

Proteinschäume in der Lebensmittelproduktion: Mechanismenaufklärung, Modellierung und Simulation

(DFG/AiF-Cluster)

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Laufzeit:	2011 – 2014
Zuwendungssumme:	€ 2.592.300,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI und durch DFG)

Ausgangssituation:

In der Produktion von Lebensmitteln kommen zahlreiche stoffliche Systeme vor, bei welchen ein Gas in dispergierter Form vorliegt. Vielfach ist ein Gaseinschluss auch explizit erwünscht. Mit ihm lassen sich nämlich die Eigenschaften z.B. so beeinflussen, dass das Produkt eine geringere Dichte annimmt, einen angenehmen sensorischen Eindruck bewirkt oder einen verbesserten ernährungsphysiologischen Nutzen hat. Diese Eigenschaften assoziieren die Verbraucher mit dem Attribut „leicht“; entsprechende Produkte besitzen eine hohe Kundenakzeptanz.

Gasdispersionen in Lebensmitteln sind zuweilen auch prozesstechnisch von großem Vorteil, so z.B. durch Reduzierung von fluidmechanischen Widerständen oder durch Verstärkung der mikrobiologischen Aktivität in Fermentern. Im Gegensatz hierzu gehen von Gasdispersionen aber auch Gefahren für die Lebensmittelproduktion aus. So entsteht häufig unerwünscht Schaum, der seinerseits zu einer wesentlichen Verringerung von konvektiven sowie diffusiven Effekten und somit zu unerwünschten, starken Prozessinhomogenitäten führen kann.

Für die Beurteilung einer positiven oder negativen Wirkung auf ein Produkt und einen Prozess ist es entscheidend, dass sich Schäume inhärent instabil verhalten. Hieraus resultiert unmittelbar die Frage nach den stofflichen und prozesstechnischen Randbedingungen sowie nach dem Existenzbereich eines Schaums. Dieser Aspekt ist nicht nur von wissenschaftlicher Bedeutung, sondern es ist auch von erheblicher praktischer Bedeutung, die Stabilität von Schäumen vorauszusagen und gezielt zu beeinflussen. Von einigen Schäumen wird ein

stabiles Verhalten für einige Minuten erwartet (z.B. Schlagsahne), von anderen Schäumen (z.B. Ready-to-eat-Desserts) für mehrere Wochen oder Monate.

Arbeiten zur physiko-chemischen Entstehung, Stabilisierung und Destabilisierung von Schäumen bei der Lebensmittelproduktion finden auf internationaler Ebene in großem Umfang statt, in Deutschland finden sich bislang nur wenige Forschungsaktivitäten in diesem Bereich. Das vorliegende Clustervorhaben zielte deshalb darauf ab, in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit von 10 Arbeitsgruppen die physiko-chemischen Grundlagen zu schaffen und Simulationswerkzeuge zu entwickeln, die den Weg für ein neuartiges Design von Produkten und Prozessen mit Milchproteinschäumen ebnen sollten. Im Einzelnen standen dabei folgende Teilziele im Vordergrund:

- Verbesserung des Verständnisses der materialdynamischen Vorgänge inkl. der Grenzflächendynamik und des Verhaltens einzelner Schaumlamellen gut charakterisierten Proteinschaums.
- Umfassende makroskopische Charakterisierung des Verhaltens strukturell unterschiedlicher Proteinkomponenten an den Schaumblasengrenzflächen bei Variation von Stoff-, Produkt- und Prozessparametern.
- Erarbeitung von Modellen auf den mesoskaligen Ebenen vom Protein zur Schaumlamelle, von der Lamelle zur Blase und von der Blase zum Modellprodukt und zum Prozess.
- Bereitstellung von Werkzeugen zur Simulation der spatiotemporalen Verteilung von Masse, Impuls und Energie in Schäumen während

charakteristischer Prozessierungsschritte auf der Grundlage von LATTICE-BOLTZMANN-Verfahren.

- Beschreibung der Ansammlung von Aromastoffen in den Schaumblasen und deren Freisetzung beim Schaumzerfall.
- Konzeption und Umsetzung von Methoden der Modell- und Datenreduktion zur Erleichterung und Beschleunigung des Transfers von Forschungsergebnissen.
- Realisierung einer Anwenderplattform für alle Arbeitsgruppen des Clusters.

Forschungsergebnis:

Die erzielten Ergebnisse belegten auch im Detail die Gültigkeit der formulierten Arbeitshypothese, dass sich das Verhalten von Milchproteinschäumen dank des hohen Standes der Simulation, der Modellbildung und des Wissensmanagements auch unter produktionstechnischen Bedingungen mit hoher Güte virtuell prognostizieren lässt. Dabei warf die Prozessierung von Proteinschäumen Fragestellungen auf, deren Komplexität sich nicht zuletzt darin begründete, dass völlig unterschiedliche Themengebiete eng verschachtelt ineinander greifen. Für die Prozessierung galt es, die materielle Konstitution sowie die Kinematik und Dynamik der Teilvorgänge zu charakterisieren.

Analoge Aussagen trafen auf die Modellierungs- und Simulationswerkzeuge zu. Allen voranzustellen war das hochparallele High-Performance-Computing (HPC) mit der auf der LATTICE-BOLTZMANN-Methode (LBM) basierten Plattform waLBerla. Dieses Tool erlaubte eine zeiteffiziente Simulation von Proteinschäumen im statischen Fall der Schaumlagerung sowie beim fluidmechanischen Transport durch Elemente der Produktionsanlage, wie etwa Rohre, Kanäle und Düsen. Mit ihm konnten aber auch Grundströmungsformen, wie etwa reine, ebene Scherung, studiert werden. Überdies fand im Rahmen des Clusters LBM Verwendung, um thermische Effekte inkl. Verdampfung sowie um die Aromafreisetzung aus einem proteinstabilisierten Schaum zu simulieren.

Zusätzlich wurden im Cluster zusätzliche Modellierungs- und Simulationsansätze erarbeitet bzw. weiterentwickelt, welche einzelne Phänomene, Mechanismen und Strukturen betrafen. Hierzu gehörten:

- Die mathematische Abbildung der Grenzflächenadsorption von Proteinen und Emulgatoren an freien Grenzflächen, inkl. der konkurrierenden Verdrängungsvorgänge.
- Ein Modell zur Voraussage der Dynamik und Stabilität von Einzelblasen bei Lagerungs- und Transportprozessen.
- Ein Modell zur eindimensionalen Behandlung des Transportprozesses von Blasenwolken monomodaler und multimodaler Größenverteilung.
- Tensorielle, multiskalige Modelle zur Voraussage des rheologischen Verhaltens blasenhaltiger Lebensmittel, hierunter auch von rheologischen Größen bei reiner Dehnung und Scherung.
- Eine Modellbeziehung zur Bestimmung der Einsatzschubspannung, bei der der Gasvolumenanteil ϕ , die Oberflächenspannung σ und der oberflächenbezogene mittlere Blasenradius r_{32} berücksichtigt wurden.
- Ein approximative, analytische Beziehung zur Voraussage des sporadischen Schaumzerfalls bei statischer Lagerung.
- Kognitive Verfahren zur Prädiktion von (a) der Oberflächenspannung aus der Proteinkonzentration und dem pH-Wert sowie (b) der Schäumbarkeit, Schaumstabilität, Schaumkapazität und die Drainage für Lösungen mit Natriumcaseinat, β -Lactoglobulin und micellarem Casein.
- Ein neuronumerisches Werkzeug zur Modell- und Datenreduktion sowie zur effizienten Prognose, welches das Transportverhalten von Schäumen in Produktionsanlagenelementen über einen Fingerprint aus besonders charakteristischen Strömungszonen identifiziert.

Für das Gesamtergebnis des Cluster erwiesen sich folgende, erarbeitete Erkenntnisse als besonders wichtig:

- Entgegen einer aufgestellten Hypothese kommt es an der Oberfläche nicht alleine zu einer Verdrängung niedermolekularer grenzflächenaktiver Substanzen durch die Proteine. An der Oberfläche bereits adsorbierte Proteine können erneut verdrängt werden.
- Proteinschäume zeigten eine besonders hohe Stabilität in der Nähe des isoelektrischen Punktes.
- Die Gegenwart von Elektrolyten erhöhte die

Oberflächenaktivität der Proteinmoleküle; somit steigen Oberflächenbedeckung und Oberflächendruck kontinuierlich an.

- Bei den technisch üblichen Proteinkonzentrationen und Prozesszeiten liegen stets Proteine an der Oberfläche vor, so dass die Diffusions- und Verdrängungsprozesse keine wesentliche Rolle spielen.
- Die aufgestellte Hypothese, dass Proteine die strömungsmechanischen Sekundärbewegungen bei der Lagerung und beim Transport inhibieren, erwies sich als valide.
- Bei der mathematisch-analytischen Betrachtung einzelner Blasen beim Transport von Schäumen stellte sich heraus, dass die Blasenstabilität in proteinhaltigen Flüssigphasen insbesondere von der Viskosität und vom Druck der Flüssigkeit, vom Fernfelddruck sowie von der Größe der Blase abhängig.
- Kam es beim Transport zu Druckimpulsen (etwa durch Ventile) bzw. erlitt die Blase eine abrupte Kompression bzw. Expansion, so existierten für einen gewissen Zeitraum Inhomogenitäten in der Oberflächenbelegung durch Proteine.
- Für spezifische lebensmittelrelevante Bereiche des Elastizitätsmoduls zeigte sich, dass mit einer Vergrößerung desselben die Kompressionszeit verlängert wird.
- Die gewonnenen Ergebnisse in Bezug auf den fluidmechanischen Transport in horizontalen Kanälen demonstrierten die Existenz einer Kolben-Pfropfenströmung (Plug Flow) und somit einer Fließgrenze gegenüber tangentialer Deformationen.
- Der Druckabfall beim Transport hing stark von den vorherrschenden Schaumparametern ab. Er verringerte sich bei einer Erhöhung der Gaseinströmungsrates.
- Eine erarbeitete Modellgleichung ermöglichte eine einheitliche Beschreibung vom Speichermodul sowie von der Fließgrenze in Abhängigkeit von Flüssigkeitsviskosität und den physikalischen Stoffeigenschaften Gasvolumenanteil, Grenzflächenspannung, mittlerer Blasenradius und Größenverteilung der Blasen.
- Es wurde ein enger Zusammenhang zwischen Grenzflächen- und Schaumelastizität gefunden, solange keine vermehrte Aggregatbildung auftritt.
- Die erarbeitete Labor- μ CT-Anlage des

Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen (IIS) erreichte Geschwindigkeiten von nur 14 s pro Messung. Für instabile Schaumsysteme reichte diese Zeit nicht aus. Die Synchronlichtquelle am ESRF ermöglichte indessen qualitativ hochwertige Aufnahmen in Messzeiten < 1 s. Im Phasenkontrastmodus ließen sich selbst feinste Schaumlamellen visualisieren.

- Mit dieser Messtechnik wurde eine breittragende Datenbasis zur Dynamik der zerfallenden Schaumstrukturen, zur Stabilität von Schäumen aus β -Lactoglobulin und micellarem Casein in UF-Permeat, zur Blasengrößenverteilung sowie zur pH- und Temperaturabhängigkeit erarbeitet. Sie fanden in die Modellierungs- und Simulationsansätze von TP 6 zur virtuellen Prädiktion des Schaumverhaltens Eingang.
- Aus der Verteilung eines Erdbeeraromas in einem Milch/Milchschaumsystem wurde eine Anreicherung von Aromastoffen in der Milchphase festgestellt.
- Die Aromastofffreisetzung aus dem Schaum erfolgte zeitlich konzentrierter und intensiver als aus der ungeschäumten Matrix.
- Bei aromatisierten Proteinschäumen unterschiedlicher Gasblasengröße ergab sich eine intensivere Aromastofffreisetzung aus dem Schaum mit größeren Gasblasen.
- Triangeltests zeigten deutliche sensorische Unterschiede zwischen aromatisierten Schäumen und ungeschäumter Matrix mit verschiedenem Protein- und Fettgehalt.
- LATTICE-BOLTZMANN Methoden wiesen im Vergleich zu klassischen Simulationsverfahren auf der Grundlage von Finiten Diskretisierungen eine besonders hohe Eignung zur Berechnung der Dampf-, Gas- und Aromafreisetzung aus proteinhaltigen Lebensmittelschäumen auf.
- Die zur Datenreduktion ausgewählten Künstlichen Neuronalen Netze (KNN) bewiesen exzellente und zeiteffiziente Prognosefähigkeiten. Die Vorhersage von Oberflächenspannung, Schäumbarkheit, Schaumstabilität, Schaumkapazität, Drainage von Natriumcasein-Lösungen gelang mit relativen Fehlern im unteren Prozentbereich und mit Korrelationskoeffizienten größer als 95 %. Für β -Lactoglobulin war der Fehler größer; die Ursache hierfür wurde in potentiellen materiellen Modifikationen vermutet.
- Die KNN ermöglichten es auch, die Prozesse

beim Transport eines Schaums durch Innen-geometrien, wie Rohre oder Kanäle, aus Simulationsdaten vorauszusagen. Die Geschwindigkeitskomponente in Transportrichtung wurde mit einem maximalen mittleren quadratischen Fehler von 0,2 und einer minimalen Korrelation von 82 % vorausgesagt, die Geschwindigkeitskomponenten respektive mit 0,028 bzw. 0,07 und einer minimalen Korrelation von 95 % bzw. 75 %.

- Dies bewies die prinzipielle Umsetzbarkeit des im Cluster angestrebten Virtuellen Engineerings auf üblichen Praxisrechnern.

Zusätzlich zu diesen Ergebnissen gab es umfassende Überlegungen zu dem für die Praxis besonders wichtigen Themenkomplex adäquater Prozessfenster, die hier in der gebotenen Kürze wiedergegeben werden:

- Die Herstellung von Schäumen hing zunächst von ihrer Erzeugbarkeit ab. Für die im Cluster untersuchte Membranerzeugung wurde eine funktionelle Abhängigkeit von EULER-Zahl und Kapillarzahl aufgestellt, welche den in der ersten Stufe der Erzeugung notwendigen Betriebsdruck liefert.
- Nach der Blasenerzeugung an der Membran erwies es sich als notwendig, dass die Blasen in einem für den Betrieb adäquaten Zeitraum aufsteigen. Dies bestimmte den Produktionstakt mit. Hier zeigte sich die Abhängigkeit der Kapillarzahl von der FROUDE-Zahl als entscheidend. Bei sehr kleiner FROUDE-Zahl war eine Schaumerzeugung nicht möglich.
- Die Blasengröße hing auch in entscheidender Form von der Kapillarzahl ab. Dies lieferte eine Möglichkeit, die Struktur des Schaumes entscheidend zu prägen.
- Genauso löste sich die Blase in einem Zeitintervall von der Membrane ab, der von der Kapillarzahl abhängt. Blieb dieses Zeitintervall unberücksichtigt, so entstanden große Hohlräume durch Blasenkoaleszenz, wodurch die Produktqualität deutlich beeinträchtigt wurde.
- Bei sehr hohem Gasvolumenanteil lieferte der prozentuelle Gasanteil keine eindeutige Aussage zur Schaumqualität. Vielmehr trat bei den transportierten Schäumen ein neues Strömungsregime (Schwallströmung) auf, das ebenfalls anstelle einer homogenen Schaumstruktur große Hohlräume zeigte. Dies führte

nicht nur zu einer inakzeptablen Produktqualität, sondern zugleich auch zu den in der Praxis gefürchteten Prozessinstabilitäten.

- In Hinblick auf den Einfluss eines Schiebers oder eines Ventils zeigte sich, dass ein einzelner Öffnung/Schließvorgang die Schaumstruktur nicht merklich ändert. Dies gilt insbesondere bei hohen Proteinkonzentrationen.
- Auch bei periodischen Druckpulsationen fiel bei hinreichenden Proteinkonzentrationen keine signifikante Beschädigung der Schaumstruktur auf.

All diese Aspekte haben zu der Gesamteinschätzung geführt, dass die notwendigen Randbedingungen zu einem Virtuellen Engineering von schaumhaltigen Lebensmitteln vorliegen.

Wirtschaftliche Bedeutung:

Die Forschungsergebnisse sind für zahlreiche Sparten der Lebensmittelindustrie, insbesondere für die Milch- und die Süßwarenindustrie, von Interesse. Der aus rund 100 Unternehmen bestehende deutsche Milchverarbeitungssektor beschäftigt ca. 38.000 Mitarbeiter. Mit 28,4 Mrd. € in 2013 erzielte er knapp 16 % des Gesamtumsatzes der deutschen Lebensmittelindustrie. Die sogenannte Weiße Linie (Joghurt, Desserts, Quark etc.) ist mit 5,7 Mrd. € der umsatzstärkste Bereich. Das darunter angesiedelte Sortiment geschäumter Produkte ist durch wachstumsstarke Marken und eine hohe Anzahl von Produktneuerscheinungen gekennzeichnet. Insbesondere auf Genuss ausgerichtete Premiumprodukte werden vom Verbraucher gut angenommen. Da geschäumte Produkte hinsichtlich der Genussparameter Cremigkeit und Leichtigkeit hoch bewertet werden, ist mit einem steigenden Anteil solcher Systeme auch im „Low fat“-Bereich zu rechnen.

In Deutschland wurden im Jahr 2013 etwa 3,9 Mio. Tonnen Süßwaren im Wert von 12,6 Mrd. € produziert, davon wurden Waren im Wert von ca. 4,2 Mrd. € exportiert (201 Betriebe mit insgesamt ca. 50.000 Beschäftigten). Die Süßwarenbranche ist von vielen kleinen und mittleren Betrieben (KMU) geprägt. Eine bedeutende Rolle spielen hierbei sowohl mengen- als auch wertmäßig die Produktion von Speiseeis (361.956 t), gefüllten Schokoladenerzeugnissen (304.391 t), Pralinen (135.147 t) und Zuckerwaren (536.849 t). In

diesen Kategorien finden sich zahlreiche schaumbasierte Produkte, wie Marshmallows, Schaumwaffeln, Schaumküsse, mit Mousse gefüllte Pralinen etc.

Von den Ergebnissen des Clusters werden die Hersteller geschäumter Produkte und ihre Zulieferer (z. B. Hersteller von technofunktionellen Proteinprodukten und Zusatzstoffen) profitieren. Des Weiteren sind die Ergebnisse auch für den Wirtschaftszweig Maschinenbau (Anlagenbau, Membranhersteller) von Interesse.

Als weitere, wichtige Spin-Offs für KMU ist der Bereich der Prozessbeobachtung und -führung anzusehen. So etablieren sich gegenwärtig im Markt neuartige Entwicklungen auf dem Gebiet der Qualitätssicherung schaumartiger Lebensmittel, welche letztendlich in modernen Diagnosesystemen etwa für das Grenzflächenspannungsverhalten oder die Rheologie resultieren.

Publikationen (Auswahl):

1. Dombrowski, J. & Kulozik, U.: Einfluss des strukturellen Zustands des Caseins sowie des pH-Werts auf dessen Schaumstabilität. Jahresbericht Milchwiss. Forsch. ZIEL, 58, ISBN 978-3-939182-89-4 (2016).
2. Dittmann, J., Eggert, A., Lambertus, M., Dombrowski, J., Rack, A. & Zabler, S.: Finding robust descriptive features for the characterization of the coarsening dynamics of three dimensional whey protein foams. *J. Coll. Interf. Sci.*, 467, 148-157 (2016).
3. Dombrowski, J., Dechau, J. & Kulozik, U.: Multiscale approach to characterize bulk, surface and foaming properties of casein micelles as a function of alkalisation. *Food Hydrocoll.* 57, 92-102 (2016).
4. Dombrowski, J., Johler, F., Warncke, M. & Kulozik, U.: Correlation between bulk characteristics of aggregated β -lactoglobulin and its surface and foaming properties. *Food Hydrocoll.* 61, 318-328 (2016).
5. Dombrowski, J., Mattejat, C. & Kulozik, U.: Correlation between surface activity and foaming properties of individual milk proteins in dependence of solvent composition. *Intern. Dair. J.* 61, 166-175 (2016).
6. Wolf, A., Rauh, C. & Delgado A.: Dynamics and long-time behavior of a small bubble in viscous liquids with applications to food rheology - Impact of pressure and material characteristics on bubble shape. *Arch. Appl. Mech.* 1-24 DOI:10.1007/s00419-015-1074-8 (2015).
7. Dombrowski, J., Johler, F. & Kulozik, U.: Einfluss von hitzeinduzierten Strukturveränderungen auf das Schäumungsverhalten von β -Lactoglobulin. Jahresbericht Milchwiss. Forsch. ZIEL, 57, ISBN 978-3-939182-75-7 (2015).
8. Eggert, A., Supper, M., Nachtrab, F., Dombrowski, J., Rack, A. & Zabler, S.: Non-destructive imaging analysis of unstable foam structures using 3D X-ray computed tomography. *Proc. TechConn. Briefs* 2015, Proc. 1156, 559-562 (2015).
9. Bauer, M. et al.: A Python extension for the massively parallel multiphysics simulation framework waLBerla. *Intern. J. Par., Emerg. Distr. Syst.* DOI: 10.1080/17445760. 2015.1118478 (2015).
10. Anderl, D., Bauer, M., Rauh, C., Rüde, U. & Delgado, A.: Numerical Simulation of Adsorption and Bubble Interaction in Protein Foams with the Lattice Boltzmann Method. *Food Funct.* 5 (4), 755-763 (2014).
11. Anderl, D., Bogner, S., Rauh, C., Rüde, U. & Delgado, A.: Free surface Lattice Boltzmann with enhanced bubble model. *Comp. & Math. Appl.* 67, 331-339 (2014).
12. Anderl, D., Bauer, M., Rauh, C., Rüde, U. & Delgado, A.: Numerical Simulation of Bubbles in Shear Flow, *Proc. Appl. Math. Mech.* 14 (1), 667-668. DOI: 10.1002/pamm.201410317 (2014).
13. Dombrowski, J. & Kulozik, U.: Einfluss des pH-Werts auf die Struktur von mizellarem Kasein und dessen schaumstabilisierende Eigenschaften. Jahresbericht Milchwiss. Forsch. ZIEL, 56, ISBN 978-939182-43-6. (2014).
14. Dan, A., Wüstneck, R., Krägel, J., Aksenenko, E.V., Fainerman, V.B. & Miller, R.: Interfacial Adsorption and Rheological Behavior of β -Casein at the Water/Hexane Interface at Different pH. *Food Hydrocoll.* 34, 193-201 (2014).
15. Eggert, A., Müller, M., Nachtrab, F., Dombrowski, J., Rack, A. & Zabler, S.: High-speed in-situ tomography of liquid protein foams. *Intern. J. Mat. Res.* 105, doi: 10.3139/146.111057 (2014).

16. Engelhardt K.: Proteinadsorption an der Wasser-Luft-Grenzfläche: Einfluss der molekularen Struktur auf die Schaumstabilität. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg (2014).
17. Engelhardt, K., Peukert, W. & Braunschweig, B.: Vibrational sum-frequency generation at protein modified air-water interfaces: Effects of molecular structure and surface charging. *Curr. Opin. Coll. Interf. Sci.* 19, 207-215 (2014).
18. Engelhardt, K., Weichsel, U., Kraft, E., Segets, D., Peukert, W. & Braunschweig, B.: Mixed Layers of β -Lactoglobulin and SDS at Air-Water Interfaces with Tunable Intermolecular Interactions. *J. Phys. Chem. B* 118, 4098-4105 (2014).
19. Wolf, A., Masood, R., Rauh, C. & Delgado, A.: Bubble dynamics: Long-time behavior and interaction in viscous liquids. *Spec. Iss. 85th Ann. Meet. Intern. Ass. Appl. Math. Mech. (GAMM), Erlangen 2014. Proc. Appl. Math. Mech. (PAMM), WILEY-VCH, Vol. 14; DOI: 10.1002/pamm.2014. (2014).*
20. Won, J.Y., Krägel, J., Gochev, G., Ulaganathan, V., Javadi, A., Makievski, A.V. & Miller, R.: Bubble-bubble interaction in aqueous β -Lactoglobulin solutions. *Food Hydrocoll.* 34, 10-14 (2014).
21. Wolf, A., Masood, R., Delgado, A. & Rauh, C.: Bubble Dynamics: Long-time Behavior and Interaction in Viscous Liquids. *Proc. Appl. Math. Mech.* 14 (1), 861-862. DOI: 10.1002/pamm.201410411 (2014).
22. Gladbach, K., Delgado, A. & Rauh C.: Modeling and Simulation of the Transport of Protein Foams, *Proc. Appl. Math. Mech.* 14 (1), 859-860. DOI: 10.1002/pamm.201410410 (2014).
23. Proteinschäume in der Lebensmittelproduktion: Mechanismenaufklärung, Modellierung und Simulation – Zentrale Ergebnisse des gleichnamigen DFG/AiF-Clusterprojektes. (Hrsg. FEI). ISBN 978-3-925032-53-0 (2014).
24. Braunschweig, B., Mukherjee, P., Kutz, R.B., Rumpel, A., Engelhardt, K., Peukert, W., Dlott D.D. & Wieckowski, A.: Spectroscopy of Electrified Interfaces with Broadband Sum Frequency Generation: From Electrocatalysis to Protein Foams. In: *Vibrational Spectroscopy at Electrified Interfaces* (Wieckowski, A., Korzeniewski, C. & Braunschweig, B., eds.), John Wiley & Sons, 120-150 (2013).
25. Dan, A., Wüstneck, R., Krägel, J., Aksenenko, E.V., Fainerman, V.B. & Miller, R.: Adsorption and Dilational Rheology of Mixed β -Casein/DoTAB Layers Formed by Sequential and Simultaneous Adsorption at the Water/Hexane Interface. *Langmuir* 29, 2233-2241 (2013).
26. Dombrowski, J. & Kulozik, U.: Einfluss des pH-Werts und des Ionenmilieus auf die Grenzflächenaktivität und die Schäumungseigenschaften von β -Lactoglobulin. *Jahresbericht Milchwiss. Forsch. ZIEL, ISBN 978-3-939182-52-8, 55, 88-90 (2013).*
27. Dombrowski, J., Eggert, A. & Kulozik, U.: From microscale to macroscale: understanding the role of single proteins in complex food systems. *Proc. 4th Intern. Conf. Biofoams*, 218-220 (2013).
28. Eggert, A. & Kowalli, C.: Zum Anbeißen. *Inspect* 3, 60-61 (2013).
29. Engelhardt, K., Lexis, M., Gochev, G., Konnerth, C., Miller, R., Willenbacher, N., Peukert, W. & Braunschweig, B.: pH Effects on the Molecular Structure of β -Lactoglobulin Modified Air-Water Interfaces and Its Impact on Foam Rheology. *Langmuir* 29 (37), 11646-11655 (2013).
30. Gochev, G., Retzlaff, I., Aksenenko, E.V., Fainerman, V.B. & Miller, R.: Adsorption isotherm and equation of state for β -Lactoglobulin layers at the air/water surface. *Coll. Surf. A* 422, 33-38 (2013).
31. Godenschwager, C., Schornbaum, F., Bauer, M., Köstler, H. & Rüde, U.: A Framework for Hybrid Parallel Flow Simulations with a Trillion Cells in Complex Geometries. *Proc. SC13 Intern. Conf. High Perform. Comp., Network., Stor. Anal.*, 35/1-35/12 (2013).
32. Lexis, M. & Willenbacher, N.: Einfluss der Flüssigkeitsviskosität auf das rheologische Verhalten von Schäumen.

- Chem. Ing. Tech. 85 (8), 1-8 (2013).
33. Mack, S., Hussein, M. A. & Becker, T.: Examination of thermo-physical and material property interactions in cereal foams by means of Boltzmann modeling techniques. *Microfluid. Nanofluid.* 15 (3), 387-395 (2013).
 34. Mack, S., Hussein, M. A. & Becker, T.: On the Theoretical Time-Scale Estimation of Physical and Chemical Kinetics Whilst Wheat Dough Processing. *Food Biophys.* 8 (1), 69-79 (2013).
 35. Mack, S., Hussein, M. A. & Becker, T.: Tracking the thermal induced vapor transport across foam microstructure by means of micro-sensing technology. *J. Food Engin.* 116 (2), 344-351 (2013).
 36. Thienel, K., Krzeminski, A. & Hinrichs, J.: Aspekte der Aroma- und Fettwahrnehmung *DLG-Lebensm.* 6, 26-27 (2013).
 37. Dan, A., Gochev, G., Kotsmar, C., Ferri, J.K., Javadi, A., Karbaschi, M., Krägel, J., Wüstneck, R. & Miller, R.: Simultaneous vs. Sequential Adsorption of β -Casein/SDS Mixtures. Comparison of Water/Air and Water/Hexane Interfaces. In: *Proteins at Interfaces III* (Horbett, T., Brash, J. & Norde, W., eds.), ACS Symp. Ser. 153-178 (2012).
 38. Dombrowski, J. & Kulozik, U.: Einfluss von Proteinkonzentration und pH-Wert auf das Schäumungsverhalten von β -Lactoglobulin. *Jahresbericht Milchwiss. Forsch. ZIEL*, ISBN 978-939182-43-6, 54, 123-126 (2012).
 39. Eggert, A., Nachtrab, F. & Salamon, M.: Characterization of food foams using fast laboratory micro CT. *Proc. Cell. Mat. (Cellmat)*, G 46 (2012).
 40. Dan, A., Kotsmar, C., Ferri, J.K., Javadi, A., Karbaschi, M., Krägel, J., Wüstneck, R. & Miller, R.: Mixed Protein-Surfactant Adsorption Layers Formed in a Sequential and Simultaneous Way at the Water/Air and Water/Oil Interfaces. *Soft Matt.* 8, 6057-6065 (2012).
 41. Engelhardt, K., Rumpel, A., Walter, J., Dombrowski, J., Kulozik, U., Braunschweig, B. & Peukert, W.: Protein Adsorption at the Electrified Air-Water Interface: Implications on Foam Stability. *Langmuir* 28 (20), 7780-7787 (2012).
 42. Wüstneck, R., Fainerman, V.B., Aksenenko, E.V., Kotsmar, C., Pradines, V., Krägel, J. & Miller, R.: Surface dilatational behavior of β -casein at the solution/air interface at different pH values. *Coll. Surf. A* 404, 17-24 (2012).
 43. Zabler, S., Fella, C., Dietrich, A., Nachtrab, F., Salamon, M., Volland, V., Ebersperger, T., Oeckl, S., Hanke, R. & Uhlmann, N.: High-resolution and high-speed CT in industry and research. *Proc. SPIE*, 8506, doi: 10.1117/12.964588 (2012).
 44. Zoheidi, L., Wolf, A., Gladbach, K., Rauh, C. & Delgado, A.: Proteinschäume: Erste experimentelle und theoretische Untersuchungen. In: *Proc. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik GALA, Rostock 2012*, ISBN 978-3-9805613-8-9, ISSN 2194-2447 (2012).
 45. Bogner, S., Donath, S., Feichtinger C. & Rüde, U.: Three-phase flow simulation with the LATTICE-BOLTZMANN method. (Posterabstract) *Tagungsband FEI-Jahrestagung 2011*, 116-118 (2011).
 46. Nachtrab, F., Dietrich, A., Salamon M., Uhlmann, N. & Hanke, R.: Charakterisierung von Lebensmittelschäumen mittels Computertomographie. (Posterabstract) *Tagungsband FEI-Jahrestagung 2011*, 129-130 (2011).
 47. Dombrowski, J. & Kulozik, U.: Innovative membrane based food aeration: foam structures as influenced by preparation process. *Proc. 3rd Intern. Conf. Biofoams*, 199-205 (2011).

Das Cluster bestand aus folgenden zeitlich parallel bearbeiteten Teilprojekten:

TP 1 (DFG):

[Einfluss von Proteinen auf die Schaumbildung und Schaumstabilität](#)

Universität Erlangen-Nürnberg
Department für Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Feststoff- und Grenzflächenverfahrenstechnik
Prof. Dr. W. Peukert

Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Golm,
Abt. Grenzflächen
Dr. R. Miller

TP 2 (DFG):

Mesoskalige Modellierung des rheologischen Verhaltens von schaumartigen Lebensmitteln

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, AG Angewandte Mechanik
Prof. Dr. N. Willenbacher

Universität Erlangen-Nürnberg
Department für Chemie- und Bioingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Prof. Dr. A. Delgado

TP 3 (AiF):

Charakterisierung der Struktur und Dynamik von proteinstabilisierten Schäumen

Technische Universität München
Zentralinstitut für Ernährungs- und Lebensmittel-forschung, Abt. Technologie
Prof. Dr. U. Kulozik

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), Entwicklungszentrum Röntgentechnik (EZRT), Fürth
Prof. Dr. R. Hanke

TP 4 (AiF):

Einfluss von Schaumkomposition und -struktur auf die Aromastofffreisetzung und Aromawahrnehmung gasbeaufschlagter Lebensmittelsysteme

Universität Hohenheim
Institut für Lebensmittelwissenschaft und Bio-technologie, FG Lebensmittel tierischer Herkunft
Prof. Dr. Dr. J. Hinrichs

Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittel-chemie (DFA), Freising-Weihenstephan
Prof. Dr. Dr. P. Schieberle

TP 5 (DFG):

Simulation gekoppelter Wärme- und Stoffüber-gangsprozesse in hochviskosen und festen Le-bensmittelschäumen mittels Lattice-Boltzmann-Verfahren

Technische Universität München
Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW
Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie,
Prof. Dr. T. Becker

TP 6 (AiF):

Experimentell validierte Simulation strömungs-induzierter Effekte auf Proteinschäume mittels Lattice-Boltzmann-Methoden (zentrales Projekt)

Universität Erlangen-Nürnberg
Department für Chemie- und Bioingenieurwesen,
Lehrstuhl für Strömungsmechanik,
Prof. Dr. A. Delgado

Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Informatik (Systemsimulation)
Prof. Dr. U. Rude

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@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.