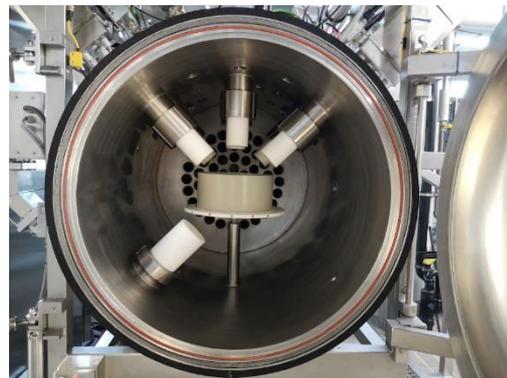


Schnelle und produktschonende Erwärmung und Gefriertrocknung von Lebensmitteln und biogenen Wirkstoffen mittels Solid-State- Mikrowellengeneratoren



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungseinrichtung(en):	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik Teilinstitut I: Lebensmittelverfahrenstechnik Prof. Dr. Ing. Ulrike van der Schaaf/PD Dr. Volker Gaukel Technische Universität München School of Life Sciences Forschungsdepartment Life Science Engineering Professur Food Process Engineering Prof. Dr. Petra Först/Isabel Kalinke
Industriegruppe(n):	Arbeitsgemeinschaft Getreideforschung e.V. (AGF), Detmold Arbeitsgemeinschaft Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V. (APV), Mainz Bundesverband der Deutschen Eiprodukten-Industrie e.V. (BVEP), Bonn Fachverband der Gewürzindustrie e.V., Bonn VDMA-Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen e. V., Frankfurt a.M. Vereinigung zur Förderung der Milchwissenschaftlichen Forschung an der TU München in Freising-Weihenstephan e.V., Freising
Projektkoordinator:	Dr. Jörg Kowalczyk Südzucker AG, Obrigheim/Pfalz
Laufzeit:	2021-2024
Zuwendungssumme:	€ 523.560,--

Ausgangssituation

Die Gefriertrocknung (GT) stellt eines der wichtigsten Verfahren zur Haltbarmachung hitzesensitiver Biomoleküle, Mikroorganismen und qualitativ hochwertiger Lebensmittel dar. Sie basiert auf der Sublimationstrocknung, bei der das Produkt zunächst eingefroren und im Anschluss das Eis direkt in den gasförmigen Zustand übergeht. Aufgrund der niedrigen Prozesstemperaturen, dem geringen oxidativen Stress und der Abwesenheit von freiem Wasser werden schädigende Reaktionen im Produkt unter Erhalt von Struktur, Farbe und Aktivität von Inhaltsstoffen minimiert. In der konventionellen GT wird die in der Primärtrocknung zur Wasserentfernung benötigte Sublimationsenthalpie durch beheizte Stellflächen in das Produkt eingebracht. Der GT-Prozess ist allerdings sehr zeit- und energieaufwändig und kann mehrere Stunden bis Tage dauern.

Ein Lösungsansatz zur Prozessbeschleunigung stellt der Einsatz von Mikrowellen (MW) zur Einbringung der Sublimationsenthalpie dar. In der Literatur sind dabei Verkürzungen der Trocknungszeiten von 36 - 96 %

gegenüber der konventionellen GT beschrieben. Dies ermöglicht in Vakuum- oder GT-Prozessen eine deutliche Steigerung der Produktionskapazität und allein durch die Prozesszeitverkürzung eine Verringerung der Kosten. Allerdings sind die Vorteile des MW-Einsatzes in den genannten Prozessen noch nicht voll ausgeschöpft. Eine inhomogene Feldverteilung und produktspezifische Eigenschaften begünstigen die Bildung von über- und unterprozessierten Produktbereichen. Diese stehen einem breiten industriellen Einsatz entgegen, da sie die Produktsicherheit, Reproduzierbarkeit und Qualitätssicherung industrieller Produktionsketten beeinträchtigen. Darüber hinaus besteht bei MW-unterstützten GT-Prozessen die Gefahr der Plasmabildung durch elektrische Feldspitzen.

Sogenannte MW-Solid-State-Generatoren (SS-Technik) stellen eine vielversprechende Alternative zum Erzeugen von Mikrowellen dar. Allerdings machen erst die günstigen Preis-/Leistungsentwicklungen der letzten Jahre deren Einsatz in industriellen Anwendungen denkbar. Daher ist die MW-SS-Technologie für den industriellen Einsatz im Lebensmittel- oder Pharmabereich in verschiedenen Grundprozessen, wie Erwärmen und vor allem Trocknen, bisher noch nicht umfassend untersucht. Die MW-SS-Technologie ermöglicht im Vergleich zu konventionellen Magnetronen eine gleichmäßigere Feldverteilung, da Anregungsfrequenz, Phase und Leistungseintrag direkt und ohne zusätzliche mechanische Komponenten eingestellt werden können.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Untersuchung und Bewertung der MW-SS-Technologie in Bezug auf die Möglichkeiten der flexiblen Frequenzanpassung zum Erzielen einer homogeneren Temperaturverteilung beim Erhitzen und eines gleichmäßigen Phasenübergangs bei geringer Temperaturbelastung in der Mikrowellengefrierdrying. Es sollte ein Modell zur Vorhersage der Feldhomogenität und Energieeffizienz des Prozesses etabliert werden, mit dem geeignete Steuerungskonzepte produktspezifisch vorhergesagt werden können.

Forschungsergebnisse

Die Prozesse der MW-Erwärmung, MW-Gefrierdrying (MWGT) und der konventionellen Gefrierdrying (GT) wurden anhand des Einsatzes verschiedener Modellsysteme untersucht, die die breite Produktpalette der Lebensmittel- und Pharmaindustrie abbilden. Dabei kamen Gellan- und Tylosegele sowie aufgeschäumte Zuckerpulver zum Einsatz. Diese Modellsysteme wurden hinsichtlich ihrer Produktparameter erfolgreich charakterisiert. Auf dieser Grundlage wurden elektromagnetische Simulationen der MWGT durchgeführt. Die entwickelten Simulationsmodelle wurden erfolgreich verifiziert und über experimentellen Daten der frequenzabhängigen Energieeffizienz validiert.

Darüber hinaus erfolgte eine umfangreiche Untersuchung des Einsatzes von SS-MW-Generatoren in der MW-Erwärmung. Dabei konnten unter Einsatz der entwickelten Methoden und Quantifizierungsansätze neue Erkenntnisse hinsichtlich einer gezielten Verbesserung der Prozesshomogenität bei gesteigerter Energieeffizienz des MW-Prozesses gewonnen werden. Aus diesen Daten wurden Steuerungskonzepte abgeleitet, die vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Erzielung einer homogenen, energieeffizienten MWGT unter Einsatz des innovativen SS-Generators zeigten. Im direkten Vergleich der beiden Generatorsysteme (Magnetron und SS-Generator) konnte zudem gezeigt werden, dass über eine gezielte Frequenzwahl und genauere Leistungsanpassung eine schnellere und damit auch energieeffizientere, homogene Trocknung durch den Einsatz des SS-Generators erzielt werden konnte. Zudem wies der SS-Generator ein signifikant niedrigeres Risiko zur ungewollten Plasmazündung in der MWGT auf.

Es wurden unterschiedliche Steuerungskonzepte zur Anwendung in der MWGT simuliert und experimentell validiert. Der Einsatz mehrerer energieeffizienter Resonanzfrequenzen führte zu einer signifikanten Steigerung der Energieeffizienz, mit einer durchschnittlichen Umwandlung von elektromagnetischer Energie in Wärme von 64,63 %, was einer Steigerung von 24,51 % im Vergleich zu konstanten Frequenzen entspricht. Die Trocknung war dabei homogen und die Qualität vergleichbar mit der gefriergetrockneten Produkte. Diese Konzepte konnten erfolgreich auf industrielle relevante Produkte übertragen und ein grundsätzliche Verfahrensleitfaden gegeben werden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Der Einsatz innovativer SS-Generatoren könnte eine wirtschaftlich interessante Alternative zur klassischen Magnetron-Technologie darstellen und in der Mikrowellen-unterstützten Gefriertrocknung durch eine optimierte Prozessführung dazu beitragen, die Prozesszeit und Plasmabildung zu reduzieren und dadurch Engpässen der Produktionskapazität sowie hohen Prozesskosten entgegenzuwirken.

Das Vorhaben liefert Erkenntnisse zu der Frage, wie sich eine Prozessführung mit frequenzbasierter Modulation und Leistungsanpassung des elektromagnetischen Feldes in der MW-gestützten Erwärmung und Gefriertrocknung auf Erwärmungshomogenität, Prozessparameter, Produkteigenschaften sowie Energieeffizienz auswirken. Es werden prädiktive Modelle für die Auslegung von Anlagensteuerungskonzepten bereitgestellt, die insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) die Möglichkeit einer zielgerichteten, produktspezifischen Prozessauslegung und-steuerung des physikalisch komplexen Trocknungsprozesses bei gleichzeitigem Erhalt der Produktqualität bieten.

Das Produktionsvolumen getrockneter Lebensmittel hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Für den Weltmarkt beläuft sich die Schätzung der Wachstumsrate auf 4,1 % pro Jahr bei einem Gesamtvolumen von 306,4 Mrd. US-Dollar in 2024. Für die exportorientierte deutsche Lebensmittelindustrie bestehen gute Chancen, an diesem Wachstum teilzuhaben.

Die sichere Prozessierung sensitiver Biomoleküle unter Energie-, Zeit- und Kostenersparnis sowie die Erweiterung der Prozesskapazitäten durch Mikrowellen-unterstützte Gefriertrocknung hat dar-über hinaus auch für die pharmazeutische Industrie große wirtschaftliche Relevanz. Die Trocknung ist ein sehr teurer Prozessabschnitt, der wegen der langen Trocknungsdauer als Engpass die Durchsatzkapazität die gesamte Produktionskette limitiert. Die deutsche pharmazeutische Industrie erwirtschaftete 2024 einen Umsatz von 64,5 Mrd. € und ist mit einem KMU-Anteil von 84,2 % (2022) der Unternehmen stark mittelständisch geprägt.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2024
2. Kalinke, I.: Effiziente Mikrowellen-Gefriertrocknung: Steigerung der Prozesseffizienz durch die richtige Kammerform. Efficient microwave freeze drying: Increasing process efficiency with the right chamber shape. *Milchw Forsch* 2023 (2024).
3. Kalinke, I., Pusl, F. & Kulozik, U.: Enhancing uniformity and energy efficiency of microwave heating for different cavity loads: Frequency-shifting strategies using feedback signals from solid-state microwave generators. *Inn Food Sc Emerg Technol* 97, S. 103814. DOI: 10.1016/j.ifset.2024.103814 (2024).
4. Kalinke, I. & Kulozik, U.: Enhancing microwave freeze drying: Exploring maximum drying temperature and power input for improved energy efficiency and uniformity. *Food and Biopr Technol*. DOI: 10.1007/s11947-024-03438-5 (2024).
5. Kalinke, I., Röder, J., Unterbuchberger, G. & Kulozik, U.: Microwave-assisted freeze drying: The role of power input and temperature control on energy efficiency and uniformity. *J Food Eng* 390, S. 112410. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2024.112410 (2024).
6. Kaysan, T., Zhou, X. & Gaukel, V.: Process intensification of microwave-assisted freeze-drying by frequency adjustment in real-time using solid-state technology. *J Food Eng*, 383, 112221 (2024).
7. Sickert, T., Kalinke, I., Christoph, J. & Gaukel, V.: Microwave-assisted freeze-drying with frequency-based control concepts via solid-state generators: A simulative and experimental study. *Processes* 11 (2), S. 327. DOI: 10.3390/pr11020327 (2023).
8. Sickert, T., Bergmann, R., Christoph, J. & Gaukel, V.: A time-saving approach to parameter studies in microwave-assisted freeze drying. *Processes*, 11 (10), 2886 (2023).
9. Kalinke, I.: Potential innovativer Solid-State-Mikrowellengeneratoren in der Mikrowellen-unterstützten Gefriertrocknung. Potentials of innovative solid-state microwave generators in microwave-assisted freeze drying. *Milchw Forsch* 2022 (2023).

10. Kalinke, I., Hilmer, M. & Först, P.: Efficient heating and drying using microwaves. A response to rising energy prices. FoodLab Int (3) (2023).
11. Kalinke, I., Hilmer, M. & Först, P.: Energieeffiziente Erhitzung und Trocknung. Mikrowellen als Antwort auf steigende Energiepreise. FoodLab (3) (2023).
12. Kalinke, I. & Kulozik, U.: Irreversible thermochromic ink in the identification of over- and under-processed product segments in microwave-assisted freeze drying. J Food Eng, S. 111470. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2023.111470 (2023).
13. Kalinke, I., Pusch, F., Häderle, F. & Kulozik, U.: A comparative study of frequency-shifting strategies for uniform and energy-efficient microwave heating in solid-state microwave systems. Innovative Food Science & Emerging Technologies 86, S. 103388. DOI: 10.1016/j.ifset.2023.103388 (2023).
14. Kalinke, I.: Neue Applikationen und Optimierung der Qualität und Produktsicherheit beim Behandeln von Lebensmitteln durch Einsatz neuer Mikrowellentechnologie. Milchw Forsch 2021 (2022).

Weiteres Informationsmaterial

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik
Lebensmittelverfahrenstechnik
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe
Tel: +49 721 608-42497
Fax: +49 721 608-45967
E-Mail: ulrike.schaaf@kit.edu

Technische Universität München - School of Life Sciences
Forschungsdepartment Life Science Engineering
Professur Food Process Engineering
Weihenstephaner Berg 1, 85354 Freising
Tel: +49 8161 71-4205
Fax: +49 8191 71-4384
E-Mail: petra.foerst@tum.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 3079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

Förderhinweis

... ein Projekt der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)

Gefördert durch:



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wird/wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.