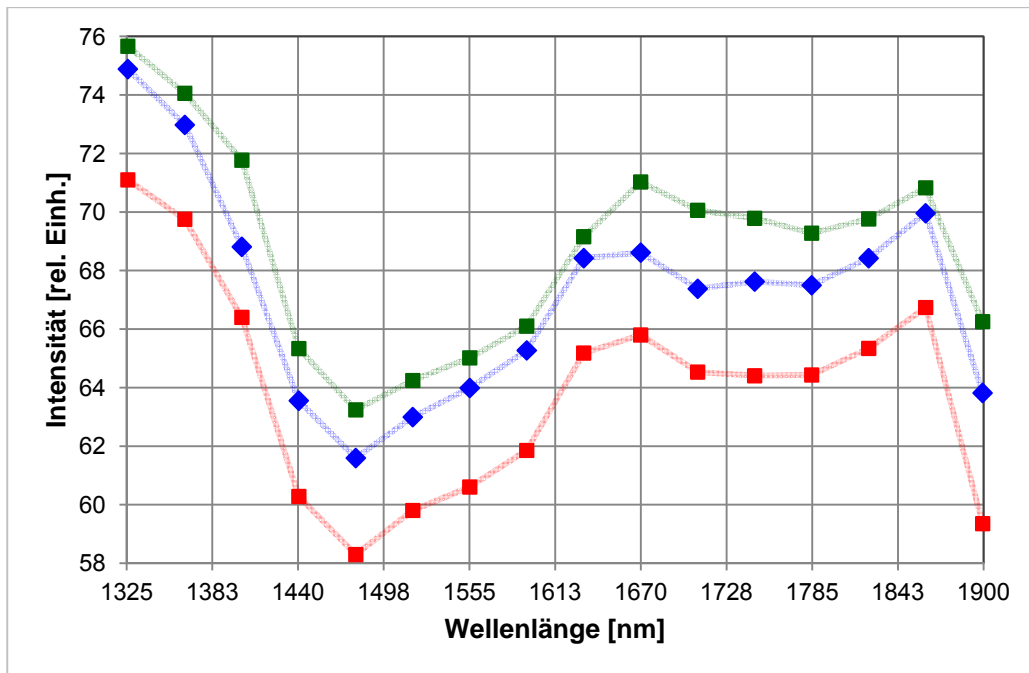


Abbildung 2

Drei Papierspektren mit je 16 Messpunkten im Wellenlängenbereich von 1325 nm bis 1900 nm. Ersichtlich ist nur die grobe Kontur der Spektren. Feine Differenzen, die aus der unterschiedlichen Papierzusammensetzung resultieren, sind nicht feststellbar (Büropapier, Magazin, Faltschachtel).

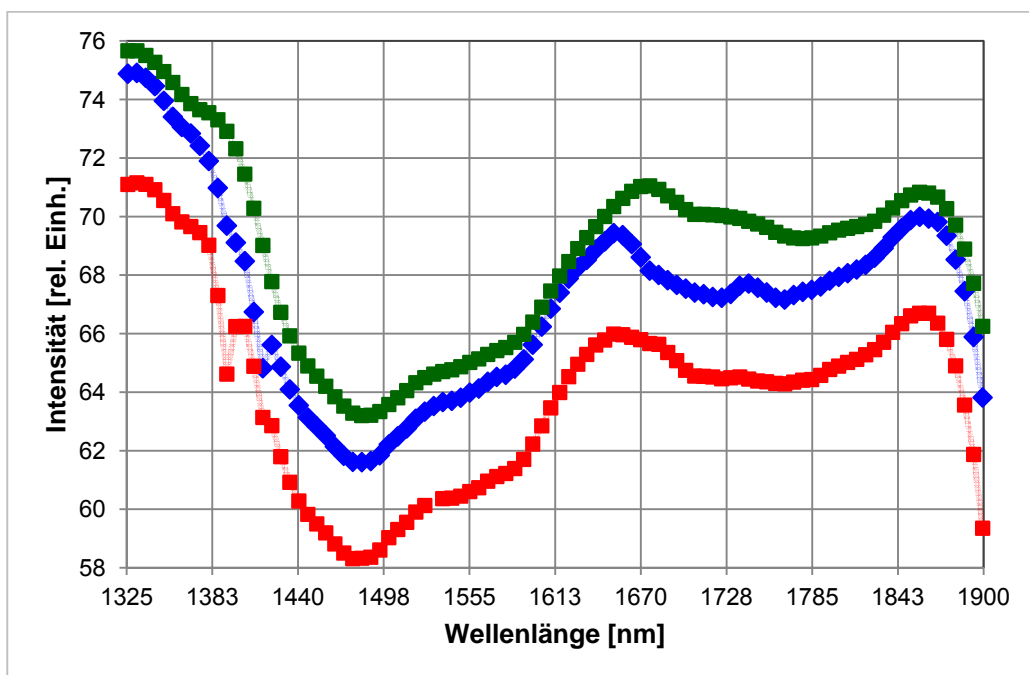
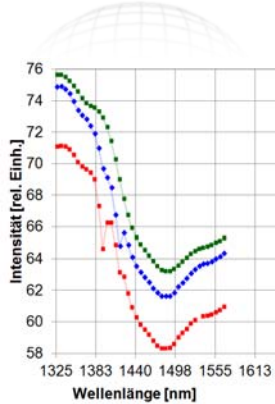
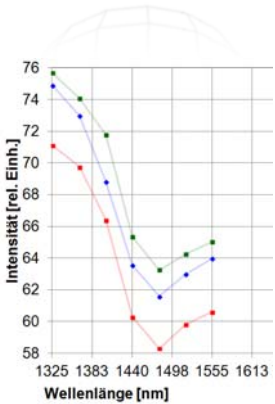
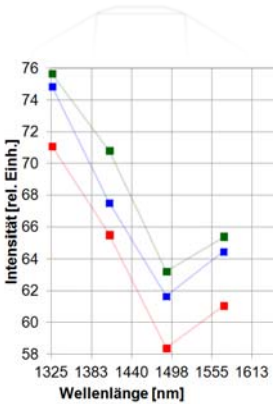
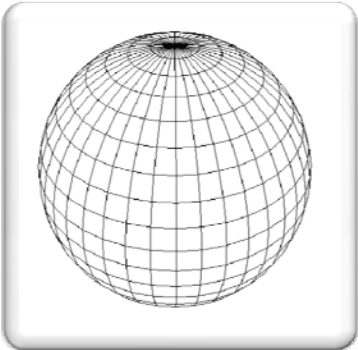
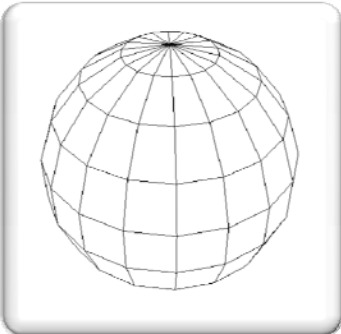
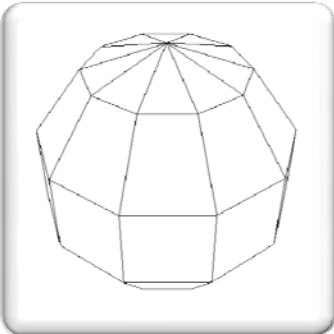


Abbildung 3

Drei Papierspektren mit je 96 Messpunkten im Wellenlängenbereich von 1325 nm bis 1900 nm. Feine Unterschiede in den Spektren sind deutlich zu erkennen (Büropapier, Magazin, Faltschachtel). Originalspektren aufgenommen mit einer KUSTA1.9MSI.

Vergleich der NIR-Spektrometer am Beispiel der Papieranalyse



Hersteller A

Hersteller B

LLA
Instruments GmbH

1.2. NIR-Spektrometersysteme KUSTAx.xMSI

Die LLA Instruments GmbH ist Hersteller und Anbieter von spektroskopischen Messgeräten für die chemische Analyse. Speziell für die Sortierung von Materialien im Rahmen des werkstofflichen und energetischen Recyclings wird die bildgebende NIR-Hyperspektralkamera mit einer optional zu integrierenden RGB-Farbzeilenkamera angeboten.

Sämtliche messtechnische und optische Komponenten sind modular aufgebaut. Sie können so vom Anlagenbauer individuell für die jeweilige Sortieraufgabe zusammengestellt werden.

Die beiden Messsysteme KUSTA1.7MSI und KUSTA1.9MSI (KUSTAx.xMSI) unterteilen sich in folgende OEM-Baugruppen:

- ▶ NIR-Hyperspektralkamera KUSTAx.xMSI
- ▶ Industrie-PC zur Kamerasteuerung und Datenerfassung
- ▶ Steuer- und Analysesoftware KustaMSI:
 - ▼ Steuerung und Überwachung der Hyperspektralkamera
 - ▼ Datenerfassung von der Kamera und Analyse der Messdaten in Echtzeit
 - ▼ Ausgabe der Analyseergebnisse an eine übergeordnete Anlagensteuerung
 - ▼ Unterstützung verschiedener Hardwareschnittstellen und Datenübertragungsprotokolle
 - ▼ Analysemethoden und Applikationen lassen sich an kundenspezifische Aufgabenstellungen anpassen
- ▶ Beleuchtungseinheit PMAmSI: Die Beleuchtungseinheit besteht aus zwei parallel zueinander angeordneten Beleuchtungszeilen, die jeweils leicht gegeneinander geneigt sind. Die integrierten NIR-Strahler erzeugen einen schmalen Lichtstreifen auf dem Förderband. Für unterschiedliche Sortieraufgaben und Förderbandbreiten werden verschiedene Ausführungsvarianten angeboten.
- ▶ Montagebrücke zur stabilen Verbindung von Beleuchtungseinheit und Hyperspektralkamera
- ▶ Optional: Klimatisierter Steuerschrank mit Touchscreen-Monitor
- ▶ Optional: RGB-Farbzeilenkamera
- ▶ Optional: Automatische Kalibriereinrichtung für Weißabgleich

2. Stand der Technik

2.1. NIR-Hyperspektralkamera / LLA Instruments GmbH

Zur Materialidentifizierung verwendet LLA eine Hyperspektralkamera mit einem bildgebenden Spektrographen. Zwei Reihen stabförmiger Halogenglühlampen erzeugen durch Reflektoren auf dem Transportband einen quer zur Bewegungsrichtung fokussierten Leuchtstreifen, durch den sich die zu sortierenden Objekte bewegen (siehe Abbildung 4). Die von den Objekten reflektierte Strahlung wird mit der Spektrometereinheit erfasst, die senkrecht über dem Leuchtstreifen angeordnet ist. Bei dem bildgebenden Spektrographen bleibt die Ortsinformation der auf den Eingangsspalt abgebildeten Messfläche über die Spalthöhe erhalten. Die in der Bildfeldebene entstehende Abbildung besteht aus einer räumlichen und senkrecht dazu aufgespreizten spektralen Komponente. Der in der Abbildungsebene angeordnete Matrixdetektor erfasst somit für jeden Bildpunkt des Eingangsspalt (Pixelzeile aus der Detektormatrix) gleichzeitig das zugehörige Spektrum auf der senkrecht dazu angeordneten Pixelspalte der Detektormatrix. Das ermöglicht ein zeilenweises Abtasten der Messobjekte mit hoher Wiederholungsrate, wobei für jede Aufnahme die volle spektrale und örtliche Information vorliegt.

Eine zeitliche Abfolge solcher zeilenförmigen Aufnahmen ergibt aneinandergesetzt ein zweidimensionales Rasterbild mit örtlichen und spektralen Informationen. Neben der Position und der Größe der Proben lässt sich anhand der zugehörigen Spektren auch die stoffliche Zusammensetzung der erfassten Materialien bestimmen. Diese Analyseergebnisse des Materialstromes werden dann in Echtzeit an die Steuerung der Sortieranlage übermittelt.

Die in den Hyperspektralkameras verwendeten Matrixdetektoren haben je nach Ausführung ein Raster von 320 x 256 Bildpunkte (KUSTA1.7MSI) bzw. 192 x 96 Bildpunkte (KUSTA1.9MSI). Dabei werden die 320 Zeilen bzw. 192 Zeilen für die örtliche und die 256 bzw. 96 Spalten für die spektrale Komponente eingesetzt. Die Spektren sind aufgrund der hohen Anzahl von Messpunkten qualitativ so hochwertig, dass sich geringfügige Differenzen in den spektralen Reflexionseigenschaften der Materialien sicher unterscheiden lassen.

Wegen der hohen Ortsauflösung und der schnellen Bildwiederholungsrate von 270 Hz bzw. 795 Hz können auch kleine Objekte bei hohen Förderbandgeschwindigkeiten zuverlässig detektiert und analysiert werden. Ein weiterer Vorteil der Hyperspektralkamera liegt in der vollständigen Abwesenheit mechanisch beweglicher Bauteile, was die Technik robust für den Einsatz in industrieller Umgebung macht.

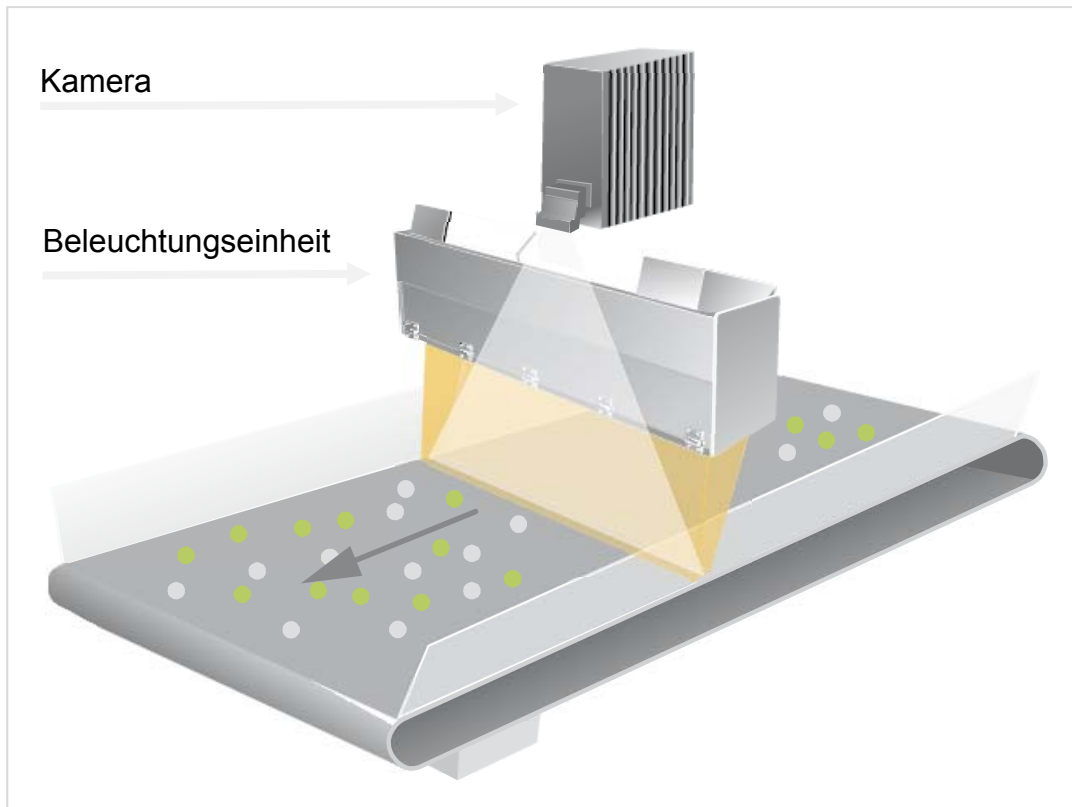


Abbildung 4

Optischer Aufbau der Messsysteme KUSTAx.xMSI

Vorteile NIR-Spektroskopie LLA Instruments GmbH

- ▶ Keine beweglichen Bauteile durch Verwendung einer Hyperspektralkamera anstelle eines Scanners
- ▶ Hohe Ortsauflösung durch große Messspuranzahl
- ▶ Höchste Informationsmenge im Vergleich zu Messsystemen der Mitbewerber:
 - ▼ LLA: 256 Messpunkte im Spektrum bei Abtastraten von 86.400 Spektren/Sekunde (22.118.400 Messwerte/Sekunde)
 - ▼ Hersteller A: 8 Messpunkte im Spektrum bei Abtastraten von 25.000 Spektren/Sekunde (200.000 Messwerte/Sekunde)
 - ▼ Hersteller B: 16 Messpunkte im Spektrum bei Abtastraten von 160.000 Spektren/Sekunde (2.560.000 Messwerte/Sekunde)
- ▶ Hohe spektrale Auflösung sichert analytische Selektivität bei Materialanalyse
- ▶ Qualitative und quantitative Analyse der Spektren in Echtzeit
- ▶ Anwendung von Methoden digitaler Bildanalyse (z. B. Objekterkennung, Abbildung 5)
- ▶ Modifikation der Analysemethoden ohne Hardwareänderung
- ▶ Einfache Installation von Analysemethoden über Fernwartungsverbinding

2.2. NIR-Spektrometereinheit / Hersteller A

Diese Sortieranlage arbeitet analog zur Anlage von Hersteller B auf der Grundlage eines scannenden NIR-Spektrometers. Zwei stabförmige Glühlampen erzeugen auf dem Transportband einen quer zur Bewegungsrichtung projizierten Leuchtstreifen, durch den sich die zu sortierenden Objekte bewegen. Ein schwingender Spiegel tastet diesen beleuchteten Streifen ab und lenkt das von den Objekten reflektierte Licht über die Sammellinse auf ein Lichtleitfaserbündel. Ein überwiegender Anteil von Lichtleitfasern des Faserbündels ist am Eintrittsspalt eines Spektrographen angeschlossen. Die restlichen drei Lichtleitfasern gehen jeweils zu einem Farbsensor. An der Austrittsseite des Spektrographen gehen weitere Lichtleitkabel zu jeweils einem NIR-Detektor. Da jedem Detektor eine spezifische Wellenlänge zugeordnet ist, erfasst die Spektrometereinheit nur wenige diskrete Messpunkte im technisch möglichen Wellenlängenbereich. Dies führt zu Spektren mit geringem Informationsgehalt, die aber mit hoher Wiederholungsrate gemessen werden können. Die Wiederholungsrate wird wie bei den konkurrierenden Systemen durch die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Spektrometereinheit begrenzt.

2.3. NIR-Spektrometereinheit / Hersteller B

Die Sortieranlage von Hersteller B arbeitet mit einem scannenden NIR-Spektrometer. Zwei Reihen von einzeln nebeneinander angeordneten Glühlampen erzeugen auf dem Transportband einen quer zur Bewegungsrichtung projizierten Leuchtstreifen, durch den sich die zu sortierenden Objekte bewegen. Ein rotierender Polygonspiegel tastet über einen Umlenkspiegel den beleuchteten Streifen auf dem Förderband kontinuierlich ab und lenkt das von den Objekten reflektierte Licht auf einen feststehenden Spektrographen. In der Bildebene des Spektrographen sind an definierten Positionen einzelne NIR Detektoren angeordnet. Da jedem Detektor eine spezifische Wellenlänge zugeordnet ist, erfasst die Spektrometereinheit nur wenige diskrete Messpunkte im technisch möglichen Wellenlängenbereich.

Bei der neuen Generation der Sortieranlagen von Hersteller B werden visuelle und NIR-Spektroskopie in einem Gerät vereint. Anstatt einer Reihe von Glühlampen verwendet diese Anlage eine einzelne Strahlungsquelle mit gleichförmig leuchtender Fläche, die zusammen mit dem NIR-Spektrometer und den VIS-Detektoren in einem Gehäuse untergebracht sind. Über einen rotierenden Polygonspiegel wird die von der Lampe emittierte Strahlung auf das Transportband geleitet, von den zu sortierenden Objekten reflektiert und über den rotierenden Polygonspiegel zu den direkt neben der Strahlungsquelle positionierten Detektoren geführt. In der Bildebene des NIR-Spektrographen sind an definierten Positionen einzelne Sensoren angeordnet. Da jedem Detektor eine spezifische Wellenlänge zugeordnet ist, erfasst die Spektrometereinheit nur wenige diskrete Messpunkte im technisch möglichen Wellenlängenbereich. Dies führt zu Spektren mit geringem Informationsgehalt, die aber mit hoher Wiederholungsrate gemessen werden können. Die Wiederholungsrate wird wie bei den konkurrierenden Systemen durch die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Spektrometereinheit begrenzt.

3. NIR-Prozessmesstechnik im Vergleich

Baugruppe und Charakteristik	LLA KUSTA1.7MSI/ KUSTA1.9MSI	Hersteller A	Hersteller B
Messoptik	Hyperspektralkamera mit korrigiertem NIR-Objektiv	Scannender Spiegel mit nachgeschalteter Optik und Lichtleitkabelbündel	Scannender Polygonspiegel mit nachgeschalteter Optik
	Wertung: Da die Hyperspektralkamera von LLA keine beweglichen Bauteile besitzt, ist sie für den zuverlässigen Einsatz in industrieller Umgebung besonders gut geeignet.		
Spektrograph	Bildgebender Spektrograph mit Detektormatrix	Spektrograph mit einer geringen Anzahl von Wellenlängen	Spektrograph mit einer geringen Anzahl von Wellenlängen
NIR-Wellenlängenbereich	950 nm – 1700 nm/ 1325 nm – 1900 nm	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Anzahl der Messpunkte im Spektrum	256/ 96	≤ 8	≤ 16
	Wertung: Die hohe Anzahl von Messpunkten im Wellenlängenbereich sichert eine hohe analytische Selektivität bei der LLA-Lösung. Die Auswertung der Messungen im NIR-Spektralbereich erfordert den Einsatz der Derivativspektroskopie, d. h. es wird die erste oder zweite Ableitung der Spektren gebildet. Eine derartige Vorgehensweise setzt ein komplettes Spektrum voraus, was bei nur 8 oder 16 Messpunkten entfällt.		
Max. Abtastbreite (Bandbreite) einer Messanordnung (Spektrograph und Messoptik)	2 m	Nicht bekannt	1,4 m
	Wertung: Bei stückigem Material > 6,2 mm kann bei der LLA-Lösung mit einer Messanordnung eine Bandbreite von 2 m gemessen werden.		
Farbsensor	Optionaler Bestandteil	Optionaler Bestandteil	Optionaler Bestandteil
	Wertung: Der Aufwand für die Integration eines Farbsensors ist für alle konkurrierenden Anordnungen vergleichbar.		
Anzahl der Messspuren	Max. 320/ 192	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Maximale Abtastrate (Scans/s)	270/ 795	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Anzahl der Messungen/ Spektren pro Sekunde	86.400/ 153.600	25.000	160.000
	Wertung: Die Anzahl der Messungen bei der Hersteller A-Lösung liegt deutlich unter dem Wert der LLA-Ausführung. Der Informationsgehalt der Messungen wird aber vor allem durch die Anzahl der gemessenen Messpunkte im Wellenlängenbereich bestimmt. Dieser Informationsgehalt ist bei den Herstellern A und B-Lösungen jedoch erheblich geringer und für einige wichtige Aufgabenstellungen nicht ausreichend.		

Baugruppe und Charakteristik	LLA KUSTA1.7MSI/ KUSTA1.9MSI	Hersteller A	Hersteller B
Anzahl der Messwerte im Wellenlängenbereich pro Sekunde	86.400 x 256 = 22.118.400 153.600 x 96 = 14.745.600	25.000 x 8 = 200.000	160.000 x 16 = 2.560.000
Digitale Auflösung des Detektors	14 Bit/ 16 Bit	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Minimale Messspur- oder Messfleckbreite bei einer Erfassungsbreite von 50 cm	0,16 cm x 0,26 cm 0,26 cm x 0,26 cm	1,0 cm x 1,0 cm	0,4 cm x 0,4 cm
Wertung: Die LLA-Lösung bietet die höchste Ortsauflösung.			
Analytische Selektivität bei der Identifikation von Polymeren	Hoch	Mittel	Mittel
Analytische Bewertung von Altpapier, Altholz und Mineralien	Möglich	Nicht möglich	Eingeschränkt möglich
Anpassung an verschiedene Sortierbandbreiten	Blickfeld der Kamera lässt sich an jede Sortierbandbreite anpassen.	Nicht bekannt	Ein Vielfaches der Breite der Messanordnung ist möglich.
Anpassung an geänderte Sortieraufgabenstellungen	Anpassung der Analysemethoden in der Steuer- software	Gegebenenfalls ist eine Hardware-Änderung notwendig (Einstellung anderer Wellenlängen).	Gegebenenfalls ist eine Hardwareänderung notwendig (Einstellung anderer Wellenlängen).

3.1. Prozessabbildvisualisierung / LLA Instruments GmbH

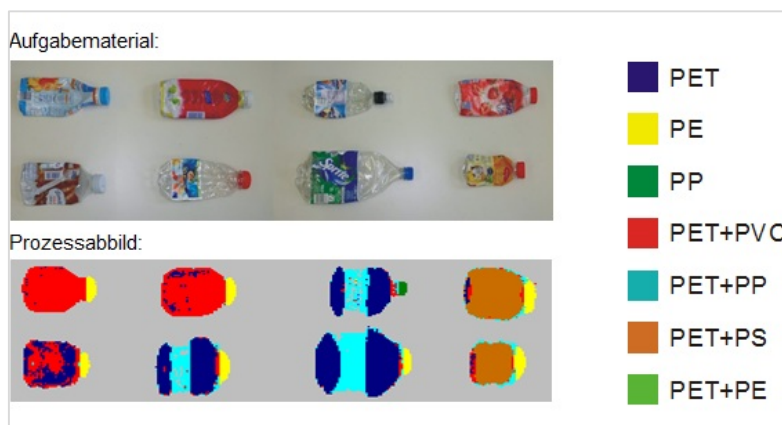


Abbildung 5

Objekterkennung und Visualisierung von Flaschen mittels der Software KustaBelt

3.2. NIR-Prozessmesstechnik für unterschiedliche Sortieraufgaben

Sortieraufgabe	Abmessungen	LLA	Hersteller A	Hersteller B
1 Hausmüll (Verpackungen)	LLA: O: 2 - 40 mm M: 0,05 – 0,25 cm ² G: ≤ 3 m/s Hersteller A: O: 30 - 350 mm M: ≤ 1 cm ² G: ≤ 3 m/s Hersteller B: O: k. A. M: k. A. G: k. A.	<i>Identifikation:</i> Verpackungen: PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS, EPS, PVC, Tetra, Etiketten Getränkeflaschen: PET, PET-G, PVC, Etiketten Folien: PE-HD, PE-LD, PP, PS, PVC, PET	<i>Identifikation:</i> PS, EPS, PP, Tetra, PE-HD, PET, PVC	<i>Identifikation:</i> PE, PVC, PET, PET-G, PP, PS, EPS
		<i>Störstoffe:</i> Papier, Pappe, Kartonagen, Holz	<i>Störstoffe:</i> Papier, Pappe, Kar- tonagen	<i>Störstoffe:</i> Papier, Pappe, Kar- tonagen, Holz
2 Elektronikunststoffe	LLA: O: 2 – 40 mm M: 0,05 – 0,25 cm ² G: ≤ 3 m/s	<i>Eingangsmaterial:</i> Gehäuse von Elektro-Altgeräten <i>Identifikation:</i> ABS, PS, PP, PA, PVC, PE, PET, PBT, PUR, PC, PMMA, PC+ABS, ABS+PVC, PPE+SB <i>Störstoffe:</i> Bromierte Flammhemmer ABS+TBBPA, ABS+TBBPAepox, PS+TBBPA, PS+TBBPAepox	Keine Angabe	Keine reine NIR-Applikation, wird nur im Zusammenhang mit Röntgentechnik angeboten.
3 Ersatz-brennstoffe (EBS)	LLA: O: 2 – 40 mm M: 0,05 – 0,25 cm ² G: ≤ 3 m/s Hersteller A: O: 10 - 350 mm M: ≤ 1 cm ² G: ≤ 3 m/s Hersteller B: O: k. A. M: k. A. G: k. A.	<i>Eingangsmaterial:</i> - Haushaltsmüll - Bauschutt	<i>Eingangsmaterial:</i> Nicht näher spezifiziert	<i>Eingangsmaterial:</i> Nicht näher spezifiziert
		<i>Identifikation:</i> - alle Kunststoff- typen - Holz, Papier	<i>Identifikation:</i> alle Fraktionen (nicht näher spezifiziert)	<i>Identifikation:</i> alle Kunststofftypen
		<i>Störstoffe:</i> - Chlorhaltige Ver- bindungen (PVC) - Kunststoffe mit halogenhaltigen Additiven (flamm- hemmende Zusatz- stoffe)	<i>Störstoffe:</i> - PVC	<i>Störstoffe:</i> - PVC

Sortier- aufgabe	Abmessungen	LLA	Hersteller A	Hersteller B
4 Altauto-recycling	LLA: O: 2 – 40 mm M: 0,05 – 0,25 cm ² G: ≤ 3 m/s	<i>Identifikation:</i> Helle Kunststoffe: ABS, PC, PP, PU, PE, PMMA, PA, PC+PBT, PC+ABS Schwarze Kunstst.: PP (PP+EPDM), PC (PC+PBT), PBT, PUR	Keine Angabe	Keine reine NIR- Applikation, wird nur im Zusammenhang mit Röntgentechnik angeboten.
5 Teppich- recycling	LLA: O: 2 – 40 mm M: 0,05 – 0,25 cm ² G: ≤ 2 m/s	<i>Identifikation:</i> PA6, PA66, Blend PA6+PA66 PP, PES, Wolle	Keine Angabe	Keine Angabe

Erläuterung der Abkürzungen:

O: Objektgröße

M: Größe der Messfläche

G: Geschwindigkeit des Transportbandes

3.3. NIR-spektroskopische Bewertung von Altpapier

Papier ist ein industriell hergestelltes Produkt, dessen Hauptbestandteile Zellulose (Zellstoff) und Lignin (Holzschliff) sind. Als Füllstoffe bzw. für den Papierstrich werden in Europa hauptsächlich Kaolin und Kalziumkarbonat verwendet. Die Altpapiersorten unterscheiden sich durch eine unterschiedliche quantitative Zusammensetzung dieser Inhaltsstoffe voneinander. Aus diesem Grund ist die Identifikation von Altpapier mit NIR eine sehr anspruchsvolle Sortierapplikation. Für die Quantifizierung der Inhaltsstoffe müssen die NIR-Spektren eine hohe spektrale Auflösung bei gleichzeitig niedrigem Rauschanteil haben. Nur so ist in der weiteren die Analyse eine mathematische Bearbeitung möglich (PLS, PCR). Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen beispielhaft die Spektren von drei verschiedenen Altpapiersorten.

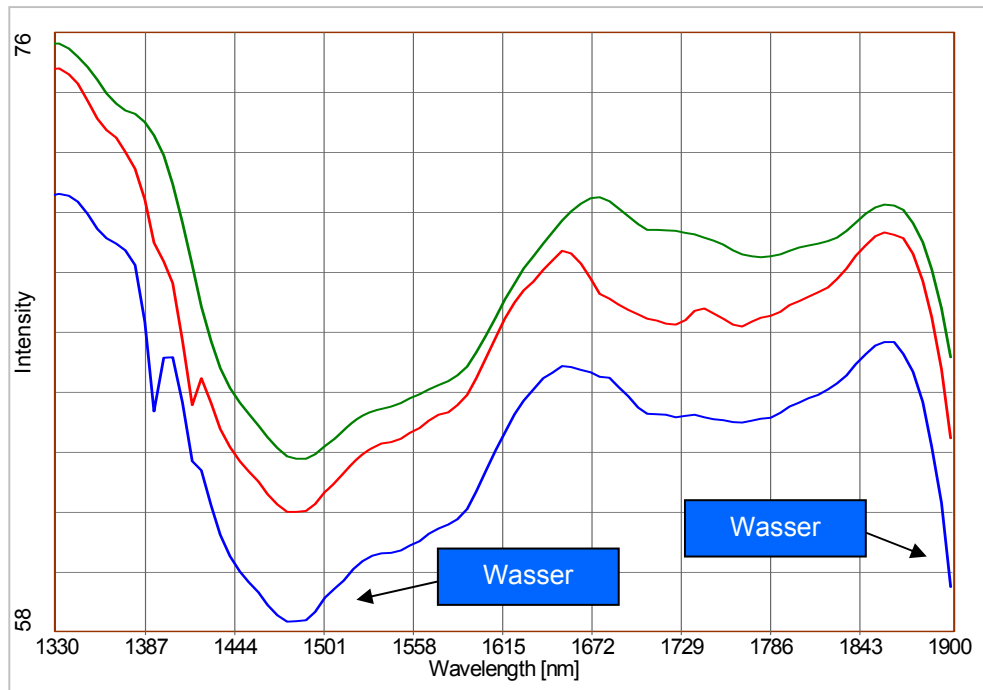


Abbildung 6

Drei Papierspektren, gemessen mit KUSTA1.9MSI mit je 96 Stützpunkten im Wellenlängenbereich 1330 nm bis 1900 nm (Büropapier, Magazin, Faltschachtel). Die sichtbaren Unterschiede im Verlauf der Spektren resultieren aus dem Feuchtegehalt der Proben. Unterschiedliche Papiersorten können nicht identifiziert werden.

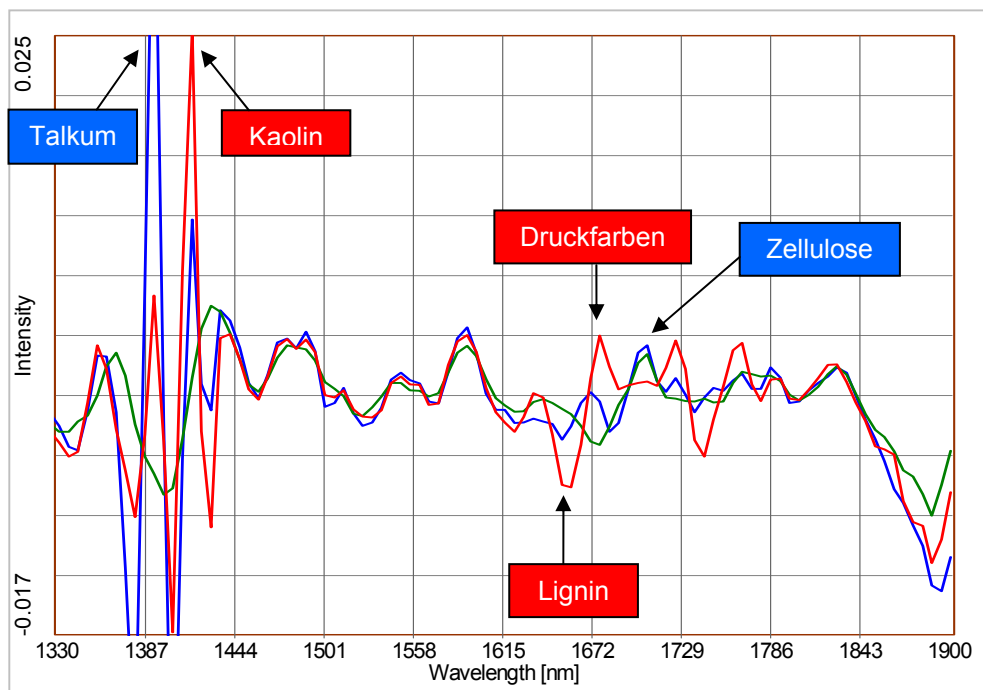


Abbildung 7

Wie Abbildung 6, jedoch 2. mathematische Ableitung (Büropapier, Magazin, Faltschachtel). Anhand der Absorptionsbanden können die unterschiedlichen Inhaltsstoffe identifiziert und quantifiziert werden. Die extrem scharfen Peaks der mineralischen Strichpigmente treten deutlich hervor.

Papier hat – im Gegensatz zu Kunststoffen – einen hohen Wasseranteil. Die Identifikation von Papiersorten ist deshalb nicht mit den Originalspektren möglich. Die Absorptionsbanden von Wasser dominieren. Bei Betrachtung der Spektren von Abbildung 6 sieht man, dass die Wasserbanden über einen breiten Wellenlängenbereich die Absorptionsbanden der anderen Inhaltsstoffe überlagern. Die derivative Spektroskopie ist ein großer Vorteil für die Analyse. Hier werden nicht die Originalspektren sondern ihre mathematischen Ableitungen für die weitere Analyse genutzt. Dadurch werden die Einflüsse von Störanteilen im Spektrum korrigiert und systematische Abweichungen von der Grundlinie entfernt. In der zweiten Ableitung existiert eine proportionale Beziehung zwischen Absorption und Konzentration der Inhaltsstoffe (siehe Abbildung 7). Es gibt Voraussetzungen für die Anwendung dieser Methode. NIR-Detektoren mit 32 oder weniger Messpunkten im Wellenlängenbereich sind für die derivative Spektroskopie nicht geeignet. Darum ist die Verwendung solcher Systeme für die Papieridentifikation fragwürdig.

3.4. NIR-Identifikationstechniken für das Altpapierrecycling

Sortieraufgabe	Abmessungen	LLA	Hersteller A	Hersteller B
1 Papier und Karton (Qualitativ)	LLA: O: > 100 mm M: 1 – 10 cm ² G: ≤ 3 m/s Hersteller A: O: 30 – 300 mm M: ≤ 1 cm ² G: ≤ 3 m/s Hersteller B: O: 50 – 300 mm M: k.A. G: k.A.	Sortierung nach EN 643 (Gruppe 1.11 Deinkingware) -Druckerzeugnisse (Zeitungen, Illustrierte, Kataloge) - Büropapiere	- Braune oder bedruckte Kartons und Wellpappen - Pappe-Zeitungen, Zeitschriften, - bedruckte Papiere - Tetra Pak	- Brauner Karton - Zeitungen - Kunststoffbeschichteter Karton - farbiger Karton - Vierfarbdruckpapier
	Störstoffe: - unerwünschte Papiere (braune Pappen und Wellpappen, Falt-schachteln, synthetische Papiere) beschichtete Erzeugnisse (kunststoffbeschichtete Papiere, Tetra Pak) - Kunststoffe	Störstoffe: Kunststoffe	Störstoffe: Kunststoffe	
2 Spezielle Papierfraktionen (Qualitativ)	LLA: O: > 100 mm M: 1 – 10 cm ² G: ≤ 3 m/s	Druckerzeugnisse, hergestellt auf Grundlage wasserbasierender Farben	Keine Angabe	Keine Angabe
	LLA: O: > 100 mm M: 1 – 10 cm ² G: ≤ 3 m/s	Druckerzeugnisse, hergestellt auf Grundlage UV-härtbarer Farben	Keine Angabe	Keine Angabe
3 Papierinhaltsstoffe (Quantitativ)	LLA: O: > 100 mm M: 1 – 10 cm ² G: ≤ 3 m/s	Bestimmung der Inhaltsstoffe (Kaolin, CaCO ₃ , Zellulose, Lignin) Masseprozent	Keine Angabe	Keine Angabe
4 Wassergehalt (Quantitativ)	LLA: O: > 100 mm M: 1 – 10 cm ² G: ≤ 3 m/s	Bestimmung des Papierfeuchtegehaltes (Masseprozent)	Keine Angabe	Keine Angabe

Erläuterung der Abkürzungen:

O: Objektgröße

M: Größe der Messfläche

G: Geschwindigkeit des Transportbandes

Die in der Sortenliste EN 643 enthaltene Spezifizierung für Deinkingware (Gruppe 1.11) gibt vor, welche Altpapiersorten ins Deinking überführt werden dürfen. Zu den unerwünschten Papierprodukten gehören Pappen und Kartona- gen aller Art. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über unerwünschte Stör- stoffgruppen und deren Identifikationsmöglichkeiten im Prozess.

Unerwünschte Deinking- Papiergruppen		Detektierbar mit NIR	Detektierbar mit Farbsensoren
1	Braune Well- und Voll- pappen, nicht kaschiert	Ja	Ja Gute Detektierbarkeit homogener Farbstrukturen
2	Braune Wellpappen, Papier kaschiert	Bedingt Abhängig von der Dicke der Kaschierung	Bedingt Nur wenn die Pappen zuvor aufgeschlitzt werden und die unbedeckte Innenseite gemessen werden kann.
3	Faltschachtelkartonagen aller Herstellungskategorien	Ja In Abhängigkeit von der Qualität werden Faltschach- teln in die Standardgruppen GZ, GG, GC, GD, U ein- gruppiert.	Nein Keine Unterscheidungs- kriterien zwischen falt- schachtelkartonagen und Zeitschriften, Illustrierten, Katalogen
4	Synthetische und kunststoff- beschichtete Papiere	Ja Gute Selektierung mit NIR, da sich die Kunststoff- Absorptionsbanden dominant markieren, Mischspektrum Papier/Kunststoff	Nein
5	Unterscheidung von Druck- erzeugnissen auf Basis von Flexo- und Offsetdruck	Ja Identifikation der Produkte über Analyse von signifi- kanten Farbinhaltsstoffen. Bei der Messung der Druck- erzeugnisse werden Misch- spektren (Papier und Druck- farbe) erhalten. Die signifi- kanten Farbinformationen sind nur auf der Grundlage der Derivativspektroskopie (2. math. Ableitung) bestimmbar.	Nein
6	Durchgefärbte Papiere	Bedingt	Bedingt

LLA Instruments GmbH

Justus-von-Liebig-Str. 9/11
12489 Berlin

Phone: +49 (0) 30-6290790-0

Fax: +49 (0) 30-6290790-10

www.lla.de

www.lla-instruments.com

mail@lla.de