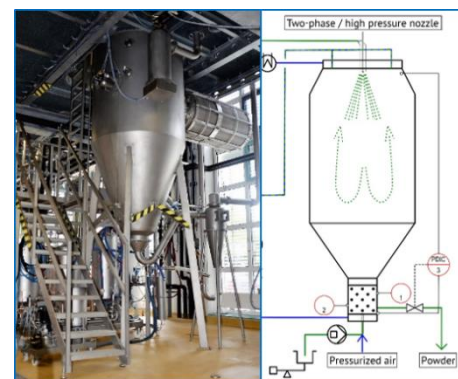


Konzeption, Entwicklung, Validierung hybrider Digitaler Zwillinge für den Sprühtrocknungsprozess mittels erklärbarer künstlicher Intelligenz: Scale-up und Produktvariation



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungseinrichtung(en):	Universität Hohenheim Institut für FG Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, FG Lebensmittelverfahrenstechnik und Pulvertechnologie Prof. Dr. R. Kohlhus Universität Hohenheim Institut für FG Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, FG Lebensmittelinformatik Jun.-Prof. Dr. C. Krupitzer
Industriegruppe(n):	Milchindustrie-Verband e.V. (MIV), Berlin
Projektkoordinator:	Dr. Jakob Fröhlich Alpavit Käserei Champignon Hofmeister GmbH & Co. KG, Lauben/Allgäu
Laufzeit:	2025 – 2027
Zuwendungssumme:	€ 524.948,--

Forschungsziel

Die Prozessführung eines Sprühtrockners ist grundsätzlich unkritisch, da es nur wenige, aber hinreichend viele einstellbare Prozessparameter gibt. Im Widerspruch dazu stellt sich in der konkreten Durchführung der Sprühtrocknung die Prozessführung als überaus schwierig dar. Ursächlich ist dies auf das nicht-ideale Trocknungsverhalten der zu trocknenden Produkte und auf das dynamische Verhalten des Sprühtrockners zurückzuführen. Dadurch ergibt sich als relevante wissenschaftliche Problemstellung die Identifikation der idealen Prozessführung für das jeweilige Produkt bei gegebenem Sprühtrockner. Der Start-up von Neuanlagen für die Sprühtrocknung, die Prozessoptimierung für neue Produkte und das Scale up bzw. Scale through zwischen Anlagen verschiedener Größen oder Typen (z.B. mehrstufige Trockner) sind aktuell äußerst aufwendige Aufgaben mit entsprechend langen Produktionsausfallzeiten. Das Systemverhalten des Sprühturms wird dabei weitgehend als Black-box aufgefasst. Änderungen in den Umgebungsbedingungen, insbesondere die Luftfeuchte, werden entsprechend nicht berücksichtigt, obwohl der Einfluss theoretisch weitgehend in der Anlage messtechnisch erfasst bzw. mittels Modellen erklärt werden kann. Ändern sich die Betriebsparameter, so ist das System ohne Eingriff durch den Operator nur sehr eingeschränkt dazu in der Lage darauf zu reagieren. Da bei so großen Systemen eine entsprechende Reaktionsverzögerung zu erwarten ist, kommen klassische regelungstechnische Konzepte hier ihre Grenzen. Aber auch neue datengetriebene Ansätze des maschinellen Lernens (ML) oder digitale Zwillinge, die ein Echtzeit-Abbild des Prozesses zur Kontrolle bzw. Optimierung des Prozesses bieten sollen, können das Problem nicht vollständig lösen, da nicht sämtliche relevanten Parameter mit entsprechender on-line Sensorik erfasst werden können.

Aktuell erfolgt diese Abbildung des Prozesses bei der Nutzung von Standardverfahren des ML mit einer universellen, d.h. nicht problemspezifischen mathematischen Modellierung. Die Schwäche dieses Ansatzes liegt darin, dass damit gut stabile System beschrieben werden können, sich verändernde Systeme aber nicht, da dies Extrapolationsfähigkeiten voraussetzt. Als Lösung bietet sich die hybride Kombination aus physikalisch-prozesstechnischer Modellierung und datenbasierter Bestimmung der Modellparameter an. Durch die physikalisch-ingenieurtechnische Modellierung ist der grundsätzliche Funktionsverlauf festgelegt und eine Extrapolation auf Basis der vorhandenen Daten und Nutzung von digitalen Zwillingen wird möglich.

Im Zentrum des Forschungsziels steht die Problematik des verfahrenstechnischen *Scale-ups* bzw. *Scale-throughs* bei der Sprühtrocknung inklusive Rezepturwechsel sowie die unverhältnismäßig langen Inbetriebnahmephasen. Mit Hilfe von ML-Ansätzen soll eine Systematik entwickelt werden, die ein „first time right“ für die genannten Aufgaben ermöglicht, d.h. bereits initial wird auf Basis des digitalen Zwillings eine spezifisch optimierte Konfiguration vorgeschlagen. Einfachere Fragestellungen, wie die der Kompensation für Schwankungen in der Luftfeuchte, sind dabei eingeschlossen. Für das Konzept wird zuverlässige on-line Messtechnik benötigt, um die Daten-getriebenen ML-Algorithmen zu nutzen. Die dazu relevante Messtechnik soll ebenfalls in dem Projekt validiert werden. Interessant ist dabei die Möglichkeit, zusätzliche Informationen über Soft-sensoren aus den bekannten Modellen der Prozesse in die ML-Algorithmen zu integrieren.

Vorgehen: Der Lösungsweg fußt auf der zentralen Arbeitshypothese, dass ein hybrider digitaler Zwilling als Kombination aus physikalischer Modellierung und einer Parametrisierung mittels ML-Methoden das Systemverhalten eines Sprühturmes beschreiben kann. Ein solches System würde sich dann im Laufe des Betriebes immer weiter verbessern und die Produktionsläufe auch als Optimierungsversuche nutzen. Klassische Ansätze für digitale Zwillinge wären mit zwei zentralen Problemen konfrontiert. Zum einen ist mit diesen Systemen eine Extrapolation auf neue Betriebszustände nicht möglich, da diese Systeme sehr fokussiert sind auf eine spezielle Produktionsumgebung. Wir planen hier die Nutzung von Ansätzen des Transfer-Learnings, mithilfe dessen ein gelerntes ML-Modell angepasst werden kann auf neue Datenmuster. Zum anderen werden bei klassischen ML-Ansätzen nicht nur die systemspezifischen Daten erlernt bzw. angepasst, sondern auch die gesamte Systembeschreibung. Die entsprechend höhere Problemkomplexität gegenüber einer Parameterschätzung in einem physikalischen Modell resultiert bei gleicher Datenlage in geringerer Genauigkeit bzw. Robustheit des Modells.

Neuartigkeit: Aktuell gebräuchliche ML-Verfahren (v.a. aus dem Deep Learning) werden oft als Black Box Methoden angesehen, da diese sehr große Datenmengen verarbeiten können, aber komplexe, intransparente Modelle erzeugen, die Menschen nicht interpretieren können. Zudem fehlen, insbesondere in KMU, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit IT-Kompetenzen, um solche Verfahren anzuwenden, da die Algorithmen bisher individuell implementiert werden und die Ergebnisse in Form von ML-Modelle manuell analysiert werden durch Menschen. Firmen, die solche Methoden anbieten, arbeiten meist nicht Domänen- (bzw. Anwendungs)-fokussiert, sondern rein datengesteuert - die Deutung der gefundenen Korrelationen ist oftmals unklar. Der vorgeschlagene Ansatz vereint in den digitalen Zwillingen Black Box ML-Verfahren mit White Box Modellen der physikalischen Modellierung, die wiederum gezwungen sind, einzelne Aspekte aufgrund der Komplexität zu abstrahieren. Somit erreichen wir, auch durch Einsatz datengestützter Verfahren aus dem Bereich der erklärbaren Künstlichen Intelligenz (XAI), eine Interpretation der ML-Modelle. Letztlich kann das System durch den Digitalen Zwilling dann Empfehlungen anbieten, z.B. für Parameterkonfigurationen, die die Mitarbeitenden verstehen, evaluieren und umsetzen können. Mittels experimenteller Arbeiten werden wir nicht nur initial Daten generieren können, um den Digitalen Zwilling zu implementieren, sondern können später auch den Ansatz verifizieren.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Sprühtrocknung von Lebensmitteln, insbesondere von Milchpulvern und milchbasierten Systemen, wird in großem Umfang betrieben. Die Anforderungen an die Kosteneffizienz, gerade für kleinere Betriebe, hat sich durch die Energiepreisstegierungen nochmals verschärft. Ein schnellerer Start-up neuer Produkte und eine

verbesserte Produktionsweise würde hinsichtlich der Effizienz gerade bei schwierigen Produkten, also bei Produkten mit wenig Betriebserfahrung, einen wichtigen Betrag leisten und damit zur Konkurrenzfähigkeit kleinerer Betriebe beitragen. Dies gilt auch für die Produktionsausfallzeiten durch die Inbetriebnahme bei Neuinvestitionen. Die wirtschaftliche Bedeutung des Vorhabens ergibt sich somit zusammengefasst aus (i) dem sicheren Rezepturwechsel (insbesondere Lohntrockner d.h. meist KMU) und (ii) dem robusten Anlagenbetrieb (z.B. rH Schwankungen, Batch to Batch Variationen, Drift) bei (iii) effizientester Fahrweise (Energiekosten, Produktverluste) durch (iv) schnelleren Start-up von Neuanlagen, insbesondere bei der Feingutrückführung, also der Düsen-Zonen-Agglomeration.

Für die oben beschriebenen Aufgaben werden aktuell besonders qualifizierte Fachkräfte benötigt. Daher ist der vorherrschende Fachkräftemangel besonders für KMU ein Problem, da interne Schulungen und der Erfahrungsaustausch zwischen Standorten nicht umsetzbar sind. Ein hybrider Digitaler Zwilling hilft sowohl bei der Schulung neuer Fachkräfte als auch durch Verminderung des Bedarfes an Spezialisten durch Unterstützung bei Entscheidungen im Produktionslauf.

Das relevante Marktvolumen der Produkte und die wirtschaftliche Relevanz lässt sich aus dem Marktvolumen für Trockenmilcherzeugnisse abschätzen, das für die deutsche Milchwirtschaft in 2020 ca. 670 kt betrug. Der globale Markt für Milchpulver hat im Jahr 2022 einen Wert von 33,5 Mrd. USD überstiegen. Bis 2032 wird eine jährliche Wachstumsrate von 5,3% prognostiziert, u.a. gestützt durch einen wachsenden Markt für Säuglingsnahrung, die Nachfrage nach Produkten mit langer Haltbarkeit und hohem Nährwert sowie einen steigenden Verbrauch von verwandten Produkten wie Speiseeis und Backwaren. Zu erwarten ist, dass ein Teil dieser Produkte durch Milchalternativen auf Basis von Pflanzenproteinen ersetzt werden wird. Diese Milchalternativen sind inhärent problematisch zu trocknen und erfordern einen hohen Energieeinsatz aufgrund des geringeren maximalen Trockensubstanzgehaltes. Insbesondere könnte ein digitaler Zwilling aber auch die Initialisierung verbessern durch die Übertragbarkeit bestehender Einstellungen und das Erlernen der optimierten Parameter. KMU sind jedoch voraussichtlich nicht in der Lage, die dazu nötigen Entwicklungskosten zu tragen. Ein direkter wirtschaftlicher Nutzen ergibt sich durch höhere erzielte Durchsätze, bzw. bessere Nutzung der Trocknungskapazität. S. Wilkinson (Wilkinson, S.; 'Heat Processing and Energy Efficiency in Dairy Product Manufacture', SDT Spring Conference 2023), berichtet von einer möglichen Einsparung im Bereich von 0,5 bis 1 Million Euro pro Jahr. Der besondere Nutzen des Projektes für KMU ergibt sich durch das Produktportfolio von KMU. Diese sind in der Regel nicht auf wenige Massenprodukte, sondern auf eine Vielzahl von Spezialprodukten ausgerichtet. Bei diesen Produkten sind die relativen Kosten der Produktentwicklung und Prozessoptimierung besonders hoch. Eine konservative Produktionsweise dieser Produkte ist daher das typische Vorgehen, woraus sich ein entsprechender Optimierungsspielraum ergibt. Neben Produktionsbetrieben für sprühgetrocknete Produkte profitieren KMU der Spezialmesstechnik- und KI-Branche direkt von dem vorgeschlagenen Projekt.

Sowohl digitale Zwillinge als auch ML-Datenanalysen werden von Softwareunternehmen und Beratungsfirmen angeboten. Allerdings ist die Erklärung der Ergebnisse der oftmals Black Box ML-Algorithmen meist aufwendig und komplex. Zudem beschränken sich die Analysen von entsprechenden Firmen meist auf die Identifikation von Korrelationen, nicht auf die abgeleiteten Kausalitäten. Digitale Zwillinge sind spezialisiert und ohne spezifische IT-Kenntnisse nicht übertragbar, z.B. auf neue Produkte. Insbesondere sind diese Systeme meist geschlossen und nicht anpassbar. Mithilfe der Resultate dieses Projekts können die Unternehmen das Potenzial des Einsatzes von ML zur Analyse der Prozessdaten evaluieren. Dies bietet für KMU diverse konkrete Vorteile:

- Schnellerer Produktionsstart von Produkten durch sensitivitätsorientierte Anpassungen im Prozess, wobei auf Erkenntnisse aus historischen Daten und Erkenntnisse aus dem Technikum durch die KI zurückgegriffen werden kann.
- Übertragbarkeit von Referenzmessungen und -modellen durch Transfer Learning unterstützt beim Scale up und Scale-through.
- Varianzen/Anomalien in den Prozesseigenschaften können mithilfe des digitalen Zwillings identifiziert und über seine Erklärbarkeit die Fehleranalyse unterstützt werden.

Weiteres Informationsmaterial

Universität Hohenheim
Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie,
FG Lebensmittelverfahrenstechnik und Pulvertechnologie
Garbenstraße 25, 70599 Stuttgart
Tel.: +49 711 459-23258
Fax: +49 711 459-22298
E-Mail: r.kohlus@uni-hohenheim.de

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

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:



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: © Universität Hohenheim, Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie

Stand: 29. Oktober 2025