

Gestaltung der Eigenschaften expandierter stärkebasierter Produkte mittels Hochgeschwindigkeitsextrusion auf der Grundlage einer neuronumerischen Prozessführungsstrategie

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle I:	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik Bereich I: Lebensmittelverfahrenstechnik Prof. Dr. Heike P. Schuchmann/M.Sc. Azad Emin
Forschungsstelle II:	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik AG Angewandte Mechanik Prof. Dr. Norbert Willenbacher/Dr. Bernhard Hochstein
Forschungsstelle III:	Universität Erlangen-Nürnberg Department für Chemie- und Bioingenieurwesen Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Prof. Dr. Antonio Delgado/Dr. Cornelia Rauh
Industriegruppen:	VDMA Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen, Frankfurt Fachverband der Stärke-Industrie e.V., Berlin
	Projektkoordinator: Dr. Stefan F.M. Kaufmann Nestle Research Centre, Lausanne
Laufzeit:	2009 - 2012
Zuwendungssumme:	€ 892.850,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

Ausgangssituation:

Trotz intensiver Forschungsarbeiten seit den 1970er Jahren beruht die Entwicklung extrudierter Produkte auf Basis von Biopolymeren, wie Stärke oder Getreide, immer noch hauptsächlich auf empirischem Wissen und den Erfahrungen der Mitarbeiter. Produktveränderungen, die insbesondere durch das Expansionsverhalten der Produkte beeinflusst werden, lassen sich im Wesentlichen nur experimentell - i. d. R. a posteriori - bestimmen. Dies bindet in der Entwicklungsphase Ressourcen. Daher stößt die Lebensmittelwirtschaft auf hohe Schwierigkeiten bei der Einführung neuer Extrusionstechnologien aus anderen Branchen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Basis zu legen für die Einführung einer innovativen Ex-

trusionstechnologie aus der Kunststoffindustrie in die Lebensmittelbranche. Hierzu sollten disziplinübergreifende neuartige methodische Forschungsansätze genutzt werden: die mehrstufige Online-Rheometrie zur Ermittlung des viskoelastischen Stoffverhaltens als Basis zur besseren Beschreibung der Expansion und hybride wissensbasierte neuronumerische Prozessmanagementverfahren als Basis für die Modellierung, Diagnose und Prognose von Prozess- und Produktverhalten unter diesen neuen Randbedingungen. Diese Methoden liefern nicht nur Daten zur Mehrung des Wissens im Bereich der expandierenden Extrusion und erhöhen damit das Prozessverständnis, sondern reduzieren auch den Aufwand in der Prozess- und Produktentwicklung wesentlich und ermöglichen eine stabile Kosten sparende Prozessführung, was gerade kleinere Unternehmen bei der Einführung dieser

Technologie unterstützt und ihnen Wettbewerbsvorteile in einem globalisierten Markt sichern kann.

Das erste Hauptziel des Forschungsvorhabens bestand in einer experimentellen, aus Produktsicht modellhaften Beschreibung der Auswirkung technisch neu zugänglicher Extrusionsparameter (Hochgeschwindigkeitsextrusion, Drehzahlen bis zu 1.800 min^{-1}) auf die Expansion koextrudierter stärkebasierter Produkte und ausgewählter, durch die Expansion bedingter, konsumentenrelevanter Produkteigenschaften. Die dabei betriebene Sammlung von Informationen zum Produkt und Prozess diente zugleich der Realisierung des zweiten Hauptziels des Vorhabens, nämlich der Erarbeitung einer selbstlernenden, intelligenten Prozessführungsstrategie, die es ermöglichen sollte, Hochgeschwindigkeitsextrusionsprozesse kosteneffizient auszulegen und stabil zu führen sowie Produkte, auch aus neuen Rohstoffen, zielgerichtet zu entwickeln.

Forschungsergebnis:

Die experimentellen Daten wurden an einem Doppelschneckenextruder mit ebenfalls neu entwickeltem Inline-Rheometer gewonnen. Zu den ermittelten Messgrößen zählten u.a. die Molekülgrößenverteilung, die viskosen und elastischen Eigenschaften der stärkebasierten Schmelze sowie Produkteigenschaften, wie Expansionsindices und Porengrößenverteilung. Hierzu wurden erfolgreich neue Messmethoden entwickelt, die es ermöglichten, die Mechanismen der verschiedenen Expansionsphasen Blasenbildung, -wachstum und -schrumpfung separat zu untersuchen und ihre Auswirkungen auf die resultierende Porengrößenverteilung bestimmen zu können. Erstmals konnten mithilfe eines Inline-Rheometers und einer Offline-Druckmesszelle für ein Rotationsrheometer auch elastische Eigenschaften, wie Bagley-Druck und Relaxationszeiten, in einer Stärkeschmelze gemessen werden. Um den Einfluss der Rohstoffeigenschaften auf das Extrudierverhalten zu charakterisieren, wurden die Zusammensetzung, die thermischen Eigenschaften, die Molekülgrößenverteilung und Sorptionsisothermen gemessen. Auf der experimentellen Seite stehen nach Abschluss des Projekts über 150 vollständig miteinander vergleichbare Datensätze zur modellhaften Beschreibung des Einflusses der Hochgeschwindigkeitsextrusion auf die Expansion und die Produkteigenschaften zur Verfügung.

Die Prozessführungsstrategie basiert auf einem neuronumerischen Hybrid aus einem lernfähigen künstlichen neuronalen Netz (KNN) und einer numerischen Methode unter Nutzung experimenteller Daten zur Charakterisierung der Produkte (Struktur/ Eigenschaften) und des Prozesses.

Das KNN wurde einerseits mit den 150 experimentell ermittelten Datensätzen trainiert. Durch numerische Simulationen wurden zusätzlich messtechnisch nur unzulänglich zugängliche Daten zur räumlichen und zeitlichen Verteilung von Geschwindigkeiten, Spannungen und Temperaturen in ausgewählten düsen nahen, vollgefüllten Extruderbereichen gewonnen. Die neu entwickelte Prozessführungsstrategie wurde experimentell unter Bedingungen der Hochgeschwindigkeitsextrusion validiert und unter Ausnutzung der Lernfähigkeit optimiert. Die Hauptarbeiten dienten der Erstellung des Prozessführungssystems. Insbesondere erfolgte im Forschungsprojekt die Verfeinerung mathematischer Modelle und numerischer Simulationen im vollgefüllten Bereich des Extruders, in dem sowohl Fördererlemente als auch Knetelemente vorliegen. Nach der Entwicklung der komplexen Architektur des KNN konnten aus experimentellen und numerischen Daten sehr gute Vorhersagen mit Abweichungen $< 10 \%$ zu charakteristischen Produkt- und Prozessparametern getroffen werden.

Wirtschaftliche Bedeutung:

In Deutschland setzen rund 160 Unternehmen (davon ca. 80 % KMU) Extruder ein, wobei der jährliche Umsatz im Lebensmittelbereich von knapp 700 Mio. € (2002) auf ca. 1 Mrd. € (2007) stieg. Gerade für die Herstellung der für kleinere Unternehmen wichtigen innovativen Nischenprodukte, wie Produkte mit gesundheitlichem Zusatznutzen mit Umsatzsteigerungsraten im zweistelligen Prozentbereich, bietet sich die expandierende Koextrusion an, da die Produkte sich nicht nur durch einen Gesundheitseffekt, sondern auch durch eine konsumentengerechte Form („Convenience Food“) und einen hohen „Erlebnisgrad“ beim Konsum (interessante Texturen) hervorheben. Bei der Vermarktung von Extrudern oder extrudierten Produkten müssen sich KMU, die nicht wie große, international agierende Unternehmen von „Economies of Scale“ typischer Massenprodukte profitieren können, am globalisierten Markt absetzen. Dazu müssen sie auf schwankende Rohstoffpreise (wie beispielsweise um $> 80 \%$ zwischen 2007

und 2009) flexibel und schnell reagieren, alternative - z.B. faserreiche - Getreidesorten und/oder zusätzliche Ingredienzen, wie thermo-mechanisch sensible sekundäre Pflanzenstoffe, verarbeiten, und kostengünstigere Anlagen oder Herstellungsprozesse sowie neuartige Prozessführungsstrategien bzw. Regelungssysteme oder kundenangepasste Prozesslinien anbieten bzw. nutzen. Die zur Entwicklung dieser Konzepte und die Nutzung dafür zur Verfügung stehender neuer Technologien, wie der Hochgeschwindigkeitsextrusion oder neuronumerischer Methoden aus der Informationstechnik, erfordern einen enormen materiellen wie personellen Aufwand, den die R&D-Zentren multinationaler Lebensmittelkonzerne zurzeit in diese Entwicklungen stecken, von KMU aber nicht aufgebracht werden kann. Damit bleibt diesen der Zugang zu diesen neuen Technologien versperrt, was einen erheblichen Wettbewerbsnachteil darstellt. Branchenübergreifend können die Ergebnisse des Projekts auch im stark mittelständisch geprägten Bereich der Informationstechnik oder der Mess-, Regelungs- und Automatisierungstechnik genutzt werden, die bislang kaum Zugang zum Markt der Lebensmittelextrusion haben.

Die im Rahmen des Vorhabens erfolgte enge Zusammenarbeit mit einem Projektbegleitenden Ausschuss aus Vertretern des Anlagenbaus, der Produkthersteller, der Messtechnik und der IT-unterstützten Prozessregelung erhöht die Chancen auf eine zeitnahe Umsetzung der Projektergebnisse. Als Anwendungen stehen in Aussicht der erste Einsatz von Hochgeschwindigkeitsextrudern in der Lebensmittelherstellung sowie die Anwendung der neuen Prozessregelungsstrategie auch bei konventionellen Lebensmittelextrusionsprozessen. Die verbesserte Prozessführung kann auch zur Entwicklung von funktionellen Produkten beitragen, in denen das verbesserte Expansionsverständnis für anwendungsspezifische Rohstoffklassen ausgenutzt werden kann. Das innerhalb des Vorhabens ausgelegte und gebaute Online-Rheometer und die darauf basierende Prozessregelung verbleiben an Forschungsstelle 1 und stehen dort auch über das Projekt hinaus Firmen, die die neue Messtechnik zunächst erproben wollen, für Versuche mit speziellen Rohstoffen unter konventionellen Bedingungen und unter Hochgeschwindigkeits-Extrusionsbedingungen zur Verfügung. Die Nutzung des entwickelten neuronumerischen Hybrids als Prozessführungs- und Prozessregelungsinstrument wurde bereits während der Projektlaufzeit vorbereitet und kann nach Projektende in individueller Abstimmung mit An-

wendern erfolgen. Die neue Prozessführungsstrategie kann für einzelne Produkte ebenfalls an Forschungsstelle 1 getestet werden, um Vorteile aufzuzeigen und Berührungspunkte abzubauen.

Im Sinne der Vorwettbewerblichkeit wurde bewusst darauf verzichtet, ein Funktionsmuster der hybriden Prozessführung auf einer speziellen Produktionsanlage zu entwickeln. Im Vordergrund stand die Machbarkeitsstudie eines KNN für Extrusionsprozesse. Die Anpassung an bestimmte Produkte und Anlagen muss in folgenden, auf den Ergebnissen aufbauenden Arbeiten der Industrie geleistet werden.

Publikationen (Auswahl):

1. FEI Schlussbericht 2013.
2. Horvat, M., Guthausen, G., Tepper, P., Falco, L. und Schuchmann, H.P.: Non-destructive, quantitative characterization of extruded starch-based products by magnetic resonance imaging and X-ray microtomography. *J. Food Engin.* 124, 122-127 (2014).
3. Cubeddu, A., Rauh, C. und Delgado A.: 3D Thermo-Fluiddynamic Simulations of Extrusion of Starch Based Products. *Open J. Fluid Dynam.* 4, 103-114 (2014).
4. Cubeddu A., Rauh, C. und Delgado A.: Hybrid Artificial Neural Network for prediction and control of process variables in Food Extrusion. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 21, 142-150 (2014).
5. Horvat, M., Emin, M.A., Hochstein, B., Wiltenbacher, N. und Schuchmann, H.P.: Influence of medium-chain triglycerides on expansion and rheological properties of extruded corn starch. *Carbohydr. polym.* 93 (2), 492-498 (2013).
6. Horvat, M., Emin, M. A., Hochstein, B., Wiltenbacher, N. und Schuchmann H. P.: A multiple-step slit die rheometer for rheological characterization of extruded starch melts. *J. Food Engin.* 116 (2), 398-403 (2013).
7. Horvat, M., Ladiges, D. und Schuchmann, H.P.: Investigation of the nucleation during extrusion cooking of corn starch by a novel nucleation die. *Food Bioproc. Technol.* 7 (3), 654-660 (2013).
8. Horvat, M. und Schuchmann, H. P.: Investigation of Growth and Shrinkage Mechanisms in Vapor-Induced Expansion of Extrusion-Cooked Corn Grits. *Food Bioproc. Technol.* DOI: 10.1007/s11947-012-0977-4, ISSN 19355130 (2012).
9. Horvat, M., Hirth, M., Emin, M.A., Schuch-

mann, H.P., Hochstein, B. und Willenbacher, N.: Online-Rheologie zur Produktentwicklung extrudierter, funktioneller Zerealien. Chem. Ing. Tech. 81 (8), 1173 (2009).

Weiteres Informationsmaterial:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik
Bereich I: Lebensmittelverfahrenstechnik
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe
Tel.: +49 721 608-8797
Fax: +49 721 608-5967
E-Mail: heike.schuchmann@lvt.uni-karlsruhe.de

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und
Mechanik, AG Angewandte Mechanik
Gotthard-Franz-Straße 3, 76131 Karlsruhe
Tel.: +49 721 608-2661
Fax: +49 721 608-3758
E-Mail: norbert.willenbacher@mvm.uni-karlsruhe.de

Universität Erlangen-Nürnberg
Department für Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Cauerstrasse 4, 91058 Erlangen
Tel.: +49 9131 85-29500
Fax: +49 9131 85 29503
E-Mail: antonio.delgado@lstm.uni-erlangen.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079669-0
Fax: +49 228 3079699-9
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.