

Success Story: Ein kontrollierter Prozess für die Produktion von Margarine höchster Qualität

Christoph Würsch, Erich Carelli, Institut für Computational Engineering, ICE NTB Buchs

Daniel Gstöhl, Stefan Frei, Institut für Energiesysteme, IES, NTB Buchs

Kim Mishra, Peter Braun, Institut für Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften der ETHZ

Rudenz Egli, Egli AG, Bütschwil

Was und wo ist Margarine?

Wenn wir zum Frühstück genüsslich ein Gipfeli oder zum Abendessen eine Apfelwähe essen, denken wir kaum daran, dass Margarine in Form von *Zieh fetten* oder *Backmargarine (shortenings)* ein unverzichtbarer Bestandteil für die Herstellung von Croissant- oder Blätterteig ist. Ein knuspriges und dennoch luftiges Endprodukt stellt hohe Anforderungen an die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Margarine. Qualitativ hochwertige Margarine ermöglicht ein schnelles und effizientes Tourieren. Dies bedingt eine hohe Plastizität und eine definierte Elastizität der Margarine, sodass sich zwischen den Teigschichten keine Teigbrücken bilden, welche ein Aufblättern verhindern. Im Gegensatz zur Backmargarine, muss Speisemargarine eine tiefe Plastizität ohne elastische Komponente aufweisen, damit die Bedürfnisse des Konsumenten befriedigt werden. Sie muss streichbar sein, wenn sie direkt aus dem Kühlschrank genommen wird und genauso, wenn sie bei 30°C auf dem Tisch steht. Ausserdem darf sie nicht nachkristallisieren, das heisst nach Lagerung im Kühlschrank plötzlich hart und brüchig werden.



Abbildung 1: Margarine (links) ist ein Hauptbestandteil von Blätterteig und auch von luftigen Gipfeli (rechts).

Die Initiative zur Erfindung der Margarine ging von Napoleon III. aus, der für Butter ein haltbares Ersatzprodukt suchte, das zur Verpflegung seiner Truppen gedacht war [1]. Margarine besteht aus einer Emulsion von fein dispergierten Fetttropfchen (meist Palmöl) und Wasser. Diese Emulsion wird auf etwa 60°C aufgeheizt und dann gezielt auf ca. 5°C abgekühlt. Während dieses Kühlprozesses kristallisieren die Fettmoleküle (Palmstearin) zu kristallinen Netzwerken und bewirken so die Verfestigung der Margarine. Dieser Abkühlprozess definiert die Kristallstruktur der Fette (Phase) und somit die

Konsistenz und damit auch die, zur Weiterverarbeitung notwendigen Qualitätskriterien. Heute werden diese Prozesse manuell geregelt. Es liegt in den Händen und beim Können des Operators, ob das Endprodukt Margarine brauchbar ist oder wieder eingeschmolzen werden muss. Die Qualität der Margarine ist dadurch grossen Schwankungen unterworfen, genauso jene der Produkte, bei welchen Margarine als Basisbestandteil eingesetzt wird, zum Beispiel bei Blätterteig. Stimmen die Parameter nicht, muss die Margarine wieder eingeschmolzen werden, was eine Unmenge an Energie kostet, die eingespart werden könnte.

Die Vision

Ein kontrollierter Prozess für höchste Qualität

Mit den Schwankungen der Produktqualität aufgrund der hohen Variabilität der Eigenschaften der Ausgangsstoffe und nicht spezifisch optimiert angepassten Prozessparameter kämpft die *Firma EGLI AG* aus Bütschwil (SG) schon seit Jahren. Die Egli AG, gegründet 1888, ist ein weltweit operierendes, in der 4. Generation inhabergeführtes Schweizer KMU im Bereich Maschinen- und Anlagenbau für die Fett-, Butter- und Margarineindustrie. Die Anlagen für die Industrie und Forschungsbetriebe zeichnen sich durch den Einsatz von neuester Technik und modernster Technologie aus.



Abbildung 2: Margarineanlage der Firma Egli AG, Bütschwil – Swiss Quality in reinstem Edelstahl. Auf der rechten Seite sind die Schabewärmetauscher sowie ein Pin-Mischer zu sehen. [2]

Rudenz Egli, der Inhaber und CEO, hatte das Ziel, die Prozesse bei der Herstellung von Margarine besser zu verstehen, zu beherrschen und schlussendlich zu regeln. Möglichst unabhängig von der exakten Zusammensetzung der Fette soll eine gleichbleibende Qualität für das Endprodukt Margarine erreicht werden. Die Innosuisse als Förderinstrument des Bundes für die angewandte Forschung war Rudenz Egli bekannt, und er ist mit der Idee für ein Innovationsprojekt an die Interstaatliche Hochschule für Technik NTB in Buchs (SG) gelangt. Mit Prof. Dr. Daniel Gstöhl vom Institut für Energiesysteme (IES) sowie Prof. Dr. Christoph Würsch und Dr. Erich Carelli vom Institut für Computational Engineering (ICE) konnte ein Team zusammengestellt werden, welches sowohl die Entwicklung von Kältemaschinen als auch die Modellierung, Simulation und Regelung von Prozessen beherrscht. Jedoch fehlte das Wissen um die spezifischen Kristallisationsprozesse und die notwendige in-line, at-line und offline Analytik von Fetten. Lebensmittelentwicklung war bis dahin kein aktiver Forschungsbereich der NTB. Dank dem nationalen thematischen Netzwerk (NTN) *Swiss Food Research* konnte diese Lücke

geschlossen werden. Peter Braun, CEO des NTN Swiss Food Research, vermittelte den Kontakt zum Institut von Prof. Dr. Erich Windhab, Vorsteher des Instituts für Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften der ETH Zürich und eine Koryphäe auf dem Gebiet strömungstechnischer Verfahren zur Mikrostrukturierung von Mehrphasensystemen im Bereich Lebensmittel. Gemeinsam wurden die Ziele und Arbeitspakete für ein Innovationsprojekt für den Nachweis der Machbarkeit der weltweit ersten Anlage für die Margarineproduktion mit modellbasierter Steuerung und inline Prozesskontrolle definiert. Entwickelt wurde ein Hochleistungs-Schabewärmetauscher mit einer zweistufigen Temperiereinheit, der neue Möglichkeiten bei der Kontrolle des Kristallisationsprozesses und damit der Produktqualität schafft. Durch den Vertrieb dieser Anlagen kann die Egli AG Marktführer als Anlagenhersteller im Bereich der Margarineproduktion werden.

Weltrekordmässig kristallisiert

Entwicklung eines neuartigen Schabewärmetauschers: CO₂-Flow-Boiling SSHE

Die Struktur der Fettkristall-Netzwerke in der Wasser-Fett-Emulsion der Margarine bestimmt die Konsistenz, Streichfähigkeit und das Lagerverhalten der Margarine [3] und wird durch den Abkühl-, den Kristallisationsprozess bestimmt. Die Streichfähigkeit wird somit auf physikalischem Weg durch fein abgestimmte Kälteprozesse erreicht, welche garantieren müssen, dass die Fette in der richtigen Kristallform kristallisieren. Da Margarine aber ab einer gewissen Temperatur eine zähflüssige, pastöse, schlecht wärmeleitende Masse wird, ist es schwierig, diese Masse schnell abzukühlen. Dafür benötigt man eine neue Art von Schabewärmetauscher, welcher am Institut für Energiesysteme entwickelt wurde. Mit einem Schabewärmetauscher mit Micro-Channel-Strömungsverdampfung mit zwei Temperaturzonen, die von einer zweistufigen CO₂ Kälteanlage bedient werden, konnte eine Abkühlung erreicht werden für die bislang drei Schabewärmetauscher notwendig waren.

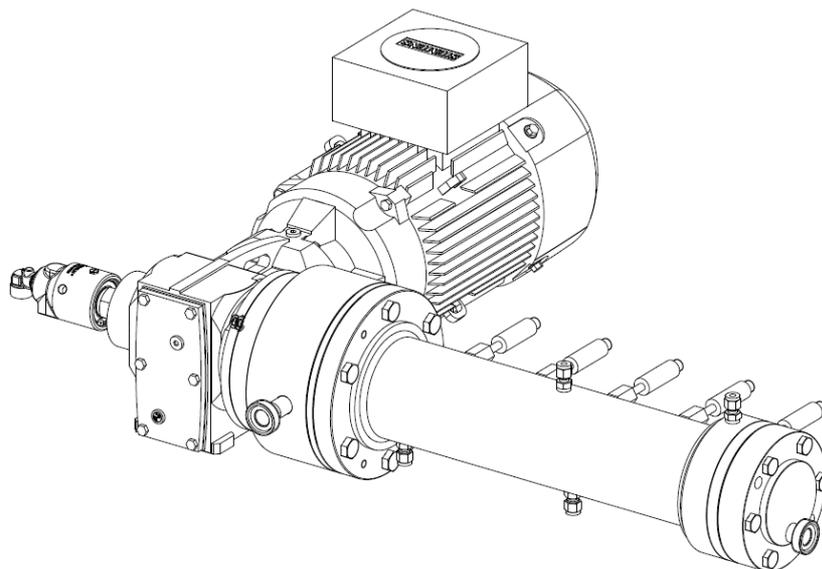


Abbildung 3: Ansicht des neuen Flow-Boiling Schabewärmetauschers, welcher in Kooperation mit der Interstaatlichen Hochschule für Technik Buchs NTB und der Firma Egli AG entwickelt wurde. Ein Asynchronmotor treibt die Messerwellen an, welche die an den Aussenwänden des Kristallisators kristallisierten Fette abschabt.

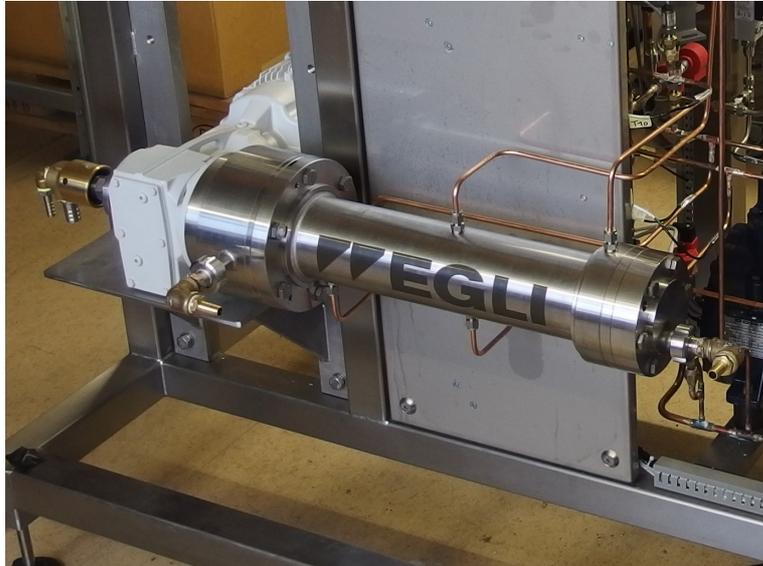


Abbildung 4: Die CO₂-Kälteanlage für den Flow-Boiling Schabewärmetauscher (FB-SSHE) wurde am Institut für Energiesysteme der Interstaatlichen Hochschule für Technik entwickelt. Mit dieser Anlage werden Kühlraten erreicht, welche bisher technisch so nicht realisierbar waren.

Auf die Struktur kommt es an

Modellierung der Kristallisation von Fetten, Prozesskontrolle und Validierung

Palmfette können in sehr unterschiedlichen Kristallphasen kristallisieren, aber nur eine bestimmte Kristallstruktur, die sogenannte β' -Phase ist gewünscht. Es handelt sich hier um eine metastabile Phase, welche entsteht, wenn Margarine möglichst schnell, fast schockmässig abgekühlt wird. Dies wird durch den neuen Flow-Boiling-Schabewärmetauscher erreicht. Was im Innern des Schabewärmetauschers passiert, welche Kristallphasen sich wann und wo bilden, haben Erich Carelli und Christoph Würsch modelliert, mit dem Ziel, hieraus ein vereinfachtes Prozessmodell für die Prozesskontrolle zu entwickeln.

Ausgehend von einem 2D-axialsymmetrischen Finite-Volumen-Simulationsmodell, welches die gekoppelten Gleichungen von Strömung, Phasenumwandlungen sowie den Wärmetransport der Margarine im Schabewärmetauscher berechnet (Abbildung 5), wurde ein eindimensionales reduziertes Modell zur Vorhersage der verschiedenen Kristallphasen und Viskosität der Margarine entwickelt, welches als Beobachter (sog. Digitaler Zwilling) für die Prozessregelung verwendet werden kann. Dieses Modell wurde mit Messungen bei der Firma EGLI AG abgeglichen. Kim Mishra vom Institut für Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften der ETHZ leitete die Versuche bei der Firma EGLI AG, wo in-line die Viskosität der Margarine sowie at-line der Kristallgehalt (SFC: solid fat content) als Funktion der Kühlleistung, der Rotordrehzahl sowie des Massedurchsatzes gemessen wurde. Abbildung 6 zeigt als Beispiel den simulierten Verlauf der verschiedenen Kristallphasen α und β' als Funktion der Position entlang des Schabewärmetauschers im stationären Betrieb für einen Betriebszustand.

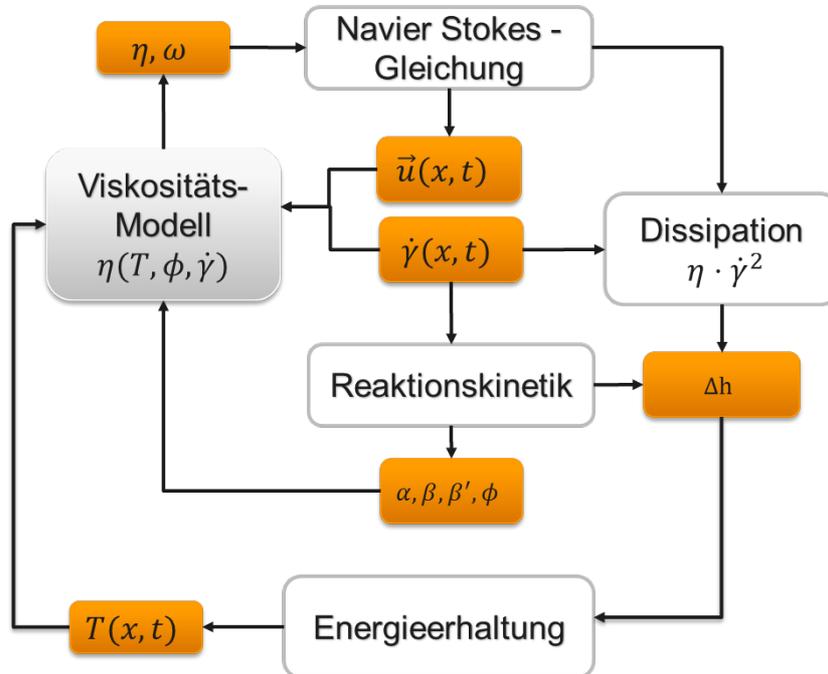


Abbildung 5: Satz von gekoppelten Gleichungen, welche für die Berechnung der Phasenumwandlungen in der Margarine verwendet werden. Die Strömung der Emulsion sowie der pastösen Margarine wird durch die Navier-Stokes-Gleichung beschrieben. Diese bestimmt die Scherrate $\dot{\gamma}$ und mit der Temperatur T auch die Reaktionsgeschwindigkeit der Kristallisationsprozesse. Durch die Kristallisation der einzelnen Phasen und die viskose Reibung innerhalb der Margarine wird Wärme frei, welche durch den Kühlprozess abgeführt werden muss (Energieerhaltung). Die Temperatur T wiederum bestimmt die Viskosität der Margarine.

Die Gleichungen für die Kristallisationskinetik von Margarine wurde aus den Arbeiten von Marangoni und Mazzanti [4] übernommen, jedoch mussten die Werte für die Reaktionsgeschwindigkeiten und die Avrami-Exponenten empirisch skaliert werden, da diese Parameter im Bereich solch hoher Scher- und Kühlraten, wie sie im entwickelten Schabewärmetauscher generiert werden, bisher noch nicht bestimmt wurden. Hierfür wären Messungen am Synchrotron und der Bau eines speziellen Rheometers notwendig. Durch die erzeugten hohen Scherraten an den Schabemessern und die enormen Kühlraten an der Wand des Flow-Boiling-SSHE wird die Reaktionsgeschwindigkeit der Fettkristallisation um Größenordnungen erhöht, was für die Prozesstechnik und die Qualität der Margarine von Vorteil ist. Anstelle von normalerweise drei seriell hintereinander verschalteten Schabewärmetauschern genügt nun ein einziger, was Geld, Zeit und Bauraum spart. Modell und Experiment stimmen gut überein (Abbildung 7). Das Viskositätsmodell sowie die Reaktionskinetik müssen auf das jeweilige Stoffsystem (z.B. Palmöl, Rapsöl) abgestimmt werden.

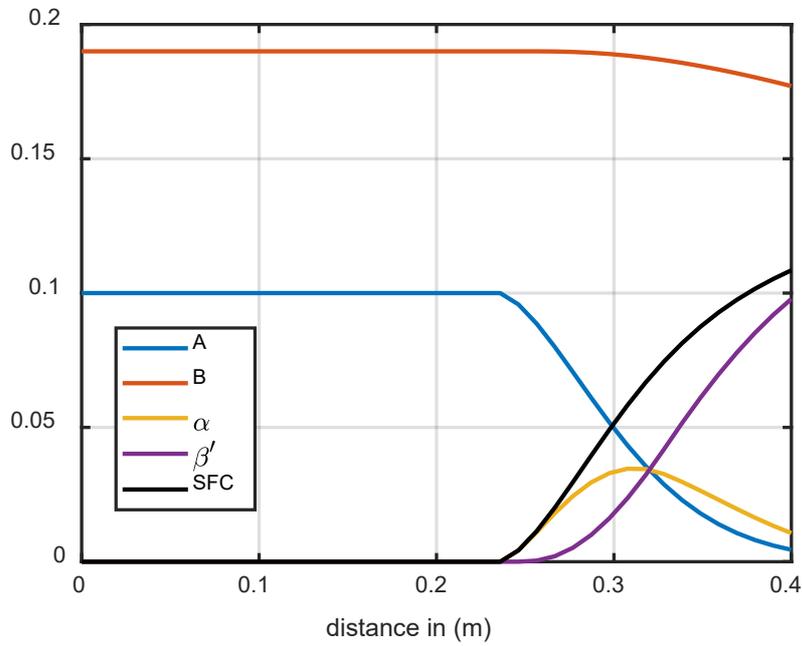


Abbildung 6: Vorhersage der Kristallisationsphasen des eindimensionalen Modells als Funktion der Position entlang des Schabewärmetauschers im stationären Betrieb der Anlage. Beim Austritt aus dem Flow-Boiling Schabewärmetauscher ist die gewünschte β' -Phase dominant vertreten. Der Feststoffanteil (SFC: solid fat content) beträgt etwa 12%.

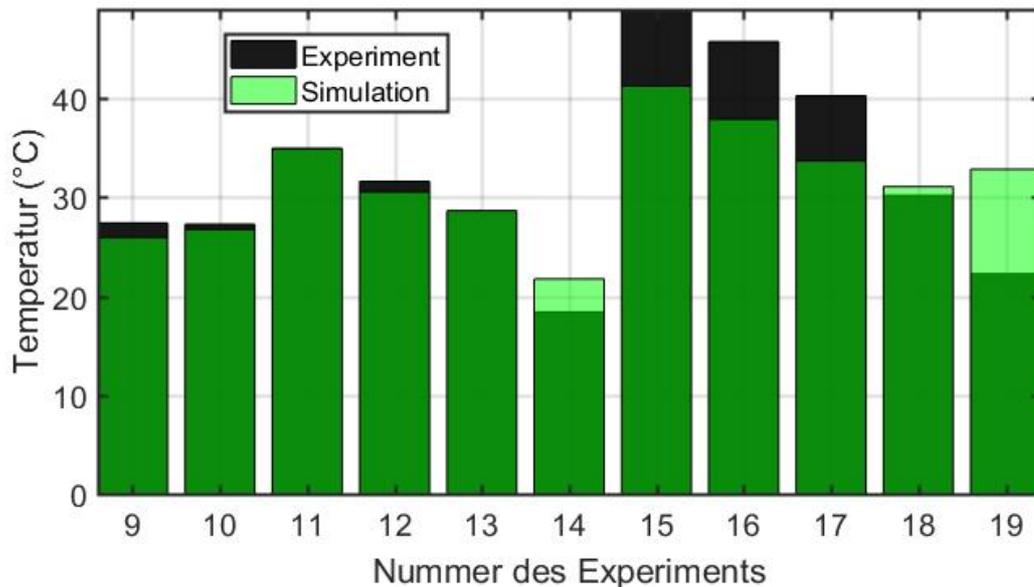


Abbildung 7: Vorhersage der Austrittstemperatur und Validierung mit dem Modell. Die Austrittstemperatur bestimmt die Viskosität der Margarine am Austritt des Schabewärmetauschers. Modell und Experiment stimmen gut überein.

Umsetzung und Weiterentwicklung bei Egli AG

Mit den im Innosuisse-Projekt erarbeiteten Grundlagen ist es möglich ein Scale-up auf einer Produktionsanlage mit Stundenleistungen von ein- oder mehreren Tonnen zu machen. Als erstes wurde bereits eine Butterkühlanlage mit Micro-Channel-Schabewärmetauschern für eine Stundenleistung von 4 Tonnen/Stunde von 19°C auf 6°C gebaut. Diese Produktionsanlage liefert weitere Kühlleistungswerte, welche als Designwerte ins nächste Projekt einfließen.

Im nächsten Weiterentwicklungs-Projekt soll die Standard-Margarineanlage mit Micro-Channel-Schabewärmetauschern ausgerüstet werden. Mit dieser Anlage kann durch gezielte und effizientere Kühlung die Basis für eine automatische Regelung und Rezeptsteuerung gelegt werden.

Schlussfolgerung

Die Vernetzung von Prozesserfahrung, Kältetechnik und mathematischer Modellierung benötigt ein sehr hohes spezifisches Wissen. Deren Koordination mit den Fachleuten vom NTB Buchs, der ETH Zürich und der EGLI AG Bütschwil ergab eine funktionierende, die Erwartungen weit übertreffende Pilotanlage. Überraschend war die extreme Effizienzsteigerung vor allem deshalb, weil die Schaberwärmetauscher-Technologie schon seit 50 Jahren bekannt und in der Praxis umgesetzt ist. Anscheinend hat bisher niemand dieses Wissen vernetzt. Ein weiter grundlegender Faktor des Erfolgs waren die sofortigen Anpassungen des Projektweges in gegenseitigen Abgleichen aufgrund der Zwischenresultate und Erkenntnisse.

Referenzen

- [1.] Claudia Mäder, *Alt, aber noch lange nicht ranzig: Die Margarine wird 150*, NZZ, 18.7.2019
- [2.] Egli AG Process Technology, Wilerstrasse 7, 9606 Bütschwil, <http://www.egliag.com/>
- [3.] Alejandro G. Marangoni, Leendert H. Wesdorp, *Structure and Properties of Fat Crystal Networks*, 2nd Edition, CRC Press (2012), ISBN 9781439887622
- [4.] Mazzanti, A. G. Marangoni and S.H.J. Idziak, *Modeling phase transitions during the crystallization of a multicomponent fat under shear*, Phys. Rev. E 71, 041607 (2005)