

Sonderabdruck  
aus „Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung“  
127. Band, 1. Heft, 1965, Seite 22—32

---

J. F. Bergmann, München | Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg · New York

## **Anwendung von Versuchsanlagen\* im Zusammenhang mit Problemen der Gefriertrocknung von Lebensmitteln\*\***

Von

**GEORG KALLISTRATOS, REINHOLD VON SENGBUSCH und KARL GOERGEN**

*Mitteilung aus dem Max-Planck-Institut für Kulturpflanzenzüchtung Hamburg-Volksdorf*

Mit 6 Textabbildungen

*(Eingegangen am 22. April 1964)*

---

\* Nach angelsächsischem Gebrauch: *pilot plants*.

\*\* Die vorliegende Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.  
Wir danken der DFG für die finanzielle Hilfe.

### *Einleitung*

Im Laufe der letzten Jahre gewann die Gefriertrocknung für die Konservierung von Lebensmitteln auf Grund zahlreicher Vorzüge gegenüber anderen Konservierungsmethoden immer größere Bedeutung (1–19). Die wichtigsten Vorteile der gefriergetrockneten Lebensmittel im Vergleich zur Tiefkühlkost sind folgende:

- a) Gewichts- und Transportkostensparnis in Höhe von 60–90%.
- b) Fortfall der Tiefkühlkette für Transport und Lagerung und der damit verbundenen hohen Kosten.
- c) Lagerfähigkeit in jedem Haushalt ohne Kühlschrank.
- d) Lagerfähigkeit unter allen klimatischen Bedingungen.
- e) Leichte Verteilbarkeit bis zum Verbraucher.
- f) Vermeidung der Gefahr des Verderbens der Ware beim Auftauen.

Außer den genannten sind folgende Vorteile noch zu berücksichtigen:

- a) Erhaltung der biologischen Wertigkeit wegen Fortfalls der Sterilisierung.
- b) Weitgehende Erhaltung des naturfrischen Aromas und Geschmacks.
- c) Fortfall von Konservierungsmitteln und chemischen Zusätzen.
- d) Erhaltung der Konsistenz des getrockneten Gutes.
- e) Leichte Zubereitung.
- f) Qualitätsverbesserung durch Konzentration des Aromas und Geschmacks auf Grund der Zugabe einer geringeren Wassermenge als dem Frischgut ursprünglich entzogen worden ist.

Bei der Verwendung des gefriergetrockneten Gutes treten gewisse Schwierigkeiten auf, die als Nachteile anzusehen sind, z. B. die unvollständige bzw. schlechte Rehydratation bei manchen Produkten. Auf Grund dieser Nachteile sind einige gefriergetrocknete Produkte für den Konsum vorläufig noch ungeeignet (20, 21).

Die steigende Anwendung der Gefriertrocknung von Lebensmitteln hängt u. a. davon ab, ob die Züchter neue Sorten, die für die Gefriertrocknung geeignet sind, schaffen, ob die Lebensmittelindustrie verbesserte Verfahren der Gefriertrocknung entwickelt und ob neue Kochrezepte für die gefriergetrockneten Produkte gefunden werden (16).

Zur Bearbeitung und Lösung von Problemen der Verfahrenstechnik, der Züchtung, der Aufbereitung, der Verpackung und Lagerung und nicht zuletzt zur Erarbeitung von Prozeßdaten für den Betrieb von Großproduktionsanlagen werden kleinere Geräte im Labormaßstab, sog. *pilot-plants*, benötigt, bei denen die verfahrenstechnisch wesentlichen Parameter Eiskondensatortemperatur, Heiztablartemperatur, Gutstemperatur im weiten Bereich meß- und regelbar sind.

In der vorliegenden Mitteilung wird eine Anlage, die in Zusammenarbeit mit der Firma Martin Christ, Osterode/Harz, entwickelt und gebaut wurde, beschrieben.

## Technik

Die Versuchsanlage ist aus drei Teilen zusammengesetzt (Abb. 1):

1. *Der obere Teil* enthält die elektronischen Schalteinheiten sowie folgende Meßinstrumente:

I. Einen Zeitschalter für die Regelung der Vorfrierzeit.

II. Meßkontakte mit 9 über Meßstellenumschalter angeschlossenen Temperaturmeßfühlern.

Diese Meßfühler können sowohl für die Steuerung der Sublimationswärmezufuhr in Abhängigkeit von Guts- wie Tablar-temperatur, je nach ihrer Plazierung im Gut oder Tablar, benutzt werden. Der Meßbereich liegt zwischen  $-50$  und  $+60^{\circ}\text{C}$ .

III. Pirani Vakuummeter, Meßbereich 1 bis  $10^{-3}$  Torr.

IV. Meßkontakte für die Regelung und Messung der Temperatur des solegekühlten Eiskondensators im Bereich von  $-4^{\circ}$  bis  $-60^{\circ}\text{C}$ .

V. Widerstandsmeßbrücke zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Trockengutes zur Bestimmung des eutektischen Punktes.

Schalter:

I. 1 Hauptschalter „Ein“ und „Aus“.

II. Automatische oder manuell zu bedienende Einschaltung der Vakuumpumpe.

III. Die Abtautaste „Ein“ und „Aus“.

Das Abtauen erfolgt mit Hilfe einer Abtauheizung von 2000 W. Die Heizung schaltet automatisch aus, wenn die Temperatur in der Vakuumkammer  $+20^{\circ}\text{C}$  erreicht hat.

IV. Schalter für die niedervoltbetriebene Infrarotheizung für die Sublimationswärmezufuhr mittels Strahlung.

2. *Der mittlere Teil* enthält:

I. Die Vakuumkammer aus V2A-Stahl, stark wärmeisoliert, 60 cm  $\varnothing$  und 52 cm tief, nutzbarer Raum etwa 150 l. An der Innenwand der zylinderförmigen Vakuumkammer befindet sich der spiralförmige, solegekühlte Kondensator, welcher ein maximales Fassungsvermögen von 15 kg Eis hat. Das Trocknen des Gutes erfolgt auf 9 heizbaren Tablaren, die übereinander horizontal angeordnet sind. Als Absicherung gegen Überhitzung der Tablare ist jeweils zwischen den Strom-

zuführungen ein zusätzlich einstellbarer Thermostat eingebaut, welcher die Stromzufuhr zu den Tablaren unterbricht, sobald die eingestellte Maximal-Temperatur überschritten ist. Hinter der Vakuumkammer sind die Umwälzpumpe, der Solebehälter und der Verdampfer eingebaut.

Mit Hilfe von zwei Meßfühlerverteilern werden die jeweils von 1—9 nummerierten Meßfühler an die entsprechenden Tablare und an Stichproben des zu trocknenden Gutes geführt, und während des Gefriertrocknungsprozesses die Tablar- und Guttemperaturen bei allen 9 Tablaren gemessen und ständig kontrolliert. Durch 2 Elektroden wird der Widerstand in einer Stichprobe des zu trocknenden Gutes während der Vorkühlung gemessen und der eutektische Punkt ermittelt.

3. *Der untere Teil* enthält die Vakuumpumpe, den kW-Zähler, den Wärmeaustauscher, den Kältekompressor und den wassergekühlten Kondensator.

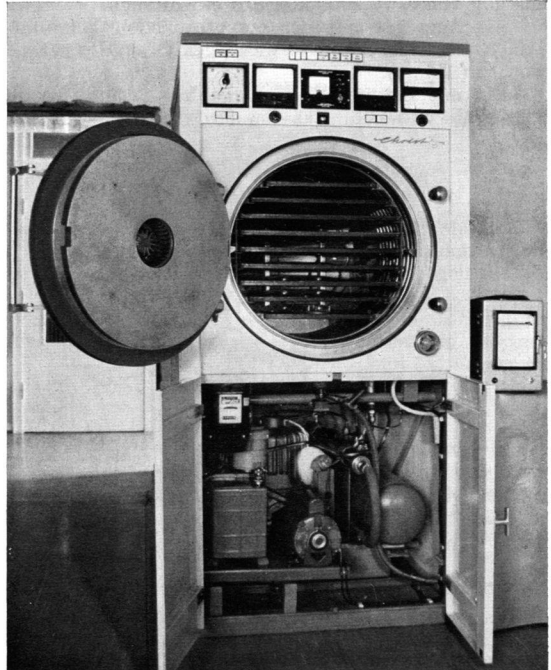


Abb. 1. Versuchsanlage zur Gefriertrocknung (MPI Hamburg).  
*Oberer Teil:* Die elektronische Schalteinheit bzw. die Meßinstrumente von links nach rechts: I. Vorfrierzeitschalter, II. Meßkontakte für die Fernsteuerung der Tablar- bzw. Gutstemperatur, III. Pirani-Vakuummeter, IV. Temperaturmeßkontakte für Eiskondensator, V. Elektrischer Leitfähigkeitsmesser, VI. Meßstellenumschalter, Schalter: 1. Haupt-Ein- und Ausschalter, 2. Einschalter für Vakuumpumpe, 3. Abtauschalter, 4. Infrarotlampe. *Mittlerer Teil:* Trockenkammer, Tablare, Kondensator, Meßfühlerverteiler links und rechts hinten, Meßfühler für Widerstandsmessungen; *Unterer Teil:* Vakuumpumpe, kW-Zähler, Wasseruhr, Kältekompressor, Wärmeaustauscher. *Rechts außerhalb:* 6-Farben-Punktschreiber

Zur Versuchs-Anlage gehört:

1 automatischer 6-Farben-Punktschreiber für die laufende Registrierung von

1. Tablar-Temperatur.
2. Kondensator-Temperatur.
3. Guts-Temperatur.
4. Widerstand im Trockengut.
5. Vakuum.
6. Tablar-Heizung.

#### Versuchsbedingungen

Für eine durchschnittliche Sublimation von 10 l Wasser in 5 Std, d. h. 2 l/Std, ist eine Kälteleistung von etwa 2000 kcal/Std erforderlich.

Als Aggregat mit der entsprechenden Leistung bei einer Verdampfungstemperatur von  $-60^{\circ}\text{C}$  ist das 2stufige wassergekühlte Hermetik-Aggregat (*k*) (Kältekompressor) gewählt worden (Abb. 2).

Ein mit Leitungswasser gekühltes System (*n*) durchläuft den Kondensator (*i*) des Kälteaggregates und kühlt das aus der 2. Stufe kommende Frigen R 22. Das ablaufende Wasser aus

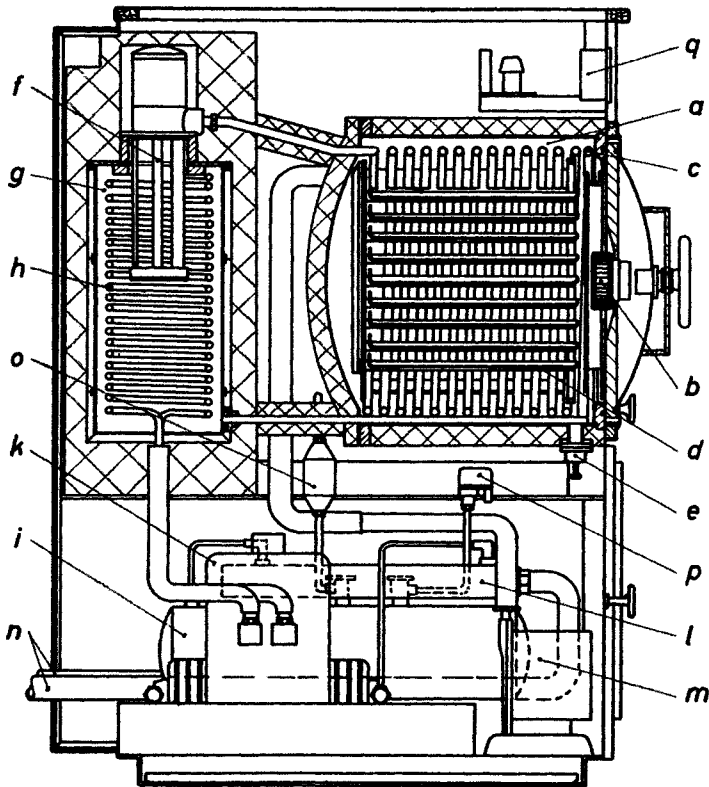


Abb. 2. Schematische Darstellung der (MPI Hamburg) Gefriertrocknungsanlage

dem Kondensator (*i*) fließt dann durch den Wärmeaustauscher (*l*) und kühlt das aus der 1. Stufe des Kältekompressors kommende Frigen.

Zur Absicherung des Kondensators gegen Überdruck ist der Überdruckschalter (*p*) eingebaut.

Über eine Trockenpatrone (o) wird das Frigen mit 2 thermischen Expansionsventilen in den Verdampfer (h) des Solebehälters (g) eingespritzt. Als Soleträger wird Methanol verwendet (flüssig zwischen  $+64,7$  und  $-97^{\circ}\text{C}$ ).

Die Kühlung des Trockenkammer-Kondensators (c) erfolgt durch Soleumwälzung. Das Durchpumpen der Sole durch den Trockenkammer-Kondensator wird mit einer Tauchpumpe (f) vorgenommen. Um ein plötzliches Absinken der Soletemperatur beim Einschalten der Umwälzpumpe zu vermeiden, war es erforderlich, den Verdampfer (h) und den Solebehälter (g) groß auszulegen.

Zur Evakuierung der Anlage ist eine 2stufige Öl-Rotations-Vakuumpumpe mit einer Leistung von  $8,4 \text{ m}^3/\text{Std}$  verwendet worden. Die leere Trockenkammer erreicht ein Vakuum von  $10^{-1}$  Torr innerhalb von 15 min.

#### Versuchsdurchführung

Die Inbetriebnahme der Versuchsanlage erfolgt nach:

- a) Einstellung der Sole-Temperatur.
- b) Vorwahl der Vorfrierzeit.
- c) Einführung der Meßfühler ins Tablar bzw. in Stichproben des Gutes sowie der Meßelektroden zur Gutswiderstandsmessung.
- d) Einstellung und Regelung der Guts- und Tablartemperatur.

##### a) Die Soletemperatur.

Das verwendete 2stufige Aggregat, das als Kältemittel Frigen R 22 (22) und Methanol als Soleflüssigkeit enthält, kann praktisch eine Soletemperatur bis zu  $-56^{\circ}\text{C}$  erreichen. Beim Umwälzen der Sole — nach Einführung des zu trocknenden Gutes — erwärmt sich die Soletemperatur um etwa  $5^{\circ}\text{C}$ .

Arbeitet man mit tieferen Temperaturen, so kann man anstelle von Methanol als Soleflüssigkeit auch Isopentan auf Grund seiner günstigen Dampfdruckeigenschaften verwenden. Isopentan hat im Gegensatz zu Methanol den Vorteil, daß es weniger toxisch als Methanol ist. Ferner wird Dekalin als Soleflüssigkeit benutzt.

##### b) Vorwahl der Vorfrierzeit

Die Einfriergeschwindigkeit des Gutes ist abhängig von der Soletemperatur. Um eine schnelle Abkühlung des Gutes zu erzielen, ist es erforderlich, eine möglichst tiefe Soletemperatur zu verwenden. Bei langsamem Einfrieren des Gutes besteht die Gefahr der Abscheidung hochkonzentriert gelöster Anteile und die Ausbildung zweier Phasen. Neben reinem Eis liegt dann eine flüssige Phase hochkonzentrierter Lösung vor (23, 24), die infolge starker Dampfdruckerniedrigung schwer oder gar nicht mehr gefriergetrocknet werden kann. Bei Fleisch und Gemüse beispielsweise tritt eine Strukturänderung der Gewebe ein, die eine protoplasmatische Entmischung bzw. eine Zerstörung des Kolloidcharakters verursacht (25). Demzufolge erscheint das Produkt bei einer organoleptischen Untersuchung schwammig und rauh. Histologisch sind charakteristische grobvakuolige Degenerationen des getrockneten Produktes zu finden (26). Es wäre demnach bei einem langsamen Gefrieren eine Veränderung der Konsistenz bzw. eine Verschlechterung der Qualität des gefriergetrockneten Gutes zu erwarten. Die Vorfrierzeit wird durch den eutektischen Punkt des Trockengutes und die anzuwendende Temperatur bestimmt.

Bei den untersuchten Champignons und Erdbeeren liegt der eutektische Punkt bei  $-28^{\circ}$  bzw.  $-30^{\circ}\text{C}$ . Diese Temperatur wird bei der Versuchsanlage (Soletemperatur  $-50^{\circ}\text{C}$ ) nach 1–2 Std erreicht. Erst dann ist die Vakuumpumpe einzuschalten. Bei zuckerhaltigen Produkten wird hierdurch eine Schaumbildung vermieden.

Zur Bestimmung des eutektischen Punktes werden die Widerstandsmessungen im Gut durchgeführt. Ist der eutektische Punkt erreicht, springt der Widerstand im Gut von etwa  $100 \text{ k}\Omega$  auf  $40 \text{ M}\Omega$  und höher (Abb. 3a).

##### c) Meßfühler

An den zwei in der Trockenkammer befindlichen Verteilern sind jeweils 9 Meßfühler eingebaut. Sie dienen zur Messung der Tablar- und Gutstemperatur während des Gefrier- und Trocknungs-

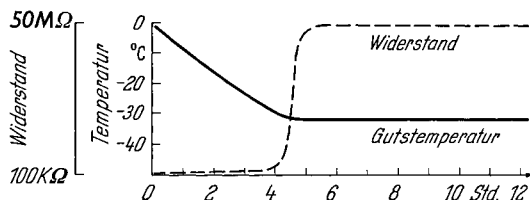


Abb. 3a. Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Gutstemperatur im Bereich des eutektischen Punktes

prozesses. Trotz der in die Tablare eingebauten Thermostaten zeigen die Tablare während des Gefriertrocknungsprozesses unterschiedliche Temperaturen. Durch die starke thermische Abstrahlung des oberen und unteren Tablars, die mit ihrer gesamten Fläche dem Eiskondensator unmittelbar benachbart gegenüberliegen, tritt hier eine Temperaturdifferenz bis zu 10°C auf gegenüber solchen Tablaren, die in der Mitte liegen und sich gegenseitig anstrahlen (Tabelle).

Tabelle. *Tablartemperaturunterschiede bei Fernsteuerung der Tablartemperatur durch Tablar-meßfühler Nr. 9. (Das Gut ist auf -30°C vorgefroren; T = Tablar-, G = Gutstemperatur)*

Tablar Nr.	Vorwahl Temperatur									
	+ 5		+ 10		+ 15		+ 20		+ 30	
	Temperaturen									
	T °C	G °C	T °C	G °C	T °C	G °C	T °C	G °C	T °C	G °C
3	+ 8	- 7	+11	- 4	+15	- 2	+15	+ 4	+40	+25
4	- 2	-14	+ 2	-10	+ 6	- 8	+12	+ 4	+54	+40
5	+ 6	-18	+10	-11	+15	- 7	+22	+ 5	+56	+44
6	+18	- 8	+22	- 5	+27	0	+30	+25	+56	+54
7	+15	- 1	+22	+ 4	+28	+10	+32	+27	+50	+48
8	+ 8	-10	+18	- 3	+25	+ 4	+31	+20	+50	+45
9	+ 4	- 2	+ 8	+ 8	+14	+11	+20	+16	+30	+26

Angesichts der durchgeführten Messungen erscheint eine Beheizung der Tablare mit Soleumlauf im Interesse einer gleichmäßigen Temperierung eine unerläßliche Voraussetzung.

*d) Einstellung und Regelung der Guts- und Tablartemperatur*

Wenn die Temperatur den eutektischen Punkt erreicht hat, kann der Trocknungsprozeß beginnen. Durch die Regelung der Tablartemperatur wird die benötigte Sublimationswärme zugeführt. Bei unkontrollierter, starker Wärmezufuhr besteht die Gefahr der Wiedereinschmelzung des Produktes. Durch vorsichtiges Erhöhen der Tablartemperatur unter Beachtung der Leitfähigkeit kann ein Überschreiten der kritischen Zone am eutektischen Punkt und eine damit verbundene Qualitätseinbuße verhindert werden. In der Anlage wird eine zu starke Wärmezufuhr durch einen Abfall des elektrischen Widerstandes sofort angezeigt und im Schreiber registriert (Abb. 3b).

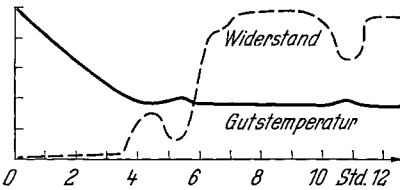


Abb. 3b. Abfall des Widerstandes durch Temperatursteigerung im Gut

Die Trocknung von Gütern mit einer Schichtdicke über 1 cm wird mit Hilfe der Meßfühler kontrolliert. Dadurch ist es möglich, verschiedene Produkte mit einem Durchmesser von 4 cm und höher optimal gefrierzutrocknen.

Der Trocknungsprozeß in der Versuchsanlage wird unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- a) Vorfrieren bis zum eutektischen Punkt, d. h. Widerstand im Gut minimal 10 MΩ.
  - b) Einschaltung der Vakuumpumpe bis zum Erreichen von mindestens 0,5 Torr.
  - c) Stufenweise Aufheizung der Tablare 5—10°C je 1/2 Std unter Berücksichtigung der elektrischen Leitfähigkeitsänderung des Gutes.
- Das Ende des Gefriertrocknungsprozesses ist aus folgenden Punkten zu ersehen:
- a) Steigerung des Widerstandes über 50 MΩ.
  - b) Druckabfall in der Kammer bis auf einen Wert, der dem zur Kondensatortemperatur gehörigen Wasserdampfdruck entspricht.
  - c) Abfall der Temperatur des Eiskondensators.
  - d) Übereinstimmung von vorgewählter Tablartemperatur und Gutstemperatur (Abb. 4).

*Unkosten und Rentabilitätsstudien*

Die wichtigsten wirtschaftlichen Faktoren für eine Anwendung der Gefriertrocknung für die Lebensmittelindustrie sind

- a) Investitions- und Amortisationskosten,
- b) Energiekosten,
- c) Personalkosten.

Eine Versuchsanlage kann keine wesentlichen Aussagen bezüglich der Rentabilität machen. Wir können nur etwas über den Energie- und Wasserverbrauch mitteilen. Die MPI-Anlage in Hamburg verbraucht insgesamt bei voller Leistung ca. 6,5 kW/24 Std. Wenn man die verbrauchte Energie ins Verhältnis zu dem sublimierten Wasser setzt, zeigt sich, daß die Energiekosten bei der Gefriertrocknung mit der Versuchsanlage relativ niedrig sind. Der Wasserverbrauch beträgt bei der Versuchsanlage ca. 10 m<sup>3</sup>/24 Std. Der Wasserverbrauch braucht insofern nicht ins Gewicht zu fallen, weil bei entsprechender Wahl der Lage der Gefriertrocknungsanlage billiges Wasser zur Verfügung stehen könnte. Dieser Teil der Unkosten dürfte demnach relativ gering sein. Darüber hinaus kann der Wasserverbrauch durch entsprechende technische Einrichtungen reduziert werden.

Die Rentabilität der Anlage kann durch folgende Maßnahmen erhöht werden:

Eine Reihe von Obst- und Gemüsearten fallen im Laufe des Jahres nur kurzfristig und stoßweise an. Das Gefriertrocknen eines solchen Materials ist begrenzt durch die Kapazität der

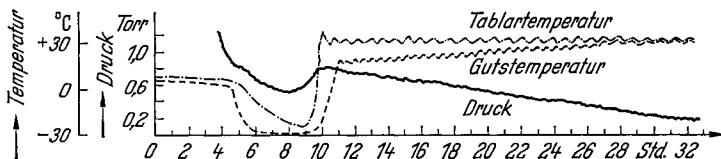


Abb. 4. Ermittlung des Endpunktes der Gefriertrocknung

Anlagen. Durch die Trennung des Tiefgefriervorganges von der Trocknung könnte man erreichen, daß die Gefriertrocknungsanlage das ganze Jahr über kontinuierlich arbeiten kann. So könnten z. B. Erdbeeren, die in Deutschland im Juni/Juli anfallen, zunächst im Großen tiefgefroren und eingelagert werden und dann anschließend in einer relativ kleinen Gefriertrocknungsanlage weiter verarbeitet werden. Wir glauben, daß die Rentabilität der Gefriertrocknung sich durch Trennung von Tiefgefrieren und Trocknen wesentlich steigern ließe. Eine Aufteilung könnte man auch beim Trocknungsvorgang durchführen, wobei die Hauptwassermenge durch Sublimation und der Rest unter Umständen durch Wärme entzogen wird.

Wenn Inhaltsstoffe des zu trocknenden Gutes zusammen mit Wasser sublimieren, dann können sie zu einer Verunreinigung des Öls der Vakuumpumpe führen. Um diese Verschmutzung zu verhindern, müßte man sie durch eine Zusatzapparatur, die vor die Pumpe geschaltet ist, auffangen.

Pflanzliche oder tierische Inhaltsstoffe können wertlos oder wertvoll sein. Im letzteren Fall wäre man an einer Wiedergewinnung dieser Inhaltstoffe interessiert. Diese Wiedergewinnung könnte in der Apparatur, die gleichzeitig dem Schutz des Öls in der Vakuumpumpe dient, vorgenommen werden. Auch die Wiedergewinnung von wertvollen Inhaltsstoffen würde die Rentabilität der Anlage erhöhen.

### Beurteilung der Qualität des gefriergetrockneten Gutes

#### a) Meßbare Schrumpfung

Durch das Trocknen eines frischen Gutes bei 100° C ergeben sich erhebliche Schrumpfungen. Es war daher zu erwarten, daß auch durch die Gefriertrocknung eine Volumenverminderung eintreten würde. Wir haben zunächst Untersuchungen über die Schrumpfungen bei Champignons angestellt. Es wurde eine Methode zum Messen der Schrumpfung entwickelt; mit dieser Methode konnten wir nachweisen, daß bei verschiedenem Ablauf der Gefriertrocknung geringere oder größere Volumenverluste eintreten. Man ist damit in der Lage, den Gefriertrocknungsvorgang so ablaufen zu lassen, daß ein Minimum an Schrumpfung erfolgt.

Es werden in einem Meßzylinder 1000 ml z. B. frische Champignons abgemessen, dann getrocknet und nach Trocknung das Volumen von neuem bestimmt.

#### b) Sichtbare Schrumpfung

Champignons, die in bester Weise gefriergetrocknet worden sind, bleiben völlig glatt, während bei ungünstigen Gefriertrocknungsbedingungen eine Schrumpfung der Hutoberfläche eintritt (Abb. 5).

### c) Stoffverluste

Es wurde beobachtet, daß durch die Gefriertrocknung von Spinat ein deutlicher Verlust des gelösten Oxalates eintrat (54). Diese Beobachtung war der Anlaß, ein Modell zu entwickeln, mit dem man die Verluste durch die Gefriertrocknung voraussehen kann.

Die Stoffverluste sind schwer durch chemische Analyse vor und nach dem Gefrier-trocknen festzustellen, weil diese Untersuchungen auf spezielle Stoffe zeitraubend und langwierig sind.

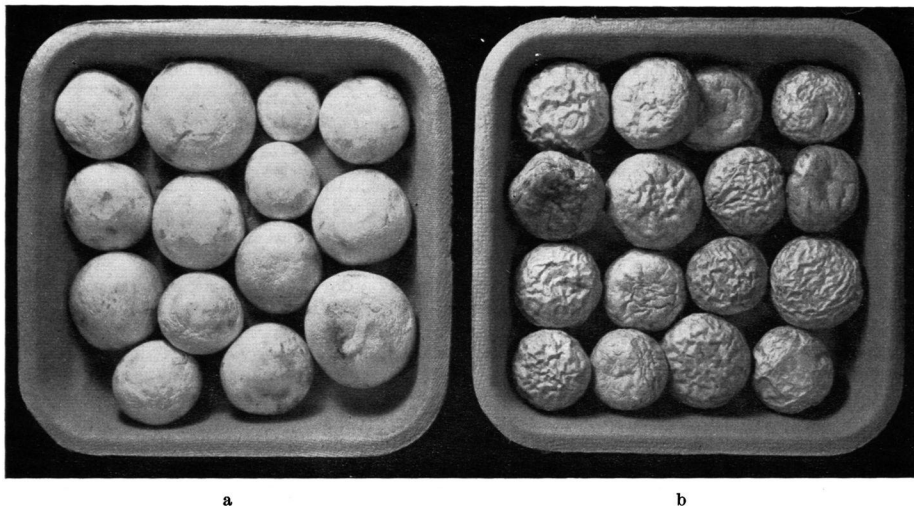


Abb. 5 a u. b. *Schrumpfung der Oberfläche von Champignons bei verschiedener Gefriertrocknung.* a bei +30° C (optimale Trocknungsbedingungen), b bei +60° C (schlechte Trocknungsbedingungen — dieselbe Sorte)

Es wurde daher ein anderer Weg gewählt: Wir haben pflanzliche Inhaltsstoffe, die im Handel zu haben sind, benutzt, um ihr Verhalten bei der Gefriertrocknung zu studieren. Wir sind uns darüber im klaren, daß diese Art der Untersuchung nur als Modell zu gelten hat, und wir jetzt anschließend auch „am lebenden Objekt“ die Verluste werden studieren müssen.

- Es ergeben sich 3 Stoffgruppen:
1. Geringe Verluste,
  2. Verluste von 10–70%,
  3. Verluste bis 100%.

In der ersten Gruppe sind die Kohlenhydrate, reine tierische Fette, Olivenöl, Casein, Vitamine und Tricarbonensäuren enthalten. In der zweiten Gruppe: Butter, Margarine, niedrige Dicarbonensäuren. In der dritten Gruppe bis 100% Verlust: ätherische Öle, flüchtige Alkohole, Aldehyde, Ester, niedrige Monocarbonensäuren (55).

### d) Rehydration

Zu den qualitativen Eigenschaften von gefriergetrockneten Produkten gehört die Quellfähigkeit (Rehydration). Diese kann quantitativ durch die Zeit gemessen werden, in der die Wasseraufnahme erfolgt. Wir konnten zeigen, daß man durch Veränderungen im Ablauf der Gefriertrocknung die Quellfähigkeit beeinflussen kann (Abb. 6).



### Aufgaben der Versuchsanlage

Für die Weiterführung unserer Arbeiten haben wir uns das folgende Programm aufgestellt:

1. Entwicklung der Grundlagen für die Weiterentwicklung und Verbesserung des Gefriertrocknungsprozesses.
2. Bestimmung der optimalen Gefriertrocknungsbedingungen.
3. Untersuchungen über die Verluste von Nahrungsmittelbestandteilen während der Gefriertrocknung unter verschiedenen Trocknungsbedingungen („am lebenden Objekt“).
4. Ausarbeitung von Methoden der Gefriertrocknungstechnik
  - a) für die Gefriertrocknung leicht sublimierbarer, aromahaltiger Produkte, um hierbei den Aromaverlust möglichst niedrig zu halten,
  - b) für die Entfernung von schädlichen und ungenießbaren sublimierbaren Stoffen aus den gefriertrockneten Produkten, z. B. Oxalsäure, Terpentol u. a.,
5. Auslese der vorhandenen landwirtschaftlichen und gärtnerischen Produkte auf ihre Eignung für die Gefriertrocknung,
6. Züchtung neuer Sorten, die für die Gefriertrocknung gut geeignet sind, wobei das Schwergewicht auf diesem Punkt liegen wird.

### Diskussion

In klarer Vorausschau der zu erwartenden Entwicklung der Gefriertrocknung hat sich die Lebensmittel-Großindustrie vor allem in den USA in den letzten Jahren mit diesem Verfahren sehr intensiv beschäftigt. Einige Firmen haben hierzu eigene Forschungslaboratorien errichtet, andere haben bereits die Produktion im großtechnischen Maßstab aufgenommen, auf den Erfahrungen der pharmazeutischen Industrie aufbauend, die ihre Erzeugnisse schon seit mehr als einem Jahrzehnt gefriertrocknet. Unterstützt wurde die Entwicklung durch die US-Armee, die unter Berücksichtigung der wehrtechnischen Bedeutung des Verfahrens ein großes Interesse daran haben mußte, die Truppenverpflegung möglichst ganz oder wenigstens teilweise auf Gefriertrockenkost umzustellen (27). Die Vorzüge der Trockenkost wie geringes Gewicht, Vitaminreichtum, naturfrisches Aroma, einfachste Lagerung entsprechen in idealer Weise den Forderungen der Organisation einer modernen, beweglichen Armee. Neben den Entwicklungsarbeiten der Lebensmittelindustrie, der Armeeforschungslaboratorien und verschiedener Universitäts-Institute in Amerika wie in Europa (28–55), haben naturgemäß die Hersteller von Trockenanlagen intensiv an der Weiterentwicklung gearbeitet, mit dem Ziel, die relativ hohen Investitionskosten des Prozesses auf eine wirtschaftlich tragbare Größenordnung zu reduzieren, da diese bisher die Anwendung des Verfahrens einschränkten.

Weitere anwendungstechnische Entwicklungsarbeiten galten dem Ziel der Gefriertrocknung von tischfertig zubereiteten Produkten. Es gelingt durch geeignete Zubereitung, die meisten Produkte des normalen Konsums als Fertiggerichte in eine

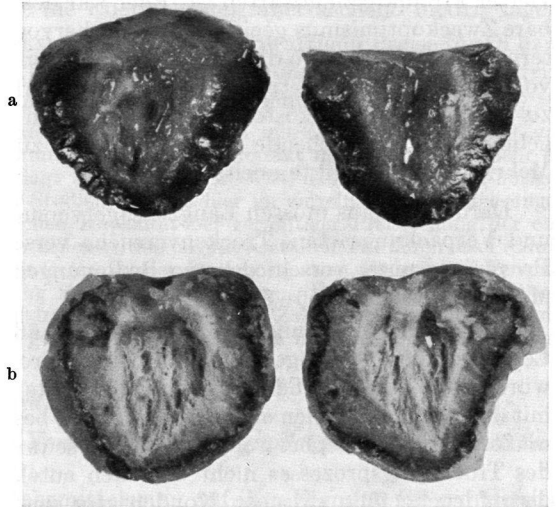


Abb. 6 a u. b. Erdbeeren (der Sorte Senga Sengana) bei verschiedener Temperatur gefriertrocknet. a Die Erdbeeren nehmen Wasser wieder auf. b Keine Aufnahme von Wasser wegen zu hoher Trocknungstemperatur

Trockenform zu überführen. Durch Zugabe von heißem Wasser kann ein derart konserviertes Gericht innerhalb von 2–3 min tischfertig zubereitet werden. Auch bei kritischer Einschätzung der Verbrauchergewohnheiten darf man erwarten, daß in Zukunft das Verfahren für den zivilen ebenso wie für den militärischen Sektor einmal Bedeutung erlangen wird. Die ersten Ansätze einer solchen Entwicklung zeichneten sich im vergangenen Jahr durch den Bau einiger größerer Anlagen mit zum Teil erheblicher Tagesleistung ab. Leider bieten jedoch die spärlich vorliegenden Publikationen der Lebensmittelgroßindustrie, dem möglichen Investitionsträger, immer noch wenig an verwertbaren Daten, um beurteilen zu können, was von der Aufnehmbarkeit oder, wie man im englischen Sprachgebrauch sagt "acceptability", so konservierter Produkte zu erwarten ist. Eher war der in manchen Veröffentlichungen spürbare Zweckoptimismus geeignet, Skepsis hervorzurufen; denn es zeigte sich bei nüchterner Betrachtung, wo die Grenzen der Anwendung des Verfahrens liegen. Sie liegen von der Kostenseite betrachtet da, wo die Verfahrenskosten in einem Mißverhältnis zu den Rohproduktkosten stehen. Sie liegen verfahrenstechnisch da, wo es nicht gelingt, eine ausreichende Aufnehmbarkeit zu erzielen. Beides ist vorerst bei der Mehrzahl der Produkte noch der Fall.

Darüber hinaus müssen Langzeitlagerversuche unter verschiedenen Bedingungen und Verpackungsarten, Trockenversuche verschiedenster Produkte verschiedenster Provenienz unter verschiedensten Bedingungen das Bild von der Brauchbarkeit der Methode abrunden (56–60).

Die Gefriertrocknung ist definitionsgemäß eine reine Sublimationstrocknung. Legt man diesen strengen Maßstab bei der Trocknung von Lebensmitteln zugrunde, würde man zur Prozeßdatenermittlung nichts weiter benötigen als eine Apparatur, mit deren Hilfe man den eutektischen Punkt bestimmen kann. Die Produktionsanlage müßte dann so gesteuert werden, daß einerseits die Temperatur des Produkts während des Trocknungsprozesses nicht über den eutektischen Punkt ansteigt, das Wasserdampfdruckgefälle zwischen Kondensator und Gut andererseits ausreicht, um den Trockenprozeß in einer annehmbaren Zeit zu vollziehen. Bereits hier beginnen die ersten Schwierigkeiten; denn je größer das Dampfdruckgefälle zwischen Kondensator und Gut ist, desto niedriger muß die Kondensatortemperatur liegen. Demzufolge werden die Kälteanlagen bei gleichbleibender Calorienleistung kostspieliger, der Wirkungsgrad schlechter und dementsprechend steigen die Energiekosten. Betreibt man die Anlage jedoch in einem Bereich thermodynamisch besten Wirkungsgrades, so liegt die Eiskondensatortemperatur relativ hoch. Infolgedessen wird das Dampfdruckgefälle gering, der Trockenprozeß verlängert und die Amortisationskosten werden infolge des reduzierten Durchsatzes erhöht. In der Praxis wird das Problem jedoch zusätzlich dadurch kompliziert, daß die theoretische Forderung nach einer reinen Sublimationstrocknung im Interesse der Wirtschaftlichkeit nicht eingehalten werden kann und mit Rücksicht auf die Qualität nicht immer eingehalten werden muß. Vielmehr hat die praktische Erfahrung gezeigt, daß eine annehmbare Qualität auch dann vielfach noch zu erzielen ist, wenn man sich bereits sehr weit von der echten Sublimationstrocknung entfernt hat, d. h. das Produkt scheint zwar makroskopisch noch gefroren zu sein, feinstrukturell liegt jedoch bereits ein Capillarnetz in flüssiger Phase vor. In der Ermittlung der Prozeßdaten, die unter optimalen thermodynamischen Trocknungsbedingungen noch eine annehmbare Qualität des Produktes gewährleisten, liegt weiterhin die Aufgabe einer Versuchsanlage.

In der Praxis wird die Ermittlung der optimalen Prozeßdaten in der Weise gehandhabt, daß die Guttemperatur von Charge zu Charge so lange erhöht wird, bis sich

eine organoleptisch nachweisbare Qualitätsminderung einstellt. Wenig unterhalb dieser Temperatur liegt dann die gewünschte Zone, die einem Kompromiß zwischen Qualität und Kosten entspricht. Das Dampfdruckgefälle zum Eiskondensator wird dann so eingestellt, daß ein Cyclus bei definierter Schichtdicke in ca. 12 Std zum Abschluß gebracht werden kann, dies mit Rücksicht darauf, daß die Anlage pro Tag 2mal belegt werden sollte.

Die Energiekosten beim Betrieb einer Versuchsanlage sind zunächst nicht interessant, da die hier ermittelten Werte wegen des meist völlig andersartigen Aufbaus der thermischen Aggregate nicht direkt auf großtechnische Anlagen zu übertragen sind. Meist liegen die Kosten bei Großanlagen relativ niedriger, dennoch scheint erwähnenswert, daß bei unserer kleinen Anlage die Energiekosten überraschend niedrig lagen.

Großanlagen werden unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Preise für Öl bzw. für Elektrizität am rentabelsten mit ölbefeuerten Absorptionskältemaschinen betrieben, wobei Abdampf noch als Sublimationswärmequelle benutzt werden kann.

Bei einem Durchsatz von 1200 kg Frischprodukt in 12 Std mit einem Feststoffgehalt von von etwa 10—20% müssen für die Trocknung pro kg Frischprodukt im Mittel wenig mehr als 10 Pfennig/kg an Energiekosten veranschlagt werden, vorausgesetzt, daß die Anlage im übrigen *lege artis* angelegt ist. Nach detaillierten Studien, auf die hier im einzelnen nicht eingegangen werden kann, dürften Anlagen einer solchen Kapazität bei vernünftiger Preisstellung der einschlägigen Industrie Investitionskosten verursachen, deren Amortisation in 10 Jahren das Produkt mit weiteren 20 Pfennig pro kg belastet. Die Gesamtkosten für Amortisation, Energie und Personal müssen demgemäß etwa 35 Pfennig pro kg Frischprodukt betragen. Bei größeren Kapazitäten könnten diese Kosten noch bis zu 30% niedriger liegen. Aus diesen Zahlen ist zu ersehen, daß die Methode, von den Verfahrenskosten her gesehen, bereits in einem interessanten Bereich liegt.

### *Zusammenfassung*

Es wurde eine Gefriertrocknungs-Versuchsanlage, sog. *pilot plant* gebaut, mit dem Ziel, folgende Probleme zu studieren:

1. Auslese der vorhandenen Lebensmittelarten auf ihre Eignung für die Gefriertrocknung.
2. Züchtung neuer Sorten, die für die Gefriertrocknung gut geeignet sind.
3. Bestimmung der optimalen Gefriertrocknungsbedingungen für die einzelnen Produkte.
4. Untersuchungen über die Verluste von Nahrungsmittelbestandteilen während der Gefriertrocknung unter verschiedenen Trocknungsbedingungen.
5. Ausarbeitung von Methoden
  - a) für die Gefriertrocknung leicht sublimierbarer aromahaltiger Produkte, um den Aromaverlust möglichst niedrig zu halten,
  - b) für die Entfernung von schädlichen und ungenießbaren sublimierbaren Stoffen aus den gefriergetrockneten Produkten, z. B. Oxalsäure, Terpentine, Senföl u. a.
6. Weitere technische Entwicklung und Wirtschaftlichkeit der Methode.

### Literatur

1. PLANCK, R.: Handbuch der Kältetechnik. Bd. 10, S. 87 Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1960.
2. NEUMANN, K. H.: 2. Cours internationale de Lyophilisation Lyon (1960).
3. MEYER, J. C., u. E. STOLTZ: Farm. Research 12, Farm. Research reprint 61, New York State Agricultural Experiment Station, Geneva, N. Y. 1959.
4. McFARLANE, A. S.: Proc. Brit. Assoc. Refrig. 39, 69 (1942—43).
5. FORREST, J.: Brit. Chem. Engng. 390 (1959).

6. GÖRLING, P.: Diese Z. **114**, 128 (1961).
7. HARPER, J., u. A. TAPPEL: *Advanc. Food Res.* **7**, 171 (1957).
8. STRASSER, T.: *Fette u. Seifen* **65**, 846 (1963).
9. GANE, R.: *Food Manufact.* **26**, 389 (1951).
10. BARNELL, H., E. GOODING u. H. WAGER: *Food Technol* **9**, 168 (1955).
11. GÖRLING, P.: *Industr. Obst- und Gemüseverwert.* **47**, 22 (1962).
12. LEATHERMAN, A., u. D. STUTZ: *Nat. Res. Council Washington D. C.* **92** (1962).
13. KUPRIANOFF, J.: *Proceeding of a Conference on Freeze-Drying of Foods* S. 16, 1961 Chicago.
14. KALLISTRATOS, G., u. R. v. SENGBUSCH: Diese Z. im Druck.
15. NEUMANN, K.: *Chem.-Ing.-Techn.* **29**, 267 (1957).
16. v. SENGBUSCH, R.: 5. Gefriertrocknungstagung Köln 14 (1962).
17. LEDERMANN, A., u. F. LINDSTROM: *Food Engng.* **33**, 41 (1961).
18. TRAUBERMANN, L.: *Food Engng.* **32**, 98 (1960).
19. LAWLER, F.: *Food Engng.* **33**, 35 (1961).
20. GÖRLING, P.: *Industr. Obst- und Gemüseverwert.* **47**, 3 (1962).
21. HAMDY, v. CAHILL u. F. DEATHERAGE: *Food Res.* **23**, 79 (1958).
22. *Hoechst, AG.*: *Frigen-Handbuch*. Frankfurt/M., Hoechst-Chemikal. Abtlg. Selbstverlag. 1962.
23. REY, L. R., u. M. BASTIEN: *Proceeding of a Conference on Freeze-Drying of Foods*, S. 25. Chicago: 1961.
24. REY, L. R.: 5. Gefriertrocknungstagung Köln 1 (1962).
25. REY, L. R.: *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **85**, Art. 2, 513 (1960).
26. DOTY, D. M., WANG HSI, u. E. AUERBACH: *J. agric. Food Chem.* **11**, 664 (1963).
27. WODICKE, V.: *Food Technol.* **12**, 667 (1958).
28. GALL, B., N. PHILLIPS u. R. LA PLANTE: *Nat. Res. Council Washington D. C.* **133** (1962).
29. REY, L. R.: 2. Cours internationale de lyophilisation a Lyon (1960).
30. SMITHES, W., u. T. BLAKLEY: *Food Technol* **13**, 610 (1959).
31. PETERSEN, E.: *Food Marketing* **8** (1961).
32. HARPER, J., C. Chichester, u. T. ROBERT: *J. agric. Engng.* **43**, 78 (1962).
33. BEYER, M., E. KEUNECKE, J. MOLL, G. OETJEN u. G. VOIGTLÄNDER-TETZNER: *Chemie-Ing.-Techn.* **33**, 185 (1961).
34. EDE, A.: *J. Soc. chem. Ind. (Lond.)* **68**, 330 (1949).
35. MAHLER, K.: *Chemie-Ing.-Techn.* **33**, 627 (1961).
36. HARPER, J.: *A.I. Ch. E. J.* **288** (1962).
37. GREAVES, R.: *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **85**, 682 (1960).
38. THUSE, E.: 5. Gefriertrocknungstagung Köln. S. 12 (1962).
39. HARPER, J., u. C. CHICHESTER: *Trans. 10th Nat. Vacuum Symposion.* S. 47 (1963).
40. KESSLER, H.: *Chemie-Ing.-Techn.* **34**, 163 (1962).
41. EHLERS, H.: 5. Gefriertrocknungstagung Köln. S. 7 (1962).
42. MEFFERT, H.: 5. Gefriertrocknungstagung Köln. S. 10 (1962).
43. TOPPEL, A., R. MARTIN, u. E. FLOCHER: *Food Technol.* **11**, 599 (1957).
44. LEA, C. H., u. R. S. HANNAN: *Biochim. biophys. Acta* **3**, 313 (1949); *Nature (Lond.)* **165**, 438 (1950); *Biochem. J.* **47**, 626 (1950).
45. BARKER, J., R. GANE, u. L. MAPSON: *Food Manufact.* **21**, 345 (1946).
46. JACKSON, S., S. RICHTER u. S. CHICHESTER: *Food Technol.* **11**, 468 (1957).
47. KALLISTRATOS, G., u. R. v. SENGBUSCH: *Naturwiss.* **51**, 367 (1964).
48. KALLISTRATOS, G., u. R. v. SENGBUSCH: *Nutr. et diät* **6**, 193 (1964).
49. WICKERHAM, L. J., u. M. H. FLICKINGER: *Brewers Digest* **21**, 55 (1946).
50. ROLFES, T., S. P. CLEMENT u. A. R. WINTER: *Food Technol.* **9**, 401 (1955).
51. SINTSYN, A. V.: *Maysnaya Ind. SSR* **31**, 25 (1960).
52. NEUMANN, K.: *Chemie-Ing.-Techn.* **29**, 267 (1957).
53. YOO, A., A. NELSON u. M. STEINBERG: *Food Technol.* **10**, 145 (1956).
54. ZIEMBA, J.: *Food Engng.* **32**, 57 (1960).
55. KUPRIANOFF, J.: *Kältetechn.* **12**, 284 (1960).
56. OBATA, Y., u. S. SAKAMURA: *Eiyo to Shokuryo* **7**, 29 (1954—55).
57. BATZER, O. F., T. ARLENE, SANTORO, M. C. TAN, W. A. LANDMANN u. B. S. SCHWEIGERT: *J. agric. Food Chem.* **8**, 498 (1960).
58. HODGE, J. E.: *J. agric. Food Chem.* **1**, 928 (1953).
59. GÖRLING, P.: *Industr. Obst- u. Gemüseverwert.* **48**, 32 (1963).
60. OETJEN, G., H. EHLERS, U. HACKENBERG, J. MOLL u. K. NEUMANN: *Nat. Res. Council Washington D. C. S.* **178** (1962).