

## Modellbasierte Optimierungsstrategien zur automatisierten Hochdruckhaltbarmachung von Lebensmitteln am Beispiel von Fleischerzeugnissen

<b>Koordinierung:</b>	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
<b>Forschungsstelle I:</b>	Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik (DIL), Quakenbrück Dr. Volker Heinz/Prof. Dr. Stefan Töpfl
<b>Forschungsstelle II:</b>	Universität Erlangen-Nürnberg Department für Chemie- und Bioingenieurwesen Lehrstuhl für Strömungsmechanik Prof. Dr. Antonio Delgado/Dr. Cornelia Rauh
<b>Industriegruppen:</b>	Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM), Frankfurt VDMA Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen, Frankfurt Bundesverband der Deutschen Fleischwarenindustrie e.V. (BVDF), Bonn
	Projektkoordinator: Benjamin Forell, Gebrüder Abraham Schinken GmbH, Edewecht
<b>Laufzeit:</b>	2009 – 2011
<b>Zuwendungssumme:</b>	€ 598.550,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

### Ausgangssituation:

In Deutschland werden jährlich etwa 1,41 Mio. t Fleischwaren hergestellt, von denen der überwiegende Teil (0,98 Mio. t Koch- und Brühwürste) einer thermischen Behandlung ausgesetzt wird. Alternativ werden insbesondere bei Rohschinken und Rohpökelfleischwaren biochemische Verfahren zur Inaktivierung oder Hemmung produktschädlicher und pathogener Mikroorganismen eingesetzt. Mangels einer thermischen Haltbarmachung können in etwa 20 bis 60 % der Rohpökelfleischwaren auf dem Markt über die Rohware eingeschleppte Listerien nachgewiesen werden. Auch bei erhitzten Produkten können durch Rekontamination (Schneiden, Verpacken etc.) oder Mängel in der Prozessführung erhöhte Keimzahlen auftreten, in Untersuchungen wurden in Brühwürsten 10,5 % der Proben Listeria positiv bewertet.

Aufgrund steigender Anforderungen an die Lebensmittelsicherheit sowie der Verlängerung von Distributionswegen gewinnt die Anwendung hydrostatischen Hochdrucks als Entkeimungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Wesent-

liche verfahrenstechnische Vorteile stellen die schnelle und gleichmäßige Ausbreitung der Prozessgröße Druck sowie der geringe Energieverbrauch dar. Weltweit sind derzeit mehr als 120 Anlagen zur Behandlung von Konfitüren, Avocado-Püree, Reis und Muscheln sowie Fleischerzeugnissen im industriellen und damit wirtschaftlichen Einsatz.

Die beobachtete Abtötung von Mikroorganismen kann auf eine Veränderung metabolischer Vorgänge und auf eine Beeinträchtigung der Membranintegrität zurückgeführt werden. Während die chemische Struktur niedermolekularer Inhaltsstoffe (Vitamine, Farbstoffe, Aromen) weitgehend unbeeinflusst bleibt, treten bei höhermolekularen Substanzen mit bedeutendem Anteil ionischer und hydrophober Bindungen oder Wasserstoffbrückenbindungen strukturelle Änderungen auf. Diese können zu Produkten mit neuen Textureigenschaften führen, jedoch auch unerwünschte Veränderungen, wie Farb- und Texturänderungen oder Fettoxidationen, bewirken. Während des Druckaufbaus kann durch Dissipation der Volumenänderungsarbeit aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften (Kompres-

sibilität, spezifische Wärmekapazität) eine ungleichmäßige Erwärmung (ca. 3°C/100 MPa bei wässrigen Medien, 6,3°C/100 MPa bei Rinderfett) innerhalb des Behandlungsgutes auftreten. Das Temperaturfeld hängt zusätzlich von unvermeidbaren konvektiven und diffusiven Ausgleichsvorgängen ab. Im Labormaßstab können durch Wärmedämmung und/oder Beheizen der Behälterwand sowie des einströmenden Fluides annähernd homogene Bedingungen erzielt werden. Durch druckinduzierte Veränderungen des pH-Wertes weist auch dieser beim Vorliegen unterschiedlicher Materialien eine inhomogene Verteilung auf. Dies muss während der Prozessauslegung berücksichtigt werden, da neben Temperatur und Druck auch der pH-Wert die Kinetik von Inaktivierungsreaktionen bestimmt. Eine sichere, produktschonende und effiziente Haltbarmachung erfordert daher eine Erfassung der Behandlungsintensität und ihrer Verteilung in industriellen Hochdruckanlagen in Echtzeit.

Eine geeignete Online-Messtechnik, vor allem für die Prozessgröße Temperatur, steht derzeit nicht zur Verfügung. Sowohl Thermoelemente als auch Widerstandsthermometer weisen druckabhängige Abweichungen auf. Die notwendigen Kabeldurchführungen stellen einen mechanischen Schwachpunkt bei der Behälterauslegung dar. Eine drahtlose Übertragung mittels Funk ist aufgrund der Wandstärke der Behälterwand nicht möglich. Demzufolge liegen für die wirtschaftliche Produktion technische Systeme vor, die lediglich eine reine Zeitsteuerung bezogen auf den Druck realisieren. Bisher erfolgt die Ausschöpfung des Potentials der Technologie nur in sehr eingeschränktem Umfang, da neben hohen Investitionskosten Strategien zur Optimierung und Führung der Hochdruckprozesse unter automatisierten Bedingungen zur Erreichung einer homogenen Behandlung fehlen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, mittels modellbasierter Optimierungsstrategien die Grundlage zu erarbeiten für eine automatisierte Hochdruckhaltbarmachung von Lebensmitteln. Hierzu fanden methodische Hybride Einsatz, bei denen im synergetischen Sinne bilanzierende Modelle und Datenmodelle sowie numerische Simulation und kognitive Algorithmen zur Diagnose des Hochdruckbehandlungsprozesses und zur Prognose des Behandlungsergebnisses dienen. Die Durchführung erfolgte beispielhaft an Fleischprodukten, die erarbeiteten Erkenntnisse sind jedoch auch auf andere Lebensmittel übertragbar.

#### Forschungsergebnis:

Das Vorhaben wurde interdisziplinär durch zwei Forschungsstellen mit Expertise auf dem Gebiet der Lebensmitteltechnologie, Biothermofluid-dynamik, Sensorentwicklung, Steuerungs- und Regelungstechnik und hybriden Methoden bearbeitet. Als Beispielprozess diente die sichere, effiziente und im Vergleich zu konventionellen Verfahren wettbewerbsfähige Haltbarmachung von Fleischerzeugnissen mittels Druckapplikation.

Die Entwicklung von Online-Sensoren mit drahtloser Signalübertragung führte zur Verbesserung der Prozessbeobachtung. Durch die Entwicklung drucktauglicher In-situ-Temperatur- und pH-Sensoren zur Gewinnung der Prozessgrößen Temperatur und pH in Echtzeit konnte zusammen mit bereits existierenden Drucksensoren und der Entwicklung von Prozessführungsstrategien zu einer Reduzierung von sicherheitsbedingter Überprozessierung der Produkte, einem verringerten Zeitbedarf, einer erhöhten erreichbaren Produktivität sowie einer Reduktion des Energie- und des Ressourcenbedarfs beigetragen werden.

Der Entwurf von Optimierungs- und Prozessführungsmaßnahmen basierte auf der Erarbeitung von bilanzierenden Modellen zur Beschreibung des Massen-, Impuls- und Energietransports sowie von Datenmodellen des Verhaltens biochemischer und mikrobiologischer Reaktionen und des pH-Werts. Diese gingen in numerische Simulationen ein, die Auskunft über auftretende Inhomogenitäten geben. Hieraus leiten sich kritische Kontrollpunkte im Prozess sowie Orte zur Positionierung der Sensoren ab. Die numerischen Simulationen erlauben darüber hinaus die Erarbeitung und Bewertung potentieller struktureller und dynamischer Optimierungsstrategien.

Die erarbeiteten Maßnahmen zur strukturellen Optimierung der Produkt- und Prozesshomogenität umfassen Betrachtungen bezüglich der Behandlungskammer, der Pumpe, des Produktbeschickungskorbs, des Druckübertragungsmediums, der Geometrie und der Anordnung des verpackten Lebensmittels etc. Die dynamische Optimierung verwirklicht den Aufbau eines Regelkreises basierend auf Online-Temperaturmessung und fluiddynamischer Verdrängung des mit thermischen Heterogenitäten behafteten Druckmediums durch ein außerhalb der Druckkammer temperiertes Medium. Beide Maßnahmen reduzieren Prozessinhomogenitäten und erhöhen die Produktqualität und -sicherheit.

Die somit als Hybrid ausgestaltete Prozessführungsstrategie (Einsatz kognitiver Algorithmen) baut auf handelsüblichen Automatisierungsgeräten (SPS) auf, indem sie nicht nur eine Diagnose des aktuellen Prozesszustandes, sondern auch eine Prognose des Behandlungsergebnisses ermöglicht. Die entwickelte Online-Messtechnik erlaubt eine Vielzahl weiterer Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Anwendung der Hochdrucktechnologie. Neben der Prozesssteuerung lässt sich das Verhalten von technischen Komponenten unter Druck testen und kalibrieren. Es bestehen so z.B. auch Möglichkeiten Systeme, die im Tiefseebereich eingesetzt werden, zu entwickeln. Hierbei ist nicht nur die Datenaufzeichnung interessant, sondern vor allem die Möglichkeit der direkten Online-Überwachung.

#### Wirtschaftliche Bedeutung:

Die erarbeiteten Ergebnisse und Sensoren können sowohl in der Lebensmittelindustrie als auch im Maschinen- und Anlagenbau, in der Sensortechnik und in der chemischen Industrie Einsatz finden. Die wirtschaftliche Bedeutung liegt für den Maschinen- und Anlagenbau u.a. in der Schaffung neuer Geschäftsfelder durch Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten für eine Hochdruckbehandlung im Bereich der Lebensmittelverarbeitung. Die entwickelte Mess- und Prozessleittechnik ermöglicht in Kombination mit kinetischen Daten ein automatisiertes Betreiben einer Hochdruckanlage und eventuelle Anpassungen der Behandlungsbedingungen in Echtzeit. Die Forschungsergebnisse, die auch eine Bewertung unerwünschter Veränderungen beinhalten, stellen die Grundlage für eine breitere Anwendung dieser Technologie im Bereich der Lebensmittelverarbeitung, aber auch in anderen Bereichen dar. Durch Verbesserung der Behandlungshomogenität kann eine schonende Behandlung thermisch sensibler Produkte sowie eine hohe Produktsicherheit bei einer kombinierten Anwendung von Druck und Temperatur erreicht werden.

Vor dem Hintergrund hoher Investitionskosten ist insbesondere das Erzielen hoher Behandlungskapazitäten entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb. Durch eine Verkürzung der Zykluszeit ist eine Verringerung der Behandlungskosten möglich.

Gleichzeitig ermöglicht der Einsatz der Messsonde(n) die Protokollierung der Behandlungsparameter im Sinne eines HACCP-Konzeptes und damit eine Absicherung der Lebensmittelhersteller in Bezug auf Produkthaftung und Rückverfolgbarkeit. Darüber hinaus werden die Exportchancen für Nischen- und Spezialitätenprodukte durch eine Verlängerung der Haltbarkeit erhöht bzw. je nach Zielland und gesetzlichen Vorgaben (verschärfte Importbedingungen in den USA und Österreich sowie zu erwartende Verschärfungen in Europa) durch den Einsatz der Hochdrucktechnologie erst ermöglicht. Hierdurch ergeben sich insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen der Lebensmittelindustrie Absatzchancen und deutlich verbesserte, größere Wettbewerbsvorteile.

#### Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2011.
2. Nagel, M., Wierschem, A., Rauh, C. und Delgado, A.: In-Situ Visualisierung von pH-Werten und pH-Wert-Feldern mit Hilfe von immobilisierten Indikatoren. Proc. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, GALA 2011, ISBN 978-3-9805613-7-2 (2011).
3. Töpfl, S.: Physikalische Technologien zur Haltbarmachung und Strukturbeeinflussung von Fleischwaren. Tagungsband FEI-Jahrestagung 2011, 31-46 (2011).
4. Rauh, C. und Delgado, A.: Limitations of mathematical modelling and numerical simulation of industrial and laboratory high pressure processes. High Press. Res., 31 (1), 126-130 (DOI: 10.1080/08957959.2010.531720) (2011).
5. Nagel, M., Wierschem, A., Rauh, C. und Delgado, A.: Optische In-Situ Messung des pH-Werts unter Hochdruck an intransparenten Medien. Proc. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, GALA 2010, ISBN 978-3-9805613-6-5 (2010).
6. Rauh, C. und Delgado, A.: Analytical considerations and dimensionless analysis for a description of particle interactions in high pressure processes. High Press. Res., 30 (4), 567-573 (DOI: 10.1080/08957959.2010.538394) (2010).

7. Diez, L., Singh, J., Nesme, A., Nagel, M., Benning, R., Wierschem, A., Rauh, C. und Delgado, A.: Prozessanalyse und -design in der Lebensmitteltechnologie. (Posterabstract) Tagungsband 68. FEI-Jahrestagung 2010, 112-113 (2010).

**Weiteres Informationsmaterial:**

Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik (DIL)  
Prof.-von-Klitzing-Str. 7, 49610 Quakenbrück  
Tel.: +49 5431 183-0  
Fax: +49 5431 183-114  
E-Mail: b.hukelmann@dil-ev.de

Universität Erlangen-Nürnberg  
Department für Chemie- und Bioingenieurwesen  
Lehrstuhl für Strömungsmechanik  
Cauerstrasse 4, 91058 Erlangen  
Tel.: +49 9131 85-29501  
Fax: +49 9131/85-29503  
E-Mail: cornelia.rauh@Istm.uni-erlangen.de  
Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)  
Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn  
Tel.: +49 228 3079699-0  
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.