

Versuche zur Behandlung von Getreide mittels Mikrowellenenergie

Von Wolfgang Lücke, Göttingen*)

DK 664.8.047:621.3.011

Die Trocknung von Getreide mittels Mikrowellenenergie erscheint besonders interessant vor dem Hintergrund, daß bei Einhalten bestimmter Applikationsbedingungen wichtige Qualitäts-Eigenschaften der Körner im Hinblick auf die Weiterverarbeitung positiv zu beeinflussen sind und zusätzlich eine mikrobielle Sanierung des Getreides möglich ist. Zur Überprüfung dieser Aussagen wurden am Institut für Agrartechnik in Göttingen Versuche mit einer neu entwickelten Mikrowellenbehandlungsanlage durchgeführt. Bei ihrer Erstellung wurde besonders auf die richtige Anpassung der regelbaren Senderöhre an den Applikationsraum geachtet. Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zur üblichen Konvektionstrocknung mit Warmluft Unterschiede im Trocknungsverlauf, der Trocknungsgeschwindigkeit, der Keimfähigkeit der Körner und im mikrobiellen Besatz.

1. Einleitung

Die Behandlung von Getreide oder Getreideprodukten mittels Mikrowellenenergie ist verschiedentlich untersucht worden. Dabei standen neben der Ermittlung der dielektrischen Eigenschaften des Getreides folgende Ziele im Vordergrund [1, 2]:

1. Abtötung von tierischen Schaderregern
2. Abtötung von Bakterien und Pilzen
3. Gezielte Vorbehandlung von Getreide für eine bestimmte Verarbeitung
4. Qualitätsverbesserung wertbestimmender Inhaltsstoffe
5. Trocknung von Getreide
6. Schaffung neuer Produkte.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Behandlung von Getreide mit Mikrowellen weisen zum Teil noch keine hinreichend einheitlichen Ergebnisse auf:

Die Hygienisierung von Lebensmitteln mit Mikrowellen ist Stand der Technik. Eine Abtötung von Schaderregern wie Insekten, Bakterien und Pilzen an Getreide ist möglich, muß aber mit möglichen negativen Wirkungen auf die Keimfähigkeit der Körner abgestimmt werden. Immerhin sind bei solchen Untersuchungen auch Wirkungen im Hinblick auf eine Stimulierung des Auskeimens von Samen beobachtet worden. Dies hätte einen schnelleren Feldaufgang zur Folge [3 bis 10].

Zu den Inhaltsstoffen ist bekannt, daß bei kurzfristig mit Mikrowellenenergie behandeltem Weizenmehl eine Vergrößerung des Backvolumens und eine Verbesserung anderer Eigenschaften möglich ist (Fallzahl, Krustenfarbe). Bei thermischer Überlastung des Mehls werden jedoch alle wichtigen qualitativen Parameter negativ beeinflusst [7, 11].

Andere Untersuchungen zeigen durchweg positive Ergebnisse: Bei der Trocknung von Teigwaren ist die Anwendung von Mikrowellen vielfach fester Bestandteil des Produktionsprozesses. Dabei wird nicht nur die Qualität verbessert, sondern auch der Besatz an Mikroorganismen verringert [12].

*) Dr. W. Lücke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke) der Universität Göttingen.

Auch läßt sich durch die Behandlung mit Mikrowellen Stärke verkleistern. Dies kann eine erhöhte Verdaulichkeit bewirken, was bei Futtergetreide durchaus bedeutsam werden könnte [13, 14].

Der Einsatz von Mikrowellen ermöglicht letztlich auch die Herstellung von neuen Produkten, wie etwa Pop-Corn ohne Fettsatz. Gerade diese Möglichkeit könnte den Absatz von Getreide oder Getreideprodukten steigern helfen.

Die Trocknung von Getreide durch Mikrowellen ist mit Ausnahme der Schnellbestimmung der Feuchtigkeit bisher kaum untersucht worden [15, 16]. Sie wird häufig aus energetischen Gründen als zu teuer angesehen. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die oben angeführten positiven Aspekte ebensowenig berücksichtigt wurden wie die tatsächliche energetische Umsetzung der Mikrowellenenergie am Produkt. Diese ist abhängig vom Gesamtwirkungsgrad des Applikationssystems. Dieser wiederum wird nicht allein von der Leistung der Senderöhre, sondern einer Vielzahl anderer Faktoren beeinflusst, die bei den bisherigen Untersuchungen nicht ausreichend beachtet wurden. Hierin liegt unter anderem die Erklärung für die zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse.

Zum besseren Verständnis dieser Aussagen werden zunächst das Prinzip der dielektrischen Erwärmung und die dabei wirksamen Einflußfaktoren erläutert.

2. Grundlagen der dielektrischen Stoff Erwärmung

Mikrowellen sind bekanntlich elektromagnetische Wellen. Das Spektrum liegt im Bereich von 300 MHz bis 300 GHz und somit zwischen Infrarot- und Radiowellen, **Bild 1**. Für die technische Nutzung postalisch zugelassen sind in der Bundesrepublik die Frequenzen 915 MHz und 2,45 GHz. In den Haushaltsöfen und den meisten technischen Nutzenanwendungen gebräuchlich ist heute die Frequenz 2,45 GHz, die deswegen auch bei den hier dargestellten Versuchen Verwendung fand.

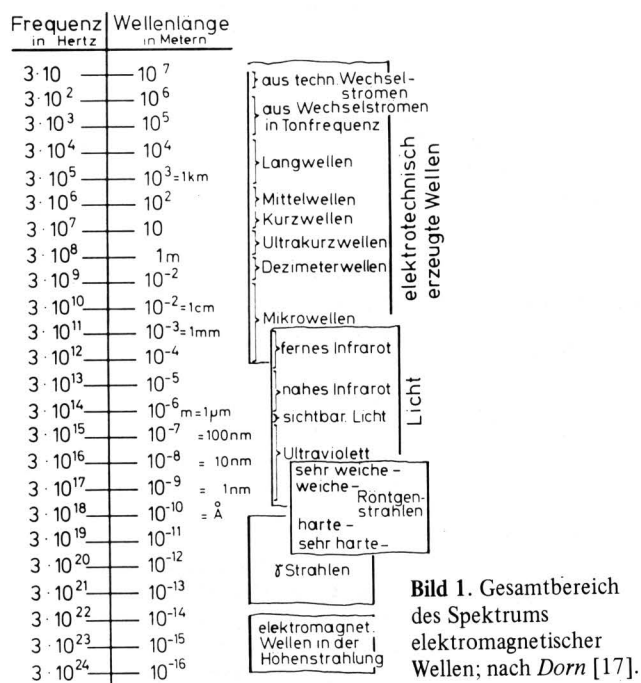


Bild 1. Gesamtbereich des Spektrums elektromagnetischer Wellen; nach Dorn [17].

Der eigentliche Erwärmungsvorgang bei der Mikrowellenanwendung erfolgt dabei wie in **Bild 2** gezeigt. Bringt man ein Dielektrikum in ein elektrisches Gleichfeld, so findet eine Polarisierung statt. Dieser Polarisierungsvorgang kann dabei die Ausrichtung von Dipolen im Feld, die Bildung von induzierten Dipolen, die Verschiebung geladener Atome und Atomgruppen sowie die Bildung von freien Ladungsträgern im Dielektrikum selbst induzieren. Kehrt man die Richtung des elektrischen Feldes um, so ändert sich auch die Polarisierung. Bei dielektrischen Materialien stimmt die Phase der Wechselfelds nicht mit der Phase des Feldes überein. Die Polarisierung "hinkt" gewissermaßen dem Feld nach: dadurch wird Wirkleistung in Form von Wärme freigesetzt. Bei der Applikation von Mikrowellen findet dieser Polarisierungsvorgang mit den o.a. Frequenzen statt [18].

Die im Dielektrikum, also dem behandelten Produkt, pro Volumeneinheit dabei über den gesamten Querschnitt freigesetzte Wärmeleistung ergibt sich nach *Püschner* [19] aus:

$$P = 2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r'' f$$

mit

- P Wärmeleistung pro Volumenelement (W/m³)
- E elektrische Feldstärke (V/m)
- ϵ_0 Dielektr. Feldkonstante ($8,859 \cdot 10^{-12}$ A s/V m)
- ϵ_r'' Realteil d. komplexen Dielektrizitätskonstante (-)
- f Frequenz (Hz)

Es wird deutlich, daß der Energieumsatz linear von der Frequenz und den dielektrischen Eigenschaften des Stoffes abhängt. Die Feldstärke geht quadratisch ein. Aus der Gleichung ergibt sich damit scheinbar ein einfacher und leicht zu überschauender Zusammenhang. Tatsächlich sind die Verhältnisse jedoch komplizierter.

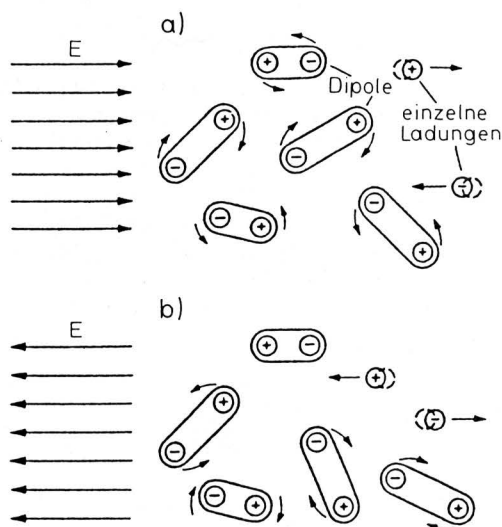


Bild 2. Ausrichtung von Dipolen im elektrischen Wechselfeld.

- a) Erste Halbwelle des elektrischen Feldes: Die Dipole richten sich unter dem Einfluß des elektrischen Feldes aus. Einzelne Ladungen verschieben sich in Feldrichtung.
- b) Zweite Halbwelle des elektrischen Feldes: Die Dipole drehen sich in umgekehrter Richtung.

Im **Bild 3** sind schematisch Weg und Wechselbeziehungen beim Energiefluß von der Energiequelle bis zum Produkt in einem Mikrowellenapplikationssystem dargestellt.

Die Energie wird in einer speziellen Senderöhre, dem Magnetron, erzeugt. Ihr Weitertransport erfolgt über den Hohlleiter zum eigentlichen Applikationsraum, dem Resonanzraum. Dabei beeinflussen sowohl die Geometrie des Hohlleiters als auch die des Resonanzraumes die Ausbildung der Grundwelle und deren Frequenz.

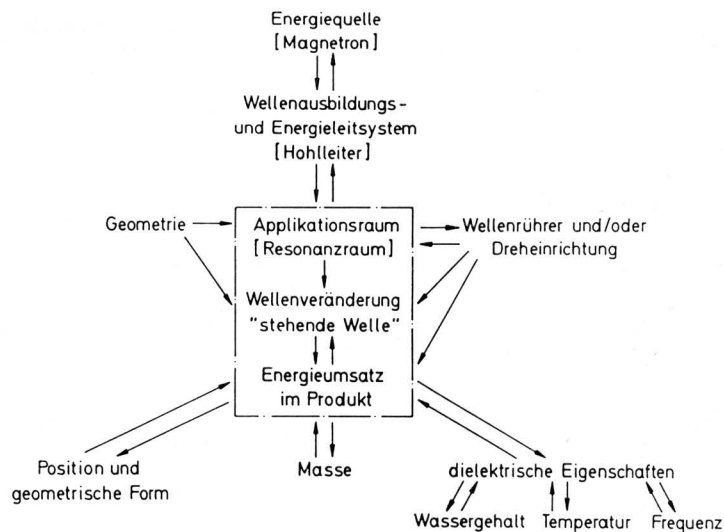


Bild 3. Energieumsatz und Wechselbeziehungen bei der Applikation von Mikrowellen.

Im Resonanzraum gelangt die Energie abhängig von Wellentyp und -frequenz in das zu behandelnde Produkt. Wieviel Energie tatsächlich zu Wärme umgesetzt werden kann, hängt von der Form und der Position des Produktes im Raum, seiner Bewegung, seiner Masse und seinen dielektrischen Eigenschaften ab. Diese dielektrischen Eigenschaften biologischer Produkte sind ihrerseits wiederum abhängig von Temperatur, Feuchte und Frequenz.

Alle genannten Faktoren führen zu einer bestimmten Feldstärke am Produkt, die bei der Trocknung infolge von Erwärmungs- und Verdunstungsvorgängen sowie geometrischer Veränderungen des Produktes während des Prozesses nicht konstant ist.

Die genannten Wechselwirkungen beeinflussen darüber hinaus den Sendebetrieb des Magnetrons. Ein Magnetron ist, obwohl dies bei Anwendung der Haushaltsgeräte oft so erscheint, keine Senderöhre mit definierter Ausgangsleistung.

Wie das Generatordiagramm, **Bild 4**, des in unseren Versuchen verwendeten Magnetrons ausweist, sind sehr viele Sendezustände mit unterschiedlichem Leistungsangebot und variierender Frequenz möglich. Dies hängt direkt mit der Phasenlage und dem Welligkeitsfaktor zusammen. Sind beide nicht richtig angepaßt, so kann dies im Extremfall zum Sendebetrieb im elektronischen oder thermischen Grenzgebiet des Diagrammes führen. Dies hätte unweigerlich die Zerstörung des Magnetrons zur Folge [20].

Aber auch bei exakter Anpassung des Magnetrons an den Resonanzraum und damit bei richtiger Phasenlage und richtigem Welligkeitsfaktor können sich wegen der oben angeführten vielschichtigen Wechselwirkungen und infolge des Wasserentzuges bei der Trocknung verschiedene Sendezustände mit zum Teil erheblich variierender Sendeleistung einstellen (**Bild 4**).

Ein Betrieb des Magnetrons mit hoher Sendeleistung und geringer Frequenzabweichung ist nur bei einer Phasenlage im Bereich von $0,35 \lambda$ (λ = Wellenlänge) bei kleinem Stehwellenverhältnis möglich.

Eine Messung der Feldstärke oder gar ihre Beeinflussung und damit eine Ermittlung der tatsächlich am Produkt aus der Sendeleistung umgesetzten Wärmeleistung ist wegen der aufgeführten Wechselwirkungen und der während des Betriebes schwankenden Sendezustände nur begrenzt möglich. Einen Ansatzpunkt zur Modifizierung der wirksamen Feldstärke bietet die Veränderung der vom Magnetron erzeugten Sendeleistung.

In den bekannten und häufig auch zu Versuchszwecken verwendeten Haushaltsmikrowellenöfen erfolgt eine Variation des Energieangebotes durch die Taktfolge eines zyklischen Zu- und Abschaltens des Magnetrons bei konstanter Ausgangsleistung.

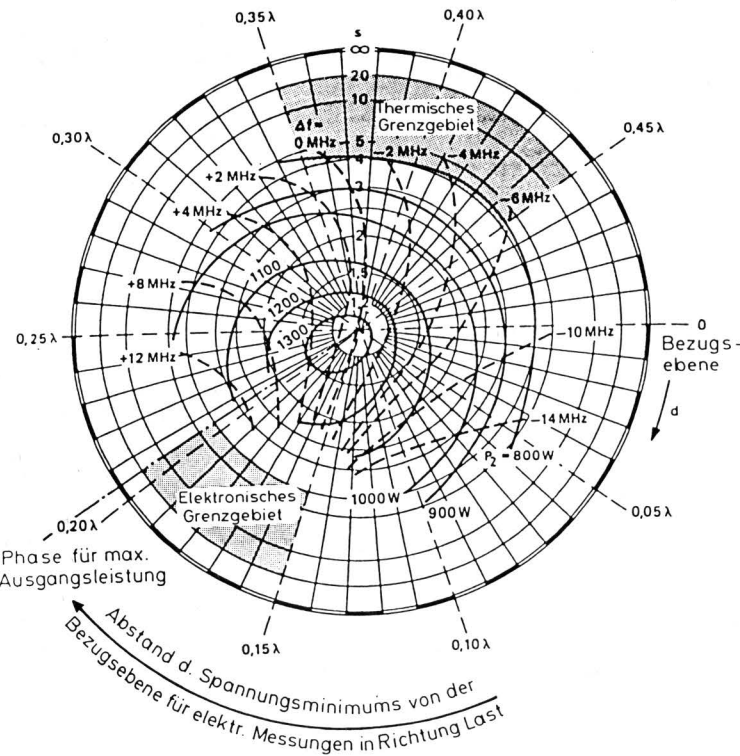


Bild 4. Betriebs-sicherer Sendeleistungsbereich eines 1,2 kW Magnetrons; nach Valvo-Unterlagen [20].

Dies hat in Wirklichkeit jedoch nur ein zeitabhängig verändertes Energieangebot, nicht aber eine veränderte, wirksame Feldstärke zur Folge. Deren Einfluß auf das Produkt bleibt folglich unberücksichtigt.

Genau an diesem Punkt setzen nun die Untersuchungen im Institut für Agrartechnik der Universität Göttingen an. Ziel dieser Versuche ist es, den Trocknungsverlauf bei Getreide unter Berücksichtigung der oben angeführten Parameter exakt zu erfassen. Zusätzlich sollen der Pilzkeimgehalt an Schimmelpilzen und die Keimfähigkeit ermittelt werden. In einem späteren Stadium der Versuche werden auch Untersuchungen von Inhaltsstoffen sowie energetische Betrachtungen folgen.

3. Aufbau und Durchführung der Versuche

Für die Untersuchungen wurde der aus **Bild 5** zu erkennende Versuchsaufbau erstellt. Der Resonanzraum e ist ein modifizierter Haushaltsmikrowellenofen mit einem neuen Magnetron d mit definierter Vorreflektion über eine Einwegleitung f und einem speziellen Rechteckhohlleiter g.

Das Magnetron besitzt eine Sendeleistung von 1,2 kW und ist im Bereich von 50 bis 1200 Watt stufenlos regelbar. Die Regelung erfolgt nicht durch Takten, sondern durch Variation der Sendeleistung. Dadurch ändern sich Feldstärke und Energieangebot.

Über dem Applikationsraum ist eine Waage a mit einer Drehvorrichtung angebracht. An ihr ist der Probenteller aufgehängt. Kontinuierliche Messungen des Gewichtsverlustes während der Behandlung erfassen den Trocknungsverlauf. Zur Vergleichmäßigung des Feldes wird die Probe während der Applikation mit definierter Frequenz gedreht. Die Oberflächentemperatur der Getreideprobe wird berührungslos durch ein IR-Strahlungstemperaturmeßgerät b ermittelt.

Das Abführen des Wasserdampfes bewirkt eine in den Ofen eingebaute Absaugvorrichtung, die dem Applikationsraum klimatisierte Luft zuführen kann, um beispielsweise durch Verwendung von Trocknungsluft mit hoher relativer Luftfeuchte eine konvektive Trocknung während der Mikrowellenapplikation auszuschließen.

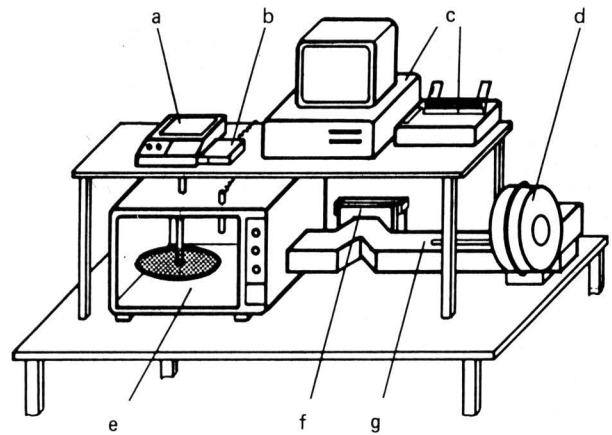


Bild 5. Versuchsaufbau der 1,2 kW-Mikrowellen-Trocknungsanlage.

- | | |
|----------------------------------|---------------------------|
| a Präzisionswaage | d 1,2 kW-Magnetron |
| b IR-Temperaturmeßgerät | e Resonanzraum |
| c Datenerfassung und -auswertung | f Einwegleitung |
| | g geschlitzter Hohlleiter |

Die gesamte Anlage ist über ein Vielstellen-Meßdatenerfassungsgerät c mit einem Prozeßrechner verbunden, der die Meßdaten erfäßt und gegebenenfalls die Regelung des Magnetrons zur Einhaltung einer exakten Oberflächentemperatur vornimmt.

Die Versuche wurden mit angefeuchtetem Weizen der Sorte Kanzler durchgeführt. Es wurden 250 g Probenmasse auf dem Drehteller gleichmäßig verteilt. Danach wurden 1,2 kW Mikrowellenleistung solange appliziert, bis die gewünschte Oberflächentemperatur von 40 oder 60 °C erreicht war. Hierzu genügte eine Applikationszeit von maximal 30 s. Danach wurde rechnergesteuert nur noch soviel Leistung gesendet, wie zum Erhalt der angestrebten Oberflächentemperatur nötig war.

Die Konvektionstrocknung als Vergleich mit den Mikrowellenversuchen wurde in einem umgebauten Klimaschrank durchgeführt; auch hier erfaßte eine kontinuierliche Wägung während der Belüftung den Trocknungsfortschritt.

Die Luftgeschwindigkeit betrug in beiden Versuchsanlagen 0,2 m/s. Der absolute Wasserdampfgehalt der Luft war ebenfalls gleich. Die Lufttemperaturen bei den Konvektionstrocknungsversuchen betragen 40 und 60 °C und entsprachen somit den angestrebten Oberflächentemperaturen des Getreides während der Mikrowellenapplikation.

4. Ergebnisse der Versuche

4.1 Massenabnahme und Trocknungsgeschwindigkeit

Im **Bild 6** ist die Massenabnahme von feuchtem Weizen im Vergleich von Mikrowellen- und Konvektionstrocknung aufgetragen. Die Ausgangsfeuchte der Proben betrug 25 %, die Ausgangsmasse 250 g. Die Trocknung wurde fortgesetzt bis zum Erreichen einer Endfeuchte von ca. 14 %. Diese Feuchte stellte sich am schnellsten bei Mikrowellentrocknung mit 60 °C Oberflächentemperatur ein. Erwartungsgemäß dauerte die Trocknung bei Belüftung mit 40 °C Lufttemperatur am längsten.

Bei gleicher Temperatur ist die Mikrowellentrocknung in jedem Fall hinsichtlich der Trocknungsgeschwindigkeit der Konvektionstrocknung deutlich überlegen. Die anhand dieses Bildes bereits erkennbare Beschleunigung der Trocknung durch Mikrowellen wird besonders deutlich beim Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten über der Trocknungszeit, **Bild 7**.

Bei der Mikrowellentrocknung erreicht die Trocknungsgeschwindigkeit in weniger als einer Minute Behandlungsdauer ein ausgeprägtes Maximum. Dies steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem schon erwähnten schnellen Erreichen der angestrebten Korntemperatur.

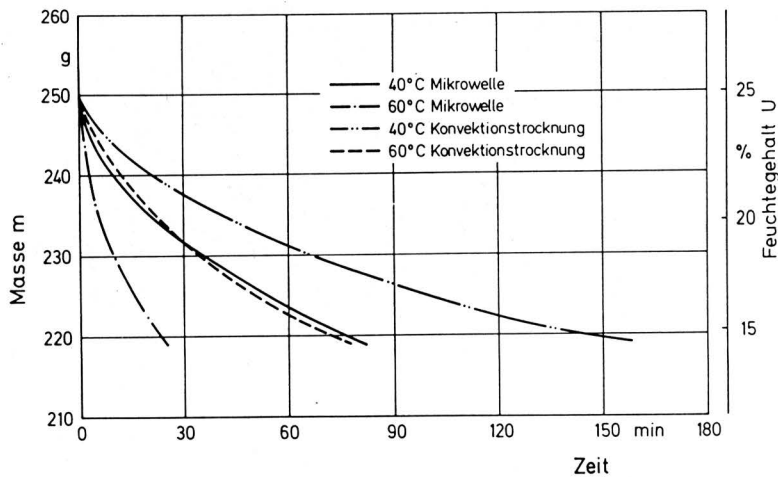


Bild 6. Masse und Feuchtegehalt als Funktion der Zeit bei Mikrowellen- und Konvektionstrocknung; Anfangsfeuchte 25 %, Endfeuchte 14,4 %, Luft- bzw. Kornoberflächentemperatur 40 und 60 °C.

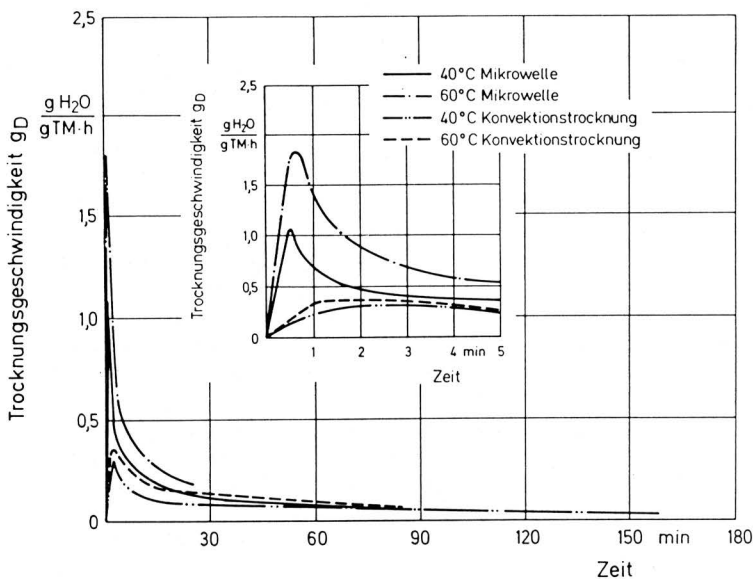


Bild 7. Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion der Zeit bei Mikrowellen- und Konvektionstrocknung; Anfangsfeuchte 25 %, Endfeuchte 14,4 %, Luft- bzw. Kornoberflächentemperatur 40 und 60 °C.

Nach dem Erreichen dieses Maximums fällt die Trocknungsgeschwindigkeit bei den Mikrowellenvarianten sehr stark ab, liegt aber bei einer Oberflächentemperatur von 60 °C bis zum Erreichen des Endfeuchtegrades höher als jede Konvektionstrocknungsvariante.

Bei Mikrowellentrocknung mit 40 °C Oberflächentemperatur sinkt nach ca. 20 min die Trocknungsgeschwindigkeit auf ein niedrigeres Niveau als bei der Konvektionstrocknung mit 60 °C.

Diese Ergebnisse machen deutlich, daß die Verwendung von Mikrowellenenergie bei der Getreidetrocknung geradezu prädestiniert ist für den Einsatz in Durchlauftrocknern. Zum einen ist das auf die Möglichkeit der schnelleren Körnererwärmung und des damit verbundenen beschleunigten Einsetzens der Trocknung zurückzuführen. Ein anderer Grund für diese Aussage ergibt sich aus der Betrachtung des Verlaufes der Trocknungsgeschwindigkeit über dem relativen Feuchtegrad nach **Bild 8**.

Besonders bei Mikrowellentrocknung mit 60 °C Oberflächentemperatur liegt die Trocknungsgeschwindigkeit auch bei niedrigen Feuchtegraden immer über denen der Vergleichsvarianten. Für die 40 °C-Behandlungsstufe gilt dies nur bei höheren Feuchtegraden.

Offensichtlich wird das Anwachsen der Trocknungswiderstände über der abnehmenden Gutfeuchte durch das Verfahren der Mikrowellenapplikation besser kompensiert.

Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, daß über das Eindringungsvermögen der Mikrowellen die Energieumsetzung direkt an den Wassermolekülen erfolgt. Damit erwärmt sich das Getreidekorn nicht nur außen, sondern, wenn auch in abnehmendem Maße, direkt im Innern. Dies ist bei Diffusionsvorgängen von Wasserdampf aus tieferen Kornschichten natürlich von Vorteil.

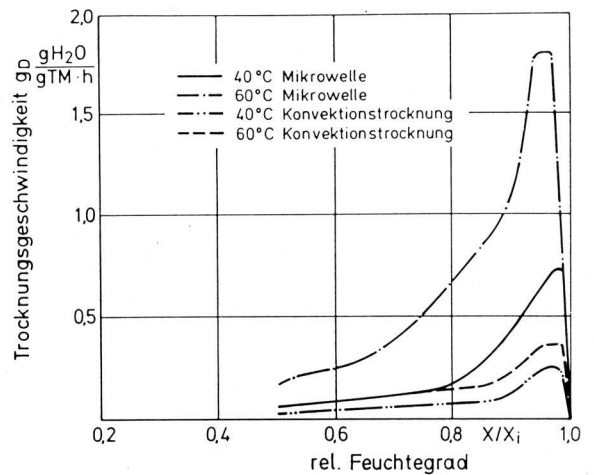


Bild 8. Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades bei Mikrowellen- und Konvektionstrocknung; Anfangsfeuchte 25 %, Endfeuchte 14,4 %, Luft- bzw. Kornoberflächentemperatur 40 und 60 °C.

4.2 Schimmelpilzbesatz und Keimfähigkeit der Körner

In **Tafel 1** sind der Pilzkeimgehalt und die Keimfähigkeit der Körner nach unterschiedlicher Behandlung mit Mikrowellenenergie aufgeführt.

Die linke Spalte gibt den Ausgangszustand hinsichtlich Pilzbesatz und Keimfähigkeit an. Die Spalten 2 und 3 zeigen die Ergebnisse bei Trocknung auf Endfeuchte mit langer Behandlungsdauer, die Spalten 4 und 5 die Ergebnisse für eine Applikationsdauer von 10 min, wobei eine genügend niedrigere Endfeuchte noch nicht erreicht wird.

Deutlich zu erkennen ist die Abnahme von Pilzbesatz und Keimfähigkeit bei den Behandlungsvarianten mit 60 °C Oberflächentemperatur. Bei 40 °C erfolgt tendenziell eine Verringerung des Pilzbesatzes ohne Schädigung der Keimfähigkeit.

Bemerkenswert ist in jedem Fall, daß die Reduktion der Pilzkeime und auch der Keimfähigkeit innerhalb von 10 min nach Behandlungsbeginn abgeschlossen ist (Spalten 4 und 5 im Vergleich mit Spalten 2 und 3). In dieser Zeit liegt auch die Phase mit der größten Sendeleistung von 1,2 kW. Gleichzeitig findet in ihr wegen des höheren Wassergehaltes der Körner der größte Umsatz an Mikrowellenenergie statt.

Art der Behandlung Parameter	un- behandelt	II behandelt	III behandelt	IV behandelt	V behandelt
Oberflächentemperatur °C	-	40	60	40	60
Ausgangsfeuchte %	23	23	23	23	23
Endfeuchte %	-	14	14	20	17
Behandlungsdauer min	-	91	21	10	10
Pilzkeime (Keime/g _{TM})	33000	22000	5000	16000	5000
Keimfähigkeit (%)	90	88	30	91	27

Tafel 1. Keimfähigkeit und Anzahl von Schimmelpilzkeimen nach Behandlung mit Mikrowellenenergie bei unterschiedlicher Applikationsdauer; Anfangsleistung d. Magnetrons 1,2 kW.

Art der Behandlung Parameter	un- behandelt	II behandelt	III behandelt	IV behandelt	V behandelt
Oberflächentemperatur °C	-	40	60	40	60
Ausgangsfeuchte %	23	23	23	16	16
Endfeuchte %	-	14	14	<14	<14
Behandlungsdauer min	-	166	63	166	63
Pilzkeime (Keime/g _{TM})	33000	22000	5000	34000	8000
Keimfähigkeit (%)	90	88	30	90	40

Tafel 2. Keimfähigkeit und Anzahl von Schimmelpilzkeimen nach Behandlung mit Mikrowellenenergie bei unterschiedlichem Ausgangsfeuchtegehalt; Anfangsleistung d. Magnetrons 1,2 kW.

Es stellt sich daher die Frage, ob die Reduktion der Keimfähigkeit und des Pilzbesatzes eine Funktion des Wassergehaltes der Körner ist. Eine Antwort auf diese Frage ergibt sich aus **Tafel 2**.

Spalte 1 zeigt wieder den Ausgangszustand. In den Spalten 2 und 3 sind die Ergebnisse der Varianten mit hoher Ausgangsfeuchte, in den Spalten 4 und 5 die der Behandlungsvarianten mit niedriger Ausgangsfeuchte aufgetragen.

Tendenziell führen höhere Ausgangsfeuchten (Spalten 2 und 3) zu einem stärkeren Rückgang der Pilzkeime und der Keimfähigkeit, als dies bei niedriger Ausgangsfeuchte (Spalten 4 und 5) der Fall ist. Bei 60 °C Oberflächentemperatur ist der Effekt der Mikrowellenapplikation auf Pilzbesatz und Keimfähigkeit wieder sehr deutlich.

Bei 40 °C scheint eine Reduktion des Pilzbesatzes ohne größere Schädigung der Keimfähigkeit möglich zu sein, wenn ausreichend Feuchte zur Verfügung steht.

Ein Vergleich von Pilzkeimbesatz und Keimfähigkeit des Weizens nach Mikrowellen- bzw. Konvektionstrocknung läßt bisher trotz mehrfacher Wiederholungen keine eindeutigen Aussagen zu. Bei Konvektionstrocknung mit 60 °C reduziert sich die Keimfähigkeit der Körner in gleicher Weise wie bei der Mikrowellenapplikation. Eine Verminderung der Pilzkeimzahlen ist hier jedoch im Gegensatz zur entsprechenden Mikrowellenvariante nicht immer aufgetreten. Dies steht im Einklang mit Aussagen im Schrifttum, die eine Abtötung vegetativer Pilzkeime infolge konvektiver Erwärmung erst im Temperaturbereich oberhalb 60 °C erwarten lassen [21]. Ob Mikrowellen tatsächlich schon bei niedrigeren Temperaturen Pilzkeime abtöten können, ist daher noch nicht eindeutig zu beantworten.

Zur Klärung dieser Frage ist eine genaue Betrachtung des Energieumsatzes des Prozesses, der wirksamen Feldstärken und des Temperaturverlaufes im Korn unumgänglich. Dies ist Gegenstand unserer zukünftigen Untersuchungen.

5. Zusammenfassung

Als Ergebnis der bisherigen Versuche ist festzustellen, daß es durch Verwendung von Mikrowellen zur Getreidetrocknung möglich ist, schon bei Oberflächentemperaturen von 40 °C Trocknungsgeschwindigkeiten zu erzielen, wie sie sich bei der Konvektionstrocknung erst mit 60 °C Lufttemperatur einstellen.

Dies ist im Gegensatz zur Konvektionstrocknung aber ohne Schädigung der Keimfähigkeit der Körner erreichbar. Dabei lassen sich möglicherweise unter Einhaltung noch exakt zu bestimmender Bedingungen auch die Keimzahlen an Schimmelpilzen und eventuell anderen Schadorganismen reduzieren.

Allein dieser Umstand beweist, daß bei richtiger Anwendung die Mikrowellentrocknung schonender als andere Verfahren sein kann. Für eine praktische Umsetzung dieser Ergebnisse ist deshalb die Ermittlung weiterer Grundlagen unter Einbeziehung der oben angeführten Parameter unumgänglich.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Nelson, S.O. u. B. Russel*: Models for estimating the dielectric constants of cereal grains and soybeans. *Journal of Microwave Power* Bd. 21 (1986) Nr. 2, S. 110/12.
- [2] *Sang Ha Noh u. S.O. Nelson*: Dielectric properties of rice at frequencies from 50 Hz to 12 GHz. *Trans. ASAE* Bd. 32 (1989) S. 991/98.
- [3] *Nelson, S.O.*: RF and microwave energy for potential agricultural applications. *Journal of Microwave Power* Bd. 20 (1985) Nr. 2, S. 65/70.
- [4] *Spreng, H.*: Sterilisation von stückigen Lebensmitteln mit Mikrowellen. Diss. ETH Zürich, 1975.
- [5] *Rosenberg, Ute u. W. Bögl*: Der Einfluß von Mikrowellen-erhitzung auf den Keimgehalt von Lebensmitteln. *Fleischwirtschaft* Bd. 62 (1982) Nr. 9, S. 1182/87.
- [6] *Hielscher, W.*: Über die mikrobiologische Qualität von Müsli und die Verringerung des Keimgehalts mit Mikrowellen. Ingenieurarbeit Technische Fachhochschule Berlin 1983.
- [7] *Pohland, Andrea*: Versuche zur Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften von Mehl und Getreide durch Mikrowellen. Ingenieurarbeit Technische Fachhochschule Berlin 1983.
- [8] *Klingler, R.W.*: Mikrowellenbehandlung von Müsliprodukten. *Lebensmitteltechnik* (1984) Nr. 9, S. 446/50.
- [9] *Nelson, S.O., L.E. Stetson u. W.W. Wolf*: Long-term effects of RF dielectric heating on germination of alfalfa seed. *Trans. ASAE* Bd. 27 (1984) S. 255/58.
- [10] *De Vries, C.*: Versuche zur Trocknung von Saatmais mit Mikrowellenenergie. Diplomarbeit Univ. Göttingen 1988.
- [11] *MacArthur, L.A. u. B.L. Apollonia*: Effects of microwave radiation and storage on hard red spring wheat flour. *Cereal Chemistry* Bd. 58 (1981) Nr. 1, S. 53/65.
- [12] *Meisel, N.*: Mikrowellen beim Trocknen von Teigwaren. *Getreide, Mehl und Brot* (1976) Nr. 7, S. 187/89.
- [13] *Schmidt, F.*: Trocknung und Wärmebehandlung von Getreide oder Sojabohnen mit einer neuentwickelten Wärmebehandlungsanlage. *Die Mühle und Mischfuttertechnik* Bd. 124 (1987) Nr. 14, S. 179/81.
- [14] *Rodda, E.D., P.R. Hill u. K.E. Harshbarger*: Microwave roasted soybeans. *Trans. ASAE* Bd. 27 (1984) S. 282/86.
- [15] *Meyer, W. u. W. Schilz*: High frequency dielectric data on selected moist materials. *Journal of Microwave Power* Bd. 17 (1982) Nr. 1, S. 67/81.

- [16] *Radajewski, W., P. Jolly u. G.Y. Abawi:* Grain drying in a continuous flow drier supplemented with a microwave heating system. Journal of Agricultural Research Bd. 41 (1988) S. 211/25.
- [17] *Dorn, F.:* Physik. Hannover: Schroedel-Verlag 1975.
- [18] *Euler, G.:* Mikrowellenanwendungen für die Industrie. Hamburg: Handbuch der Fa. Valvo 1971.
- [19] *Püschner, H.:* Wärme durch Mikrowellen. Eindhoven: Technische Bibliothek der Fa. Philips 1964.
- [20] *N.N.:* Dauerstrichmagnetrons. Hamburg: Datenbuch der Fa. Valvo 1985, modifiziert nach: *Euler, G.:* Messungen und Entwicklungsgesichtspunkte für Mikrowellengeräte mit Dauerstrichmagnetrons. Hamburg: Handbuch der Fa. Valvo 1978.
- [21] *Schlegel, H.G.:* Allgemeine Mikrobiologie. Stuttgart: Thieme-Verlag 1981.

Beurteilung nicht quantifizierbarer Verfahrensparameter von Feuchtgetreidekonservierungsverfahren mit der Nutzwertanalyse

Von Thomas Jungbluth, Stuttgart-Hohenheim*)

DK 664.8.032:664.8.035.7:330.133

In der Bundesrepublik Deutschland werden je nach Klimaregion zwischen 50 und 85 % der gesamten Getreidemenge in einem Zustand geerntet, der vor der Lagerung eine Konservierung notwendig macht. Berücksichtigt man zusätzlich, daß mehr als 50 % des geernteten Getreides in der tierischen Produktion veredelt werden, so ist zu erwarten, daß die sogenannten Feuchtkonservierungsverfahren zunehmend Bedeutung erlangen werden. Es war daher notwendig, die bekannten Verfahren zu beurteilen. An diesem Beispiel wird das Einbeziehen nicht direkt quantifizierbarer Parameter mittels einer Nutzwertanalyse vorgestellt.

1. Einleitung

Am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim wurden langjährige Untersuchungen zur Beurteilung von Konservierungsverfahren für Feuchtgetreide und CCM durchgeführt. Es sollten bekannte Verfahren überprüft werden und aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ggf. neue Verfahren entwickelt werden. Ziel und Gliederung der Untersuchung sind in **Bild 1** dargestellt. Die Ergebnisse der Versuche im Labor, halbtechnischen und technischen Maßstab sowie der Fütterungsversuche wurden bereits veröffentlicht [1, 2, 3, 4].

Zur ökonomischen Einordnung der Verfahren wurde, aufbauend auf den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen, eine Kostenvergleichsrechnung durchgeführt, deren Ergebnisse in **Tafel 1** zusammengefaßt sind [5].

2. Aufgabenstellung

Bei reiner Kostenvergleichsrechnung ist von funktionsgleichen Anlagen auszugehen [6]. Da dies bei den betrachteten Verfahren nicht uneingeschränkt der Fall ist, sollen neben dem Ziel der Kostenminimierung auch weitere Ziele mit berücksichtigt werden, die jedoch zu einem großen Teil nicht quantifizierbar sind, sondern als qualitative Werturteile formuliert sind.

Die Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert, der an dieser Stelle gedankt sei.

*) Prof. Dr. T. Jungbluth und Prof. Dr. Th. Bischoff leiten am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim das Fachgebiet "Verfahrenstechnik in der Tierproduktion und landwirtschaftliches Bauwesen".

ZIEL: Beurteilung von Feuchtgetreidekonservierungsverfahren

Erweiterung des Kenntnisstandes

Bestimmung optimaler Verfahrensparameter (Laborversuch)

- Vermahlungsgrad
- Gutfeuchte
- aerobe Stabilität

Überprüfung der Verfahren (technischer Maßstab)

- Konservierungsverlauf
- Fütterungsversuche

Verfahrensbeurteilung

- Kostenvergleichsrechnung
- Nutzwertanalyse

Bild 1. Ziel und Gliederung der Untersuchungen zur Beurteilung von Verfahren der Feuchtgetreidekonservierung.

Verfahren		Konservierungskosten (DM/dt) bei Lagerkapazität von ...		
		200 m ³	400 m ³	600 m ³
Hochsilo, gasdicht	A 1	6,26	4,16	3,47
Flüssigkonservierung	A 2	10,53	6,82	6,19 ^{*)}
Flachsilo				
o. Propions., Eigenbau	A 3	6,93	5,78	5,41
" " Unternehmer		7,45	6,22	5,80
m. Propions., Eigenbau	A 4	8,90	7,39	6,90
" " Unternehmer		9,42	7,83	7,29
Hochsilo, nichtgasd.	A 5	6,37	4,19	3,48

*) 500 m³

Tafel 1. Gesamtkosten verschiedener Verfahren zur Feuchtgetreidekonservierung bei unterschiedlicher Lagerkapazität.