# Messung der lokalen Blasengrößenverteilung und des Flüssigkeitsgehalts in wässrigen Schäumen zur Validierung von CFD-Simulationen

# Measurement of local bubble size distribution and liquid content in aqueous foams for the validation of CFD simulations

Christoph Gerstenberg, Eric Morelle, Christopher McHardy, Cornelia Rauh Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lebensmittelbiotechnologie und -prozesstechnik, Königin-Luise Straße 22, 14195 Berlin

Schaum, Blasengröße, Flüssigkeitsgehalt, optische Messungen, elektrische Leitfähigkeit foam, bubble size, liquid content, optical measurements, electrical conductivity

# Zusammenfassung

Unerwünschte Schaumbildung in industriellen Produktionsanlagen wirkt sich häufig negativ auf Massen-, Impuls- und Energietransportvorgänge aus. So kann die unerwünschte Schaumbildung bei Destillations- oder Absorptionsprozessen in der Lebensmittel- und Chemieindustrie zu einem erhöhten Druckverlust führen, folglich können erhebliche ökonomische Einbußen entstehen. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Schaumentstehungsmechanismen und natürlichen Schaumalterungsprozessen sowie Schaumzerstörungsmaßnahmen stellen eine Herausforderung bei der Vorhersage der Schaumentwicklung dar, besonders bei der ingenieurwissenschaftlichen Auslegung von Produktionsanlagen. CFD-Simulationen bieten sich in diesem Zusammenhang an, da die Schaumentwicklung bereits während der Planung von Produktionsanlagen kostengünstig nachgebildet werden kann und somit wertvolle Erkenntnisse über die Entstehung von unerwünschten Schäumen gewonnen werden. Eine Validierung der einzelnen Modelle sowie der gesamten Simulation durch den Vergleich mit experimentellen Daten ist vor einer solchen Anwendung durchzuführen. Im Rahmen dieses Beitrages wird ein experimenteller Aufbau zur Schaumcharakterisierung vorgestellt, der zur Validierung von Modellen zur Beschreibung von Schaumalterungsprozessen und Schaumzerstörungsmaßnahmen dient.

Die Charakterisierung des Schaumes erfolgt mittels einer optischen Messtechnik sowie eine Messung des elektrischen Leitwertes zur Bestimmung des lokalen Flüssigkeitsgehalts. Durch eine automatisierte Bildanalyse können Aussagen über das Schaumvolumen sowie über die zeitliche Veränderung der Blasengröße in Abhängigkeit der Schaumhöhe gegeben werden. Diese lokale und zeitliche Auflösung der Blasengrößenverteilung ist von besonderem Interesse für die Validierung von natürlichen Schaumalterungsprozessen wie Ostwald-Reifung und Koaleszenz. Aus dem Verhältnis des gemessenen elektrischen Leitwerts und dem Leitwert der reinen Flüssigkeit können wiederum Rückschlüsse auf den lokalen Flüssigkeitsgehalt innerhalb des Schaumes gezogen werden, der zur Validierung von Drainage-Modellen Verwendung findet.

# Einleitung

Die Entstehung unerwünschter Schäume in industriellen Produktionsanlagen beeinflusst die Produktion häufig negativ, da Transportvorgänge von Masse, Impuls und Energie durch die Anwesenheit von Schaum oft gestört werden. Die Lebensmittel- und Chemieindustrie berichtet von einer Vielzahl von Prozessen und Produktionsanlagen, die von unerwünschter Schaumentstehung betroffen sind. So kann Schaumbildung zum Beispiel bei Destillationsoder Absorptionsprozessen zu einem erhöhten Druckverlust und einer reduzierten Trennleistung führen oder beim Abfüllen von nicht-karbonisierten Getränken eine Verunreinigung der Behälter und Anlagen hervorrufen (Leuner et al., 2020; Morelle et al. 2021). In der Konsequenz sind damit häufig erhebliche ökonomische Einbußen verbunden.

Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Schaumentstehungsmechanismen und natürlichen Schaumalterungsprozessen sowie der Einsatz von physikalischen Schaumzerstörungsmaßnahmen (McHardy et al., 2018) stellen eine Herausforderung bei der Vorhersage der Schaumentwicklung dar, besonders bei der ingenieurwissenschaftlichen Auslegung von Produktionsanlagen. In diesem Zusammenhang können CFD-Simulationen eine zusätzliche Möglichkeit bieten, die Schaumentwicklung bereits während der Planung von Produktionsanlagen kostengünstig nachzubilden. Somit werden bereits während der Planung wertvolle Erkenntnisse über die Entstehung von unerwünschten Schäumen gewonnen. Als Voraussetzung hierfür ist eine Validierung der einzelnen Modelle sowie der gesamten Simulation durch den Vergleich mit experimentellen Daten nötig. Blasengrößenverteilung und Flüssigkeitsgehalt sind zwei Eigenschaften des Schaumes, die von besonders großem Interesse in Schaumsimulationen sind.

Zur Messung des Flüssigkeitsgehalts in Schäumen wurde eine Vielzahl von verschiedenen Methoden und experimentellen Versuchsanlagen in der Literatur beschrieben. Eine Methode zur Bestimmung des Flüssigkeitsgehalts ist es, den entstandenen Schaum in kleinere Volumina zu unterteilen und nach dem vollständigen Schaumzerfall, den Flüssigkeitsgehalt volumetrisch oder gravimetrisch zu bestimmen (Varley et al., 2004). Eine weitere Möglichkeit ist es, den Flüssigkeitsgehalt mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit zu bestimmen. Hierfür wird das Verhältnis der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit im Schaum und der Leitfähigkeit der reinen Flüssigkeit gebildet und über eine empirische Gleichung in den Flüssigkeitsgehalt umgerechnet (Feitosa et al. 2005). Verschiedenste Konfigurationen dieses Experiments sind in der Literatur beschrieben, die sich unter anderem im Aufbau und Anordnungen der Elektroden, Material und Dimension des Aufschäumbehälters sowie Messmethode und -aufbau zur Bestimmung der Leitfähigkeit unterscheiden (Karapantsios und Papara, 2008; Feitosa und Durian, 2008; Cilliers et al., 2001).

Die lokale und zeitlich aufgelöste Blasengrößenverteilung ist in vielen Anwendung von großem Interesse. Die hierbei jedoch entstehenden großen Mengen an Bildmaterial müssen in der Regel durch automatisierte Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet werden. Herkömmliche Bildverarbeitung stößt aber besonders bei realen Flüssigkeiten, die Störgrößen wie Partikel aufweisen können, häufig schnell an ihre Grenzen. Daher werden immer häufiger künstliche neuronale Netze (KNN) zur Bildverarbeitung aufgrund ihres robusten Verhaltens verwendet. Für die Bildsegmentierung gibt es bereits Veröffentlichungen zu Netzarchitekturen als auch vortrainierten Netzen (Ronneberger et al., 2015; Panckow et al., 2020). Diese Netze können für eine verbesserte Genauigkeit mit eigenen Trainingsdaten auf die individuelle Anwendung angepasst werden.

Lebensmittelsysteme stellen komplexe Mischungen einer Vielzahl unterschiedlicher Stoffklassen (Lipide, Kohlenhydrate, Proteine, Sekundärmetaboliten, Ballaststoffe, u.w.) dar, die zusätzlich stark in ihren physico-chemischen Eigenschaften schwanken können. Weiterhin können sich Lebensmittel stark in ihren optischen Eigenschaften (Transparenz) sowie ihrer elektrischen Leitfähigkeit untereinander unterscheiden. Häufig liegt die elektrische Leitfähigkeit der reinen Flüssigkeit in so niedrigen Bereichen, dass Flüssigkeitsgehaltsmessungen, besonders bei hohen Gasanteilen, an ihre Grenzen stoßen. Daher kann es von Vorteil sein, reale Stoffsysteme mit Modellflüssigkeiten für eine bessere Reproduzierbarkeit sowie Messgenauigkeit zu ersetzen.

Daher werden in diesem Beitrag, erste Ergebnisse zu Blasengrößen- und Flüssigkeitsgehaltsmessungen in Schäumen sowie Modellflüssigkeiten zum Ersatz von Lebensmittelsystemen vorgestellt.

# Material und Methoden

Das Experiment zur Charakterisierung von wässrigen Schäumen besteht aus einer zylindrischen Glassäule mit einem Durchmesser von 24 mm und einer Höhe von 700 mm. Alle 70 mm sind abwechselnd rechteckige Sichtfenster (33x20 mm) sowie Anschlüsse zum Einsetzen von kreisförmigen Elektroden aus Kupfer mit 15 mm Durchmesser sowie Temperatursensoren (LM35, Fa. Texas Instruments) in das Rundrohr eingesetzt. Als Flüssigkeitsreservoir dient ein 200 ml Erlenmeyerkolben mit Anschlüssen für eine zylindrische Glasfritte mit Porositätsklassen 0 und 1 (nach ISO 4793:1980) zum Begasen mit Luft, einem Thermoelement (Typ K) zur Überwachung der Temperatur und einem Zulauf zum Befüllen der Flüssigkeit. Zum Einstellen des Luftvolumenstroms wird ein Massenstromregler (GF40, Fa. Brooks Instrument) verwendet. Mit einer Heizplatte kann die Flüssigkeit mit einem konstanten Wärmestrom erwärmt werden. Zwei Industriekameras (acA2040-55um und acA2440-35um, Fa. Basler) zeichnen sowohl den Schaum in der gesamten Glassäule auf als auch die erste Blasenschicht am Sichtfenster. Die elektrische Leitfähigkeit im Schaum wird zwischen zwei gegenüberliegenden Elektroden über eine Spannungsmessung (10 kHz bei 1 V) bestimmt. Um Querflüsse zwischen unterschiedlichen Elektrodenpaaren zu verhindern, wird der Strom zu jedem Zeitpunkt nur an einem Elektrodenpaar angelegt, wobei maximal 20 Messungen pro Sekunde pro Elektrodenpaar möglich sind. Aus dem Verhältnis des gemessenen spezifischen elektrischen Leitfähigkeitswerts und dem Leitfähigkeitswert der reinen Flüssigkeit, kann der Flüssigkeitsanteil über eine empirische Korrelation bestimmt werden (Feitosa et al. 2005). Bei thermisch erzeugten Schäumen wird der Leitwert der reinen Flüssigkeit an die gemessene Temperatur im Schaum angepasst. Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit (HYT 939, Fa. IST AG) der Umgebung werden zusätzlich überwacht.

# Versuchsmedien

Als Versuchsmedien wurden folgende Lebensmittel untersucht: Magermilch aus Magermilchpulver der Fa. Sachsenmilch; Kartoffelfruchtwasser, Fa. Emsland Group; Bierwürze aus Malzextrakt ("Bavarian Pilsner") der Fa. Weyermann und Orangensaft aus Konzentrat der Fa. Döhler. Da Lebensmittel stark in ihren physicochemischen Eigenschaften schwanken können, stammen alle Versuchsmedien aus derselben Charge. Als Referenz wurde ein Wasser-Tensid-Gemisch, ein Alkansulfonat (SAS) mit einer Konzentration von 0,03 Gew.-% der Fa. WeylChem Performance verwendet.

#### Durchführung der Versuche

Vor jedem Versuch wurde eine Kalibrierung der Kamera (Single Camera Calibrator, Fa. The MathWorks), um Linsenverzerrungen herauszurechnen, sowie eine 2-Punkt Kalibrierung der Leitfähigkeitsmessung durchgeführt. Das Versuchsmedium wurde anschließend über den seitlichen Anschluss am Erlenmeyerkolben eingefüllt, um ein vorzeitiges Benetzen der Glassäule mit dem Versuchsmedium auszuschließen. Da die Schaumunterkante während der Schaumentwicklung stetig sinkt, wurde ein minimales Flüssigkeitsvolumen von 345 ml bestimmt, das es ermöglicht, die Schaumunterkante während der gesamten Messung zu detektieren. Nach dem Befüllen wurde durch Begasen mit einen konstanten Luftvolumenstrom von 50 ml/min oder durch Sieden mit einer konstanten Heizleistung von 180 W Schaum erzeugt. Bild- und Abtastraten für die Kameras bzw. die Leitfähigkeitsmessungen sowie die Beleuchtung wurden an die Dynamik bzw. optischen Eigenschaften der Schaumbildung des jeweiligen Versuchsmediums individuell angepasst. Experimente wurden abgebrochen, wenn entweder die Schaumoberkannte eine Höhe von 700 mm erreicht hatte oder eine Gleichgewichtsschaumhöhe erreicht wurde. Nach jeder Messung wurde die Messsäule gründlich mit Leitungswasser, Ethanol und abschließend destilliertem Wasser gewaschen und anschließend mit Luft getrocknet. Abschließend wurde die Glassäule auf mögliche Verunreinigungen kontrolliert, da selbst kleinste Verunreinigungen, wie Rückstände von Reinigungsflüssigkeiten, Fingerabdrücke oder Staub die Schaumhöhe stark beeinflussen.

# Bestimmung der temperaturabhängigen elektrischen Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit des Versuchsmediums wurde mit einem Leitfähigkeits-Messgerät mit einer 2-pol. Messzelle (GMH 3431, Fa. Greisinger) im Bereich von 20 °C bis 100 °C, in 20 K Schritten gemessen. Dafür wurde eine abgedeckte Probe in einem Wasserbad erwärmt, bis die konstante Temperatur im Inneren der Probe erreicht wurde. Anschließend wurde die elektrische Leitfähigkeit in dreifacher Wiederholung bestimmt. Alle Versuchsmedien weisen einen linearen Zusammenhang zwischen elektrischer Leidfähigkeit und Temperatur auf, der über eine lineare Regression bestimmt wurde.

# Auswertung der optischen Messungen

Für die Auswertung des Bildmaterials wurden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt. Zur Bestimmung der Schaumhöhe konnte ein einfaches Bildverarbeitungsverfahren entwickelt werden. Dafür wurde das Schwarzweißbild als erstes invertiert, anschließend für eine bessere Abgrenzung des Schaums vom Hintergrund der Kontrast angepasst und abschließend eine Binärisierung des Bildes durchgeführt, vergleiche Abb. 1, Mitte. Die Schaumhöhe konnte nun als Differenz zwischen der Schaumober- und Schaumunterkante bestimmt werden.

Da die Schaumblasen je nach Versuchsmedium verschiedene Morphologien, Größen, Lamellendicken und dadurch Transparenz besitzen können, wurde für die Auswertung ein künstliches neuronales Netzwerk (KNN) genutzt. Das Netzwerk ist ein "Convolutional Neural Network" mit U-Net-Architektur (Ronneberger et al., 2015). Erste Trainingsergebnisse des Netzes sind in Abb. 1, rechts dargestellt und zeigen bereit gute Übereinstimmung zwischen der Blasenannotation (3) und der Blasendetektion durch das KNN (2).





Abb. 1: Links: Zeitlicher Verlauf der Schaumhöhe von Magermilch, Aufschäumung mit Luft. Mitte: Bestimmung der Schaumhöhe vom Originalbilds über Invertierung, Kontrastanpassung und Binärisierung.

Rechts: 1: Originalbild, 2: Blasendetektion durch KNN, 3: Blasenannotation.

#### Erstellen von Modellflüssigkeiten

Um die Stoffeigenschaften der Lebensmittel nachzubilden, wurden wässrige Lösungen unter Zugabe von verschiedenen Zusatzstoffen hergestellt. Verschiedene Konzentrationen von NaCl (Fa. Millipore Corporation), Hydrokolloiden (Carragen, Fa. Sigma-Aldrich; Pullulan, Fa. Tokyo Chemical Industry) und Tensiden (SAS, Fa. WeylChem Performance; Tween20, Fa. Merck-Schuchardt; Tween80, Fa. Sigma-Aldrich) wurden eingewogen und anschließend für mindestens 30 min gerührt, bis alle Zusatzstoffe restlos aufgelöst wurden. Die hergestellten Lösungen wurden innerhalb eines Tages vermessen, da es bei einer längeren Lagerung zu einer Veränderung der Stoffeigenschaften auf Grund von Abbaureaktionen kommen kann.

Die Dichtemessungen wurden mit einem Biegeschwinger (Biegeschwinger DMA 4100 M, Fa. Anton Paar) bei 20 °C und in Dreifachbestimmung durchgeführt. Für die Bestimmung der dynamischen Viskosität wurde ein Rotationsviskosimeter (Rheometer MCR 102, Fa. Anton Paar) mit einem Doppelspalt-Messsystem verwendet. Um eine verbesserte Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu erhalten, wurden die Messflüssigkeiten für 60 s bei einer konstanten Scherrate von 250 s<sup>-1</sup> vorgeschert. Aus der Rücklaufkurve wurde über eine lineare Regression die dynamische Viskosität bestimmt. Alle Messungen erfolgten bei 20 °C und in Dreifachbestimmung. Mit einem Tensiometer (Force Tensiometer-K11, Fa. Krüss) wurde die statische Oberflächenspannung mit der Plattenmethode nach Wilhelmy ermittelt. Nach jeder Messung wurde das Messsystem gründlich mit Ethanol und anschließend destilliertem Wasser gewaschen. Um mögliche Rückstände auf der Messplatte zu entfernen, wurde diese abschließend abgeflammt. Um die Oberflächenspannung im Gleichgewichtszustand zu erhalten, wurde ein zeitliches Mittel aus einhundert Messpunkten gebildet. Zwischen zwei Messpunkten lagen jeweils 10 s. Alle Messungen fanden bei 20 °C und mindestens in Dreifachbestimmung statt. Um ein Maß für die Schaumfähigkeit der Messflüssigkeiten zu erhalten, wurde die zeitaufgelöste Schaumhöhe in einem Schaummessgerät (DFA100, Fa. Krüss) bestimmt. Die Erzeugung von Schaum erfolgte durch die Zufuhr eines konstanten Luftvolumenstroms von 1 L/min für 20 s. Anschließend wurde optisch die maximale Schaumhöhe bestimmt. Zum Aufschäumen wurde eine Glasfritte mit der Porositätsklassen 1 nach ISO 4793:1980 und ein Flüssigkeitsvolumen von 60 ml verwendet. Messungen der Schaumfähigkeit erfolgten mindestens in Dreifachbestimmung und bei 20 °C.

# Ergebnisse

# Schaumhöhe

In Abb. 2 sind Ergebnisse des pneumatischen Aufschäumens in der 700 mm Glassäule als zeitlicher Verlauf der Schaumhöhe beispielhaft für Magermilch mit Wiederholungen (links) und der Mittelwert für die verschiedenen Versuchsmedien (rechts) dargestellt. Es konnte festgestellt werden, dass die Schaumhöhe sehr sensibel auf die Umgebungsbedingungen reagiert. Eine Änderung der Raumtemperatur um wenige Grad Celsius oder Veränderungen der relativen Luftfeuchtigkeit von 10 %, resultieren bereits in einer Abweichung der Schaumhöhe um einige Zentimeter. Besonders deutlich war dieser Effekt bei der thermischen Schaumbildung zu beobachten. Aus den pneumatischen Schaumhöhenverläufen der einzelnen Versuchsmedien ist klar zu erkennen, dass Orangensaft und Bierwürze ein weniger starkes Schaumverhalten aufweisen als die restlichen Medien. Dieses Verhalten der Schaumfähigkeit ist in qualitativer Übereinstimmung mit Versuchen, die im DFA100 Schaummessgerät durchgeführt wurden.



Abb. 2: Links: Schaumhöhe von Magermilch für sechs Wiederholungen als Funktion der Zeit. Rechts: Zeitlicher Verlauf der Schaumhöhe von Magermilch, SAS, Bierwürze, Orangensaft und Kartoffelfruchtwasser.

# Blasengrößen

In Abb. 3 sind beispielhaft für Magermilch (links) und Orangensaft (rechts) die Blasenbilder dargestellt. Die Bilder wurden bei einer Höhe von 218 mm und 518 mm oberhalb des Bodens bzw. einer Höhe von 43 mm und 343 mm oberhalb des Flüssigkeitsspiegels vor dem Aufschäumen aufgenommen. Für Magermilch ist eine klare Vergröberung der großen Blasen von ca. 5 mm auf mehr als 10 mm zu erkennen. Weiterhin kann festgestellt werden, dass die geringe Schaumfähigkeit des Orangensafts dazu führt, dass nach der gleichen Zeit der Flüssigkeitsstand höher liegt, da weniger Schaum gebildet wurde. Hier kann der klare Übergang vom Kugelschaum zum Polyederschaum erkannt werden. Gegenwärtig ist nur eine qualitative Auswertung der Blasenbilder möglich, da das KNN für eine zuverlässige Blasensegmentierung an weiteren Trainingsbildern trainiert werden muss.



Abb. 3: Magermilch (links) und Orangensaft (rechts): Höhe über dem Boden: 218 mm und 518 mm; Höhe oberhalb des Flüssigkeitsspiegels: 43 mm und 343 mm. Der Flüssigkeitsspiegel liegt bei 175 mm.

# Flüssigkeitsgehalt im Schaum

Für die Flüssigkeitsgehaltmessungen im Schaum wurde ein Tensid-Wasser-Gemisch (SAS, 0,03 Gew.-%) hergestellt und pneumatisch aufgeschäumt. In Abb. 4 rechts ist der zeitliche Verlauf des Flüssigkeitsgehaltes über die Höhe der Schaumsäule aufgetragen. In Abb. 4, links und in der Mitte sind zum Vergleich die Schaumhöhe sowie die Blasengröße bei 218 mm oberhalb des Bodens bzw. 43 mm oberhalb der Schaumunterkante dargestellt. Es ist klar ein trockener Polyederschaum zu erkennen, was im Einklang mit den Flüssigkeitsgehalten steht, da die Grenze für Polyederschaum bei unter 5 % Flüssigkeit liegt (Drenckhan und



Abb. 4: Links: Schaumhöhe des Tensid-Wassergemisches zur Zeit der Flüssigkeitsgehaltsmessungen. Mitte: Bild der Blasengrößen bei 218 mm oberhalb des Bodens. Rechts: Verlauf der Flüssigkeitsgehaltmessungen für verschiedene Höhen in der Säule. Hutzler, 2015). Weiterhin ist erkennbar, dass der Flüssigkeitsgehalt mit zunehmender Schaumhöhe sinkt, gleichzeitig trocknet der Schaum am oberen Rand langsamer aus als nah am Flüssigkeitsspiegel. Hier sind weitere Experimente geplant, die die freie und erzwungene Drainage genauer untersuchen sollen.

# Modellflüssigkeit

Für die Modellflüssigkeit wurden Dichte, dynamische Viskosität und statische Oberflächenspannung von Magermilch nachgestellt sowie anschließend die Schaumhöhe gemessen, vergleiche Tabelle 1. Für die Dichte sowie die dynamische Viskosität wurden bereits sehr gute Übereinstimmungen zwischen Versuchsmedium und Modellflüssigkeit erzielt mit einer Abweichung von weniger als ein Prozent. Bei der Modellflüssigkeit 1 liegt die Abweichung für die statische Oberflächenspannung unter 5 Prozent, jedoch weicht die Schaumhöhe im DFA100 um mehr als das zehnfache von der Magermilch ab. Für die Modellflüssigkeit 2 wurde die Tensid-Konzentration anhand eines Wasser-Tensid-Gemisches eingestellt. Hier konnte eine Übereinstimmung der Schaumhöhe erzielt werden, jedoch wurde die statische Oberflächenspannung weit unterschritten. Die Vermutung ist, dass es zwischen dem Salz und dem ionischen Tensid zu Interaktionen kommt. So wurde berichtet, dass verschiedene Salze in hohen Konzentrationen in der Lage sind, die Ladungen der ionischen Tenside abzuschirmen (Qazi et al., 2020). Dadurch werden elektrostatische Abstoßungskräfte der Tenside an der Grenzfläche reduziert, wodurch wiederrum die Tensid-Konzentration an der Grenzfläche steigen kann und die statische Oberflächenspannung sinkt. Gleichzeitig wird die Adsorptionskinetik der Tenside an den Grenzflächen reduziert, wodurch die Zeit bis zur Sättigung der Oberfläche mit Tensiden stark erhöht wird (von Millisekundenbereich hin zum Sekundenbereich) (Qazi et al., 2020). Diese starke Reduktion der Adsorptionsgeschwindigkeit des Tensids an die Grenzfläche ist wahrscheinlich der Grund für die reduzierte Schaumhöhe. Eine Alternative sind nicht-ionische Tenside, da diese den Vorteil haben, nicht von der Interaktion mit Salzen betroffen zu sein. In weiteren Versuchen mit nicht-ionischen Tensiden (Tween 20 und Tween 80) führte aber die generell langsamere Adsorptionsgeschwindigkeit von nicht-ionischen Tensiden zu ähnlichen geringen Schaumhöhen. Eine vielversprechende Alternative ist Saccharose als ein Ersatz für die Salze. Der Nachteil an Saccharose ist zwar, dass sowohl Dichte als auch Viskosität eine Funktion der Konzentration sind, dafür aber keine Interaktion mit ionischen Tensiden besteht. Es konnte mit Saccharose als Ersatz für NaCl und bei gleicher Tensid-Konzentration wie in Modellflüssigkeit 2 bereits eine wesentlich höhere Schaumhöhe von ca. 22 mm erzielt werden. Auch hier sollen weitere Experimente folgen, in denen andere Versuchsmedien nachgestellt werden.

Tabelle 1. Obersicht der Stoffeigenschaften für Magemilich und verschiedene Modelinussigkeiten.				
	Magermilch	Modellflüs-	Modellflüssig-	Wasser-Tensid-
	-	sigkeit 1	keit 2	Gemisch (SAS)
Dichte [g / cm <sup>3</sup> ]	1,03616	1,03664	1,03664	/
Dynamische Viskosität	1,983	2,010	1,999	/
[mPa s]				
Statische Oberflächen-	48,04	46,80	28,11	49,30
spannung [mN/m]				
Schaumhöhe [mm]	42,3	3	37	/
SAS-Konzentration [g/l]	/	0,003301	0,05282	0,05282

Tabelle 1: Übersicht der Stoffeigenschaften für Magermilch und verschiedene Modellflüssigkeiten.

# Zusammenfassung

Es kann festgehalten werden, dass sowohl bei der Blasengrößenmessung als auch bei der Flüssigkeitsgehaltmessung vielversprechende Ergebnisse erzielt wurden, die in nachfolgenden Experimenten weitergeführt werden sollen. Das KNN zur Bildverarbeitung soll für eine noch bessere Blasendetektion spezifisch mit neuen Trainingsdaten nachtrainiert werden. Die Flüssigkeitsgehaltmessungen bilden bereits den zu erwartenden Flüssigkeitsverlauf über die Schaumhöhe in Abhängigkeit der Zeit plausibel ab. Um Lebensmittelsysteme mit Modellflüssigkeiten nachzustellen ist ein vielversprechender Ansatz gefunden worden, der die Schaumeigenschaften für Magermilch bereits gut nachstellen kann. Auch hier sind weitere Experimente nötig, um andere Versuchsmedien auch in ihren Schaumeigenschaften nachzustellen und mit Hilfe transparenter Modellsysteme optische Messungen zu ermöglichen.

# Danksagung

Wir bedanken uns für die Finanzierung unserer Forschung durch das Programm zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über den Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI, Bonn) im Rahmen des DFG/AiF-Cluster 6 - TP 8 (AiF 5 PN).

#### Literaturverzeichnis

**Cilliers, J. J.; Xie, W.; Neethling, S. J.; Randall, E. W.; Wilkinson, A. J., 2001**: "Electrical resistance tomography using a bi-directional current pulse technique", Meas. Sci. Technol. (Measurement Science and Technology), 12, pp. 997-2001

Drenckhan, W.; Hutzler, S., 2015: Structure and energy of liquid foams", Advances in Colloid and Interface Science, 224, pp. 1-16

**Feitosa, K.; Durian, D. J., 2008**: "Gas and liquid transport in steady-state aqueous foam", Eur. Phys. J. E (The European Physical Journal E), 26, pp. 309–316

Feitosa, K.; Marze, S.; Saint-Jalmes, A.; Durian, D. J., 2005: "Electrical conductivity of dispersions: from dry foams to dilute suspensions", J. Phys.: Condens. Matter (Journal of Physics: Condensed Matter), 17, pp. 6301–6305

**Karapantsios, T. und Papara, M., 2008**: "On the design of electrical conductance probes for foam drainage applications", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 323, pp. 139–148

Leuner, H.; Gerstenberg, C.; Lechner, K.; McHardy, C.; Rauh, C.; Repke, J., 2020: "Overcoming unwanted foam in industrial processes of the chemical and food industry – an ongoing survey", Chemical Engineering Research and Design, 163, pp. 281-294

McHardy, C.; Thünnesen, J.; Horneber, T.; Kostova, J.; Hussein, M.; Delgado, A.; Rauh, C., 2018: "Active control of foams by physically based destruction mechanisms", Special Issue: 89th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), 18

**Morelle, E.; Rudolph, A.; McHardy, C.; Rauh, C., 2021**: "Detection and prediction of foam evolution during the bottling of noncarbonated beverages using artificial neural networks", Food and Bioproducts Processing, 128, pp. 63-76

Panckow, R. P.; McHardy, C.; Rudolph, A.; Muthig, M.; Kostova, J.; Wegener, M.; Rauh, C., 2020: "Characterization of fast-growing foams in bottling processes by endoscopic imaging and convolutional neural networks", Journal of Food Engineering, pp. 110-151

Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T., 2015: "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation"

Qazi, Mohsin J.; Schlegel, Simon J.; Backus, Ellen H. G.; Bonn, Mischa; Bonn, Daniel; Shahidzadeh, Noushine, 2020: " Dynamic Surface Tension of Surfactants in the Presence of High Salt Concentrations ", 36, 7956–7964

Varley, J.; Boyd, J.W.R; Gallagher, S.; Brown, A.K; Dodd, P.W, 2004: "Correlation between conductivity and liquid hold-up for a multi-segment industrial foam probe for fermentation", Biochemical Engineering Journal, 19, pp. 199-210