Zeitschrift: Mitteilungen aus Lebensmitteluntersuchungen und Hygiene = Travaux de chimie alimentaire et d'hygiène

Herausgeber: Bundesamt für Gesundheit

Band: 90 (1999)

Heft: 6

Artikel: Haltbarkeitsorientierte Auslegung von Lebensmittelverpackungen mit computerunterstützter Simulation

Autor: Pfeiffer, Christian / Walter, Juris / Mardon, Lawson

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-981798

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Haltbarkeitsorientierte Auslegung von Lebensmittelverpackungen mit computerunterstützter Simulation*

Christian Pfeiffer, Marcel d'Aujourd'hui (†) und Juris Walter, Lawson Mardon Packaging Services AG, Neuhausen am Rheinfall

Jeannette Nüssli und Felix Escher, Institut für Lebensmittelwissenschaft, ETH-Zentrum, Zürich

Einleitung

Die Lagerung von landwirtschaftlichen Rohstoffen, Zwischenprodukten und fertigen Lebensmitteln über mehr oder weniger lange Perioden stellt einen integrierenden Bestandteil der Produktionskette und der Versorgung des Marktes mit qualitativ hochstehenden Lebensmitteln dar. Während der Lagerung unterliegen Rohstoffe, Halbfabrikate und Fertigerzeugnisse fast ausnahmslos Veränderungen, welche zu Qualitätseinbussen von einer geringen sensorischen Fehlnote bis hin zum totalen Verderb führen können. Deshalb wird für Lebensmittel die *Haltbarkeit* (englisch *shelf-life*) als die Zeit in Tagen, Monaten oder Jahren definiert, in welcher die Qualitätseinbussen ein tolerierbares Mass nicht überschreiten. Die tolerierbare Qualitätseinbusse oder die Qualitätsgrenze ist für jedes einzelne Lebensmittel und für jeden Verwendungszweck zu definieren.

Die Haltbarkeit eines Lebensmittels lässt sich durch die *Verpackung* massgeblich beeinflussen. Daraus ergibt sich für die Lebensmitteltechnologie die Aufgabe, diejenige Verpackungsart auszuwählen, welche für ein bestimmtes Produkt die notwendige Haltbarkeit garantiert. Der maximal mögliche Verpackungsschutz entspricht in der Regel nicht der kostengünstigsten Lösung, erfüllt oft die ökologischen Anforderungen nicht oder erweist sich vom Convenience-Aspekt her als ungeeignet. Deshalb ist es sinnvoll, die Verpackung nicht auf einen maximalen Schutz hin auszulegen, sondern für eine definierte Haltbarkeit zu optimieren. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, wie die haltbarkeitsorientierte Auslegung der Verpa-

* Vortrag gehalten an der 111. Jahrestagung der Schweiz. Gesellschaft für Lebensmittel- und Umweltchemie, Stein am Rhein, 3. September 1999

ckung eines Produktes *(«Shelf-Life Designed Packaging of Food», SDPF)* mit computerunterstützter Simulation durchgeführt werden kann. Dabei werden die Methoden der Simulation besprochen und einige praktische Beispiele vorgestellt.

Einflussfaktoren auf die Haltbarkeit von Lebensmitteln

Im Zusammenhang mit der Haltbarkeit wird die Lebensmittelqualität umschrieben mit den physiologischen Merkmalen Nährwert und Bekömmlichkeit und den sensorischen Eigenschaften Farbe, Flavour (Summe von Geruch und Geschmack) und Textur. Eine Qualitätsverminderung in Lebensmitteln und damit eine Begrenzung der Haltbarkeit kann eines oder mehrere dieser Merkmale betreffen. Qualitätseinbussen werden hervorgerufen durch

- die Aktivität von Mikroorganismen, d. h. Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen,
- den Befall mit Insekten und Parasiten,
- enzymatische Reaktionen,
- nicht enzymatische chemische Reaktionen,
- physikalische Veränderungen.

Die physikalischen Veränderungen führen nicht nur zur Qualitätsverminderung im engeren Sinn (Feuchtwerden, Austrocknen, Kristallisation usw.), sondern durch Verlust von Wasser auch rein quantitativ zu einer Gewichtsabnahme und zur Unterschreitung der Gewichtstoleranz, z. B. eines verpackten Getränkes.

Diese Reaktionen und Veränderungen werden ganz allgemein durch folgende Faktoren kontrolliert:

- intrinsische Faktoren, wie chemische Inhaltsstoffe, Struktur, Wassergehalt bzw. Wasseraktivität, pH-Wert und Redoxpotential des Lebensmittels;
- Prozessfaktoren, wie Verarbeitungsmethode, Konservierungsmethode, Verwendung von Zusatzstoffen, Verpackungstechnik;
- extrinsische Faktoren, wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Lichtverhältnisse und mikrobiologischer Kontaminationsgrad der Umgebung während der Lagerung.

Als Prozessfaktor ist es Aufgabe der Verpackung, die für eine bestimmte Haltbarkeit notwendige *Barrierenwirkung* zu erreichen. Für die nachfolgenden Überlegungen soll die in der Praxis meist erfüllte Forderung gelten, dass eine Verpackung vor Einwanderung von Insekten, Parasiten und Mikroorganismen vollständig schützt. Im weiteren wird die Notwendigkeit des Schutzes eines Lebensmittels vor mechanischer Beschädigung durch Bruch nicht berücksichtigt. Es ergibt sich dann die Situation, dass sich die Betrachtungen über die Barrierenwirkung auf die *Wasserdampfdurchlässigkeit,* die *Durchlässigkeit von Gasen* wie *Sauerstoff, Kohlendioxid* und *Stickstoff* sowie auf die *Lichtdurchlässigkeit* beschränken können. Als weitere spezielle Einflussgrösse käme noch die Durchlässigkeit von Aromastoffen hinzu.

Theoretisch lassen sich demnach durch eine bestimmte Verpackung diejenigen Veränderungen und Reaktionen beeinflussen, die kontrolliert werden durch

- den Wassergehalt bzw. die Wasseraktivität,
- den Partialdruck von Sauerstoff, Kohlendioxid oder Stickstoff,
- die Einwirkung von UV- und Lichtstrahlen.

Ist die Kinetik der Veränderungen in Abhängigkeit der drei Faktoren sowie der *Temperatur* als übergeordneter Einflussgrösse bekannt, so kann im einfachsten Falle bei vorgegebenen Barriereneigenschaften die Haltbarkeit ermittelt werden. Umgekehrt lassen sich die notwendigen Barriereneigenschaften für eine vorgegebene Haltbarkeit festlegen. Im erweiterten Sinne lassen sich aufgrund derartiger Berechnungen Empfehlungen über das Verpackungsmaterial, die Packungsdimensionen, die Füll- und Verschliessbedingungen und die Lagerbedingungen machen.

Während die für diese Berechnungen relevanten Eigenschaften von Verpackungsmaterialien heute entweder in entsprechenden Datensammlungen vorliegen oder mit vertretbarem Aufwand gemessen werden können, sind kinetische Angaben über Qualitätsveränderungen wesentlich weniger zahlreich und auf ausgewählte Lebensmittel und Reaktionstypen beschränkt. Zuverlässige quantitative Angaben fehlen insbesondere zu sensorischen Qualitätsveränderungen, welche in der Regel eine ganze Reihe verschiedener Reaktionen umfassen. Datensammlungen und allgemeine kinetische Hinweise zur Bestimmung der Haltbarkeit finden sich bei *Labuza* (1), *Charalambous* (2), *Okos* (3), *Labuza* und *Taoukis* (4), *Robertson* (5), *Heiss* und *Eichner* (6), *Heiss* (7), *Man* und *Jones* (8).

Mathematische Simulation

Durchlässigkeit der Verpackung

Bei unterschiedlichem Partialdruck eines Gases auf beiden Seiten einer Folie diffundiert eine gewisse Menge dieses Gases durch die Folie hindurch in Richtung des tieferen Partialdrucks. Diese Durchlässigkeit Q hängt u.a. von der Art des Gases sowie vom Material und der Dicke der Folie ab. Die Definition und Einheit der Gasdurchlässigkeit ist

$$[Q] = Volumen / (Zeit \cdot Fläche \cdot Partialdruckdifferenz) = cm^3 / (d \cdot m^2 \cdot bar),$$

wobei d die Betrachtungsdauer in Tagen bezeichnet. Die Wasserdampfdurchlässigkeit ist definiert durch

$$[Q] = Gewicht / (Zeit \cdot Fläche) = g / (d \cdot m^2)$$

und bezieht sich auf die Differenz der relativen Feuchtigkeit (Quotient aus dem aktuellen Wasserdampfdruck und dem Sättigungsdruck) von 100 %. Die Durchlässigkeit Q ist indirekt proportional zur Foliendicke D. Das Produkt

$$P = Q \cdot D$$

ist somit dickenunabhängig von der Foliendicke und heisst Permeabilität. Verbindet man mehrere Folien der Dicken D_i mit Permeabilitäten P_i zu einem Laminat, so ist die daraus resultierende Durchlässigkeit gegeben durch

$$Q = 1/(\sum_i D_i / P_i).$$

Die Permeabilität hängt zusätzlich von der Temperatur und der Feuchtigkeit ab. Der Einfluss der Temperatur kann mit dem Arrheniusgesetz wie folgt ausgedrückt werden:

$$P(T) = P_0 \cdot \exp(-\frac{E_p}{R \cdot T}),$$

wobei E_p die Aktivierungsenergie für die Permeation, R die universelle Gaskonstante und T die absolute Temperatur bezeichnet. Da für den Einfluss der relativen Feuchtigkeit kein physikalisches Gesetz zur Verfügung steht, jedoch ebenfalls ein exponentielles Verhalten vermutet wird, kann mit dem Ansatz

$$P(F) = exp\ (d_0 + d_1 \cdot F + d_2 \cdot F^2 + ...)$$

versucht werden, die Koeffizienten d_0, d_1, d_2, ... zu bestimmen. Beschränkt man sich dabei auf ein Polynom 2. Grades im Exponenten und berücksichtigt zusätzlich die Temperaturabhängigkeit, dann erhält man

$$P(T, F) = exp(c_0 + c_1 / T + c_2 \cdot F + c_3 \cdot F^2).$$

Dieser Ansatz wurde am Beispiel des Gases O_2 anhand zahlreicher Literaturdaten und gemessener Durchlässigkeiten getestet und hat sich als genügend allgemein herausgestellt. Da die relative Feuchtigkeit auf beiden Seiten der Folie im allgemeinen verschieden ist, ersetzt man F zum Beispiel durch den Mittelwert der beiden Feuchtigkeiten. Für andere Gase und für Wasserdampf werden ähnliche Formeln verwendet.

Wassergehalt von Lebensmitteln

Der Wassergehalt stellt einen der wichtigsten Faktoren für die Haltbarkeit eines Lebensmittels dar. Für die Lösung von Verpackungsproblemen ist er deshalb besonders zu berücksichtigen. Dazu muss die Beziehung zwischen dem Wassergehalt des Lebensmittels und der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft bekannt sein.

In Bezug auf den Wassergehalt stellt sich zwischen Lebensmittel und Umgebungsluft ein Gleichgewicht ein. Dieses Gleichgewicht wird demnach durch die

relative Feuchtigkeit F charakterisiert und deshalb auch Gleichgewichtsfeuchtigkeit genannt. In der Praxis wird die relative Feuchtigkeit F direkt mit der aus der Lösungstheorie abgeleiteten Wasseraktivität a_w des Lebensmittels gleichgesetzt, wobei a_w als Teil des Ganzen angegeben wird (a_w = F/100). Die Gleichgewichtsfeuchtigkeit bzw. die Wasseraktivität steht mit dem Wassergehalt W des Lebensmittels (g Wasser/100 g Lebensmittel) über die Sorptionsisotherme in Beziehung. In den betrachteten Fällen wurde die Sorptionsisotherme in einem gewissen Feuchtigkeitsbereich linear approximiert.

Bei einem verpackten Lebensmittel setzt sich das Gesamtvolumen der Verpackung aus dem Volumen des Füllguts und dem Volumen des Kopfraums zusammen. Die Aufteilung des in der Verpackung vorhandenen Wasserdampfes zwischen dem Füllgut und dem Kopfraum wird durch die Sorptionsisotherme bestimmt. Es lässt sich leicht zeigen, dass sich fast die gesamte Menge Wasserdampf im Füllgut befindet. So enthält gesättigte Luft bei Zimmertemperatur nur gerade 0,00002 g/cm^3 Wasser, während 1 g eines Trockenprodukts unter denselben Bedingungen rund 0,1 g Wasser enthält. Bei der Diffusion von Wasserdampf durch die Verpackung hindurch ins Innere nimmt man daher an, dass die gesamte Menge Wasserdampf direkt in das Füllgut gelangt. Mit Hilfe der Sorptionsisothermen kann nun die relative Feuchtigkeit im Kopfraum bestimmt werden. Dieser Vorgang lässt sich leicht in Formeln fassen. Es werden dazu folgende Bezeichnungen verwendet:

W	=	Wassergehalt des Lebensmittels
Fa	=	relative Feuchtigkeit ausserhalb der Verpackung
$Fi(t)$	=	relative Feuchtigkeit im Kopfraum zur Zeit t
A	=	Oberfläche der Verpackung
Q	=	Wasserdampfdurchlässigkeit der Verpackung
m	=	Gewicht des Lebensmittels
t	=	Zeit in Tagen
si	=	Steigung der Sorptionsisothermen

Die zeitliche Änderung des Wassergehalts des Füllguts durch Diffusion beträgt

$$dW / dt = Q \cdot A\,(Fa - Fi(t)) / m.$$

Die relative Feuchtigkeit im Kopfraum ändert sich gemäss

$$dFi / dt = (dW / dt) / si.$$

Durch Integration erhält man die Funktionen $W(t)$ und $Fi(t)$.

Gewichtsverlust der Verpackung

Neben der Beeinflussung der Lagerstabilität durch Wasseraufnahme oder -abgabe kann ein Wasserverlust direkt zur Unterschreitung des deklarierten Füllge-

wichtes von Packungen führen. Dieser Gewichtsverlust ist nur bei feuchten Produkten relevant, z. B. bei Säften, Füllgütern mit Saucen usw. Im Kopfraum solcher Verpackungen ist die Atmosphäre stets gesättigt, d. h. $Fi = 100\ \%$. Der Gewichtsverlust lässt sich direkt nach obiger Formel für den Wassergehalt bestimmen.

Reaktionen mit Sauerstoff

Oxidationen zählen zu den häufigsten qualitätsvermindernden Reaktionen im Lebensmittel. Deshalb müssen für die meisten Verpackungsfragen die Sauerstoffverhältnisse innerhalb der Verpackung bekannt sein. Dabei muss sowohl die Kinetik der sauerstoffverbrauchenden Oxidationsreaktionen im Lebensmittel als auch die Sauerstoffdiffusion durch die Verpackung berücksichtigt werden. Bezeichnet man mit *pi* den Sauerstoffpartialdruck im Kopfraum, so setzt sich die zeitliche Änderung von *pi* wie folgt zusammen:

$$dpi / dt = dpi_1 / dt - dpi_2 / dt$$

mit

dpi_1 = Zunahme des O_2-Partialdrucks durch Diffusion
dpi_2 = Abnahme des O_2-Partialdrucks durch Reaktion.

Die Zunahme des O_2-Partialdrucks durch Diffusion wird durch

$$dpi / dt = QO_2 \cdot A \cdot (pa - pi(t)) / Vk$$

berechnet, wobei
pa = O_2-Partialdruck aussen
Vk = Volumen des Kopfraumes.

Die Abnahme des O_2-Partialdrucks hängt von der Reaktion mit dem Lebensmittel ab, worauf hier nicht im Detail eingegangen wird. Allfällige Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit auf die Reaktionsgeschwindigkeit sollten dabei berücksichtigt werden. Aus der Reaktionsgeschwindigkeit folgt der O_2-Verbrauch zunächst in Gewichtseinheiten. Die Abnahme des O_2-Partialdrucks im Kopfraum wird mit Hilfe des Gasgesetzes bestimmt.

Zusätzlich zum Sauerstoffgehalt der Verpackung wird der Verlauf einer Substanz oder einer Grösse berechnet, welche an der Reaktion beteiligt ist und ein geeignetes Mass für die Qualität des Lebensmittels darstellt.

Gesamtdruck der Verpackung

Der zeitliche Verlauf des Gesamtdrucks ist vor allem bei Vakuumverpackungen von Interesse. Man verwendet die Tatsache, dass der Totaldruck gleich der Summe der Partialdrücke der Gaskomponenten ist. Es genügt also, die Partialdrücke der am

häufigsten vorkommenden Gase (N_2, O_2 und CO_2) zu bestimmen und zu addieren. Es ist interessant zu sehen, wie sich die Zusammensetzung der Kopfraumatmosphäre und der Totaldruck einer Verpackung aufgrund unterschiedlicher Durchlässigkeiten der Gase mit der Zeit ändert.

Computerprogramm

Die beschriebene theoretische Lösung wurde mit der PC-Software Excel programmiert. Eine Datenbank enthält die Barrierenwerte bezüglich Wasserdampf, O_2, N_2 und CO_2 für eine Fülle von Folien, Laminaten und Verpackungen. Da die Durchlässigkeiten im allgemeinen von der Temperatur und der Feuchtigkeit abhängen, sind nur die Koeffizienten c_0, c_1, c_2, c_3 der Funktionen $P(T,F)$ abgelegt. Durch Auswählen von Folien und/oder Laminaten und Eingeben der Dicken können neue Verbunde komponiert und ihre Barriereneigenschaften rechnerisch ermittelt werden. Es besteht die Möglichkeit, mehrere Teile einer Verpackung (Behälter, Verschlussteil, Etikette) einzeln zu definieren und deren Gesamtdurchlässigkeit zu bestimmen.

Nachdem die Verpackung definiert worden ist, wird ein dem Lebensmittel angepasstes Berechnungsmodul ausgewählt. Es stehen Module für verschiedene Lebensmittelgruppen zur Verfügung, welche sich in der chemischen Reaktion oder dem Sorptionsverhalten unterscheiden. Weitere Angaben über die Verpackung (Gesamtvolumen, Kopfraumvolumen, Füllgewicht) und die Abfüllbedingungen (unter Luft abgefüllt, begast, vakuumiert) werden benötigt. Das Programm berechnet sodann iterativ in Zeitschritten die für das Lebensmittel kritischen Grössen und stellt den Verlauf über seine Lagerdauer grafisch dar. Verschiedene Varianten sind so rasch durchgerechnet und können miteinander verglichen werden.

Module für SDPF von einzelnen Lebensmitteln

Übersicht

Die Auswahl der Lebensmittel für die Modellierung erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Verschiedenartigkeit der Produkte (Zusammensetzung, Verderbsreaktionen)
- Möglichkeit der Bildung von Lebensmittelgruppen mit ähnlichen Eigenschaften
- Verfügbarkeit von entsprechenden Daten für das Sorptionsverhalten, die Sauerstoffempfindlichkeit usw.

Sämtliche für die Modellierung verwendeten Daten und Informationen stammen aus der Fachliteratur. In Tabelle 1 sind die bisher erstellten Module für Lebensmittel bzw. Lebensmittelgruppen sowie deren für die Modellierung ausgewählten qualitätsvermindernden Reaktionen aufgeführt.

Zudem gibt es ein allgemeines Modul zum Bestimmen der Gaszusammensetzung, das heisst der Anteile Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid, im Kopfraum von unter MAP/CAP («Modified Atmosphere Packaging»/«Controlled At-

Tabelle 1
Beispiele für die Anwendung des SDPF-Programmes

Lebensmittel	*Qualitätsvermindernde Reaktionen*	*Anwendungsbeispiele*
Cerealien	Feuchtigkeitsaufnahme, Lipidoxidation	Frühstücksflocken, Haferflocken, Biscuits usw.
Snacks	Lipidoxidation, Feuchtigkeitsaufnahme	Chips, extrudierte Snacks
Nüsse	Lipidoxidation, Feuchtigkeitsaufnahme	Erdnüsse geröstet, Erdnüsse gesalzen, Mandeln, Haselnüsse usw.
Kaffee (geröstet, gemahlen)	Feuchtigkeitsaufnahme, Aromaverlust	
Instant-Produkte	Feuchtigkeitsaufnahme, Lipidoxidation	Suppen, Saucen, Getränkepulver usw.
Milchpulver	Feuchtigkeitsaufnahme, Nicht-enzymatische Bräunung	
Fruchtsäfte	Gewichtsverlust, Vitaminoxidation	Orangensaft, Apfelsaft usw.
Fertiggerichte	Lipidoxidation, Gewichtsverlust	Fleischkomponente von Fertigmenüs, Tierfutter
Kartoffelflocken	Feuchtigkeitsaufnahme, Lipidoxidation	Instant-Kartoffelpüree
Verarbeiteter Käse («processed cheese»)	Gewichtsverlust, Schimmelwachstum	
Emmentaler Käse	Gaskonzentration im Headspace und im Käse (Sauerstoff, Kohlendioxid), Aufblähen / Vakuumbildung	
Früchte und Gemüse	Gaskonzentration im Headspace (Sauerstoff, Kohlendioxid, Stickstoff)	Frische Salate, frisches Schnittgemüse, frische Früchte, andere MAP-Produkte
Trockenmischungen	Feuchtigkeitsaufnahme	Alle Arten von Trockenprodukten

mosphere Packaging») verpackten Füllgütern wie Frischsalate, Wurst, Früchte. Die Auswahl der Module lässt sich auf den dargestellten Grundlagen für weitere Lebensmittel ergänzen.

Ausgewählte Beispiele

Modul Cerealien

Cerealien sind infolge ihres tiefen Wassergehaltes von meistens weniger als 5 %, d. h. des tiefen a_w-Wertes, sehr feuchtigkeitsempfindlich. Je nach Ausmass der Wasseraufnahme kann es zu folgenden unerwünschten Veränderungen kommen:

- Texturerweichung
- erhöhte Geschwindigkeit der Lipidoxidation
- Enzymaktivität
- Wachstum von Mikroorganismen (7).

Trotz des tiefen Fettgehaltes von meistens weniger als 10 % sind Cerealien oxidationsanfällig, da die Fettfraktion überwiegend aus einfach und doppelt ungesättigten Fettsäuren besteht. Die Lipidoxidation verläuft zunächst linear und beschleunigt sich dann autokatalytisch. Oft werden jedoch Cerealien noch während dem linearen Verlauf der Reaktion als ranzig empfunden (6, 9, 10). Pentan, eine flüchtige, geruchlose Substanz, die gegen Ende der Lipidoxidation gebildet wird, ist ein geeigneter Indikator für das Ausmass der Lipidoxidation, da es analytisch relativ einfach bestimmt werden kann (11). Die Lipidoxidation ist von folgenden Faktoren abhängig (12):

- Sauerstoffpartialdruck in der Verpackung
- Temperatur
- Feuchtigkeit.

Modul Fertiggerichte

Sterilisierte Fertigmenüs bestehen oft aus verschiedenen Komponenten wie Fleisch, Gemüse und Beilagen. Fleisch ist dabei die empfindlichste aller Komponenten. Die wichtigste qualitätsvermindernde Reaktion ist wiederum die Lipidoxidation. Für dieses Modul wurde als Indikator für das Ausmass der Lipidoxidation Ethan gewählt (13, 14). Im weiteren gelten die beim Modul Cerealien gemachten Bemerkungen zur Oxidation der Lipide.

Der Gewichtsverlust ist für den Hersteller aus wirtschaftlichen und gesetzestechnischen Gründen interessant, hat aber keinen direkten Einfluss auf die Qualität des Fleisches.

Modul Fruchtsaft

Fruchtsäfte, wie zum Beispiel Orangensaft, sind wichtige Vitaminlieferanten. Somit ist der Vitamingehalt, vor allem an Vitamin C (Ascorbinsäure), ein wichtiges Qualitätsmerkmal für Fruchtsäfte. Ascorbinsäure wird sowohl oxidativ, das heisst durch Sauerstoff, als auch in geringerem Umfang anaerob, das heisst sauerstoffunabhängig, abgebaut (15–17). Der totale Ascorbinsäureverlust ist folglich von folgenden Faktoren abhängig (18, 19):

- Sauerstoffpartialdruck in der Verpackung (dabei muss die im Saft gelöste Sauerstoffmenge auch berücksichtigt werden)
- Ascorbinsäuregehalt
- Temperatur.

Bezüglich des Gewichtsverlustes gelten die im Abschnitt Fertiggerichte gemachten Angaben.

Modul Salat

Salat wird heute in ganzer oder bereits gerüsteter Form mehr und mehr mit der Technik des Controlled Atmosphere Packaging (CAP) oder Modified Atmosphere Packaging (MAP) auf dem Markt angeboten (20, 21). Die Einstellung einer optimalen Gasatmosphäre sorgt dafür, dass sich der Stoffwechsel des lebenden pflanzlichen Gewebes auf einem Niveau einpendelt, das eine möglichst lange Haltbarkeit ermöglicht. Die CAP-Technik wird auch für geschnittenes Suppengemüse und für Früchte eingesetzt.

Anwendungsmöglichkeiten

Der Verpackungsspezialist kann in Zusammenarbeit mit dem Lebensmitteltechnologen aufgrund des SDPF-Programms folgende Einflussfaktoren einer Lebensmittelverpackung optimieren:

- Verpackungsmaterial(-ien)
- Barrieren-Eigenschaften
- Verpackungsdimensionen bzw. Füllgrad
- Abfüllbedingungen
- Lagerbedingungen.

Für den Lebensmittelhersteller kann dies folgenden Nutzen haben:

- Kostenreduktion der Verpackung
- Bestimmung von kritischen Einflussfaktoren der Lebensmittelverpackung
- Reduktion der Zahl der erforderlichen Haltbarkeitstests durch vorbereitende Simulation und Evaluation möglicher Lösungen von Verpackungsproblemen
- längere Haltbarkeit

Im Folgenden sind einige Beispiele von durchgeführten Berechnungen aufgeführt, welche im SDPF-Programm erfolgten. Weitere Beispiele sind an anderer Stelle vorgestellt worden (22, 23).

Modul Nüsse: Vergleich der Simulation mit Messungen bei Erdnüssen

In Lagerversuchen mit Erdnusssamen wurde geprüft, wieweit experimentelle mit berechneten Daten übereinstimmen. Dazu wurde die Lagerstabilität der Erdnüsse aufgrund oxidativer Veränderungen beurteilt, die wiederum über die Veränderung der Sauerstoffkonzentration im Kopfraum erfasst wurde. Abbildung 1 zeigt in diesem Beispiel eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Allgemein hat sich diese brauchbare Übereinstimmung bestätigt, sofern für die Er-

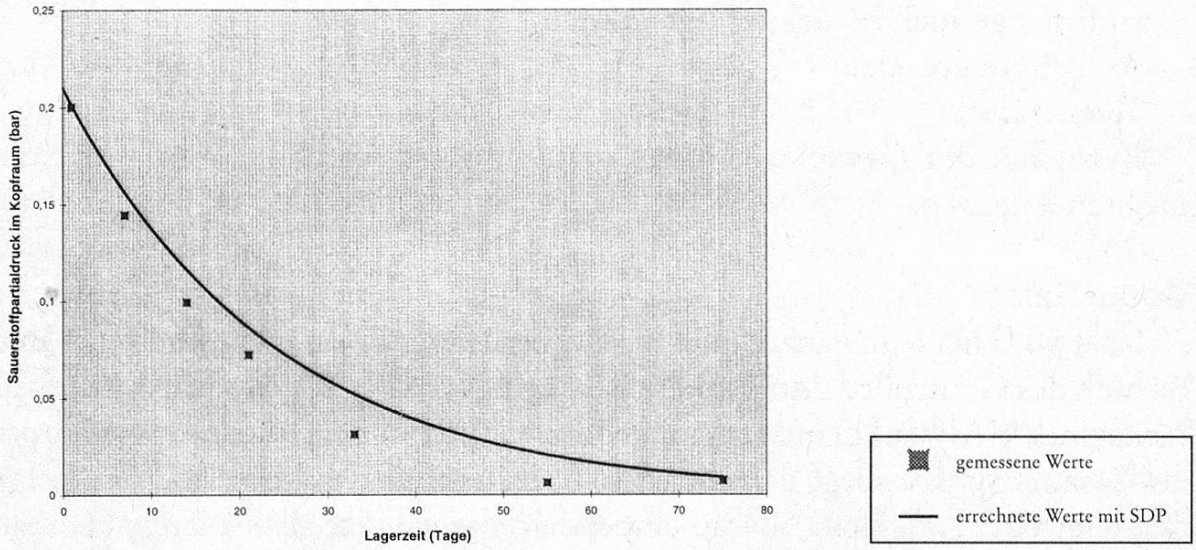

Abbildung 1 **Veränderung des Sauerstoffgehaltes im Kopfraum von CERAMIS-Beuteln mit Erdnusssamen während der Lagerung bei 25 °C; Vergleich von berechneten und gemessenen Daten**

arbeitung des Moduls genügend experimentelle Ausgangsdaten zur Verfügung standen.

Modul Cerealien: Feuchtigkeitsaufnahmen von Getreideflocken

In Abbildung 2 ist die Feuchtigkeitsaufnahme von Frühstückscerealien in unterschiedlichen Verpackungen und mit unterschiedlichem Ausgangswassergehalt über eine einjährige Lagerperiode dargestellt. Das Simulationsprogramm zeigt, wie man für unterschiedliche Bedingungen die zu erwartende Feuchtigkeitsaufnahme dieser sehr feuchtigkeitsempfindlichen Produkte abschätzen kann. So bietet die Verdoppelung der Foliendicke nicht nur den erwarteten besseren Schutz für das Produkt mit 2,3 g/100 g Ausgangswassergehalt, sondern vermag auch das Produkt mit 3,0 g/100 g Ausgangswassergehalt besser vor Wasseraufnahme zu schützen.

Modul Kartoffelflocken: Oxidationsstabilität

Instant-Kartoffelflocken sind trotz ihres tiefen Lipidgehaltes oxidationsanfällig und deshalb sauerstoffempfindlich. In Abbildung 3 sind die simulierten Werte für die Veränderung der Sauerstoffkonzentration im Kopfraum und das Ausmass der Oxidation von Linol- und Linolensäure über die Lagerung während eines Jahres in unterschiedlichen Verpackungen dargestellt. Es zeigt sich, dass für Polypropylenbecher eine Stickstoffbegasung keine verbesserte Oxidationsstabilität bringt, da die Sauerstoffbarriere von Polypropylen trotz des Einsatzes einer Aluminiumdeckelfolie zu gering ist. Wird Polypropylen durch EVOH und die Aluminiumdeckelfolie durch eine SiOx-Deckelfolie ersetzt, zeigt sich ohne Stickstoffbegasung ebenfalls eine Verbesserung der Stabilität. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Kopfraum

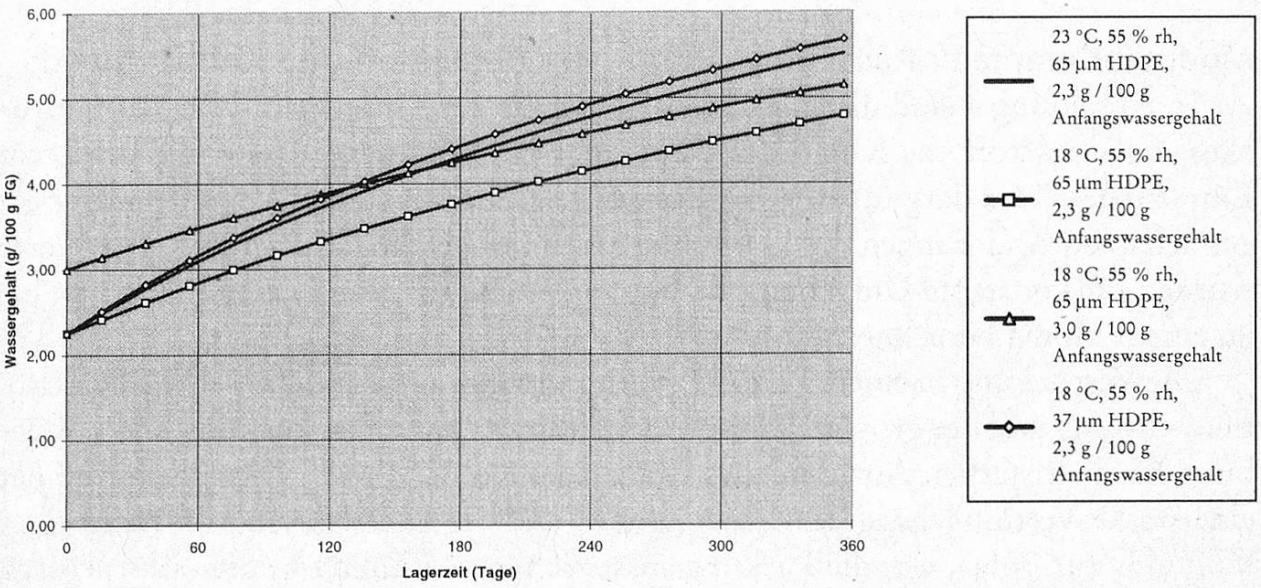

Abbildung 2 **Simulation der Feuchtigkeitsaufnahme bei der Lagerung von Frühstückscerealien, verpackt mit unterschiedlichem Ausgangswassergehalt und in unterschiedlich dicker HDPE-Folie**

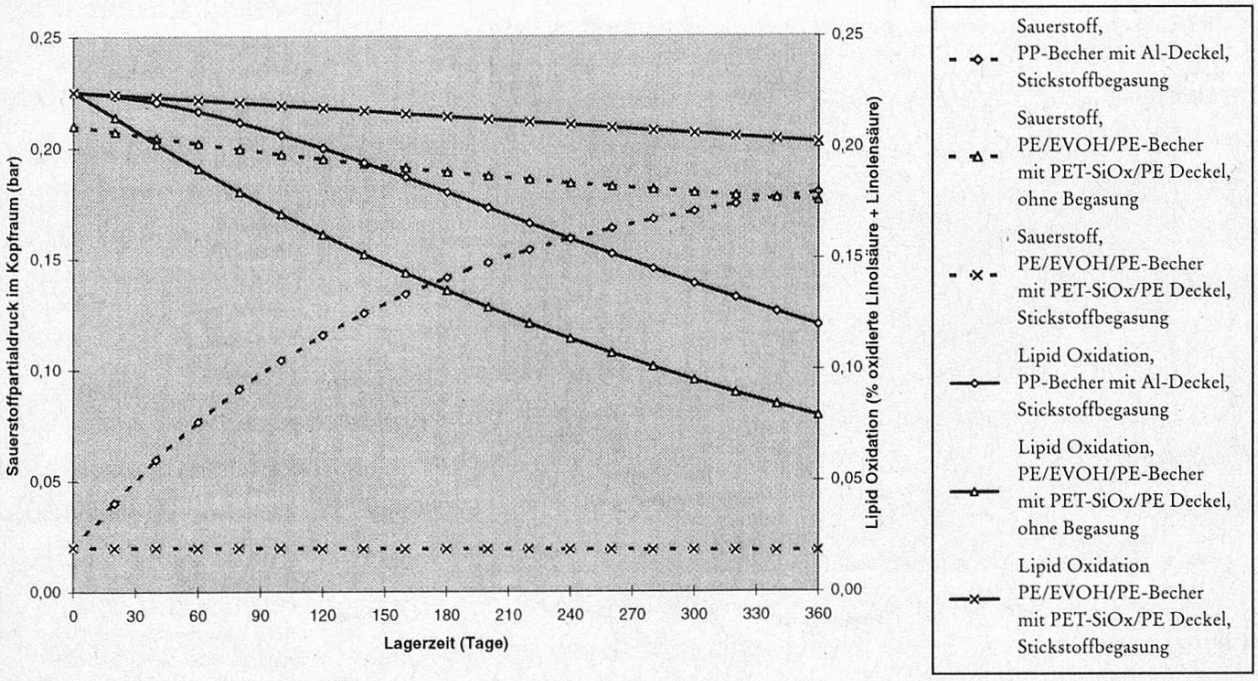

Abbildung 3 **Veränderungen von Kartoffelflocken während der Lagerung in unterschiedlichem Verpackungsmaterial und ohne und mit Stickstoffbegasung; Simulation der Sauerstoffkonzentration im Headspace und der Oxidation von Linol- und Linolensäure in den Kartoffelflocken**

des Systems sehr gross ist. Erst die zusätzliche Stickstoffbegasung bringt die gewünschte Oxidationsstabilität.

Modul Emmentaler Käse: Partialdruck von Sauerstoff und Kohlendioxid

In Abbildung 4 sind die simulierten Werte für die Veränderung des Partialdruckes von Sauerstoff und Kohlendioxid in unterschiedlich verpacktem und begastem Emmentaler Käse dargestellt. Abbildung 5 zeigt die aus diesen Veränderungen zu erwartenden Änderungen des Gasvolumens in der jeweiligen Packung. Die Werte wurden für konstante Umgebungsbedingungen und für eine Lagerperiode von bis zu einem Monat berechnet.

Die Verpackung in einem PET/PE-Verbund führt aufgrund der schwachen Barrierewirkung und der grossen Partialdruckdifferenz zwischen Packung und Umgebung zu einer starken Abnahme des Gehalts an Kohlendioxid. Dies wiederum hat eine starke Verminderung des Gasvolumens und die unerwünschte Bildung eines Vakuums zur Folge, was die Packung äusserlich unansehnlich werden lässt. Durch die ungenügende Barriereeigenschaft steigt umgekehrt die Sauerstoffkonzentration an, womit die Gefahr der Verschimmelung des Käses zunimmt. Mit dem Einsatz eines Hochbarrierenmaterials können diese negativen Effekte weitgehend ausgeschlossen werden.

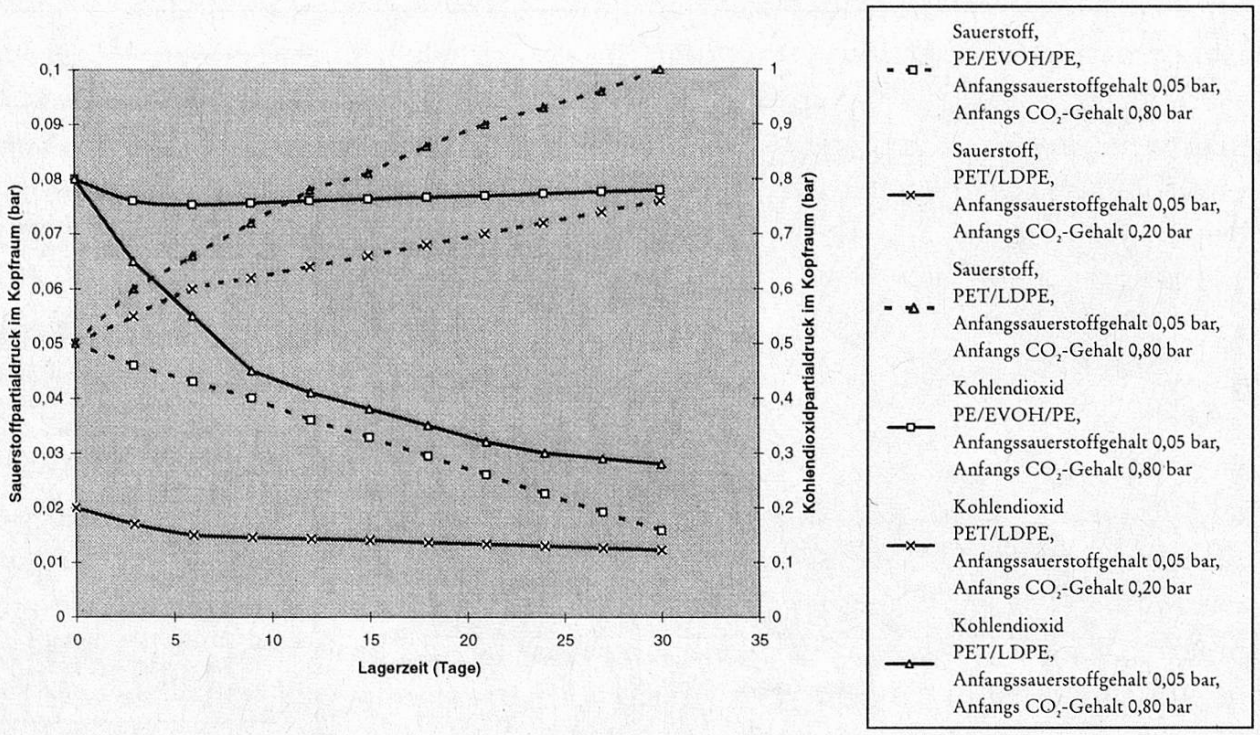

Abbildung 4 **Simulation des Einflusses des Verpackungsmaterials und der Begasung auf die Veränderung des Partialdruckes von Kohlendioxid und Sauerstoff in verpacktem Emmentaler Käse während der Lagerung**

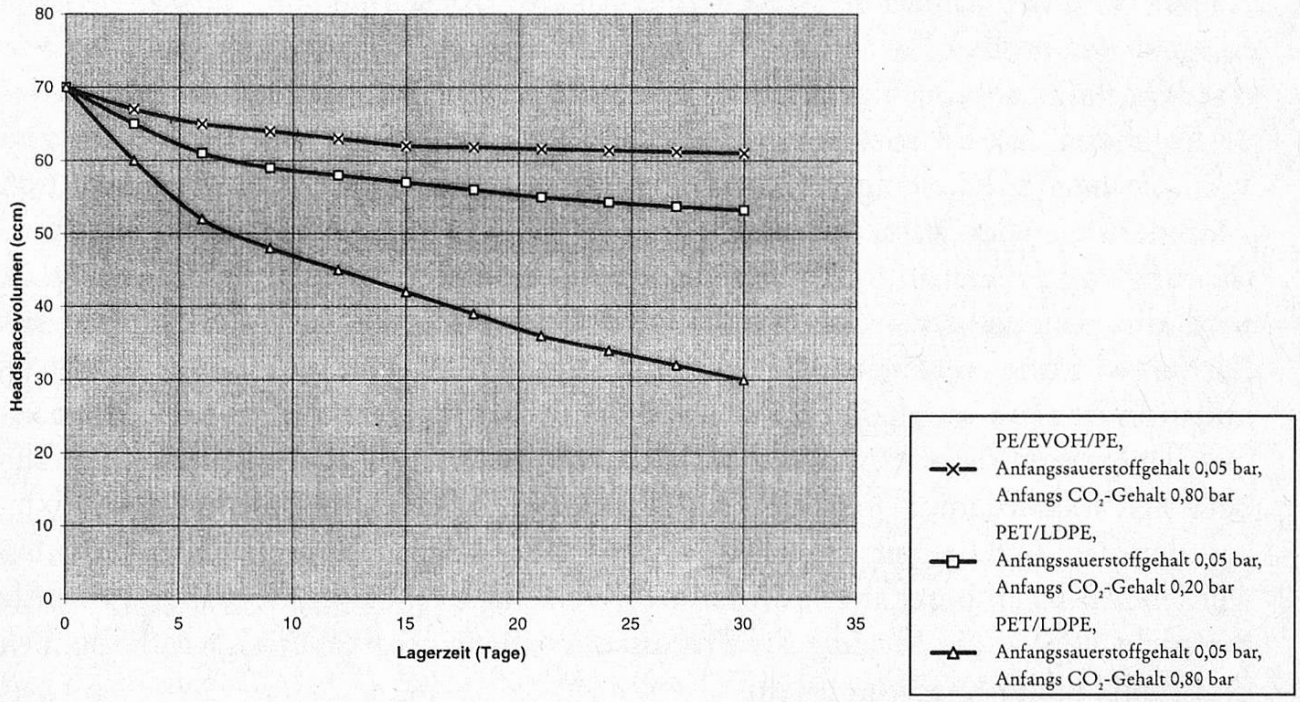

Abbildung 5 **Simulation des Einflusses des Verpackungsmaterials und der Begasung auf die Veränderung des Gasvolumens in verpacktem Emmentaler Käse während der Lagerung**

Schlussfolgerungen

Die diskutierten Beispiele zeigen, dass mit der vorgeschlagenen Computersimulation Fragen der Verpackungswahl und der Lagerstabilität verschiedenster Lebensmittel systematisch analysiert werden können. Eine gewisse Einschränkung ergibt sich dadurch, dass für viele qualitätsvermindernde Reaktionen noch wenig experimentelle kinetische Daten zur Verfügung stehen. Deshalb waren für die Modellierung experimentell nicht erhärtete Annahmen zu treffen. Dennoch lassen sich relative Werte der Lagerstabilität ableiten, welche sich für Vergleiche verschiedener Produkte und für Abschätzungen der notwendigen Verpackungsqualität eignen. Im allgemeinen stimmen die Berechnungen recht gut mit den Beobachtungen aus bisher durchgeführten Labortests überein. Eine weitergehende Verfeinerung der Berechnungen ist für komplexe und damit schwer erfassbare Systeme wie Lebensmittel wenig sinnvoll.

Aus ähnlichen Überlegungen wurde anfänglich auf die Modellierung des Lichteinflusses verzichtet. Gegenwärtig werden nun zur Erweiterung des Programmes Untersuchungen zu den Daten über den Einfluss von Licht und UV-Strahlung durchgeführt, die für die Modellierung notwendig sind.

Gesamthaft kann die Methode der haltbarkeitsorientierten Auslegung von Lebensmittel- und Verpackungstechnologie eine interessante Unterstützung der experimentellen Optimierung der Haltbarkeit von Lebensmitteln bieten.

Zusammenfassung

Bei der Haltbarmachung von Lebensmitteln übernimmt die Verpackung die Aufgabe, die Produkte während der Lagerung über eine vorgegebene Zeitdauer vor einer Qualitätseinbusse zu schützen, welche das tolerierbare Mass übersteigt. In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur Optimierung der Auslegung von Verpackungen für diejenigen Fälle vorgeschlagen, in welchen die Haltbarkeit durch Veränderungen des Wassergehalts (Wasseraufnahme bzw. -abgabe) oder durch Einwirkung von Sauerstoff und damit ausgelöste Oxidationen beschränkt wird. Dazu wird die Kinetik der feuchtigkeits- und sauerstoffbedingten Veränderung zur Barrierewirkung von Packstoffen gegenübergestellt. Mit computerunterstützter Simulation ist es so möglich, für vorgegebene Packstoffeigenschaften und für maximal akzeptierte Veränderungen die Haltbarkeit zu ermitteln. Umgekehrt kann die zulässige Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit für eine bestimmte Haltbarkeit definiert und die entsprechende Auswahl des Verpackungsmaterials getroffen werden. Es liegen Berechnungsmodule für verschiedene Produktegruppen vor. Als Beispiele werden die Module für Erdnüsse, Frühstückscerealien, Kartoffelflocken und Emmentaler Käse vorgestellt.

Résumé

L'emballage a pour but de permettre la conservation de l'aliment, le produit devant être protégé d'une détérioration de la qualité, jusqu'à une certaine limite, pendant une période définie de stockage. Ce travail présente une méthode pour optimiser l'emballage dans les cas où la durée de vie du produit est limitée par des changements de la teneur en humidité (perte ou gain en eau) ou par l'effet de l'oxygène et des réactions oxydatives. Les données cinétiques de changements causées par l'humidité et l'oxygène sont combinées avec les données des propriétés barrières du matériel d'emballage. La simulation assistée par ordinateur permet de prédire la durée de vie du produit pour un emballage en particulier et pour un niveau de changement de qualité toléré. Egalement, les limites de la perméabilité en vapeur d'eau et en oxygène peuvent être définies et permettre de sélectionner le matériel d'emballage. Des modules sont disponibles pour la simulation de la durée de vie de divers groupes de produits. Les modules sont présentés pour les cacahuètes, les céréales de petit déjeuné, les flocons de pommes de terres et le fromage Emmental.

Summary «Application of Computer Simulation to Shelf Life Designed Food Packaging»

Packaging in combination with food preservation must aim at protecting a food product from quality deterioration below an acceptable limit for a defined period of time. This paper presents a method to optimize packaging design for those cases in which shelf-life is limited due to changes in moisture content (loss or uptake of water) or due to impact of oxygen and oxidative reactions. The kinetic data of changes caused by moisture and oxygen are combined with data on barrier properties of pa-

ckaging material. Computer aided simulation enables the prediction of shelf-life for a particular packaging material and for a tolerable level of quality changes. Equally, limits of water vapor and oxygen permeability may be defined and the suitable packaging material selected. Modules for shelf-life simulation for various groups of products are available. The modules for peanuts, breakfast cereals, potato flakes and Emmental cheese are presented.

Key words

Shelf life, Packaging, Barrier properties, Modeling, Optimization

Literatur

1 *Labuza, T.P.:* Shelf-life dating of foods. Food and Nutrition Press, Inc., Westport, CT 1982.

2 *Charalambous, G.:* Handbook of food and beverage stability. Elsevier Applied Science Publ., Amsterdam 1986.

3 *Okos, M.R. (Ed.):* Physical and chemical properties of food. American Association Agricultural Engineers, St. Joseph, MI 1986.

4 *Labuza, T.P.* and *Taoukis, P.S.:* The relationship between processing and shelf-life. In: Birch, G.G., Campbell-Platt, G. and Lindley, M.G. (Eds.): Food for the 90's, pp. 73–106. Elsevier Applied Science Ltd., London 1990.

5 *Robertson, G.L.:* Food packaging, principles and practice. Marcel Dekker, Inc., New York, NY 1993.

6 *Heiss, R.* und *Eichner, K.:* Haltbarmachung von Lebensmitteln, 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin 1990.

7 *Heiss, R.:* Verpackung von Lebensmitteln. Springer Verlag, Berlin 1980.

8 *Man, C.M.D.* and *Jones, A.A. (Eds.):* Shelf life evaluation of foods. Blackie Academic and Professional, London 1994.

9 *Schrader, U., Becker, K.* und *Heiss, R.L.:* Der Einfluss von Diffusion und Löslichkeit auf die Reaktion von Sauerstoff mit kompakten Lebensmitteln. Verpack. Rundsch., Techn.-wiss. Beilage **31** (6), 33–40 (1980).

10 *Labuza, T.P.:* Kinetics of lipid oxidation in foods. CRC Crit. Rev. Food Technol. **2,** 355–405 (1971).

11 *Warner, K., Evans, C.D., List, G.R., Boundy, B.K.* and *Kwolek, W.F.:* Pentane formation and rancidity in vegetable oils and in potato chips. J. Food Sci. **39,** 761–765 (1974).

12 *Quast, D.G.* and *Karel, M.:* Effects of environmental factors on the oxidation of potato chips. J. Food Sci. **37,** 584–588 (1972).

13 *Güntensperger, B.:* Oxidationsstabilität von hitzesterilisierten Fleischprodukten in Flachschalen. Dissertation Nr. 10934, ETH Zürich 1994.

14 *Güntensperger, B.* and *Escher, F.E.:* Oxidative changes of heat-sterilized meat in trays. J. Food Sci. **59,** 22–32 (1994).

15 *Sadler, G.D.:* A mathematical prediction and experimental confirmation of food quality loss for products stored in oxygen permeable polymers. Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN 1984.

16 *Lin, H.S.* and *Agalloco, J.:* Degradation kinetics of ascorbic acid. Process Biochem. **14** (9), 22–32 (1979).

17 *Kennedy, J.F., Rivera, Z.S., Lloyd, L.L., Warner, F.P.* and *Jumel, K.:* L-ascorbic acid stability in aseptically processed orange juice in Tetra Brik cartons and the effect of oxygen. Food Chem. **45,** 327–331 (1992).

18 *Lee, Y.C., Kirk, J.R., Bedford, C.L.* and *Heldman, D.R.:* Kinetics and computer simulation of ascorbic acid stability of tomato juice as functions of temperature, pH and metal catalyst. J. Food Sci. **42,** 640–644, 648 (1977).
19 *Kacem, B., Matthews, R.F., Crandall, P.G.* and *Cornell, J.A.:* Nonenzymatic browning in aseptically packaged orange juice and orange drinks. J. Food Sci. **52,** 1665–1667, 1672 (1987).
20 *Brody, A.L. (Ed.):* Controlled/modified atmosphere/vacuum packaging of foods. Food and Nutrition Press, Inc., Trumbull, CT 1989.
21 *Morales-Castro, J., Rao, M.A., Hotchkiss, J.H.* and *Downing, D.L.:* Modified atmosphere packaging of head lettuce. J. Food Process. Preserv. **18,** 295–304 (1994).
22 *Pfeiffer, Ch., D'Aujourd'hui, M., Walter, J., Nuessli, J.* and *Escher, F.:* Shelf-life designed packaging of foods with computer aided simulation. Lebensm.-Technol. **28,** 370–380 (1995).
23 *Pfeiffer, Ch., D'Aujourd'hui, M., Walter, J., Nuessli, J.* and *Escher, F.:* Optimizing food packaging and shelf life. Food Technol. **53** (6), 52–59 (1999).

Korrespondenzadresse: Prof. Dr. Felix Escher, Institut für Lebensmittelwissenschaft, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich