

Herstellung von Nanoemulsionen aus Gewürzextrakten mittels Ultraschalltechnologie

Processing nanoemulsions based on spice extracts using ultrasound technology

M. DOBBERSTEIN, I. DEDERER und K. TROEGER

Zusammenfassung

Zur Verarbeitung von Gewürzextrakten in Kochschinken sollten stabile Nano-Emulsionen (Öl-in-Wasser = Ö/W) mittels Ultraschalltechnologie hergestellt werden. Für diesen Zweck wurde eine Methode entwickelt, um 1%ige Ö/W-Emulsionen aus Rosmarinextrakt, α -Tocopherol und Flüssigrauch mittels Ultraschallprozessor UP400S herzustellen. Dazu wurden die Geräteparameter Temperatur (θ), Amplitude (A), Zyklus (Z), Beschallungszeit (t), sowie Verdünnungseffekt und Lösungsverhalten der Zutaten optimiert. Die erzielte Partikelgröße wurde mittels statischer Lichtstreuung gemessen. Aus den gesammelten Erkenntnissen der Vorversuche ergaben sich für die Ultraschallbehandlung die Parameter: $\theta_0 = 70$ °C; $Z = 0,7$; $A = 0,75$, $t = 180$ s. Die Partikelgröße der Emulsionströpfchen bewegte sich überwiegend in einer Größenordnung von 42 nm bis 2,6 μ m. Den größten Anteil stellten dabei Tropfen mit einer Partikelgröße von 134 nm und 670 nm. Die entwickelte Methode ermöglicht die Herstellung von homogenen und stabilen Emulsionen für die Weiterverarbeitung in Kochschinken.

Summary

This study deals with the production of nano-emulsions based on spice extracts using the ultrasound technology. A method to create one percent o/w-emulsions by usage of the ultrasound processor UP400S was therefore developed using rosemary extract, α -tocopherol and liquid smoke. The parameters temperature (θ), amplitude (A), cycle (Z), time (t), thinning effect and dilution of raw materials have been optimized. In cooperation with the MRI Karlsruhe, Department of Food Technology and Bio Process Engineering, the particle size was determined using the static light scattering. As results of this study, the optimized parameter $\theta = 70$ °C; $Z = 0.7$; $A = 0.75$, $t = 180$ s have been discovered to process emulsions using the ultrasound technology. Particle diameters varied from 42 nm to 2.6 μ m. Most of the particles were detected at sizes of 134 nm and 670 nm. The developed method to process homogeneous stable emulsions may then be used for further processing of cooked ham.

Schlüsselwörter	Ultraschall – Nano-Emulsion – Rosmarin – Gewürzextrakt – Partikelgröße
Key Words	ultrasound – nano-emulsion – rosemary – spice extract – particle size

Einleitung

Für den Einsatz von Gewürzextrakten in Kochschinken sollten mittels Ultraschalltechnologie Nano-Emulsionen hergestellt werden. Durch die vergrößerte Oberfläche von Nano-Lebensmitteln können physikalisch-chemische Eigenschaften verändert werden (MORARU *et al.*, 2009) wie z. B. die Erhöhung des nutritiven Werts durch den Zusatz Wert gebender Inhaltsstoffe

(DRUSCH & HEINS, 2010; WEISS *et al.*, 2009). Der Begriff „Nano-Partikel“ wird derzeit noch kontrovers diskutiert. Verschiedene Regierungsbehörden und wissenschaftliche Einrichtungen definieren Nanomaterialien über neuartige, größenabhängige Eigenschaften (z. B. KÜHLING, 2008; GREINER, 2011). Für die vorliegende Arbeit wird der Begriff Nano-Emulsion, gemäß „International Union of Pure and Applied Chemistry“, für Emulsionen

verwendet, bei denen die Tröpfchengröße in einer Dimension von 10^{-9} Metern (nm) vorliegt.

Die Tröpfchenzerkleinerung kann mit verschiedenen Verfahren, wie z. B. der Hochdruckhomogenisation oder Zerkleinerung mittels Ultra-Turrax erreicht werden. Bei der Anwendung der Ultraschalltechnologie zur Emulsionsherstellung werden die zwei Phasen mittels Beschallung durch Frequenzen oberhalb des menschlichen Hörfrequenzbereiches homogenisiert. Die bei diesem Verfahren entstehenden Kavitationsblasen bewirken eine mechanische Zerkleinerung der Emulsions-Tropfen (JÄHNICH, 2007).

Durch Beschallung als eine Form des Energieeintrags werden chemische Reaktionen und Prozesse beeinflusst (MASON & LORIMER, 2002). Der Energieeintrag unterteilt sich in Reibung, Turbulenzen, Wellen und Kavitation. Der Energieanteil, der in Kavitation umgewandelt wird, hängt von mehreren Faktoren ab (MASON & PETERS, 2003). Zu den wohl bedeutendsten Faktoren zählt die Intensität der Beschleunigung. Gemäß dem „Gesetz von Bernoulli“ erzeugt eine höhere Beschleunigung höhere Geschwindigkeiten und dadurch höhere Druckunterschiede. Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass Vakuum- bzw. Kavitationsblasen anstatt von Wellen in der Flüssigkeit erzeugt werden. Dies bedeutet: Je höher die Beschleunigung, desto höher ist der Energieanteil, der in Kavitation umgewandelt wird (CRAVOTTO & CINTAS, 2006).

Ausgehend von den Ergebnissen vorangegangener Studien im MRI Kulmbach, Institut für Sicherheit und Qualität bei

Fleisch (OSWALD, 2008; SCHIEBELBEIN, 2010) wurde eine Methode entwickelt, um Emulsionen für die Herstellung von Kochschinken mittels Spritzpökelverfahren (MÜLLER, 1988) herzustellen. Dazu wurden die Einflüsse der verschiedenen Herstellungsparameter geprüft und für die Emulsionsherstellung optimiert.

Material und Methode

RosE a (Rosmarin Antioxidans Extrakt 14 % Diterpenphenol Typ-Nr. 027.010, Fa. Flavex)

RosE b (Rosmarin („Flavoxan 14“, Rosmarin Antioxidans Formulierung, Fa. Flavex) Flüssigrauch/Rauchkondensat („Aurium 270“, Tasty Smoke GmbH)

Lezithin ($\geq 97\%$, Carl Roth GmbH & Co KG)

Emulsionsherstellung

Für die Herstellung von Emulsionen aus antioxidativ wirkenden Gewürzextrakten in Kochschinken wurden verschiedene Rezepturen erarbeitet (s. Tab. 1). Es wurde eine Methode für die Herstellung von Emulsionen mittels Ultraschallprozessor (UP400S, Hielscher Ultrasonics GmbH) entwickelt. Untersuchte Parameter waren die Konzentration der öligen Phase (c), die Arbeitstemperatur des Wassers (θ), die Amplitude der Sonotrode (A), Arbeitszyklus der Sonotrode (Z), Beschallungszeit (t), Eintauchtiefe der Sonotrode (h) und die fraktionierte Zugabe der Zutaten (Öl, Wasser und Emulgator). Um den Einfluss des jeweiligen Parameters festzustellen, wurde dieser variiert und die anderen Parameter konstant gehalten. Geprüft wurde auf die Kriterien Homogenität und Stabilität der

Tab. 1: Rezepturen der Versuchs-Emulsionen

Rezeptur	Rosmarinextrakt [ppm]	Carnosolsäure* [ppm]	α -Tocopherol [ppm]	Lezithin [ppm]	Flüssigrauch [ppm]
K	-	-	-	-	-
R	400	44	-	40	-
F	-	-	-	-	400
RT	300	33	100	40	-
FT	-	-	100	10	300
RF	200	22	-	20	200
RFT	150	17	100	25	150

*Anteilig am Rosmarinextrakt, berechnet nach Spezifikation des Herstellers

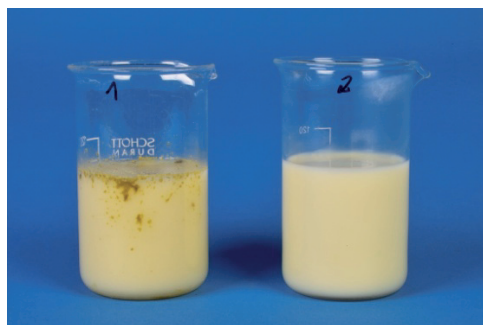


Abb. 1a: Optische Homogenitätsprüfung
l. inhomogen (Ölabsatz), r. homogen

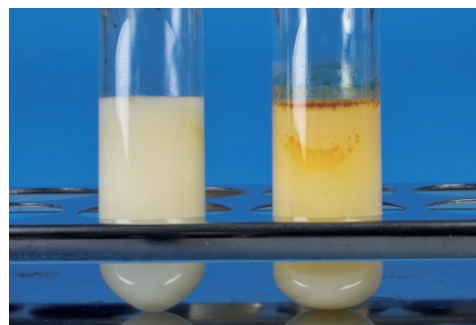


Abb. 1b: Optische Stabilitätsprüfung
l. stabil, r. instabil

Tab. 2: Prüfung der Auswirkung unterschiedlicher Beschallungszeiten in Abhängigkeit der Zyklusdauer

Versuch	c [%]	θ_0 [°C]	Zyklus [%]	Amplitude [%]	Wasser [ml]	t [s]
A1	1,0	55	50	65	99,0	60
A2	1,0	55	50	65	99,0	120
A3	1,0	55	50	65	99,0	180
A4	1,0	55	75	65	99,0	60
A5	1,0	55	75	65	99,0	120
A6	1,0	55	75	65	99,0	180
A7	1,0	55	100	65	99,0	60
A8	1,0	55	100	65	99,0	120
A9	1,0	55	100	65	99,0	180

Tab. 3: Prüfung des Lösungsverhaltens der Inhaltsstoffe

Versuch	c [%]	θ_0 [°C]	Zyklus [%]	Amplitude [%]	Wasser [ml]	t [s]
B1	0,2 ¹⁾	55	50	65	50	15
B2	0,2 ¹⁾	55	50	65	50	30
B3	0,2 ¹⁾	55	50	65	50	60
B4	1,0 ²⁾	55	50	65	99	60
B5	1,0 ²⁾	55	50	65	99	120
B6	1,0 ²⁾	55	50	65	99	180

¹⁾ Konzentration an Lezithin; ²⁾ Konzentration an Rauchcondensat

Emulsionen. Die Bewertung der Homogenität erfolgte mittels 10-Punkte-Skala, wobei 1 = inhomogen und 10 = homogen darstellte (s. Abb. 1a). Die Stabilitätsprüfung erfolgte mittels Zentrifugation (Sorvall RC-5B, Fa. Du Pont Instruments), bei 10.000 U/min über 10 Minuten ohne Kühlung. Von den optisch als homogen mit 1 bis 10 bewerteten Emulsionen, fanden für die Stabilitätsprüfung (s. Abb. 1b), ebenfalls mit 10-Punkte-Skala, nur Emulsionen mit Wertung 7-10 Verwendung. Alle Versuche wurden als Doppelbestimmung in 100 ml Chargen mit dem Sonotrodentyp Spitze H7 (Hielscher Ultrasonics GmbH) mit einer

Zugabe von 10 % Lezithin (ω/ω : Emulgator/Öl) hergestellt.

Vorversuche zur Emulsionsherstellung

Zunächst wurde unter Verwendung von *RosE a* die Auswirkung unterschiedlicher Beschallungszeiten bei unterschiedlichen Zyklen geprüft (s. Tab. 2). Im Anschluss erfolgte der Versuch, den Absatz aus Lezithinpartikeln und Fetttröpfchen am Becherrand zu beseitigen (B1, B2, B3) und die Bestimmung des Lösungsverhaltens von Flüssigrauch (B4, B5, B6) (s. Tab. 3).

Tab. 4: Prüfung der Auswirkung von Wasser- und Lezithinzugabe sowie verschiedener Tauchtiefen der Sonotrode

Versuch	c [%]	θ_0 [°C]	Zyklus [%]	Amplitude [%]	Wasser [ml]	t [s]	Anmerkung
C1	0,5	50	50	65	50; 25; 24,5 ¹⁾	3*60	-
C2	0,5	50	50	65	99,5	1*180	-
D1	1,0	55	50	65	99	1*180	L. gelöst ²⁾
D2	1,0	55	50	65	99	1*180	L. ungelöst ²⁾
D3	1,0	55	50	65	50,25,24 ¹⁾	3*60	L. gelöst ²⁾
D4	1,0	55	50	65	50,25,24 ¹⁾	3*60	L. ungelöst ²⁾
E1	1,0	70	50	65	50,25,24 ¹⁾	3*60	5 – 35 ³⁾
E2	1,0	70	75	65	50,25,24 ¹⁾	3*60	5 - 35 ³⁾
E3	1,0	70	100	65	50,25,24 ¹⁾	3*60	5 - 35 ³⁾
E4	1,0	70	75	65	99	1*180	35 ³⁾
E5	1,0	70	75	65	99	1*180	15 ³⁾
E6	1,0	70	75	65	99	1*180	5 ³⁾

¹⁾ fraktionierte Wasserzugabe²⁾ L. = Lezithin³⁾ Tauchtiefe der Sonotrode in mm

Tab. 5: Prüfung verschiedener Arbeitstemperaturen in Abhängigkeit der Zyklusdauer

Versuch	c [%]	θ_0 [°C]	Zyklus [%]	Amplitude [%]	Wasser [ml]	t [s]
F1	1,0	60	50	65	50,25,24	3*60
F2	1,0	60	75	65	50,25,24	3*60
F3	1,0	60	100	65	50,25,24	3*60
F4	1,0	70	50	65	50,25,24	3*60
F5	1,0	70	75	65	50,25,24	3*60
F6	1,0	70	100	65	50,25,24	3*60
F7	1,0	80	50	65	50,25,24	3*60
F8	1,0	80	75	65	50,25,24	3*60
F9	1,0	80	100	65	50,25,24	3*60

Tab. 6: Prüfung von Amplitude und Zyklus

Versuch	c [%]	θ_0 [°C]	Zyklus [%]	Amplitude [%]	Wasser [ml]	t [s]
G1	1,0	70	50	55	50,25,24	3*60
G2	1,0	70	50	65	50,25,24	3*60
G3	1,0	70	50	75	50,25,24	3*60
G4	1,0	70	50	85	50,25,24	3*60
G5	1,0	70	50	95	50,25,24	3*60
G6	1,0	70	60	55	50,25,24	3*60
G7	1,0	70	60	65	50,25,24	3*60
G8	1,0	70	60	75	50,25,24	3*60
G9	1,0	70	60	85	50,25,24	3*60
G10	1,0	70	60	95	50,25,24	3*60
G11	1,0	70	70	65	50,25,24	3*60
G12	1,0	70	70	75	50,25,24	3*60
G13	1,0	70	70	85	50,25,24	3*60
G14	1,0	70	80	65	50,25,24	3*60
G15	1,0	70	80	75	50,25,24	3*60
G16	1,0	70	80	85	50,25,24	3*60

Der Effekt einer fraktionierten Wasserzugabe (C1, C2) in Zusammenhang mit dem Lösungsverhalten des Lezithins (D1-D4) bzw. der Tauchtiefe der Sonotrode (E1-E6), wurde mit den nächsten Versuchen geprüft (Tab. 4). Als ölige Phase kam *RosE b* zum Einsatz.

Versuche zur Emulsionsherstellung

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Vorversuche wurden verschiedene Arbeitstemperaturen geprüft (s. Tab. 5).

Um die Wirkung des Zusammenspiels aus Amplitude und Zyklus zu ermitteln, wurden aus *RosE a* Emulsionen mit folgenden Parametern (s. Tab. 6) hergestellt und die Versuche mit *RosE b* wiederholt.

Bestimmung der Partikelgröße

Die Partikelgrößenverteilungen wurden vom MRI, Standort Karlsruhe, Institut für Lebensmittel- und Verfahrenstechnik, per statischer Lichtstreuung mit dem Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Ltd., UK) bestimmt. Der Messbereich des Gerätes zur Partikelgrößenverteilung liegt bei 20 nm bis 2000 µm. Alle Proben wurden in der mit Wasser gefüllten Messzelle (Hydro 2000G) bei Raumtemperatur (ca. 22 °C) gemessen, wobei die Pumpeneinstellung bei 1250 U/min und die Rührerdrehzahl bei 500 U/min lag. Die Ermittlung der Partikelgrößenverteilungen erfolgte unter Verwendung des Auswertemodells „General Purpose“ mit den softwareseitigen „Default“-Einstellungen. Die Software (Version 5.60) berechnet die Partikelgrößenverteilung anhand der Detektorsignale unter Anwendung der Mie-Lorenz-Theorie (AMBROSIO & HERNÁNDEZ-FIGUEROA, 2010) und Einbeziehung der für das jeweilige Probenmaterial angegebenen Brechungsindices. Aus jeder Emulsion wurden, 3-4 Tage nach Herstellung, drei Stichproben entnommen und der Messzelle bis zu einer „Obscuration“ von 9 bis 10 % zugegeben. Gemessen wurde jeweils dreimal für 10 s und aus den neun Messungen der Mittelwert berechnet. Die für die Messung benötigten Brechungsindices wurden der Literatur und Analysenzertifikaten des Herstellers entnommen.

Ergebnisse und Diskussion

Mittels Stabilitätstest konnten die visuellen Eindrücke der frisch hergestellten Emulsionen bestätigt werden. Dabei ließ sich feststellen: Je höher die Homogenität war, desto stabiler zeigte sich die Emulsion gegenüber der Flieh-/Schleuderkraft im anschließenden Stabilitätstest.

Bei einer Beschallungszeit von bis zu 180 s waren die Emulsionen mit einer insgesamt längeren Beschallungszeit besser zu bewerten als die Emulsion mit kürzerer Beschallungszeit von 60 und 120 s.

Das Lezithin ließ sich bei einem Anteil von 0,2 % in Wasser ab einer Beschallungszeit von 30 Sekunden homogen im Becherglas lösen. Allerdings wurde durch diesen Schritt keine Verbesserung bei der Herstellung erzielt. Das Lösen des pulverförmigen Lezithins in kaltem Wasser hingegen führte zu homogeneren Emulsionen. Das Rauchkondensat zeigte keinen Unterschied im Vergleich zur Beschallung von Wasser, da das Kondensat keine hydrophoben Substanzen in nennenswerten Konzentrationen enthält. Daher wurde das Rauchkondensat bei der Emulsionsherstellung wie Wasser behandelt. Weiterhin wurde festgestellt, dass die hergestellten Emulsionen auch 7-14 Tage nach der Herstellung, bei 6 °C Lagerung, kaum eine Entmischung der Phasen aufwiesen.

Bei den Versuchen hat sich auch gezeigt, dass die Integration von kurzen Beschallungspausen bei fraktionierter Wasserzugabe zu einer homogeneren Emulsion führt. Dies ist auf den oben beschriebenen Effekt der Kavitationsbildung zurückzuführen. Bei einer Beschallungspause sinkt die Bewegungsgeschwindigkeit der Partikel rapide, wodurch eine erneute Beschleunigung durch die Ultraschallbehandlung ermöglicht wird.

Die einzelnen Ergebnisse der optischen Homogenitäts- und Stabilitätsprüfung sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tab. 7: Ergebnisse der Beurteilung auf Homogenität und Stabilität mittels 10-Punkte-Skala

Versuch	Homogenität	Stabilität	Versuch	Homogenität	Stabilität
A1	1	-	F1	5	5
A2	2	-	F2	4	4
A3	3	1	F3	6	6
A4	3	-	F4	5	5
A5	4	-	F5	7	7
A6	4	2	F6	6	6
A7	4	2	F7	2	-
A8	5	3	F8	3	-
A9	2	-	F9	4	-
B1	5	-	G1	3	-
B2	9	-	G2	4	-
B3	9	-	G3	4	-
B4	10	-	G4	4	-
B5	10	-	G5	3	-
B6	10	-	G6	8,5	8
C1	3	2	G7	9	8
C2	2	2	G8	9	8
D1	5	1	G9	5	-
D2	2	1	G10	5	-
D3	6	1	G11	9	7
D4	6	1	G12	8	7
E1	5	5	G13	7	3
E2	7	7	G14	6	3
E3	6	6	G15	7,5	3
E4	1	-	G16	8	3
E5	1,5	-			
E6	2	-			

Tab. 8: Optimale Parameter für den Ultraschallprozessor für Gewürzextrakt-Emulsionen und Rauchkondensat

c [%]	θ_0 [°C]	Zyklus [%]	Amplitude [%]	Wasser [%]	t [s]
1,0 ¹⁾	70	70	75	50, 25, 24	3*60
10 ²⁾	70	70	75	40, 25, 25	3*60

¹⁾ Konzentration an Öl; ²⁾ Konzentration an Rauchkondensat

Aus der Auswertung der Versuche ergaben sich die in Tabelle 8 dargestellten wirksamsten Parameter für die Herstellung von Gewürzextrakt-Emulsionen mittels Ultraschall. Demnach sollten für die Herstellung mittels UP400S für 1%ige Ö/W-Emulsionen die Wassertemperatur 70 °C, der Sonotrodenzyklus 70 % und die Sonotrodenamplitude 75 % betragen und die Wasserzugabe in 3 Fraktionen mit anschließender Beschallungszeit von jeweils 60 s erfolgen.

Bei Betrachtung der Partikelgrößenmessung muss, um eine Aussage zu dem

Emulsionsgrad treffen zu können, Partikelanzahl und Volumenanteil berücksichtigt werden. Die maximale Partikelanzahl von ca. 10 % der Versuchsemulsionen wurde, unabhängig von der Rezeptur, bei 64-69 nm gemessen (s. Abb. 2a). Den größten Volumenanteil der Versuchsemulsionen machten Partikelgrößen von etwa 42 nm bis 2,6 µm aus. Den maximalen Volumenanteil stellten dabei, je nach Rezeptur, Tropfen mit einer Partikelgröße von 134 nm und 670 nm (s. Abb. 2b). Im Gegensatz zur Partikelanzahl nach Partikelgröße unterschieden sich die Emulsionen im Volumenanteil nach Partikelgröße.

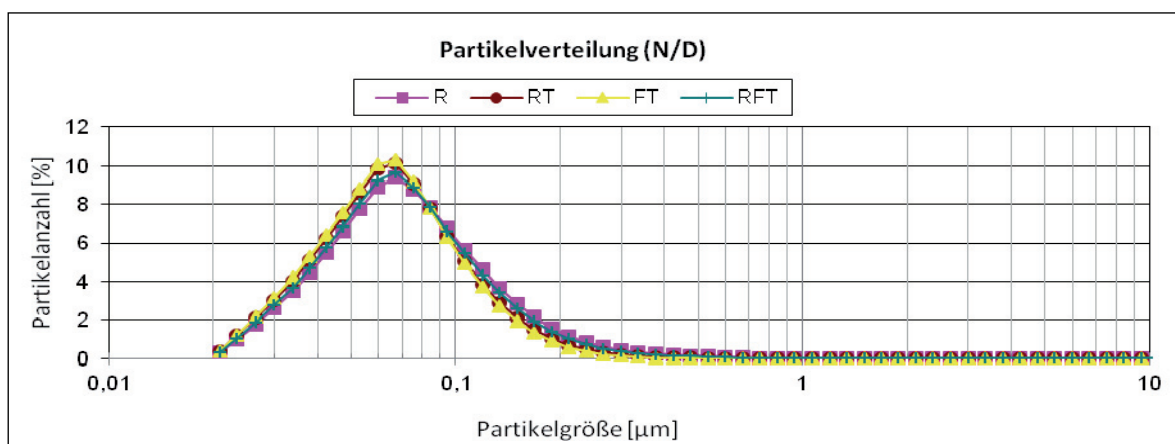


Abb. 2a: Partikelverteilung (P.-Anzahl/P.-Größe)

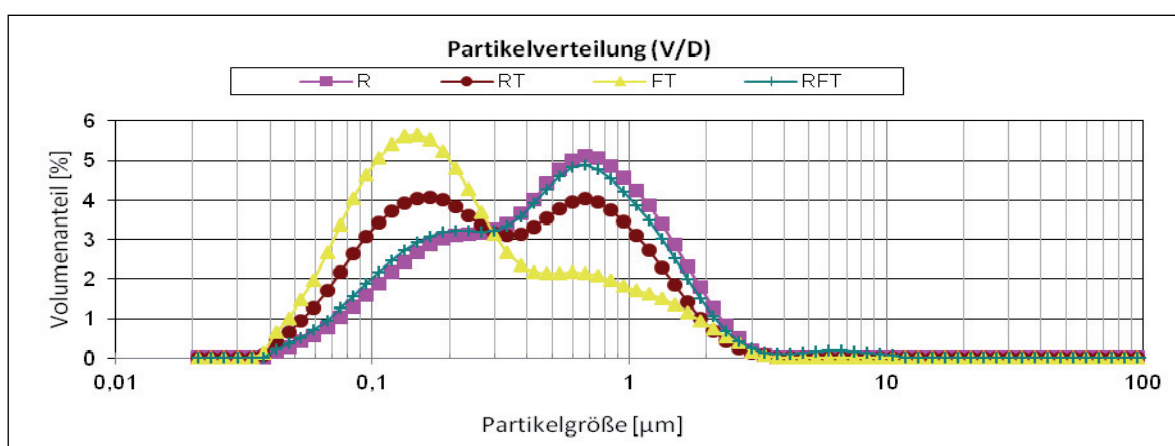


Abb. 2b: Partikelverteilung (Volumenanteil/P.-Größe)

So wurde ein Maximum des Volumenanteils für Emulsion FT (Flüssigrauch mit Tocopherol) bei einer Partikelgröße von 134 nm gemessen. Der Volumenanteil der Emulsionen R (Rosmarinextrakt) und RFT (Rosmarinextrakt mit Flüssigrauch und Tocopherol) zeigte eine Peakspitze bei jeweils 670 nm. Beim Versuch RT (Rosmarinextrakt mit Tocopherol) wurden zwei Peaks von jeweils 4 % Volumenanteil bei 150 und 751 nm gemessen. Allen Messungen gemein ist die Verschiebung des Volumenanteils hin zur geringeren Partikelgröße von etwa 134 nm in Abhängigkeit des Tocopherolanteils bezogen auf die Gesamt-Öl-Phase.

Schlussfolgerung und Aussicht

Unter Benutzung der Ultraschalltechnologie ist es gelungen, Emulsionen im nanoskaligen Bereich zu erzeugen. Die optimale Einstellung der Geräte-Parameter

und Behandlung der Rohmaterialien sind für die erfolgreiche Herstellung entscheidend. Da zwar ein Großteil der Tropfen im nanoskaligen Bereich ermittelt wurde, aber auch Tropfen bei weit mehr als 1 µm detektiert wurden, handelt es sich bei den hergestellten Emulsionen um Nano-Mikro-Emulsionen.

Die geringe Tröpfchengröße der Nano-Mikro-Emulsionen ermöglicht, zusätzlich zu der Wirkung des zugesetzten Emulgators, eine Stabilisierung der Phasen der Emulsionen auch bei längeren Lagerzeiten von bis zu 14 Tagen.

Die Nano-Mikro-Emulsionen sollen im Folgenden bei der Herstellung von Kochschinken eingesetzt werden, mit dem Ziel, durch eine feine und gleichmäßige Verteilung der antioxidativen Substanzen im Fleisch den Oxidationsprozessen im Kochschinken entgegenzuwirken.

Eine Randbedingung dieser Arbeit war die Herstellung der Emulsionen unter Verwendung von Lezithin als Emulgator zu 10 % der Ölphase. Die positiven Ergebnisse der entwickelten Methode zur Emulsionsherstellung und die festgestellte Langzeitstabilität der hergestellten Emulsionen lassen die Frage zu: Kann bei der Herstellung von Emulsionen aus bestimmten Gewürzextrakten der Einsatz von Emulgatoren weiter reduziert oder auf die Verwendung komplett verzichtet werden? Weiterhin von Interesse wäre die Fragestellung, inwiefern sich die hergestellten Emulsionen von etablierten Emulsionen aus Gewürzextrakten auf dem Markt unterscheiden. Um einen derartigen Vergleich anzustellen ist es nötig, dieselben Ausgangsmaterialien zur Herstellung der Nano-Mikro-Emulsionen wie auch für die Herstellung der Vergleichsemulsionen zu verwenden.

Literatur

- Ambrosio, L. A., & Hernández-Figueroa, H. E. (2010) Fundamentals of negative refractive index optical trapping: forces and radiation pressures exerted by focused Gaussian beams using the generalized Lorenz-Mie theory. *Biomedical optics express*, 1 (5), 1284-1301. doi: 10.1364/BOE.1.001284.
- Cravotto, G., & Cintas, P. (2006) Power ultrasound in organic synthesis: moving cavitation chemistry from academia to innovative and large-scale applications. *Chem. Soc. Rev.* doi: 10.1039/B503848K.
- Drusch, S., & Heins, A. (2010) Charakterisierung von mikro- und nanostrukturierten Trägersystemen. In: H. Weber (Eds.), *Nanotechnologie in der Lebensmittelindustrie* (pp. 165-175). Hamburg: Behr's Verlag.
- Greiner, R. (2011) Aktueller Kenntnisstand zum Einsatz nanostrukturierter Substanzen im Lebensmittelbereich. Berlin: 35. Informationstag "Fleischtechnologie" und 3. Tagung "Nanotechnologie", Beuth Hochschule für Technik Berlin.
- Jähnich, I. (2007) Einführung in die Ultraschalltechnik. *Ultraschall und Technologien, Ahrensfelde*
- Kühling, W. (2008) *Nanotechnologie im Lebensmittelbereich*. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (p. 64).
- Mason, T. J., & Peters, D. (2003) *Practical Sonochemistry: Power Ultrasound Uses and Applications*. *Ultrasound* (Vol. 2, p. 165). Horwood Publishing.
- Mason, T. J., & Lorimer J. P., (2002) *Applied Sonochemistry: The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*. Wiley-VCH.
- Mason, T. J., & Peters, D. (2003) *Practical Sonochemistry: Power Ultrasound Uses and Applications*. *Ultrasound* (Vol. 2, p. 165). Horwood Publishing.
- Moraru, C., Huang, Q., Takhistov, P., Dogan, H., & Kokini, J. (2009) *Food Nanotechnology: Currently Developments and Future Prospects*. *Global Issues in Food Science and Technology* (pp. 369-399). Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-374124-0.00021-1.
- Müller, W.-D. (1988) *Technologie der Kochpökelwaren*. *Technologie der Kochwurst und Kochpökelware -Kulmbacher Reihe 8-*. Kulmbach: Institut für Technologie der Bundesanstalt für Fleischforschung.
- Oßwald, D. (2008) *Brühwurstherstellung und Auswirkungen auf die Produktqualität sowie Wirtschaftlichkeit*. Diplom-Arbeit. Hochschule Fulda.
- Schiebelbein, I. (2010) *Herstellung von Nano-Emulsionen (Öl/Wasser) aus antioxidativ wirkenden Pflanzenextrakten mittels Ultraschalltechnik und Einsatz dieser Emulsionen zur Stabilisierung von Fleischerzeugnissen*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Institut FL, MRI, Kulmbach.
- Weiss, J., Gaysinsky, S., Davidson, M., & McClements, J. (2009). *Nanostructured Encapsulation Systems: Food Antimicrobials*. *Global Issues in Food Science and Technology* (pp. 425-479). Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-0-12-374124-0.00024-7