

Miniaturisierte Spektralanalysesysteme im Kontext von Lebensmittelqualität und Ernährungsoptimierung

Miniaturized systems for spectral analysis aiming at food quality and nutrition optimization

Heinrich Engelke, Tino Pügner, Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), Dresden, Deutschland
 heinrich.engelke@ipms.fraunhofer.de

Kurzfassung

Es gibt umfangreiche Möglichkeiten sowohl die Lebensmittelqualität als auch Aspekte der individuellen Ernährung messtechnisch zu erfassen. Hieraus lassen sich Empfehlungen ableiten, die vom Kauf über Lagerung, Zubereitung bis hin zum Konsum den Anwender unterstützen. Neben allgemeinen Zielen wie der Reduzierung von Lebensmittelverschwendung („*food waste*“) können auch persönliche Ziel wie Gewichtsreduzierung, Fitnesssteigerung oder Muskelaufbau gefördert werden. Viele der aktuellen Ansätze haben jedoch Limitierungen in Bezug auf die Kosten, Anwendbarkeit oder den Aufwand für die Messungen. Hochintegrierte miniaturisierte Spektralanalysesysteme bieten in zahlreichen Anwendungen eine Option für tragbare und einfach zu nutzende Systeme, die den vor Ort Einsatz ermöglichen.

Abstract

Several options can be applied to monitor food quality as well as aspects of individual nutrition. Knowledge of these can be used to advise on purchase, storage, preparation and consumption. Here personal aims can be supported besides healthy nutrition and reduction of food waste also more complex aims such as weight reduction, better fitness and muscle building. Existing systems mostly reveal limitations regarding cost, applicability and effort for the measurements. Highly integrated and miniaturized spectral analyzers offer options for portable and simple to use devices in numerous applications including mobile use.

1 Einleitung

Qualitativ hochwertige Lebensmittel und deren optimale Zusammenstellung sind der Schlüssel für die gesunde Ernährung. Neben der Ausgewogenheit von Ballaststoffen, Eiweiß, Kohlenhydraten und Fett sind auch die Berücksichtigung individueller Ziele relevant. Gewichtsreduzierung, Steigerung der Ausdauer oder Muskelaufbau können nur durch ein gezieltes Einstellen von Training und Ernährung bestmöglich erreicht werden. Hierzu ist nicht allein die Nahrungszuführung ausschlaggebend, sondern das, was individuell vom Körper aus der Nahrung heraus aufgenommen wird.

Die Spektralanalyse ist seit langer Zeit als Labormethode zum qualitativen und quantitativen Messen von Stoffzusammensetzungen etabliert. Erste Systeme stehen für den Feldeinsatz zur Verfügung [1, 2]. Von der Analyse des Ackerbodens, der gezielten Steuerung der Bewässerung, Begutachtung des Pflanzenwachstums und der Reife bis zur Ernte [3], anschließend Sortierung, Lagerung, Verkauf bis zur Zubereitung, Verzehr und Resteverwertung werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Für die Zusammensetzungsanalyse spielt die nahinfrarot (NIR) Absorptionsspektroskopie eine tragende Rolle [4]. Probleme wie Schimmelbefall können mittels Fluoreszenzmessungen erkannt werden. Ebenso wird die spektrale Bildgebung („*hyper spectral imaging*“) im Anwendungskontext dort eingesetzt, wo der Nutzen den deutlich höheren gerätetechnischen Aufwand rechtfertigt.

In aktuellen Entwicklungen wird der vor-Ort Einsatz mit Echtzeitauswertung zunehmend wichtig. Ultrakompakte hochintegrierte Spektralanalysesysteme eröffnen neue Möglichkeiten solche Messungen durchzuführen und schnelle Entscheidungen, ohne den Umweg über die Laboranalyse zu ermöglichen.

2 Technologische Aspekte

Für die Umsetzung der Miniaturisierung werden von klassischen Laborgeräten bekannte Systemansätze weitgehend unverändert übernommen. Auch der grundlegende Ablauf der Spektralanalyse bleibt unverändert. Das Licht einer geeigneten Strahlungsquelle wird auf bzw. durch die Probe geleitet, nach der Wechselwirkung zwischen Photonen und Materie wird die Intensität zeit- oder ortsdiskret mittels Spektrometer erfasst und die spektrale Verteilung analysiert. Infolge materialspezifischer Absorption, Reflexion oder Fluoreszenz ist ein Stoffanalyse möglich. Die Spektralanalyse kann exemplarisch durch Monochromatoren, Interferometer als auch durch geeignete Spektralfilter erfolgen.

Anspruchsvolle laserspektroskopische Verfahren wie Raman-Spektroskopie, Kurzpuls- oder Mehrphotonenverfahren spielen derzeit in Anwendungskontext noch keine relevante Rolle, da der apparative Aufwand aktuell noch zu hoch ist.

Ansätze für die Miniaturisierung werden insbesondere durch die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik vorangetrieben (Abb. 1: Smart-NIR). Hier kann beispielsweise das Beugungsgitter eines Monochromators in der beweglichen Silizium-Mikrostruktur eines MEMS-Bauelements (*micro electro mechanical systems*) realisiert werden oder ein Scannerspiegel wird zur Beleuchtung eines feststehenden Gitters genutzt.



Bild 1 Extrem miniaturisiertes NIR-Spektrometer

Neben MEMS-Bauelemente für aktive Komponenten in Spektrometern und Interferometersystemen tragen beispielsweise integrierte Lichtquellen, bevorzugt in kompakten Chipgehäusen wie Chip Scale Packages, zur weiteren Miniaturisierung der Gesamtsysteme bei (Abb. 2).

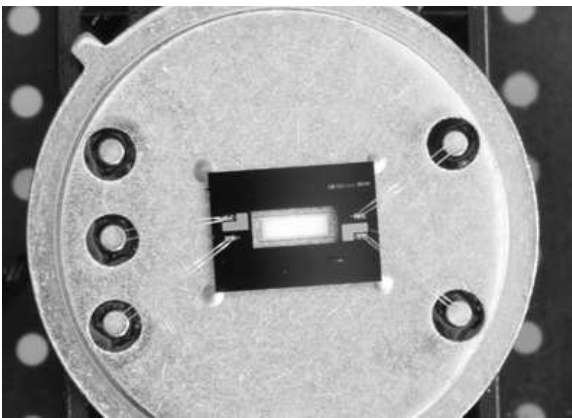


Bild 2 Infrarot-Lichtquelle im Chip Scale

3 Strategie für die Systementwicklung

Potenzielle Systementwicklungen profitieren von der Möglichkeit, zunächst Messungen mit regulärer Laborausstattung durchführen zu können (Abb. 3).

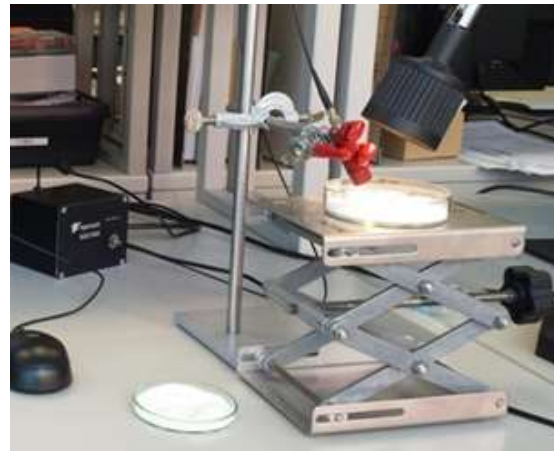


Bild 3 NIR-Absorptionsmessung in diffuser Reflexion (Laboraufbau)

Auf Basis der erfassten Ergebnisse (Abb. 4) kann eine Auswahl von Spektralbereichen bzw. Banden erfolgen, die für die Auslegung des miniaturisierten Messsystems notwendig sind. An dieser Stelle kann zudem entschieden werden, ob für die Erfassung der Spektraldaten ein Ansatz mit einem Monochromator notwendig ist oder ein polychromatischer Ansatz, im Sinne einer Anordnung aus mehreren Detektoren und Filtern passender Lage und Breite, günstiger umzusetzen ist.

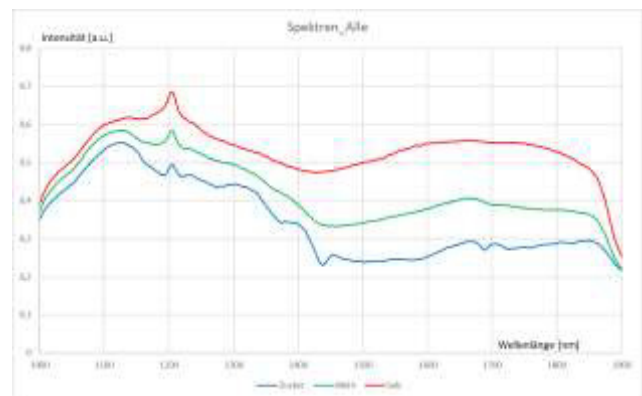


Bild 4 NIR-Absorptionsspektren von Zucker, Mehl und Salz – Lebensmittel der Gruppe „weiße Pulver“

Parallel kann mit der Software- und Modellentwicklung bereits begonnen werden, bevor das miniaturisierte System final fertiggestellt ist. Speziell beim bei der Nutzung von KI-Modellen (KI: künstliche Intelligenz), die zunächst aufwändig anhand großer Datensätze trainiert werden müssen, sind große Zeitvorteile erzielbar.

4 Systemintegration

Die Integration von ultrakompakten Optiksyste men erfordert neue Wege für den Systemzusammenbau. Speziell nichtaxiale Optiken, die in Monochromatoren und Interferometern Anwendung finden, sind komplex hinsichtlich der Montage und Justage der optischen Baugruppen. Der resultierende Herstellungsaufwand bringt Limitierungen für die Fertigung großer Stückzahlen mit sich und kann die

Marktakzeptanz durch hohe Herstellungskosten einschränken. Ein neuer Ansatz für die Fertigung komplexer Optiksyste-me ist die sogenannte „Faltmontage“ [5]. Hierbei wer-den mittels etablierter 2D Montageprozesse die Kompo-nenten auf ein Substrat mit vorprozessierten Biegelinien assembliert. Durch Falten der Wände und des Deckels ent-lang der Biegelinien entsteht ein Körper mit dreidimensio-nal angeordneten Funktionselementen und Strahlengang in seinem Inneren [6]. Wird eine ausreichende Genauigkeit erreicht, so können auch nichtaxiale Optiksyste-me hocheffizient realisiert und große Stückzahlen kostengünstig ge-fertigt werden (Abb. 5).

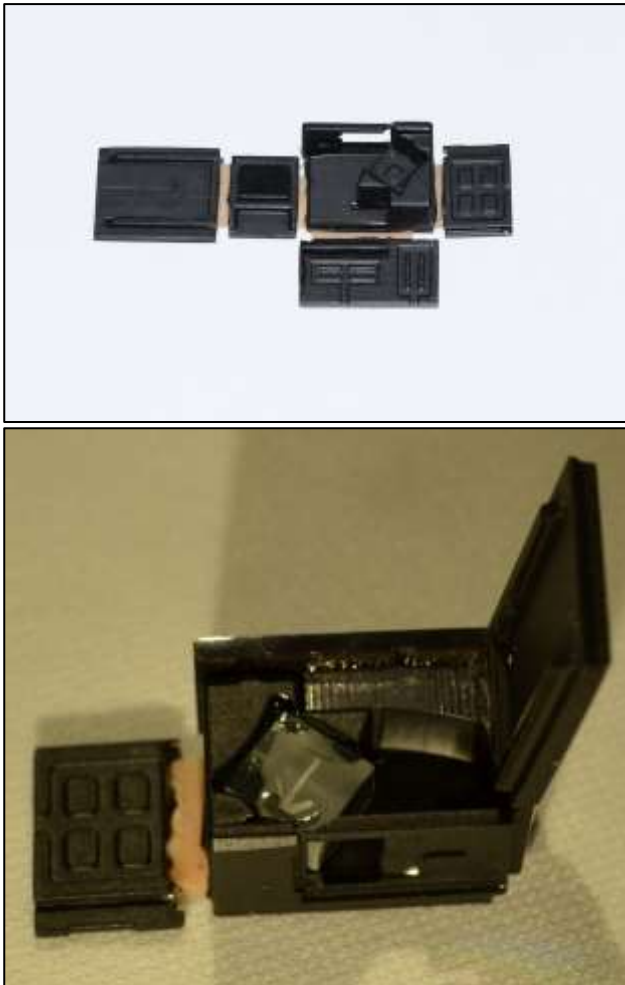


Bild 5 Integration eines Spektrometers mittels Faltmontage (oben unbestücktes Substrat, unten halbgefaltetes System)

Weiteres Potenzial ergibt sich aus den Möglichkeiten der additiven Fertigung. Hierdurch können bereits bei über-schaubaren Stückzahlen ultrakompakte Systemkomponen-ten kostengünstig ermöglicht werden [7].

Die vorteilhafte Kombination aus Substraten, welche sich mit einer Auswahl an Fertigungsverfahren von kleinen bis großen Stückzahlen ökonomisch herstellen lassen, sowie etablierten Montagetechniken der Mikroelektronik, erge-ben in Summe einem hervorragend stückzahl-skalierbaren Fertigungsansatz. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen tre-ten keine Technologiebrüche beim Übergang von kleinen

zu großen Stückzahlen auf, was insbesondere mittelständi-schen Hersteller bevorteilt.

Aufbauend auf miniaturisierte Systemkomponenten wurde erste Handheldgeräte für den mobilen Einsatz realisiert.

5 Applikationsbeispiele

Die Nutzung hochkompakter Spektralanalysesysteme wurde bereits in ersten Anwendungen umgesetzt. Die nichtdispersive Infrarotmessung (NDIR) wird beispie-lsweise zur Erfassung des CO₂ Gehalts in Luft eingesetzt. Hierbei reichen nur zwei Wellenlängen für eine quantita-tive Analyse aus.

Ähnliche Ansätze, jedoch im Bereich des nahinfraroten Spektralbereichs (NIR) ermöglichen die Messung der Feuchte von Böden für den Pflanzenanbau. Die bekannte Wasserbande bei 1450 nm wird zu einer Referenz, bei-spielsweise bei 1150 nm in Verhältnis gesetzt und ermög-licht so die Steuerung der Bewässerung.

Für die Messung von flüssigen Proben werden vorzugs-weise Küvetten verwendet (Abb. 6). Die Messung in Transmission hat oftmals ein besseres Signal-Rausch-Ver-hältnis (SNR, *signal-to-noise ratio*) im Vergleich zur Mes-sung in diffuser Reflexion. Je nach Absorptionsverhalten der Probe muss die Dicke der Küvette passend ausgewählt werden, um eine gute Aussteuerung des Spektrometers zu gewährleisten. Stark streuende Proben ergeben wenig Sig-nal, hier ist unter Umständen die Messung über die Flüssigkeitsoberfläche in Reflexion vorteilhaft.



Bild 6 Messung an flüssigen Proben wie Milch, Olivenöl oder wässrigen Zuckerlösungen

Ein konkretes Beispiel ist die quantitative Messung des Zu-ckergehalts wässriger Lösungen. Hier wird eine Bande bei 1690 nm genutzt, die der Absorption von Haushaltszucker zugeordnet werden kann (Abb. 7).

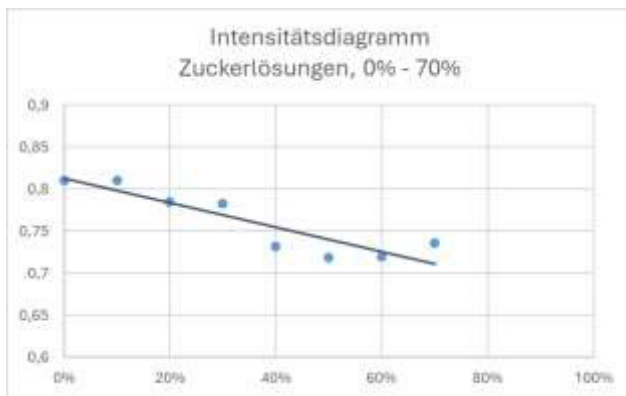


Bild 7 Spektrale Absorption in unterschiedlichen wässrigen Zuckerlösungen bei NIR-Wellenlänge von 1690 nm

Die Anwendung für komplexe Fragestellungen wie beispielsweise der Nährstoffaufnahme im menschlichen Körper, insbesondere Zucker bzw. Kohlenhydrate, Eiweiß und Fett, birgt die Möglichkeit, Ernährung anhand von Ist-Werten zu optimieren. Die Auswertung der Spektren ist jedoch komplex und erfordert innovative Algorithmen und Nutzung von künstlicher Intelligenz (KI).

6 Ausblick

Erste Anwendungen stehen kurz vor dem Beginn der Produktentwicklung. Neben der Hardwareintegration ist die Software- und Modellentwicklung wichtig. Selbstlernende Algorithmen unterstützen die Implementierung neuer Anwendungen. Neben tragbaren Systemen und sogenannten „Wearables“ steht für den Feldeinsatz die Nutzung von unbemannten Flugobjekten (Drohnen) und autonomen Robotern im Fokus neuer Entwicklungsprojekte.

Danksagung

Besonderer Dank gilt zahlreichen Nachwuchskräften, die im Rahmen ihres Engagements an den umfangreichen Labormessungen beteiligt waren.

Literatur

- [1] T. Pügner, J. Knobbe, H. Grüger, „Near-Infrared Grating Spectrometer for Mobile Phone Applications“, *Applied Spectroscopy* 2016, Vol. 70(5), 734–745, (2016), doi: 10.1177/0003702816638277
- [2] H. Grüger, J. Knobbe, T. Pügner, „Improved scanning mirror micro spectrometer for material recognition in recycling applications“ SPIE Proceedings Volume 12899, MOEMS and Miniaturized Systems XXIII; 128990F (2024) <https://doi.org/10.1117/12.3002165>
- [3] H. Grüger, J. Knobbe, T. Pügner, „Multi- and hyperspectral imaging of plants and their properties by means of highly integrated and MEMS based systems“, SPIE Proceedings Volume 12879, Photonic Technologies in Plant and Agricultural Science; 1287903 (2024) <https://doi.org/10.1117/12.3002114>.

- [4] S.I. Hintschich, T. Pügner, J. Knobbe, J. Schröder, P. Reinig, H. Grüger, and H. Schenk, „MEMS-based miniature near-infrared spectrometer for application in environmental and food monitoring for application in environmental and food monitoring“, Proceedings of the 8th International Conference on Sensing Technology, ICST 2014.
- [5] H. Grüger, J. Knobbe, T. Pügner, M. Leuckefeld, P. Reinig, S. Meyer, „Concept for a new approach to realize complex optical systems in high volume“, Proc. of SPIE Vol. 10448_26, (2017) DOI: 10.1117/12.2279782.
- [6] H. Grüger, J. Knobbe, T. Pügner, M. Schulz, S. Sdrenka, G. Ziegmann, „Place and bend assembly: towards production of substrates in high volume technologies“ Proceedings Volume 12898, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics XVII; 128980Q (2024) <https://doi.org/10.1117/12.3002152> PW 2024.
- [7] H. Grüger, J. Knobbe, M.H. Sabiha, „Investigation of mechanical and optical properties of 3D printed materials serving as substrate for place and bend assembly“, SPIE Proceedings Volume 10931, MOEMS and Miniaturized Systems XVIII; 109310R (2019) <https://doi.org/10.1117/12.2509279>