

Differenzierung von Lebensmitteln und Kunststoffen durch FD-FLIM

Nina Leiter¹, Maximilian Wohlschläger¹, Martin Versen¹, Martin Löder², Christian Laforsch²

¹*Technische Hochschule Rosenheim, Hochschulstr. 1, 83024 Rosenheim, Deutschland*

²*Universität Bayreuth, Universitätsstr. 30, 65447 Bayreuth, Deutschland*

Zusammenfassung

Die Lebensmittelindustrie steht vor Herausforderungen durch die Verunreinigung von Lebensmitteln mit Fremdkörpern, was zu finanziellen Verlusten und Imageschäden führen kann. Aktuelle Methoden wie Röntgeninspektion sind nicht ausreichend, um Kunststoffe zu erkennen. Eine vielversprechende Alternative ist die FD-FLIM Methode, die eine Unterscheidung von Kunststoffen und Lebensmitteln über deren spezifische Fluoreszenzabklingzeit ermöglicht. Deshalb wurden die Fluoreszenzeigenschaften von Lebensmitteln und Kunststoffen untersucht. Die Ergebnisse zeigen vielversprechende Unterschiede, insbesondere bei der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit. Diese Erkenntnisse bilden eine Basis für die Entwicklung automatisierter Klassifikationsverfahren zur Fremdkörpererkennung in Lebensmittelprozessen über die Fluoreszenzabklingzeit. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Automatisierung von FD-FLIM, die Erweiterung des Probenumfangs und die Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit konzentrieren, um eine Anwendbarkeit in der Lebensmittelindustrie zu ermöglichen.

Keywords: Lebensmittel, Kunststoff, Fluoreszenz, FD-FLIM, Detektion

Einleitung

In der Lebensmittelindustrie kommt es immer wieder zur Verunreinigung von Produktchargen durch Fremdkörper. Ursächlich hierfür sind unter anderem der Abrieb von Transportkisten und Förderbändern aus Kunststoff der Produktionsanlage sowie defekte Hygiene-Handschuhe von Mitarbeitern. Ein Rückruf von Produktionschargen geht stets mit erheblichen finanziellen Verlusten einher und verursacht darüber hinaus einen einschneidenden Imageschaden für Lebensmittelproduzenten. Auswertungen der Lebensmittelwarnungen in Deutschland des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) [1] im Zeitraum von 2011 bis 2022 zeigen, dass die Bereiche „Erzeugnisse aus Fleisch und Wurst“, „Getreide und Backwaren“ sowie „Milch und Milchprodukte“ am häufigsten durch Fremdkörper, insbesondere Kunststoffe, kontaminiert sind. Diese Verteilung korreliert auch mit den Statistiken des Europäischen Schnellwarnsystems für Lebensmittel und Futtermittel [2] im Zeitraum von 2017 bis 2022. Folglich ist ein Verfahren unabdingbar, welches die Fremdkörper in-Line detektiert, um finanziellen Verlust zu reduzieren und Imageschäden zu vermeiden.

Aus diesem Grund werden in heutigen Lebensmittelproduktionsstraßen bereits teilweise Röntgeninspektionssysteme eingesetzt [3]. Durch das abgeschirmte Röntgenfluoreszenzsystem können

Substanzen mit hoher Dichte, wie beispielsweise Metallspäne oder Schrauben identifiziert und anschließend aussortiert werden. Allerdings ist das Verfahren bei Materialien mit geringer Dichte und somit für die Detektion von Glas und Kunststoffe ungeeignet. Ein weiteres Verfahren basierend auf Radartechnik stellte das Fraunhofer-Institut im Jahr 2020 vor, mit welchem Glassplitter erkannt werden können [4]. Jedoch weisen die genannten Daten des BVL darauf hin, dass 31% der in der Statistik erfassten Fremdkörper aus Kunststoff bestehen, welche nicht in der Lebensmittelproduktion detektiert und identifiziert werden können.

In der Untersuchung von Wohlschläger [5] wurde nachgewiesen, dass die Methode der bildgebenden Fluoreszenzabklingzeitmessung im Frequenzbereich (FD-FLIM, eng.: Frequency-domain fluorescence lifetime imaging microscopy) eine Identifikation unterschiedlicher Kunststoffe und eine Unterscheidung dieser von natürlichen Materialien ermöglicht. In [6] konnten außerdem 14 Kunststoffe über das FD-FLIM verfahren in Kombination mit trainierten neuronalen Netzen unterschieden werden. Aus diesem Grund wird untersucht, ob mit FD-FLIM eine Unterscheidung von Kunststoffen und Lebensmitteln möglich ist und die innovative Methode dadurch einen Beitrag zur Lebensmittelsicherheit leisten kann.

Theorie der Fluoreszenzabklingzeit

Materialien, die Autofluoreszenz aufweisen, reagieren auf Anregung mit einem charakteristischen Fluoreszenzsignal [7]. Wie von [8] weiter ausgeführt, ist zur Messung der Fluoreszenzabklingzeit eines Materials eine kontinuierliche und modulierte Anregung erforderlich, wenn die Fluoreszenzabklingzeit im Frequenzbereich gemessen wird. Die Anregung kann durch eine Fourier-transformierte Testfunktion wie eine sinusförmige oder rechteckige Schwingung bei einer definierten Modulationsfrequenz ω erfolgen. Das Fluoreszenzsignal folgt der sinusförmigen/rechteckigen Anregung mit einer Phasenverschiebung ϕ . Zusätzlich ist das Fluoreszenzsignal energieärmer und deshalb in seiner Amplitude gedämpft sowie in seinem Mittelwert verschoben. In Abb. 1 sind die Amplitude der Anregung B , die Amplitude der Fluoreszenzemission b , der Mittelwert der Anregung A und der Mittelwert der Fluoreszenzemission a sowie die Phasenverschiebung ϕ schematisch dargestellt.

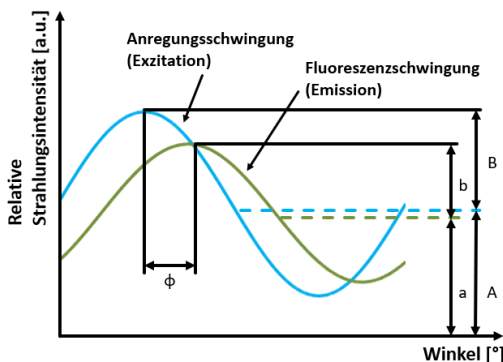


Abb. 1: Schematische Darstellung der Phasenverschiebung und der Amplitudendämpfung des Fluoreszenzsignals [8]

Wie in Gl. (1) dargestellt, wird über die Modulationsfrequenz ω und die Phasenverschiebung ϕ , die phasenabhängige Fluoreszenzabklingzeit τ_{PH} berechnet [7]:

$$\tau_{PH} = \frac{\tan(\phi)}{\omega} \quad (1)$$

Zur Berechnung der modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeit τ_M über Gl. (2) ist der Modulationsindex M notwendig [7]:

$$M = \frac{(b/a)}{(B/A)} \quad (2)$$

Die modulationsabhängige Fluoreszenzabklingzeit τ_M ergibt sich wie in Gl.

(3) dargestellt aus dem Modulationsindex M und der Modulationsfrequenz ω [7]:

$$\tau_M = \frac{\sqrt{\frac{1}{M^2} - 1}}{\omega} \quad (3)$$

Experimenteller Aufbau

Um die Fluoreszenzabklingzeiten von Kunststoffen und Lebensmitteln zu analysieren, wurde ein experimenteller Aufbau angelehnt an [8] verwendet. Dieser beinhaltet eine FD-FLIM-Kamera und eine Laser-Diode, welche an einem Mikroskop montiert sind (siehe Abb. 2). Die ausgewählte Laserdiode wird von der Kamera gesteuert und liefert ein sinusförmig/rechteckig moduliertes Anregungssignal. Als modulierte Anregungsquelle stehen drei Laser-Dioden mit Wellenlängen von 405 nm, 445 nm oder 488 nm zur Verfügung. Das Lichtsignal wird über den Strahleingang des Mikroskops auf die zu untersuchende Materialprobe gerichtet. Das zeitverschobene Fluoreszenzantwortsignal wird durch das x20-Objektiv erfasst und anschließend von den 1004×1008 Fotodioden der FD-FLIM-Kamera detektiert, die oben auf dem Mikroskop angebracht ist. Anstatt der FD-FLIM-Kamera kann auch ein Minispektrometer als Detektor montiert werden, um die spektrale Fluoreszenzantwort aufzuzeichnen. In beiden Fällen werden zwei optische Filter verwendet, ein optischer Bandpassfilter, um die Bandbreite des Anregungslichts zu verengen, und ein optischer Langpassfilter, um Reflexionen und Streulicht im Emissionsweg zu blocken. Im Falle der Verwendung der FD-FLIM-Kamera wird der Messaufbau über eine Referenz mit einer definierten Abklingzeit von 3,75 ns kalibriert. Die gemessenen Daten werden von der Kamera über eine USB-Schnittstelle an den Computer übertragen. Die Daten der FD-FLIM Kamera bestehen aus je 5 Bildern welche die Fluoreszenzintensität, die Phasenverschiebung, den Modulationsindex sowie die phasen- und modulationsabhängige Fluoreszenzabklingzeit beinhalten. Diese Bilder werden als TIF-Dateien abgelegt. Die Daten des Minispektrometers werden in Exceltabellen gespeichert.

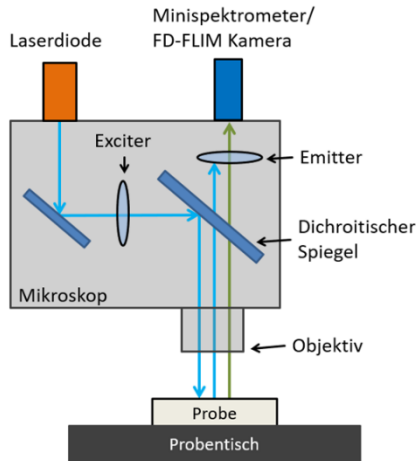


Abb. 2: Schematische Darstellung des experimentellen Messsystems zur Bestimmung von Fluoreszenzeigenschaften

Kunststoff- und Lebensmittelproben

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Fluoreszenzeigenschaften von Lebensmitteln und Kunststoffen, welche in der Lebensmittelindustrie zum Einsatz kommen, mittels FD-FLIM bestimmt. Hierzu wurde Aufschnitt von Salami, Schinken und Gouda sowie Zucker als Lebensmittelproben verwendet. Des Weiteren wurden eine transparente Kunststoff-Lebensmittelverpackung aus dem Einzelhandel, eine genormte E2-Eurokiste aus blauem PP-Kunststoff und ein blauer Nitril-Naturkautschuk-Handschuh analysiert. Nähere Informationen zu den untersuchten Materialien sind Tab. 1 zu entnehmen.

Tab. 1: Auflistung der untersuchten Lebensmittel- und Kunststoffproben

Bezeichnung	Material
Salami	Lebensmittel, Geflügelsalami von Wildmann
Schinken	Lebensmittel, Saftiger Krustenschinken von Hofmaier
Gouda	Lebensmittel, Gouda von Grünländer
Zucker	Lebensmittel, Rüberzucker von Südzucker
Verpackung	Kunststoff, Einzelverpackung von Saftiger Krustenschinken Hofmaier
Handschuh	Kunststoff, Nitril-Naturkautschuk blau
Eurokiste	Kunststoff,

E2-Eurokiste aus PP blau von SSI Schäfer
--

Methodisches Vorgehen – Spektroskopie

Zur Auswahl einer geeigneten Anregungswellenlänge für die FD-FLIM Messungen von Lebensmittel und Kunststoffen, dienen Messungen des Fluoreszenzspektrums. Mit Hilfe des experimentellen Aufbaus mit dem Minispektrometer wurden 10 Fluoreszenzspektren der Proben mit den Laserdioden 405nm, 445nm und 488nm aufgenommen. Die in Tabellen gespeicherten Datenwerte wurden anschließend in MATLAB® verarbeitet. Dazu wurde zuerst die Hintergrundmessung je Messung subtrahiert und anschließend eine Glättung und Interpolation der Datenpunkte durchgeführt. Für jede Probe wurde anschließend das gemittelte Fluoreszenzspektrum aus den 10 Einzelspektren berechnet. Darüber hinaus wurden die Maxima und die Stokes-Verschiebung berechnet, welche wiederum in Tabellen abgelegt wurden.

Methodisches Vorgehen – FD-FLIM

Für jede Materialprobe wurden 220 Einzelmessungen mittels der FD-FLIM-Methode durchgeführt, was ca. 200 Millionen gemessenen phasen- und modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeiten entspricht. Die TIF-Dateien der Fluoreszenzintensität, der Phasenverschiebung, des Modulationsindex und der phasen- und modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeiten wurden in MATLAB® importiert und verarbeitet. Die 220 phasen- und modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeitbilder je Probe wurden jeweils zu einer Matrix von 110.880x2016 zusammengefügt. Für jede Matrix wurde anschließend ein Histogramm der Fluoreszenzabklingzeit generiert und das resultierende Maxima, der Mittelwert der Fluoreszenzabklingzeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen berechnet. Basierend darauf wurde je Probe eine zugehörige Gauß-Kurve berechnet und mittels der Anpassungsgüte überprüft. Die Kennzahlen der Gaußkurven wurden ebenfalls in Excel-Tabellen abgelegt. Die anschließende Darstellung der Ergebnisse in einem Zeigerdiagramm kombiniert die Information der phasen- und modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeit. Hierzu wird die modulationsabhängige Fluoreszenzabklingzeit als Länge eines Vektors vom Nullpunkt definiert, welcher um den Winkel der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit um den Nullpunkt gedreht wird.

Ergebnisse der Spektroskopie

Bei einer Anregungswellenlänge von 405 nm (siehe Abb. 3) zeigen der Handschuh, der Gouda und die Eurokiste ein deutliches Maximum im Bereich 1 von 420 – 600 nm. Schinken, Salami und Zucker zeigen in diesem Bereich 1 zwei Maxima. Für Salami, Gouda und Schinken sind im Bereich 2 von 600 – 900 nm zwei Maxima zu erkennen. Das Spektrum der Verpackung zeigt in beiden Bereichen kein eindeutiges Maximum.

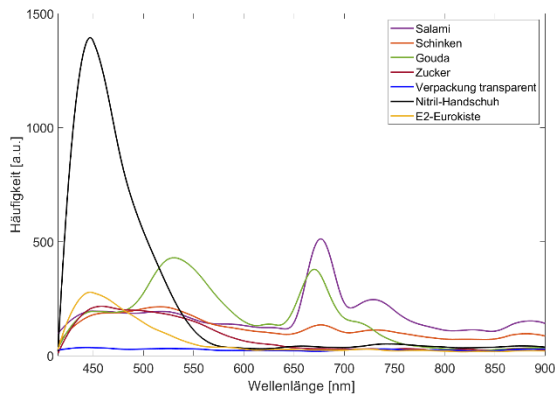


Abb. 3: Fluoreszenzspektrum von Kunststoffen und Lebensmitteln bei einer Anregungswellenlänge von 405 nm.

Bei einer Anregungswellenlänge von 445 nm (siehe Abb. 4) zeigen alle Materialien außer die Verpackung ein eindeutiges Maximum in Bereich 1. In Bereich 2 weisen Zucker und Gouda zwei weitere Maxima auf.

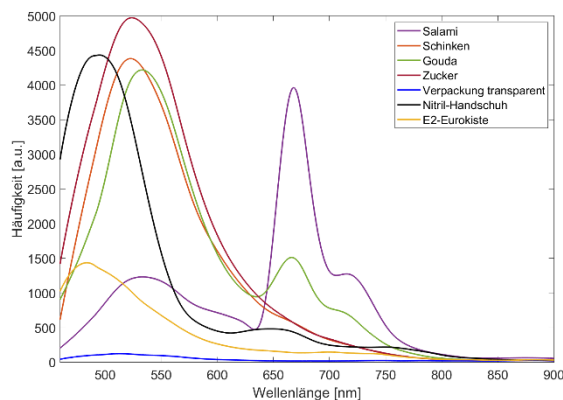


Abb. 4: Fluoreszenzspektrum von Kunststoffen und Lebensmitteln bei einer Anregungswellenlänge von 445 nm.

Bei einer Anregungswellenlänge von 488 nm (siehe Abb. 5) zeigen alle Materialien außer der Verpackung und der Eurokiste ein eindeutiges Maximum in Bereich 1. Für Gouda, Salami und

Schinken zeigen sich in Bereich 2 zwei weitere Maxima.

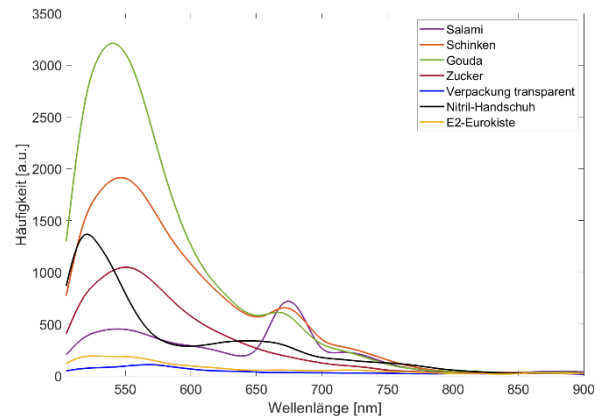


Abb. 5: Fluoreszenzspektrum von Kunststoffen und Lebensmitteln bei einer Anregungswellenlänge von 488 nm.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde für die Untersuchung des FD-FLIM Verfahrens eine Anregungswellenlänge von 445 nm verwendet. Bei dieser Anregungswellenlänge zeigt sich eine hohe Intensität des Fluoreszenzsignals sowie charakteristische Maxima im Spektrum für alle Materialien ausgenommen Verpackung.

Ergebnisse des FD-FLIM Verfahrens

In Tab. 2 sind die berechneten Mittelwerte ($\overline{\tau_{PH}}$) und die zugehörigen Standardabweichungen ($s(\overline{\tau_{PH}})$) der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit gelistet.

Tab. 2: Ergebnisse der Mittelwerte und Standardabweichung der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit von Kunststoffen und Lebensmitteln bei einer Anregungswellenlänge von 445 nm.

Bezeichnung	$\overline{\tau_{PH}}$ [ns]	$s(\overline{\tau_{PH}})$ [ns]
Salami	3,64	0,36
Schinken	2,36	0,23
Gouda	2,76	0,13
Zucker	2,64	0,08
Verpackung	2,20	0,15
Handschuh	2,70	0,08
Eurokiste	2,12	0,12

Die Materialien Verpackung und Eurokiste zeigen die kürzesten phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeiten. Sie liegen damit

niedriger als die der Lebensmittel. Die phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeiten von Zucker, Handschuh und Gouda liegen dicht beieinander. Salami zeigt die längste

phasenabhängige Fluoreszenzabklingzeit mit der größten Standardabweichung.

In Tab. 3 sind die berechneten Mittelwerte ($\overline{\tau_M}$) und die zugehörigen Standardabweichungen ($s(\overline{\tau_M})$) der modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeit gelistet.

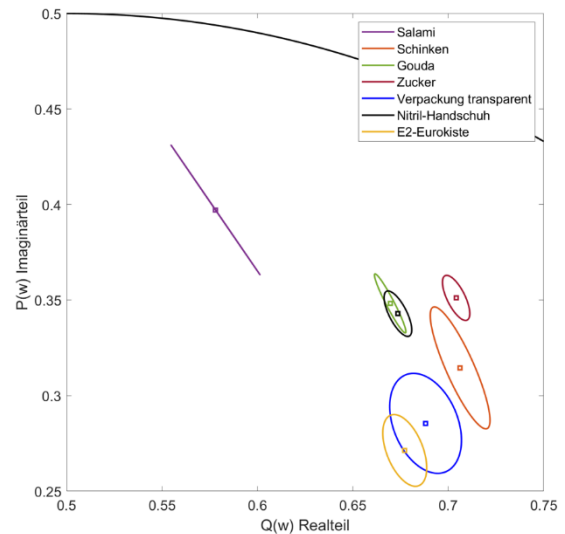
Tab. 3: Ergebnisse der Mittelwerte und Standardabweichung der modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeit von Kunststoffen und Lebensmittel bei einer Anregungswellenlänge von 445 nm.

Bezeichnung	$\overline{\tau_M}$ [ns]	$s(\overline{\tau_M})$ [ns]
Salami	5,38	0,36
Schinken	4,35	0,30
Gouda	4,61	0,14
Zucker	4,14	0,14
Verpackung	3,98	0,27
Handschuh	4,49	0,14
Eurokiste	4,97	0,24

Die Verpackung zeigt die kürzeste und die Salami die längste modulationsabhängige Fluoreszenzabklingzeit im Vergleich zu den anderen Materialien. Die Mittelwerte von Zucker, Schinken, Handschuh, Gouda und Eurokisten liegen verteilt zwischen Verpackung und Salami, wobei die Abklingzeiten von Handschuh und Gouda dicht beieinander liegen.

Abb. 6 zeigt das Zeigerdiagramm der Materialien, welches sich aus den phasen- und modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeiten ergibt. Im Zeigerdiagramm wird deutlich, dass die Ellipsen der Eurokiste und der Verpackung sowie die des Goudas und des Handschuhs sich schneiden, welche die einfache Standardabweichung der Fluoreszenzabklingzeit repräsentieren. Eine Clusterbildung von Lebensmittel oder Kunststoff ist nicht vorhanden.

Abb. 6: Zeigerdiagramm zur Darstellung der Mittelwerte (Quadrat) und Standardabweichung (Ellipse) der Fluoreszenzabklingzeiten von Kunststoffen und Lebensmittel.



Diskussion der Ergebnisse

Für eine vereinfachte Diskussion der Ergebnisse ist in Tab. 4 und 5 aufgeführt, in welchen Fällen die Materialien über die einfache Standardabweichung der Fluoreszenzabklingzeit unterschieden werden können (✓) oder nicht (✗).

Tab. 4: Differenzierung von Kunststoffen und Lebensmittel im Bereich der einfachen Standardabweichung der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit.

$\overline{\tau_{PH}} \pm s(\overline{\tau_{PH}})$	Verpackung	Handschuh	Eurokiste
Salami	✓	✓	✓
Schinken	✗	✓	✗
Gouda	✓	✗	✓
Zucker	✓	✗	✓

In 14 von 21 Fällen können die Materialpaare über die einfache Standardabweichung der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit unterschieden werden. In nur 4 von 21 Fällen kann Kunststoff nicht von einem Lebensmittel unterschieden werden (siehe Zeilen Verpackung, Handschuh und ein Feld in der Zeile Eurokiste). Es ist jedoch hervorzuheben, dass Kunststoff in allen Materialpaaren von Salami unterschieden werden konnte.

Tab. 5: Differenzierung von Kunststoffen und Lebensmittel im Bereich der einfachen Standardabweichung der modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeit.

$\bar{\tau}_M \pm s(\bar{\tau}_M)$	Verpackung	Handschuh	Eurokiste
Salami	✓	✓	✗
Schinken	✗	✗	✓
Gouda	✓	✗	✗
Zucker	✗	✓	✓

In 13 von 21 Fällen können die Materialpaare über die einfache Standardabweichung der modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeit unterschieden werden. In 6 Fällen kann Kunststoff nicht von Lebensmittel unterschieden werden (siehe die Zeilen Verpackung, Handschuh und Eurokiste). Dieses Ergebnis zeigt, dass die Information der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit für die Unterscheidung von Kunststoff und Salami genutzt werden kann. Für die Detektion von Kunststoff in Schinken, Gouda und Zucker ist die Information der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit oder der modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeit nicht ausreichend. Werden jedoch beide Kennzahlen kombiniert, wie im Zeigerdiagramm dargestellt ist eine Unterscheidung von Kunststoff zu Salami, Schinken und Zucker möglich. Lediglich Gouda ist in der einfachen Standardabweichung der Fluoreszenzabklingzeit nicht vom Handschuh zu unterscheiden (siehe Tab. 6).

Tab. 6: Differenzierung von Kunststoffen und Lebensmittel im Zeigerdiagramm im Bereich der einfachen Standardabweichung..

Zeigerdiagramm	Verpackung	Handschuh	Eurokiste
Salami	✓	✓	✓
Schinken	✓	✓	✓
Gouda	✓	✗	✓
Zucker	✓	✓	✓

Fazit

Kunststoffe können derzeit nicht in-line in Lebensmittelproduktionsstraßen detektiert werden, was zu Problemen für den Lebensmittelproduzenten führt. FD-FLIM könnte eine neue und vielversprechende Methodik zur Detektion von Kunststoffen in der Lebensmittelproduktion sein. Aus diesem Grund wurden Lebensmittel und Kunststoffe mittels FD-FLIM bei einer Anregungswellenlänge von 445 nm vermessen. Die Analyse der Fluoreszenzabklingzeiten zeigt, dass Salami, Schinken und Gouda von den untersuchten Kunststoffen differenziert werden kann. Die vorliegenden Untersuchungen präsentieren somit vielversprechende Ergebnisse bezüglich der Detektion von Kunststoffen in Lebensmitteln mithilfe von FD-FLIM. Die identifizierten Unterschiede in den Mittelwerten und Standardabweichungen der phasenabhängigen und modulationsabhängigen Fluoreszenzabklingzeiten bieten eine Grundlage für die Entwicklung eines automatisierbaren Klassifikationsverfahrens zur Identifikation von Fremdkörpern in Lebensmittelprozessen. Durch zukünftige Untersuchungen soll festgestellt werden, was durch die Implementierung eines Klassifikationsalgorithmus, unterstützt durch zusätzliche Datensammlungen und den Einsatz künstlicher Intelligenz erreicht werden kann. Insgesamt eröffnen die vorliegenden Ergebnisse Perspektiven für die Entwicklung fortgeschrittener Verfahren zur Qualitätssicherung in der Lebensmittelindustrie, insbesondere im Hinblick auf die Überwachung von Fremdkörperkontaminationen. Zukünftige Forschungsanstrengungen könnten darauf abzielen, FD-FLIM zu automatisieren, den Probensatz zu erweitern und die Klassifikationsgenauigkeit zu verfeinern, um eine Umsetzbarkeit im industriellen Prozess zu ermöglichen.

Danksagung

Die dargelegten Untersuchungen wurden durch Bayern Innovativ im Rahmen des Projektes LeMi-FID (FKZ: VAL-2202-0004) gefördert. Besonderen Dank gilt auch der Weber Maschinenbau GmbH.

Literaturnachweis

- [1] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, *lebensmittelwarnung.de* – Das Portal der Bundesländer und des BVL, online: <https://www.lebensmittelwarnung.de/bvl-lmw-de/liste/alle/deutschlandweit/10/0>.

- [2] European Commission, *RASFF Window*, online: <https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/screen/search>.
- [3] R.P. Haff, N. Toyofuku., *X-ray detection of defects and contaminants in the food industry*, *Sens Instrumen Food Qual*, 2:262–703, (2008); doi: 10.1007/s11694-008-9059-8
- [4] Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR, *Fremdkörper in Lebensmitteln via Radar aufspüren*, *Forschung kompakt*, Verbraucherschutz, 2. November, 2020, S. 1-3., (2020);
- [5] M. Wohlschläger, M. Dietlmeier, N. Leiter, M. Versen, M. Löder C. Laforsch, *Developing and Applying an MLP and RFC on Gaussian-Analyzed FD-FLIM Data to Identify and Distinguish Plastics from Environmental Materials*, *IEEE IJCNN Conference*, 18.-23. Juni, (2023);
- [6] G. J. Maniyattu, E. Geegy, N. Leiter, M. Wohlschläger, M. Versen and C. Laforsch, *Multilayer Perceptron Development to Identify Plastics Using Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy*, *Electronic Device Failure Analysis*, Volume 25, Issue 3 EDFAAO 3:31-37 (2023);
- [7] B. Valeur and M. Berberan-Santos, *Molecular Fluorescence*, Weinheim, WILEY VCH (2012);doi: 10.1002/978352765000
- [8] M. Wohlschläger, M. Versen, M. G.J. Löder, C. Laforsch, *A promising method for fast identification of microplastic particles in environmental samples: A pilot study using fluorescence lifetime imaging microscopy*, *Heliyon*, (2024); e25133, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25133>.