

Sonderdruck

aus „Deutsche Lebensmittel-Rundschau“ Zeitschrift für Lebensmittel, -Wirtschaft und -Recht

47. Jahrgang, Heft 9, 10, September—Oktober 1951

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m. b. H. · Stuttgart 1 · Tübinger Straße 53 · Postfach 40

Aus der Bundesforschungsanstalt für Lebensmittelfrischhaltung und Konservierung, Karlsruhe

Zur Frage der Gaslagerung von Gemüse unter Verwendung von Kunststoffolien

Von Johannes Wolf

Die praktische Erfahrung hat gezeigt (*Friebe-Scupin* 1933, *Scupin* 1935, *Krumbholz* 1939), daß schnell verderbliche Gemüse wesentlich besser und bzw. auch länger frisch zu erhalten sind, wenn man sie bei geeigneten niederen Temperaturen in wasserdampfdichte Folien verpackt lagert als bei den gleichen Temperaturen, aber unverpackt. Die begünstigende Wirkung der Verpackung wurde vor allem darin gesehen, daß die Transpirationsverluste des Gemüses stark eingeschränkt werden. Diese Deutung erscheint deshalb wesentlich, weil die Lagerungsfähigkeit solcher Gemüse in höherem Maße durch Verdunstung als durch mikrobielle Umsetzungen beschränkt ist (*Heiss* 1938). Bei dieser Sachlage wäre zu prüfen, ob das immerhin umständliche und zusätzliche Kosten verursachende Einhüllen kleinerer Posten nicht vorteilhafter durch eine entsprechende Raumluftbefeuchtung ersetzt und dadurch gleichzeitig die Überwachung des Lagergutes erleichtert würde.

Gegenüber den durch die Umhüllung mit Kunststoffolien herabgesetzten Transpirationsverlusten hatte man bis dahin wenig Aufmerksamkeit dem Umstand geschenkt, daß die Hülle nicht nur eine höhere Wasserdampfspannung in der das Lagergut unmittelbar umgebenden Luft bewirkt als bei unverpacktem Gut, sondern daß auch der Gasaustausch zwischen Innen- und Außenatmosphäre gehemmt wird, mit der zu erwartenden Folge, daß durch die Atmungstätigkeit des Lagergutes eine erhöhte Kohlendioxyd- und eine verminderte Sauerstoffspannung sich innerhalb der Hülle einstellt. Es würde sich damit bei Verwendung wasserdampf- und bis zu einem gewissen Grade auch gasdichter Einhüllfolien um eine Gaskaltlagerung in einzelnen Packungen bei extrem hoher relativer Luftfeuchtigkeit handeln. Da die vielfach ausgezeichneten Erfolge einer Gaskaltlagerung vor allem bei Obst nur zu bekannt sind, interessierte uns in diesem Zusammenhang die Frage, welche Zusammensetzung die Gasatmosphäre erreicht, die lagerndes Gemüse umgibt, wenn die Ware in wasserdampfdichte Folie eingehüllt kaltgelagert wird. Es sind dies Bedingungen, die denen ähneln, welche sich z. B. beim Transport und Lagern von Obst und Gemüse in ungenügend belüfteten Räumen oder Behältern einstellen können.

Unser Vorhaben, das wir bereits 1942 angekündigt hatten, konnte durch die Kriegs- und Nachkriegsereignisse nur verzögert durchgeführt werden. Da inzwischen im Auslande über Versuche ähnlichen Charakters berichtet worden ist (*Anonym* 1948, *Tischer* 1947/48), möchten wir die vorläufigen Ergebnisse einer Auswahl unserer weiterlaufenden Untersuchungen mitteilen.

Versuchsanordnung und Methodisches

Die Versuche wurden bei 0° bis +2° C ($\pm 0,5^\circ$) durchgeführt. Die vom Handel bezogenen und vor Versuchsbeginn mehrere Stunden vorgekühlten Gemüse und Obst wurden in Mengen von 13 bis 20 kg in einen mit Cellophan AST der Fa. Kalle AG., Wiesbaden-Biebrich, ausgelegten Wellpappkarton dicht gepackt und die freien Enden des auskleidenden Cellophans übereinander geschlagen. Der Karton erhielt außen eine zweite, thermoplastisch möglichst dicht verschlossene Cellophanhülle. Die Verbindung mit dem Inneren der Packung konnte durch eine oder mehrere kapillare Glasröhren hergestellt werden. Diese Kapillaren endeten innen entweder im Zentrum der Packung oder aber in einer Ecke innerhalb bzw. außerhalb der auskleidenden Cellophanhülle. Außen wurden die Kapillaren durch 3-Weghähne abgeschlossen, die es ermöglichten, mit Hilfe einer 50-cm³-Gaspipette (mit Quecksilberniveaueugel) Gasproben zu entnehmen. Die Gasproben wurden nach *van Slyke* und *Sendroy* (1932) analysiert.

Bei Versuch 1 wurde kein Karton verwendet, vielmehr das Material doppelt in Cellophan eingehüllt (die äußere Hülle verklebt) und in eine Lattenkiste eingelegt.

Ergebnisse (vgl. Tabelle 1).

Versuch 1. Material Spargel.

Am 13. 5. 43 bei 0° C 20,642 kg Spargelstangen eingelagert.

Die Analyse der am Tage nach Verschluss der Packung entnommenen Gasprobe ergab, daß der Kohlendioxydgehalt der Innenatmosphäre der Packung auf fast 9% hinaufgeschwollen und der Sauerstoffgehalt auf etwa 12,5% abgesunken war. Aus dem beobachteten

Tabelle 1. Übersicht der beobachteten charakteristischen Werte im Verlaufe der Veränderung der Gaszusammensetzung der Packungsatmosphäre bei der Lagerung von Spargel und Karotten in Kunststoffhülle.

Versuchs-Nr.	Material	Temp. °C	O ₂ -Minimum %	CO ₂ -Maximum %	(O ₂ +CO ₂) Minimum %	Gleichgewichtskonzentrationen in %		
						O ₂	CO ₂	O ₂ +CO ₂
1	Spargel	0	≤12,5	≥9	—	16,5	4,5	21,0
2	Spargel	+1	6	9,7	15	13,5	7,5	20,9
3	Spargel	+0,5	10,5	8,5	16	12	8,5	20,5
4	Spargel	+1 bis +2	8,5	9,7	16,8	11	9,7	20,7
5	Karotten	+0,5	12,5	6,5	16,8	15	6,5	21,5
6	Karotten	+0,5	14,5	3	17,2	19	2	21

weiteren Verlauf der Veränderungen darf geschlossen werden, daß diese ersten gemessenen Werte offensichtlich bereits auf einem abfallenden (CO_2 -) bzw. ansteigenden (O_2 -) Kurvenast lagen (entsprechend etwa Punkt A in Abb. 1); über die im Verlaufe des ersten Versuchstages erreichten maximalen CO_2 -Gehalte bzw. minimalen O_2 -Gehalte kann deshalb nichts Näheres ausgesagt werden. Die Zusammensetzung der inneren Gasatmosphäre änderte sich indes in den folgenden Tagen überaus rasch: der CO_2 -Gehalt sank fortlaufend ab und erreichte am 5. Tage nach der Einlagerung eine Gleichgewichtslage, die bei vorliegender Versuchsanordnung bei etwa 4,5% CO_2 lag und während der weiteren 20tägigen Versuchsdauer beibehalten wurde. Der Sauerstoffgehalt dagegen stieg an und erreichte eine Gleichgewichtslage bei etwa 16,5%.

Da nicht zu erwarten war, daß der Versuch noch weiteres Neues bringen würde, wurde er am 7. 6. 1943 abgebrochen. Das Lagergut war feucht, die Cellophanfolie innen mit zahlreichen Kondenswassertropfchen dicht bedeckt. Übereinstimmend mit den bisher in dieser Weise durchgeführten Lagerungsversuchen er-

Versuch wurde in diesem Zeitpunkt wegen technischer Störungen abgebrochen. Der Kohlendioxydgehalt der Binnenluft stieg nach einer deutlichen Verzögerung kräftig an und erreichte zur selben Zeit, in dem die Sauerstoffkurve ihr Minimum aufwies, mit 9,7% ihr Maximum, dem sich ein etwa 3 Tage währender Abfall auf einen Gleichgewichtswert von 7,5% CO_2 angeschlossen.

Versuch 3. Material Spargel.

Am 13. 6. 1950 wurden 12,62 kg bei 0,5° C über Nacht vorgekühlte Spargelstangen in Cellophan verpackt und bei derselben Temperatur gelagert.

Der Sauerstoffgehalt der Packungsinnenatmosphäre sank von 20,8% innerhalb von etwa 3 Tagen auf 10,5% ab, verharrte etwa 3 Tage auf diesem Wert und stieg dann auf ca. 12% an, ein Wert, der bis zu Versuchsende beibehalten wurde. Der Kohlendioxydgehalt der Innenatmosphäre stieg fortlaufend an und erreichte am 7. Tage mit 8,5% einen Gleichgewichtswert.

Der Gang der Veränderungen, der dem in der schematischen Abbildung 2 dargestellten entspricht, war an verschiedenen Entnahmestellen innerhalb der Packung gleich (Zentrum bzw. Ecke außerhalb der inneren Cellophanhülle, jedoch innerhalb des Pappkartons).

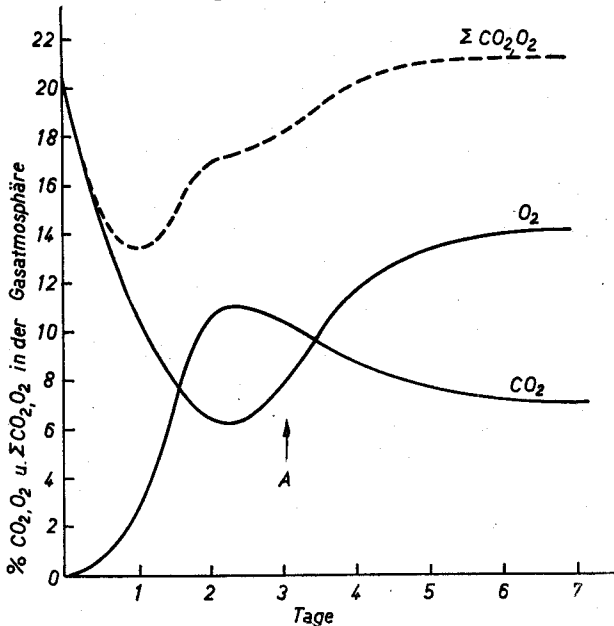


Abb. 1: Veränderung der prozentischen Gehalte an CO_2 , O_2 und ($\text{CO}_2 + \text{O}_2$) in der Packungs-Innenatmosphäre während der Kaltlagerung von kunststoffumhülltem Gemüse bei anfangs zunehmender Gasdurchlässigkeit der Folie.

wies sich der Spargel in bestem Zustande, die Stangen waren voll turgeszent (knackig und saftig) und von frischem Material kaum zu unterscheiden. An drei Stangen waren wenig ausgedehnte Infektionsstellen (Schimmelpilze) zu bemerken. Auch die zubereitete Ware konnte sehr zufriedenstellend bewertet werden. Das Auslagerungsgewicht betrug 20,365 kg, mithin war ein Gewichtsverlust von 1,34% im Verlaufe der 25tägigen Lagerung entstanden.

Versuch 2. Material Spargel.

Etwa 20 kg Spargelstangen, die am 28. 5. 1949 gestochen und bis zu Versuchsbeginn bei +1° gelagert worden waren, wurden am 7. 6. 1949 in Cellophan verpackt und bei derselben Temperatur weitergelagert. Die Ergebnisse des Versuchs sind in Abb. 1 hinsichtlich des grundsätzlichen Verlaufes der sich daraus ergebenden Kurven dargestellt.

Der Sauerstoffgehalt der Packungsinnenatmosphäre sank von seinem normalen Ausgangswert (20,8%) innerhalb von zwei Tagen auf 6% ab, stieg indes überaus rasch wieder an und erreichte nach weiteren drei Tagen mit etwa 13,5% einen Gleichgewichtswert; der

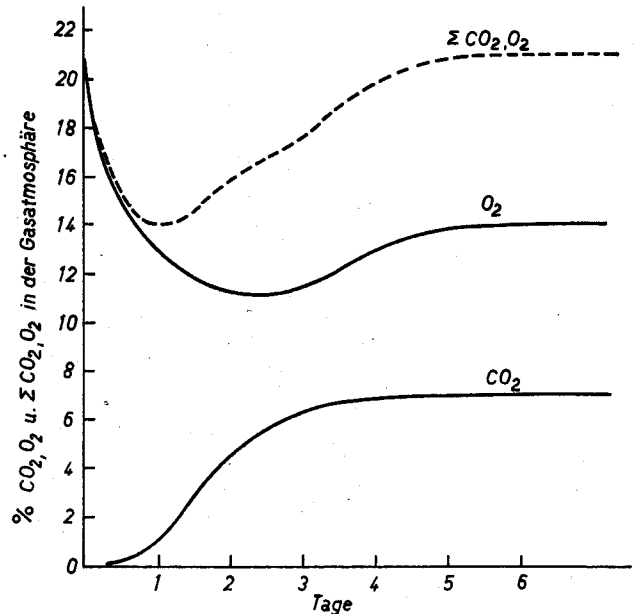


Abb. 2: Veränderung der prozentischen Gehalte an CO_2 , O_2 und ($\text{CO}_2 + \text{O}_2$) in der Packungs-Innenatmosphäre während der Kaltlagerung von kunststoffumhülltem Gemüse bei anfangs zunehmender Gasdurchlässigkeit der Folie.

Abweichend von den beiden vorstehenden Versuchen war die äußere Cellophanfolie, innen nicht in auffälligem Ausmaß mit Kondenswassertropfchen bedeckt.

Versuch 4. Material Spargel.

Die Packung aus Versuch 3 wurde nach Versuchsabbruch (23. 6. 1950) nach einem Raum mit Temperaturen zwischen +1 und 2° C verbracht und dort durch die Kapillarröhren mit Raumluft (ca. 500 cm^3/min) b's zum 26. 6. 1950 durchlüftet; dann wurden die Hähne wieder geschlossen und die Packungen bei dieser Temperatur weitergelagert.

Der Sauerstoffgehalt der Binnenluft nahm von etwa 20% innerhalb von zwei Tagen auf etwa 8,5% ab und stieg anschließend innerhalb von zwei weiteren Tagen wieder unter Erreichen eines Gleichgewichtswertes von ca. 11% an.

Der Kohlendioxydgehalt der Binnenluft stieg zunächst fortlaufend an, am dritten Tag war der Anstieg bereits sehr verzögert, und am fünften Tag war mit ca. 9,7% ein Gleichgewichtswert erreicht.

Die Packung wurde nach weiterer viertägiger Nachlagerung bei 3–4° C geöffnet (6. 7. 1950). An drei Stangen waren Infektionsstellen sehr beschränkten Ausmaßes zu bemerken, im übrigen machte das Lagergut einen sehr frischen Eindruck. Der Gewichtsverlust betrug während der Lagerung von 3½ Wochen bei z. T. nicht optimalen Temperaturen 0,6%.

Versuch 5. Material Karotten.

Karotten am 7. 8. 1949 geerntet, bis 12. 8. bei +1° C vorgelagert, anschließend entlaubt und in einer Portion von 12,35 kg in Cellophan verpackt bei 0,5° C gelagert.

Der Sauerstoffgehalt der Binnenatmosphäre sank innerhalb von 3 Tagen auf 12,5% ab und stellte sich nach sehr allmählichem, etwa 7 Tage währendem Anstieg auf ca. 15% ein.

Der Anstieg des Gehaltes an Kohlendioxyd setzte verzögert ein und näherte sich asymptotisch einer Gleichgewichtskonzentration von ca. 6,5%, die nach insgesamt 6 Tagen erreicht war.

Versuch 6. Material Karotten.

Material von Versuch 5 nach Versuchsabbruch (am 25. 7. 1949) ausgepackt und offen bei +0,5° C gelagert. Am 1. 8. 1949 erneut in Cellophan verpackt und weiter bei +0,5° C aufbewahrt.

Der Sauerstoffgehalt der Innenatmosphäre verminderte sich innerhalb von 3 Tagen auf 14,5%, nahm dann wieder rasch zu und erreicht am 6. Tage einen Gleichgewichtswert von 19%, der bis Versuchsende (10. 8.) beibehalten wurde.

Der Kohlendioxydgehalt erreicht in allmählichem Anstieg am 5. Tage einen Wert von 3%, der anschließend auf einen Gleichgewichtswert von etwa 2% abfiel.

Versuch 7.

Die untere freie Öffnung ($\phi = 22$ cm) einer oben tubulierten Glasglocke (Höhe 50 cm, Volumen etwa 22 Liter) wurde durch eine mittels Terokal auf den Glasrand aufgeklebten Cellophan AST-Folie luftdicht abgeschlossen. Die obere Öffnung wurde durch einen Gummistopfen verschlossen, durch dessen zwei Bohrungen Kapillaren führten, von denen die eine dicht unterhalb des Storfens, die andere unmittelbar über der Folie endete. Über Dreiweghähne konnten durch die Kapillaren Gasproben entnommen werden. Die Binnenatmosphäre wurde durch Spülen mit einem Stickstoffstrom und anschließendes Einleiten von Kohlendioxyd auf ca. 16% CO₂ und 6% O₂ eingestellt. Versuchstemperatur +0,5° C, relative Luftfeuchtigkeit innen ca. 100%, außen ca. 93%, Folie innen mit Kondenswassertröpfchen bedeckt.

Der Gehalt an Kohlendioxyd fiel im Verlaufe von 5 Tagen mit fast gleichbleibender Geschwindigkeit auf 5,5% ab; im selben Zeitraum stieg der Gehalt an Sauerstoff auf 16,5% an. An beiden Entnahmestellen waren die Veränderungen völlig gleich.

Besprechung der Ergebnisse

Bei einer Lagerung lebender Objekte unter Bedingungen beschränkter Ersatzes der die Pflanzenteile umgebenden und durch deren Atmungsstätigkeit in ihrer Zusammensetzung veränderten Binnenatmosphäre hätte erwartet werden dürfen, daß diese Binnenatmosphäre sich innerhalb einer gewissen Zeit in gleichsinnigem kontinuierlichem Gang auf eine konstante Zusammensetzung einstellt. Diese Gleichgewichts-Zusammensetzung hängt ab vom Verhältnis zwischen Intensität des Gasstoffwechsels und Durchlässigkeit der Verpackung für die beteiligten Gase. Verändert sich während des Versuchs die Gasdurch-

lässigkeit der Verpackung nicht, und reagiert das Pflanzengewebe in der Intensität des Gasstoffwechsels sofort auf die sich verändernde Zusammensetzung der Binnenatmosphäre, so wäre anzunehmen, daß der O₂-Gehalt der Binnenatmosphäre fortlaufend bis zu einer bestimmten Gleichgewichtskonzentration abfällt, während der CO₂-Gehalt ansteigt und sich ebenfalls asymptotisch einer Gleichgewichtskonzentration nähert (s. Abb. 3).

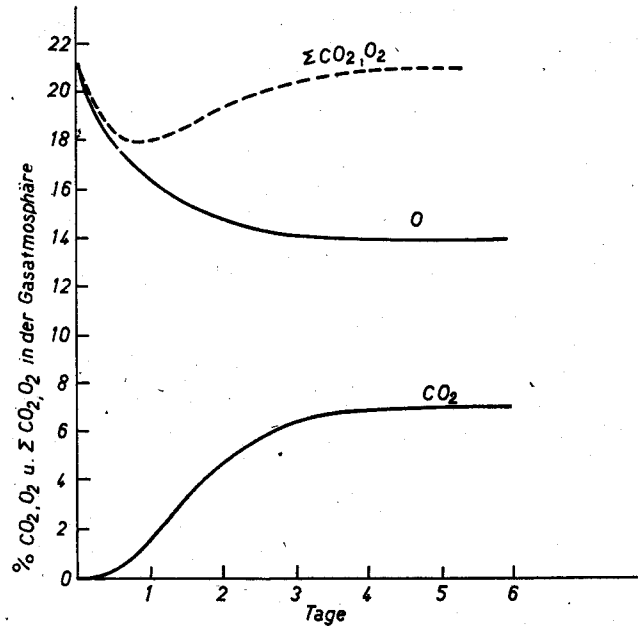


Abb. 3: Veränderung der prozentischen Gehalte an CO₂, O₂ und (CO₂ + O₂) in der Packungs-Innenatmosphäre während der Kaltlagerung von kunststoffumhülltem Gemüse bei gleichbleibender Gasdurchlässigkeit der Folie.

Ein auch unter Bedingungen unbeschränkter Lufterneuerung zu beobachtender abfallender, etwa durch allmähliche Erschöpfung des Vorrates an Atmungs-material bedingter Gang der Atmungsintensität würde die Verhältnisse nicht grundsätzlich ändern, sondern nur modifizieren, und zwar würde der O₂-Gehalt solange ansteigen und der CO₂-Gehalt abfallen wie der Gasumsatz sich verringert.

Während die O₂- und CO₂-Kurven beim Versuch 3 mit Spargel und beim Versuch 5 mit Karotten eine Ähnlichkeit mit einem solchen zu erwartenden Verhalten zeigen, ergab sich indes in anderen Fällen und insbesondere für die O₂-Gehalte ein zunächst unerwarteter Gang in der Veränderung der Zusammensetzung der Binnenatmosphäre (Versuch 1 und 2 mit Spargel und Versuch 6 mit Karotten); denn in diesen Fällen wurden die Gleichgewichtskonzentrationen an O₂ bzw. CO₂ jeweils von der Seite her erreicht, die unterhalb bzw. oberhalb ihrer Gleichgewichtskonzentrationen liegt.

Als bemerkenswert darf weiterhin festgehalten werden, daß in allen unseren Versuchen die Gleichgewichtslagen dadurch ausgezeichnet waren, daß die Summe von %O₂ und %CO₂ ca. 21% betrug.

Bei der Deutung der Befunde waren diejenigen Faktoren zu berücksichtigen, die für die Geschwindigkeit der Einstellung der Gleichgewichte und für die Lage der Gleichgewichte als maßgebend erscheinen. Diese sind:

1. Grad der Einschränkung des Gasaustausches zwischen Innen- und Außenatmosphäre in Abhängigkeit von der Versuchsdauer.
2. Intensität der Atmung. Zu berücksichtigen wäre hierbei:

- a) die zeitliche Veränderung der Atmungsintensität der Versuchsobjekte
- b) der Einfluß der veränderten Zusammensetzung der die Objekte umgebenden Atmosphäre auf die Atmungsintensität
- c) eine gewisse Verzögerung im Ansprechen der Objekte auf die veränderten Außenbedingungen.

3. Löslichkeit der beteiligten Gase in der Gewebsflüssigkeit in Abhängigkeit von den sich verändernden Partialdrücken der einzelnen Gase.

Die Diskussion dieser zu berücksichtigenden Faktoren ergibt:

Zu 1. Es hätte erwartet werden dürfen, daß die Durchlässigkeit der anfangs lufttrockenen Folie mit zunehmender Quellung für die wasserlöslichen Gase fortlaufend bis zu einem Maximum ansteigt*). Wegen der besonders großen Löslichkeit von Kohlendioxyd in Wasser war anzunehmen, daß die Folie mit zunehmendem Quellungsgrad bevorzugt für Kohlendioxyd durchlässiger würde**), während im „trockenen“ Zustand der Folie die Durchlässigkeit der Verpackung bei gegebener Konzentrationsdifferenz in erster Linie durch die Molekelgröße bestimmt und damit für Kohlendioxyd und Sauerstoff von zwar vergleichbarem, im übrigen aber sehr geringem Ausmaß sei.

Wenn die unter 2. genannten Faktoren zunächst unberücksichtigt bleiben, so hätte die in der ersten Versuchsphase bei zunehmender Wasseraufnahme der Folie für O₂ und CO₂ verschieden stark anwachsende Durchlässigkeit dazu führen müssen, daß der Gehalt der Binnenatmosphäre an CO₂ weniger stark ansteigt als der Gehalt an O₂ abfällt; in gleicher Richtung würde der unter 3. angeführte Sachverhalt sich auswirken. Es hätte weiterhin erwartet werden müssen, daß im Gleichgewicht der %-Gehalt an CO₂ in der Binnenatmosphäre kleiner ist als die Größe der Differenz im O₂-Gehalt zwischen Außenluft und Binnenatmosphäre. Ein Gasaustausch durch vorhandene Undichtigkeiten an den Klebestellen der Verpackung dürfte gegenüber dem Gasaustausch durch die Folie selbst zu vernachlässigen sein.

In der uns erreichbaren Literatur waren präzise Angaben über die Gasdurchlässigkeit von Folien der von uns verwendeten Sorte in Abhängigkeit von ihrem Wassergehalt nicht zu finden. In orientierenden eigenen Versuchen ergab sich eindeutig, daß in kurzfristigen Versuchen die „trockene“ Folie (φ der umgebenden Luft $\sim 70\%$) für Sauerstoff und Kohlendioxyd praktisch undurchlässig ist. Die Durchlässigkeit für Kohlendioxyd (kaum die für Sauerstoff) stieg an, wenn die Folie beiderseits mit feuchtigkeitsgesättigten Atmosphären in Berührung stand und sie wurde für beide Gase erheblich wenn die Folie von einem feinen Kondenswasserbeschlag bedeckt war.

In einigen dieser orientierenden Versuche (bei 0° C) wurde dabei beobachtet, daß Sauerstoff und Kohlendioxyd durch die mit Kondenswassertröpfchen bedeckte Folie bei vergleichbaren CO₂- und O₂-Partialdruckdifferenzen zwischen Außen- und Innenatmosphäre etwa gleich schnell diffundierten (Versuch 7); diese Befunde ließen sich indes nicht mit Sicherheit reproduzieren so daß wir sie mit Vorbehalt wiedergeben. Bei derartigen Untersuchungen können sehr leicht unkontrollierbare Verhältnisse sich dadurch einstellen, daß bereits bei geringen Gesamtdruckunterschieden zu beiden Seiten der maximal gequollenen Folie diese gedehnt wird wobei der Lacküberzug in zahlreichen mikroskopisch kleinen Spalten aufreißt und vielleicht auch Poren entstehen. Es ging indes

über den Rahmen dieser Untersuchung hinaus, solchen Fragen nachzugehen; wir verweisen deshalb auf spezielle Untersuchungen, die von einer anderen Stelle in unserer Anstalt durchgeführt werden. Bei der praktischen Verwendung solcher Folien für Zwecke der Obst- und Gemüselagerung wird solch ein Gang der Konzentrationsänderung an CO₂ und O₂ die Regel sein, da der Erzeuger das Lagergut mit den mechanisch festeren lufttrockenen Folien einhüllen wird; er erreicht dadurch zu Beginn auch rascher die erwünschte Änderung der Zusammensetzung der Packungsatmosphäre als mit einer von vornherein feuchten Folie. Wenn außer der Konzentrationsdifferenz lediglich Molekelgröße und Löslichkeit in der Folie die Diffusionsgröße bestimmten, würde man wohl anzunehmen haben, daß die Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit durch einen erhöhten Quellungsgrad bedingt sei, während die speziell erhöhte Diffusionsgeschwindigkeit für Sauerstoff die Annahme der Eröffnung oder Erweiterung von Poren erforderlich machte. Allerdings steht dieser letzteren Begründung entgegen, daß ein Kondenswasserbeschlag eher zu einer Verstopfung vorhandener Poren für Sauerstoff führen würde (vgl. Devaux 1891).

Ein solcher während der ersten Versuchstage entstehender Effekt würde ausreichen, um den in Versuch 1 und 2 beobachteten Gang der Veränderung der Zusammensetzung der Binnenatmosphäre zu erklären. Die zunächst relativ trockene Membran bietet dem Gasdurchtritt anfangs erheblichen Widerstand. In dieser Phase sammelt sich entstehendes Kohlendioxyd in der Packung an, während der verbrauchte Sauerstoff allenfalls durch Undichtigkeiten in der Hülle in Form von Luft teilweise ersetzt werden kann. Voraussetzung für das Auftreten dieses in einigen Fällen beobachteten Ganges scheint demnach zu sein, daß die Objekte so kräftig atmen, daß die Gleichgewichtskonzentrationen erreicht und überschritten werden, bevor durch die Quellung der Folie ein ausreichender Gasaustausch ermöglicht wird. Begünstigt erscheint das Auftreten dieses Ganges bei einem relativ niederen Wert des Verhältnisses von Packungsoberfläche zu eingehülltem Lagergut; es sind dies zugleich auch solche Bedingungen, von denen zu erwarten ist, daß sie die Höhe der Gleichgewichtskonzentrationen wesentlich beeinflussen. Die diffusionserhöhende Bedeckung der Folie mit Kondenswassertröpfchen setzt andererseits genügend kräftig transpirierende Objekte und ein Temperaturgefälle zwischen Objekt und Folie voraus.

Es sei hier eingeschaltet, daß mindestens bei mittlerer Luftfeuchtigkeit eine negative Korrelation zwischen Atmung und Transpiration besteht (Semichatova 1950), die darin begründet ist, daß die Aufrechterhaltung des Konzentrationsgefälles an H₂O zwischen Gewebe und Luft einer Energie bedarf, die durch die Atmungsvorgänge geliefert wird. Inwieweit bei hohen Luftfeuchtigkeiten die Menge des bei der Atmung entstehenden Verbrennungswassers (bei Spargel ca. 8 mg/kg und h bei 0° C) eine zu berücksichtigende Rolle bei der Regulation der Wasserverhältnisse im Gewebe spielt, wäre zu prüfen.

In besonders ausreichendem Maße scheinen diese Bedingungen in Versuch 1 erfüllt gewesen zu sein.

Zu 2.

a) Wie wir früher (Wolf 1942) festgestellt hatten, ist der Abfall der Atmungsintensität frisch eingelagerter Spargelstangen auch innerhalb der ersten Versuchstage bei 0° C so überaus geringfügig, daß er für die hier zu deutenden Erscheinungen außer Betracht bleiben kann.

*) Modern Packaging Encyclopedia, S. 181; Packaging Catalog Corporation, New York 1950.

**) Falls nur die Wasserlöslichkeit die Diffusionsgröße bestimmte, würde CO₂ ca. 30 mal rascher permeieren als O₂.

b) Erhöhung der Konzentration an Kohlendioxyd senkt im allgemeinen die Atmungsgröße; das Ausmaß der Senkung hängt u. a. von der Gewebe- und der Pflanzenart und vom Entwicklungszustand des Organs ab. Spezielle Beobachtungen über den hemmenden Einfluß erhöhter CO₂-Konzentration auf die Atmung von Spargel veröffentlichte *Thornton* (1933). Erniedrigung der Sauerstoffkonzentration in der die Objekte umgebenden Atmosphäre senkt die Atmungsgröße ebenfalls. Nach Befunden von *Platenius* (1943) beginnt die fortlaufende Verminderung der CO₂-Ausscheidung und der O₂-Aufnahme bereits, wenn die Konzentration an Sauerstoff eben unter 20% fällt; bei einem Sauerstoffgehalt der Atmosphäre von 10% beträgt bei 20° C die Sauerstoffaufnahme nur noch 77% und die Kohlendioxydausscheidung nur noch etwa 79% der in normaler Luft gemessenen Werte.

Für sich allein betrachtet, würde ein sich sofort auswirkender und fortlaufend ansteigender Atmungshemmungseffekt zu einer gleichsinnig, aber immer langsamer erfolgenden Veränderung der Zusammensetzung der Binnenatmosphäre führen, bis sich dann allmählich ein Gleichgewicht einstellt; das Gleichgewicht wird dann erreicht sein, wenn die durch die Atmung pro Zeiteinheit gebildeten CO₂- und verbrauchten O₂-Mengen ebenso klein geworden sind, wie die in der gleichen Zeit durch Diffusion die Packung verlassenden CO₂- bzw. die in die Packung eintretenden O₂-Mengen.

c) Einen hiervon abweichenden Gang würde die Veränderung der Zusammensetzung der Binnenatmosphäre dann annehmen, wenn die Reaktion der Pflanze hinsichtlich der Atmungsgröße auf die sich verändernde Zusammensetzung der Binnenatmosphäre deutlich verzögert erfolgte. Eine solche nicht unwahrscheinliche Verzögerung in der Atmungshemmung würde sich dahin auswirken, daß die Zusammensetzung der Binnenatmosphäre sich vorübergehend über die eigentliche Gleichgewichtszusammensetzung hinaus verändern und die Atmung erst bei extremen Konzentrationsverhältnissen in der Binnenatmosphäre auf die dem wirklichen Gleichgewicht entsprechende Größe eingeschränkt würde. Diese extremen Konzentrationsverhältnisse würden allerdings nur kurzfristig und zwar so lange aufrecht erhalten bleiben, wie die Atmungsregulation zeitlich verzögert ist. Denn sobald die Atmung auf die dem wirklichen Gleichgewicht entsprechende Größe vermindert ist, würde eine extremere Zusammensetzung der Binnenatmosphäre die Atmungsgröße noch weiter vermindern, so daß die gebildeten bzw. verbrauchten Mengen an Kohlendioxyd bzw. Sauerstoff kleiner würden als die gleichzeitig durch die Folie diffundierenden Mengen an Kohlendioxyd bzw. Sauerstoff. Die Folge würde sein, daß die Zusammensetzung der Binnenatmosphäre auf die dem Gleichgewicht entsprechende Konzentrationen an Kohlendioxyd bzw. Sauerstoff einreguliert wird.

Verzögerungen in der Auswirkung einer Hemmung führen zu Erscheinungen einer „Überregulation“, wie wir sie von anderen physiologischen Vorgängen her kennen. Es konnte leider nicht ermittelt werden, ob Verzögerungen in der Reaktion der Atmungsgröße von Pflanzen auf verminderte O₂- bzw. erhöhte CO₂-Konzentrationen bisher beobachtet worden sind. *Platenius* (1943) gibt zwar an, daß in eine an Sauerstoff verarmte (4 8%) Atmosphäre gebrachter Spargel innerhalb von drei Tagen bei 20°C fortlaufend weniger Kohlendioxyd ausscheidet und Sauerstoff verbraucht, doch spiegelt dieser Befund möglicherweise lediglich den allgemein absinkenden Gang der Atmung bei der Aufbewahrung von der Pflanze entnommener Teile wider

(vgl. *Wolf* 1942) und kann deshalb nicht ohne nähere Prüfung zum Beweis für die Gültigkeit der vorstehend angeführten Erklärungsmöglichkeit herangezogen werden.

Zu 3. Der zu Versuchsbeginn stark ansteigende Kohlendioxyd-Partialdruck in der Packungsatmosphäre bedingt eine erhöhte Löslichkeit von Kohlendioxyd in der Gewebsflüssigkeit (vgl. z. B. *Pfeffer* 1891, *Denny* 1947). Die Kohlendioxydanreicherung in der Binnenatmosphäre erreicht deshalb nicht so hohe Werte, wie sie der Sauerstoffverarmung in den ersten Versuchsstadien entsprechen müßten (RQ ~ 1). Durch die Eigenschaft der Gewebsflüssigkeit für Kohlendioxyd als Sammel- oder Ausgleichsbecken puffernd zu wirken, bleibt auch die CO₂-Konzentration der Binnenatmosphäre näher bei der endgültigen Gleichgewichtszusammensetzung der Binnenatmosphäre und fällt nach dem anfänglichen Anstieg nicht so stark ab, wie die Konzentration an Sauerstoff ansteigt, für den eine Pufferwirkung der Gewebsflüssigkeit im Sinne einer Nachlieferung von O₂ wegen der weitaus geringeren Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser und wegen des fortlaufenden Verbrauches nur unbedeutend ist.

Die Aufnahme eines beachtlichen Anteils von entstehendem Kohlendioxyd durch die Gewebsflüssigkeit*) wirkt sich unter der Annahme eines bleibenden Atmungsquotienten von ca. 1 dahin aus, daß ein Unterdruck in der Packung entsteht, der Zuströmen von Außenluft durch Undichtigkeiten in der Hülle bedingt. Die Folge des Einströmens eines vorwiegend aus Stickstoff bestehenden Gasgemisches ist, daß die Summe der %-Gehalte an Sauerstoff und Kohlendioxyd in der Binnenatmosphäre zunächst absinkt und erst, wenn die Gewebsflüssigkeit sich dem CO₂-Sättigungsgleichgewicht nähert und der Überschuß an N₂ infolge des innen höheren N₂-Partialdruckes herausdiffundiert, nimmt die Summe (% CO₂ + % O₂) wieder zu und erreicht im Gleichgewichtszustand wieder den Ausgangswert von ca. 21%.

Die Verwendung von Kunststoffolien als ein Mittel, außer dem Wasser- auch den Gasaustausch von verpacktem Obst und Gemüse einzuschränken, ist an sich mit einem Unsicherheitsfaktor behaftet. Es ist von vornherein nicht ohne spezielle Messungen möglich, Aussagen darüber zu machen, welche Zusammensetzung die Packungsatmosphäre im Gleichgewichtszustand annehmen wird. Es könnte der ungünstige Fall eintreten, daß der Sauerstoffgehalt sogar, mindestens vorübergehend, bis in einen für das Lagergut schädlichen Bereich abfällt.

Die unter unseren Versuchsbedingungen beobachteten Konzentrationen an CO₂ und O₂ lagen nun niemals, auch nicht im Stadium des O₂-Minimums, in diesem schädlichen Bereich, sondern die Innenatmosphäre stellte sich im Gleichgewicht in der Regel (Ausnahme Versuch 6) auf 5 bis 10% CO₂ und 16 bis 11% O₂ ein. Es sind dies Konzentrationen, bei denen nach früheren Beobachtungen (z. B. *Kidd* u. *West* [1930], *Kaess* [1939]) die Haltbarkeit von Obst gegenüber der Lagerung in Luft von normaler Zusammensetzung deutlich verbessert ist.

Es scheint uns nach diesen Befunden aus orientierenden Versuchen empfehlenswert, systematische Versuche auf breiterer Grundlage, u. a. mit verschiedenen Sorten von Früchten und Gemüsen, mit weiteren Typen von Folien und schließlich bei variiertem Packungsgröße durchzuführen und damit die Eignung dieser Lagerungsart für die in der Praxis hierfür in Frage kommenden lebendigen Lagergüter pflanzlicher Herkunft zu überprüfen.

*) Die Gesamtmenge an CO₂ lösender Flüssigkeit innerhalb der Hülle vermehrt sich während der Lagerung durch das entstehende Atmungswasser (siehe oben) nicht, da in gleichen Zeiten etwa ebensoviel Wasser (in Dampfform) durch die Folie nach außen hindurchtritt, wie Atmungswasser neu gebildet wird.

Es wäre von einer derartigen Verwendung von Kunststoffolien zu erwarten, daß auch die hygienischen Verhältnisse der Waren wesentlich verbessert würden, vor allem dann, wenn sich diese Vorzüge einer verbesserten Haltbarkeit auch bei Kleinpakungen erhalten sollten, bei denen eine Hülle aus Kunststoffolie noch eine besondere, zum Kauf anreizende Wirkung auslöste.

Zusammenfassung

Spargel und Karotten wurden in Cellophan dicht eingehüllt mehrere Wochen bei etwa 0° C gelagert. Die Haltbarkeit war unter diesen Bedingungen ausgezeichnet.

In allen Fällen stellte sich nach wenigen Tagen ein Gleichgewicht zwischen Gasstoffwechselumsatz und Gasdiffusion durch die Verpackung ein. In diesem Zustand des Gleichgewichts betrug die Summe von % CO₂ und % O₂ in der Binnenatmosphäre 21%, und zwar waren die Differenzen im %-Gehalt zwischen Innen- und Außenatmosphäre für CO₂ und O₂ etwa von gleicher Größe.

Bei einigen Versuchen stieg der CO₂-Gehalt der Innenatmosphäre nach Verschuß der Packung fortlaufend an und näherte sich asymptotisch einer Gleichgewichtskonzentration; ein annähernd reziprokes Verhalten zeigte der Gehalt an Sauerstoff, wobei indes in fast allen Fällen ein flaches Minimum vor der Gleichgewichtseinstellung durchlaufen wurde.

In anderen Versuchen wurde die Gleichgewichtslage von beiden Gasen in den ersten Versuchsstadien vorübergehend stark überschritten, und das Gleichgewicht stellte sich deshalb von einer niederen Sauerstoff- bzw. erhöhten Kohlendioxydkonzentration ausgehend ein. Ein Grund für dieses Verhalten scheint vor allem zu sein, daß die Gasdurchlässigkeit der anfangs trockenen und damit für Gase nur sehr schwer permeablen Folie durch Quellung stark erhöht wird. Begünstigt wird die diffusionsfördernde Wirkung der Quellung durch Niederschlag von Kondenswassertropfchen auf der Folie. Weitere für die beobachteten Veränderungen möglicherweise maßgebende Faktoren werden diskutiert.

LITERATURVERZEICHNIS:

- 1) Anonym: Tests show importance of low temperatures in prolonging life of pre-packaged produce. Air conditioning a. refrig. News, v. 27. 12. 1948, S. 13.
- 2) Denny, F. E.: Changes in oxygen, carbon dioxide, and pressure caused by plant tissue in a closed system. Contrib. Boyce Thompson Inst. 14, 383 (1947).
- 3) Devaux, H.: Etude expérimentale sur l'aération des tissus massifs. Annal. sci. nat. VII. Sér. Botanique XIV, 297 (1891).
- 4) Friebe-Scupin, L.: Erfahrungen mit Spargelkühlagerung. Verlag Landwirtsch. Wochenschr. Halle 1933, S. 13.
- 5) Heiss, R.: Die Aufgaben der Kältetechnik in der Bewirtschaftung Deutschlands mit Lebensmitteln. Bd. D.: Frischhaltung von Obst und Gemüse, Heft 77 der RKTL-Schriften. Beuth-Vertrieb, Berlin, 1938, S. 45/46.
- 6) Kaeß, G.: Landwirtsch. Jahrb. 88, 91—96 (1939).
- 7) Kidd, F. und C. West: The gas storage of fruit. II. Optimum temperatures and atmospheres, J. Pomol. Hort. Sci. 8, 67—77 (1930).
- 8) Krumbholz, G.: Lagerversuche mit Gemüse. Landwirtsch. Jahrb. 88, 86—88 (1939).
- 9) Pfeffer, W.: Pflanzenphysiologie, Bd. I, S. 534, Leipzig: Engelmann, 1897.
- 10) Platenius, H.: Effect of oxygen concentration on the respiration of some vegetables. Plant Physiol. 18, 671 (1943).
- 11) Scupin, L.: Schriftenreihe zur Lagerung von Lebensmitteln, Reihe A, Heft 2, Bremerhaven 1935, S. 78.
- 12) Semichatova, O. A.: Bot. Z. SSSR., 35, 461 (1950).
- 13) Slyke, D. D. van, und J. Sendroy jr.: J. of biol. Chem. 95, 509 (1932).
- 14) Thornton, N. C.: Carbon dioxide storage. III: The influence of carbon dioxide on the oxygen uptake by fruits and vegetables. Contrib. Boyce Thompson Inst. 5, 371 (1933).
- 15) Tischer, R. G.: Physiological and storage responses of fruit to certain technological treatments before and during storage with special emphasis on artificial atmospheres. Report on Agricult. Res 1947—48, Iowa Agric. Exp. Sta. 1948, S. 279—80.
- 16) Wolf, J.: Untersuchungen an Spargel. III. Mitt.: Der Gasstoffwechsel von Spargel bei verschiedenen Temperaturen. Gartenbauwiss. 16, 525—549 (1942).