

Einsatz von künstlicher Intelligenz und laseroptischer Verfahren zur Beurteilung von hochkonzentrierten Milcherzeugnissen



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungseinrichtung(en):	Technische Universität München School of Life Sciences Forschungsdepartment Life Science Engineering Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie Prof. Dr. Thomas Becker/Dipl.-Ing. Dominik Geier
Industriegruppe(n):	Milchindustrie-Verband e.V. (MIV), Berlin Weihenstephaner Förderverein für Brau-, Getränke- und Getreidetechnologie e.V., Freising
Projektkoordinatorin:	Salvador Donat Luis Kraft Foods R&D Inc. (Mondelèz International), Unterhaching
Laufzeit:	2022 - 2025
Zuwendungssumme:	€ 267.328,--

Ausgangssituation

Hochkonzentrierte Milcherzeugnisse werden durch Wasserentzug hergestellt und dienen einerseits dem direkten Konsum, andererseits sind sie eine bedeutende Zwischenstufe bei der Herstellung unterschiedlicher Milcherzeugnisse. Bei der Prozessierung werden relevante Parameter zur Charakterisierung der Produktqualität, wie rheologische Kennzahlen (komplexes Modul, Viskosität), die Partikelgrößenverteilung verschiedener Partikel (Milchfettkugeln und Caseinmicellen) sowie der Fett- und Proteingehalt derzeit überwiegend mit Laboranalysen ermittelt, die geschultes Personal erfordern und mit einer zeitlichen Verzögerung zum Prozess behaftet sind. Messtechniken, die mit Atline- oder Bypass-Lösungen arbeiten, ermitteln Parameter ohne manuelle Entnahme aus dem Produktionsprozess, stellen aber aufgrund eines komplexeren Aufbaus hohe Anforderungen an Reinigung und Desinfektion, sind wartungsintensiv und teuer. Inline-Methoden hingegen messen direkt im Prozess und schnell, sind aber aufgrund der hohen Anschaffungskosten bisher nicht verbreitet. Zudem ist für die Bestimmung der genannten Parameter jeweils ein eigenständiges Messsystem notwendig, was gerade für KMU die Investitionskosten weiter erhöht. Auch die Koordinierung und zeitliche Einordnung der Ergebnisse ist eine Herausforderung, da jedes Messsystem eine individuelle Analysendauer und -frequenz aufweist. Somit spiegeln diese Analyseergebnisse nicht den aktuellen Prozesszustand wider und können nicht zu einer autonomen Prozesssteuerung eingesetzt werden.

Auf der Analyse von Laser Speckle basierende laseroptische Verfahren sind nicht-invasiv und inline-fähig und wurden in Labor-Versuchsaufbauten genutzt, um basierend auf der Lichtstreuung die genannten Parameter zu bestimmen. Die Labor-Versuchsaufbauten wurden jedoch bisher nur unabhängig voneinander eingesetzt und sind aufgrund eines hohen Rechenaufwands bei der Auswertung nicht echtzeitfähig.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines auf der Analyse von Laser Speckle basierenden kombinierten laseroptischen Verfahrens, das die gleichzeitige Inline-Erfassung folgender Parameter ermöglicht:

- Komplexes Modul und Viskosität über die Laser Speckle Rheology
- Partikelgrößenverteilung (PGV) über das diffuse Reflexionsprofil sowie die Korrelation zu optischen Kennzahlen
- Fett- und Proteingehalt über die Absorption sowie die Intensität der Rückstreuung

Durch die Integration der Auswertalgorithmen der verschiedenen laseroptischen Verfahren sowie physikalischen Wissens in künstliche neuronale Netze, soll die Berechnung der Parameter so optimiert werden, dass das kombinierte laseroptische Verfahren in Echtzeit und mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand ablaufen kann.

Forschungsergebnis

Im Projekt wurde ein durchgängiger methodischer Workflow von der optischen Speckle-Datenerfassung über eine systematische Datenqualitätskontrolle bis hin zur physikalisch fundierten, KI-basierten Bestimmung relevanter Produkt- und Prozessparameter etabliert und auf prozessnahe Bedingungen übertragen. Dazu wurde ein kombiniertes laseroptisches Verfahren entwickelt, das verschiedene specklebasierte Auswertemethoden in einem integrierten System vereint und mit künstlicher Intelligenz in Form neuronaler Netze verknüpft ist.

Zur Sicherstellung der Datenqualität wurden zunächst Stabilität und Vergleichbarkeit der Speckle-Signale untersucht. Zudem wurde der Einfluss der Belichtungszeit, des Auswertebereichs (Region of Interest), zentraler Abbildungs- und Signaleinstellungen sowie Entrauschungsverfahren auf die Autokorrelationsfunktion $g_2(t)$ quantifiziert und in standardisierte, praxistaugliche Verfahrensweisen überführt. So wurden bspw. Belichtungszeiten an die jeweilige Messaufgabe angepasst, der Auswertebereich standardisiert und Entrauschungsverfahren so ausgewählt, dass dynamikrelevante Signalanteile nicht verfälscht werden.

Für die echtzeitbasierte Ableitung rheologischer Kenngrößen ruhender Proben wurden systematische Signalverzerrungen gezielt korrigiert (beispielsweise durch eine geeignete Gamma-Kalibrierung, die die Qualität der Kontrastabbildung und -auswertung erhöht) und ein effizienter KI-basierter Auswertungs- und Verarbeitungsworkflow implementiert. Dadurch konnten die Signalstabilität und die Qualität der abgeleiteten rheologischen Kenngrößen deutlich verbessert werden, was sich in einer erhöhten Genauigkeit bei der Bestimmung des komplexen Schermoduls widerspiegelte. Die Validierungen mit verschiedenen milchbasierten Matrices zeigte eine hohe Übereinstimmung mit rheometrischen Referenzmessungen bei Abweichungen unter 10 %, was die Robustheit gegenüber Rezepturvariationen und Prozessbedingungen unterstreicht. Für die Bestimmung von Struktur- und Konzentrationsparametern wurde ein specklebasiertes Analyseverfahren entwickelt, das die zeitliche Dynamik der Streusignale in robuste, modellgeeignete Merkmalsrepräsentationen transformiert. Auf dieser Grundlage konnten sowohl die Protein- und Fettkonzentration als auch die Partikelgrößenverteilung (PGV) zuverlässig vorhergesagt werden. Als zentraler Schritt zur Ermöglichung einer prozessfähigen Anwendung wurde die Übertragung der Speckle-Verfahren auf strömende Systeme umgesetzt. Durch die Erfassung der Probe aus zwei Perspektiven sowie eine geeignete Signaltrennung und Referenzierung, konnten bewegungsinduzierte Strömungsanteile von der brownischen dominierten Dynamik der Streuzentren entkoppelt und damit strömungsinduzierte Störeinflüsse wirksam reduziert werden. Auf dieser Basis wurde eine physikalisch aussagekräftige zeitliche Signalcharakteristik abgeleitet und deren Eignung zur Ermittlung der Parameter demonstriert.

Weiterhin wurde eine automatisierte Anomalie-Detektion entwickelt und etabliert, die untypische Messzustände und Störeinflüsse zuverlässig identifiziert und damit eine zusätzliche Sicherheitsebene für ein inlinefähiges Gesamtsystem bereitstellt. Insgesamt zeigte sich, dass die entwickelte Methodik eine belastbare Grundlage für eine integrierte, nicht-invasive und prozessnahe Analytik bietet und das Potenzial besitzt, in weiteren Entwicklungsschritten in praxisnahe Inline- oder Bypass-Anwendungen überführt zu werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Ergebnisse werden milchverarbeitende Unternehmen in die Lage versetzen, die Qualität ihrer Produkte kontinuierlich inline zu überwachen und regelnd in den Prozess einzugreifen. Hierdurch können Fehlproduktionen, z.B. durch Flokkulation oder Gelierung, vermindert werden.

Die detaillierte Untersuchung und Aufklärung des laseroptischen Verfahrens ermöglicht die Umsetzung einer echtzeit- und inlinefähigen kombinierten KI-gestützten Erfassung der Partikelgrößenverteilung, des Fett- und Proteingehalts und rheologischer Kennzahlen (komplexer Modul, Viskosität). Eine Implementierung in neuen Anlagen bzw. eine Erweiterung oder Nachrüstung in der Praxis vorhandener Systeme könnte innerhalb weniger Jahre nach Projektende in der industriellen Praxis erfolgen. Das entwickelte Verfahren ist eine direkte, nicht-invasive Methode ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung. Folglich können die so erfassten Parameter inline überwacht und zur Prozesssteuerung genutzt werden. Die Kosten für ein auf dem Verfahren basierendes laseroptisches Inline-System zur Prozessüberwachung werden auf etwa 6.000 € geschätzt und decken den Laser, das Kamerasystem und die dazugehörige Hardware zur Bereitstellung der KI bei Einzelfertigung ab.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2025.
2. Wang, T., Goudoulas, T., Moeini, A., Geier, D., Fattahi, E. & Becker, T.: Optimized Laser Speckle Rheology Measurement Based on Speckle Pattern's Gamma Correction and Neural Network. Opt. Laser Technol. 191, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113320> (2025).
3. Manavi, S., Fattahi, E. & Becker, T.: A trial solution for imposing boundary conditions of partial differential equations in physics-informed neural networks. Eng. Appl. Artif. Intell. 127, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107236> (2024).
4. Wang, T., Fattahi, E., Geier, D. & Becker, T.: Neural Network-Driven Image Gamma Calibration: An Innovative Approach for All-Optical Rheometer. Langfassungsband 17. Dresdner Sensor-Symposium, 76-80, DOI 10.5162/17dss2024/7.2 (2024).

Weiteres Informationsmaterial

Technische Universität München
School of Life Sciences
Forschungsdepartment Life Science Engineering
Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie
Weihenstephaner Steig 20, 85354 Freising
Tel.: +49 8161 71-3262
Fax: +49 8161 71-3883
E-Mail: tb@tum.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 3079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

Förderhinweis

... ein Projekt der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



FORSCHUNGSKREIS
DER ERNÄHRUNGSINDUSTRIE E.V.



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wird/wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bildnachweis - Seite 1: © Krause, Johansen - MIV

Stand: 6. Mai 2026