

## Verbesserung von Trocknungsprozessen pflanzlicher Rohstoffe durch prozessinduzierte Verringerung von Stofftransportwiderständen

<b>Koordinierung:</b>	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
<b>Forschungsstelle I:</b>	Technische Universität Berlin Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie FG Lebensmittelbiotechnologie und -prozess Technik Prof. Dr. Cornelia Rauh/Dipl.-Ing. Erik Voigt
<b>Forschungsstelle II:</b>	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik Bereich I: Lebensmittelverfahrenstechnik Prof. Dr. Heike P. Schuchmann/Prof. Dr. Marc Regier (extern)/ Dr. Volker Gaukel
<b>Industriegruppe:</b>	VDMA Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen e. V., Frankfurt
	Projektkoordinator: Bernd Pütz Brückner-Werke KG, Nortorf
<b>Laufzeit:</b>	2011 – 2014
<b>Zuwendungssumme:</b>	€ 397.500,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

### Ausgangssituation:

Der Wasserentzug ist einer der wichtigsten Stofftransportprozesse in der Lebensmittelindustrie. Hierfür werden verschiedene Verfahren eingesetzt, wobei insbesondere die konventionell weit verbreiteten Trocknungsprozesse mit einem Phasenübergang des Wassers unter Zufuhr thermischer Energie sehr kosten- und zeitintensiv sind. Bei der Trocknung von pflanzlichen Rohstoffen wird der Wasserabtransport durch vorhandene Zell- und Gewebestrukturen erschwert, die eine Stoffübergangs-/Diffusions-, aber auch Wärmedurchgangsbarriere darstellen. Da es sich bei der Trocknung um einen gekoppelten Prozess handelt, wird die Trocknungskinetik vom jeweils langsameren Prozess bestimmt. Ob hierbei die Stoffübergangswiderstände gegenüber den Wärmeübergangswiderständen dominieren, hängt vom Trocknungsverfahren und von der Produktstruktur ab.

Ein Aufschluss der Zellmembranen sowie eine Verbesserung der Diffusionsvorgänge innerhalb des Gewebes, z. B. durch Ultraschall (US) oder Hochspannungsimpulse (HSI), ermöglicht eine leichtere und/oder vollständige Wasserentfernung. Allerdings war es bislang nicht möglich, die dafür verantwortlichen Mechanismen aufzuklären, da eine entsprechende zerstörungsfreie lokale Online-Messtechnik fehlte. So konnten die im erfahrungsbasierten Trial-and-Error-Verfahren für Einzelfälle gefundenen Prozess- oder Produktverbesserungen nicht zur Ausarbeitung neuer Verfahrenskonzepte oder zu einer gezielten Optimierung genutzt werden.

Grundlage der Permeabilisierung mit Hochspannungsimpulsen (HSI) ist die irreversible Bildung von Poren in biologischen Membranen durch die Anwendung elektrischer Felder. Dadurch wird die limitierende Wirkung der Zellmembran bei Stofftransportprozessen aufgehoben. Der Einfluss von Ultraschall auf

Stofftransportprozesse basiert auf der Minimierung interner und externer Widerstände für den Wärme- und Stofftransport (Diffusionsbarrieren bzw. Grenzschichtbildung). Vor allem die als Kavitation bezeichnete und durch den zyklischen Wechseldruck verursachte Implosion von Gasblasen sowie daraus resultierende Mikroströmungen können auch Grenzflächen beeinflussen und so externe Widerstände gegen den Stofftransport im Produkt sowie den Stoffübergang an der Produktoberfläche verringern.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein besseres Verständnis zum Einfluss von innovativen Prozessen, wie der Ultraschall- und HSI-Technik, auf die Trocknungsvorgänge in pflanzlichen Lebensmitteln zu erhalten und dieses für die gezielte Prozessentwicklung von neuen Trocknungskonzepten bzw. für eine Verbesserung der Produktqualität zu nutzen. Dabei sollten unter Einsatz der Magnetresonanztomographie die nachgewiesenen Verbesserungen von Trocknungsprozessen bezüglich des zu Grunde liegenden Mechanismus auf der Ebene der Gewebestruktur aufgeklärt werden sowie durch systematische Untersuchungen von verschiedenen Rohwaren (Apfel, Karotte, Kartoffel) und Trocknungsprozessen (Warmlufttrocknung, Gefriertrocknung, Mikrowellentrocknung) eine Datengrundlage für eine spätere Implementierung in den industriellen Maßstab gelegt werden.

#### Forschungsergebnis:

Die Trocknungsversuche an Kartoffeln und Äpfeln im MRT konnten zeigen, wie die Wasserverteilung in der Probe während der Trocknung durch den Einsatz von Ultraschall als begleitende Unterstützung und durch Hochspannungsimpulse als Vorbehandlungsmethode beeinflusst wird. Durch konstruktive Verbesserungen des Versuchsaufbaus war es zudem möglich, die Versuche bei 60°C durchzuführen, ohne die Messspulen des MRT zu beschädigen. Mit 60°C bewegt man sich in einem Temperaturbereich, der auch industriell relevant ist. Eine Modellierung der Trocknungsverläufe von Äpfeln und Kartoffeln für eine Kontaktultraschall-Konvektionstrocknung bei 60°C und 75°C hat gezeigt, dass das Trocknungsmodell von MIDILLI auch für die Beschreibung von ultraschallgestützten Trocknungsvorgängen geeignet ist. Des Weiteren wurde die Erwär-

mungswirkung des Ultraschalls an einer Apfelprobe und bei verschiedenen Ultraschallamplituden exemplarisch mit Hilfe einer Leistungsabschätzung überprüft.

Zur Untersuchung des Einflusses von Ultraschall (US) und gepulsten elektrischen Feldern (PEF) auf die Gewebestruktur und Porengröße wurde in einer lichtmikroskopischen Analyse das Gewebe von Äpfeln, Karotten und Kartoffeln auf Veränderungen der Zellwandintegrität untersucht, wobei eine Färbung mittels Toluidinblau zum Einsatz kam. Des Weiteren wurde die Wasserverteilung während der ultraschallgestützten Trocknung im Vergleich zur konvektiven Trocknung ohne Zusatzbehandlung ermittelt. Die Wasserverteilung nach der PEF-unterstützten Gefriertrocknung wurde ebenfalls bestimmt. Hier ergab sich beim Vergleich mit den unbehandelten Kontrollproben nach der Gefriertrocknung kein signifikanter Unterschied. Weiterhin fanden Untersuchungen bezüglich der Gewebeschädigung in den Schichten des Gewebes statt. Mit Hilfe von bildgebenden Verfahren konnten Aussagen zur Gewebeveränderung aufgrund des Einsatzes von innovativen Technologien getätigt werden. Die mikroskopische Analyse des Apfel-, Karotten- und Kartoffelgewebes ergab, dass es im Falle der US-Probe zu keiner oder nur zu einer geringen Schrumpfung der Zellen im Bereich der Kontaktfläche zum Sieb kam, während die Kontrollprobe deutliche Schrumpfung zeigte. Im Falle der Wasserverteilung war zu erkennen, dass sich die Wasserverteilung der US-Proben deutlich von den Kontrollproben unterscheiden. Die zusätzliche Zellschädigung war dagegen nur sehr gering. Bei PEF-Proben und Proben mit kombinierter PEF- und US-Behandlung waren hingegen zusätzliche Zellschädigungen ausgeprägt. Die Wasserverteilung war auch hier im Vergleich zu den Kontrollproben verändert, wenn auch im geringeren Maße als bei den US-Proben.

Der Effekt gepulster elektrischer Felder auf die Zellstruktur wurde mittels Impedanzmessung des Zellaufschlussgrades untersucht. Aus der durchgeführten Variation der Elektroporationsparameter wurden für jeden Rohstoff diejenigen identifiziert, die bei jeweils geringster Behandlungsintensität zu einem hohen (> 80 %), mittleren (~ 60 %) und niedrigen (< 30 %) Zellaufschlussgrad führen. An diesen Proben erfolgte eine Texturanalyse. Die Texturanalyse ergab bei der Karotte und dem Apfel eine deutliche Senkung

der notwendigen Deformationsarbeit, bei der Kartoffel fiel dieser Effekt etwas geringer aus. Für die praktische Umsetzung der Konzepte zur angepassten und verbesserten Trocknung, wurden geeignete Behandlungsintensitäten ausgewählt und für die Warmluft- und Gefriertrocknungsversuche eingesetzt. Dabei kamen in einem vollständigen Versuchsplan für die Warmlufttrocknung jeweils 2 Luftgeschwindigkeiten und 2 Temperaturen zum Einsatz, während bei der Gefriertrocknung aufgrund der instrumentellen Limitation nur eine Einstellung in Bezug auf Temperatur und Luftdruck gewählt werden konnte. Abhängig vom Rohstoff und den Trocknungsparametern erbrachten die Zusatzbehandlungen Trocknungszeitersparnisse bei der Warmlufttrocknung von bis zu 32 %. Beim Apfel führte die kombinierte Behandlung aus PEF und Kontaktultraschall zu den größten Trocknungszeitersparnissen. Die einzelnen Effekte durch PEF und US waren geringer und schienen sich im Falle der Kombinationsbehandlung zu addieren. Bei der Kartoffel kam es für alle Trocknungsparameter zu einer Verkürzung der Trocknungszeit durch die PEF-Behandlung. Es zeigte sich, dass der Effekt tendenziell durch eine höhere Luftgeschwindigkeit begünstigt wird, wobei die Temperatur kaum einen Einfluss hat. Für die Karotte kann geschlussfolgert werden, dass PEF zu den größten Trocknungszeitersparnissen führt, während US keinen Einfluss auf den Trocknungsverlauf zu haben scheint.

Die Versuche im Technikumsmaßstab haben im Fall der Mikrowellentrocknung ein differenziertes Bild ergeben. So sind keine pauschalen Aussagen über den vorteilhaften Einsatz von Hochspannungsimpulsen möglich, die für alle eingesetzten Produkte gelten. Vielmehr steht mit der Mikrowellentrocknung ein Verfahren zur Hand, bei dem der Einsatz von zusätzlichen Verfahrensschritten genau abgewogen werden sollte, besonders in Hinblick auf das Kosten/Nutzen-Verhältnis. Der Einsatz von Ultraschall in der Mikrowellentrocknung von pflanzlichen Rohstoffen zeigte bei den durchgeführten Versuchen an Einzelproben keinen positiven Einfluss auf das Trocknungsergebnis.

Bei der Gefriertrocknung scheint PEF bei der Trocknung von Kartoffeln keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit zu haben. Auch der Endfeuchtegehalt wird nur minimal beeinflusst. Eine Ultraschallbehandlung konnte hier nicht

durchgeführt werden, da das Gewebe durch die Gefriertrocknung zu fragil und während der Trocknung zerstört wurde. Beim Gefrierprozess (ohne Trocknung) zeigt sich, dass der Einsatz von PEF bei Äpfeln und Kartoffeln zu einer Beschleunigung des Gefrierprozesses führt, was zusätzlich der Bildung von größeren Eiskristallen an der Oberfläche entgegenwirkt. Zur Qualitätsbewertung der Trockenprodukte wurden die Rehydratationseigenschaften, die Schrumpfung, die Farbe, der Vitamin C-Gehalt sowie die Textur untersucht.

Da sich der Nutzen der Behandlung mit innovativen Technologien nicht nur aus einer Trocknungszeitersparnis ergibt, sondern auch aus der Beeinflussung von Qualitätsparametern, wurden im Rahmen der Konvektions- und Gefriertrocknungsversuche ebenfalls Schrumpfungs- und Rehydratationsverhalten sowie der Vitamin-C-Gehalt und mögliche Farbveränderungen analysiert. Dabei ergaben sich für die unterschiedlichen Matrices Veränderungen verschiedenster Art und unterschiedlichen Ausmaßes:

Apfel: Die Ultraschallbehandlung führte in einigen Fällen zu einer verstärkten Schrumpfung, während die PEF-Behandlung in allen Fällen eine geringere Schrumpfung nach sich zog im Vergleich zu den Kontrollproben. Die Rehydratation wird durch die PEF-Behandlung in allen Parameterkombinationen begünstigt, während US- und kombinierte PEF/US-Behandlung in den meisten Fällen zu einer Verminderung der Rehydratationskapazität führt. Die PEF-Behandlung führte zu einer dunkleren Farbe der Trockenäpfel. Die Ultraschallbehandlung hat augenscheinlich keinen Einfluss auf die Farbe des Produktes. Eine Ultraschallbehandlung der Äpfel während der Gefriertrocknung erwies sich mit dem vorhandenen Equipment als nicht durchführbar, da es aufgrund der Fragilität der Matrix zu einer vollständigen Zerstörung des Gewebes kam. Eine PEF-Behandlung als Vorbehandlungsschritt zur Gefriertrocknung war problemlos möglich, führte jedoch zu keiner nennenswerten Beeinflussung des Trocknungsverlaufes oder der Trocknungsgeschwindigkeit. Auch die meisten Qualitätsparameter wurden nur marginal beeinflusst, mit Ausnahme der Farbe. Die PEF-behandelten Apfelproben hatten nach der Trocknung im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollproben einen deutlich dunkleren, bräunlicheren Farbton.

**Kartoffel:** Bezüglich der Textur der getrockneten Würfel war die Bruchkraft der behandelten Kartoffeln um ein Vielfaches höher als bei den unbehandelten Proben. Vergleicht man Proben mit gleichem Wassergehalt gibt es zwischen den Trocknungsverfahren (US, PEF, US/PEF) keine Unterschiede im Schrumpfungsverhalten. Tendenziell hat die PEF-Behandlung einen leicht verminderten Effekt auf die Rehydrationsfähigkeit von getrockneten Kartoffeln. Die mit Hochspannungsimpulsen behandelten Proben haben eine dunklere Farbe im Vergleich zu den unbehandelten Proben. Die Methode zur Vitamin-C-Bestimmung (nach RÜCKEMANN) hat nicht zu sinnvollen Werten geführt. Die Methode nach BEUTLER führte ebenfalls durch Unterschreitung des Detektionsbereichs zu nicht verwertbaren Ergebnissen.

**Karotte:** Bezüglich des Schrumpfungsverhaltens zeigt sich, dass es bei der Warmlufttrocknung mit 60 °C zu einer verstärkten Schrumpfung der PEF- und US-behandelten Proben im Vergleich zu den Kontrollproben kommt. Dieser Effekt dreht sich bei einer höheren Trocknungstemperatur (75°C) jedoch um und führt zu einer geringeren Schrumpfung der vorbehandelten Proben im Vergleich zu den Kontrollproben. PEF und US bieten bei hohen Temperaturen also einen Schutzeffekt gegen Schrumpfung. Solch ein unterschiedliches Verhalten in Bezug auf die Trocknungstemperatur lässt sich auch beim Rehydrationsverhalten beobachten. Eine PEF- oder kombinierte PEF/US-Behandlung vor einer Warmlufttrocknung bei 60°C führte zu einer Verringerung des Rehydrationsvermögens der Proben im Vergleich zu den Kontrollproben. Der Einsatz von Ultraschall führte hingegen zu einer Verbesserung der Rehydrationskapazität. Bei einer Trocknungstemperatur von 75 °C kommt es nur zu sehr geringen oder keinen Unterschieden im Rehydrationsverhalten zwischen den Proben, wobei sich die Effekte von PEF und US hier scheinbar addieren lassen. PEF-behandelte Karotten weisen nach der Warmlufttrocknung im Vergleich zu den Kontrollproben eine dunklere Farbe auf. Es kommt anscheinend zu Bräunungsreaktionen. Bei den gefriergetrockneten Proben kann man hingegen keine Unterscheide zwischen PEF- und Kontrollproben ausmachen.

#### Wirtschaftliche Bedeutung:

Der Einsatz von innovativen energie- und kosteneffizienten Verfahren ist zukunftsweisend und sichert der Lebensmittelindustrie die notwendigen Standortvorteile in Deutschland. Die Trocknungseffizienz ist dabei insbesondere durch den limitierten Wärme- und Stofftransport innerhalb des Produktes bestimmt. Eine erste Kostenabschätzung der Behandlung mit Hochspannungsimpulsen resultiert in Gesamtkosten von ca. 0,5 Cent pro Tonne behandeltem Produkt (Anlage mit einer Kapazität von 22 t/h und einem notwendigen spezifischen Gesamtenergieeintrag von 5 kJ/kg, Leistung der Anlage 30 kW). Vorversuche der Forschungsstellen konnten eine 20%ige Reduzierung der Trocknungszeit durch die Vorbehandlung mit gepulsten elektrischen Feldern zeigen. Die Ergebnisse, die während dieses Projekts generiert wurden, konnten die Beobachtungen aus den Vorversuchen bestätigen. Das Potential der Technologie zur Verringerung der Energie- und Prozesskosten für die Trocknung ist daher gegeben.

Weiterhin wird eine Produktqualitätserhöhung u.a. durch die Reduzierung der thermischen Belastung mit möglichen höheren Produktpreisen ermöglicht. Durch eine gleichmäßigere Restfeuchteverteilung und effizientere Trocknung vor allem im Produktinneren können außerdem größere Schnitte (z.B. > 1,5 cm Kantenlänge für Kartoffelwürfel) realisiert und die Vermarktung neuer Produkte ermöglicht werden.

Die Forschungsergebnisse können sowohl von Betrieben der obst-, gemüse- und kartoffelverarbeitenden Industrie als auch von Firmen des Maschinen- und Anlagenbaus bzw. Herstellern von Trocknungstechnik zur Optimierung von Produkt- und Verfahrenskonzepten genutzt werden.

#### Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2014.
2. Gaukel, V., Voigt, E. und Regier, M.: Mikrowellenvakuumtrocknung von Obst und Gemüse – Einfluss einer Vorbehandlung mit gepulsten elektrischen Feldern (PEF). FOOD-LAB 4, 20-25 (2016).

**Weiteres Informationsmaterial:**

Technische Universität Berlin  
Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie, FG Lebensmittelbiotechnologie und -prozesstechnik  
Königin-Luise-Str. 22, 14195 Berlin  
Tel.: +49 30 314-71250  
Fax: +49 30 832-7663  
E-Mail: cornelia.rauh@tu-berlin.de

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik  
Bereich I: Lebensmittelverfahrenstechnik  
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe  
Tel.: +49 721 608-48797  
Fax: +49 721 608-942497  
E-Mail: heike.schuchmann@kit.edu

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.