

Lagerung von Äpfeln unter dynamisch kontrollierter Atmosphäre

Franz Gasser, Thomas Eppler, Werner Naunheim, Séverine Gabioud und Ernst Höhn, Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW, CH-8820 Wädenswil

Auskünfte: Franz Gasser, E-Mail: franz.gasser@acw.admin.ch, Fax +41 44 783 62 24, Tel. +41 44 783 64 23

Zusammenfassung

Bei der dynamischen CA-Lagerung (DCA = Dynamic Controlled Atmosphere) von Äpfeln wird der Sauerstoffgehalt in der Lageratmosphäre schrittweise abgesenkt mit dem Ziel, einen möglichst tiefen Sauerstoffwert zu erreichen, um die Qualität der Früchte während der Lagerung möglichst gut zu erhalten. Die Sauerstoffkonzentration darf dabei aber einen kritischen Wert nicht unterschreiten, da die Früchte sonst infolge Sauerstoffmangel geschädigt werden. Zwei Methoden, welche auf der Messung des Respirationsquotienten und der Chlorophyllfluoreszenz beruhen, wurden getestet, um die kritische Sauerstoffkonzentration bei der dynamischen CA-Lagerung (DCA) von verschiedenen Apfelsorten zu erfassen. Beide Methoden ergaben identische Werte. Diese betragen, abhängig von der Apfelsorte, zwischen 0,2% und 0,4%. Nach Erreichen des kritischen Wertes wurde die Sauerstoffkonzentration um rund 0,2% bis 0,3% über die kritische Konzentration erhöht, um eine sichere Lagerung zu gewährleisten. Auf diese Weise konnten die Früchte während rund 200 Tagen bei Sauerstoffkonzentrationen von 0,3% bis 0,6% ohne jegliche physiologischen Lagerschäden gelagert werden. Die Fruchtfleischfestigkeit von DCA gelagerten Äpfeln war im allgemeinen signifikant höher als diejenige der Kontrollfrüchte unter konstanter CA-Atmosphäre.

Bei der konventionellen CA-Lagerung werden Äpfel bei konstanten Bedingungen bezüglich Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Lageratmosphäre (CO_2 , O_2) gelagert. Die optimalen Lagerbedingungen werden für neue Sorten in mehrjährigen Reihenversuchen nach dem «trial and error» Prinzip ermittelt. Die empfohlenen Lagerbedingungen beinhalten immer auch eine gewisse Sicherheitsspanne, um wechselnde klimatische Bedingungen zu berücksichtigen und die Früch-

te nicht schädlichen Bedingungen auszusetzen. Bei der dynamischen CA-Lagerung (DCA) wird der Sauerstoffgehalt in der Lageratmosphäre schrittweise abgesenkt mit dem Ziel, einen möglichst tiefen Sauerstoffwert zu erreichen, ohne dass die Äpfel dadurch geschädigt werden. Hinter diesem Konzept steht die Annahme, dass ein tiefer Sauerstoffgehalt den Qualitätsabbau während der Lagerung reduziert (Abb.1). Fällt der Sauerstoffgehalt unter einen kritischen Wert,

den sogenannten anaeroben Umkehrpunkt, so beginnen die Äpfel zu gären, was der Qualität abträglich ist und zu Verlusten führt. Die dynamische CA-Lagerung ist also nur durchführbar, wenn zuverlässige Methoden zur Verfügung stehen, um die kritische Konzentration während der Sauerstoffabsenkung zu detektieren. Die Messung des Respirationsquotienten RQ und der Chlorophyllfluoreszenz F_0 bieten sich als zerstörungsfreie Methoden dafür an: Äpfel, welche zu wenig Sauerstoff zur Verfügung haben, reagieren auf diesen Stress mit einer starken Erhöhung des Respirationsquotienten und der Chlorophyllfluoreszenz F_0 . Die Erhöhung des RQ widerspiegelt den Übergang von aerober zu anaerober Energiegewinnung im Stoffwechsel. Die Erhöhung der Chlorophyllfluoreszenz F_0 (entsprechend F_0) beruht auf der pH-Wert Absenkung in den Chloroplasten, welche wiederum durch eine pH-Wert Absenkung im Zytoplasma der Zellen bei anaeroben Bedingungen ausgelöst wird (Prange *et al.*, 2005b). Aus diesem Grund eignet sich die Messung der beiden Parameter zur Kontrolle beziehungsweise Regelung der dynamischen CA-Lagerung. Die Bestimmung der Chlorophyllfluoreszenz wurde in der vorliegenden Arbeit auf ihre Tauglichkeit, im Vergleich zur Erfassung des RQ als Referenzmethode, getestet.

Simulation der DCA

Die Versuche zur dynamischen CA-Lagerung wurden jeweils über die ganze Lagersaison (rund

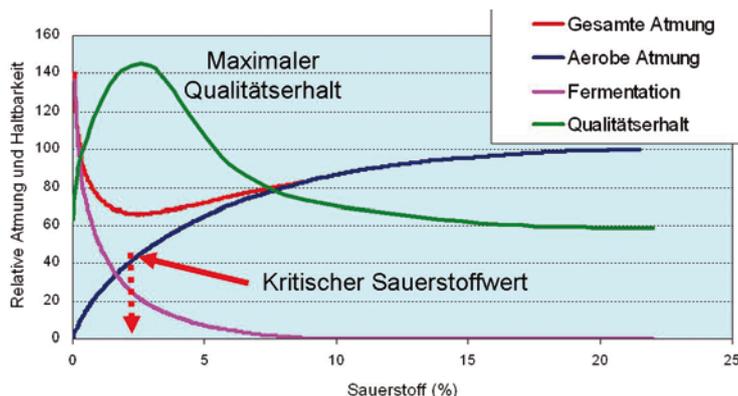


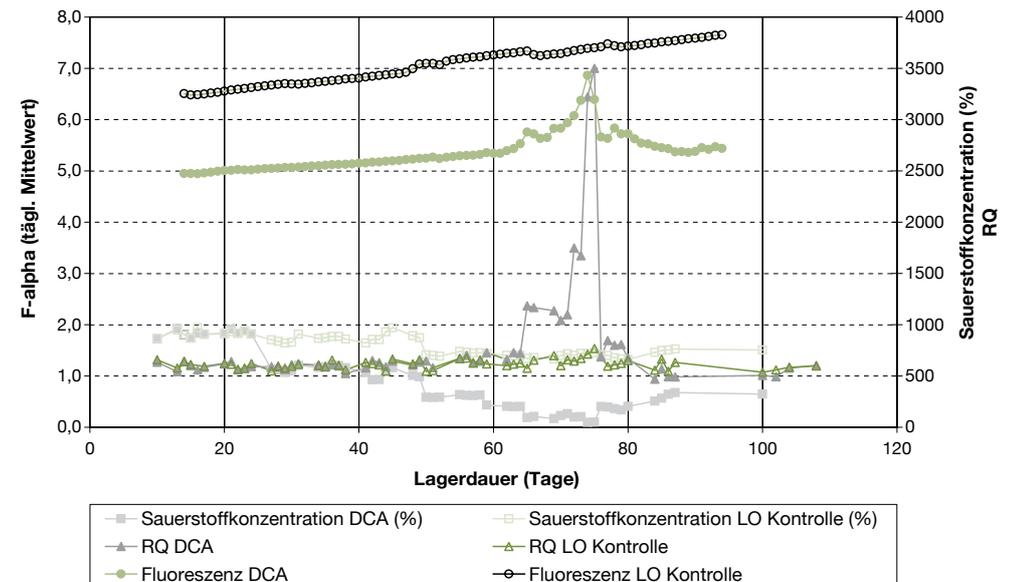
Abb. 1. Das Prinzip der dynamischen CA-Lagerung.

ttel

200 Tage) in einer Pilotanlage mit je 10-11 kg Äpfeln pro Versuchsvariante durchgeführt (Sorten Idared, Maigold, Elstar, Braeburn, Golden Delicious, Herkunft ACW Wädenswil). Die Absenkung des Sauerstoffgehaltes wurde durch tägliche Bestimmung des Respirationsquotienten RQ (berechnet aufgrund der Respirationssmessung der Äpfel respektive der Messung der CO₂-Abgabe und O₂-Aufnahme) sowie durch stündliche Messungen der Chlorophyllfluoreszenz (F- α) mit dem «Harvest Watch» System der Firma Satlantic Inc. (Halifax, N.S., Canada) überwacht. Während der Lagerung wurden die Äpfel im Dunkeln gehalten. Fruchtfleischfestigkeit, lösliche Trockensubstanz und titrierbare Säure wurden an Mustern von je 20 Früchten nach einer Lagerung von 3,5 und sieben Monaten und zusätzlich nach einer Nachreife von sieben Tagen bei Raumtemperatur bestimmt. Die CA-Bedingungen in der Pilotanlage wurde im Durchflussverfahren über Zudosierung von befeuchteten Gasen (N₂, CO₂, O₂) mit Massendurchflussreglern eingestellt. Die Messung der Fruchtrespiration erfolgte täglich mit einem GC Chrompack CP2002 (Gasser *et al.*, 2003).

Einfluss der Apfelsorte

In der Lagersaison 2005/2006 wurden verschiedene, bei optimalem Erntetermin gepflückten Sorten bei 3°C gelagert. Für jede Sorte wurde ein Lagerbehälter bei konstanten Niedrig-Sauerstoff-Bedingungen (LO, low oxygen) gelagert (Konzentrationen



für CO₂/O₂ bei Idared 1,5/1,0 %, bei Maigold 3,0/2,0 %, bei Elstar 3,0/2,0 % und bei Braeburn 1,0/1,5 %). Ein Lagerbehälter pro Sorte wurde für die dynamische CA-Lagerung mit schrittweiser Sauerstoffabsenkung verwendet. Die DCA gelagerten Äpfel wurden zuerst je eine Woche bei normalen Kühlraumbedingungen und dann bei den oben erwähnten LO-Bedingungen gelagert, bevor

der Sauerstoff langsam um 0,2 % pro Woche abgesenkt wurde.

Der kritische Sauerstoffwert betrug bei den Sorten Idared, Maigold und Elstar 0,2 % bis 0,3 %, bei Braeburn 0,4 %. Nachdem die kritische Sauerstoffkonzentration erreicht worden war, wurde die Sauerstoffkonzentration bei allen Sorten um 0,2 bis 0,3 % über den kritischen Wert erhöht, um

Abb. 2. Zeitlicher Verlauf von RQ und F- α während der DCA Lagerung von Braeburn Äpfeln (2002/2003).

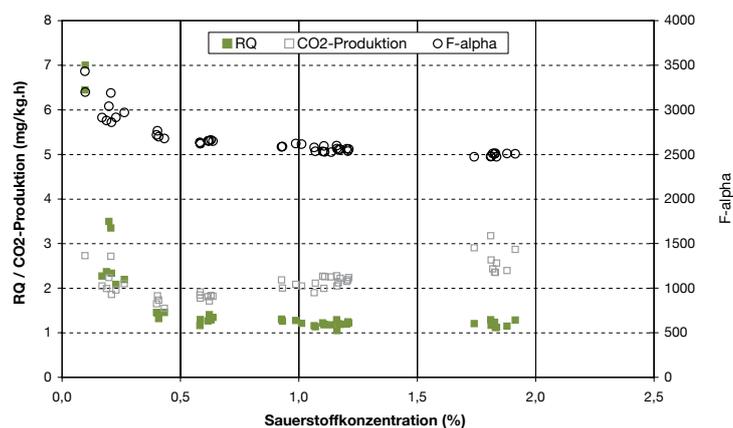


Abb. 3. RQ, CO₂ Produktion and F- α in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration in der Lageratmosphäre bei Braeburn Äpfeln (2002/2003).

Tab. 1. Versuchsplanung in der Lagersaison 2006/2007 für die DCA Lagerung von Golden Delicious (zwei Pflückzeitpunkte)

Lagermethode	Geschwindigkeit O ₂ Absenkung	CO ₂ Konzentration
Konstante LO Bedingungen	Konstant bei 1 %	Konstant bei 3 %
Langsame Sauerstoffabsenkung	0,2 % pro Woche	Konstant bei 3 %
Schnelle Sauerstoffabsenkung (A)	0,2 % pro Tag	Konstant bei 3 %
Schnelle Sauerstoffabsenkung (B)	0,2 % pro Tag	Proportional zu O ₂ (3:1)

Tab. 2. Kritische Sauerstoffkonzentration von Golden Delicious (zwei Pflückzeitpunkte, Lagersaison 2006/2007)

Lagermethode	Pflückzeitpunkt 1			Pflückzeitpunkt 2		
	1	2	3	1	2	3
Langsame Sauerstoffabsenkung	0,31	0,22	0,37	0,11	0,23	0,38
Schnelle Sauerstoffabsenkung (A)	0,43	0,23	0,38	0,11	0,19	0,41
Schnelle Sauerstoffabsenkung (B)	0,45	0,28	0,44	0,12	0,22	0,38

1 = Sauerstoffabsenkung zu Beginn der Lagerung, 2 = Sauerstoffabsenkung nach 90-100 Tagen, 3 = Sauerstoffabsenkung am Ende der Lagerung (188-197 Tage)

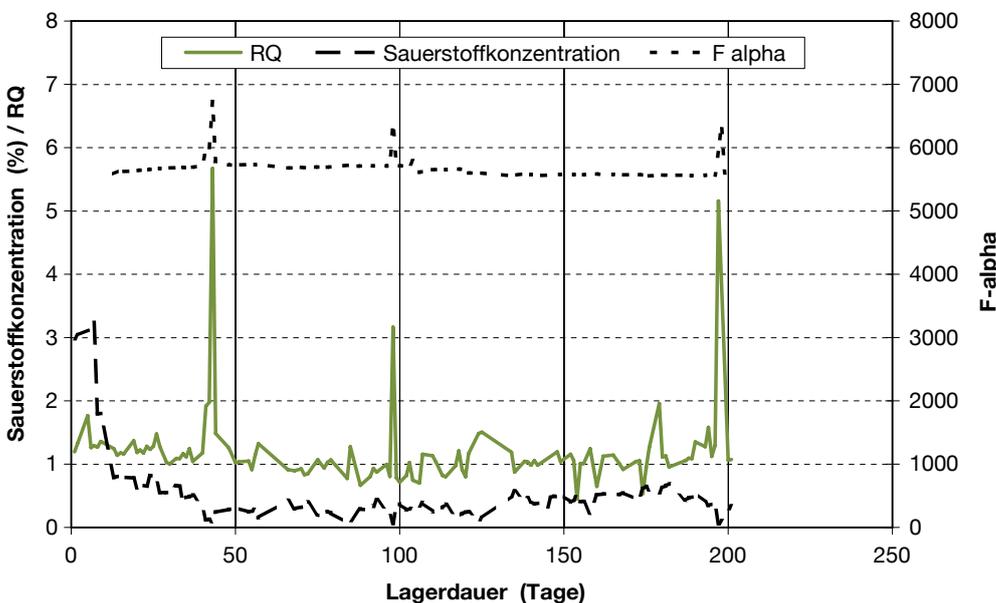
eine sichere Lagerung zu ermöglichen. Wie aus Abbildung 2 am Beispiel von Braeburn hervorgeht, verhielten sich die beiden Parameter RQ und F- α in Abhängigkeit von der Sauerstoffabsenkung genau gleich. In Abbildung 3 ist die Entwicklung von CO₂ Produktion, RQ und F- α in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration im Lagerbehälter an einem Beispiel illustriert. Der kritische Sauerstoffwert kann an-

hand des Minimums für die CO₂ Produktion oder anhand der Erhöhung von RQ und F- α identifiziert werden.

Die Fruchtfleischfestigkeit der DCA gelagerten Äpfel war im Allgemeinen signifikant höher als diejenige der LO-Kontrollvarianten, mit Ausnahme der Sorte Elstar, wo die Unterschiede nicht signifikant waren. Interessant und für die Praxis bedeutungs-

voll ist auch, dass die LO-gelagerten Maigoldäpfel (Kontrollvariante) in diesem Jahr alle Hautbräune aufwiesen, während die DCA gelagerten Äpfel, bedingt durch die Sauerstoffabsenkung, von diesem Schaden gänzlich verschont blieben. Dies trotz der hohen Luftfeuchtigkeit in den Lagerbehältern, welche in der Regel das Auftreten von Hautbräune noch verstärkt.

Abb. 4. Zeitlicher Verlauf von RQ und F- α während der DCA Lagerung von Golden Delicious (erster Pflückzeitpunkt, langsame Sauerstoffabsenkung).

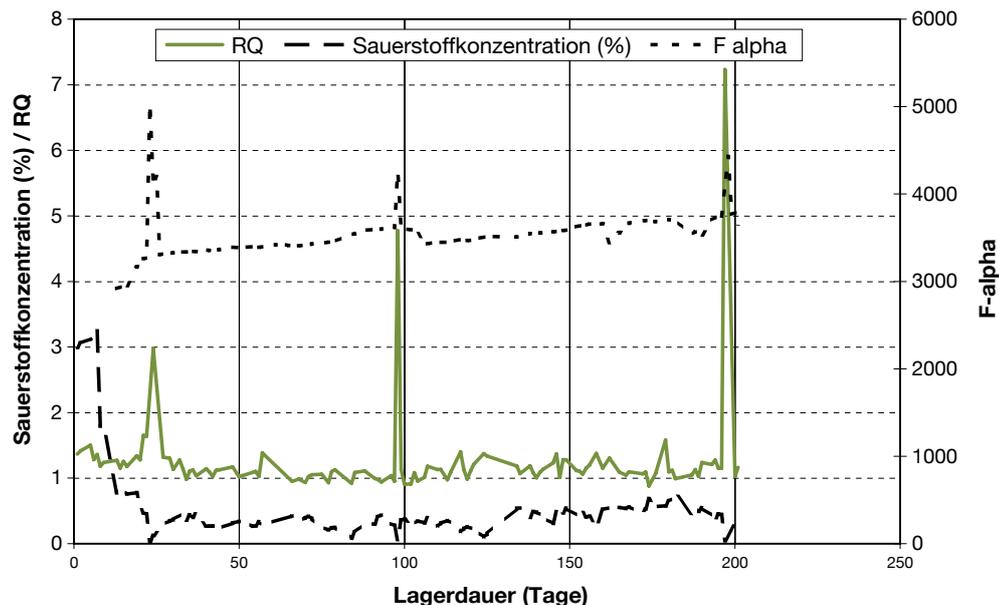


Einfluss von Pflückzeitpunkt und DCA Methode

Der Einfluss von Erntezeitpunkt, Geschwindigkeit der Sauerstoffabsenkung und der CO₂-Konzentration wurde in der Lagersaison 2006/2007 mit der Sorte Golden Delicious getestet, welche an zwei Pflückzeitpunkten geerntet wurde (optimaler Zeitpunkt am 25.9.2006 und bei fortgeschrittener Reife am 5.10.2006) (Tab.1). Im Gegensatz zum Vorjahr wurde der Sauerstoff während der gesamten Lagerdauer von rund 200 Tagen dreimal abgesenkt um allfällige Veränderungen in der kritischen Sauerstoffkonzentration erfassen zu können. Zu Beginn der Lagerung wurden die

Äpfel zuerst bei 1°C normal kühl gelagert, dann während 2 Wochen bei konstanten LO-Bedingungen von 3,0 % / 1,0 % (CO₂/O₂) und derselben Temperatur gelagert, bevor der Sauerstoff abgesenkt wurde. Bei beiden Pflückzeitpunkten stieg die kritische Sauerstoffkonzentration gegen Ende der Lagerung etwas an (Tab.2). Das bedeutet, dass die Äpfel in dieser Lagerphase geringfügig empfindlicher auf Sauerstoffabsenkung reagieren, beziehungsweise dass die Sauerstoffkonzentration gegen Ende der Lagerung nicht zu tief gehalten werden sollte. Beim zweiten Pflückzeitpunkt konnte gleich zu Beginn der Lagerung ein etwas tieferer Sauerstoffwert ohne Stresssignal erreicht werden als beim ersten Pflückzeitpunkt. Dieser Unterschied ist jedoch bezüglich der Anwendung in der Praxis nicht kritisch, d.h. es können verschiedene Pflückzeitpunkte zusammen im gleichen Lagerraum gelagert werden, vorausgesetzt, diese werden über Messung der Chlorophyllfluoreszenz überwacht. Die Werte für die kritische Sauerstoffkonzentration hängen auch von der Schrittweite ab, welche bei der stufenweisen Absenkung des Sauerstoffgehaltes gewählt wird. Insofern sind die Werte in Tabelle 2 mit einer Toleranz von +/- 0,1 % O₂ zu interpretieren.

Bedeutungsvoll für die Anwendung der DCA ist auch, dass der tiefste erreichbare Sauerstoffwert weder von der Geschwindigkeit der Sauerstoffabsenkung noch vom CO₂-Gehalt der Lageratmosphäre beeinflusst wurde. Aufgrund unserer früheren Versuche ist allerdings anzufügen, dass bei sehr schneller Sauerstoffabsenkung innerhalb von rund zehn Tagen sehr wohl ein Effekt der Absenkungsgeschwindigkeit nachweisbar ist: bei diesen Bedingungen liegt der kritische Sauerstoffwert höher als bei langsamer Absenkung. Es



scheint, dass die Früchte aufgrund der langsamen Sauerstoffabsenkung eine Art Adaptation durchlaufen, welche sie befähigt, sehr tiefe Sauerstoffgehalte schadlos zu überstehen. Bedeutungsvoll für die Praxis ist auch das Ergebnis bezüglich CO₂-Gehalt. Bisher ging man bei der DCA Lagerung immer von der Annahme aus, dass bei der Sauerstoffabsenkung der CO₂-Gehalt proportional zur Sauerstoffkonzentration gehalten werden muss, um physiologische Schäden in den Früchten zu vermeiden. Das bedeutet aber in der Praxis, dass die Lagerhäuser Scrubber, d.h. CO₂-Absorptionsgeräte, mit einer sehr hohen Kapazität betreiben müssten, was bezüglich Anschaffung und Betrieb hohe Kosten verursachen würde. Geht man im Gegensatz zu dieser Lehrmeinung von einem konstanten CO₂-Gehalt aus, so würde das für die Praxis eine grosse Erleichterung bedeuten. Aufgrund unserer Versuche kann die Frage der optimalen CO₂-Konzentration noch nicht abschliessend beantwortet werden.

Zwischen den LO-gelagerten Kontrollfrüchten und den DCA gelagerten Früchten gab es keinerlei Unterschiede bezüglich phy-

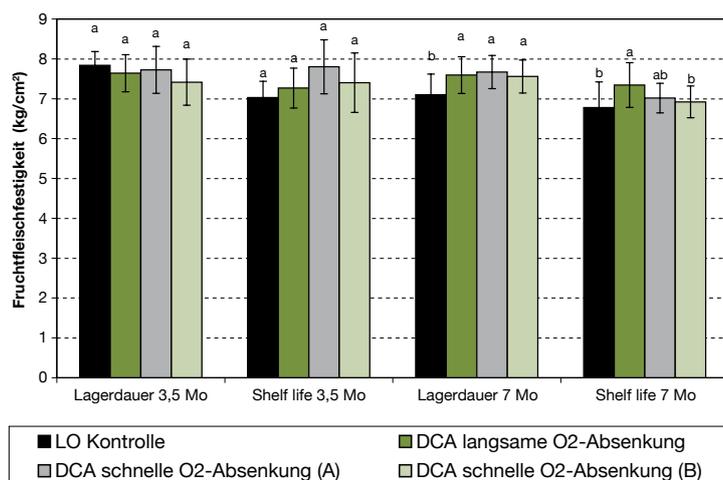
siologischen Schäden. Wie schon im Vorjahr verhielt sich der Messwert der Chlorophyllfluoreszenz F- α genau gleich wie der Respirationsquotient. Das bedeutet, dass die Messung der Chlorophyllfluoreszenz das Respirationsverhalten der Früchte widerspiegelt (Abb. 4 und 5). Nach einer Lagerdauer von 3,5 Monaten unterschieden sich die Kontrollfrüchte und die DCA gelagerten Früchte bezüglich Fruchtfleischfestigkeit kaum, nach sieben Monaten waren jedoch die DCA gelagerten Äpfel bei beiden Pflückzeitpunkten signifikant fester. Auch nach der Nachreife während sieben Tagen bei Raumtemperatur wiesen die DCA Früchte eine höhere Fruchtfleischfestigkeit auf (Abb. 6 und 7). Die DCA Früchte wiesen einen tendenziell höheren Säuregehalt als die Kontrollfrüchte auf (Daten nicht aufgeführt). Die drei DCA Varianten untereinander waren in qualitativer Hinsicht bezüglich allen gemessenen Qualitätskriterien gleichwertig.

Fazit

Unsere Versuche zeigten, dass Äpfel bei sehr tiefen Sauerstoffwerten von 0,4 % bis 0,6 % ohne physiologische Schäden gelagert werden können. Der tiefste ein-

Abb. 5. Zeitlicher Verlauf von RQ und F- α während der DCA Lagerung von Golden Delicious (erster Pflückzeitpunkt, schnelle Sauerstoffabsenkung (B))

Abb. 6. Fruchtfleischfestigkeit von Golden Delicious nach Lagerung bei konstanten LO Bedingungen und DCA Lagerung (erster Pflückzeitpunkt).

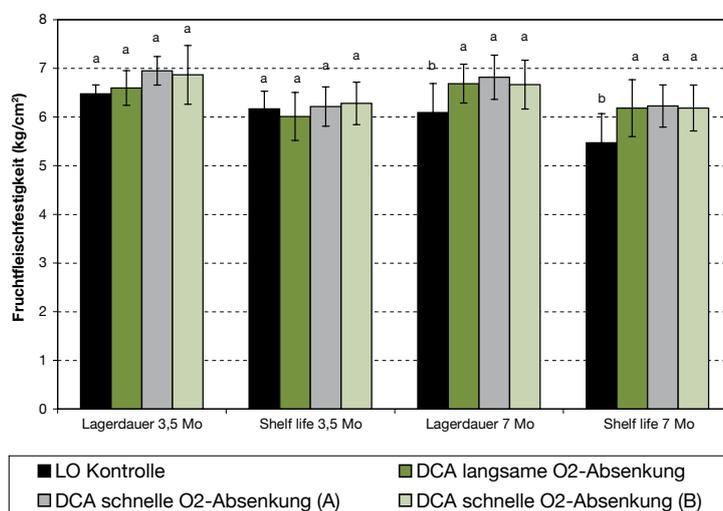


stellbare Sauerstoffwert hängt u.a. auch von der Sorte ab und ist, wie unsere langjährigen Versuche zeigen, jährlichen Schwankungen unterworfen. Aufgrund unserer Erkenntnisse ist es notwendig, für die DCA Äpfel sortenrein zu lagern und mit den Fluoreszenzsensoren im Lagerraum eine repräsentative Auswahl verschiedener Pflückzeitpunkte zu überwachen. Die von uns ermittelten Werte für die kritischen Sauerstoffkonzentration sind etwas niedriger als diejenigen, welche von Prange *et al.* (2005a), aufbauend auf der Messung der Chlorophyllfluoreszenz, bestimmt wurden (0,5%). Schouten *et al.* (1997) bestimmten mittels der Messung der Ethanolbildung in Äpfeln ei-

nen kritischen Sauerstoffwert für die Sorte Elstar von 0,2% bis 0,3%. Diese Resultate entsprechen in der Größenordnung unseren Ergebnissen. In Zukunft muss sicher noch die Frage, ob die CO₂ Konzentration einen Einfluss auf die Fruchtqualität und das Auftreten von physiologischen Schäden hat, vertieft bearbeitet werden. Die Überwachung des kritischen Sauerstoffgehaltes mit Hilfe der Messung der Chlorophyllfluoreszenz F-α hat sich als wirkungsvoll und einfach erwiesen, vorausgesetzt, es werden methodische Rahmenbedingungen wie Dunkeladaption der Äpfel und konstante geometrische Verhältnisse (Distanz Sensor zu Äpfeln) eingehalten. Schlussendlich gilt es

anzumerken, dass die DCA eine Weiterentwicklung bezüglich Regelung der Lagerparameter darstellt: wurden bisher die Parameter wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO₂- und O₂-Konzentration aufgrund von langjährigen Versuchen immer gleich eingestellt, so wird es mit der DCA möglich sein, die Lagerbedingungen an den physiologischen Zustand der Früchte anzupassen, indem das «Stress-Signal» der Äpfel als Regelparameter dient (Abb. 8). Die DCA stellt in diesem Sinne eine «interaktive» Lagermethode dar, bei der die Frucht selber einen Teil des Regelkreises darstellt. Durch Anwendung der DCA lässt sich die innere Qualität von Äpfeln besser als bei der konventionellen LO oder ULO Lagerung erhalten, zudem kann mit der DCA auch das Auftreten der Hautbräune verzögert werden. Schlussendlich bietet sich die DCA insbesondere für die Lagerung von Bioäpfeln an, bei denen der Reifehemmer 1-MCP nicht eingesetzt werden darf (Höhn *et al.* 2007). Die Anwendung der DCA in der Praxis bedingt aber, dass mit der vorhandenen Lagertechnik überhaupt so niedrige Sauerstoffwerte erreicht und geregelt werden können. Dazu braucht es sehr dichte Lagerräume, indirekte Kühlung und eine zuverlässige Regulierung der CA-Atmosphäre.

Abb. 7. Fruchtfleischfestigkeit von Golden Delicious nach Lagerung bei konstanten LO Bedingungen und DCA Lagerung (zweiter Pflückzeitpunkt).



Literatur

- Gasser F., Dätwyler D., Schneider K., Naunheim W. & Höhn E. 2003. Effects of Decreasing Oxygen Levels in the Storage Atmosphere on the Respiration of Idared Apples, *Proc. 8th Int. CA Conference*, Rotterdam, *Acta Hort.* **600**, 189-192.
- Höhn E., Baumgartner D., Crespos P. & Gasser F., 2007. Reifesteuerung und Apfellaagerung mit 1-Methylcyclopropen (MCP), *Agar-forschung* **14**, (5), 187-193.
- Prange R.K., DeLong J.M., Daniels-Lake B.J. & Harrison P.A.,

2005a. Innovation in controlled atmosphere technology, *Stewart Postharvest Review*. **3** (9), 1-11.

■ Prange R. K., DeLong J. M. & Harrison P. A., 2005b. Quality Management through Respiration Control: Is there a Relationship between Lowest Acceptable Respiration, Chlorophyll Fluorescence and Cytoplasmic Acidosis? *Proc. 5th Inter. Postharvest Symp., Acta Hort.* **682**, 823-830.

■ Schouten S.O.P., Prange R.K., Verschoor J., Lammers T.R. & Oosterhaven J., Improvement of Quality of Elstar Apples by Dynamic Control of ULO Conditions, *Proc. 7th Controlled Atmosphere Research Conference, Postharvest Horticulture Series* **16**, 71-78.

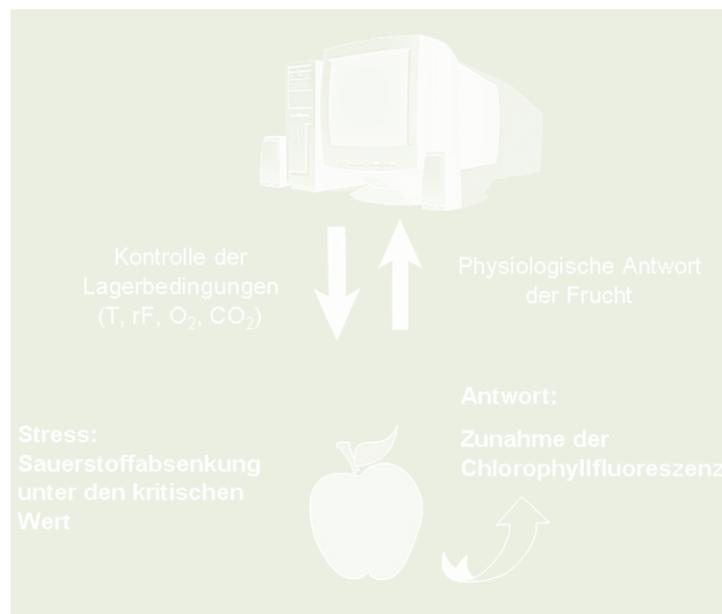


Abb. 8. Die dynamische CA-Lagerung als interaktive Lagermethode.

RÉSUMÉ

Contrôle de la concentration critique d'oxygène en conditions d'entreposage AC dynamique des pommes

Lors de l'entreposage de pommes en conditions AC dynamique (ACD), la teneur en oxygène est abaissée pas à pas. Le but est d'atteindre des valeurs en oxygène très basses afin de maintenir le mieux possible la qualité des fruits durant l'entreposage. La concentration en oxygène ne doit cependant pas passer en dessous d'un seuil critique, sinon la conséquence d'un manque d'oxygène, occasionnerait des dommages dans les fruits. Deux méthodes qui se basent sur des mesures du quotient respiratoire et de la fluorescence chlorophyllienne ont été testées pour déterminer ce seuil critique de concentration en oxygène de diverses variétés de pommes en conditions d'entreposage AC dynamique (ACD). Les deux méthodes ont donné des valeurs critiques identiques de concentration d'oxygène. Ces valeurs dépendent de la variété et se sont situées entre 0.2% et 0.4%. Dès que la valeur critique était atteinte, la concentration en oxygène a été augmentée de 0.2% à 0.3% au-dessus de ce seuil, afin de garantir toute sécurité lors du stockage. De cette manière, les fruits ont pu être maintenus et conservés environ 200 jours à des concentrations d'oxygène entre 0.3% et 0.6% sans dommage physiologique d'entreposage. La fermeté de la chair des fruits a été en général significativement plus élevée en conditions ACD par rapport à celles des fruits conservés dans le témoin en conditions AC constantes.

SUMMARY

Control of the critical oxygen level during dynamic CA storage of apples

The concept of dynamic CA storage (DCA) involves the reduction of the oxygen level in the storage atmosphere to near the lowest level tolerated by the fruit, the so-called anaerobic compensation point. Fruit quality loss during DCA storage is presumed to be slowed down compared to normal ULO storage. Storage conditions below the critical oxygen level will cause anaerobic conditions followed by severe quality losses in stored fruit. Two methods based on RQ and fluorescence signal $F-\alpha$ monitoring have been tested to detect the critical oxygen concentration (ACP) during dynamic CA-storage (DCA) of several apple varieties. Both methods yielded identical oxygen values for ACP. ACPs found were at concentrations as low as 0.2 – 0.4%, depending on the apple variety. After the critical oxygen limit was reached, the oxygen concentration was increased by about 0.1 – 0.3% above the critical limit. In this way, fruits were held for 200 days at oxygen levels of 0.3% to 0.6% without causing physiological disorders. Fruit firmness values of DCA stored apples were in general significantly higher than those of ULO-stored control fruit after storage for about 200 days.

Key words: *Malus domestica*, apple, low-oxygen tolerance, dynamic CA storage, anaerobic compensation point, respiration.