2

Grundlagen und Methoden des HSI

JOCHEN ADERHOLD / ROBERT BRÜNING / PAUL-GERALD DITTRICH / WULF GRÄHLERT
MARTIN HUBOLD / RAIK ILLMANN / JOACHIM JONUSCHEIT / GUNTHER NOTNI
ALFRED RINNHOFER / MAIK ROSENBERGER / MICHAEL SCHÖBERL / ERIC WISOTZKY

2.1 Einführung

Die hyperspektrale Bildverarbeitung vereinigt eine klassische Methode der Naturwissenschaft, die optische Spektroskopie, mit einem verhältnismäßig jungen Verfahren zur Gewinnung räumlicher Informationen im optischen Bereich, der Bildverarbeitung. Der Begriff »optisch« ist hier umfassend gemeint und schließt außer dem sichtbaren Licht auch die benachbarten Spektralbereiche (Ultraviolett, Infrarot) ein.

Die optische Spektroskopie ist seit über zweihundert Jahren ein wichtiges Instrument in der Grundlagen- und in der angewandten Forschung. Allgemein zergliedert sie elektromagnetische Strahlung im optischen Bereich, z. B. beschrieben durch die Intensität, nach einer anderen physikalischen Größe, meistens, und im vorliegenden Leitfaden ganz überwiegend, nach der Wellenlänge. Sie trug zur Entstehung der Quantentheorie bei und ermöglichte die Entdeckung der Expansion des Universums. In der angewandten Forschung wird sie vielfach genutzt, um Aussagen über die chemische Natur einer Probe zu treffen, indem man elektromagnetische Strahlung mit ihr in Wechselwirkung treten lässt und sie dann spektroskopisch untersucht.

Die Bildverarbeitung befasst sich mit der mathematischen Behandlung digitaler Bilder und hat sich in den letzten Jahrzehnten parallel zur digitalen Computertechnik rasch entwickelt. Ein digitales Bild kann zum Beispiel durch eine digitale Kamera aufgenommen werden und wird durch eine Zahlenmatrix repräsentiert, die die meist rechteckige Geometrie des Kamerasensors wiedergibt. Bei Grauwertbildern ist sie zweidimensional, da jedes Pixel durch genau einen Zahlenwert beschrieben wird. Farbbilder haben drei Zahlenwerte pro Pixel (jeweils einen für die Farbbereiche rot, grün, blau), die Matrix ist dann dreidimensional.

Das Prinzip der hyperspektralen Bildgebung erweitert die Idee des Farbbilds, indem sie jedem Pixel nicht drei, sondern bis zu mehrere hundert Zahlenwerte zuordnet. Diese entstehen durch die spektrale Zerlegung des Signals, bevor es auf den Detektor fällt. Spektroskopie und digitale Bildgebung werden also kombiniert, man erhält für jedes Pixel ein komplettes Spektrum, wenngleich die spektrale Auflösung (meist einige Nanometer) deutlich geringer ist als in der klassischen Spektroskopie.

Vielfach findet sich auch der Begriff »multispektral«. Er unterscheidet sich vom Begriff »hyperspektral« rein quantitativ durch die (geringere) Zahl der Zahlenwerte pro Pixel. Eine Grenze zwischen den beiden Begriffen kann nur willkürlich gezogen werden, zum Beispiel bei zehn Zahlenwerten pro Pixel.

Im Fokus dieses Leitfadens stehen industrielle Anwendungen der hyperspektralen Bildverarbeitung. Zwar werden Hyperspektralverfahren in Astronomie und Fernerkundung schon seit langer Zeit verwendet. Sie sind aber nicht Thema dieses Leitfadens, da sie ganz andere technische Anforderungen stellen und meistens auch nicht kostenkritisch sind. Um die ganze Bandbreite hyperspektraler Methoden zeigen zu können, behandelt der Leitfaden allerdings auch Beispiele aus der Medizin, die sich wenigstens prinzipiell auf industrielle Anwendungen übertragen lassen.

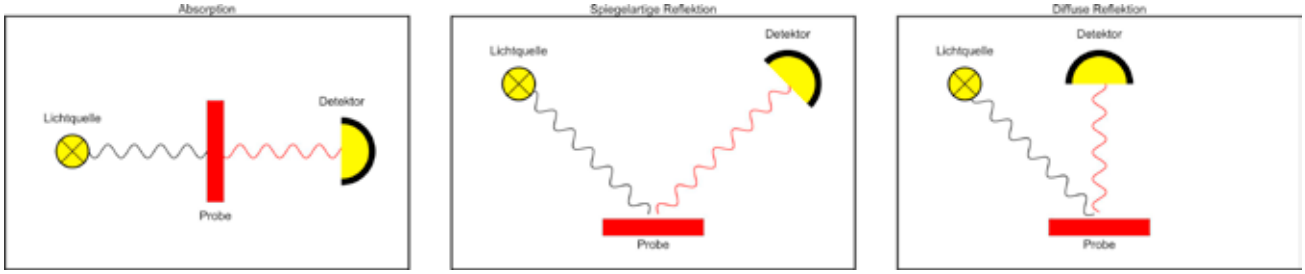


Bild 1: *Eine Auswahl möglicher Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie (Quelle: Fraunhofer WKI).*

2.2 Methoden der hyperspektralen Bildaufnahme

Es gibt eine Vielzahl möglicher Wechselwirkungsmechanismen zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie, wie zum Beispiel Absorption sowie spiegelartige (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) und diffuse Reflexion (Einfallswinkel ≠ Ausfallswinkel) (siehe Bild 1). Letztere hat in der Praxis die größte Bedeutung, da sie wenig Anforderungen an die Probenvorbereitung stellt und, anders als die spiegelartige Reflexion, von Informationen dominiert wird, die durch eine intensive Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie entstehen. Daneben existieren komplexere Wechselwirkungsmechanismen, wie etwa die Fluoreszenz oder der Raman-Effekt. Daher werden im folgenden Abschnitt 2.2.1 die verschiedenen technischen Realisierungen im Bereich der diffusen Reflexionsspektroskopie ausführlich erläutert und in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 werden eine Reihe weiterer Spektroskopiemethoden mit ihren jeweiligen Techniken vorgestellt.

2.2.1 Diffuse Reflexionsspektroskopie

Für die spektrale (multispektrale und hyperspektrale) Bildgebung können in diesem Bereich unterschiedliche Messprinzipien angewendet werden. Diese Messprinzipien ermöglichen die Aufnahme von Messergebnissen in Form eines sogenannten »Spektralwürfels«, welcher sowohl die Ortsinformationen (x und y) als auch die Spektralinformationen (Wellenlänge λ) einer Bildszene enthält (Bild 2). Es handelt sich dabei um einen dreidimensionalen Ergebnisraum, bestehend aus zwei räumlichen und einer spektralen Messgröße. Aus der aufgenommenen Bildszene können somit Informationen über Form, Abmessungen und Struktur sowie die erweiterten Materialeigenschaften bzw. chemische Beschaffenheit von zu untersuchenden Messobjekten gewonnen werden. Die Szene bzw. das Objekt wird somit örtlich und spektral aufgelöst erfasst, d. h. es liegt für jedes Pixel ein vollständiges Spektrum

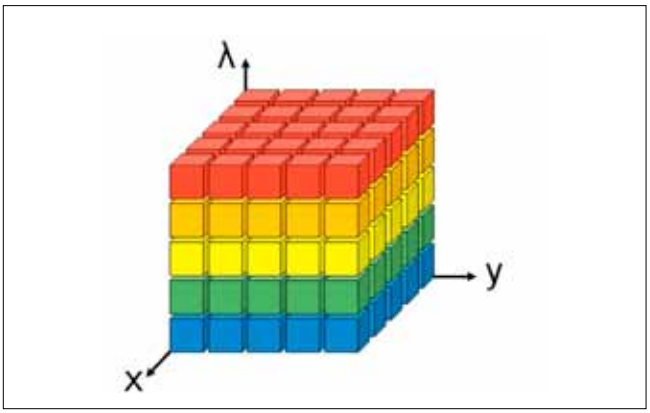


Bild 2: *Spektralwürfel: 3D-Datenwürfel mit x und y für die Ortsinformation und λ für die Spektralinformation (Quelle: Fraunhofer IOF).*

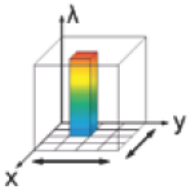
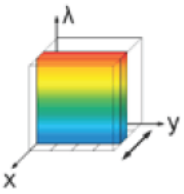
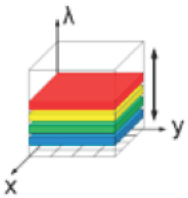
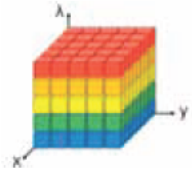
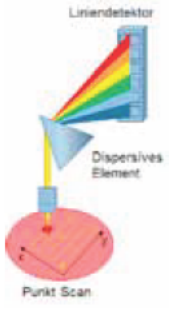
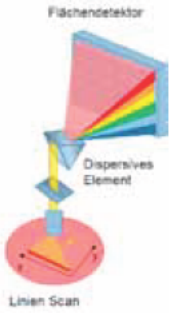
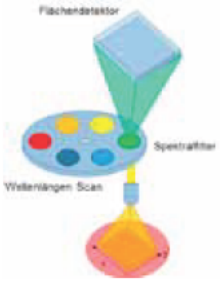
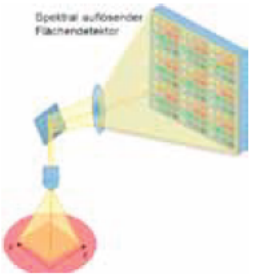
vor. Die Unterschiede bei der multi- oder hyperspektralen Bildgebung liegen im anzuwendenden Messprinzip. Die Messprinzipien unterscheiden sich im Aufbau und in der Anordnung des optischen Systems, der Methode der spektralen Kanaltrennung, in den Eigenschaften des Bildsensors (Primärwandler) sowie in der Art und dem zeitlichen Verlauf der Abtastung der Bildszene. Hier werden grundsätzlich vier Abtastprinzipien unterschieden (punktweise, linienhafte und flächenhafte Snapshot-Abtastung sowie spektrales Scanning; siehe Tabelle 1). Je nach Messprinzip resultieren unterschiedlichste Systemlösungen, die in Abhängigkeit der Messaufgabe ausgewählt werden müssen.

In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Messprinzipien für die spektrale Bildgebung näher erläutert. Auf das Punkt-Scanning wird verzichtet, da es in der Praxis nur noch wenig Bedeutung hat. Im Bereich des Linien-Scanning wird sich die Darstellung auf Pushbroom-Imager beschränken (Abschnitt 2.2.1.1). Grundsätzlich sind Alternativen wie zum Beispiel Arrays aus Einzeldetektoren denkbar, die aber wenig praktische Bedeutung haben. Flächenhafte Detektoren haben, wie Linien- und Zeilendetektoren auch, das wellenlängentrennende (dispersive) Element überwiegend auf der Detektorseite, arbeiten also mit spektral breiter Beleuchtung. Eine weitere Einteilung kann nach der Art des dispersiven Elements erfolgen und insbesondere danach, ob die Aufnahme bei allen Wellenlängen zur gleichen Zeit erfolgt (Snapshot-Anordnung) oder nicht (Staring-Anordnung). Es gibt aber auch die Möglichkeit, eine Wellenlängenabhängigkeit auf der Beleuchtungsseite zu realisieren, dann aber zwangsläufig in einer Snapshot-Anordnung (Abschnitt 2.2.1.2). Auch eine Kombination beider Ansätze ist möglich (Abschnitt 2.2.1.6).

2.2.1.1 Pushbroom-Imager

Das Bildaufnahmeverfahren nach dem Pushbroom-Imaging-Prinzip gliedert sich in die Familie der Aufnahmeverfahren für die bildgebende Spektroskopie ein. Aus dem geschichtlichen Blickwinkel hat das Verfahren des Pushbroom-Imaging (deutsch: Straßenbesen) seinen Ursprung in der Fernerkundung. Dort ist es in seinem ursprünglichen Aufbau noch immer in diversen Fernerkundungssatelliten im Einsatz.
Die Begründung dafür ist recht einfach. Da das Verfahren zwingend eine Relativbewegung erfordert, eignet es sich hervorragend für die spektrale Erfassung bewegter Objekte. In Bezug auf die Anwendungsfelder ergeben sich für diese Methode zahlreiche Möglichkeiten. Sie reichen von Applikationen in der Inline-Prozesskontrolle, im Prozessmonitoring, in der Qualitätssicherung bis hin zu Remote-Sensing-Applikationen in Satelliten, Drohnen und anderen Flugobjekten [1, 2, 9].

Tabelle 1: *Messprinzipien für die spektrale Bildgebung*

Prinzip	**Punkt-Scanning (Whiskbroom)**	**Linien-Scanning (Pushbroom)**	**Flächen-Scanning (Staring)**	**Snapshot**
Abtastung	punktweise	linienhaft	flächenhaft	flächenhaft
Generierung Orts- und Spektralinformationen	parallel: (λ) sequentiell: (x,y)	parallel: (x,λ) sequentiell: (y)	parallel: (x,y) sequentiell: (λ)	parallel: (x, y, λ)
Physikalische Prinzipien / Technologien für spektrale Bildgebung	• dispersive Elemente	• multiple Linien-detektoren • dispersive Elemente	• Filterrad • durchstimmbare Filter (LCTF, AOTF,...) • multiple Quellen • durchstimmbare Quellen • Interferometer	• Mosaikfilter • Array dispersiver Elemente • Filter- und Mikro-linsenarray
Aufbau Spektralwürfel				
Grundanordnung				
Typische Parameter:				
Spektrale Auflösung	hoch	hoch	niedrig – mittel	niedrig – mittel
Messgeschwindigkeit	langsam	mittel	hoch - mittel	hoch

Das Objektfeld entspricht beim Pushbroom-Imaging dem einer Zeilenabtastung. In Bild 3 ist der schematische Aufbau eines Pushbroom-Imagers gezeigt. Bei diesem System wird die Dispersion durch ein Gitter (3) umgesetzt. Ein Eintrittsspalt (2) sorgt im optischen System dafür, dass ein linienförmiges Objektfeld nach dem Objektiv (1) das optische System durchläuft. Durch anschließende Projektion der »aufgefächerten« Linie auf die gesamte Gitteroberfläche wird durch »Winkeldispersion« ein funktionaler Zusammenhang zwischen Reflexionswinkel und Wellenlänge hergestellt, in diesem Fall analytisch durch die Gittergleichung beschreibbar. Somit ist in einer Dimension das, wenn auch nur linienförmig ausgeprägte Objektfeld ortsaufgelöst codiert, während sich in der anderen Dimension das durch die Dispersion »aufgefächerte« Spektrum erstreckt. Das entstehende aufgefächerte Strahlenbündel trifft letztendlich bildseitig auf den flächenhaften Sensor (4). Die Erfassung der zweiten räumlichen Koordinate wird nun durch eine orthogonale Verschiebung des linienförmigen Objektfelds um nicht mehr als eine Linienbreite mit einem folgenden, erneuten Bildeinzug erreicht. Dieser wird den vorhergehenden, gespeicherten Informationen hinzugefügt; ein Vorgang, der als »Stitching« (deutsch: Nähen) bezeichnet wird. Durch das Aneinanderreihen der zeilenförmigen Ortssignale entsteht letztendlich ein zweidimensionales, orts- und frequenzaufgelöstes Bild. Dies entspricht dem eingangs erwähnten Spektralwürfel [4, 8].

Besondere Aufmerksamkeit gilt hier vor allem dem Betrag der Verschiebung. Ist dieser größer als die objektseitige Linienbreite, so entsteht eine Unterabtastung mit Informationsverlust innerhalb der Ortsauflösung. Der umgekehrte Fall entspricht einer Überabtastung. Diese stellt zwar keinen Informationsverlust dar, führt jedoch bei Nichtberücksichtigung zu längenmesstechnischen Fehlern und unscharfen Bildern. Besonders für Anwendungen in der Fernerkundung ist die Zuhilfenahme sekundärer Messgrößen (z. B. Beschleunigungen) zur Berechnung und Korrektur der Verschiebung sinnvoll.

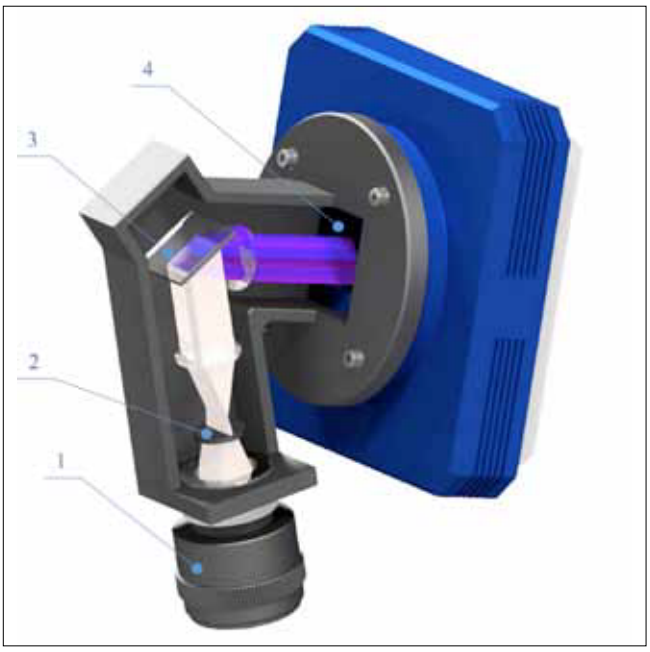


Bild 3: *Schnittdarstellung eines Pushbroom-Sensorsystems mit Gitter (Strahlengang qualitative Darstellung für den UV-Bereich)* *(Quelle: nach [4]).*

Die Initialisierung der translatorischen Relativbewegung des Messobjekts gegenüber dem Sensor kann sowohl durch Bewegung des Bildaufnahmesystems als auch durch Bewegung des Messobjekts selbst erfolgen. Prozesstechnisch lässt sich wohl überwiegend letztere Variante technologisch einfacher und wirtschaftlich sinnvoller realisieren. Besonders für Messaufgaben in der Inline-Prozesskontrolle kann die ohnehin vorhandene Bewegung der Probe auf einem Förderband oder ähnlichem Bewegungssystem genutzt werden. Entscheidend ist jedoch, dass die Bewegung dem metrischen Abtastmuster der Bildzeile gerecht werden muss. Hier ergibt sich bei falscher Handhabung unter anderem das Problem der bereits beschriebenen Unterabtastung oder einer Bewegungsunschärfe im verrechneten Bild.

In Hinblick auf die dem optischen System inhärenten geometrischen Aberrationen hat dieses Verfahren einige Vorteile. Die wohl vorteilhafteste Eigenschaft ergibt sich aus der Tatsache, dass die durch die optischen Komponenten entstehenden Verzeichnungen (optische Aberrationen 2. Ordnung, Seidel-Aberrationen) die geometrische Abbildung

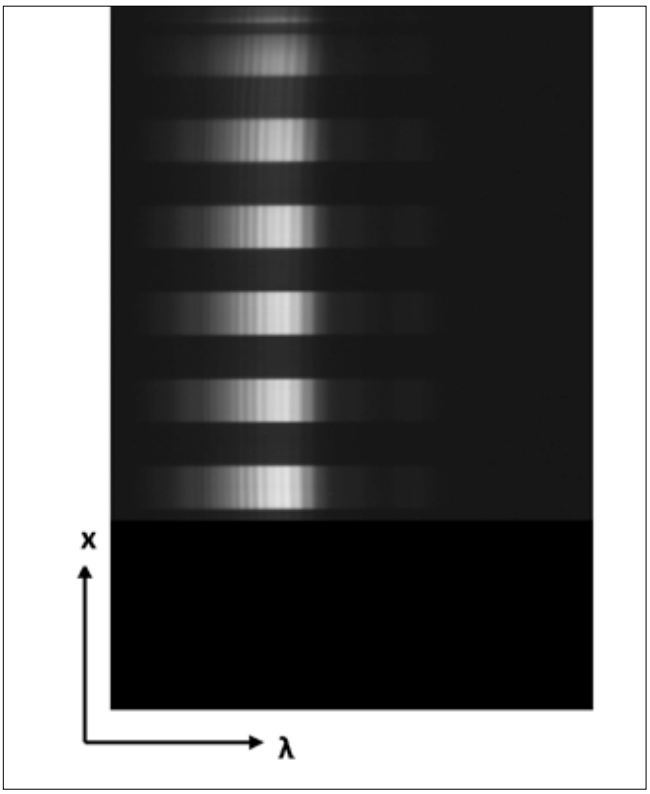


Bild 4: *Reales Sensorbild eines schachbrettmusterartigen Objekts* *(Quelle: Fraunhofer IOF).*

prinzipiell nur in einer Dimension beeinflussen, denn der Einfluss auf eine Bildzeile ist als vernachlässigbar klein anzusehen. Die selbstverständlich noch vorhandene Verzeichnung der zweiten Dimension wirkt sich auf die Linearität der spektralen Verteilung aus, was sich bildlich als sogenannter »Smile-Effekt« auf dem tatsächlichen Sensorsignal als Bogenstück ausprägt (Bild 4). Durch einen geeigneten Kalibrierprozess kann unter Zuhilfenahme eines Monochromators oder eines durchstimmbaren Weißlichtlasers als spektrale Maßverkörperung ein hinreichend genaues Kalibriermodel erstellt werden. Dieses kann als Polynom analytisch beschrieben oder direkt in ein diskretes, numerisches Korrekturmodel überführt werden. Durch anschließende Faltung des eingezogenen Sensorsignals mit dem Korrekturmodell ist es möglich, die chromatische Aberration zu kompensieren. Mit dem gleichen Ansatz kann auch die eindimensionale, geometrische Aberration beherrscht werden [5].

Bild 5 zeigt exemplarisch einen Laboraufbau eines multiplen Pushbroom-Systems. Mit diesem können Objekte in einem Spektralbereich von 200 bis 1700 nm örtlich aufgelöst spektral abgetastet werden. Hierzu ist für die Spektralbereiche UV, VIS/NIR und SWIR jeweils ein Pushbroom-Scanner integriert. Bild 6 zeigt die Quanteneffizienzen der drei abgestimmten Systeme [7]. Ein durch eine hochpräzise Linearachse angetriebener Schlitten sorgt für die notwendige translatorische Relativbewegung. Bei dieser Anordnung muss die Probe sequenziell für

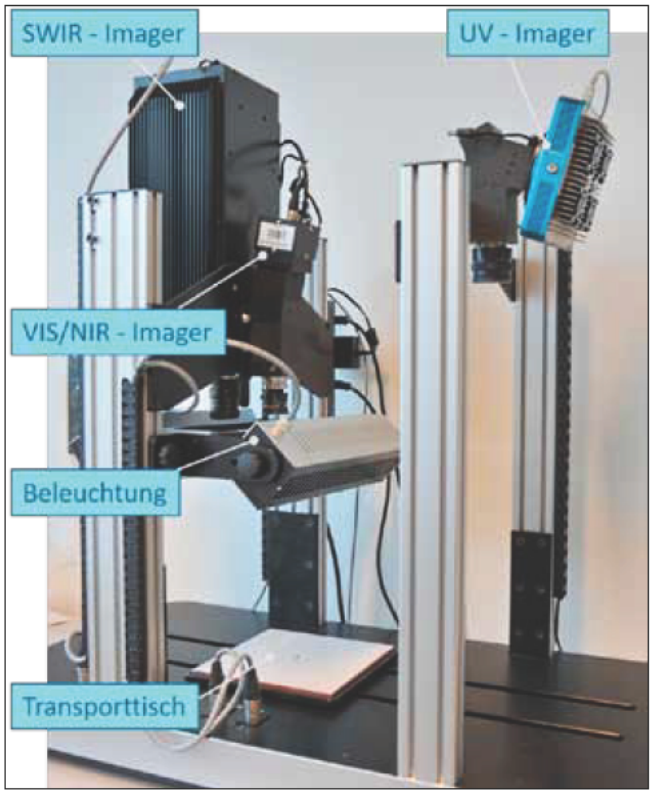


Bild 5: *Laboraufbau eines multiplen Pushbroom-Systems für einen Spektralbereich von 200 bis 1700 nm (Quelle: TU Ilmenau).*

photon focus

Das Hyperspektrale Drohnensystem

Mit dem Hyperspektralen Drohnensystem wird das Unsichtbare erkennbar.

Je nach Anwendung ist das Drohnensystem mit SWIR, Low Light oder Hyperspektral Kameras erhältlich.

Das System eignet sich daher ideal für unterschiedlichste Anwendungen:
- Früherkennung eines Krankheitsbefalls bei Pflanzen
- Baustellen- und Strasseninspektion
- Erkennung von Boden- und Gewässerverschmutzungen und vieles mehr.

Kontaktieren Sie uns, wir beraten Sie gerne.

www.photonfocus.com

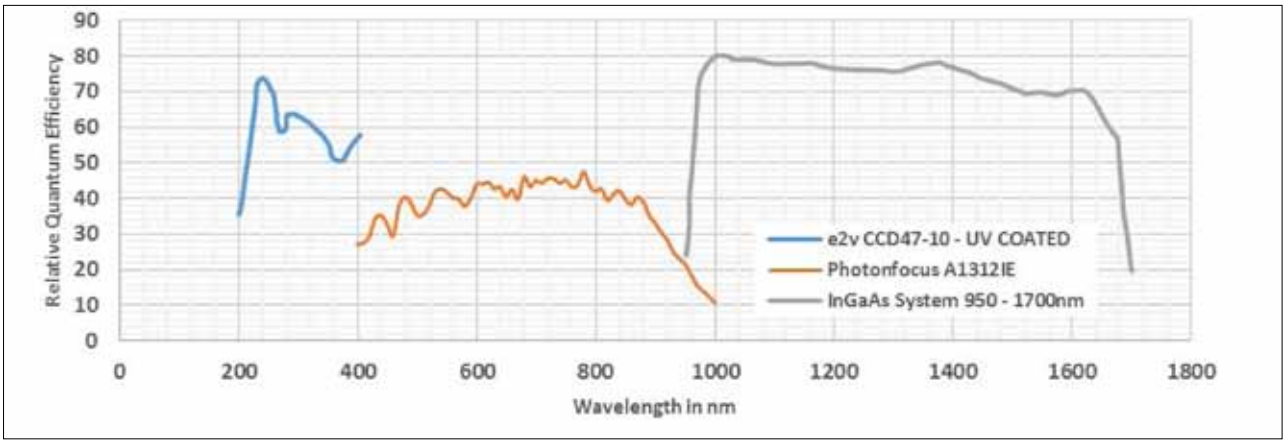


Bild 6: *Quanteneffizienzen dreier abgestimmter Systeme* *(Quelle: nach [7]).*

jeden Spektralbereich individuell im Objektfeld des jeweiligen Bildaufnahmesystems angeordnet werden. Die Abstimmung der Objektfelder jedes Systems auf ein einziges ist für bestimmte Spektralbereiche durch die Verwendung spezieller optischer Komponenten (z. B. Strahlteiler) grundsätzlich möglich, jedoch aufgrund der Intensitätsverluste und der zusätzlichen Aberrationen für die Praxis nicht zu empfehlen.

2.2.1.2 Snapshot-Imaging

Mosaik-Bildsensoren

Die ortsaufgelöste Farb- und Spektralwertermittlung ist in einer Vielzahl von Applikationen in Industrie, Biologie und Medizin, Umwelt und Verwaltung, Sicherheit sowie zukünftig auch im täglichen Leben ein wichtiges Werkzeug für die technische Erfassung von Informationen aus Bildszenen zur Qualitätssicherung von Produkten und Prozessen [10]. Immer häufiger erfordern aktuelle Aufgabenstellungen, dass ortsaufgelöste Farb- und Spektralwertinformationen von Bildszenen in Videoechtzeit erfasst, interpretiert und ausgewertet werden müssen. Hierfür bietet sich der Einsatz von Snapshot-Mosaik-Kameras an.

Die Bezeichnung »Snapshot« lässt sich mit dem Begriff »Schnappschuss« übersetzen. Diese Lösung ermöglicht die gleichzeitige Aufnahme der Orts- und Spektralinformationen in einer einzigen Integrationsperiode des Sensors [11]. Snapshot-Mosaik-Kameras sollten somit angewendet werden, wenn es sich um bewegte Objekte handelt bzw. die aufzunehmende Bildszene eine Aufnahme mit Videofrequenzen erfordert.

Die Kombination von pixelzugeordneten Spektralfiltermatrizen und standardisierten CMOS-Sensoren ermöglicht die Herstellung und Anwendung von miniaturisierten orts- und spektralauflösenden Sensoren, welche, angewendet in Snapshot-Mosaik-Kameras, im Vergleich zu Whiskbroom-, Staring- oder Pushbroom-Kameras eine innovative Lösung darstellen. Bei den Snapshot-Mosaik-Kameras kommen multispektral auflösende Mosaik-Filter-On-Chip CMOS-Sensoren zum Einsatz, welche sich dadurch auszeichnen, dass spektralselektive Filter in einer sich über die gesamte Sensorfläche in x- und y-Richtung wiederholenden Matrix auf den Pixeln des CMOS-Sensors aufgebracht sind. Snapshot-Mosaik-Kameras können als technische Weiterentwicklung von Bayer-Pattern RGB-Kameras verstanden werden. Aktuelle am Markt verfügbare multispektrale Snapshot-Mosaik-Kameras arbeiten mit 1.3, 2 und 4 Megapixel CMOS-Sensoren, welche mit 4, 9, 16 oder 25 unterschiedlichen spektralselektiven Filtern im sichtbaren (VIS) oder nahinfraroten (NIR) Spektralbereich ausgestattet sind (Bild 7).

Die in der sich wiederholenden Filtermatrix auf den Pixeln des CMOS-Sensors aufgebrachten spektralselektiven Filter basieren auf dem Fabry-Pérot-Filterprinzip [12]. Dabei bestimmt die Resonatorlänge des aufgebrachten Filters dessen spektrale Empfindlichkeit. Neben den dielektrischen Bandpass-Interferenzfiltern existieren auch sogenannte Oberflächenplasmonen-Resonanzfilter [13].

Bei den Sensoren für Snapshot-Mosaik-Kameras wird prinzipiell zwischen monolithisch gefertigten und hybrid gefertigten Sensoren unterschieden (Bild 8). Monolithische Mosaik-Bildsensoren sind dadurch gekennzeichnet, dass die Filter direkt im CMOS-Halbleiterherstellungsprozess auf die monochromatischen CMOS-Sensoren aufgebracht werden. Weiterhin zeichnen sie sich durch eine geringere Bauhöhe und kostengünstigere Fertigung bei sehr großen Stückzahlen aus. Die Herstellungsmethoden werden wirtschaftlich ab Stückzahlen von mehreren hunderttausend bis Millionen Sensoren [14]. Bei hybriden Mosaik-Bildsensoren werden die Filter auf ein separates Substrat aufgebracht und anschließend über dem Bildsensor gelegt und fixiert. Sie zeichnen sich durch die Integration von Mikrolinsen zwischen Spektralfiltermatrix und CMOS-Sensorpixeln aus. Dadurch kann das Sensorkanalübersprechen reduziert werden und eine höhere Anzahl

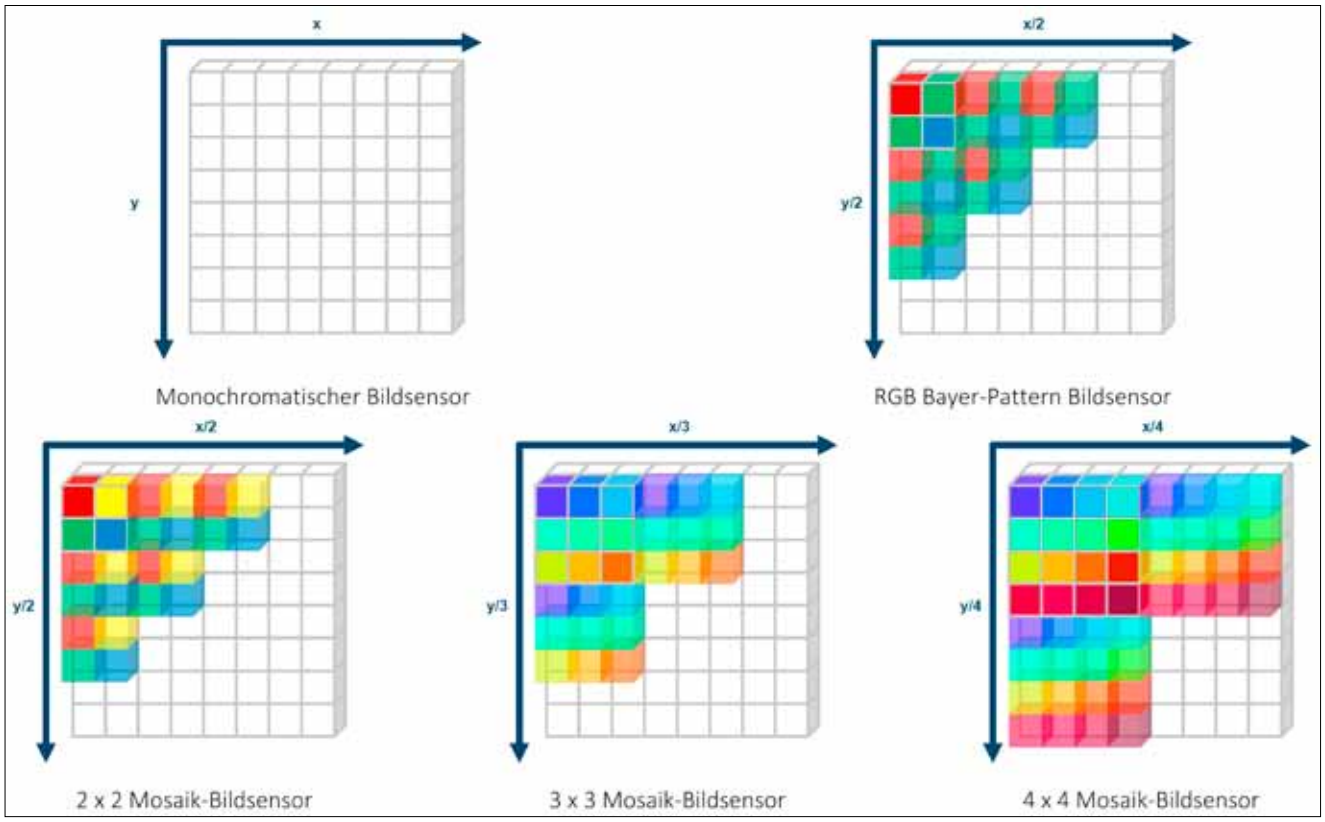


Bild 7: *Prinzipdarstellung: Bildsensoren für Snapshot-Mosaik-Kameras* (Quelle: TU Ilmenau).

an Photonen kann das direkt darunterliegende Sensorpixel erreichen. Der hybride Ansatz eignet sich für geringere Stückzahlen von wenigen Dutzend bis zu einigen tausend oder zehntausend Sensoren. Weiterhin ist es möglich, auf Basis ein und desselben Sensors unterschiedliche multispektrale Konfigurationen mit den Filtern zu realisieren [14].

Durch die Kombination von pixelzugeordneten Spektralfiltermatrizen auf standardisierten CMOS-Sensoren erhöht sich die Integrationsdichte und Systemkomplexität von Snapshot-Mosaik-Kameras gegenüber den etablierten Kameras mit monochromatischem Bildsensor oder RGB-Bayer-Pattern-Bildsensor um ein Vielfaches (siehe Bild 7). Auch geht mit der Kombination von pixelzugeordneter Spektralfiltermatrix auf standardisierten CMOS-Sensoren eine von der Anzahl der Spektralwellenlängen abhängige Reduzierung der Ortsauflösung einher. Derartige Sensoren können auch als Zeilensensoren oder als sogenannte Snapshot-Tiled-Kameras realisiert werden. Bei Snapshot-Tiled-Kameras weisen immer makroskopisch zusammenhängende Sensorbereiche bestehend z. B. aus 256 × 256 Pixeln die gleiche spektrale Filtercharakteristik auf. Hierbei werden beispielsweise 32 verschiedene spektralselektive Sensorbereiche realisiert.

Vorteil bei der Anwendung von Snapshot-Mosaik-Kameras ist deren mögliche Echtzeitfähigkeit (typisch 60 Hz Bildrate), sodass für eine spektrale Bildgebung kein Bewegen des Messobjekts oder des Sensors erforderlich ist. Systembedingte Nachteile von Snapshot-Mosaik-Kameras sind die reduzierte Orts- und Spektralauflösung sowie auftretende

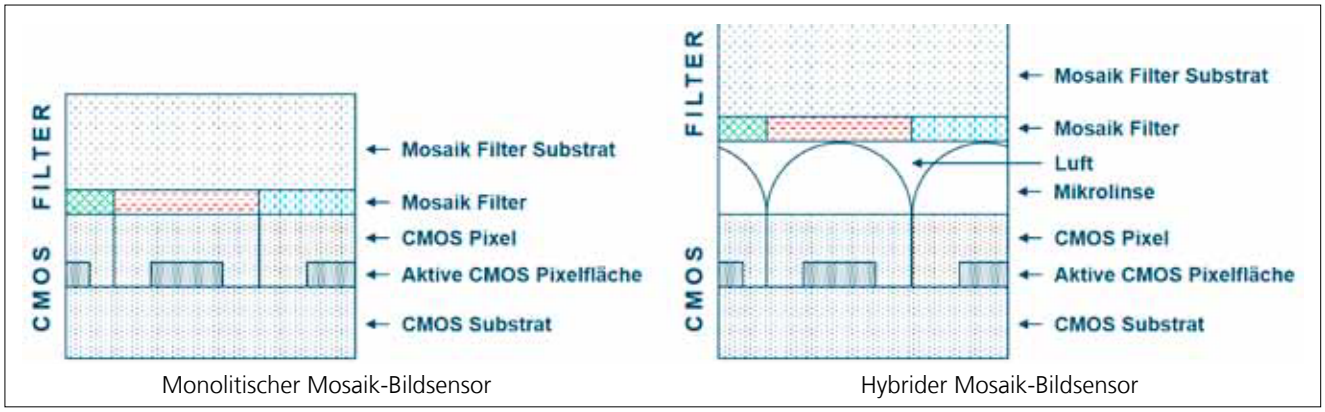


Bild 8: *Prinzipdarstellung: Aufbau von Bildsensoren für Snapshot-Mosaik-Kameras* (Quelle: TU Ilmenau).

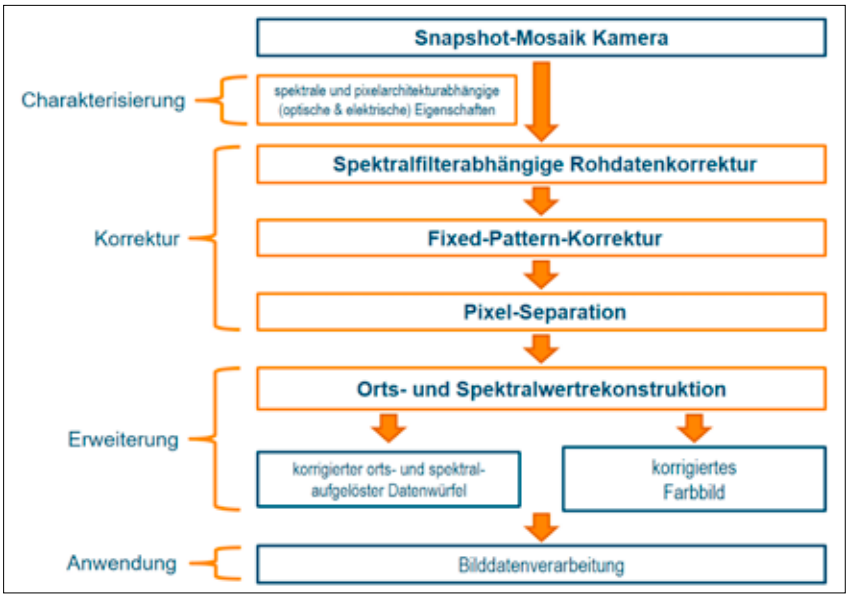


Bild 9: *Anwendungsmodell für Snapshot-Mosaik-Kameras* (Quelle: TU Ilmenau).

Übersprecheffekte, welche durch messtechnische Charakterisierung und darauf aufbauend eine algorithmische Korrektur nur bedingt korrigiert werden können.

Die Bildaufnahme mit Snapshot-Mosaik-Kameras wird durch eine Vielzahl an systembedingten Eigenschaften beeinflusst: Inhomogenität der spektralen Filtermaterialien durch mikrotechnische Verarbeitungseinschränkungen und elektronische Verarbeitungsfehler bei der Bildszenenaufnahme durch Übersprechen, Leckagen und Oberwellen. Darüber hinaus haben die angewendete Beleuchtung und die Eigenschaften der verwendeten Optik für die Snapshot-Mosaik-Kamera einen Einfluss auf die Bildszenenaufnahme [15]. Um diese systembedingten Eigenschaften zu ermitteln und anteilig zu korrigieren, sollten Snapshot-Mosaik-Kameras messtechnisch charakterisiert und ein erweitertes Sensormodell zur algorithmischen Korrektur entwickelt und angewendet werden [16]. Bild 9 enthält einen allgemeinen Leitfaden für die Anwendung von Snapshot-Mosaik-Kameras im sichtbaren Spektralbereich (siehe auch [16, 17, 18, 19]).

Multiapertur-Systeme

Einen alternativen Ansatz für das Snapshot-Imaging bilden miniaturisierte Multiapertur-Systeme. Dabei werden N Abbildungskanäle in einem Array angeordnet, wobei jedem Kanal eine spezifische Wellenlänge zugeordnet wird. Dies kann in Analogie zum Mosaik-Ansatz durch eine angepasste Filtermatrix geschehen, wobei sich jedes Filterelement über einem makroskopischen Sensorabschnitt erstreckt und nur einmal pro Sensor vorhanden ist. Dabei bestimmt die Anzahl der verwendeten Filterkacheln die spektrale Abtastung und die Anzahl der von jeder Kachel bedeckten Pixel die räumliche Auflösung [20]. Eine weitere Möglichkeit zur Umsetzung eines solchen parallelisierten Systems stellen linear variierende Filter dar. Im Gegensatz zu diskreten Filtern müssen diese Filter jedoch in die Aperturebene der Abbildungsoptik eingebracht werden [21], da dort die räumliche Information gleichmäßig über den genutzten Filterabschnitt verteilt vorliegt und sich ebenfalls spektral homogene Einzelbilder ergeben (siehe Bild 10). Die im Vergleich zu Mosaikkameras verwendeten makroskopisch strukturierten Filter, sowie eine mögliche Filterintegration unabhängig vom CMOS-Sensor, erlauben es auch, komplexere Filterstrukturen mit einer verbesserten Filtercharakteristik einzusetzen. Dabei können insbesondere zweiseitig beschichtete Filter zum Einsatz kommen, mit denen ein größerer Spektralbereich als mit klassischen Mosaikfiltern abgedeckt wird.

Neben den lateral diskret oder kontinuierlich strukturierten Filterkomponenten kommt für dieses Konzept eine angepasste Arrayoptik zum Einsatz.

Diese ermöglicht zum einen die Integration einer Vielzahl von Kanälen auf einem einzelnen Bildsensor, zum anderen eine ultraflache Bauweise der Optikkomponenten mit Bauhöhen von unter einem Zentimeter. Die verwendeten Mikroobjektive setzen sich dabei aus zwei funktionsbestimmenden Arraystrukturen zusammen. Einerseits sind dies die abbildenden Mikrolinsenarrays, die aufgrund ihrer kurzen Brennweite einen großen Schärfentiefebereich besitzen, mit einer fixen Fokusposition eine

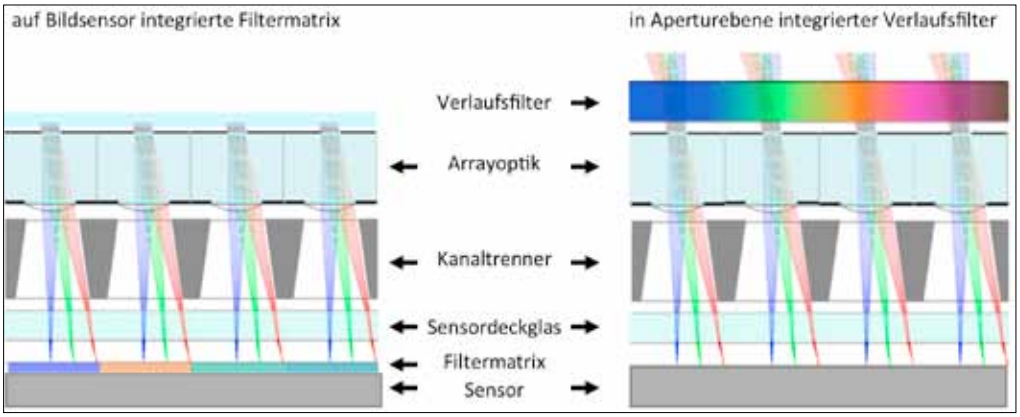


Bild 10: *Systemkonzept für Multiapertur-Snapshot-Kamera* (Quelle: Fraunhofer IOF).

scharfe Abbildung im Objektraum ab 20 cm ermöglichen und keine beweglichen optomechanischen Elemente für die Refokussierung benötigen. Andererseits ermöglicht eine 3D-Feldblendenstruktur zwischen Linsenarray und Sensor eine effektive Unterdrückung von Kanalübersprechen auf dem gemeinsam genutzten Bildsensor. Der modulare Arrayaufbau des Konzepts erlaubt zudem eine einfache Skalierung des Systems und es lassen sich die Anzahl spektraler Stützstellen sowie die räumliche Auflösung flexibel über die Kanalanzahl und den lateralen Kanalabstand einstellen. Dadurch ergibt sich ein für kleine und mittlere Stückzahlen einfach an konkrete Anwendungen anzupassendes Systemkonzept.

Mit beiden Systemen werden in Echtzeit N individuell spektral begrenzte monochromatische Aufnahmen der Bildszene erfasst (siehe Bild 11). Diese müssen anschließend von einem Bildverarbeitungsalgorithmus miteinander überlagert werden. Hierfür müssen zuerst die Einzelbilder segmentiert und eine kanalspezifische Bildkorrektur durchgeführt werden. Danach erst erfolgt die spektrale Rekonstruktion mittels Überlagerung der ortsaufgelösten Intensitätswerte der Einzelkanäle. Voraussetzung hierfür ist, dass im Vorfeld die relative Lage jedes Einzelkanals in Bezug auf den Bildsensor mittels einer Kalibrierung für verschiedene Objektab stände bestimmt wurde. Dies ist nötig, da aufgrund der lateral leicht versetzten Anordnung der Kanäle untereinander eine tiefenabhängige Verschiebung korrespondierender Ortskoordinaten zwischen den verschiedenen Einzelansichten auftritt. Zudem erfolgt eine pixelgenaue spektrale Kalibrierung jedes Einzelkanals, um spektrale Verschiebungen aufgrund ortsabhängiger Einfallswinkel auf den Filterelementen zu kompensieren. Weitere Korrekturalgorithmen erfolgen analog zu Mosaik-Kamerasystemen, wie die Aufnahme von Hell- und Dunkel-Referenzbildern für die Fixed-Pattern-Korrektur, der spektrale Weißabgleich der Lichtquelle oder die Sensorwerterweiterung mittels linearer und nichtlinearer Methoden.

2.2.1.3 Staring Imaging

Zusätzlich zu Mosaik- oder Linienscan-Kameras ist es möglich, die Wellenselektion z.B. mittels eines Filterrads und einer zeitlich sequentiellen Aufnahme zu erreichen. Da der Aufbau mit einem Filterrad relativ kostengünstig zu realiseren ist, wird dieser Ansatz im folgenden Abschnitt vorgestellt. Hierbei wird die Kamera mit einem zwischen Objektiv und Sensor eingebauten Filterrad ausgestattet (Bild 12). Ein aufzunehmendes Objekt wird mit einer Lichtquelle beleuchtet und die reflektierten Lichtstrahlen werden mithilfe des Filterrads in verschiedene Wellenlängenbänder aufgeteilt, die mit einem monochromatischen Sensor über die Fläche abgetastet werden.

Aufbau

Der grundsätzliche Aufbau eines Gesamtsystems besteht im Wesentlichen aus den drei Komponenten Lichtquelle, Sensor und Filterrad. Für die zu nutzende Lichtquelle gibt es ein breites Spektrum an Möglichkeiten. Dabei müssen jedoch einige Aspekte beachtet werden. Zum einen muss das Emissionsspektrum der Quelle die zu selektierenden Wellenlängenbereiche enthalten und sollte bekannt sein. Zum anderen müssen Leistung und Emissionsrichtung auf die jeweilige Anwendung abgestimmt werden. In der Regel ist es sinnvoll, eine gerichtete Lichtquelle zu nutzen, die das Objekt mit dem interessanten Wellenlängenspektrum gut ausleuchtet. Beispiele verschiedener möglicher Lichtquellen sind LEDs oder Gasentladungslampen (wie Xenonlichtquelle oder Halogenlampe), aber auch natürliche Lichtquellen wie die Sonne sind denkbar.

Bei dem zu nutzenden Sensor handelt es sich um einen optoelektrischen Sensor (CMOS oder CCD), wie er in klassischen Fotokameras vorkommt. Dabei muss der Sensor ein Intensitätssignal über das gesamte auszuwertende Spektrum liefern und die Sensitivität sollte bekannt sein.

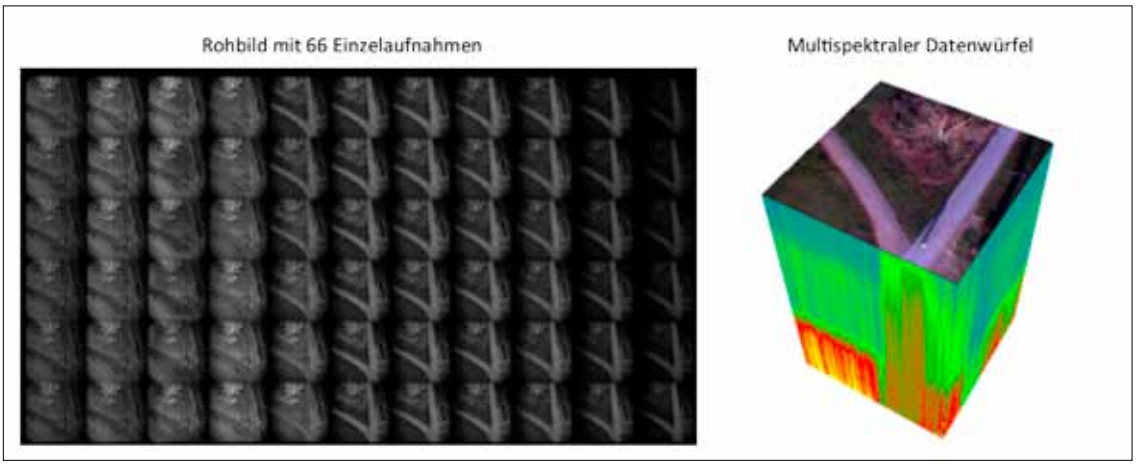


Bild 11: *Beispielaufnahme eines Multiapertur-Systems mit 66 Spektralkanälen und rekonstruiertem Datenwürfel* *(Quelle: Fraunhofer IOF).*

Bild 12: *Oben: Ein Filterrad mit 20 Farbfiltern im Spektralbereich von 400 bis 800 nm; unten: schematischer Aufbau eines Filterradsystems aus Linse, Filterrad mit verschiedenen Spektralfiltern und CCD-Kamera* *(Quelle: Fraunhofer HHI).*

Das Filterrad als zentrales Element ist bestückt mit N schmalbandigen oder breitbandigen optischen Filtern, welche die gewünschten Wellenlängen selektieren. Die Anzahl der Filter ist dabei abhängig von der Anwendung. In der Literatur gibt es Aufbauten von Filterrädern mit N = 5 bis zu über 20 Filtern [22, 24]. Letztere können mithilfe von Doppelfilterrädern realisiert werden. Hierbei ist bei jedem Filterrad ein Filterplatz leer, um eine interferenzfreie Selektion der Spektren zu ermöglichen. Das Filterrad kann manuell oder mittels eines Schrittmotors betrieben werden. Dabei ist jedoch sicherzustellen, dass der Filter bei der Bildaufnahme selbst statisch vor dem Sensor positioniert ist, um Aberrationsfehler zu vermeiden. Die Filter tasten das zu untersuchende Spektrum in gleichen Schritten ab. Dieser spektrale Scan der Szene liefert eine monochromatische, räumliche Karte der Szene pro Detektor-Output. Die N resultierenden spektralen Aufnahmen unterliegen aufgrund des Aufbaus einem zeitlichen Versatz, was bei dynamischen Szenen eine anschließende Registrierung zur Kompensation erfordert.

Für das Filterdesign ergeben sich verschiedene Möglichkeiten. Als Filterarten kommen primär zwei Arten in Betracht. Zum einen Farbfilter, welche jeweils nur einen bestimmten Wellenlängenbereich passieren lassen. Diese sind zumeist aus eingefärbtem Glas, Kunststoff oder Gelatinefolien hergestellt. Eine weitere mögliche Filterart ist der Interferenzfilter. Hierbei wird der Effekt der Interferenz genutzt, um Licht frequenz-(wellenlängen-)abhängig zu filtern. Interferenzfilter sind nicht durchstimmbare Fabry-Pérot-Interferometer und bestehen aus einer dicken Trägerschicht, auf die eine teildurchlässige metallische Spiegelschicht aufgedampft ist. Auf dieser befindet sich eine dünne dielektrische und transparente Schicht, gefolgt von einer zweiten Spiegelschicht. Durch die Schichtdicke l der dielektrischen Schicht wird die gefilterte Wellenlänge festgelegt.

Beim Design von Filtern für ein Filterradsystem ist eine Reihe von Randbedingungen zu beachten, wie Härte, Langzeitstabilität oder Blasenfreiheit der optischen Filtergläser sowie Glasarten [25]. Gleichzeitig sind die Freiheitsgrade für das System hoch, sodass die Optimierung in einem großen Parameterraum stattfindet. Ein Filterraddesign wird durch die Dickenmatrix D (G x N-Matrix, mit Anzahl der Glasarten G und Anzahl der Filter N) und die Transformationsmatrix (3 x N-Matrix) beschrieben. In Verbindung mit der relativen spektralen Empfindlichkeit des Sensors und der relativen spektralen Transmission des Objektivs erhält man die Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle.

Wird zwischen Objektiv und Sensor einer Kamera ein Filterrad mit N Filtern angebracht, so können mithilfe einer Farbraumtransformation aus dem N-dimensionalen Kamerafarbraum Farbvalenzen in einem dreidimensionalen Standardfarbraum berechnet werden. Für die Berechnung und Optimierung von Farbraumtransformationen bzw. als Grundlage für das Design der Farbfilter eines Filterrads ist die Erfassung der relativen spektralen Empfindlichkeit der Bildsensoren notwendig.

Aberration

Sowohl beim Aufbau als auch beim Design sowie der Registrierung der einzelnen Kanäle bzw. Rekonstruktion des hyperspektralen Datenkubus müssen Abbildungsfehler (Aberration) berücksichtigt werden [22, 23]. Diese Aberration wird überwiegend durch die Filter verursacht, da die Filter unterschiedliche Brechungsindizes und Dicken aufweisen sowie nie exakt senkrecht vor dem Sensor liegen, was zur Brechung der Strahlen an beiden Filteroberflächen und Modifikation des Strahlengangs führt. Die daraus entstehende Verschiebung des Fokuspunkts weist wellenlängenabhängige

transversale (entlang der Sensorebene) als auch longitudinale (entlang der optischen Achse) Komponenten auf. Da jeder Filter geringfügig unterschiedliche Aberrationseigenschaften aufweist, treten Artefakte wie Farbsäume im multispektralen Bild auf und müssen für einen korrekten hyperspektralen Datensatz korrigiert werden.

Um die Aberration zu korrigieren, kann diese mit Bezug auf den Strahlengang ohne Filter gemessen und kompensiert werden (absolute Kalibrierung). In der Praxis wird jedoch ein Farbkanal als Referenz gewählt und alle weiteren Parameter, wie beispielweise das zu nutzende Linsensystem, werden optimal eingestellt. Diese weiteren Einstellungen werden für die anderen Filter nun nicht mehr verändert, sondern die Aberration wird in Bezug auf diesen Filter berechnet und kompensiert (relative Kalibrierung). Eine absolute Kalibrierung ist dann nicht notwendig.

Ist die Kamera vollständig kalibriert, können nun einzelne Spektralbereiche bei hoher Ortsauflösung zeitlich nacheinander erfasst und vermessen werden. Voraussetzung für eine korrekte Rekonstruktion der aufgenommenen Spektren ist, dass die spektralen Emissionseigenschaften der Lichtquelle, die spektrale Aufnahmeempfindlichkeit des Sensors und die spektrale Remission einer Weißfläche sowie eine lichttechnische Charakterisierung der verwendeten optischen Filter (Transmissionseigenschaften der einzelnen Filter) vorliegen. Durch die relativ großen Freiheitsgrade bei der Wahl von N und bei der Gestaltung der spektralen Transmissionsgrade der Filter können mit dieser Art der Realisierung die besten Ergebnisse für die ortsaufgelöste Bestimmung von Farbvalenzen erzielt werden.

Ebenfalls ist es möglich, dieses Verfahren der Wellenselektivität mittels eines Filterrads auf der Anregungsseite, d. h. vor einer homogenen breitbandigen Lichtquelle, durchzuführen. Hier können ebenfalls schmalbandige oder breitbandige Filter zum Einsatz kommen [26]. Der größte Nachteil der Wellenlängenselektion auf der Anregungsseite ist hierbei, dass die spektrale Reflexion von fluoreszierenden Materialien nicht exakt bestimmt werden kann. Dafür tritt das Problem der filterverursachten Aberration nicht auf.

2.2.1.4 Bildaufnahme mit multispektraler Beleuchtung

Motivation

Die Sensoren von multispektralen Flächenkameras bestehen aus vielen Pixelzeilen, häufig schachbrettartig mit 9 oder 16 verschiedenen Filtern versehen, die auf ein bestimmtes Set an Wellenlängen ausgelegt sind. Für übliche Aufgabenstellungen (wie z. B. bei RGB-Kameras oder in der Agrarwirtschaft) lohnt sich die Fertigung dieser Spezialsensoren. Werden andere Eigenschaften des Lichts (beispielsweise andere Wellenlängen oder Polarisationsinformationen) benötigt, um an die relevanten Informationen zu gelangen, dann sind Anpassungen durch erforderliche Neuentwicklung von Sensoren entsprechend kostspielig und die Kamerasysteme in ihrem Funktionsumfang damit sehr unflexibel. Ferner finden multispektrale Zeilenkamerasysteme Anwendung (Abschnitt 2.2.1.1), deren Sensor aus einigen hundert Pixelzeilen besteht. In typischen Szenarien werden aus einer kompletten Aufnahme jedoch nur wenige Zeilen (und entsprechende Wellenlängen) für die Auswertung benötigt. Diese Systeme sind flexibel in der Auswahl der Wellenlängen, jedoch deutlich teurer und durch die Datenraten in der Bandgeschwindigkeit begrenzt. Als Herausforderung hat sich weiterhin gezeigt, dass die Empfindlichkeit der Bänder zueinander nicht veränderbar ist und damit eine Einschränkung der nutzbaren Dynamik eintritt. Eine Ergänzung um weitere Wellenlängen oder zusätzliche Modalitäten ist kostspielig und nur über Neuentwicklungen möglich.

Ein alternatives Verfahren unter Nutzung einer konventionellen Kamera und verschiedener multispektraler LED-Lichtquellen eröffnet vielseitige Anwendungsmöglichkeiten, da Standardkomponenten eingesetzt werden. Das Verfahren basiert auf dem sogenannten »a priori«-Prinzip. D. h. die Bewegung des Materials durch den Erfassungsbereich der Kamera ist bekannt und für gewöhnlich eindimensional und/oder umfasst auch eine kontinuierliche Geschwindigkeit des Werkstoffs auf dem Fließband. Entsprechend dem Anwendungsfall werden die notwendigen Farbkanäle oder andere Modalitäten ermittelt. Darauf aufbauend erfolgt die Auswahl der entsprechenden LEDs, Filter und des passenden Kamerasystems. Diese Vorgehensweise reduziert den Aufwand und die Kosten erheblich und bedeutet für den Anwender eine deutlich flexiblere und kostengünstigere Lösungsfindung.

Funktionsprinzip

Beispielgebend wird ein System erklärt, das zur multispektralen Inspektion von Stück- oder Schüttgut (z. B. Lebensmitteln, Getreide, Erze) auf einem Fließband dient (siehe Bild 13). Zur Anwendung kommt eine herkömmliche Graustufenkamera, die die Objekte über eine Beleuchtung mit mindestens zwei verschiedenen Spektren ausleuchtet und in der Bewegung aufnimmt. Notwendige Filter für bestimmte Wellenlängen oder beispielsweise Polarisationsfilter sitzen dabei entweder vor der Lichtquelle selbst oder sind durch das schmalbandige Spektrum moderner LEDs gar nicht erforderlich. Die nachgeschaltete Registrierung und Verrechnung der Bilder mittels eigens konzipierter Software dient der Fusionierung und erzeugt eine multispektrale Aufnahme. Wesentlich ist die sequentielle Aufnahme während der Bewegung des Transportbands, was einen hohen Durchsatz ermöglicht.

Das Material wird mit einer bekannten Geschwindigkeit über das Förderband transportiert und läuft durch den Erfassungsbereich der Kamera. Der Erfassungsbereich der Kamera wird dabei mit einer Lichtquelle beleuchtet, die zeitlich nacheinander unterschiedliche Wellenlängen aktivieren kann. Von einer zur nächsten Aufnahme ist das Objekt bereits weitertransportiert worden und es werden in jeder Aufnahme unterschiedliche Objektpositionen jeweils mit einer anderen Wellenlänge erfasst. Die Aufnahmegeschwindigkeit muss so hoch sein, dass jedes Objekt mit allen Wellenlängen während des Durchlaufs zumindest einmal erfasst wird. Dies ist jedoch mit heutigen Kameras problemlos zu erreichen.

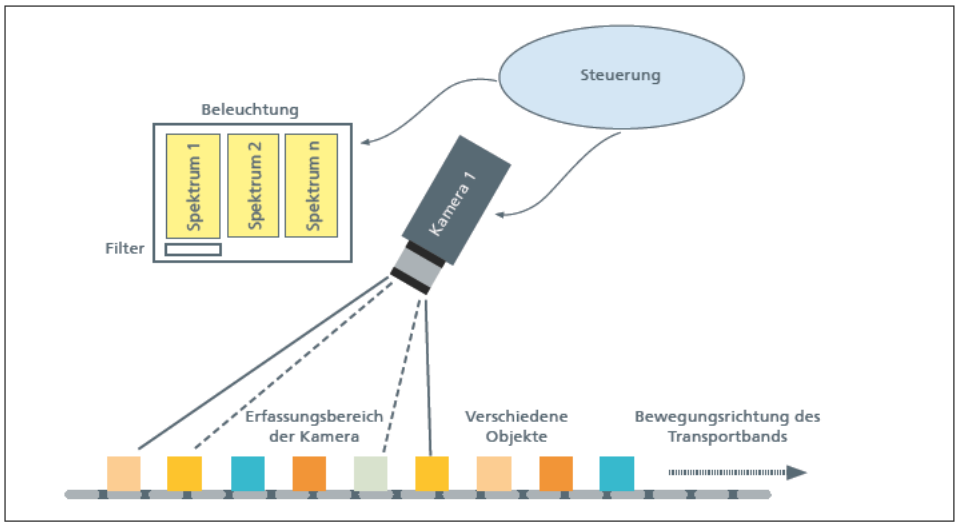


Bild 13: *Prinzip der Bildaufnahme mit multispektraler Beleuchtung* (Quelle: Fraunhofer IIS).

Bei der Aufnahme werden die Objekte nacheinander in allen Wellenlängen erfasst. Durch die Bewegung des Bands sind die gewonnenen Bilder nicht deckungsgleich und müssen nachträglich verrechnet werden. Dazu werden, basierend auf der Bandbewegung, eine Registrierung und Fusion durchgeführt. Mit jeder neuen Aufnahme einer Wellenlänge kann ein weiteres Stück des Objekts berechnet und rekonstruiert werden. Für die volle Abdeckung der bewegten Objekte genügt beispielsweise für drei Wellenlängen die Aufnahme mit im Vergleich zu einer klassischen Aufnahme 3facher Bildwiederholrate.

Variationsmöglichkeiten

Die Anzahl und Art der Lichtquellen sind bei der vorgestellten Aufnahmetechnik variabel: Unterschiedliche Eigenschaften wie Wellenlängen oder Polarisationsinformation können über die Auswahl der Lichtquellen gesteuert werden. Ebenso ist der Einsatz im Auflicht und Durchlicht möglich. Für jeden der Kanäle kann eine unterschiedliche Belichtungszeit der Kamera eingestellt werden. Damit ist eine Anpassung an die Lichtleistung der LEDs und unterschiedliche spektrale Reflektivität der Objekte möglich. Gleichzeitig maximiert sich der Dynamikumfang der Messung.

Der prinzipielle Systemaufbau kann aus einer einfachen Graustufenkamera bestehen und arbeitet mit zwei oder mehr Wellenlängen der Lichtquelle. Die Bandgeschwindigkeit bestimmt die notwendige Bildwiederholrate, sodass durch geeignete Kamerasysteme höhere Geschwindigkeiten gewährleistet werden können. Eine Erkennung des Materials oder Triggerung sind dabei nicht notwendig. Die Bandgeschwindigkeit kann variabel angepasst und das Verfahren sowohl für 2D- als auch für 3D-Objekte verwendet werden. Auch nichtlineare Bewegungen, wie z. B. im freien Fall oder auf einem Rundförderer, sind realisierbar.

2.2.1.5 Verwendung mehrerer Kameras

Obwohl bei HSI-Lösungsansätzen die Datenmengen allein durch die Aufnahme von Bildinformationen in vielen Wellenlängen bereits ein Mehrfaches von üblichen Farbbildern betragen, gibt es dennoch gute Gründe, multispektrale Datensätze mit Bildern zusätzlicher Kameras zu kombinieren. Der Grund hierfür liegt darin, dass multispektrale Kameras notwendigerweise spezifische Limitierungen in mindestens zwei wesentlichen Bereichen aufweisen:

- Multispektralkameras können nur einen begrenzten Wellenlängenbereich abdecken. Eine Separation der Wellenlängen und somit die Messung eines Spektrums ist nur in einem eingegrenzten Wellenlängenbereich eindeutig möglich, der von einer Ausgangswellenlänge bis zur maximal doppelten Wellenlänge reicht. Sollen daher Spektren vom sichtbaren Bereich, beginnend von Blau mit 400 nm bis in den NIR-Bereich aufgenommen werden, so ist dies ohne Mehrdeutigkeit nur bis 800 nm möglich. Oder, wahlweise, von rund 500 bis 1000 nm. In der Praxis ist der nutzbare Bereich je nach eingesetzter Technologie zur Wellenlängenseparation vielfach noch weiter eingeschränkt. Daher werden unterschiedliche Bandpassfilter eingesetzt, um Mehrdeutigkeiten in den Spektren zu vermeiden.

- Snapshot-Multispektralkameras haben eine eher schwache geometrische Auflösung. Snapshot-Kameras teilen sich die auf einem Sensor verfügbaren Pixel auf und maskieren einzelne Pixel mit wellenlängenspezifischen Filtern. Auf einem Sensor steht nur eine begrenzte Anzahl von Pixeln zur Verfügung. Da durch die Filterung des einfallenden Lichts auf jeweils relativ schmale Wellenlängenbereiche jedes Pixel nur wenige passende Photonen empfängt, sollten zur Erzielung eines guten Signal-Rausch-Verhältnisses Kameras mit eher größeren Pixeln bevorzugt werden. Bei gegebener Chipgröße sind Kameras mit großen Pixeln von Natur aus schon nicht mehr hochauflösend. Müssen sich die Wellenlängen die jeweils zur Verfügung stehenden Pixel auch noch teilen, so reduziert sich die resultierende geometrische Auflösung umso mehr, je mehr Wellenlängen separiert werden. Hier geht es um die Abwägung spektraler Auflösung gegenüber geometrischer Auflösung. So reduziert sich die Auflösung für eine Kamera mit 9 Bändern sowohl in x- als auch y-Richtung um den Faktor 3, für eine Kamera mit 25 Bändern jeweils um den Faktor 5. Aus einer Kamera mit ursprünglich 1280 (H) x 1024 (V) Pixeln wird eine 9-Band-Kamera mit nur mehr 426 (H) x 339 (V) bzw. eine 25-Band-Kamera mit 256 (H) x 205 (V) Pixeln.

In beiden Fällen kann eine Ergänzung einer HSI-Kamera mit einer hochauflösenden Farbkamera fehlende Informationen hervorragend ergänzen. Da bei einer RGB-Farbkamera die Durchlasswellenlängenbereiche für R, G und B deutlich breiter sind als üblicherweise spektrale Bänder einer HSI-Kamera (vergleiche die von den RGB-Kurven in Bild 14 abgedeckten Frequenzbereiche mit den multispektralen Kurven 1 bis 8), können die Pixel für ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis kleiner ausfallen. So lassen sich auf derselben Chipfläche mehr Pixel realisieren, was in einer hohen geometrischen Auflösung resultiert.

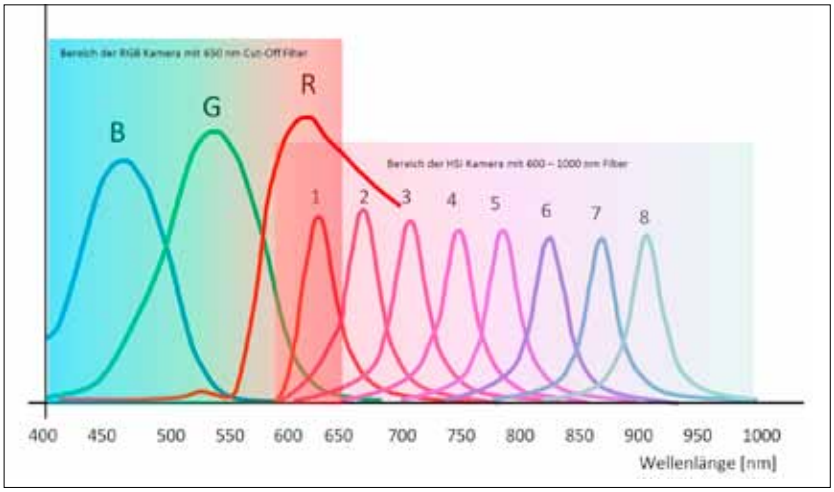


Bild 14: *Durchlasskurven einer RGB-Farbkamera sowie einer 9-Band-HSI-Kamera für den Frequenzbereich von 630 bis 920 nm. Zur Vermeidung von mehrdeutigen Informationen ist die Farbkamera mit einem Filter ausgestattet, der Wellenlängen über 650 nm sperrt, und die HSI-Kamera mit einem Bandpass mit einem Durchlassbereich von 600 bis 100 nm*
(Quelle: Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH).

Bild 15: *Multispektralkamera in Verbindung mit zusätzlichen Kamerasystemen*
(Quelle: Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH).

Gleichzeitig kann der sichtbare Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm zumindest in 3 Bändern von der RGB-Kamera abgedeckt werden, sodass die HSI-Kamera Teile des VIS und den vollständigen NIR-Bereich eindeutig ohne mehrdeutige Ergebnisse aufnehmen kann. Damit wird der gesamte Wellenlängenbereich 400 bis 1000 nm eindeutig repräsentiert. Zusätzlich stehen für die Auswertung von hochfrequenten Texturen oder für Vermessungszwecke geometrisch hochaufgelöste Farbbilder zur Verfügung.

Da sich die beiden Kameras konstruktionsbedingt nicht auf derselben optischen Achse befinden können, müssen die Bilder der beiden Kameras aufeinander registriert werden. Während dies für flache Objekte bei bekannter und konstanter Entfernung rein aus den optischen Gegebenheiten und den Kamerabildern gelingt, wird bei Objekten mit einer Tiefenausdehnung die Form der dreidimensionalen Oberfläche benötigt, um alle Oberflächenpunkte in allen Datensätzen deckungsgleich für eine nachfolgende multispektrale Auswertung aufbereiten zu können. Die dafür notwendige Aufnahme der dreidimensionalen Oberfläche kann mit bekannten Methoden wie Stereobildauswertung oder Time of Flight (TOF)-Kameras erfolgen. Es sind also hierfür noch weitere Kameras notwendig.

Ein Anwendungsbeispiel zur Erkennung von Wertstoffen in Restmüll ist im Kapitel 4.5 ausführlich beschrieben.

2.2.1.6 Kombinierte Wellenlängenselektion auf Anregungs- und Detektorseite

Die vorgestellten multispektralen Aufnahmemethoden erreichen eine spektrale Auflösung entweder auf Detektor- oder Lichtquellenseite. Es ist jedoch auch eine spektrale Auflösung durch die Kombination beider Selektionsmöglichkeiten möglich. Hierbei erfolgt jeweils eine breitere spektrale Anregungsselektion auf Seiten der Lichtquelle und eine breitere spektrale Selektion auf Seiten des Sensors. Eine breitere spektrale Beleuchtungssituation kann zum einen durch entsprechende Filter in einem Filterrad oder auch einzelnen LEDs erreicht werden. Eine breitere spektrale Selektion sensorseitig kann wiederum mittels eines Filterrads oder einer konventionellen RGB-Kamera realisiert werden.

Um einzelne schmalbandige Wellenlängenbereiche bzw. die Spektren der einzelnen Reflexionsantworten zu extrahieren, muss eine Faltung der Lichtspektren $L(\lambda)$ mit den Sensorspektren $\sigma(\lambda)$ erfolgen:

$$p = \int \sigma(\lambda) L(\lambda) d\lambda$$

Damit ergeben sich $N_L \cdot N_\sigma$ -Spektren, welche für eine multispektrale Analyse herangezogen werden können.

Ein mögliches Anwendungsbeispiel für solch eine kombinierte Wellenlängenselektion ist die intraoperative Bildgebung in der Medizin. Während der OP wird das Operationsgebiet prinzipiell mit Weißlicht beleuchtet und mit einer normalen Kamera beobachtet (Mikroskopie oder Endoskopie). Will man spezifische spektrale Eigenschaften sichtbar machen, ist es sinnvoll denselben Strahlengang zu nutzen und mit einer schmalbandigeren Beleuchtung zu arbeiten (siehe Bild 16).

2.2.2 Laser-HSI

Grundvoraussetzung für die »klassische« hyperspektrale Bildgebung ist die Verwendung einer Breitbandbeleuchtung, die den gesamten untersuchten Wellenlängenbereich abdeckt. Dies lässt sich beispielsweise mit Einsatz schwarzer Strahler (z. B. Halogenlampen), LEDs oder durchstimmbaren Lasern realisieren. Damit ist es möglich, Reflexions- oder Transmissionsspektren der untersuchten Proben zu erhalten, die maßgeblich durch die Absorptions- und Dispersionseigenschaften der Materialien bestimmt werden. Typische HSI-Kameras arbeiten dabei im Wellenlängenbereich zwischen 250 bis maximal 2500 nm.

Einen alternativen Beleuchtungsansatz stellt die Verwendung einer monochromatischen Lichtquelle, also eines Lasers, dar. Die damit nutzbare Raman- und Fluoreszenz-Anregung macht es möglich, das Einsatzgebiet der hyperspektralen Bildgebung deutlich auszuweiten.

Bei der somit für die hyperspektrale Bildgebung verfügbaren Raman-Spektroskopie wird die sogenannte Raman-Streuung spektral detektiert, wobei es sich um inelastisch von Molekülen oder Festkörpern gestreutes Licht handelt. Mittels Raman-Spektroskopie werden die Grundschwingungen von Molekülen und Festkörpern messtechnisch erfassbar, was sonst nur im langwelligen Infrarot und somit mit extrem teuren MIR-HSI-Systemen möglich ist. Darüber hinaus wird aufgrund der scharfen, gut voneinander getrennten Banden eine hohe Selektivität erreicht. Nicht unerwähnt bleiben soll außerdem, dass die Raman-Spektroskopie im Unterschied

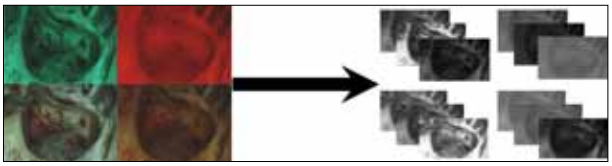


Bild 16: *Die vier Beleuchtungsmodi (links) werden schnell hintereinander aufgenommen und daraus können mehrere, im konkreten Fall 12 Wellenlängen selektiert bzw. rekonstruiert werden* (Quelle: Fraunhofer HHI).

zur klassischen Spektroskopie weder durch Wasser- noch durch Kohlenstoffabsorption gestört wird, Messungen durch Glas möglich sind und auch kaum eine Probenvorbereitung notwendig ist.

Andererseits ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Raman-Streuung nur ein sehr geringer Anteil Photonen (meist < 0,0001 Prozent) gestreut wird, woraus sich geringe SNR-Verhältnisse und lange Integrationszeiten ergeben [27]. Hinreichend aufgelöste Raman-Spektren erfordern außerdem auch spektral (sehr) hochauflösende Detektoren.

Bei einer »Beleuchtung« mit Laserlicht tritt neben der Raman-Streuung oft auch Fluoreszenz auf. Fluoreszenz entsteht, wenn ein optisch angeregtes Molekül unter Strahlungsemission in ein tieferes Energieniveau übergeht. Das emittierte Licht ist dabei langwelliger, verfügt also über niedrigere Energie als das anregende Licht. Fluoreszenzspektroskopie ist eine hochsensitive Methode, die geringe Nachweisgrenzen ermöglicht und derzeit vor allem in der Mikroskopie Anwendung findet [28]. Da Fluoreszenz und Raman-Streuung oft gleichzeitig auftreten, ist es wegen des hohen Fluoreszenzuntergrunds oft schwierig, die schwachen Raman-Signale zu detektieren [27].

Bei der bildgebenden Raman- und Fluoreszenz-Spektroskopie (im Folgenden als »Laser-HSI« bezeichnet) ist es prinzipiell möglich, beide Effekte zu detektieren und so der hyperspektralen Bildgebung neue Perspektiven zu eröffnen, wobei es

nicht zwingend notwendig ist, die Signale anregungsspezifisch zu trennen.

Bild 17 zeigt beispielhaft einen Laser-HSI-Aufbau, bestehend aus einem Anregungslaser, einem System zur Liniengenerierung, einem dichroitischen Spiegel, einem Langpassfilter und einer Pushbroom-HSI-Kamera. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile vorgestellt.

Der Anregungslaser sollte über eine möglichst hohe Ausgangsleistung verfügen, da die Liniengenerierung die Leistung auf eine große Fläche verteilt und dadurch die erreichbaren Signalintensitäten stark abnehmen. Außerdem muss die Laserwellenlänge so gewählt werden, dass sich die erzeugten Raman- und Fluoreszenz-Signale per HSI-System detektieren lassen. Typische VNIR-HSI-Kameras weisen einen Spektralbereich zwischen 400 nm und 1000 nm auf. Die Laserwellenlänge sollte dementsprechend so gewählt werden, dass das verwendete Spektrometer möglichst die gesamte emittierte Strahlung erfasst. Zu den typischen Lasern gehören Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 405 nm, 450 nm oder 520 nm oder ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm.

Da für das Laser-(Pushbroom)-HSI-System eine zeilenförmige Anregung benötigt wird, ist es notwendig, den Laserstrahl mit einer möglichst hinreichenden homogenen Intensitätsverteilung aufzuspreizen. Dafür kommt beispielsweise, wie in Bild 17 gezeigt, ein schnell rotierender Galvanospiegel zum Einsatz. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine sogenannte Powell-Linse zu verwenden. Die Laserlinie muss anschließend durch einen dichroitischen Spiegel auf die Probe projiziert werden. Der dichroitische Spiegel reflektiert dabei das Licht des Lasers, lässt aber langwellig verschobenes Licht passieren. Damit sich Signale mit geringer Raman-Verschiebung messen lassen, ist es wichtig, einen dichroitischen Spiegel mit möglichst steiler Bandkante zu wählen. Das von der Probe ausgesendete Raman- bzw. Fluoreszenz-Signal gelangt anschließend durch einen Kantenfilter zum HSI-Kamerasystem. Der Kantenfilter dient dazu, selektiv die intensive Anregungsstrahlung zu entfernen. Da diese mehrere Größenordnungen über dem zu messenden Signal liegt, würde sie den eigentlichen Messprozess negativ beeinflussen. Der Kantenfilter sollte daher eine hohe optische Dichte und wiederum eine steile Bandkante aufweisen.

Das Pushbroom-HSI-Kamerasystem besteht aus einem Objektiv, einem bildgebenden Spektrometer und dem Detektor. Das Objektiv sollte dabei so gewählt sein, dass sein »Field-of-View« (FOV) auf die Breite der Anregungslinie abgestimmt ist. Beim bildgebenden Spektrometer kann es sich um ein typisches VNIR-Spektrometer handeln. Es ist allerdings

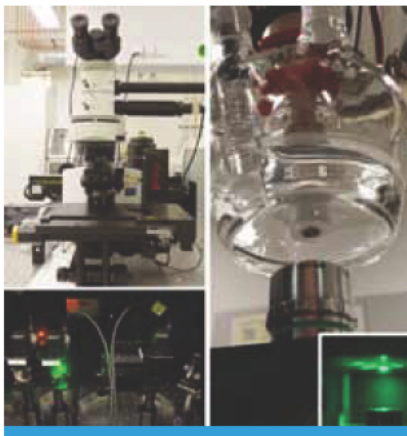
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

RAMAN-Spektroskopie
Ihr Partner bei besonderen Anforderungen

Laserwellenlängen / nm						
405	442	514	561	595	660	785

Sie haben besondere Anforderungen an die RAMAN-Spektroskopie oder benötigen spezielle Referenz-Messungen? Wir bieten Ihnen:

7 LASER	*- Anregung bei sieben verschiedenen Wellenlängen*
RAMAN-MAPPING	*- für alle Wellenlängen*
SERS + SERRS	*- oberflächenverstärkte (Resonanz-)RAMAN-Spektroskopie*
ANTI-STOKES	*- RAMAN-Messungen ohne Fluoreszenz-Untergrund (514 nm)*
BRAGG-GITTER	*- ultra-schmale Rayleigh-Filter (bis 5 cm^{-1}; für 514 nm)*
VARIABLE OPTIK	*- anpassbarer Strahlengang*



links: Mikroskopoptik und Laserbank
rechts: Aufbau für spektro-elektrochemische Untersuchungen

Fragen Sie uns!

Kontakt

Prof. für Elektrochemie
Andreas-Schubert-Bau
Zellescher Weg 19
01069 Dresden

0351 463 33633
@ inez.weidinger@tu-dresden.de

www.tud.de/mn/chemie/pc/pc3

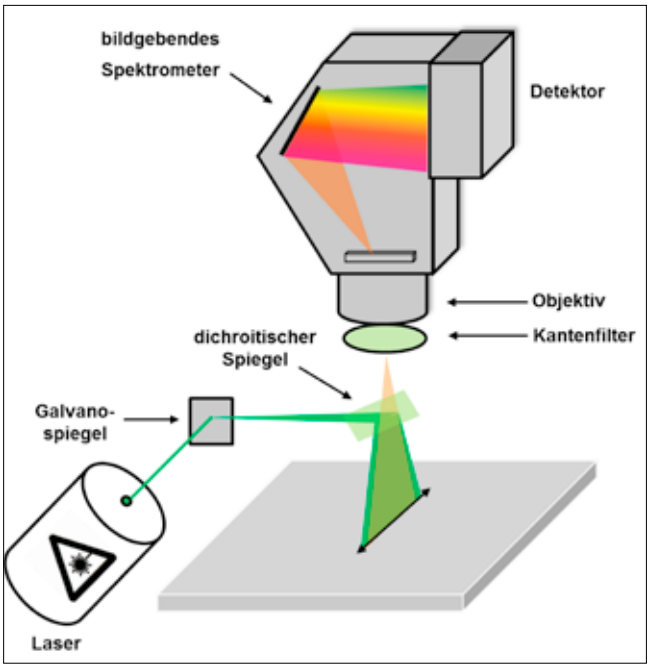


Bild 17: *Schematische Darstellung eines Laser-HSI-Systems (Quelle: Fraunhofer IWS).*

auch möglich, spezielle Raman-Spektrometer einzusetzen. Diese zeichnen sich durch eine höhere spektrale Auflösung und einen geringeren, messbaren Wellenlängenbereich aus. Der eingesetzte Detektor sollte ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) ermöglichen. Gut eignet sich ein sogenannter EMCCD (electron multiplying CCD), der eine Verstärkung des gemessenen Signals ermöglicht und dadurch zu einer Verbesserung des SNR beiträgt.

Die Messung der Probe erfolgt, wie bei einem typischen HSI-System, zeilenweise und der Hypercube der Probe wird anschließend in der Aufnahmesoftware generiert. Die Bildwiederholrate der Kamera bestimmt Messgeschwindigkeit bzw. die Ortsauflösung senkrecht zur Beobachtungslinie.

Die sich mit dem beschriebenen System eröffnenden neuen Inspektionsmöglichkeiten sollen hier anhand von zwei Beispielen vorgestellt werden: der Untersuchung einer Mischung aus Schwefel und Naphthalin und der Messung der relativen Carotin-Konzentration in einer Karottenscheibe. Für beide Versuche wurden neben den Laser-HSI-Messungen Referenzspektren mit einem Raman-Mikroskop aufgenommen.

Bild 18 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung der Schwefel-Naphthalin-Mischung. Bild 18a zeigt ein Foto der Probe. Bei beiden untersuchten Stoffen handelt es sich um starke Raman-Streuer und beide Substanzen weisen keine Autofluoreszenz auf. Deshalb sind die Raman-Signale der beiden Probensubstanzen gut zu erkennen, da diese nicht durch einen Fluoreszenzuntergrund überlagert werden. Der Vergleich mit den Referenzspektren zeigt die Qualität der Kalibrierung des Spektrometersensors (Bild 18b). Die erzielbare spektrale Auflösung des Laser-HSI ist bedingt durch das bildgebende Spektrometer deutlich geringer als die bei Verwendung des Raman-Mikroskops. Trotz der spektral gering aufgelösten Banden repräsentiert die Raman-Intensität der untersuchten Probe, beispielhaft hier bei einer Raman-Verschiebung von ca. 180 cm^{-1}, gut die räumliche Verteilung von Schwefel und Naphthalin (Bild 18c). Eine Klassifizierung (Lineare Diskriminanzanalyse LDA) unter Verwendung der gesamten spektralen Information (Bild 18d) demonstriert die Leistungsfähigkeit des Laser-HSI.

Im zweiten Versuch wurde eine Karottenscheibe mit dem Laser-HSI untersucht (Bild 19a). Bei dieser Probe sind jedoch die Raman-Banden durch die Fluoreszenz der organischen Materialien überlagert. Bild 19c zeigt ein farbcodiertes Intensitätsbild der Fluoreszenz bei ~1000 cm^{-1}. Insbesondere im Bereich der äußeren Schale und des Cambiums ist eine erhöhte Fluoreszenz zu erkennen. Bild 19b zeigt ein Beispielspektrum der Karottenscheibe nach einer Untergrundkorrektur, bei der der Fluoreszenzuntergrund mathematisch entfernt wurde. Dadurch sind die Raman-Banden des Carotins bei ~1150 cm^{-1} und ~1520 cm^{-1} gut zu erkennen. In Bild 19d ist die Intensität der Raman-Bande des Carotins nach der Untergrundkorrektur farbcodiert dargestellt. Das Bild zeigt also die relative Konzentration des Carotins in der Karottenscheibe. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit anderen aus der Literatur bekannten Raman-Untersuchungen [29].

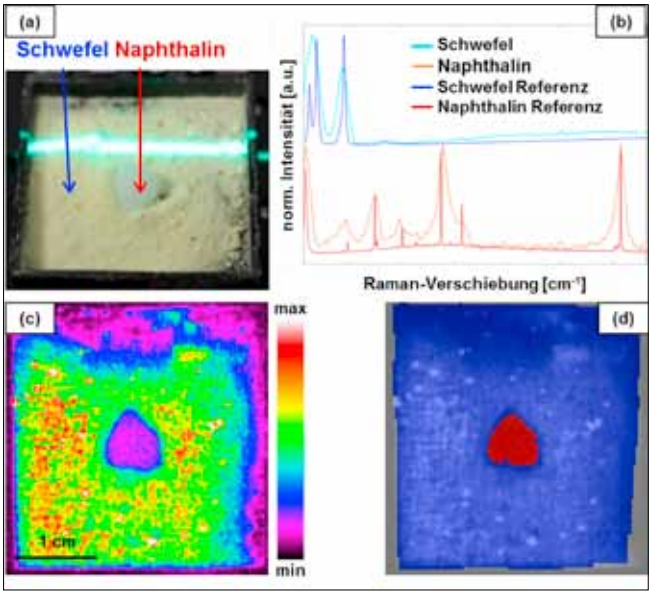


Bild 18: *Laser-HSI-Messung einer Mischung aus Schwefel und Naphthalin. (a) Foto der Probe mit der Anregungslinie des Lasers. (b) Beispiel- und Referenzspektren von Schwefel und Naphthalin. (c) Farbcodiertes Bild der gemessenen Raman-Intensität bei ~180 cm^{-1} (Schwefel-Bande). (d). Ergebnisse der LDA-Klassifizierung der Laser-HSI-Messung (blau = Schwefel; rot = Naphthalin) (Quelle: Fraunhofer IWS).*

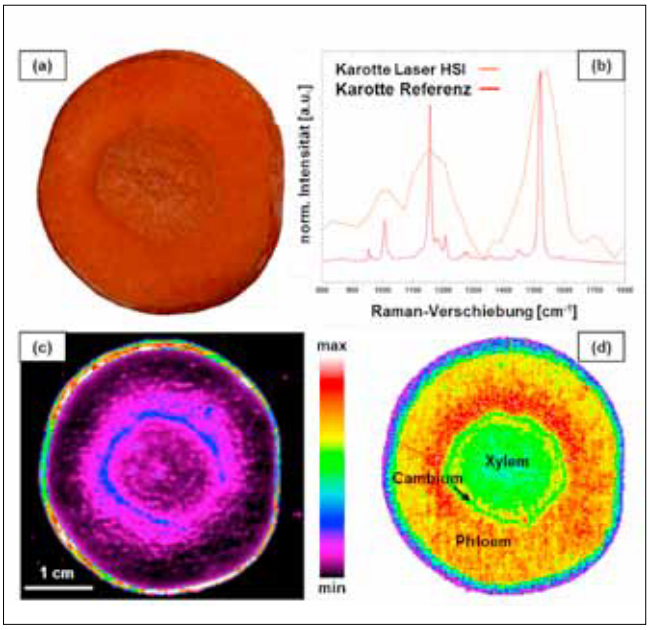


Bild 19: *Laser-HSI-Messung einer Karottenscheibe. (a) Foto der gemessenen Karottenscheibe. (b) Beispiel- und Referenzspektren aus dem Phloem der Karotte. (c) Farbcodiertes Bild der gemessenen Intensität bei ~1000 cm^{-1} vor jeglicher Bearbeitung der Spektren. (d) Farbcodierte relative Intensität der Carotin-Bande bei ~1520 cm^{-1} (Quelle: Fraunhofer IWS).*

Ein weiteres Beispiel, bei dem das Laser-HSI in einem potenziell industriell relevanten Prozess zur Anwendung kommt, ist in Kapitel 4.3 näher beschrieben.

2.2.3 Terahertz-Spektroskopie

Terahertz (THz)-Wellen liegen im elektromagnetischen Spektrum an der Schnittstelle zwischen Elektronik und Optik. Üblicherweise bezeichnet man das Frequenzintervall zwischen 100 GHz und 10 THz als Terahertz-Strahlung oder -Wellen. Mit Wellenlängen von 3 mm bis 30 µm decken sie somit mehr als eine optische Oktave ab.

Die Eigenschaften von Materie im Terahertz-Spektralbereich lassen sich anhand der Merkmale der angrenzenden Spektralbereiche erklären (Bild 20). Für die längerwelligen Mikrowellen sind die meisten Dielektrika wie etwa Kunststoffe, Kleidung oder Papier transparent. Auch Terahertz-Strahlung kann diese Materialen mit vergleichsweise geringer Abschwächung durchdringen. Damit sind Terahertz-Wellen für die bildgebende Durchleuchtung, etwa eine zerstörungsfreie Materialprüfung, hoch interessant. Hinzu kommen ihre spektroskopischen Möglichkeiten. Wie das höherfrequente Infrarot können sie einen spektralen Fingerabdruck des durchleuchteten Materials liefern. Nahezu alle polaren Gase weisen beispielsweise in diesem Spektralbereich schmalbandige Rotationsbanden auf, die sich eindeutig den Molekülen zuordnen lassen. Auch die meisten Makromoleküle, etwa Biomoleküle, Proteine, Drogen, Sprengstoffe oder Pharmazeutika, zeigen spektrale Signaturen im Terahertz-Bereich [30]. Bei Festkörpern und polaren Flüssigkeiten sind diese Linien verbreitert. Problematisch sind Messungen von polaren Stoffen in der flüssigen Phase. Für das stark polare Wassermolekül etwa bedeutet dies, dass Wasserdampf diskrete Absorptionslinien im Terahertz-Spektrum zeigt, während flüssiges Wasser durch starke Stoßverbreiterung breitbandig absorbiert. Ein wenige Mikrometer dicker Wasserfilm ist daher für Terahertz-Wellen oberhalb von 500 GHz nahezu opak.

Die spektroskopischen Eigenschaften in den drei unterschiedlichen Phasen (fest, flüssig und gasförmig) unterscheiden sich im Terahertz-Spektralbereich charakteristisch. Während Gase schmale charakteristische Absorptionslinien zeigen, treten spektral definierte Absorptionen bei Festkörpern nur für kristalline Stoffe auf, die zudem noch stark spektral verbreitert sind. Bei amorphen Festkörpern und insbesondere Flüssigkeiten sind keine charakteristischen spektralen Fingerabdrücke zu beobachten.

Der technologische Fortschritt bei der Entwicklung von anwenderfreundlichen Terahertz-Quellen und -Detektoren im letzten Jahrzehnt hat neue Messmethoden ermöglicht, um spektroskopische Untersuchungen in allen drei Phasen durchführen zu können. Zu den vielen neuen Entwicklungen gehört auch die Erzeugung von Terahertz-Strahlung mit Ultrakurzpulslasern. Mithilfe von Femtosekundenlasern und schnellen optischen Schaltern aus Halbleitermaterialien lassen sich extrem kurze THz-Impulse (< 1 ps) mit einem extrem breiten Spektrum (> 5 THz) erzeugen, das breiter ist als die Mittenfrequenz um 1 THz. Um spektroskopische Informationen aus den Terahertz-Impulsen zu gewinnen, die durch ein unbekanntes Medium propagiert sind, verwendet man die sogenannte Zeitbereichs-

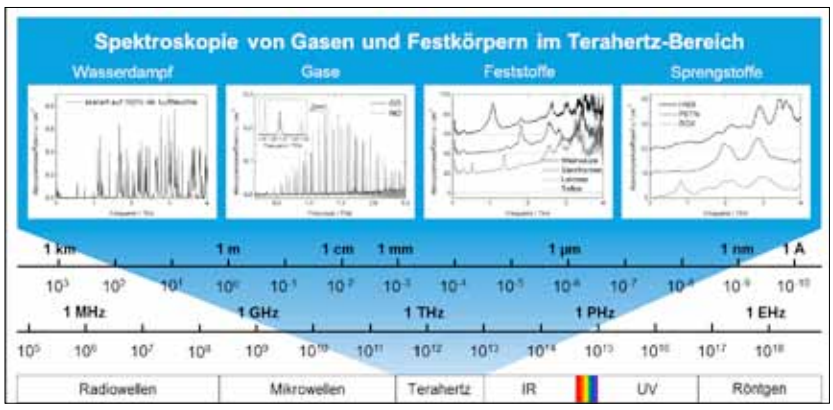


Bild 20: *Terahertz-Spektralbereich im elektromagnetischen Spektrum (Quelle: Fraunhofer ITWM).*

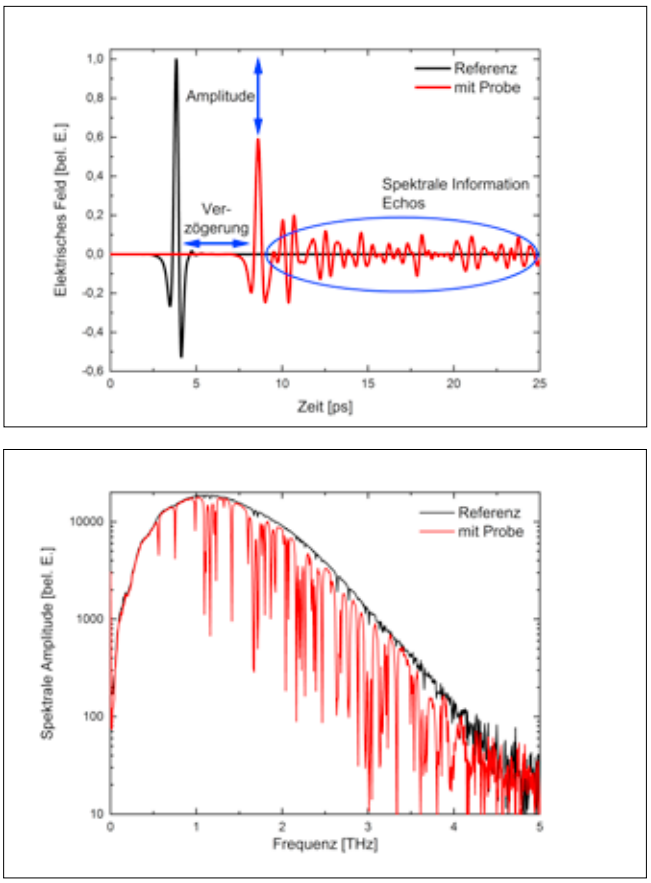


Bild 21: *Auswertung eines Terahertz-Impulses; oben: mögliche Informationen im Zeitbereich; unten: Spektren, die mittels Fouriertransformation aus den zugehörigen Impulsen ermittelt wurden* *(Quelle: Fraunhofer ITWM).*

Spektroskopie (Time domain Spectroscopy TDS). Dabei wird die Veränderung des Impulses im Zeitbereich (elektrisches Feld) nach Propagation durch das Medium analysiert und über eine Fouriertransformation die spektrale Information (Amplitude und Phase) ermittelt (Bild 21).

Da der Terahertz-Impuls im Zeitbereich erfasst wird, können außer den spektroskopischen Informationen über die Probe noch weitere Informationen gewonnen werden. So lassen sich über die Verzögerung des Impulses unter anderem Aussagen zu Probendicke, -aufbau und -dichte machen.

Wird nun eine Probe flächig untersucht, erhält man bei der Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie zwei dreidimensionale Datensätze, wobei die zwei räumlichen Koordinaten der Probe identisch sind (in der Regel als x- und y-Achse bezeichnet) und die dritte Koordinate entweder der Zeitachse oder der Frequenzachse entspricht (Bild 22). Im Zeitbereich wird das elektrische Feld in Falschfarben dargestellt, im Frequenzbereich die spektrale Intensität. Somit liegen bei jedem Messpunkt Laufzeit- und spektroskopische Informationen vor. [31].

Anwendungsbeispiele mit Terahertz-Spektroskopie werden im Kapitel 4.7 beschrieben.

2.3 Zusammenfassung

Um die vielfältigen Möglichkeiten der Spektroskopie zur Materialcharakterisierung nutzen zu können, gibt es eine Vielzahl technischer, zum Teil auch kommerziell erhältlicher Lösungen. Das Arbeitspferd ist sicher die diffuse Reflexionsspektroskopie, da sie leicht in industrielle Fertigungsprozesse einzubinden ist. Bewegt sich das zu untersuchende Material ohnehin auf einem Förderband, bietet sich als technische Realisierung die Pushbroom-Anordnung an. Ist es nicht möglich, das Probenmaterial in dieser Weise zu bewegen, können Flächenkameras eine Lösung sein. Dabei muss zwischen sich bewegenden und (im Vergleich zur Messzeit) statischen Szenarien unterschieden werden.

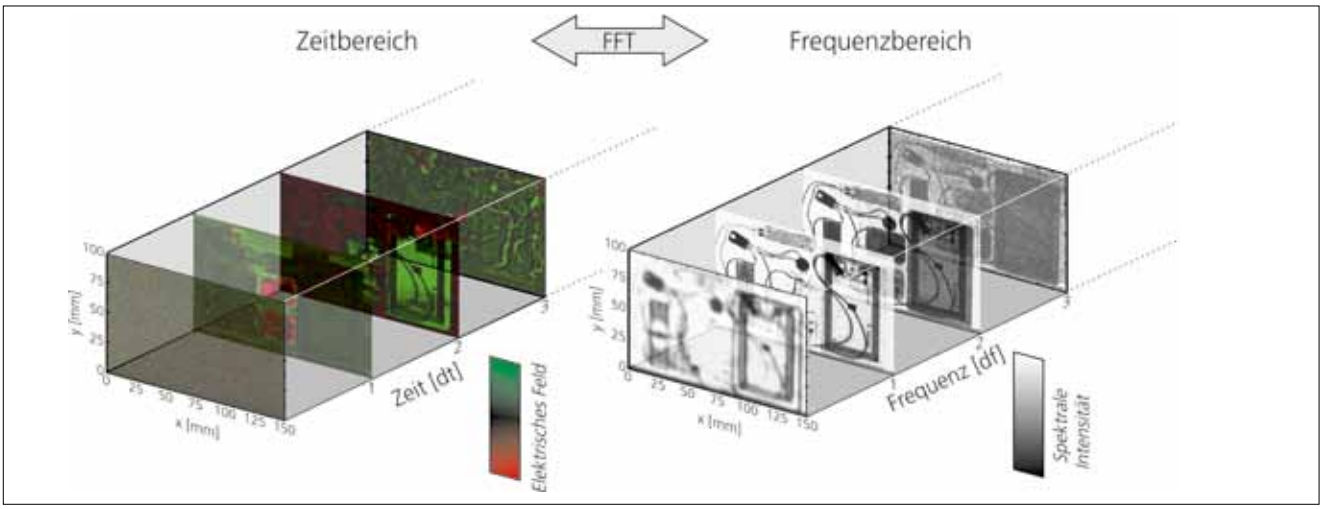


Bild 22: *Beispielhafte Visualisierung des Messergebnisses; im Zeitbereich besteht der Datensatz aus zwei räumlichen Koordinaten und einer Zeitachse. Dieser dreidimensionale Datensatz kann mittels FFT konvertiert werden, wobei die räumlichen Achsen erhalten bleiben und die Zeitachse zur Frequenzachse wird* *(Quelle: Fraunhofer ITWM).*

Ein wichtiges Merkmal für die Auswahl des Verfahrens ist die geforderte Flexibilität. Systeme mit mehreren hundert spektralen Stützstellen wie etwa die Pushbroom-Imager lassen sich softwareseitig auf wechselnde Fragestellungen anpassen. Dies kann notwendig sein, wenn man es mit Material mit stark wechselnden Eigenschaften zu tun hat (Holz, Naturfasern, Lebensmittel etc.). Je spezifischer die Fragestellung ist, desto einfacher und desto kostengünstiger kann der Messaufbau sein.

Komplexere Fragestellungen können auch den Einsatz von Messverfahren verlangen, die außerhalb des optischen Bereichs im weiteren Sinne arbeiten (Terahertz-Spektroskopie) oder Spektren verwenden, die durch Prozesse höherer Ordnung entstehen (Laser-Spektroskopie).

Generell ist es sinnvoll, zur Auswahl des richtigen Verfahrens Vorversuche mit Musterproben durchzuführen, da die Eignung eines Verfahrens für eine bislang nicht erschlossene Fragestellung nicht gut am »grünen Tisch« beurteilt werden kann.

Literatur

[1] Joseph, G.: Building Earth Observation Cameras. Boca Raton: CRC Press, 2015

[2] Kessler, R. W.: Prozessanalytik: Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. Weinheim: Wiley-VHC, 2006

[3] Illmann, R.: Wide range UV irradiation system for imaging reflection spectroscopy. In: Proceedings Volume 10656: Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications V (2018)

[4] Illmann, R.: Aufbau eines breitbandigen UV-Bestrahlungssystems für die bildgebende UV-Spektroskopie. Ilmenau: Technische Universität, 2018

[5] Stark, F.; Rosenberger, M.; Dittrich, P.-G.; Celestre, R.; Hänsel, M.; Notni, G.: Geometrical and spectral data stitching for combining hyperspectral imaging systems. In: Automatisierungstechnik 65 (2017), 6, S. 381

[6] Illmann, R.; Rosenberger, M.; Notni, G.: Strategies for Merging Hyperspectral Data of Different Spectral and Spatial Resolution. In: Conference Digital Image Computing: Techniques and Applications (2019)

[7] Notni, G., Illmann, R.; Rosenberger, M.: Education & Training in Multi- and Hyperspectral Measurement Engineering and Quality Assurance. In: Journal of Physics: Conference Series 1065 (2018)

[8] Manickavasagan, A.; Jayasuriya, H.: Imaging with Electromagnetic Spectrum: Applications in Food and Agriculture. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014

[9] W. G. Rees, W. G.: Physical Principles of Remote Sensing. 3. Auflage, Cambridge: University Press, 2012

[10] Heist, S.; Zhang, C.; Reichwald, K.; Kühmstedt, P.; Notni, G.; Tünnermann, A.: 5D hyperspectral imaging: fast and accurate measurement of surface shape and spectral characteristics using structured light. In: Optics Express 26 (2018), 18, S. 23366-23379

[11] Hagen, N. A.; Kudenov, M. W.: Review of snapshot spectral imaging technologies. In: Optical Engineering 52 (2013), 9, 090901

[12] Lambrechts, A.; Gonzalez, P.; Geelen, B.; Soussan, P.; Tack, K.; Jayapala, M.: A CMOS-compatible, integrated approach to hyper- and multispectral imaging. In: IEEE International Electron Devices Meeting (2014), S. 10.5.1-10.5.4.

[13] Junger, S.; Verwaal, N.; Tschekalinskij, W.; Weber, N.: Multispectral CMOS sensors with on-chip nanostructures for wavelength monitoring of LED devices. In: Proceedings SPIE 8641: Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVII (2013), 86411B

[14] Tisserand, S.: Multispektrale Bildgebung mit angepassten Bayer-Filtern. In: PHOTONIK (2017), S. 48–51

[15] Pichette, J.; Goossens, T.; Vunckx, K.; Lambrechts, A.: Hyperspectral calibration method For CMOS-based hyperspectral sensors. In: Proceedings SPIE 10110: Photonic Instrumentation Engineering IV (2017), 101100H

[16] Dittrich, P-G.; Radtke, L.; Zhang, C.; Guo, S.; Buch, B.; Rosenberger, M.; Notni, G.: A comparative study of methods and algorithms for spatially resolved spectral value reconstruction with multispectral resolving filter-on-chip CMOS sensors. In: Proceedings SPIE 10912: Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXVII (2019), 109120Z

[17] Goossens, T.; Geelen, B.; Pichette, J.; Lambrechts, A.; Van Hoof, C.: Finite aperture correction for spectral cameras with integrated thin-film Fabry–Perot filters. In: Applied Optics 57 (2018), 26, S. 7539-7549

[18] Connah, D. R.; Hardeberg, J. Y.: Spectral recovery using polynomial models. In: Proceedings SPIE 5667: Color Imaging X: Processing, Hardcopy, and Applications (2005)

[19] Internationale Beleuchtungskommision CIE Central Bureau: Multispectral image formats. Vienna, 2017 CIE 223:2017

[20] Geelen, B.; Tack, N.; Lambrechts, A.: A snapshot multispectral imager with integrated tiled filters and optical duplication. In: Proceedings SPIE 8613: Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VI (2013), 861314

[21] Hubold, M.; Berlich, R.; Gassner; C.; Brüning, R.; Brunner, R.: Ultra-compact micro-optical system for multispectral imaging. In: Proceedings SPIE 10545: MOEMS and Miniaturized Systems XVII (2018), 105450V

[22] Klein, J.: Multispectral imaging: aberrations and acquisitions from different viewing positions. Aachen: RWTH, 2015

[23] Brauers, J.; Schulte, N.; Aach, T.: Multispectral filter-wheel cameras: Geometric distortion model and compensation algorithms. In: IEEE Transactions on Image Processing 17 (2008), 12, S. 2368–2380

[24] Wisotzky, E.L. et al.: Intraoperative hyperspectral determination of human tissue properties. In: Journal of Biomedical Optics 23 (2018), 09, 091409

[25] Krüger, U.; Schmidt, F.: Ortsaufgelöste Farbmessung – Aspekte eines Filterraddesigns. In: Workshop Farbbildverarbeitung, Ilmenau, 2002, S. 1–8

[26] Wisotzky, E.L. et al.: Validation of two techniques for intraoperative hyperspectral human tissue determination. In: Proceedings of SPIE 10951 (2019), 109511Z

[27] McCreery, R.L.: Raman Spectroscopy for Chemical Analysis. New York: Wiley Interscience, 2000

[28] Lakowicz, J.R.: Principles of Fluorescence Spectroscopy. New York: Springer, 2006

[29] Baranska, M.; Baranski, R.; Schulz, H.; Nothnagel, T.: Tissue-specific accumulation of carotenoids in carrot roots. In: Planta 224 (2006), 5, S. 1028–1037

[30] Theuer, M.; Harsha, S. S.; Molter, D.; Torosyan, G.; Beigang, R.: Terahertz time-domain spectroscopy of gases, liquids, and solids. In: ChemPhysChem 12 (2011), 15, S. 2695–2705; http://publica.fraunhofer.de/documents/N-185765.html (zuletzt abgerufen: 1. Juli 2019)

[31] Molter, D.: Novel approaches in coherent terahertz measurement techniques. Doktorarbeit, Kaiserslautern: Technische Universität, 2011