

Entwicklung einer intelligenten Gärsteuerung zur optimierten Herstellung von Teiglingen mittels digitaler Bildauswertung und erfahrungsbasierter Fuzzyregelung

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle I:	Technische Universität München Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie, Freising Prof. Dr. Thomas Becker/Dr. Mario Jekle
Forschungsstelle II:	Universität Hohenheim Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie FG Prozessanalytik und Getreidewissenschaft Prof. Dr. Bernd Hitzmann/Dipl.-LM-Ing. Florian Hecker
Industriegruppen:	Zentralverband des Deutschen Bäckerhandwerks e.V., Berlin Weihenstephaner Institut für Getreideforschung (WIG) e.V., Freising
	Projektkoordinator: Dr. Bernhard Noll Rapidojet GmbH, Michelbach a.d.Bilz
Laufzeit:	2014 – 2016
Zuwendungssumme:	€ 416.250,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

Ausgangssituation:

Der Prozessschritt des Gärens ist einer der wichtigsten qualitätsbeeinflussenden Parameter in der Backwarenherstellung. Da es sich beim Gären von Teiglingen um einen fermentativen Vorgang handelt, bei dem die dem Teig zugegebene Bäckerhefe (*Saccharomyces cerevisiae*) vorhandene niedermolekulare Kohlenhydrate zu CO₂, Ethanol und zahlreichen Nebenprodukten verstoffwechselt, haben die Betriebsparameter einen direkten Einfluss auf die sensorische Qualität der fertigen Backwaren. Bei diesen Parametern, die standardmäßig beim Gären gesteuert werden, handelt es sich um die Temperatur, die relative Luftfeuchte, die Luftgeschwindigkeit und die Gärzeit. Ein optimaler Reifegrad vor dem Backen, der zum einen eine ausreichende Lockerung zum Erreichen der gewünschten Volumenausbildung und zum anderen eine gewisse Formstabilität des Teiglings zum Erreichen der gewünschten Gebäckform und -textur beinhaltet, ist Voraussetzung für ein optimales Endprodukt. Da sich diese Voraussetzungen jedoch nicht jederzeit

gewährleisten lassen - weder in der Produktionsstätte noch in der Filiale - werden immer wieder Teiglinge nach suboptimaler Gärung abgebacken und Backwaren produziert, die Hersteller- oder Verbrauchererwartungen nicht voll erfüllen.

Derzeit existiert kein Gärsystem, welches den Ist-Zustand der Teiglinge erfasst und überwacht, d. h. Form, Volumenentwicklung und Oberflächenbeschaffenheit detektiert und diese Informationen zur Regelung der relevanten Prozessparameter Temperatur, relative Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Gärzeit nutzt. Ein solches System wäre jedoch vor dem Hintergrund der Entwicklung der Backbranche hin zu Filialbetrieben und dem damit einhergehenden rückläufigen Einsatz von erfahrenem und gut ausgebildetem Fachpersonal bezüglich einer ökonomischen und qualitätsoptimierten Produktion überaus hilfreich. Die Entwicklung eines entsprechenden situativen Prozessführungssystems könnte auftretende Rohstoff- und Prozessvariationen in der Produktionsstätte wie auch in Filialen durch eine adaptierte Tempera-

tur-/Feuchte- und Zeitführung kontinuierlich ausgleichen und die Ausschussmenge bzw. die Menge an qualitätsgeminderter Ware deutlich reduzieren.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines optischen Messsystems und eines darauf aufbauenden fuzzy-basierten Regelungssystems für den Gärprozess, das trotz schwankender Rohstoff- und Verarbeitungsqualitäten und Fehlbedienungen in der Lage sein soll, in Abhängigkeit vom aktuellen Teiglingzustand und seiner Entwicklung automatisch einen Reifegrad der Teiglinge am Ende des Gärprozesses zu garantieren, der zu einer qualitativ hochwertigen Backware führt.

Forschungsergebnis:

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein optisches Messsystem und ein darauf aufbauendes fuzzy-basiertes Regelungssystem für den Gärprozess entwickelt. Zunächst erfolgte die Integration des optischen Messsystems, bestehend aus Kamera, Beleuchtung und Bewegungssteuerung, sowie der kombinierten T-/rF-Sensoren in die Gärschränke. Für die unterschiedlichen Produkte (Baguette, Brötchen, Weizenbrot) wurden die Standardrezepturen, Standardprozessparameter und Analysemethoden zur Bewertung der Produktqualität festgelegt. Anhand dieser Standardprodukte wurden die Bildverarbeitungsroutinen an die Gegebenheiten des Gärschranks erweitert. Dabei wurden die Algorithmen auf die besonderen Anforderungen während der Gare angepasst, um robuste Ergebnisse zu erzielen. Per Bildverarbeitung wurde eine einfache und schnelle Segmentierung der Teiglinge ermöglicht. Hierfür wurden Farbhistogramme ermittelt und somit Schwellwerte (Threshold) bestimmt, welche die Backwaren vom Hintergrund segmentierten. Anschließend wurden die erkannten Objekte markiert und für jedes Objekt die Lage relativ zur Kameraposition „per Moments of Inertia“ ermittelt. Mit diesen Informationen und den Flächenschwerpunkten konnte mittels kleinster und größter Objektachse die räumliche Dimension des Objektes bestimmt werden. Weiterhin wurden anhand dieser Informationen die Wachstumskinetik bestimmt und zusätzlich über photogrammetrische Ansätze eine dreidimensionale Punktwolke erstellt, die für eine Volumenbestimmung eingesetzt wurde. Mit diesem optischen Messsystem wurden Bilder-

serien der Teiglingsreifung als Funktion der Zeit, der relativen Luftfeuchte und der Temperatur aufgenommen. Die Fermentationsparameter wurden nach einem Central Composite Design ($2^{(5-1)} + \text{star}$) variiert, um den Einfluss der Gärführung auf die Entwicklungskurven der Teiglinge und die spätere Produktqualität greifbar zu machen sowie die Veränderungen der optischen Eingangsgrößen (Oberfläche, Farbe, Volumen, Höhe/Breite und deren zeitliche Änderung) zu erfassen.

Zusätzlich wurde ein neuer Analysenansatz von Forschungsstelle 1 entwickelt. Mittels „hochaufgelösten Backversuchen“ wurde ebenfalls der Einfluss der Prozessparameter auf den genauen zeitlichen Verlauf der Teiglingsreifung erfasst. Die so gewonnenen Erkenntnisse zu den Zusammenhängen zwischen Prozessparametern, optischen Eingangsgrößen und Produktqualität wurden zum Aufbau des Regelsystems genutzt. Dafür wurde anhand der gewonnenen Daten die Wissensgrundlage für das Fuzzy-System erstellt. Die Fuzzy-Sets wurden implementiert sowie ein Modell zur Schätzung der Wachstumskinetik erarbeitet. Durch die vorherigen Arbeitspakete ergab sich die Erkenntnis, dass die Wachstumskinetik der Parameter mit der höchsten Wertigkeit zur Einschätzung der Teiglingsreife ist. Die zuvor entwickelte Algorithmik zur Erfassung der optischen Eingangsgrößen wurde optimiert und an neue Erkenntnisse aus der Projektarbeit angepasst. Es wurden weitere Segmentierungsmethoden getestet sowie Kameraeinstellungen erneut vorgenommen und der Ansatz der Bildregistrierung implementiert. Damit konnten die Methoden zur Erkennung der Teiglinge verbessert und somit die Evaluierung der Produktparameter von individuellen Teiglingen ergänzt werden.

Das von Forschungsstelle 2 entwickelte Blasenwachstumsmodell ermöglicht neue Einblicke in die Wachstumskinetik von Gasblasen in Abhängigkeit ihrer Initialgröße in Hefeteigen. Darüber hinaus dient dieses Modell zur Vorhersage der Volumenentwicklung von Teiglingen. Hierbei wurde eine hohe Vorhersagegüte erreicht, die das relative Volumen von Teiglingen nach 330 s mit einem Fehler von nur 2,3 %, nach 600 s sogar nur mit einem Fehler von 0,8 % vorhersagen kann.

Im weiteren Vorgehen sollte die Implementierung der fuzzy-basierten Regelung in die Gär-

schränke erfolgen. Da eine direkte Steuerung der Gär-schränke nicht möglich bzw. umsetzbar war, konnte die Implementierung nur in Ansätzen evaluiert werden. Zum einem wurde ein Regelkonzept erstellt und simuliert, um die Regelfähigkeit zu bewerten. Zum anderen wurden Produkt- und Prozessparameter in Echtzeit mittels Sensoren und Kamertechnik ermittelt und per Fuzzy-Steuerung ausgewertet. Die neuen Regelparameter mussten per Handsteuerung, d.h. mit einer Zeitverzögerung, den Gär-schränken vorgegeben werden. Abschließend wurden erneut Produktversuche durchgeführt, um die Konsistenz des konzipierten Fuzzy-Regelsystems zu evaluieren. Trotz der fehlenden Integration konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens wichtige wissenschaftliche Ergebnisse erzielt werden, die eine fundierte Grundlage bilden, um zukünftig autonom regelnde Gär-schränke realisieren zu können.

Wirtschaftliche Bedeutung:

Die Backbranche in Deutschland ist stark mittelständisch geprägt, ca. 14.200 handwerkliche Betriebe unterhalten ca. 30.000 eigene Filialen. Lediglich 0,31 % der Unternehmen verzeichnen einen Umsatz von mehr als 50 Mio. €. Mindestens 5 % der täglich hergestellten Brote und Brötchen entsprechen aufgrund fehlerhafter Gare nicht den erforderlichen Qualitätszielen. Bei einem durchschnittlichen Jahresumsatz an Brot und Brötchen in Höhe von 6,5 Mrd. € allein bei den deutschen Handwerksbäckern entspricht dies einem Umsatzvolumen (am Verkaufspreis gemessen) von etwa 325 Mio. €. Die tatsächlichen Kosten reduzieren sich auf ca. ein Viertel davon, da ein Teil reduziert veräußert wird bzw. ein großer Teil nachproduziert werden kann (80 Mio. €).

Das entwickelte System trägt dazu bei, die Herstellung fehlerhafter Produkte zu verringern und damit die Produktionskosten zu senken, insbesondere auch in Hinblick auf steigende Rohstoff-, Energie- und Entsorgungskosten. Das System garantiert eine bessere Produktqualität, da fehlendes Fachpersonal durch einen „virtual fermentation guide“ nahezu unabhängig von Produktionsort und -zeit ersetzt werden kann. Die Forschungsergebnisse können in Maschinen- und Messtechnikentwicklungen (Erweiterungsmodule für bestehende Anlagen oder Neukonzeptionen von Gäranlagen) einfließen. Hierdurch eröffnet sich insbesondere für KMU

aus dem Maschinen- und Anlagenbau die Möglichkeit, innovative Anlagen und Messtechniken auf den Markt zu bringen.

Weiteres Informationsmaterial:

1. FEI-Schlussbericht 2017.
2. Yousefi-Darani, A., Paquet-Durand, O., Zettel, V. und Hitzmann, B.: Closed loop control system for dough fermentation based on image processing. J. Food Pro. Eng. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12801> (2018).
3. Zettel, V., Paquet-Durand, O., Hecker, F. und Hitzmann, B.: Image analysis and mathematical modelling for the supervision of the dough fermentation process. AIP Conf. Proc. 1769, 180003, 1-6 (2016).
4. Zettel, V., Paquet-Durand, O., Hecker, F. und Hitzmann, B.: Reifeprüfung für Teiglinge. atp plus, Sonderausg. 1, 56-59 (2016).
5. Brandner, S., Jekle, M. und Becker, T.: Projekt – intelligente Gärsteuerung. Backtech. 4, 28 (2016).
6. Verheyen, C., Albrecht, A., Elgeti, D., Jekle, M. und Becker, T.: Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality. Food Res. Intern. 76 (3) 860-866 (2015).

Weiteres Informationsmaterial:

Technische Universität München
Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW
Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie
Weihenstephaner Steig 20, 85354 Freising
Tel.: +49 8161 71-3262
Fax: +49 8161 71-3883
E-Mail: tbecker@wzw.tum.de

Universität Hohenheim
Institut für Lebensmittelwissenschaft
und Biotechnologie
FG Prozessanalytik und Getreidewissenschaft
Garbenstraße 23, 70599 Stuttgart
Tel.: +49 711 459-23286
Fax: +49 711 459-23259
E-Mail: bernd.hitzmann@uni-hohenheim.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 9079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

... ein Projekt der **Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)**

gefördert durch/via



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn, wird/wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.