

Simulation und Vorhersage des mechanisch induzierten Mundgefühls beim Verzehr von fettreduzierten, nicht stückigen, fließfähigen Lebensmitteln

(Teilprojekt 8 im DFG/AiF-Cluster 3)

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle:	Universität Erlangen-Nürnberg Department für Chemie- und Bioingenieurwesen Lehrstuhl für Strömungsmechanik Prof. Dr. A. Delgado/Dr. C. Rauh
Industriegruppen:	Milchindustrie-Verband e.V. (MIV), Berlin Bundesverband der Hersteller von Lebensmitteln für eine besondere Ernährung e.V. - Diätverband, Bonn
	Projektkoordinator: Dr. G. Krammer Symrise AG, Holzminden
Laufzeit:	2009 – 2012
Zuwendungssumme:	€ 239.750,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

Ausgangssituation:

In Zeiten eines stetig zunehmenden Wettbewerbsdrucks in der Lebensmittelindustrie gewinnt das kundenorientierte Design hochqualitativer Produkte an Bedeutung. Vor allem kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) bleiben nur dann wettbewerbsfähig, wenn sie sich dem Markt schnell und flexibel anpassen. Aufgrund des allgemein hohen Qualitätsniveaus fällt der Kunde seine Kaufentscheidung zunehmend auf Grundlage unbewusster Eindrücke. Um im Wettbewerb bestehen zu können, müssen die angebotenen Produkte deshalb über besondere, im Vergleich zu anderen Produkten einzigartige Eigenschaften verfügen. Als eine solche Eigenschaft spielt die Textur eines Lebensmittels zusätzlich zu seinem Geschmack und Geruch für die Akzeptanz beim Kunden eine entscheidende Rolle.

Infolge des anhaltenden Trends zur gesundheitsbewussten Ernährung stehen insbesondere fettreduzierte Lebensmittel im Blickpunkt. Den größten Anteil des Umsatzes der Lebensmittelindustrie in Deutschland, der jährlich ca. 163 Mrd. € beträgt, erwirtschaften KMU. Dabei ist

die deutsche Milchindustrie und Molkereiwirtschaft mit einem Jahresumsatz von über 21,7 Mrd. € (2011) und etwa 30.000 Beschäftigten die stärkste Branche innerhalb der Lebensmittelindustrie. Mit 25,43 % Exportanteil (8,32 Mrd. €) am Gesamtabsatz nimmt die Molkereiwirtschaft auch im Außenhandel die Spitzenstellung in der Lebensmittelwirtschaft ein. Diese Zahlen belegen eindrucksvoll die wirtschaftliche Bedeutung der Produktentwicklung für die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen der Milchindustrie.

Um die zu erwartende Kundenakzeptanz eines fettreduzierten Milchprodukts vor seiner Einführung in den Markt abschätzen zu können, kommen in der Industrie sensorische Untersuchungen zum Einsatz. Mit Hilfe dieser etablierten Methoden lassen sich einzelne Parameter, wie beispielsweise die Textur eines Lebensmittels und das resultierende Mundgefühl, gezielt abfragen und den Kundenvorstellungen anpassen. Ein repräsentatives Ergebnis erfordert jedoch einen relativ hohen Aufwand, der in zahlreichen und kostenaufwendigen Untersuchungen unter Einsatz von sensorischen Panels besteht. Die a priori Prognose des Mundgefühls völlig neuer Re-

zepturen bleibt bei dieser sensorischen Verkostung naturgemäß außer Acht. Aktuelle Entwicklungen in der Milchindustrie zeigen, dass sich das Portfolio vor allem im Bereich Joghurt zugunsten von Produkten mit 0,1 % oder 1,5 % Fett verschiebt. Dennoch gelingt die Etablierung solcher Produkte auf dem Markt trotz großer Werbekampagnen nicht immer.

Insbesondere neu entwickelte fettarme Produkte müssen von der ersten Kostprobe an den Kunden nicht nur durch ihren gesundheitlichen Mehrwert, sondern auch durch ihr Mundgefühl überzeugen. Einfluss auf das Mundgefühl haben neben dem Fettgehalt auch weitere Faktoren, wie der Proteingehalt, die thermische Prozessführung und die eingesetzten Kulturbakterien. Die Herstellung fettreduzierter Lebensmittel erfordert somit eine Prozessgestaltung, die zu vom Kunden voll akzeptierten Produkten mit ähnlichen Eigenschaften wie die der Vollfettprodukte führt.

Die wissenschaftlich-technische Problemstellung basiert auf dem unzureichend bekannten Zusammenhang von Fließvorgängen und den von diesen induzierten mechanischen Reizen im Mund beim Verzehr von fettreduzierten Lebensmitteln. Dessen Aufklärung erfordert Kenntnisse über das Ausmaß der Beanspruchung einzelner Bereiche auf der Zunge und dem Gaumen durch die Strömung im Mund. Dabei ist zu erwarten, dass unterschiedliche Textur- und Matrixcharakteristika einen entscheidenden Einfluss auf die Strömungsmuster haben. Aus dem Einfluss der Fluidynamik im Mund lassen sich somit mechano-sensorische Empfindungen ableiten, die in der Lebensmittelindustrie bislang aus sensorischen Beurteilungen von Lebensmitteln in Form von qualitativ linguistischen Merkmalen resultieren.

Ziel des Forschungsvorhabens (Teilprojekt 8 im [DFG/AiF-Cluster „Fettwahrnehmung und Sättigungsregulation: Ansatz zur Entwicklung fettreduzierter Lebensmittel“](#)) war es, mithilfe numerischer Simulationen das mechanisch induzierte Mundgefühl beim Verzehr von fettreduzierten, nicht stückigen, fließfähigen Lebensmitteln (z.B. Joghurt) zu untersuchen. Des Weiteren stand eine Objektivierung sensorischer textueller Eindrücke sowie deren Vorhersage im Fokus des Projektes. Hierzu bedurfte es a) der Ermittlung der das mechanisch induzierte Mundgefühl verursachenden Fließvorgänge beim Verzehr fettreduzierter, nicht stückiger, fließfähiger Lebensmittel mittels numerischer Simulationen, b) der Erarbeitung eines hybriden Systems zur

objektivierten Beschreibung des Mundgefühls und c) darauf aufbauend der Entwicklung eines Expertensystems zur sensorisch zielgerichteten Produkt- und Prozessgestaltung zu entwickeln der Lebensmittel. Die Verknüpfung sensorischer, technologischer und strömungsmechanischer Wissens basierte auf einer engen Zusammenarbeit mit humansensorisch orientierten Forschungsstellen des Clustervorhabens ([Teilprojekt 9, AK Busch-Stockfisch](#)) sowie Forschungsstellen aus der Technologie und Verfahrenstechnik ([Hinrichs, TP 1, Universität Hohenheim](#)), (Schuchmann, TP 2, KIT).

Forschungsergebnis:

Mithilfe numerischer Simulationen des Schluckvorgangs wurde für unterschiedliche Produktklassen eine Charakterisierung der daraus resultierenden mechanischen Belastungen des Mundinnenraums (Zunge, Gaumen) erarbeitet. Die Produkte deckten dabei eine Spanne von leichtviskosen Newtonschen Modelllebensmitteln (z.B. Wasser) bis hin zu hochviskosen nicht-Newtonschen Lebensmitteln (Joghurtproben unterschiedlicher Fettgehalte von 0,1 % bis 10 %) ab. Numerische Simulationen in einer Modellmundhöhle ermitteln und visualisieren die im Mund ablaufenden Fließvorgänge von Lebensmitteln sowie Normal- und Scherspannungen, die an den Mechanorezeptoren einen Reiz auslösen. Diese Größen wurden in charakteristischen strömungsmechanischen Kennzahlen (z.B. Reynoldszahl, Deborahzahl, Beschleunigungs-, Druck- und Reibungskräfte) abgebildet. Die Analyse des Strömungsfeldes hinsichtlich der induzierten mechanischen Spannungen erfolgte einzeln in voneinander unabhängigen Bereichen auf der Zungenoberfläche, um so einen „Fingerprint“ der mechanischen Spannungsverteilung und somit in einem vereinfachten System eine Objektivierung der mechanischen Vorgänge bei der sensorischen Wahrnehmung zu erhalten. Es konnte unter anderem gezeigt werden, dass die Bereiche der stärksten mechanischen Belastung in der Nähe des Rachens liegen.

Diese Erkenntnisse zu zonenspezifischen mechanischen Belastungen wurden mit experimentell bestimmten sensorischen, textuellen Daten der Arbeitsgruppe Busch-Stockfisch und rheologischen und technologischen Daten der Arbeitsgruppe Hinrichs korreliert. Systeme, wie die sensorische Texturwahrnehmung, bei denen eine hohe Komplexität vorliegt und die sich nicht mittels mathematischer Gleichungen beschreiben

lassen, können sich zur Vorhersage kognitiver Algorithmen bedienen. Dieses Vorhaben setzt im Wesentlichen künstliche neuronale Netze und ein hybrides Neuro-Fuzzy-System ein. Künstliche neuronale Netze (KNN) sind mathematische Algorithmen, die - ähnlich wie bei einem Lernvorgang eines Menschen - aus Datensätzen (Eingangs- und Ausgangsdaten) Zusammenhänge über ein Training erlernen. Hierbei werden Verknüpfungen und Gewichtungen zwischen sogenannten Neuronen innerhalb des Trainings bestimmt. Nach erfolgreichem Training, das durch eine Validierung mit realen, noch dem System unbekanntem Daten bestätigt wird, ist das KNN in der Lage, aus Eingangsdaten Vorhersagen über Ausgangsdaten zu treffen. Ein Neuro-Fuzzy-System bedient sich wie ein künstliches neuronales Netz einem Training mit vorhandenen Daten. Zudem kommen im Fuzzy-Anteil aber noch von Experten formulierte Regeln zum Einsatz, welche die Form einer Wenn-Dann-Logik besitzen. Diese Regeln wurden von den Arbeitsgruppen Busch-Stockfisch und Hinrichs zur Verfügung gestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass ein KNN, das als Eingangsdaten mechanische Kenngrößen der numerischen Simulation (zonenspezifische Schubspannungen auf der Zunge) erhalten hat, für ein spezifisches Produkt sehr gute Vorhersagen über das sensorische Attribut „oral viscosity“ treffen konnte. Die Erweiterung mit den Experten-Regeln in Form des hybriden Neuro-Fuzzy-Systems (= hybrides Expertensystem) konnte sehr gute Vorhersagen zu „Cremigkeit“, „Grießigkeit“, „Adstringierend“ und „Belegend“ erstellen. Das gesteckte Ziel einer objektivierte Beschreibung des zu erwartenden Mundgefühls konnte somit basierend auf strömungsmechanisch induzierten Belastungen des Mundinnenraums mittels eines hybriden Systems erreicht werden. Die Ergänzung des hybriden Expertensystems um Suchalgorithmen und Optimierungsverfahren führte außerdem dazu, auch umgekehrt gezielt für vorgegebene sensorische Anforderungen Produktzusammensetzungen vorschlagen zu können. Die Validierung zeigte auch hierfür eine sehr gute Vorhersagegenauigkeit. Dies zeigt, dass das erstellte hybride Expertensystem ein hohes Potential besitzt, Sensorikpanels und Produktentwickler in der Praxis bei der Auswahl von erfolgversprechenden Sensorik-Produkt-/Prozessparameter-Kombinationen zu unterstützen.

Wirtschaftliche Bedeutung:

Aus wirtschaftlicher Sicht besteht das besondere Potential des hier verfolgten Ansatzes in der Bereitstellung eines völlig neuartigen Expertensystems, das Auskunft über das mechanisch induzierte Mundgefühl gibt. Mit dessen Hilfe lässt sich die Kundenakzeptanz von fettreduzierten Lebensmitteln erhöhen sowie stets mit finanziellem Verlust verbundene Fehlentwicklungen vermeiden. Zusätzlich verschaffen die Ergebnisse den Herstellern von fettreduzierten Milchprodukten auch im internationalen Kontext klare Wettbewerbsvorteile. Sie ermöglichen eine zuverlässige und zeiteffiziente Prognose des Mundgefühls und erlauben damit eine substantielle Beschleunigung von Entwicklungsprozessen. Das vorgeschlagene Expertensystem verschafft insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen schon während der Entwicklungsphase eine signifikante Ersparnis an Entwicklungszeit und -kosten, sowohl bei der Formulierung von Rezepturen, aber auch bei der Gestaltung der einzusetzenden technologischen Prozesse.

Die erzielten Ergebnisse sind vor allem für Unternehmen der Milchindustrie von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Sie ermöglichen zusammen mit dem leicht an die Technologie einzelner KMU anpassbaren Expertensystem eine effiziente Aufstellung des Sortiments fettreduzierter Joghurts, eine erfolgreiche Etablierung der Produkte am Markt und dadurch bedingt langfristige Gewinne. Die Erkenntnisse erlauben es, sowohl neu zu entwickelnde als auch gegebenenfalls bereits im Sortiment vorhandene fettreduzierte Joghurts zu optimieren und hinsichtlich der Textur an die sensorische Charakteristik von Vollfettprodukten anzupassen. Dies lässt sich durch die Anwendung des erstellten, vorwettbewerblichen Expertensystems realisieren, das in der Praxis in KMU leicht auf einer handelsüblichen PC Anwendung finden kann. Die Bedienung des Systems bedarf keines mathematisch-numerischen Vorwissens, da der Benutzer keine numerischen Simulationen und keine Programmierung von kognitiven Algorithmen durchführen muss.

Die Forschungsergebnisse strahlen über die Lebensmittelindustrie hinaus auch in andere Wirtschaftsbranchen sowie in die Zulieferindustrie aus.

Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2012.
2. [Fettwahrnehmung und Sättigungsregulation: Ansatz zur Entwicklung fettreduzierter Lebensmittel – Zentrale Ergebnisse des gleichnamigen DFG/AiF-Clusterprojektes. \(Hrsg. FEI\). ISBN 978-3-925032-51-6 \(2012\).](#)
3. Rauh, C., Singh, J., Nagel, M. & Delgado, A.: Objective analysis and prediction of texture perception of yoghurt by hybrid neuro-numerical methods. Intern. Dair. J. 26 (1), 2-14 (DOI: 10.1016/j.idairyj.2012.03.006) (2012).
4. Kutter, A., Hanesch, C., Rauh, C. & Delgado, A.: Impact of proprioception and tactile sensations in the mouth on the perceived thickness of semisolid foods. Food Qual. Pref. 22 (2), 193-197 (DOI:10.1016/j.foodqual.2010.09.006) (2011).
5. Kutter, A., Singh, J. P., Rauh, C. & Delgado, A.: Improvement of the prediction of mouth-feel attributes of liquids foods by a Post-humus Funnel. J. Text. Studies. 42 (3), 217-227 (DOI: 10.1111/j.1745-4603.2011.00291.x) (2011).
6. Díez, 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).

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

Weiteres Informationsmaterial:

Universität Erlangen-Nürnberg
 Department für Chemie- und Bioingenieurwesen
 Lehrstuhl für Strömungsmechanik
 Cauerstrasse 4, 91058 Erlangen
 Tel.: + 49 9131 8529-500
 Fax: + 49 9131 8529-503
 E-Mail: antonio.delgado@lstm.uni-erlangen.de

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

gefördert durch/via:

