Digitales Prozess-Abbild durch maschinelles Lernen zum prädiktiven Erkennen kritischer Prozess-Zustände und Qualitätsparameter am Beispiel eines fermentierten und eines haltbaren Lebensmittels



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungseinrichtung(en):	Universität Hohenheim Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie FG Lebensmittelinformatik Jun.-Prof. Dr. Christian Krupitzer/N.N. Universität Hohenheim Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie FG Milchwissenschaft und -technologie Prof. Dr. Dr. Jörg Hinrichs/N.N.
Industriegruppe(n):	Milchindustrie-Verband e.V. (MIV), Berlin
Projektkoordinator:	Dr. Christian Trgo J. Bauer GmbH & Co. KG, Wasserburg/Inn
Laufzeit:	2023 – 2026
Zuwendungssumme:	€ 501.453,--

Ausgangssituation

Viele Unternehmen der Lebensmittelindustrie sehen in der Digitalisierung eine große Chance und ein wesentliches Element für eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung. Zukünftig werden verstärkt Szenarien in den unternehmerischen Fokus rücken, die eine Digitalisierung voraussetzen, z. B. eine flexible Auftragsfertigung in Echtzeit oder die Herstellung individualisierter Lebensmittel. Für diese Prozesse werden u. a. Analysen der Produktionslinien benötigt, idealerweise in Echtzeit, damit Änderungen bei Rohstoffen und Zutaten und/oder den Prozessparametern unmittelbar nachvollzogen werden können. Technologien, wie eine Big-Data-Analyse durch maschinelles Lernen, intelligente Sensorik und Internet der Dinge (IoT), werden in anderen Industriebereichen bereits erfolgreich eingesetzt und haben ebenfalls Anwendungspotenzial in der Lebensmittelverarbeitung, z. B. zur Erkennung kritischer Zustände, zur Prognose von Qualitätsparametern oder zur Optimierung von Prozessen.

Ziel des Forschungsvorhabens in Hinblick auf die Integration von Datenanalyse-Verfahren des maschinellen Lernens zur Optimierung von Lebensmittelverarbeitungsprozessen war es, die Potenziale dieser neuen Technologien zu untersuchen. Da die Verarbeitungsprozesse von Lebensmitteln häufig sehr komplex sind und meist zahlreiche Prozessschritte umfassen, die wiederum von Unternehmen zu Unternehmen variieren, fokussierte das Vorhaben auf zwei ausgewählte Beispiele, nämlich a) die Herstellung eines fermentierten Milchprodukts – Frischkäse und b) die Herstellung eines haltbaren Produkts – (High-Protein) Pudding. Bei beiden Beispielen wurde Fouling als Prozessanomalie untersucht.

Forschungsergebnis

Für fermentierte Milchprodukte ist nicht nur der Milchrohstoff mit seinen jahreszeitlichen Schwankungen bzgl. seiner Zusammensetzung, sondern auch die Zusammensetzung der Starterkulturen und Zutaten, wie z. B. der Fruchtzubereitungen, Gewürze und Stabilisatoren während der Be- und Verarbeitung, bedeutsam. Darüber hinaus determinieren die Abfolge der Prozessschritte und die gewählten Prozessparameter die technofunktionellen Eigenschaften, wie z. B. Fließverhalten, Partikelgröße und Voluminosität der fermentierten Matrix, welche wiederum mit den sensorischen Eigenschaften, wie z. B. der Cremigkeit, korrelieren. In Unternehmen werden physikalische Produktdaten bisher selten systematisch erhoben, obwohl diese in Ergänzung zu chemischen Markern geeignet wären, um die Endprodukte analytisch zu differenzieren und mögliche Qualitätsabweichungen zu prognostizieren. Beim zweiten Beispiel (High-Protein Pudding) ist das Processing im Vergleich zum fermentierten Produkt zwar weniger komplex, allerdings ist für das Erhitzen, das die lange Haltbarkeit garantiert, aufgrund der hohen Temperaturen eine maßgeschneiderte Prozessführung anhand der Inhaltsstoffe nötig, um möglichst lange Produktionszeit zu ermöglichen.

In der Praxis werden u. a. White-box-Ansätze angewendet, die eine phänomenologische Modellierung, z. B. von physikalischen oder experimentell ermittelten Zusammenhängen, bieten. Die prinzipiellen Zusammenhänge von Produkteigenschaften und Prozessschritten können damit zwar gut beschrieben werden, schließen aber Abstraktionen ein. Black-Box-Methoden beruhen auf einer rein Daten-basierten Modellidentifikation mittels maschinellen Lernens (ML), jedoch sind die resultierenden Prognosemodelle produktspezifisch und damit beschränkt übertragbar; zudem fehlt in vielen Unternehmen Personal mit IT-Kompetenzen, um solche Verfahren anwenden zu können. Deshalb haben sich beide Forschungseinrichtungen zusammen damit beschäftigt, wie ein *Predictive Digital Dairy Twin* konzipiert werden kann, der *Erklärbare Künstliche Intelligenz* (Explainable Artificial Intelligence, XAI) und hybride Grey-box Modelle vereint (Jox et al. 2024).

Im Rahmen des Projekts wurden die Anforderungen herausgearbeitet, welche und wie existierenden Datenquellen in Produktionslinien für eine Datenanalyse genutzt sowie kombiniert werden können. Dabei wurden sowohl Ansätze verwendet, die Vorhersagen für den Gesamtprozess, wie auch zeitaufgelöst über die jeweilige Produktionszeit treffen. Beide Ansätze wurden auf beide Produktdatensätze angewendet. Beispielsweise konnte bei der (High-Protein) Pudding Produktion Fouling anhand von Fouling Indikatoren mittels einem Long Short-Term Memory (Deep Learning ML Modell) für 30 min mit einem quadratischen Mittelwertfehler (engl. RMSE) von 0,23 K (logarithmische Temperaturdifferenz) und 26 kPa (Druckabfall) prognostiziert werden. Zudem wurden XAI-Ansätze angewendet, um die Vorhersagen hinsichtlich Zeit und wichtigen Parametern zu untersuchen. Beispielsweise zeigten die letzten Minuten vor der Prognose Relevanz für das Vorhersageergebnis.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Ergebnisse des Vorhabens sind insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) von wirtschaftlicher Bedeutung. Die deutsche Milchindustrie ist mittelständisch strukturiert und verzeichnet mit über 43.000 Beschäftigten einen Jahresumsatz von ca. 40,6 Mrd. € (Stand 2024/2025). Mit dem im Rahmen des Projektes entwickelten Prozessmodellen und Analyseansätze können spezifische Daten, wie Informationen über die Rohstoff- und Produktcharakteristika (chemisch, physikalisch), die im Labor ermittelt werden, mit kontinuierlichen Prozess(sensor)daten kombiniert werden, um frühzeitig Prozessabweichungen zu erkennen. Somit konnte das Projekt methodisch aufzeigen, wie bisher ungenutzte Sensordaten für das proaktive Erkennen von kritischen Prozesszuständen verknüpft und nutzbar gemacht werden können.

KMU des Anlagenbaus und Softwarehersteller können die erarbeitete Methodik des maschinellen Lernens für die Prognose von Prozessabweichungen zu Anwenderprodukten weiterentwickeln. KMU der Milchindustrie können dann sekundär, ohne spezialisierte und i. d. R. teure Datenanalysten zu beschäftigen, durch die Verwendung der Anwenderprodukte profitieren und damit perspektivisch ihre Prozesse prognostizieren und z. B. Reinigungsstartzeitpunkte angepasst vorhersagen. Durch den Einsatz der im Rahmen des Projektes entwickelten Datenanalysen können die Nachhaltigkeit von Prozessen gesteigert und Kosten durch Prozessabweichungen minimiert werden.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2026.
2. Jox, D., Borsum, C., Hummel, D., Hinrichs, J. & Krupitzer, C.: Enhancing dairy processing with machine learning and domain knowledge: A combined analysis of offline and time series data. J. Food Eng. 391, 112423 (2025).
3. Yazgan, N. N., Hummel, D., Hinrichs, J. & Hitzmann, B.: Raman spectroscopy as a tool for inline quality management in food processing. *Raman Spectroscopy in the Food Industry*, Hrsg.: Uğur TAMER, Mustafa ÇULHA und İsmail H. BOYACI, Boca Raton, FL: CRC Press, S. 205-229, ISBN 9781003359975 (2024).
4. Jox, D., Hummel, D., Hinrichs, J. & Krupitzer, C.: A Conceptual Framework for Predictive Digital Dairy Twins: Integrating Explainable AI and Hybrid Modeling. Proceedings of the 10th International Food Operations and Processing Simulation Workshop, FoodOPS (2024).

Der Schlussbericht ist für die interessierte Öffentlichkeit bei den Forschungseinrichtungen abzurufen.

Weiteres Informationsmaterial

Universität Hohenheim
Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie
FG Lebensmittelinformatik
Fruwirthstraße 21, 70599 Stuttgart
Tel.: +49 711 459-23664
Fax: +49 711 459-22298
E-Mail: christian.krupitzer@uni-hohenheim.de

Universität Hohenheim
Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie
FG Milchwissenschaft und -technologie
Garbenstraße 21, 70599 Stuttgart
Tel.: +49 711 459-23792
Fax: +49 711 459-23617
E-Mail: j.hinrichs@uni-hohenheim.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

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben **01IF22840N** der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bildnachweis - Seite 1: © Universität Hohenheim / Max Kovalenko

Stand: 17. November 2026