Gartenbauwissenschaft, 66 (5). S. 237–246, 2001, ISSN 0016–478X. © Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart

Nachlagerverhalten von Apfelfrüchten nach dem Aufbewahren unter extremen Gaskonzentrationen I. Ethylenbildung während der Nachlagerzeit

Postharvest Response of Apple Fruits after Storing in Extreme Gas Concentrations I. Ethylene Production During Post-Storage Period

J. Goliáš[1)], Kristina Warnstorff[2)], H. Böttcher [3)]
([1)]Institute of Postharvest Technology of Horticultural Products, University Brno, Lednice na Moravé, Czech Republic, [2)]Arbeitsgruppe Biometrie und Agrarinformatik und [3)]Institut für Ernährungswissenschaften der Landwirtschaftlichen Fakultät Halle)

Zusammenfassung

Äpfel der Sorte 'Golden Delicious' und 'Idared', die im Abstand von 7 Tagen im präklimakterischen, im beginnenden klimakterischen und im fortgeschrittenen klimakterischen Reifestadium gepflückt und 7,5 Monate bei 1 bzw. 4 °C mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Lageratmosphäre aufbewahrt wurden, sind auf ihr Ethylenbildungsvermögen nach der Entnahme aus dem Lager analysiert worden. Die Nachlagerdauer erstreckte sich über 192 bis 264 h. Die in Einzelfruchtanalyse ermittelten Meßwerte zeigten zunächst den Abschnitt eines steilen, s-förmigen Aufbaues und anschließend einen seneszenzbedingten Rückgang der Ethylenbildungsraten. Dieser Vorgang läßt sich gut durch eine Regressionsfunktion mit zwei Termen für diese beiden physiologischen Prozesse mit $\hat{y} = a / (1 + be^{ct}) - (c + dt)$ [t = Nachlagerdauer in h] beschreiben. Aus dieser Funktion können die zeitlichen Abschnitte des verzögerten Anlaufes der Ethylenbildung nach der Entnahme aus dem Lager $t_1 - t_o$, der stärksten Zunahme der Ethylenbildungsrate $t_2 - t_1$, der Wendepunkt im Funktionsverlauf t_w und der Zeitpunkt der maximalen Eythlenbildungsrate t_{max} sowie der Parameter d als Maß für den seneszenzbedingten Rückgang der Rate nach Überschreiten des Maximalwertes ($t_{max.}$) abgegrenzt werden. Unter dem Einfluß der untersuchten Lagerbedingungen und Pflückzeitpunkte kommt es zur zeitlichen Vorverlegung des Maximums der Ethylenbildungsrate, zur Veränderung der Höhe des jeweiligen Maximalwertes und des Ausmaßes des seneszenzbedingten Rückganges im Vergleich zur Kaltlagerung (0,03 % CO_2 + 21 % O_2). Zwischen den Bedingungen einer ULO-Lagerung und Kaltlagerugng mit normaler Gaszusammensetzung ergaben sich für die Sorte 'Golden Delicious' keine wesentlichen Veränderungen, bei 'Idared' dagegen eine deutliche Verfrühung des Maximalpunktes bei geringerer Aktivität (bis 33,2 %). Das Pflücken im präklimakterischen Reifezustand wirkte sich stärker differenzierend auf die Ethylenbildungsrate aus; der seneszenzbedingte Rückgang der Bildungsrate war beim 3. Pflückzeitpunkt am wenigsten von den Lagerbedingungen beeinflußt.

Summary

Apple fruit of the cultivars 'Golden Delicious' and 'Idared' picked at 7 day intervals at the preclimacteric, at the beginning climacteric and at the advanced climacteric ripening stage, were stored in different storage atmospheres for 7 1/2 months at 1 and 4 °C, respectively. After removal from the store, their ethylene production was analyzed. The post-storage period extended up to 191 to 262 hours. The results of single fruit analyses showed at first a period of a steeply sigmoid increasing ethylene production curve, followed by a senescence-caused drop of the production rate. This course can be described appropriately by a regression function with two terms for both physiological processes, reading $\hat{y} = a / (1 + b e^{c\,t}) - (c + d\,t)$ [t = shelf-life period in h]. On the basis of this function the periods of delayed ethylene production set-in after removal from the store ($t_1 - t_0$), of the intensive increase of the ethylene production rate ($t_2 - t_1$), of the inflection point of the curve t_w and the point of the maximal ethylene production rate t_{max} as well as the parameter d [unit for the senescence-caused drop of the rate after exceeding the maximal point y (t_{max})] can be defined. The chosen storage conditions and picking dates involved an earlier occurrance of the ethylene production peaks, altered the hight of the respective maximum values and the extent of the senescence-caused drop, compared to refrigerated storage conditions (0,03 % CO_2 and 21 % O_2). The cultivar 'Golden Delicious' showed no essential changes between the conditions of ULO-storage and the refrigerated storage atmosphere. 'Idared', however, exhibited a clearly earlier maximum point and lower activity (up to 33.2 %). Picking at the preclimacteric stage had more consequences for the ethylene production rate than the other stages. The senescence-caused drop of the ethylene production rate was least influenced by the storage conditions.

Einleitung

Eine hohe und stabile Fruchtqualität ist für einen sicheren Absatz von Äpfeln auf dem Markt Voraussetzung.

Deshalb muß neben der Temperaturregelung auch die Gaszusammensetzung der Lageratmosphäre während der langfristigen Lagerung produktgerecht angepaßt werden. Zunächst wurde das Verfahren der konventionellen (zweiseitig gesteuerten) CA-Lagerung (engl.: controlled atmosphere) mit z.B. 3% CO_2 + 3% O_2 eingesetzt. Eine weitere Senkung des Sauerstoffpartialdruckes auf < 2% O_2 ist in Form der ULO-Lagerung (engl.: ultra low oxygen) vor zwei Jahrzehnten schrittweise in die Praxis eingeführt worden. Die starke Verringerung des Sauerstoffpartialdruckes in der Lageratmosphäre führte zu einem besseren Erhalt der Fruchtfleischfestigkeit (LIDSTER 1982, SMITH 1984), der grünen Grundfarbe der Apfelschale (SHARPLES 1982, SCHOUTEN 1988) und des Säuregehaltes (ANDERSON 1967, BOHLING und HANSEN 1985). Eine Erhöhung des CO_2-Gehaltes in der Atmosphäre auf z.B. 3% CO_2 + 1% O_2 hat die ablaufenden Stoffwechselprozesse in den Früchten weiter eingeschränkt (BRACKMANN et al. 1994). Dabei ist es aber notwendig, sortenabhängig die verträglichen Grenzkonzentrationen für O_2 und CO_2 zu beachten. Damit kommt man sehr schnell in einen Grenzbereich, der für den Ablauf der einzelnen Stoffwechselvorgänge, für die Erhaltung der Fruchtqualität und für das Auftreten von Stoffwechselschäden kritisch sein kann, zumal man die jahresbedingte unterschiedliche Empfindlichkeit der geernteten Sorten und Partien im voraus noch nicht kennt.

Ein wichtiger Prozeß bei der Reifung klimakterischer Früchte ist die Bildung von Ethylen. Es wird aus der Aminosäure Methionin über die Zwischenstufen S-Adenosylmethionin und 1-Aminocyclopropan-1-Carbonsäure (ACC) gebildet, wobei die Aktivität der ACC-Synthase und ACC-Oxidase eine entscheidende Rolle spielen. Höhere CO_2- und niedrigere O_2-Konzentrationen, wie sie bei der modernen ULO-Lagerung eingesetzt werden, hemmen durch verschiedene Wirkungsweise auch die Ethylenbildung während des langfristigen Lagerns sehr deutlich. Diese kann sich nach der Entnahme aus dem Lager dann aber sehr schnell und intensiv entfalten (YOUNES 1988). Dabei ist zu berücksichtigen, daß bereits zum Erntetermin innerhalb der Früchte eines Baumes beträchtliche Unterschiede hinsichtlich des Ethylengehaltes im Kernhaus (Sorte 'Golden Delicious') bestehen können, die in Einzelfrüchten einen bis zu 150-fach erhöhten Gehalt an Ethylen gegenüber der Mehrzahl anderer Früchte aufweisen können (SCHIMPF 1992, SCHIMPF et al. 1995). Diese abweichenden Werte sind "zufällig" auf Früchte aller Reifegruppen verteilt. Eine Einzelfruchtbestimmung gibt die Gewähr einer zuverlässigen Bestimmung der abgegebenen Ethylenrate.

Die Entwicklung der Ethylenbildung nach der Auslagerung ist zwar wiederholt untersucht worden (YOUNES 1988, LEVIN et al. 1993, GOLIÁŠ und BATAILLE 1994, BRACKMANN et al. 1995, JOBLING und MCGLASSON 1995), jedoch noch nicht hinsichtlich ihres typischen Verlaufes analysiert und belegt worden. Auch wichtige Einflußfaktoren (Nachlagerdauer, Pflückzeitpunkt u.a.) wurden nicht berücksichtigt.

Ziel der Untersuchungen war es, die Gesetzmäßigkeiten des Verlaufes der Ethylenbildung von langzeitgelagerten Apfelfrüchten zweier unterschiedlich reagierender Sorten durch geeignete Regressionsmodelle unter Einbeziehung des Pflückzeitpunktes und unterschiedlicher Gaszusammensetzung während der Langzeitlagerung zu beschreiben. Dabei sollten auch extreme Grenzkonzentrationen (8% CO_2 und ~1,0% O_2) berücksichtigt werden, um gegebenenfalls Ansätze für die Schädigung des Stoffwechsels der Fruchtgewebe durch die extremen Gaskonzentrationen zu erkennen.

Material und Methoden

Die Untersuchungen erfolgten an Äpfeln aus dem mitteldeutschen Anbau (Raum Halle/Saale):

Sorten:	'Golden Delicious'	/ 'Idared'
Unterlage:	M 9	/ MM106
Baumalter:	14. Standjahr	/ 14. Standjahr
Anbauort:	Nauendorf/Ortsteil Wallwitz, 20 km nördlich von Halle.	

Die Äpfel sind an drei verschiedenen Terminen im Abstand von 7 Tagen geerntet worden (1. Erntetermin: 'Golden Delicious' 24.09.96; 'Idared' 30.09.96). Dabei lag der erste Termin stets im präklimakterischen Bereich (E 1), eine Woche vor dem optimalen Termin; der zweite entsprach nahezu dem optimalen Erntezeitpunkt zu Beginn des klimakterischen Bereiches (E 2) und der dritte war bereits im klimakterischen, leicht fortgeschrittenen Reifestadium (E 3) gelegen.

Die Äpfel wurden innerhalb von 18 h nach dem Pflücken in getrennten Lagerbehältern (Fassungsvermögen je 210 l) mit folgender Zusammensetzung der Lageratmosphäre eingelagert:

Variante V 1:	~0% CO_2 + 1% O_2
Variante V 8:	0,03% CO_2 + 21% O_2 (Luft)
Variante V 10:	8% CO_2 + 1% O_2.

Die Lageratmosphäre wurde im permanenten Durchflußverfahren eingestellt und gehalten. Eine Ethylenanreicherung in der Lagerbox konnte daher nicht stattfinden.

Die Erzeugung der benötigten Gaskomponenten O_2 und N_2 erfolgte mit Hilfe eines Molekularsiebabsorbers auf der Basis von Zeolithen (Anlage ESO 3) nach SCHULZ et al. (1989). Der hohe CO_2-Gehalt für Variante 10 war durch ständige Zuspeisung von technisch gewonnenem CO_2-Gas gesichert. Der Luftdurchsatz in den Boxen lag bei 30 l h^{-1}.

Die Sorte 'Golden Delicious' wurde bei 1 °C, 'Idared' bei 4 °C jeweils 225 Tage lang aufbewahrt. Unmittelbar nach der Entnahme aus dem Lagerbehälter sind die zu untersuchenden Früchte kurzfristig einzeln in kleine Polyäthylenbeutel verpackt worden, um weitgehend eine Veränderung der Gaszusammensetzung zu vermeiden. Nach der Entnahme und ersten Messung reiften die Früchte in normaler Atmosphäre bei 20 °C ohne Ethyleneinfluß nach. Die von den einzelnen Früchten abgegebenen Ethylenmengen sollten so bestimmt werden, daß die Früchte unverletzt blieben und zu 6 zeitlich gestaffelten Terminen während der Nachlagerzeit im Verlauf von folgenden Zeiträumen untersucht werden können: 1. Erntetermin bis 264 h, 2. Erntetermin bis 240 h und 3. Erntetermin bis 192 h nach der Entnahme aus dem Lager.

Um die von Frucht zu Frucht unterschiedlichen Ethylenentwicklungsabläufe genauer erfassen zu können, wurde eine von GOLIÁŠ und BÖTTCHER (2000) entwickelte Methode verwendet. Unter Nutzung einer

speziellen Anreicherungstechnik nach dem Gleichgewichtsprinzip (spezielle Anreicherungskolonne mit Carbosieve ™ G) wurde die Ethylenbildungsrate an den gleichen Früchten zu verschiedenen Zeitpunkten mit einem Gaschromatographen (Fa. Varian GmbH, Darmstadt, Deutschland: Typ „Varian 3400“) bestimmt, ohne daß die Früchte geschädigt wurden. Die einzelnen Früchte sind während der Meßdauer in kugelförmige Respirationskammern mit einem Hohlraumvolumen von 500 ml eingelegt worden. Von jeder Variante sind 5 Einzelfrüchte zufällig aus der Auslagermenge für die Messungen entnommen worden. Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen konnte diese Anzahl (n = 5) nicht erhöht werden. Die Meßergebnisse aller Früchte konnten für die Auswertung herangezogen werden.

Die Bildungsrate an Ethylen (C_2H_4) wurde in $\mu l\,kg^{-1}\,h^{-1}$ für jede Einzelfrucht berechnet.

Die statistische Auswertung zur Beurteilung der Auswirkungen von Lagerverfahren und Ernteterminen erfolgte mittels zweifaktorieller Varianzanalyse (Faktoren: 3 Lagerverfahren, 3 Erntetermine) und der Quantifizierung des Verlaufes der Ethylenbildung in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer bei unterschiedlicher Zusammensetzung in der Lageratmosphäre durch nichtlineare Regressionsanalyse. Signifikante Differenzen von Mittelwerten sind mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von p = 0,05 angegeben.

Die Verteilung der Meßwerte, die von den Früchten nach der Entnahme aus den Lagerbehältnissen erhalten wurden, ließen nach einer kurzen Verzögerung einen steilen Anstieg der Ethylenbildung erkennen, die später in einen abnehmenden Verlauf überging. Somit scheinen sich zwei physiologische Reaktionen in den Früchten zu überschneiden. Aus diesem Grund war es erforderlich, zur sachgerechten Charakterisierung ein spezielles Regressionsmodell mit zwei Termen für die Schätzung des vorliegenden Verlaufes zu verwenden.

Ergebnisse

Ethylenbildung bei Ende der Langzeitlagerung

Die Ethylenuntersuchungen an den Früchten begannen bei Ende der Hauptlagerung von 7 1/2 Monaten. Die Sorte ‘Golden Delicious’ zeigte im Mittel der Ernteterminе bei normalen Kaltlagerbedingungen (V 8) erwartungsgemäß eine sehr viel höhere Ethylenbildungsrate von 17,0 $\mu l\,kg^{-1}\,h^{-1}$ als ‘Idared’ mit 1,9 $\mu l\,kg^{-1}\,h^{-1}$ (Tab. 1). Zu diesem Zeitpunkt konnte bei beiden Sorten keine Wechselwirkung Lagerverfahren x Erntetermine nachgewiesen werden. Dies belegt, daß das Verhalten der beiden Sorten mit 3 verschiedenen Ernteterminen unter den Lagerbedingungen gleichartig war. Dagegen unterschieden sich alle drei gewählten Lagerverfahren signifikant voneinander. Bei den Ernteterminen war nur der 3. Erntetermin von den ersten beiden verschieden (Tab. 1).

Unter den Bedingungen einer *normalen Luftzusammensetzung* (V 8: 0,03% CO_2 + 21% O_2) konnte für die Sorte ‘Golden Delicious’ im Mittel der Erntetermine die höchste Ethylenbildungsrate ermittelt werden, mit fortschreitender physiologischer Entwicklung der Früchte, ausgedrückt durch die gewählten Erntetermine, ist ein leichtes Ansteigen der Ethylenbildung zu beobachten (Tab. 1). Dies Verhalten trifft auch für die Sorte ‘Idared’ zu, nur liegt die Bildungsrate hier im Mittel um 85 bis 90% niedriger. Früchte nach *ULO-Lagerung* (V 1: 0% CO_2+ 1% O_2) ließen bei ‘Golden Delicious’ eine deutliche Hemmung der Ethylenbildung erkennen, die bei präklimakterischem Erntetermin 49%, im fortgeschrittenen Stadium aber nur 23% erreichte. (Tab. 1). ULO-Bedingungen (V 1) bewirkten allerdings bei der Sorte ‘Idared’ bei jedem Erntetermin eine unerwartete Erhöhung der Ethylenbildung gegenüber V 8 um 0,2 bis 0,9 $\mu l\,g^{-1}\,h^{-1}$ (Tab. 1).

Extrem *hohe CO_2–Konzentrationen* von 8% in Verbindung mit ULO (V 10) bewirkten bei beiden Sorten eine beträchtliche Verringerung der Ethylenbildung. Bei ‘Idared’ betrug sie im Mittel 90% im Vergleich zur Kaltlagerung in normaler Luft (V 8), wobei praktisch kein Einfluß der physiologischen Fruchtreife bestand. ‘Golden Delicious’-Äpfel von V 10 zeigten ebenfalls eine deutlicher Hemmung gegenüber Kaltlager-Äpfeln. Bei sehr zeitig und optimal gepflückten Früchten (E 1 und 2) betrug der Rückgang 61 bis 65%, für verspätet geerntete ist ein solcher von nur 47% bestimmt worden (Tab. 1).

Die niedrigsten zu diesem Zeitpunkt ermittelten Raten für die Ethylenbildung sind für beide Sorten jeweils bei den optimal zu Beginn des Klimakteriums geernteten Früchten und bei Anwendung von 8% CO_2 und 1,0% O_2 in der Lageratmosphäre bestimmt worden (‘Golden Delicious’ 5,6, ‘Idared’ 0,1 $\mu l\,kg^{-1}\,h^{-1}$) (Tab. 1).

Ethylenbildung während der Nachlagerzeit

Zeitlicher Verlauf der Ethylenbildung

Die Meßwerte der Ethylenbildungsrate zeigten im Verlauf der Nachlagerung ein unterschiedliches Bild. Zunächst stiegen sie, sowohl für die Einzelfrüchte als auch für den Mittelwert aus fünf Früchten s-förmig steil an und fielen dann nach einen Maximum wieder unterschiedlich ab. Beim ersten Abschnitt handelt es sich um den schnellen Aufbau der unter den langzeitigen Lagerbedingungen durch die Temperatur und Gaszusammensetzung unterdrückten Ethylenbildung im Rahmen des normalen biologischen Reifeprozesses. Mit Erreichen des Maximalwertes beginnt ein Rückgang, der auf die einsetzende Seneszenz bei diesem Bildungsprozeß zurückzuführen ist. Zur Charakterisierung des gesamten Verlaufes wurde ein Regressionsmodell verwendet, dessen erster Term sich aus der biologischen Wachstumsfunktion ableitet und durch eine s-förmig ansteigende logistische Funktion beschrieben wird. Der zweite Term trägt dem seneszenzbedingten Rückgang der Bildung von Ethylen im zweiten Teil der Nachlagerung Rechnung, so daß sich folgende Regressionsfunktion für fast alle Varianten als geeignet erwies:

$$\hat{y} = \frac{a}{1 + b \cdot e^{c\,t}} - (c + d \cdot t) \quad (1)$$

$\hat{y}$: Ethylenbildungsrate [$\mu l\,kg^{-1}\,h^{-1}$]
t: Nachlagerdauer [h].

Als repräsentatives Beispiel ist der Verlauf der Ethylenbildungsrate für Früchte der Sorte ‘Golden Delicious’, 2. Erntetermin und Kaltlagerung (V 8) in Abb. 1 im Detail aufgezeichnet. In ihr sind neben dem Verlauf der geschätzten Funktion aller untersuchten Früchte auch die von Früchten mit intensiver und weniger intensiver

Tab.1. Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten zum Auslagerzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Lagerung unter verschiedenen Lagerbedingungen in Abhängigkeit von Erntetermin und Lagerverfahren
Ethylene production rate of apple fruit of different picking dates and of a 7 1/2 months storage period at different storage conditions

Lagerverfahren	Erntetermin			
	E 1	E 2	E 3	$\bar{x}$
	Präklimakterium	Beginn Klimakterium	Fortgeschrittenes Klimakterium	
	mittlere Ethylenbildungsrate µl kg^{-1} h^{-1}			
'Golden Delicious'				
V 1 (0 % CO_2 + 1,0 % O_2)	7,9	10,2	15,1	11,1^b
V 8 (0,03 CO_2 % + 21,0 % O_2)	15,5	16,1	19,5	17,0^a
V 10 (8 % CO_2 + 1,0 % O_2)	6,0	5,6	10,3	7,2^c
$\bar{x}$	9,8^a	10,6^a	15,0^b	
'Idared'				
V 1 (0 % CO_2 + 1,0 % O_2)	2,2	2,2	3,1	2,5^a
V 8 (0,03% CO_2 + 21,0 % O_2)	1,5	1,3	2,9	1,9^b
V 10 (8 % CO_2 + 1,0 % O_2)	0,3	0,1	0,2	0,2^c
$\bar{x}$	1,3^a	1,2^a	2,1^b	

Ethylenbildung eingetragen. In der Abb. werden auch weitere charakteristische Kennwerte, die sich aus den mathematischen Ableitungen ergeben, dargestellt (Tab. 2).

Das typische Verhalten aller untersuchten Varianten im Mittel der fünf Früchte ist in den Abb. 2 bis 7 aufgezeichnet. Das Bestimmtheitsmaß für die einzelnen Schätzfunktionen, das über 60 % lag, oft auch 85–90 % erreichte (Tab. 2), belegt die gute Eignung dieses Modells. Lediglich bei der Sorte 'Idared', Kaltlagerung (V 8), trat kein Abfall der Ethylenbildungsrate ein und der zweite Term der Funktion entfällt. Dies trifft für alle 3 Erntetermine zu.

Die Parameter der in Abb. 2 bis 7 dargestellten Funktionen sind in Tabelle 2 eingetragen. Sie enthält zugleich auch die typischen Verlaufscharakteristiken, die physiologisch – bezogen auf die Frucht – zu interpretieren sind. Ihre Berechnung erfolgte mit Hilfe der Software SAS nach den in WARNSTORFF und DÖRFEL (1999) angegebenen Formeln und bei gleichzeitiger Weiterentwicklung für die Funktionsgleichung (1). Zusätzlich zu den angegebenen relevanten Parametern in Tab. 3 bei WARNSTORFF und DÖRFEL (1999) wurde der Zeitpunkt der maximalen Ethylenbildung zusätzlich unter Berücksichtigung des 2. Terms geschätzt. Geht man bei den Überlegungen von der Dauer der Nachlagerung in Stunden (h) aus, dann sind folgende fachlich relevante Punkte aus den Funktionsparametern a, b, c und d zu berechnen (Tab. 2):

t = 0: Startpunkt für den Nachlagerzeitraum, im vorliegenden Fall für die Messung der Ethylenbildungsrate (t = 0) bei Ende der Langzeitlagerung,

t_1: Zeitpunkt des Überganges von einer geringeren Bildungsrate von Ethylen in den Bereich der stärksten Zunahme der Ethylenbildungsrate in Stunden [h],

t_w: Wendepunkt: Zeitpunkt der maximalen Zunahme der Ethylenbildungsrate,

t_2: Zeitpunkt des Überganges von einem nahezu linearen Anstieg der Ethylenbildungsrate in den Bereich einer sich verringernden Ethylenabgabe je Stunde [h],

t_2–t_1: Bereich der stärksten Zunahme der Ethylenbildung je Stunde [h],

$t_{max.}$: Zeitpunkt der maximalen Ethylenabgabe je Stunde (t_{max})

$t_{max.}$–$t_{1:}$ Hauptzeitraum des Aufbaues der Ethylenbildung je Stunde [h] nach der Entnahme aus einem Lager

d : Maßzahl für den alterungsbedingten Rückgang der Ethylenbildung in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer [µl kg^{-1} h^{-1}].

Da für 'Idared' der Lagervariante V 8 der Verlauf nur der logistischen Funktion entspricht, d.h. keine seneszenzbedingte Abnahme durch einen zweiten Term in der Regressionsfunktion belegt werden kann, liegt eine asymptotische Annäherung der Ethylenbildung je Stunde an den Parameter a vor. Die maximale Bildungsrate wurde in diesem Fall bei $t_{99\,\%}$ (Zeitpunkt, an dem 99 % des asymptotischen Wertes erreicht werden – Tab. 2) ermittelt.

Die geschätzten Funktionen für 'Golden Delicious' und 'Idared' (3. Erntezeitpunkt) haben allerdings für die Lagerverfahren V1 und V 10 im Bereich von der 5. bis zur 35.Stunde wegen fehlender Meßwerte nur eine begrenzte Aussagefähigkeit (Abb. 4 und 7).

Einfluß der Sorte

Nach der Entnahme aus dem Kaltlager mit normaler Luftzusammensetzung (V 8) setzte bei den Früchten der Sorte 'Golden Delicious', die zu Beginn des klimakterischen Reifestadiums gepflückt worden waren, eine

Tab. 2. Statistische Maßzahlen und relevante Größen der geschätzten Funktionen für den Verlauf der Ethylenbildungsrate in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer
Statistical parameters and relevant figures of the estimated functions for the course of the ethylen production rate on dependence of the shelf-life period

Erntezeitpunkt	Lagerverfahren	Parameter a	b	c	d	Bestimmtheitsmaß B %	Reststandardabweichung s_R	Maximalwert t_{max} (h)	$y(t_{max})$ (µl)	t_1	t_W	t_2
'Golden Delicious'												
E 1	V 1	175,14	13,337	-0,0702	0,2795	80,7	23,98	90,1	145,9	18,1	36,9	55,7
	V 8	161,90	11,992	-0,0548	0,1682	91,2	15,56	117,0	139,2	21,3	45,3	69,4
	V 10	98,87	112,922	-0,1075	0,01484	84,6	17,50	105,1	97,3	31,7	44,0	56,2
E 2	V 1	162,22	8,917	-0,0628	0,22771	85,1	19,08	94,6	137,0	13,9	34,8	55,8
	V 8	180,97	16,262	-0,0883	0,25592	76,7	29,27	78,0	158,1	16,7	31,6	46,5
	V 10	130,20	323,137	-0,2085	0,15116	85,2	18,52	52,6	121,7	21,4	27,7	34,0
E 3	V 1	190,32	11,411	-0,08523	0,57191	59,9	33,50	66,9	145,2	13,1	28,6	44,0
	V 8	159,86	7,222	-0,09887	0,33715	61,2	30,26	58,5	136,8	6,7	20,0	33,3
	V 10	165,75	15,319	-0,15292	0,34289	70,7	28,46	45,8	147,9	9,2	17,8	26,4
'Idared'												
E 1	V 1	49,47	16,381	-0,0824	0,02710	81,7	8,17	94,7	46,7	17,9	33,9	50,0
	V 10	56,07	33,680	-0,0842	0,06360	87,2	7,30	92,6	49,5	26,1	41,8	57,4
E 2	V 1	56,12	1,8E+08	-0,7692	0,02172	88,8	7,52	34,6	56,1	23,0	24,8	26,5
	V 10	63,59	205270,1	-0,4724	0,11071	88,1	7,91	37,7	59,7	23,1	25,9	28,7
E 3	V 1	67,23	31,668	-1,0401	0,13462	72,1	11,76	9,3	66,9	2,06	3,32	4,59
	V 10	78,21	3754,97	-0,4146	0,15630	74,4	13,45	32,7	73,1	16,7	19,8	23,0
logistische Funktion								$t_{99\%}$	y_{max}			
E 1	V 8	69,89	33,40	-0,0422		81,5	14,15	192,2	69,9	52,0	83,2	114,4
E 2	V 8	70,50	12,68	-0,0423		72,2	17,07	168,5	70,5	28,9	60,0	91,1
E 3	V 8	76,45	20,35	-0,0830		74,3	15,67	91,7	76,4	20,4	36,3	52,2

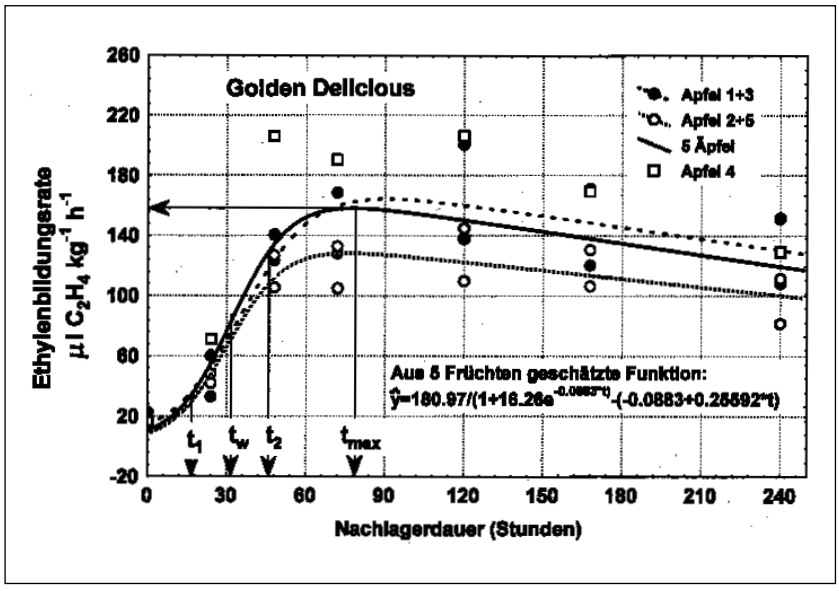


Abb. 1: Verlauf der Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten 'Golden Delicious' 2. Pflückzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Kaltlagerung (V 8) in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer (h) bei Raumtemperatur mit Kennzeichnung der physiologischen Zeitabschnitte der Bildung von Ethylen
Course of the ethylene production rate for apple fruit 'Golden Delicious' 2. picking date after 7 1/2 months of refrigerated storage (V 8) in dependence on shelf-life period (h) at room temperature with marking of the physiological periods of production

sehr intensive Ethylenbildung ein, denn der Beginn der stärksten Zunahme der Ethylenbildungsrate zum Zeitpunkt (t_1) wurde bereits nach 16,7 h, der Punkt der größten Zunahme (t_W) nach 31,6 h und das Maximum der Bildung war nach 78,0 h mit einer Menge von 158,1 µl g^{-1} h^{-1} erreicht (Abb. 1, 3, Tab. 2). Der Hauptschub der Ethylenbildung je Stunde trat bei dieser Sorte in einem Zeitraum von 61,3 h ein ($t_{max.}$ - t_1). Für die Sorte 'Idared' war die Ethylenfreisetzung sehr viel geringer und von längerer Dauer, denn der Übergang von einer verzögerten zu einer stärker ansteigenden Freisetzung trat erst nach 28,9 h, der der größten Zunahme nach 60,0 h und der Maximalwert nach 168,5 h mit einer Rate von nur 70,5 µl kg^{-1} h^{-1} ein (Abb. 6, Tab. 2). Der Hauptaufbau der Ethylenbildung erstreckte sich sortentypisch über 139,6 h.

Unter diesen Ernte- und Lagerbedingungen war innerhalb des Untersuchungszeitraumes bei 'Idared' kein seneszenzbedingter Rückgang zu beobachten, dagegen bei 'Golden Delicious' ein solcher von 0,256 µl kg^{-1} h^{-1} je Stunde Nachlagerdauer (Parameter d) (Tab. 1, Abb. 1, 3). Während die Bestimmtheitsmaße für die Schätzfunktionen für die Sorten 'Golden Delicious' und 'Idared' mit B = 76.7 % und B = 72,2 % nahezu gleich waren, ist dagegen die Reststandardabweichung s_R % für 'Golden Delicious' mit 26,64 wesentlich niedriger als für 'Idared' mit 41,2.

Einfluß des Erntetermines

Die gewählte Abstufung des Erntetermines wirkte sich erwartungsgemäß sehr stark auf den Verlauf der Ethylenbildung aus. Betrachtet man die Früchte, die im Kaltlager mit normaler Luftzusammensetzung lagerten, dann bewirkte eine zeitlich gestaffelte Ernte vom präklimakterischen bis in den fortschreitenden klimakterischen Bereich, also im Zeitraum von 2 Wochen, eine Intensivierung der Ethylenbildung und damit des Reifevorganges. Bei 'Golden Delicious' verkürzte sich die Zeitspanne bis zum Übergang in eine stärkere Zunahme um 14,6 h, bis zum Punkt der maximalen Zunahme der Ethylenbildungsrate um 25,3 h und bis zum Maximalwert um 58,5 h (Abb. 1–4, Tab. 2). Für die Sorte 'Idared', die physiologisch durch einen weniger intensiven Reifevorgang gekennzeichnet ist, verkürzte sich diese relevante Zeitspanne noch viel stärker mit folgenden Werte: 31,6 h, 46,9 h und 100,5 h. Der Rückgang erfolgte in nahezu gleichen Stufen vom 1. bis zum 3. Erntetermin (Abb. 5–7, Tab. 2).

Andererseits führten die Reifezeitpunkte der Frucht nur zu geringer Differenzierung hinsichtlich der gebildeten Maximalmenge an Ethylen. Die gebildete Menge lag für 'Golden Delicious' im Mittel bei 145 µl kg^{-1} h^{-1} und für 'Idared' bei 72,2 µl kg^{-1} h^{-1}.

Der altersbedingte Rückgang nach Überschreiten des Maximalwertes war für Früchte der Sorte 'Golden Delicious' dagegen stärker differenziert. Je physiologisch reifer die Früchte zum Erntetermin waren, umso größer war die Rate der Abnahme der Ethylenbildung: 1. Erntetermin 0,168, 2. Erntetermin 0,256 und 3. Erntetermin 0,337 µl kg^{-1} h^{-1} je Stunde Nachlagerdauer (Tab. 2). Zieht man für die Sorte 'Idared' anstelle der Lagervariante V 8, die kein Maximum und damit einen altersbedingten Abfall noch nicht erkennen ließ, die Variante der ULO-Lagerung (V 1) heran, dann stellt sich besonders im fortgeschrittenen klimakterischen Bereich (E 3) ein sehr starkes Ansteigen des Parameters d ein: 1. Erntetermin d = 0,027, 2. Erntetermin d = 0,0217 und 3. Erntetermin d = 0,1346 µl kg^{-1} h^{-1} für jede Stunde Nachlagerung.

Der Zeitraum für die Ausbildung des fruchtspezifischen Ethylenbildungspotentials (Bereich $t_{max.}$–t_1) verkürzte sich mit fortschreitender Reife der gepflückten Früchte erheblich, für 'Golden Delicious' von 95,7 auf 51,8 h (1./3. Termin) und für 'Idared' von 140,2 auf 71,3 h (1./3. Termin) (Tab. 2).

Mit zunehmender Reife der Äpfel zum Erntezeitpunkt setzte auch eine starke individuelle Entwicklung derselben ein. So nahm das Bestimmtheitsmaß für die geschätzten Regressionsfunktionen sehr deutlich ab, für 'Golden Delicious' von B = 91,2 % (1. Ernte) auf B = 61,2 % (3. Ernte) bzw. 'Idared' von B = 81,5 % auf B = 74,3 %. Auch die Reststandardabweichung s_R% betrug für 'Golden Delicious' 17,1 (1. Ernte) und 29,85 (3. Termin). Für 'Idared' liegt sie zum 3. Erntetermin dagegen deutlich niedriger: 1. Erntetermin 36,74, 3. Erntetermin 24,92.

Einfluß des Lagerbedingungen

Apfelfrüchte, die für 7,5 Monate unter den *Bedingungen der ULO-Lagerung* (V 1: 0 % CO_2 + 1 % O_2) aufbewahrt wurden, zeigten bei der gut CA-lagergeeigneten Sorte 'Golden Delicious' im wesentlichen den gleichen Verlauf der Ethylenbildung wie solche aus einem Lager mit normaler Luftzusammensetzung (Abb. 2–4), lediglich die Ernte im präklimakterischen Stadium führte zu einem schnelleren Aufbau der Ethylenbildung, die abschnittweise über die einzelnen Parameter zu einem um 26,9 h früheren Erreichen des Maximalwertes beitrug. Die in der Zeiteinheit maximal gebildete Menge an Ethylen (t_{max}) unterschied sich zwischen den beiden Lagerverfahren V 1 und V 8 nur unwesentlich: Lagerverfahren V 1: $\hat{y}$ = 142,7, Lagerverfahren V 8: $\hat{y}$ = 144,7 µl kg^{-1} h^{-1}.

Der seneszenzbedingte Rückgang der Ethylenabgabe (Parameter d) nach Überschreiten des Maximalwertes war relativ gering, wich nur wenig von den in normaler Luftzusammensetzung gelagerten Früchten ab (E 1: +0,11 bzw. E 2: -0,028 µl kg^{-1} h^{-1} je Stunde Lagerdauer) (Tab. 2). Dagegen war beim 3. Erntermin ein stark beschleunigter Rückgang (V 1) mit 0,572 µl kg^{-1} h^{-1} je Lagerstunde bzw. (V 8) mit 0,337 µl kg^{-1} h^{-1} zu beobachten (Abb. 4, Tab. 2).

Die Sorte 'Idared' reagierte auf die Lagerbedingungen (V 1) mit einer Verfrühung der Ethylenbildung gegenüber V 8, so daß sich ein Maximalwert abzeichnete und ein anschließender Rückgang der freigesetzten Rate festgestellt werden konnte (Abb. 5–7, Tab. 2). Das sich aus dem Pflücktermin ergebende zunehmende physiologische Alter der Früchte beschleunigte die Ethylenfreisetzung zu allen Zeitpunkten (t_1, t_w, t_2). Der Maximalwert wurde bei Früchten vom 1. Erntetermin um 97,5 h, vom 2. Termin um 133,9 h und vom 3. Termin um etwa 82 h früher als bei Äpfeln aus dem Lager ohne Veränderung der Luftkomponenten (V 8) ermittelt. Allerdings waren die Maximalwerte vor allem beim 1. Erntetermin um 23,2 µl kg^{-1} h^{-1} (33,2 %) niedriger als bei den Bedingungen von V 8.

Die seneszenzverursachte Abnahme der Ethylenbildungsrate konnte beim 1. und 2. Erntetermin nur mit

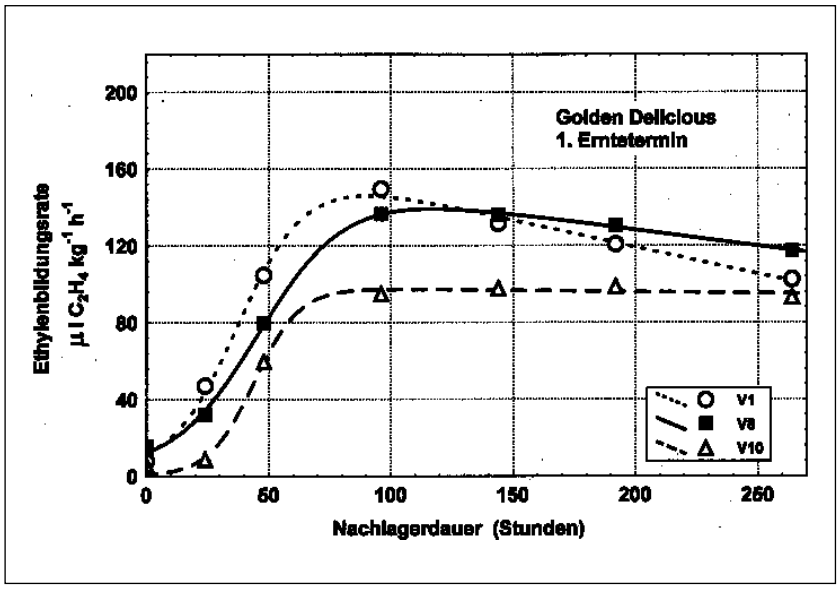


Abb. 2: Verlauf der Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten 'Golden Delicious' 1. Pflückzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Aufbewahren unter verschiedenen Lagerbedingungen in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer (h) bei Raumtemperatur
Course of the ethylene production rate for apple fruit 'Golden Delicious' 1. picking date after 7 1/2 months of storage at different storage conditions in dependence on shelf-life period (h) at room temperature

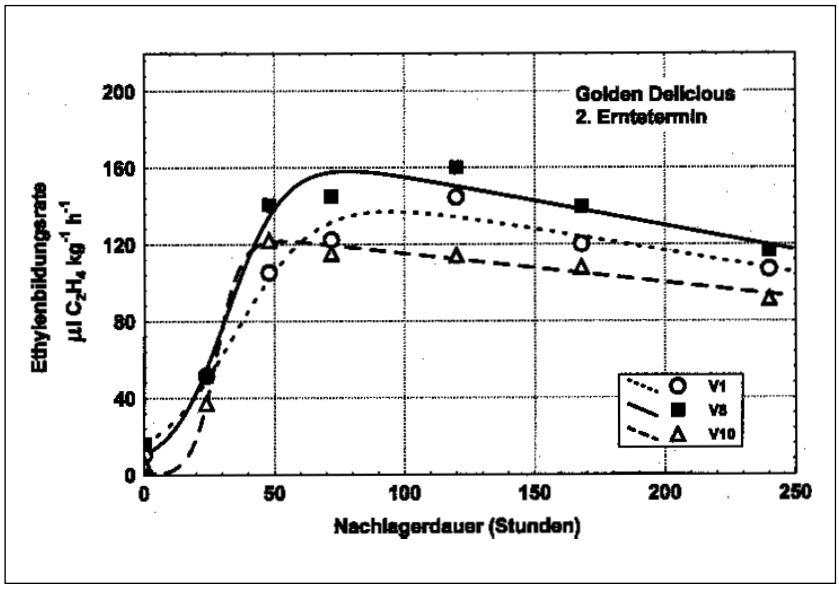


Abb. 3: Verlauf der Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten 'Golden Delicious' 2. Pflückzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Aufbewahren unter verschiedenen Lagerbedingungen in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer (h) bei Raumtemperatur
Course of the ethylene production rate for apple fruit 'Golden Delicious' 2. picking date after 7 1/2 months of storage at different storage conditions in dependence on shelf-life period (h) at room temperature

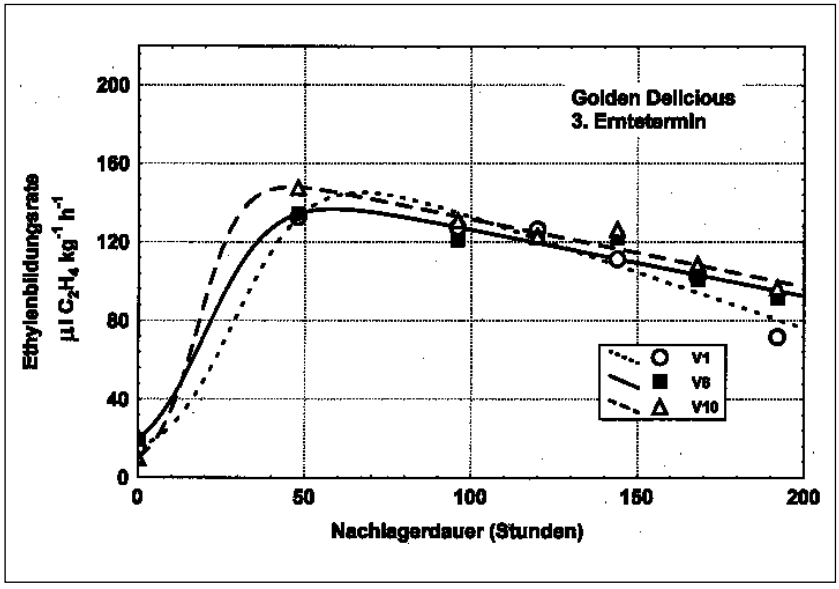


Abb. 4: Verlauf der Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten 'Golden Delicious' 3. Pflückzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Aufbewahren unter verschiedenen Lagerbedingungen in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer (h) bei Raumtemperatur
Course of the ethylene production rate for apple fruit 'Golden Delicious' 3. picking date after 7 1/2 months of storage at different storage conditions in dependence on shelf-life period (h) at room temperature

geringen Werten des Parameters d bestätigt werden. Bei Früchten mit dem deutlichen Übergang in den klimakterischen Bereich (E 3) zur Ernte war ein 5,5-fach höherer Wert für die Abnahme der Rate als bei den anderen beiden Terminen ermittelt worden (0,13462 µl kg^{-1} h^{-1}) (Abb. 4–7, Tab. 2).

Das Aufbewahren von Apfelfrüchten bei *extrem erhöhtem Gehalt an CO_2* (V 10: 8 % CO_2 + 1 % O_2) führte bei der Sorten 'Golden Delicious' vor allem beim 1. und in geringerem Maße beim 2. Erntetermin trotz einer ausgeprägten verzögerten Anfangsphase (Wert t_1 (V 10) = t_1 (V 8) +10,4 h bzw. +4,7 h) zu einer geringen zeitlichen Vorverlegung des Maximalwertes ($t_{max.}$) um –11,9 bzw. -25,4 h) und zu einer Erniedrigung des Maximalwertes ($t_{max.}$) um 41,9 (E 1) bzw. 36,4 µl kg^{-1} h^{-1} (E 2) (Abb. 5 + 6, Tab.2) bezogen auf das Verhalten bei normaler Luftzusammensetzung (V 8). Für den 3. Erntetermin war der Verlauf der Ethylenbildungsrate bei Früchten aus dem Verfahren V 10 etwas schneller und in seinem Ausmaß etwas höher als bei den beiden anderen Lagerverfahren (Abb. 4). Dafür lag der senszenzbedingte Rückgang (Parameter d) für diesen Erntetermin wesentlich höher (≈0,340 µl kg^{-1} h^{-1}) im Vergleich zu den beiden zeitigeren Pflückterminen (0,015 bzw. 0,151 µl kg^{-1} h^{-1} je Stunde).

Die Sorte 'Idared' zeigte beim 1. und 2. Erntetermin hinsichtlich eines zeitlich früheren Auftretens des Maximalwertes und des Absenken seines Niveaus das gleiche Verhalten wie bei den Bedingungen einer ULO-Lagerung (V 1) (Abb. 5 + 6, Tab. 2), wenn man Verlauf und zeitliche Verschiebung betrachtet. Beim 3. Erntetermin wirkten sich die Lagerbedingungen V 10 nicht so nachteilig wie bei V 1 (ULO-Lagerung) aus (Abb. 7). Allerdings ist hier der seneszente Rückgang (Parameter d) beim Lagerverfahren V 10 (0,156) etwas deutlicher als bei V 1 (0,134 µl kg^{-1} h^{-1} je Stunde), beim Aufbewahren mit normaler Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration (V 8) war – wie bereits dargelegt – kein Rückgang der Ethylenbildungsrate zu beobachten (Abb. 4–7, Tab. 2).

Diskussion

Nach der Entnahme aus dem Lager baut sich die durch die Lagerfaktoren Temperatur und Gaszusammensetzung gehemmte Ethylenbildung sehr schnell auf. Sie strebt in der Regel einem Maximum zu, um dann in einen deutlichen Rückgang der Bildungsrate überzugehen. Somit handelt es sich um zwei völlig unterschiedliche Prozesse. Dieser zeitliche Verlauf läßt sich daher am besten durch eine Regressionsfunktion mit zwei Termen beschreiben, deren erster, für den Aufbau verantwortlich ist, (beschrieben durch eine nichtlineare, s-förmige Wachstumsfunktion), der zweite sich aus dem Seneszenzverhalten der Ethylenbildung (linearer Abfall) ergibt. Die hohen Werte des Bestimmtheitsmaßes B für die geschätzten Regressionsfunktionen belegen diese Eignung. (Tab. 2). Mit diesem Regressionsmodell kommt auch der bei der vorausgegangenen langfristigen Lagerung erreichte Entwicklungstand in der Ethylenbildung der einzelnen Varianten voll zum Ausdruck (Tab. 1).

Ein sortenbedingt langsamerer Aufbau der Ethylenbildung ('Idared') ist auch bei JOBLING und MCGLASSON (1995) für die Sorten 'Gala' und 'Lady Williams', nicht dagegen bei 'Fuji', beobachtet worden. Es tritt dann häufig kein Rückgang der Ethylenbildungsrate ein, insbesondere wenn die Versuchsdauer nicht ausreichend bemessen worden ist (Sorte 'Idared' V 8).

Einen seneszenzbedingten Rückgang der Ethylenbildung während der Nachlagerzeit z.B. bei 'Golden Delicious' ist auch in den Meßreihen von YOUNES (1988) und JOBLING und MCGLASSON 1995) (Sorte 'Lady Williams') zu erkennen, ohne ihn als solchen herauszustellen. Dieser Rückgang ist offenbar mit seneszenzbedingten Veränderungen der Gewebemembranen, (Anstieg der Membranpermeabilität, höherer Elektrolyt Leakage) verbunden (MAGNE und LARHER 1995). Aber auch eine rückläufige Aktivität der ACC-Oxidase mit Einsetzen der Alterung der lagernden Früchte wird damit in Verbindung gebracht (HOFFMANN und YANG 1980, MORIN und HARTMANN 1986, BRACKMANN et al. 1995, TAN und BANGERTH 2000).

Die gewählte Methode der Bestimmung der Ethylenausscheidung der Einzelfrucht ermöglicht eine klare Darstellung des Verlaufes der Bildungsrate für die untersuchten Varianten. Aus den geschätzten nichtlinearen Funktionen können bestimmte physiologische Bereiche der zeitabhängigen Ethylenbildung abgegrenzt werden (WARNSTORFF und DÖRFEL 1999). Diese sind der Bereich des verzögerten Anlaufes der Ethylenbildung nach der Entnahme aus dem Lager t_1–t_o, der stärksten Zunahme der Ethylenbildungsrate t_2–t_1, der Wendepunkt t_w und der Zeitpunkt der maximalen Eythlenbildungsrate t_{max} mit $\hat{y}(t_{max})$, maximale Menge an Ethylen in der Zeiteinheit. Der Parameter d ist ein Maß für den seneszenzbedingten Rückgang der Rate nach Überschreiten des Maximalwertes $\hat{y}(t_{max.})$.

Dieser typische Verlauf der Ethylenbildung bleibt auch bestehen, wenn die Apfelfrüchte physiologischen Streßsituationen, wie extremer Gaszusammensetzung, unterworfen oder zu unterschiedlichen Zeiten gepflückt werden (Abb. 2–7). Dabei kommt es in erster Linie zu deutlichen Verschiebungen der einzelnen Abschnitte, indem die maximale Ethylenbildungsrate früher als unter Kaltlagerbedingungen erreicht wird, insbesondere bei Sorten mit geringerer Ethylenbildung. Bei der Sorte 'Idared' wird der Zeitpunkt des Maximalwertes im Vergleich zur Kaltlagerung (V 8) soweit zeitlich vorgezogen, daß sogar ein Abfall der Ethylenbildungsrate geschätzt werden konnte (Abb. 5–7, Tab. 2). Eine beträchtliche Senkung der Ethylenbildung ist vor allem beim 1. Pflücktermin und in geringerem Maße beim 2. nach einem Aufbewahren bei extrem hohen CO_2-Werten (V 10 : 8 % CO_2) bei beiden Sorten festzustellen. Hier werden die an der Ethylenbildung beteiligten Enzyme offenbar besonders stark vom CO_2 gehemmt. Bei späterem Pflückzeitpunkt (E 3) werden diese Belastungen wesentlich besser toleriert. Bei der Sorte 'Idared' zeigte auch die Bedingung der ULO-Lagerung (V 1) eine gleiche Vorverlegung und Verringerung des Niveaus des Maximalwertes $\hat{y}(t_{max.})$ in Bezug auf die normale Gaszusammensetzung (V 8) (Abb. 5–7, Tab. 2).

Die ausgeprägte zeitliche Verschiebung der zeitlichen Abschnitte der Intensität der Ethylenbildung ermöglicht es, angehende physiologische Veränderungen der Früchte, vor allem bei einer Gaszusammensetzung von > 5 % CO_2, zu erkennen und einzugrenzen. Sie sind auch eine Hilfe zur Charakterisierung der Verhaltens von verschiedenen Sorten.

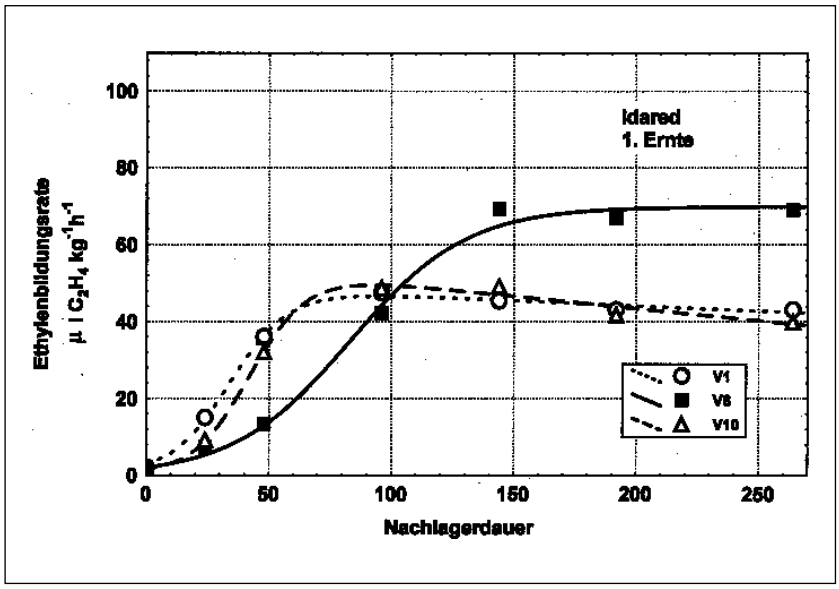


Abb. 5: Verlauf der Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten 'Idared' 1. Pflückzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Aufbewahren unter verschiedenen Lagerbedingungen in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer (h) bei Raumtemperatur

Course of the ethylene production rate for apple fruit 'Idared' 1. picking date after 7 1/2 months of storage at different storage conditions in dependence on shelf-life period (h) at room temperature

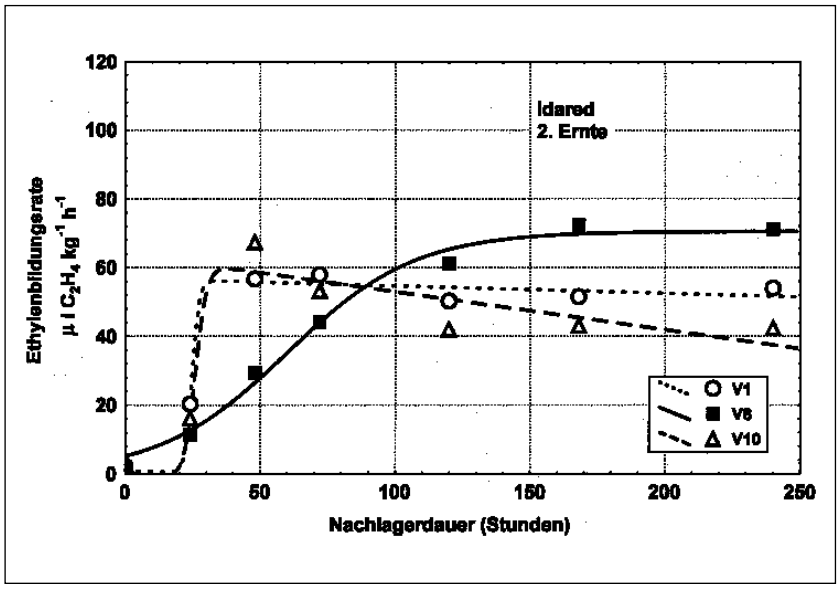


Abb. 6: Verlauf der Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten 'Idared' 2. Pflückzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Aufbewahren unter verschiedenen Lagerbedingungen in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer (h) bei Raumtemperatur

Course of the ethylene production rate for apple fruit 'Idared' 2. picking date after 7 1/2 months of storage at different storage conditions in dependence on shelf-life period (h) at room temperature

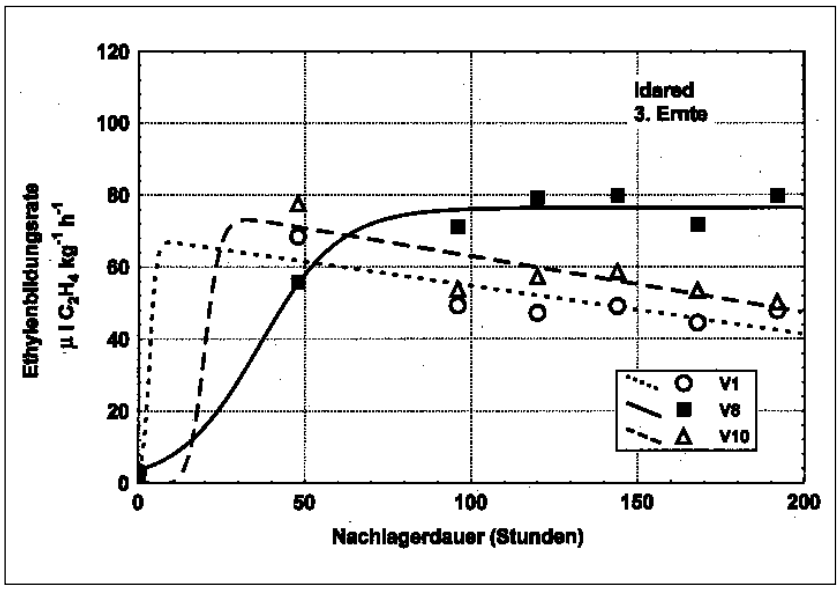


Abb. 7: Verlauf der Ethylenbildungsrate von Apfelfrüchten 'Idared' 3. Pflückzeitpunkt nach 7 1/2 Monaten Aufbewahren unter verschiedenen Lagerbedingungen in Abhängigkeit von der Nachlagerdauer (h) bei Raumtemperatur

Course of the ethylene production rate for apple fruit 'Idared' 3. picking date after 7 1/2 months of storage at different storage conditions in dependence on shelf-life period (h) at room temperature

Die um jeweils eine Woche fortschreitende physiologische Alterung der Früchte zum Erntezeitpunkt führte zu einem zunehmend schnelleren Abbau der Ethylenbildung nach dem Überschreiten des Maximalwertes, ausgedrückt durch die Schätzwerte für den Parameter d.

Für die Bereitstellung der Apfelfrüchte aus der Langzeitlagerung sind wir Frau Dr. HEIKE SCHIMPF zu besonderem Dank verpflichtet. Herrn GERT SCHARF danken wir für die umsichtige technische Wartung der Lager- und Meßanlagen.

Literatur

ANDERSON, R. E. 1967: Experimental storage of eastern-grown 'Delicious' apples in various controlled atmospheres. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 91, 810–820.

BOHLING, H. und H. HANSEN 1985: Untersuchungen über das Lagerungsverhalten von Äpfeln in kontrollierten Atmosphären mit sehr niedrigen Sauerstoffanteilen. Erwerbsobstbau 27, 80–84.

BRACKMANN, A., J. STREIF und F. BANGERTH 1994: Einfluß von CA- bzw. ULO-Lagerbedingungen auf Fruchtqualität und Reife bei präklimakterisch und klimakterisch geernteten Äpfeln. I. Auswirkung auf Farbe, Fruchtfleischfestigkeit, Säure und lösliche Trockensubstanz. Gartenbauwissenschaft 59, 252–257.

BRACKMANN, A., J. STREIF und F. BANGERTH 1995: Einfluß von CA- bzw. ULO-Lagerbedingungen auf Fruchtqualität und Reife bei präklimakterisch und klimakterisch geernteten Äpfeln: II. Auswirkung auf Ethylen-, CO_2-, Aroma- und Fettsäureproduktion. Gartenbauwissenschaft 60, 1–6.

GOLIÁŠ, J. and B. BATAILLE 1994: Evaluation of some indicators of apples ripening after controlled atmosphere storage. Acta Universitatis Agriculturae, Facultas Horticulturae 9, (1/2) 69–76.

GOLIÁŠ, J. und H. BÖTTCHER 2000: Methode zur zerstörungsfreien Bestimmung der flüchtigen Stoffwechselprodukte von Früchten während der Nacherntezeit. Nahrung 44, 56–57.

HOFFMANN, N. E. and S. F. YANG 1980: Changes of 1-amino-cyclopropane -1-carboxylic acid content in ripening fruits in relation to their ethylene production rates. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 105, 492–495.

JOBLING, J. J. and W. B. MCGLASSON 1995: A comparison of ethylene production, maturity and controlled atmosphere storage of 'Gala', 'Fuji' and 'Lady William' apples (*Malus domestica*, Borkh.). Postharv. Biol. and Technol 6, 209–218.

LEVIN, A., L. SONEGO, Y. ZUTKHI and R. BEN-ARIE, R. 1993: Effects of CO_2 on ethylene production by apples at low and high O_2 concentrations. In: Cellular and molecular aspects of the plant hormone ethylene. Proceedings of the International symposium on cellular and molecular aspects of biosynthesis and action of the plant hormone ethylene, Agen, France. September 1992. Kluwer Academic Publishers, 150–151.

LIDSTER, P. D. 1982: Low oxygen atmospheres to maintain apple quality in storage. In: Controlled atmospheres for storage and transport of perishable agricultural commodities. Third Nat. CA Res. Conf. Oregon State University, Oregon, 1982, 109–120.

MAGNE, C. and F. LARHER 1995: Changes in ethylene-producing capacity of apples fruit tissues during natural or induced senescence. J. Horticult. Sci. 70, 307–314.

MORIN, F. and C. HARTMANN 1986: Changes in free and conjugated 1- aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthese activity in the senescent Golden Delicious apples. J. Plant Physiol. 125, 173–178,

SCHIMPF, H. 1992: Untersuchungen über den Verlauf des Ethylengehaltes im Kerngehäuse von Apfelfrüchten während der Entwicklung und zur Ernte und über den Einfluß einer Zugabe von Ethen in die Atmosphäre auf das Lagerverhalten von Apfelfrüchten der Sorten 'Golden Delicious', 'Idared' und 'Gloster'. Diss. Landw. Faktultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

SCHIMPF, H., H. SCHULZ und H. BÖTTCHER 1995: Der Ethen-Gehalt von Apfelfrüchten in Beziehung zur Insertion am Baum und ausgewählten Reifemerkmalen. Gartenbauwissenschaft 60, 157–162.

SCHOUTEN, S. P. 1988: ULO, Ethyleen en kwaliteit. Fruitteelt 78, 20–22.

SCHULZ, H., C. BODE und G. SCHARF 1989: Molekularsiebabsorber zur Erzeugung von Stickstoff mit einem Restsauerstoffgehalt von < 1 Vol.-% für die CA-Lagerung. 1. CA-Lagersymposisum für Obstfrüchte mit internationaler Beteiligung. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), 209–226

SHARPLES, R. O.1982: Effects of ultra-low-oxygen conditions on the storage quality of English Cox's Orange Pippin apples. In: Controlled atmospheres for storage and transport of perishable agricultural commodities. Third Nat. CA Res. Conf., Oregon State University, Oregon, 1982, 131–138.

SMITH, S. M. 1984: Improvement of aroma of Cox's Orange Pippin apples storage in low oxygen atmospheres. J. Hort. Sci. 59, 515–522.

TAN, T. and F. BANGERTH 2000: Regulation of Ethylene, ACC, MACC Production, and ACC-Oxidase Activity at Various Stages of Maturity of Apple Fruit and the Effect of Exogenous Ethylene Treatment. Gartenbauwissenschaft 65, 121–128.

WARNSTORFF, K. und H. DÖRFEL 1999: Anwendung nichtlinearer Wachstumsfunktionen und aus ihnen abgeleitete relevante Größen. J. Agron. & Crop Sci. 182, 259–271.

YOUNES, A. 1988: Untersuchungen über den Einfluß der Erntetermine, der Lagertemperatur und der Zusammensetzng der Lageratmosphäre auf die Ethylenbildungsrate, die Atmungsintensität und das Lagerverhalten der Früchte der Apfelsorten 'Golden Delcious' und 'Idared'. Diss. Landwirtschaftliche Fakultät der MLU Halle-Wittenberg. 131 S.

Eingereicht: 06. 03. 01/03. 07. 01

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. J. GOLIÁŠ, Mendel University of Agriculture and Forestry. Department of Postharvest Technology of Horticultural Products, CZ-69144 Lednice na Moravè; Frau Dr. KRISTINA WARNSTORFF, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Arbeitsgruppe Biometrie und Agrarinformatik D-06099 Halle (Saale), Ludwig Wucherer-Str. 84 und Prof. Dr. HORST BÖTTCHER, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Institut für Ernährungswissenschaften, Emil Abderhalden-Str. 26, 06108 Halle (Saale)