

Einfacher, aber wirkungsvoller Ansatz zur Effizienzsteigerung filterbasierter Sensoren: Konzept der spektralen Vorselektion

A. Kobylinskiy* **, B. Laue*, E. Förster* **, B. Höfer***, Y. Shen****, M. Kraus* **, X. Uwurukundo*,
H. Hillmer**, R. Brunner* ***

* Fachbereich SciTec, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

** Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik, Universität Kassel

*** Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik Jena

**** 4X GmbH München

[mailto: Aliaksei.Kobylinskiy@eah-jena.de](mailto:Aliaksei.Kobylinskiy@eah-jena.de)

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur drastischen Erhöhung der Detektionseffizienz von filterbasierten Spektrometern vorgestellt. Das Prinzip basiert auf einer spektralen und räumlichen Aufteilung des einfallenden Lichts, bevor es die Filterelemente erreicht.

1 Motivation

Filterbasierte Spektrometer sind sehr gefragt, besonders in den Bereichen, wo eine Miniaturisierung von großer Bedeutung ist, z.B. in Pharma-, Agrar- und Lebensmittelindustrie. Trotz vieler Vorteile [1], leiden filterbasierte Spektrometer unter einem Effizienzverlust. Diese limitierte Effizienz lässt sich mit dem etablierten Detektionsprinzip erklären. Das breitbandige einfallende Licht trifft auf ein Filterarray (oder eventuell einen Verlaufsfilter), wobei jedoch nur ein schmalbandiger Bereich durch jeden Filter (oder einen Teil des Verlaufsfilters) transmittiert wird. Durch dieses Funktionsprinzip wird der überwiegende Anteil des einfallenden Lichtes zurückreflektiert und geht somit für die Detektion verloren. Je schmalbandiger das verwendete Filtersystem ist, desto gravierender ist dieses Problem, aufgrund der extrem hohen Reflexionsverluste an jedem Filterelement.

2 Konzept

Um das verfügbare Licht effizienter nutzen zu können, wurde das folgende Konzept entwickelt (siehe Abb. 1). Das breitbandige „weiße“ Eingangslight wird mithilfe der Strahlteiler spektral und räumlich aufgespalten, bevor es die vor dem Detektor befindlichen Filterelemente belichtet.

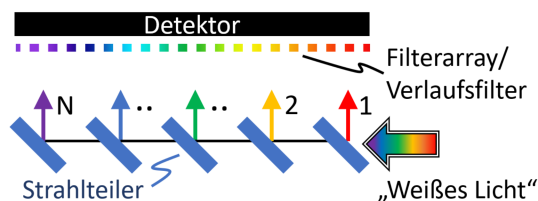


Abb. 1 Konzept der spektralen Vorselektion

Somit erreicht eine konzentrierte Menge des Lichtes jeden Filter des Arrays (oder den Teil des Verlaufsfilters), in dem die Transmission stattfindet.

Hierdurch werden Reflexionsverluste minimiert und das System besitzt eine signifikant höhere Effizienz als die konventionelle Methode ohne spektrale Vorselektion.

3 Experimenteller Nachweis

Das Konzept wurde anhand der verfügbaren Fabry-Perot Filterarrays nachgewiesen [2]. Die Filterarrays bestehen aus 144 Filtern mit den Abmessungen von $40 \times 40 \mu\text{m}$, wobei die 64 mittleren Filter für die Transmission konzipiert sind. Drei verwendete Filterarrays sind in der Lage den spektralen Bereich von $521\text{--}685 \text{ nm}$ mit einer spektralen Auflösung von etwa 3 nm zu detektieren [3]. Es wurde ein Effizienzsteigerungsmodul aufgebaut, indem das "weiße" Eingangslight mithilfe von dichroitischen Strahlteilern in Teilspektren zerlegt und zu den vorgesehenen Filterarrays geleitet wird. Um die erhöhte Effizienz dieses Aufbaus nachzuweisen, wurde ein Referenzmodul verwendet. Im Referenzmodul, welches eine identische Struktur besitzt, wurden andere Strahlteiler verwendet, die das Licht ohne spektrale Vorselektion gleichmäßig über Filterarrays verteilen. Für die anschließende Kameraintegration wurden die beiden Module zudem in ein Gehäuse integriert. Um beide Systeme belichten und die Kamerasignale miteinander vergleichen zu können, wurde eine Quecksilber-Kadmium (HgCd) Spektrallampe verwendet. Das Licht wurde mittels einer optischen Faser mit Kollimatoren geleitet. Drei Spektrallinien (546 nm , Doppellinie $577\text{--}579 \text{ nm}$ und 644 nm) wurden durch die entsprechenden drei Filterarrays detektiert. Anhand der kompletten Datenreihe [2] konnte für alle Spektrallinien eine Effizienzsteigerung um den Faktor 4 ermittelt werden.

Ein weiterentwickeltes Effizienzsteigerungsmodul mit einem noch höheren Faktor wurde durch eine

Reihe von Strahlteilern und Spiegeln in Kombination mit dem Verlaufsfilter realisiert [4]. Der Aufbau ist in der Abb. 2 dargestellt. Er ermöglicht die Detektion eines kontinuierlichen Spektrums für einen breiten Spektralbereich (450–850 nm). Trotz der spektralen und räumlichen Aufteilung des Lichtes, wurde die gesamte dispersive Richtung des Verlaufsfilters ausgeleuchtet.

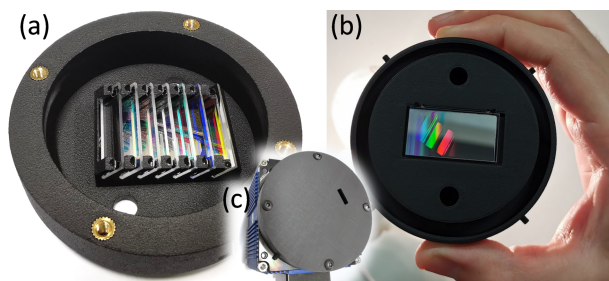


Abb. 2 (a) Vorderseite des Effizienzsteigerungsmoduls mit der erkennbaren Reihe der Strahlteiler und Spiegel, (b) Rückseite des Moduls mit den sichtbaren Strahlbündel auf dem Verlaufsfilter (Modul ist zur Halogenlampe gerichtet), (c) geschlossenes Modul mit CCD Kamera verbunden.

Dieser Effekt wurde durch eine gedrehte Anordnung der Strahlteilerreihe zum Verlaufsfilter realisiert. Somit konnte ein komplettes Spektrum ohne den Verlust von einzelnen Wellenlängen detektiert werden. Die Abb. 2(a) zeigt die Vorderseite des Moduls, in der die Strahlteilerreihe zu erkennen ist. Die Abb. 2(b) zeigt die Rückseite des Moduls mit den sichtbaren Teilstrahlbündel auf dem Verlaufsfilter, hierbei ist das Modul zur Halogenlampe gerichtet. Ein geschlossenes Modul mit einer rechteckigen Eingangsöffnung (3,1 x 10 mm), welches mit einer CCD Kamera verbunden ist, wird in der Abb. 2(c) dargestellt.

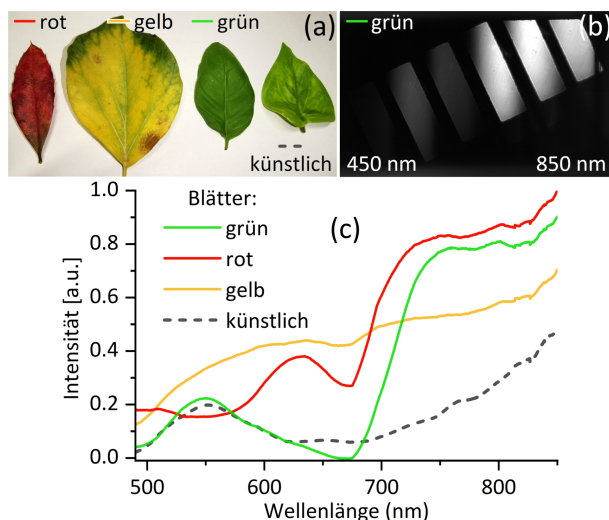


Abb. 3 Messung der Blätter: (a) Foto, (b) Kamerabild des Reflexionsspektrums eines grünen Blattes, (c) Reflexionsspektren von Blättern.

Aus der optomechanischen Geometrie des Aufbaus (Größe der Öffnung und Verlaufsfilterlänge) folgt ein theoretischer Effizienzsteigerungsfaktor von etwa 6.

Die maximalen Verluste an den Strahlteiler betragen bis zu 15 %. Somit ist der Faktor von 5,1–5,7 für den kompletten Spektralbereich zu definieren. Um die Aufnahme des kontinuierlichen Spektrums zu demonstrieren, wurden die Reflexionsspektren von natürlichen und künstlichen Blättern [Abb. 3(a)] gemessen. Die verwendete Lichtquelle war eine Halogenlampe. Das von den Blättern reflektierte Licht wurde durch die optische Faser mit den Spiegelkollimatoren zu dem Modul geleitet. Als Veranschaulichung zeigt die Abb. 3(b) ein Kamerabild des gemessenen grünen Blattes. Die nacheinander aufgenommenen Reflexionsspektren der Blätter sind in der Abb. 3(c) aufgeführt. Die Messung demonstriert lediglich die kontinuierliche Spektrumaufnahme mit den bekannten Verhaltensweisen von Chlorophyll und den Pigmenten der Blätter (oder deren Abwesenheit bei dem künstlichen Blatt).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Konzept der Effizienzsteigerung der filterbasierten Spektrometer wurde für diskrete als auch für die kontinuierlichen Spektrenaufnahmen experimentell nachgewiesen. Das Konzept basiert auf dem Kompromiss zwischen der Erhöhung der Komplexität und drastischen Effizienzsteigerung der filterbasierten Spektrometer. Zukünftige Arbeiten umfassen höhere Konzepte, welche überwiegend auf Reflexionsprinzipien basieren.

5 Danksagung

Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit durch Carl Zeiss Spectroscopy GmbH, Scia Systems GmbH, und Bundesministerium für Bildung und Forschung (13FH657IX6).

Literatur

- [1] H. Hillmer, C. Woidt, A. Istock, A. Kobylinskiy, D.T. Nguyen, N. Ahmed, R. Brunner, T. Kusserow: "Role of nanoimprint lithography for strongly miniaturized optical spectrometers" in *Nanomaterials* **11**, 164 (2021)
- [2] A. Kobylinskiy, B. Laue, E. Förster, B. Höfer, Y. Shen, H. Hillmer and R. Brunner: "Substantial increase in detection efficiency for filter array-based spectral sensors" in *Appl. Opt.* **59**, 2443–2451 (2020)
- [3] Y. Shen, A. Istock, A. Zaman, C. Woidt, and H. Hillmer: "Fabrication and characterization of multi-stopband Fabry–Pérot filter array for nanospectrometers in the VIS range using SCIL nanoimprint technology" in *Appl. Nanosci.* **8**, 1415–1425 (2018)
- [4] A. Kobylinskiy, M. Kraus, X. Uwurukundo, H. Hillmer, and R. Brunner: "Simple but effective: strong efficiency boost for a linear variable filter-based spectrometer" in *J. Opt. Microsyst.* **1**(4), 044501 (2021)