

Precision Dough Production - Entwicklung eines Digitalen Zwillings zur Optimierung von Verarbeitungsprozessen für Weizenmehle



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/Dr. Thekla Alpers/Dominik Ulrich Geier
Industriegruppe(n):	VDMA-Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen e. V., Frankfurt a.M. Weihenstephaner Förderverein für Brau-, Getränke- und Getreideforschung e.V., Freising
Projektkoordinator:	Dr. Helge Nelson, Miele & Cie. KG, Oelde
Laufzeit:	2026 – 2029
Zuwendungssumme:	€ 274.599,--

Forschungsziel

Legislative und klimatische Veränderungen stellen die Backwarenindustrie aktuell vor vielfältige Herausforderungen, da sich eine zunehmende Anzahl an externen Faktoren auf die Weizenmehlqualität auswirken. So sinkt der Protein- und damit der Feuchtklebergehalt des Weizens durch die restriktive Novellierung der Düngeverordnung (Dünge-VO), wodurch die Teigmatrix und folglich die Gashaltbarkeit der Teige geschwächt werden. Dies führt zu Einbußen im Gebäckvolumen und festeren Brotkrumen. Zudem wirken sich klimatische Veränderungen und Wettersituationen auf die inhaltsstoffliche Zusammensetzung von Weizen und den daraus hergestellten Mehlen aus: im Erntejahr 2023 resultierte dies in stark inhomogenen Rohstoffqualitäten, wobei insbesondere die Höhe der amylolytischen Aktivität (Fallzahl) stark vom Erntezeitpunkt und der Anbauregion abhing. Um den Herausforderungen variierender Rohstoffqualitäten in den nachfolgenden Verarbeitungsprozessen zu begegnen, wird überwiegend auf erfahrungsbasierte Lösungsansätze von Fachkräften zurückgegriffen. Mithilfe von Trial-and-Error werden so Rezepturen und einzelne Prozessschritte erfahrungsbasiert den abweichenden Rohstoffqualitäten angepasst.

Angeichts des zunehmenden Drucks zur Steigerung der Ressourceneffizienz sowie des gleichzeitigen Fachkräftemangels gewinnen Digitalisierungskonzepte wie Digitale Zwillinge (*Digital Twins*, DTs) zunehmend an Bedeutung. Studien zeigten, dass der Einsatz von DTs in der Lebensmittelindustrie bereits in einzelnen Applikationen verbreitet ist. Ein DT ist dabei ein virtuelles Modell eines realen Objekts, Prozesses oder Systems und nutzt Daten von Sensoren und anderen Quellen, um das Verhalten und die Leistung des realen Gegenstücks abzubilden und zu überwachen. Folglich nutzen DTs Prozessmodelle, um das Verhalten des physischen Systems präzise abzubilden, indem sie Abläufe und Funktionen innerhalb eines Prozesses mathematisch darstellen. DTs verwenden diese Modelle, um Echtzeitdaten zu interpretieren, Vorhersagen zu treffen und Optimierungen

vorzunehmen, wodurch eine effektive, effiziente und automatische Steuerung ermöglicht wird. Gerade im Bereich der Backwaren wird das Potenzial zur Prozessoptimierung mittels DTs bisher nicht ausgeschöpft, denn der Fokus liegt auf der Überwachung und Kontrolle einzelner Prozessschritte, die zudem größtenteils auf den Primärsektor abzielen. Die isolierte Nutzung von Prozessmodellen ist bei mehrstufigen Verarbeitungsprozessen jedoch nicht zielführend, da Interdependenzen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Stellgrößen bestehen. Deshalb schlägt dieses Forschungsvorhaben ein Konzept für einen Digitalen Zwilling für die Teigbereitung und -verarbeitung vor, das die Prozessmodelle der einzelnen Verarbeitungsschritte mit der Rezeptur verknüpft und somit eine ganzheitliche Prozessüberwachung und -kontrolle ermöglicht.

Ziel ist es, auf Variationen im Weizenmehl (Proteingehalt und -qualität und α -amylolytische Aktivität) durch aufeinander abgestimmte rezeptur- und prozessseitige Anpassung so reagieren zu können, dass konstant Backwaren von hoher Qualität hergestellt werden. Dies wird durch die Entwicklung eines DT mit interkorrelierten Prozessmodellen umgesetzt, welcher sich von der Rohstoffcharakterisierung über den Knetprozess bis zur Gare erstreckt. Dieser Ansatz wird aufgrund der Komplexität der Teigherstellung und -verarbeitung nicht als Kombination bestehender Prozessmodelle, sondern durch Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) umgesetzt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll dies exemplarisch für den Teigherstellungs- und -verarbeitungsprozess von Toastbrot umgesetzt werden, da dieser auf einer direkten Führung beruht. Durch die DT-basierte Anpassung von Verarbeitungsprozessen in Abhängigkeit der Rohstoffqualität und des Prozessverhaltens wird ein höherer Automatisierungsgrad ermöglicht. Damit soll die Grundlage für einen ressourceneffizienteren Herstellungsprozess geschaffen werden sowie den Forderungen der Backbranche nach Lösungen für immer herausfordernder werdenden Inhomogenitäten im Rohmaterial bei gleichzeitiger Abnahme der Verfügbarkeit von Fachkräften begegnet werden.

Durch den Einsatz von Machine Learning (ML)-Modellen wie *Variational Autoencoder Generative Adversarial Network* (VAE-GAN) wird erreicht, dass das Potenzial der einzelnen Verfahrensschritte in Abhängigkeit von der Rezeptur besser ausgeschöpft und folglich die gewünschte Qualität auch bei schwankenden Rohstoffqualitäten kontinuierlich verbessert wird. Das Forschungsvorhaben adressiert folgende Arbeitshypothesen: 1. Prozess- und Rezepturparameter kompensieren Variabilität von Weizenmehl im Rahmen der Möglichkeiten, 2. ML-Modelle ermöglichen präzise Vorhersagen und Handlungsempfehlungen, 3. Der Digitale Zwilling ist auf weitere Prozessschritte übertragbar.

Wirtschaftliche Bedeutung

Weizen stellt mit einer Ernte von 18,0 Mio. t knapp 50% der deutschen Getreideernte dar. Davon werden rund 7,65 Mio. t Weichweizen jährlich in deutschen Mühlen zu Weizenmehl vermahlen. In der Wertschöpfungskette vom Weizenkorn zur Backware kommt Mühlen ein besonders tragender Beitrag zu. Eine wesentliche Aufgabe der Mühlen ist es, eine gleichbleibende Qualität des Weizenmehls durch Mischen verschiedener Rohstoffe und Passagen zu erzielen. Weiterverarbeitende Betriebe sind auf diese Standardisierung angewiesen, um umfassende Prozessoptimierungen zwischen einzelnen Chargen möglichst zu vermeiden. Allerdings unterliegt die Weizenqualität in den letzten Jahren einer steigenden Zahl an Herausforderungen. So ist der Feuchtklebergehalt in Folge der 2019 verabschiedeten Novellierung der Düng-VO rückläufig. Zudem führen durchwachsene Vegetationsbedingungen und wetterbedingte Einflüsse zu Limitierungen im Hinblick auf die erzielbare Mehqualität. Insbesondere im Erntejahr 2023 variierten Mehqualitäten in Abhängigkeit des Erntezeitpunkts stark. Eine weitreichende Anpassung der nachgeschalteten Verarbeitungsprozesse wurde dadurch unabdingbar. Eine entscheidende Rolle tragen dabei Fachkräfte. Das backwarenproduzierende Gewerbe stellt mit rund 30% der Arbeitnehmenden den größten Anteil in der Lebensmittelindustrie. Der damit verbundene hohe Bedarf an Fachkräften stellt die Branche seit Jahren vor Herausforderungen, da die Zahlen der Lehrlinge (Bäcker/in) in den vergangenen 10 Jahren um fast 50% gesunken sind. Durch den steigenden Bedarf an Fachwissen bei gleichzeitig abnehmender Verfügbarkeit steigt der Druck zur Etablierung alternativer Lösungsansätze.

Automatisierungslösungen stellen eine Mitigationsmaßnahme für diese Herausforderung dar. Als ein Ansatz erweisen sich Digitale Zwillinge, welche datenbasierte Prognosen von Prozessverläufen liefern können und

Unregelmäßigkeiten in Prozessen identifizieren und durch Änderungsempfehlungen vermeiden können. Während DTs zur Prozessüberwachung oder -kontrolle im Primärsektor bereits angewandt werden, ist der weitverbreitete Einsatz in weiterverarbeitenden Prozessen bisher nicht etabliert. Doch insbesondere bei mehrstufigen Verarbeitungsprozessen, wie die Backwarenherstellung, kommen herkömmliche Prozessmodelle, welche einzelne Verarbeitungsschritte modellieren, aufgrund von Interdependenzen und Wechselwirkungen zwischen den Prozessschritten an ihre Grenzen. Erst durch eine ganzheitliche Prozessüberwachung und -kontrolle können diese Limitierungen überwunden werden. Die Entwicklung eines DT mit interkorrelierten Prozessmodellen würde die stark mittelständisch geprägte Backbranche (ca. 10.000 Betriebe in Deutschland mit 25,4 Mitarbeitern/Betrieb) in Zeiten des Fachkräftemangels stützen. Der DT ist eine dynamische Lösung, die Maschinen, Rezepturen und Rohstoffqualitäten samt Wechselwirkungen systematisch modelliert. Daher können industrielle Betriebe einen solchen DT in ihr Automatisierungskonzept implementieren. Handwerklich produzierende Betriebe weisen meist einen geringeren Automatisierungsgrad auf, können jedoch DT-generierte Handlungsempfehlungen manuell umsetzen, um inhomogene Mehlqualitäten ressourceneffizient zu verarbeiten.

Das Potential für eine Implementierung der Forschungsergebnisse wird in der Backbranche als hoch angesehen. Die Backbranche verzeichnet mit einer Investitionsquote von 4,0% eine überdurchschnittlich zu bewertende Investitionsintensität. Somit besteht eine hohe Bereitschaft der Branche, zukunftssträchtige Technologien zu implementieren. Davon profitiert auch der mittelständisch stark aufgestellte Maschinenbau in Deutschland. So wurde im Jahr 2023 im Vergleich zum Vorjahr ein Zuwachs von 11% an inländischen Aufträgen für Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen verzeichnete. Zu dem potenziellen Nutzerkreis zählen folglich Maschinenbauer, Hersteller von Automatisierungs- und Digitalisierungstechnik sowie backwarenproduzierende Betriebe selbst. Darüber hinaus besteht ein Translationspotential der angedachten Methoden in die liefernden Branchen.

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:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

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: © AdobeStock_235604159

Stand: 30. September 2026