



Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee

GER-88213 Ravensburg-Bavendorf Germany

Phone: 0049(0)751 7903-315 Fax: 0049(0)751 7903322

www.kob-bavendorf.de

Abschlussbericht

„Integration und Synergie moderner Technologien für einen reduzierten Energieverbrauch und Vermeidung Lebensmittelverluste in der Obstlagerung“

Dr. Adriana Lugaresi, Dr. Felix Büchele, Dr. Daniel Neuwald

Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB)

Client: QS-Wissenschaftsfonds

18. Sep. 2025

Inhalt

Inhalt	- 2 -
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	- 3 -
Abstract.....	- 4 -
Material und Methoden	- 5 -
Versuchsdesign.....	- 5 -
Energetische Auswertung	- 7 -
In-situ Respirationsrate	- 7 -
Fruchtqualität und Packout	- 7 -
Ex-situ Respirationsrate und Ethylenproduktion.....	- 8 -
Profil flüchtiger Aromastoffe	- 9 -
Verkostung.....	- 9 -
Ergebnisse und Diskussion.....	- 10 -
Lagerdaten.....	- 10 -
In-situ respiration rate	- 13 -
Fruchtqualität	- 15 -
Pack-Out.....	- 20 -
Ex-situ Metabolismusintensität	- 21 -
Verkostung.....	- 23 -
Profil flüchtiger Aromastoffe	- 25 -
Zusammenfassung und Schlussfolgerung	- 27 -
Öffentlichkeitsarbeit	- 28 -
Budget	- 32 -
Anhang	- 34 -
Linear mixed model Koeffizienten	- 34 -
Referenzen	- 36 -

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1. Atmosphärische Bedingungen (Sauerstoff in rot und Kohlenstoffdioxid in blau) in den DCA-Lagervarianten.....	- 6 -
Abbildung 2. Typische Schadbilder bedingt durch Überreife (links, Mitte) sowie das Schadbild einer parasitären Lagerfäulnis beim Apfel.....	- 8 -
Abbildung 3. Relative tägliche Kühlzeiten bei 5°C (blau) im Verhältnis zur Referenz 1°C (schwarz).	- 10 -
Abbildung 4. Relative Luftfeuchtigkeit (%) in Abhängigkeit der Lagertemperatur	- 11 -
Abbildung 5. Energieverbrauch der Abtauheizung an den Verdampferlamellen und des Kältekreislaufes.....	- 12 -
Abbildung 6. Inter-CO ₂ -Scrubber Zyklen modellierte CO ₂ -Produktionsrate in mmol kg ⁻¹ h ⁻¹ über die Versuchsdauer hinweg in Abhängigkeit der Lagerbedingungen.	- 13 -
Abbildung 7. Violin Plot der Verteilung der CO ₂ -Produktionsraten über die komplette Lagerdauer in Abhängigkeit der Lageratmosphäre x Temperatur Kombination.	- 14 -
Abbildung 8. Monatlich gemessener Qualitätsabbau während der Langzeitlagerung.	- 16 -
Abbildung 9. Interaktionsplot der Qualitätsparameter Festigkeit, Säuregehalt und Grundfarbe nach 7 Tage shelf life bei 20°C.	- 19 -
Abbildung 10. CO ₂ -Produktionsrate während der shelf life Phase in Abhängigkeit von Sorte und vorhergehenden Lagerbedingungen.	- 21 -
Abbildung 11. Ethylen-Produktionsrate während der simulierten shelf life Phase in Abhängigkeit von Sorte und vorhergehenden Lagerbedingungen.	- 22 -
Abbildung 12. Ergebnisse der sensorischen Studie mit einem trained panel (n=15).	- 24 -
Abbildung 13. Heatmaps der flüchtigen Aromastoffe der drei Apfelsorten in Abhängigkeit der Lagerbedingungen	- 26 -
Abbildung 14. Impressionen zum Vortrag anlässlich des CAMA Symposium in den USA.....	- 28 -
Abbildung 15. Ausschnitte des Beitrags zum Tagungsband.	- 28 -
Abbildung 16. Impressionen zur Veranstaltung KOBstbau Tag mit ungefähr 100 Gästen aus landwirtschaftlicher Praxis und Vermarktung.....	- 29 -
Abbildung 17. Einblicke in das Lagerseminar 2025, umgesetzt durch Mittel der QS-Förderung.	- 30 -
Abbildung 18. Abstract aus dem Beitrag zum Postharvest Workshop in Palermo	- 31 -
Abbildung 19. Ausschnitte zu der laufenden Social Media Kampagnen zu Fortschritten und Meilensteinen im Projekt.	- 31 -
Tabelle 1. Kalkulierte sensible Wärme und Atmungswärme während der Abkühlphase in 24 h sowie der modellierte Stromverbrauch mit einem angenommen COP	- 12 -
Tabelle 2. Modellierte über die Saison aggregierte Wärmemenge generiert durch die Fruchtatmung.....	- 14 -
Tabelle 3. Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) Summary Table.....	- 17 -
Tabelle 4. Mittelwert und Standardabweichung physiologisch und parasitär bedingte Verluste in Abhängigkeit von Sorte und Lagervariante.....	- 20 -

Abstract

Kernobstarten wie Äpfel (*Malus domestica* Borkh.) und Birnen (*Pyrus communis*) gehören zu den beliebtesten gartenbaulichen Produkten in Deutschland hinsichtlich Konsum¹ aber auch Produktionsmengen und -flächen.² Die Kernobstbranche stellt somit für viele Regionen in Deutschland einen enormen wirtschaftlich bedeutenden aber auch kulturell und landschaftlich prägenden Faktor dar

Die Entwicklung moderner Lagersysteme erlaubt es mittlerweile regional-erzeugte Kernobstarten ganzjährig frisch zu halten und den Konsumenten zur Verfügung zu stellen. Die Lagerung ist somit ein essentieller Bestandteil des Obstsektors und finales Glied in der Wertschöpfungskette: Landwirtschaftliche Betriebe und Vermarktungsorganisationen können somit ihr Angebot auf aktuelle Marktentwicklungen anpassen, um Erlöse zu optimieren, saisonal-schwankende Verfügbarkeit auszugleichen und die ganzjährige Nachfrage nach frischen Obstarten zu bedienen und folglich die Abhängigkeit von Importware zu begrenzen.

Allerdings stellt die Obstlagerung ein kostenintensives Unterfangen dar, primär zurückzuführen auf den enormen Energieeinsatz sowie das hohe Risiko von Lebensmittelverlusten und folglich ausbleibenden Umsätzen. Kernobstarten werden traditionell auf Temperaturbereiche von -0,5° bis 2°C abgekühlt um die Metabolismus Intensität und damit zusammenhängend den Qualitätsabbau auszubremsen.³ Die Abkühlung der Produkte nach der Ernte und das anschließende Halten der niedrigen Temperaturbereiche durch kontinuierliches Betreiben der Kälteanlage setzt dabei einen erheblichen Energieaufwand voraus. Zusätzlich sind lange Laufzeiten von Lüftern bzw. Ventilatoren erforderlich, um die Klima-Bedingungen in den Lagerräumen zu homogenisieren. Technologien wie Stickstoffseparatoren und CO₂-Adsorber (Scrubber) zur Steuerung und Optimierung der Atmosphäre tragen zusätzlich zum erheblichen Energieverbrauch bei, stellen aber eine Voraussetzung für ein akzeptables Lagerergebnis dar.⁴

Inhalt dieses Projektvorhabens sind praxisnahe Forschungsmaßnahmen im Kontext der Obstlagerung. Durch den kombinierten Einsatz von innovativen Lagertechnologien soll der erhebliche Energiebedarf der Kühlung reduziert werden, sowie eine optimale Fruchtqualität während der Langzeitlagerung erhalten bleiben bei minimalen Verlusten. Dies soll zu einer höheren Wirtschaftlichkeit der regionalen Obstlagerung beitragen und die Marktposition gegenüber Importware stärken. Konzepte wie „dynamisch kontrollierten Atmosphäre (DCA)“ sowie der Ethylenhemmstoff 1-MCP reduzieren bekanntlich den Stoffwechsel von Äpfeln während der Lagerung und verlangsamen somit den reifebedingten Verlust von Qualitätsaspekten wie der Fruchtfleischfestigkeit, dem Säuregehalt, der Grundfarbe der Schale oder dem Gesundheitswert.^{5,6} Die Effekte der genannten Technologien in der Hemmung des Fruchtmetabolismus wird in der Praxis allerdings noch nicht für den Zweck von Energieeinsparungen eingesetzt.

Dem Projekt wird die Annahme zugrunde gelegt, dass durch den kombinierten Einsatz von DCA und 1-MCP, Kernobstarten wie Äpfel bei höheren Temperaturbereichen gelagert werden können, ohne den Qualitätsabbau und das Nachreifen zu beschleunigen.⁷ Eine Erhöhung der Lagertemperatur von Standardbereichen 0,5 bis 1,5°C auf 4,0 bis 6,0°C wird angestrebt.

Höhere Lagertemperaturen bedeuten per Definition eine geringere Wärmelast, die aus den Räumen entfernt werden muss, und folglich einen reduzierten Kühlbedarf. Dies soll im Endeffekt zu einem geringeren Energieverbrauch in der Langzeitlagerung beitragen, da der Betrieb der Kältesysteme für den primären Energieverbrauch im Nacherntebereich verantwortlich ist.⁴

Material und Methoden

Das Projektvorhaben wurde vom Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB) im Fachbereich Ernte, Lagerung und Fruchtqualität umgesetzt. Die Forschungstätigkeiten wurden im September 2024 aufgenommen. Für die Lagerversuche wurde auf Fruchtmaterial aus den Versuchsanlagen des KOB zurückgegriffen. Somit sind die Anbaubedingungen des Fruchtmaterials hinsichtlich Witterung, Kulturführung und Pflanzenschutzmaßnahmen bekannt und können in der Interpretation der Ergebnisse der Lagerversuche berücksichtigt werden. Der Lagerversuch erfolgte bis Ende Mai 2025. Nach Auslagerung erfolgte eine simulierte shelf life Phase für 7 bis 14 Tage bei 20°C. Dies stellt ein in der Forschung standardisiertes Vorhaben dar, um den Qualitätsabbau während der Vermarktungsphase und Transportwegen bewerten zu können.

Versuchsdesign

In diesem Projekt wurde die Interaktion der Variablen Apfelsorte x Lagertemperatur x Lageratmosphäre und Ethylenblocker untersucht. Da bekannt ist, dass sich Apfelsorten stark in ihrem Nachreifeverhalten und ihrer Lagerfähigkeit unterscheiden können, wurden die Untersuchungen mit drei verschiedenen Sorten durchgeführt:

- a) Jonagold
- b) Pinova
- c) Topaz

Die Sorten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer typischen Metabolismus-Intensität (Ethylenproduktionsrate und Atmungsintensität), dem Festigkeitsabbau, Verlust an Säuren und Empfindlichkeit gegenüber physiologischen und parasitären Lagerverlusten.^{8,9} Diese Betrachtungsweise soll gewährleisten, dass die im Projekt untersuchten Szenarien auf unterschiedliche Apfelsorten anwendbar sind.

Das Fruchtmaterial wurde entsprechend den Ernteempfehlungen des KOBs zum Zeitpunkt der optimalen Fruchtreife für eine Langzeitlagerung in kommerzielle Obstgroßkisten (~300 kg) geerntet und zu den Forschungslagern des KOBs transportiert. Das Fruchtmaterial wurde anschließend in drei verschiedene Kühllagerräume (53 m³ Dimension bzw. Kapazität >30 Großkisten) randomisiert aufgeteilt und auf die Zieltemperaturbereiche abgekühlt. Eine Schaltdifferenz von $\pm 0,5^\circ\text{C}$ wurde in den jeweiligen Kältesystemen eingestellt. Programmierung der Lüfterlaufzeiten war identisch zwischen den Lagersystemen und an die Kühllaufzeiten gekoppelt. Das Layout der Versuchslagerräume ist in einer vorhergehenden Veröffentlichung von Kitemann dargestellt.¹⁰

In den semi-kommerziellen Lagerräumen werden die folgenden Kombinationen aus Temperatur und Atmosphäre verglichen:

- i) 1°C CA-Lagerung (1,2 kPa O₂, 1,3 kPa CO₂)
- ii) 1°C DCA-Lagerung (dynamisch O₂, 1,3 kPa CO₂)
- iii) 5°C DCA-Lagerung (dynamisch O₂, 1,3 kPa CO₂)

Im Projekt wird auf die DCA-Methodik nach Thewes¹¹ zurückgegriffen. Ziel ist es dynamisch und kontinuierlich während der Lagerung, das „lower oxygen limit (LOL)“ des Fruchtmaterials zu bestimmen. Dies beschreibt den niedrigsten realisierbaren Sauerstoffwert, der die Respirationsaktivität und Ethylenproduktion der Früchte und somit den Qualitätsabbau auf ein Minimum reduziert, ohne das Fruchtmaterial zu beschädigen.¹² Ziel ist eine minimale Metabolismusaktivität die den minimalen Bedarf an Energie für das Aufrechterhalten von Zellfunktionen deckt. Wird das LOL unterschritten befinden sich die Früchte unter Sauerstoffstress (Hypoxia) und es herrscht Energiemangel,

was zur Aktivierung von Gärungsprozessen in der Frucht und der Bildung von Schadsymptomen wie Verbräunungen im Fruchtfleisch oder der Schale führen kann.¹³

Das LOL ist dabei abhängig von Faktoren wie der Sorte, dem Reifegrad, der Witterungsbedingungen während der Saison, und variiert während der Lagerung, muss also kontinuierlich bestimmt werden.¹⁴ Hierfür stehen verschiedene Methodiken zur Verfügung: Im Projekt wird periodisch die CO₂-Produktionsrate der Früchte unter Anpassung der Sauerstoffwerte im Raum gemessen. Mit niedrigeren Sauerstoffwerten sinkt die aerobe Atmungsaktivität und folglich die CO₂-Produktionsrate der Früchte. Sobald das spezielle LOL unterschritten ist, wechseln Früchte in die anaerobe Atmung und ein Anstieg der CO₂-Produktionsrate erfolgt. Diese Verhaltensweise des Fruchtmaterials lässt sich folglich nutzen, um Sauerstoffstress zu identifizieren. Die Bestimmung des LOL in DCA-Technologien erlaubt es folglich einen optimalen Sauerstoffwert kontinuierlich zu definieren, der einen besseren Qualitätserhalt der Früchte ermöglicht als eine statische Lagerung unter CA-Bedingungen (O₂ >1,0 kPa). Das Protokoll der Berechnung des LOL anhand Veränderungen in der CO₂-Produktionsrate wird über die Versuchslaufzeit zweimal wöchentlich ausgeführt. Hierfür wurde für einen Zeitraum von 10 bis 12 h die CO₂-Adsorption ausgeschaltet und anschließend das ΔCO₂ im Raum gemessen. Die Lagerdaten hinsichtlich Temperatur, Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration, Luftfeuchtigkeit und Laufzeiten der Kälte-, Ventilations- und Atmosphärentechnik wurde täglich überprüft, um sicherzustellen, dass die Sollbedingungen eingehalten werden.

Für jede Lagervariante und Apfelsorte wurde das Fruchtmaterial aufgeteilt in a) unbehandelt und b) behandelt mit dem Ethylenblocker 1-MCP (Dosierung 650 µL L⁻¹ für 24 h bei laufender Ventilation). Dieses Vorgehen erlaubt es Interaktionseffekte und mögliche Synergien zwischen Lagertemperatur, Atmosphäre und 1-MCP Anwendung festzustellen.

Eine weitere Versuchsvarianten wurden in Versuchscontainern (0.650 m³) eingelagert:

- iv) 3°C CA-Lagerung (1,0 kPa O₂, 2,5 kPa CO₂)

Die atmosphärischen Bedingungen in der DCA-Lagerung bei 1° und 5°C sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

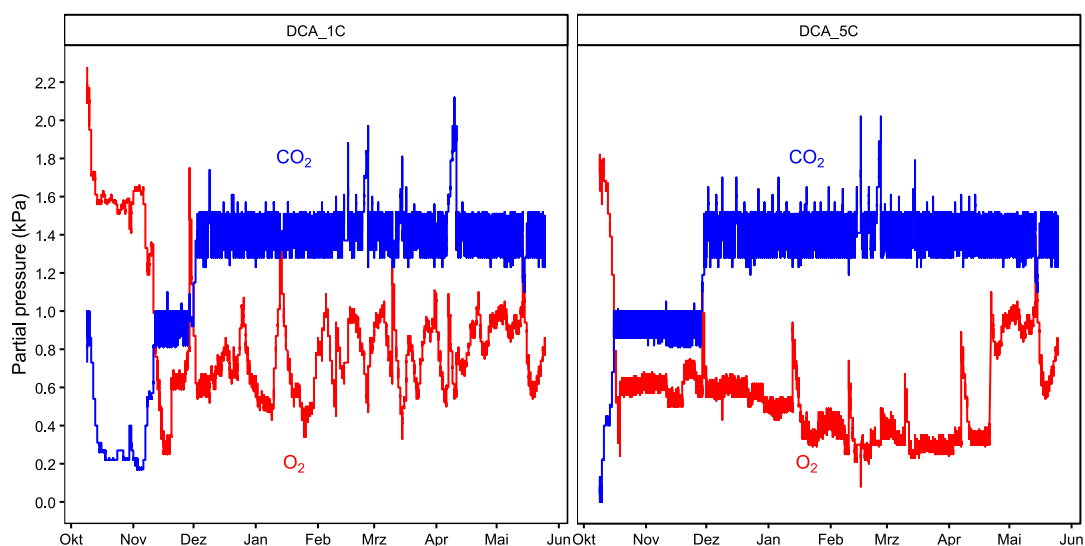


Abbildung 1. Atmosphärische Bedingungen (Sauerstoff in rot und Kohlenstoffdioxid in blau) in den DCA-Lagervarianten

In beiden DCA-Lagervarianten sind die Sauerstoffkonzentrationen auf Werte unter 1.0 kPa eingestellt worden. Zwischenzeitliche Peaks in den CO₂-Bedingungen sind auf die Durchführung des DCA-Protokolls zurückzuführen, also der Bestimmung der CO₂-Produktionsrate. Bei jeder Probenahme zur Überwachung des Qualitätsabbaus erfolgte ein Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen im Raum, die jedoch nach kurzer Zeit wieder korrigiert werden konnten (<48h).

Die Sollbedingungen wurden folglich über die Saison hinweg eingehalten.

Energetische Auswertung

Die Kühllagerräume besitzen unabhängige Kälteanlage und Steuerungssysteme; dies ermöglicht folglich für jede Lagervariante unabhängig eine Bilanz des Energieverbrauchs und Laufzeiten der Kälteanlagen, Ventilationstechnik sowie CA-Steuerungsmechanik erstellen zu können. Der elektrische Energieinput an den Kälteanlage wurde direkt an den Kompressoren kontinuierlich über die Lagerdauer hinweg erfasst. Zusätzlich wurde der Stromverbrauch der elektrischen Abtauheizung an den Verdampferlamellen aufgezeichnet. Da die Abkühlphase nicht zeitlich identisch umgesetzt werden konnte, ist diese Phase in den Messungen des Energieverbrauch nicht berücksichtigt. Wie in den späteren Ergebnissen beschrieben, ist hierfür ein theoretischer Modellansatz verfolgt worden.

In-situ Respirationsrate

Die CO₂-Produktionsrate in jedem Lagerraum wurde während des gesamten Lagerzeitraums kontinuierlich überwacht, um die Intensität des Fruchstoffwechsels zu beurteilen und daraus das Lagerpotenzial sowie die respiratorische Wärmeentwicklung in Abhängigkeit von Atmosphärenzusammensetzung und Temperatur abzuleiten. Hierfür wurde ein benutzerdefiniertes R-Skript entwickelt, das auf Basis der aufgezeichneten CO₂-Konzentration innerhalb jedes CO₂-Scrubber-Zyklus automatisch zwei Schlüsselmesspunkte identifiziert: (i) das minimale CO₂-Niveau unmittelbar nach dem Scrubbing und (ii) die erste CO₂-Messung, die einen vordefinierten Schwellenwert überschreitet und damit den nächsten Scrubbing-Vorgang auslöst. Die Gaskonzentrationen in jedem Raum wurden in Intervallen von etwa 60 bis 80 Minuten erfasst. Für jeden Zyklus wurde die CO₂-Produktionsrate berechnet, indem die Änderung des CO₂-Partialdrucks (Δp_{CO_2}) durch die zwischen den beiden Messungen verstrichene Zeit dividiert wurde. Diese Raten wurden anschließend nach Raum und Kalendertag gruppiert, um Tagesmittelwerte zu berechnen. Abschließend wurden die Werte in absolute molare Produktionsraten umgerechnet und als mmol kg⁻¹ h⁻¹ angegeben.

Die gemessene CO₂-Produktionsrate erlaubt es Schlüsse über die Metabolismusintensität und damit zusammenhängend den Qualitätsabbau sowie über die Atmungswärmeproduktion zu ziehen. Dieser Ansatz wurde im Zuge des QS-geförderten Projektvorhabens komplett neu etabliert.

Fruchtqualität und Packout

Während der Langzeitlagerung wurden monatlich Fruchtproben der verschiedenen Sorten aus den Versuchslagerräumen entnommen, um den Qualitätsabbau über Zeit in Abhängigkeit der Lagerbedingungen darzustellen. Mit der Öffnung der Versuchslagerräume Ende Mai erfolgte eine umfangreiche Analyse der bedeutendsten Qualitätsparameter Festigkeit, Säuregehalt, Grundfarbe der Schale und Gehalt löslicher Trockensubstanz. Die Grundschalenfarbe wurde mit einem Colorimeter (Modell CR-310, Konica Minolta, Chiyoda, Japan) bestimmt. Die Ergebnisse werden als Farbtonwinkel (*hue) angegeben. Die Fruchtfleischfestigkeit (FF) wurde mit einem halbautomatischen Penetrometer (Fruit Texture Analyzer GS15, GÜSS Manufacturing Pty Ltd., Strand, Südafrika) im äquatorialen Bereich an der Sonnen- und der Schattenseite der Äpfel gemessen. Hierzu wurde die Schale 1 mm tief entfernt und die Festigkeit mit einer Sonde von 11 mm Durchmesser bestimmt. Die Ergebnisse werden in Newton

angegeben. Anschließend wurden die Früchte zur Analyse der titrierbaren Säure (TA) und des Gehalts an löslichen Feststoffen (TSS) entsaftet. TSS wurden refraktometrisch bestimmt (Digitales Refraktometer PR-32a, Atago Co., Ltd., Tokio, Japan) und als % angegeben. Die Säure wurde mit demselben, nach der Filtration gewonnenen Fruchtsaft analysiert. Dazu wurden 10 mL Saft mit 100 mL destilliertem Wasser verdünnt und die Lösung mit 0,1 N NaOH bis pH 8,1 titriert (888 Titrand, 815 Robotic USB Sample Processor XL, Software: TiAmo, Metrohm AG, Herisau, Schweiz). Die Ergebnisse sind in g L^{-1} angegeben.

Zusätzlich wurde per Sortiermaschine bzw. manueller visueller Bonitur die Inzidenz von Lagerschäden in Abhängigkeit von Sorte und Lagervariante nach der Auslagerung analysiert. Dies beinhaltet parasitäre Verluste bedingt durch pathogene Pilzarten wie *neofabraea* spp. oder *Penicillium* spp., aber auch das Vorkommen von physiologischen Lagerkrankheiten wie Fleisch- oder Schalenbräunen bedingt durch Störungen des Stoffwechsels. Das sogenannte Packout, also Anteil an Früchten in einem vermarktbareren Zustand, dient somit als bedeutende ökonomische Bewertungsgrundlage einer Lagerstrategie.

Qualitätsanalysen sowie Fruchtbonituren wurden zur Auslagerung, sowie nach 7 und 14 Tagen shelf life bei 20°C umgesetzt.



Abbildung 2. Typische Schadbilder bedingt durch Überreife (links, Mitte) sowie das Schadbild einer parasitären Lagerfäulnis beim Apfel

Ex-situ Respirationsrate und Ethylenproduktion

Die Analyse der Frucht-Respirationsrate und der Ethylenproduktion erfolgte nach der Lagerung, während der simulierten 14-tägigen Vermarktungsphase bei 20 °C. Pro Wiederholung wurden vier Früchte gewogen und in 4,25-L-Glasgefäße gegeben, die kontinuierlich mit Umgebungsluft (20,9 kPa O_2 und 0,04 kPa CO_2) gespült wurden. Die Respirationsrate wurde durch Messung der CO_2 -Freisetzungsrates der Äpfel mit einem Infrarot- CO_2 -Analysator (Hartmann & Braun GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland) bestimmt. Die Ergebnisse werden in $\mu\text{g CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ angegeben. Für die Analyse der Ethylenproduktionsrate wurden die Gefäße anschließend für 2 h hermetisch verschlossen. Aus dem Kopfraum wurden 1-mL-Proben entnommen und in einen Gaschromatographen mit Flammenionisationsdetektor (GC-FID) injiziert, ausgestattet mit einer Edelstahl-Säule (60 mesh, 0,9 m $\times$ 1/8") mit aktivem Aluminiumoxid als Packmaterial (Fractovap Series 2150, Carlo Erba; Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA). Die Injektor- und Ofentemperaturen wurden auf 175 °C bzw. 100 °C eingestellt. Die Ergebnisse werden in $\text{ng kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ angegeben.

Messungen der Metabolismusintensität nach der Lagerung erlauben es das Nachreifeverhalten und den Qualitätsabbau während der Vermarktungsphase bzw. beim Konsumenten zu bewerten und in Kontext der Lagerbedingungen zu setzen.

Profil flüchtiger Aromastoffe

Die Zusammensetzung flüchtiger Stoffe (VOC) wie Aldehyde, Alkohole und Ester sind maßgeblich für das Aroma von Früchten verantwortlich. Aus vorhergehenden Studien ist bekannt, dass Lagerstrategien wie CA- und DCA-Lagerung oder die Anwendung von 1-MCP die Synthese dieser aromatischen Verbindungen beeinflussen bzw. beeinträchtigen können.¹⁵ Zur Validierung dieser energiesparenden Lagerstrategien muss daher berücksichtigt werden, ob sie mit einem negativen Effekt auf das Fruchtaroma verbunden sind. Aromauntersuchungen wurden nach 7 Tage shelf life umgesetzt.

Für die VOC-Analyse bestimmtes Fruchtmaterial wurde auf 1 °C abgekühlt. Pro Behandlung wurden drei Wiederholungen eingesetzt. Aus acht Früchten je Wiederholung wurden 10 mL Saft gewonnen, in 20-mL-Vials abgefüllt, eingefroren und bei -30 °C gelagert. Für die VOC-Analyse wurden die Proben aufgetaut; anschließend wurden 3 g NaCl zur Unterdrückung enzymatischer Reaktionen und Förderung der Freisetzung der flüchtigen Verbindungen sowie 10 µL einer 3-Octanol-Lösung (82,2 µg mL⁻¹) als interner Standard zugesetzt. Die flüchtigen Verbindungen wurden mittels Headspace-SPME extrahiert. Eine Divinylbenzene/Carboxen/Polymethylsiloxan-Faser (DVB/CAR/PDMS; 50/30 µm × 20 mm, Supelco Inc., Bellefonte, USA) wurde für über 60 min bei 35 °C und kontinuierlicher Rührung durch einen PTFE-Rührfisch dem Probengasraum ausgesetzt. Vor der Exposition der SPME-Faser wurden die Vials 10 min bei gleicher Temperatur temperiert. Die VOCs wurden mit einem Gaschromatographen gekoppelt an ein Massenspektrometer (GC/MS QP2010, Shimadzu, Kyoto, Japan) analysiert. Die Analyten wurden thermisch in den Injektor desorbiert, der im splitlosen Modus betrieben wurde (1 min splitlos, danach Splitverhältnis 1:20) bei 250 °C. Helium diente als Trägergas mit konstantem Fluss von 1,2 mL min⁻¹. Die Trennung erfolgte auf einer ZB-Wax-Kapillarsäule (30 m × 0,25 mm; 0,25 µm Filmdicke, Phenomenex Inc., Torrance, USA). Das Ofenprogramm startete bei 35 °C für 3 min, wurde anschließend mit 2 °C min⁻¹ bis 80 °C und danach mit 5 °C min⁻¹ bis 230 °C erhöht (Haltedauer 5 min). Das Massenspektrometer arbeitete im Elektronenionisationsmodus bei +70 eV; der Einzel-Quadrupol lief im Full-Scan-Modus (m/z 35–400). Die Identifizierung der VOCs erfolgte durch Vergleich der experimentellen Massenspektren mit der NIST-05-Bibliothek (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA). Zusätzlich wurden die experimentellen linearen Retentionsindizes (LRI) anhand der Retentionszeiten homologer Alkane (C7–C30, Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland) berechnet und mit Literatur-LRI verglichen. Die Konzentrationen der Einzelverbindungen wurden gemäß durch Vergleich der Peakfläche mit der des internen Standards bestimmt.

Verkostung

Zur Validierung der per GC-MS definierten Aromaprofile, wurde eine blinde Verkostung mit einem Trained-panel des Kompetenzzentrum Obstbau Bodensees umgesetzt. Hierfür wurden Früchte aus den Lagerbedingungen CA 1°C + 1-MCP, DCA 1°C + 1-MCP und DCA 5°C + 1-MCP zur Verkostung bereitgestellt. Lagervarianten und Sorten wurden nicht angegeben, das Versuchsmaterial war mit Codes anonymisiert und randomisiert auf Tellern zur Verfügung gestellt.

Die Teilnehmer der Studie wurden gebeten, die Früchte visuell und geschmacklich anhand der folgenden Parameter auf einer Skala von 1 bis 5 zu beurteilen: Aroma, Farbe, Geschmack, Knackigkeit, Optik, Saftigkeit, Säure, Akzeptanz für den Markt. An der Studie nahmen 20 Teilnehmer teil. Es wurde bewusst keine Umfrage mit Konsumenten umgesetzt, sondern mit „Supertastern“, welche ein besseres Verständnis zu den für den Markt erforderlichen Qualitätsaspekten mitbringen.

Ergebnisse und Diskussion

Lagerdaten

Die folgende Abbildung zeigt die täglichen Laufzeiten der Kälteanlage im Vergleich 1°C DCA und 5°C DCA. Die gemessenen Werte des 1°C Raums sind dabei als Referenz (schwarze horizontale Linie) dargestellt, normalisiert auf den Wert 1,0. In Farbe sind die täglichen Messungen des 5°C Raums im relativen Verhältnis aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem höheren Temperatur-Setpoint die Laufzeiten der Kälteanlage erheblich reduziert, werden können, stellenweise bis zu halbiert. Daraus wird ersichtlich, dass bei identischer Raumisolierung weniger Kühlung erforderlich ist, um einen höheren Sollbereich zu halten, trotz identischer Schaltdifferenz ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Bei einem geringeren ΔT zwischen Außen- und Innentemperatur ist folglich der Wärmeeinfall (Transmission) geringer.

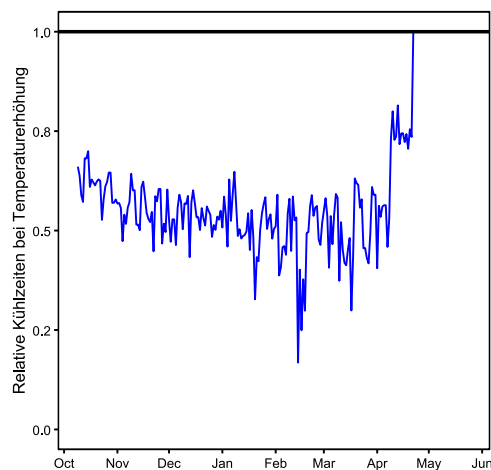


Abbildung 3. Relative tägliche Kühlzeiten bei 5°C (blau) im Verhältnis zur Referenz 1°C (schwarz).

Während reduzierte Laufzeiten der Kälteanlage hinsichtlich des Energieverbrauchs förderlich sind, kann zudem davon ausgegangen werden, dass durch weniger Kühltakte die Klimabedingungen im System Lagerraum konstanter bleiben. Fluktuationen der Temperatur und relative Luftfeuchten begünstigen Kondensationen auf den gelagerten Produkten und somit mikrobiellen Verderb.¹⁶ Zusätzlich limitieren tendenziell hoch gehaltenen Luftfeuchten den Masseverlust von Früchten durch Transpiration.¹⁷ Somit kann davon ausgegangen werden, dass höhere Temperaturen neben Energieeinsparungen auch sekundäre positive Effekte hinsichtlich der Qualität der Produkte bieten können. Prozentuale Masseverluste waren jedoch nicht Teil der Untersuchungen, somit können diese Annahmen nicht mit Daten belegt werden.

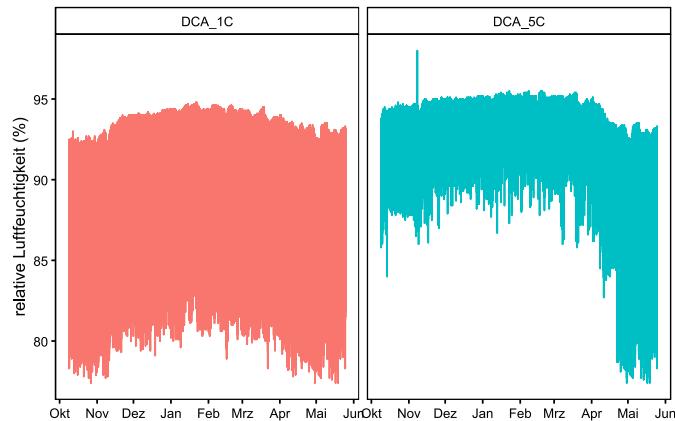


Abbildung 4. Relative Luftfeuchtigkeit (%) in Abhängigkeit der Lagertemperatur

Der Stromverbrauch der jeweiligen Kältesysteme wurde direkt an den Kompressoren gemessen. Die Messungen wurden erst nach der Abkühlphase begonnen, somit kann lediglich eine theoretische Modellierung der Energieeinsparungen in der ersten Vorkühlungsphase erstellt werden. Für diese Modellierung werden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

In der Berechnung der Wärmelast wird sich ausschließlich auf die Produktwärme des Fruchtmaterials fokussiert. Transmissionswärme und Wärme generiert durch die Motoren der Lüfter wird ausgeklammert bzw. als identisch zwischen den Räumen angenommen.

Sensible Wärmeenergie ergibt sich in dieser Betrachtung als:

$$Q = m * c_p * \Delta T \text{ [kJ]}$$

wobei

Q = Wärmeenergie

m = Masse: 11 000 kg

c_p = Spezifische Wärmekapazität 3,81 kJ (kg⁻¹ K⁻¹)

ΔT = Temperaturdifferenz = 15°, 17°, 19 K

Die durch Fruchtatmung generierte Menge CO₂ wird beim Basiswert 20°C mit einem Wert von 125,0 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ angenommen. Mit 10 K Temperaturabsenkung wird angenommen, dass sich die Respiration der Äpfel um den Faktor $Q_{10} = 2.5$ reduziert. Als Referenz für eine Abkühlkurve von Äpfeln in einem kommerziellen Obstlager wurden Literaturwerte von Hoffmann et. al (2024) genommen.¹⁸ Es ergibt sich daraus eine temperatur-exponentielle Respirationsrate, die stündlich ermittelt und anschließend auf die komplette Abkühlphase über 24h aggregiert wurde. Pro Mol CO₂ wurde eine Freisetzung von 470 kJ angenommen.¹⁹

Als Parameter für die Kälteanlage werden angenommen:

$$Carnot\ COP = \frac{T_{evap,K}}{T_{cond,K} - T_{evap,K}}$$

wobei

Verdampfungstemperatur $T_{evap} = a) 1^\circ, b) 3^\circ, c) 5^\circ$

Kondensationstemperatur $T_{cond} = 20^\circ\text{C}$

$$Real\ COP = Carnot\ Cop * \eta_{sys}$$

wobei

Systemwirkungsgrad $\eta_{sys} = 0,3$ (für R134a)

$$\text{Elektrische Kühlenergie } E_{el,cool} = \frac{Q}{COP_{real}}$$

Entsprechend dieser Modellierung nimmt die sensible Wärmelast, die aus dem Raum entfernt werden muss, mit einem geringeren ΔT nach Definition ab, während die von den Früchten generierte Atmungswärme mit höheren Temperaturbereichen und einer intensiveren Metabolismus Intensität zunimmt. Die Leistungszahl der Kälteanlagen nimmt dabei mit höheren Verdampfungstemperaturen zu. Insgesamt ist der ursprüngliche Energieverbrauch der Kälteanlage in der Abkühlphase durch einen höheren Temperatursollbereich von 3° bzw. 5°C im Verhältnis zum Referenzbereich 1°C um ~18 bis 34% verringert.

Tabelle 1. Kalkulierte sensible Wärme und Atmungswärme während der Abkühlphase in 24 h sowie der modellierte Stromverbrauch mit einem angenommen COP

ΔT	Sensible Wärme [kWh]	Atmungswärme [kWh]	Real COP	Stromverbrauch [kWh]
19°	221,2	38,5	4,3	60,0
17°	197,9	41,9	4,9	49,2
15°	174,6	45,9	5,6	39,7

Die tatsächlichen Messungen nach der Abkühlphase zeigen, dass der akkumulierte Energieverbrauch der Abtauheizung installiert an den Verdampferlamellen durch höhere Temperaturbereiche drastisch reduziert werden kann (um 46,7%). Verdampfungstemperaturen weiter entfernt vom Gefrierpunkt reduzieren folglich das Risiko von Vereisungen an den Verdampferlamellen Über die komplette Lagerdauer hinweg konnten der Energieeinsatz im Kältekreislauf an den Kompressoren um 36.9% durch höhere Temperaturbereiche reduziert werden. In absoluten Zahlen ist der Energieaufwand am Kompressor selbstverständlich wesentlich höher als der Abtauheizung. Da Vereisungen am Verdampfer allerdings die Kühlleistung und die Luftbewegungen beeinträchtigen und zudem auch die Luft im Raum zunehmend entfeuchten,²⁰ ist davon auszugehen dass ein geringes Vereisungsrisiko auch dem Qualitätserhalt der Produkte zuträglich ist. Der theoretisch-definierte Energieverbrauch in der Abkühlphase beträgt folglich ~ 5,0 bis 7,0 % des gesamten Stromverbrauchs der Kälteanlage über sie Saison hinweg. Hier muss allerdings auf die eingeschränkte Betrachtung hingewiesen werden, ohne Berücksichtigung der Transmissionswärme in der Modellierung der Abkühlphase.

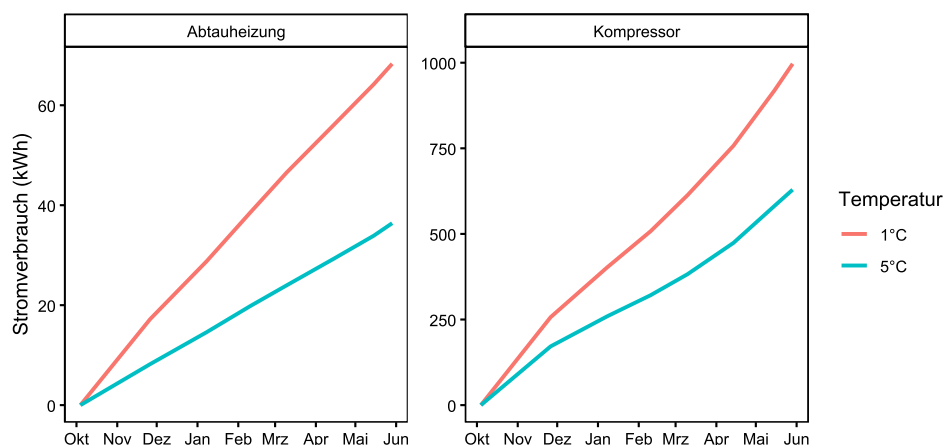


Abbildung 5. Energieverbrauch der Abtauheizung an den Verdampferlamellen und des Kältekreislaufes (Stromverbrauch an den Kompressoren) bei 1°C und 5°C unter DCA-Lagerung.

In-situ respiration rate

Die Ergebnisse der modellierten In-situ CO₂ Produktionsraten über die Lagerdauer hinweg sind in der folgenden Abbildung für die Lagerbedingungen i) CA 1°C, ii) DCA 1°C und iii) DCA 5°C abgebildet.

Es ist bemerkenswert, dass ausschließlich in der Variante DCA 5°C ein zeitlicher Trend in der Atmungsaktivität erkennbar ist. Während die CO₂-Produktionsrate zu Beginn der Lagerung von November bis Januar aufgrund der höheren Temperaturen noch höher lag als bei CA 1°C, nahmen die Werte generell über die Folgemonate ab. Mit fortschreitender Lagerung nimmt folglich die Sensitivität der gelagerten Früchte zu erhöhten Temperaturen ab. Selbstverständlich ist es auch möglich, dass die Früchte ihr Klimakterium während der Lagerung überschritten haben, und deswegen ein Rückgang der CO₂-Produktion festgestellt wurde. Für die Praxis ist diese Erkenntnis dementsprechend wertvoll, dass die Strategie von Einsparungen durch höhere Lagertemperaturen gegebenenfalls auch erst zu einem späteren Zeitpunkt umgesetzt werden kann, wenn das Fruchtmaterial weniger temperatur-sensitiv ist und das Risiko von negativen Effekten auf die Fruchtqualität geringer ist.

In der DCA 1°C Variante wurde eine niedrigere Atmungsaktivität der Früchte in Vergleich zur CA-Variante bei gleichen Temperaturbereichen gemessen. Im Prozess der Zellatmung wird O₂ als Oxidationsmittel genutzt, folgerichtig nimmt die Atmungsaktivität mit einer geringeren O₂-Verfügbarkeit in der Lageratmosphäre ab und zugleich die Qualitätsabbau Rate.¹² Zugleich wird die Produktion des Reifehormons Ethylen durch die extrem niedrigen O₂-Werte weiter limitiert.²¹ Im Vergleich der DCA-Varianten ist ein Effekt der Lagertemperatur festzustellen: Höhere Temperaturen erhöhten insbesondere in den frühen Phasen der Lagerung die tägliche CO₂-Produktionsrate.

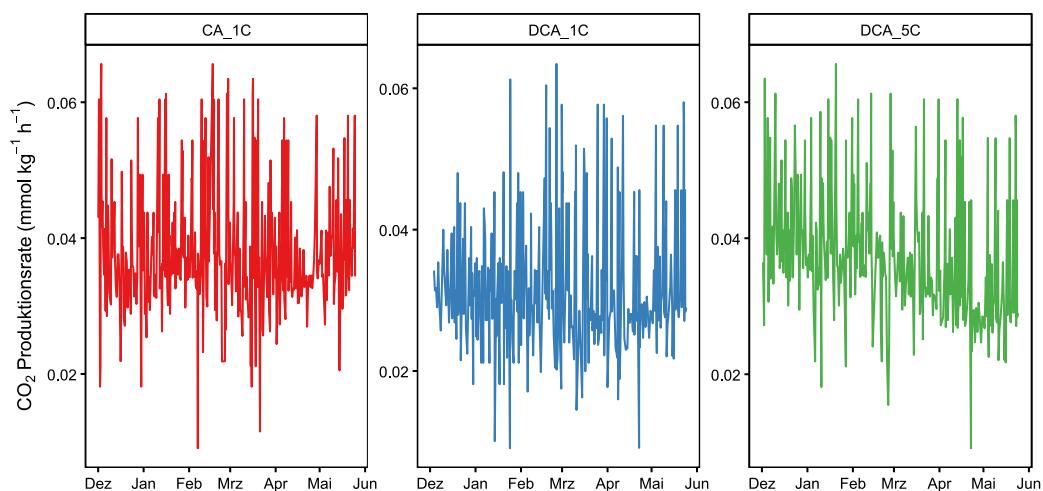


Abbildung 6. Inter-CO₂-Scrubber Zyklen modellierte CO₂-Produktionsrate in mmol kg⁻¹ h⁻¹ über die Versuchsdauer hinweg in Abhängigkeit der Lagerbedingungen.

Im Vergleich zur praxisüblichen Variante CA 1°C zeigt der unten abgebildete Violin Plot allerdings keinen signifikanten Unterschied. Somit hat die extreme Temperaturerhöhung auf 5°C unter DCA zwar im Vergleich zur 1°C DCA eine intensivere Metabolismusintensität zur Folge, im Vergleich zur praxisüblichen Lagerung unter statischen CA-Bedingungen sind allerdings keine signifikanten Unterschiede mehr festzustellen. Da eine korrelative Beziehung zwischen Atmungsintensität und Qualitätsabbau besteht, ist an diesem Punkt von einer vergleichbaren Fruchtqualität in der DCA-Lagerung auch bei deutlich erhöhten Temperaturbereichen ähnlich zur CA-Lagerung beim Referenzbereich 1°C auszugehen. Diese Modellierungen zeigen, dass moderne Lagertechnologien wie die DCA-Lagerung, auch

unabhängig von Temperaturanpassungen, einen enormes Energieeinsparungspotential im Vergleich zur praxisüblichen CA-Lagerung bieten. Eine geringere CO₂-Produktionsrate bedeutet zwangsläufig reduzierte Laufzeiten der CO₂-Scrubber sowie eine verringerte Wärmeproduktion im Lager und folglich Kühlbedarf. DCA-Technologien verbinden folglich einen optimalen Erhalt der Produktqualität, Verringerung von Seneszenz-bedingten physiologischen Fruchtschäden wie Schalenbräune oder Fleischbräune sowie ein erhebliches Potential für Energieeinsparungen in der Langzeitlagerung.

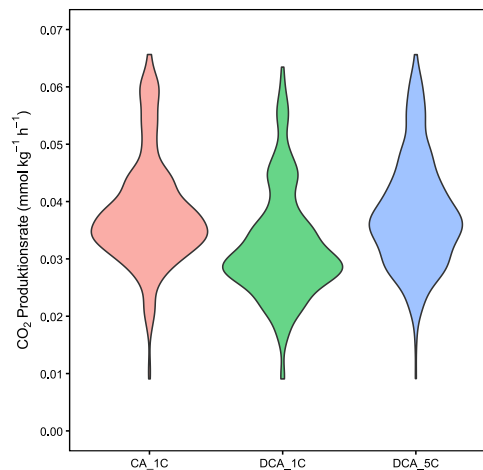


Abbildung 7. Violin Plot der Verteilung der CO₂-Produktionsraten über die komplette Lagerdauer in Abhängigkeit der Lageratmosphäre x Temperatur Kombination.

Anhand der modellierten CO₂-Produktionsraten in den unterschiedlichen Lagerbedingungen kann die Gesamtwärmeproduktion durch die Atmungsaktivität der Früchte über die Saison hinweg berechnet werden. Die Schlüsse sind demnach analog zur Interpretation der CO₂-Produktionsrate zu ziehen. Es wird ersichtlich, dass höhere Temperaturen durch die intensivere Metabolismus-Intensität der Früchte die Produktwärmelast erhöhen können. Neben den CO₂-Scrubber Laufzeiten ist dies ein Umstand, der in der Einordnung der Validität dieser Lagerstrategie berücksichtigt werden muss. Die Unterschiede zwischen CA 1°C und DCA 5°C sind dabei marginal, insbesondere ist allerdings die deutlich verringerte aggregierte Wärmeproduktion in der DCA-Lagerung auffallend.

Tabelle 2. Modellierter über die Saison aggregierter Wärmemenge generiert durch die Fruchtatmung

Treatment	Wärmemenge (kWh)
CA 1°C	~ 175,5
DCA 1°C	~ 147,5
DCA 5°C	~ 180,2

Fruchtqualität

Energieeinsparungen sind nur als zielführend zu betrachten, insofern sie nicht mit einer Beeinträchtigung der Qualität der gelagerten Produkte einhergeht. In der folgenden Abbildung ist der laufende Qualitätsabbau während Langzeitlagerung dargestellt. Es muss dabei von einem erheblichen Einfluss des Samplings bzw. der geringen Stichprobenmenge ausgegangen werden, da aus den Versuchsräumen während Lagerung nur eine niedrige Anzahl an Früchten entnommen werden konnte ($n=6$). Eine lokale Regression wurde über die Mittelwerte der gemessenen Werte gelegt, um den zeitlichen Verlauf darzustellen. Unrealistische Verläufe der Kurven wie beispielsweise ein zwischenzeitlicher Anstieg von Festigkeitswerten sind in der Regressionskurve daher tendenziell überrepräsentiert, und hängen primär mit dem Sampling und natürlichen Variationen im Fruchtmaterial zusammen.

Der generell intensivste Festigkeitsabbau wurde in der Sorte Jonagold festgestellt. Topaz zeigte ein geringeres Weichwerden, während die Festigkeitswerte in Pinova konstant blieben. Lediglich in Jonagold war ein negativer Einfluss der erhöhten Temperaturen hinsichtlich der Fruchtfleischfestigkeit festzustellen, wobei zur Auslagerung die Unterschiede zwischen den Lagerbedingungen geringer wurden. In Topaz zeigte DCA 1°C zwischenzeitlich einen vergleichsweise besseren Festigkeitserhalt. Zur finalen Messung Mitte Mai zeigten sich trotz der erhöhten Lagertemperatur bei DCA 5°C höhere Festigkeitswerte als in der praxisüblichen Variante.

Während der Langzeitlagerung nimmt der Säuregehalt ab, da diese als Substrat für die Fruchtatmung dienen.²² Eine vermeintlich gesteigerte Atmungsintensität durch erhöhte Lagertemperaturen kann folglich den Abbau an Säuren beschleunigen und das Geschmacksbild beeinträchtigen. Der Säureabbau war in Topaz am stärksten ausgeprägt, generell ist dies auch die säurebetonste Sorte in diesem Versuch. In Jonagold und Topaz scheinen leicht negative Effekte der erhöhten Temperaturen trotz DCA-Lagerung zu bestehen, in Pinova sind keine Unterschiede festgestellt worden.

Der Gehalt löslicher Trockensubstanz zeigte mit leichten Sortenunterschieden einen Anstieg während der Lagerung, was auf die Hydrolyse von eingelagerter Stärke in den Früchten sowie dem Abbau an Zellwandstrukturen zusammenhängt.^{23,24} Ein Einfluss der Lagerbedingungen wurde nicht festgestellt.

Die Grundfarbe der Schale wird typischerweise im Wert °hue gemessen. Während der Reife wird Chlorophyll in der Schale abgebaut, was einen Farbwechsel von einem als frisch wahrgenommen Grün zu einem schlussendlich gelben Farbton bedeutet. Niedrigere Werte stehen für einen intensiveren Gelbton der Schale. Während bei Pinova und Jonagold kein Einfluss der Lagerbedingungen festgestellt werden konnte, zeigt sich bei Topaz zum Ende der Lagerung ein negativer Effekt der höheren Lagertemperaturen. Dieser Trend war allerdings erst ab April festzustellen. Mit kürzeren Lagerdauern ist das Risiko von einem negativen Effekt der hohen Lagertemperatur somit reduziert.

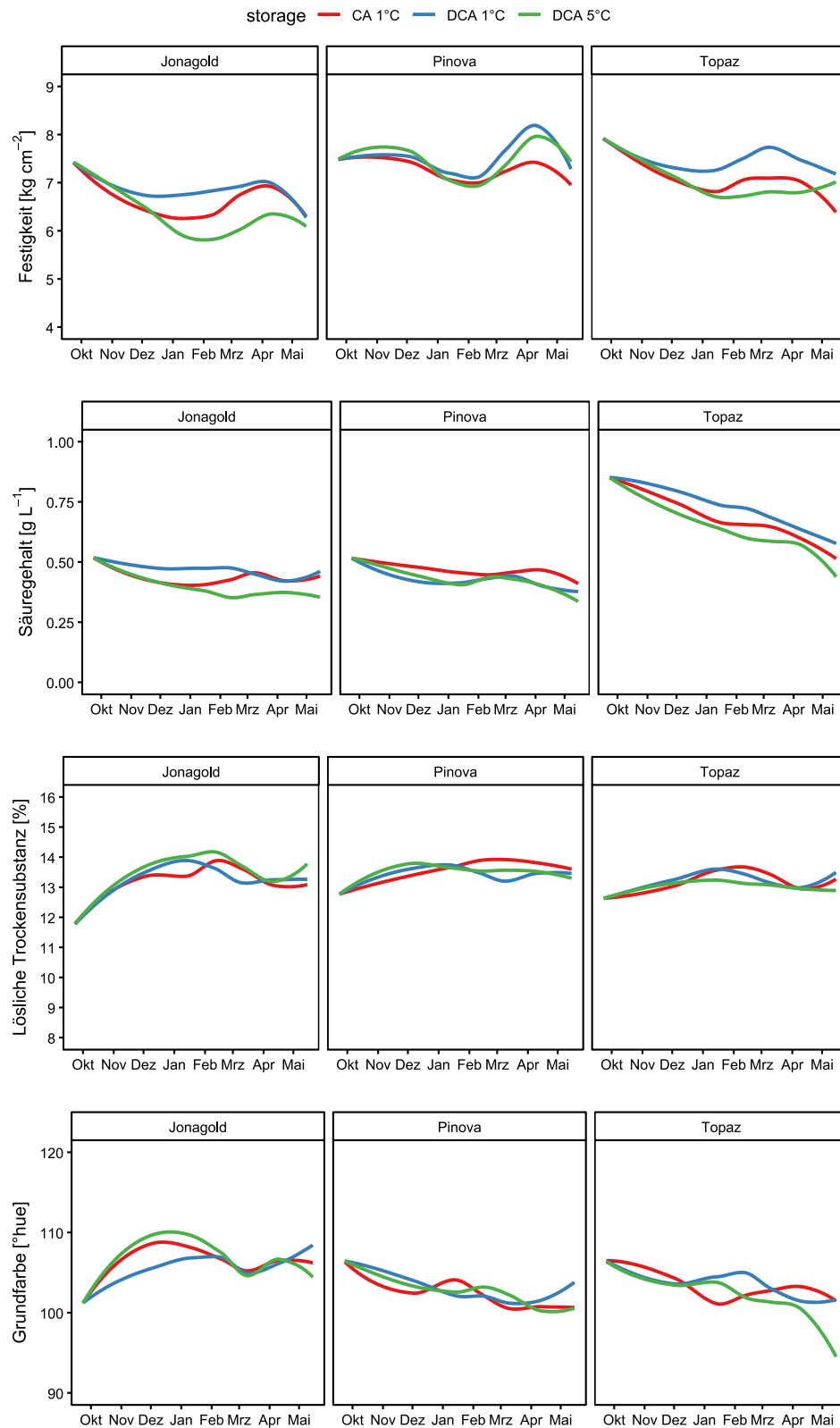


Abbildung 8. Monatlich gemessener Qualitätsabbau während der Langzeitlagerung in Abhängigkeit von Sorte und Atmosphären x Temperatur Kombination. LOESS Regression auf Mittelwerten von n = 6 Früchten.

Mit dem Zeitpunkt der Auslagerung Ende Mai wurden die verschiedenen Qualitätsparameter gemessen. Diese Messungen wurden während der simulierten shelf-life/Vermarktungsphase bei 20°C nach 7 und 14 Tagen jeweils wiederholt.

Um generelle Trends hinsichtlich der Interaktion Lagervariablen und Fruchtqualität festzustellen wurde eine multivariate Varianzanalyse (MANOVA) durchgeführt mit den Faktoren Apfelsorte, Temperatur, Atmosphäre und 1-MCP Behandlung und den abhängigen Variablen Festigkeit, Säuregehalt, Grundfarbe und Gehalt löslicher Trockensubstanz.

Es kann folgendes geschlussfolgert werden:

- (1) Temperatur, Atmosphäre und 1-MCP Behandlungen zeigten generell einen signifikanten Einfluss im Versuch
- (2) Der Effekt von Lagertemperatur ist abhängig davon ob 1-MCP eingesetzt wurde oder nicht. Ohne 1-MCP Einsatz ist er stärker ausgeprägt
- (3) Der Effekt von 1-MCP ist abhängig von der Lageratmosphäre: In der DCA-Lagerung ist der zusätzliche Vorteil von 1-MCP Behandlungen schwächer ausgeprägt als bei der Referenzvariante CA
- (4) Wie intensiv eine Temperaturerhöhung die Qualitätsparameter beeinflusst, ist stark sortenabhängig. Diese Feststellung ist für die Validierung dieser Strategie in der Praxis essentiell.
- (5) Der Effekt der Lageratmosphäre ist nicht signifikant von der jeweiligen Sorte abhängig.
- (6) Apfelsorten sind generell unterschiedlich sensitiv hinsichtlich 1-MCP Anwendungen und der Blockade der Ethylenrezeptoren. Jonagold reagiert auch aufgrund der deutlich stärkeren Ethylenproduktion stärker auf Anwendungen als Pinova und Topaz.

Tabelle 3. Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) Summary Table

> summary(man_mod, test = "Wilks")

Variable	Df	Wilks	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)	
Temp	2	0.32771	9.522	8	102	9.25E-10	***
Atmosphere	1	0.54178	10.783	4	51	2.07E-06	***
Treatment	1	0.13648	80.672	4	51	< 2.2e-16	***
Temp:Treatment	2	0.52156	4.905	8	102	3.83E-05	***
Atmosphere:Treatment	1	0.7617	3.989	4	51	0.006843	**
Temp:Cultivar	6	0.01034	20.213	24	179.13	< 2.2e-16	***
Atmosphere:Cultivar	2	0.85931	1.004	8	102	0.43766	
Treatment:Cultivar	2	0.29123	10.876	8	102	5.64E-11	***
Residuals	54						

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

In der folgenden Abbildung sind die Qualitätsparameter nach 7 Tagen shelf life bei 20°C dargestellt. Diese Vermarktungssimulation ist ein weltweit etablierter Standard in der Lagerforschung,^{25,26} um einen erwartbaren Qualitätsabbau nach Auslagerung bis zum Konsumenten zu simulieren. Da keine CA-Lagerung bei 5°C durchgeführt wurde, sowie keine DCA-Lagerung bei 3°C ist es grundsätzlich wichtig zu beachten, dass die Verbindungslinien der Messpunkte keine Regressionen bzw. Prognosen für nicht-gemessene Temperaturbereiche darstellen. Die Ergebnisse der einzelnen Qualitätsparameter wurden einem Linear mixed-effects model gefittet. Im Model wird wie im Abschnitt Material und Methoden beschrieben die Kombination Jonagold x 1°C x CA x ohne 1-MCP als Referenzvariante genommen. Die Model Estimates sind im Anhang zu finden, folgend sind die Messergebnisse visuell dargestellt.

Generell zeigen Jonagold und Topaz einen vergleichbaren Festigkeitsabbau, während in Pinova Werte weitestgehend stabil blieben, unabhängig von Lagervariante. Temperaturerhöhungen (3° und 5°C) wirken sich bei Jonagold am stärksten auf die Festigkeit aus, bei Topaz und insbesondere Pinova sind die Temperatureffekte signifikant schwächer ausgeprägt. DCA-Lagerung verbessert unabhängig von Sorte den Festigkeitserhalt im Vergleich zur CA-Lagerung. Der zusätzliche Nutzen von 1-MCP ist in der DCA-Lagerung schwächer ausgeprägt als in der CA-Lagerung. Dies ist insbesondere für die Bio-Produktion relevant, da dort 1-MCP als synthetisches Mittel nicht zugelassen ist. 1-MCP beeinflusst insbesondere bei Topaz und Jonagold den Erhalt der Festigkeit, bei Pinova ist der Einfluss aufgrund der ohnehin hohen Festigkeitswerte deutlich schwächer ausgeprägt – unabhängig von Lagertemperatur. Bei 3°C und CA zeigt 1-MCP einen größeren Effekt als bei 1°C CA.

Hinsichtlich Säuregehalts sind in Topaz signifikant höhere Werte als bei Jonagold und Pinova gemessen worden, dies hängt primär mit dem Genotyp und den Ausgangswerten zur Ernte zusammen. Temperaturerhöhungen resultieren zwar generell in einen intensiveren Säureabbau, allerdings ist dieser Effekt durch den Einsatz der DCA-Lagerung sowie insbesondere 1-MCP Anwendungen signifikant reduziert. Im Vergleich zu Jonagold sind die Temperatureffekte bei Pinova und Topaz deutlich schwächer ausgeprägt. Dies zeigt, dass diese Lagerstrategie nicht für jede Apfelsorte zwangsläufig geeignet ist. 1-MCP Anwendungen zeigen in der DCA-Lagerung eine leicht reduzierte Wirkung, somit ist bereits durch die extrem niedrigen Sauerstoffwerte ein im Vergleich zur CA-Lagerung verbesserter Erhalt der Säuren geboten. Sowohl bei Pinova als auch Topaz ist der zusätzliche Effekt der DCA-Lagerung schwächer ausgeprägt als bei der Referenzsorte Jonagold. Während bei Pinova der 1-MCP Effekt schwächer ausgeprägt ist als bei Jonagold, zeigen die Ergebnisse Topaz als generell sensibler.

Im Farbwechsel der Apfelschale von grün zu gelb durch den Abbau von Chlorophyll sind Temperatureffekte festzustellen: Während bei CA die Temperaturerhöhung von 1° auf 3°C einen leicht negativen Einfluss auf die Farbschale hat, kann durch den Einsatz der DCA-Lagerung sogar höhere Temperaturbereiche kompensiert werden. Sowohl Pinova als auch Topaz zeigen einen intensiveren Gelbton als die Referenzsorte Jonagold, was nicht zwangsläufig auf die Lagerbedingungen zurückzuführen ist, sondern auf den Genotyp. Denn bei beiden Sorten ist der negative Effekt höherer Temperaturen (5°C) schwächer ausgeprägt als bei Jonagold. Bei beiden ist die Wirkung von DCA und 1-MCP zudem signifikant stärker. Wie in den anderen Qualitätsparametern beobachtet ist der zusätzliche Nutzen von 1-MCP in der DCA-Lagerung schwächer ausgeprägt, wobei bei 5°C der Einsatz zur Kompensation des negativen Einflusses höherer Lagertemperaturen zur Begrenzung des unerwünschten Farbwechsels förderlich erscheint.

Grundlegen zeigen die Ergebnisse, dass der erhebliche Einfluss der jeweiligen Sorte in der Bewertung dieser Lagerstrategie berücksichtigt werden muss. Die im Projekt untersuchten Sorten Jonagold, Topaz und Pinova variieren stark in ihrer Temperaturempfindlichkeit bzw. der Sensitivität gegenüber der DCA-Lagerung und dem Einsatz von 1-MCP. Generell muss geschlussfolgert werden, dass die negativen Effekte von Temperaturbereiche um 5°C auch durch

die Kombination von DCA und 1-MCP nicht vollständig kompensiert werden können. 5°C ist generell auch als Extrembeispiel zu sehen, praxistaugliche Ansätze werden sich vermutlich, in Abhängigkeit von der Sorte, auf Bereich zwischen 2,5 bis 4,0 °C festlegen. Auch wenn somit von einem signifikanten Effekt der erhöhten Lagertemperatur ausgegangen werden muss, befinden sich die gemessenen Qualitätsparameter in allen Sorten weiterhin in einem für die Vermarktung akzeptablen Bereich. Zur Validierung dieser objektiven Labordaten zur Fruchtqualität, wurde zusätzlich eine Verkostung durchgeführt.

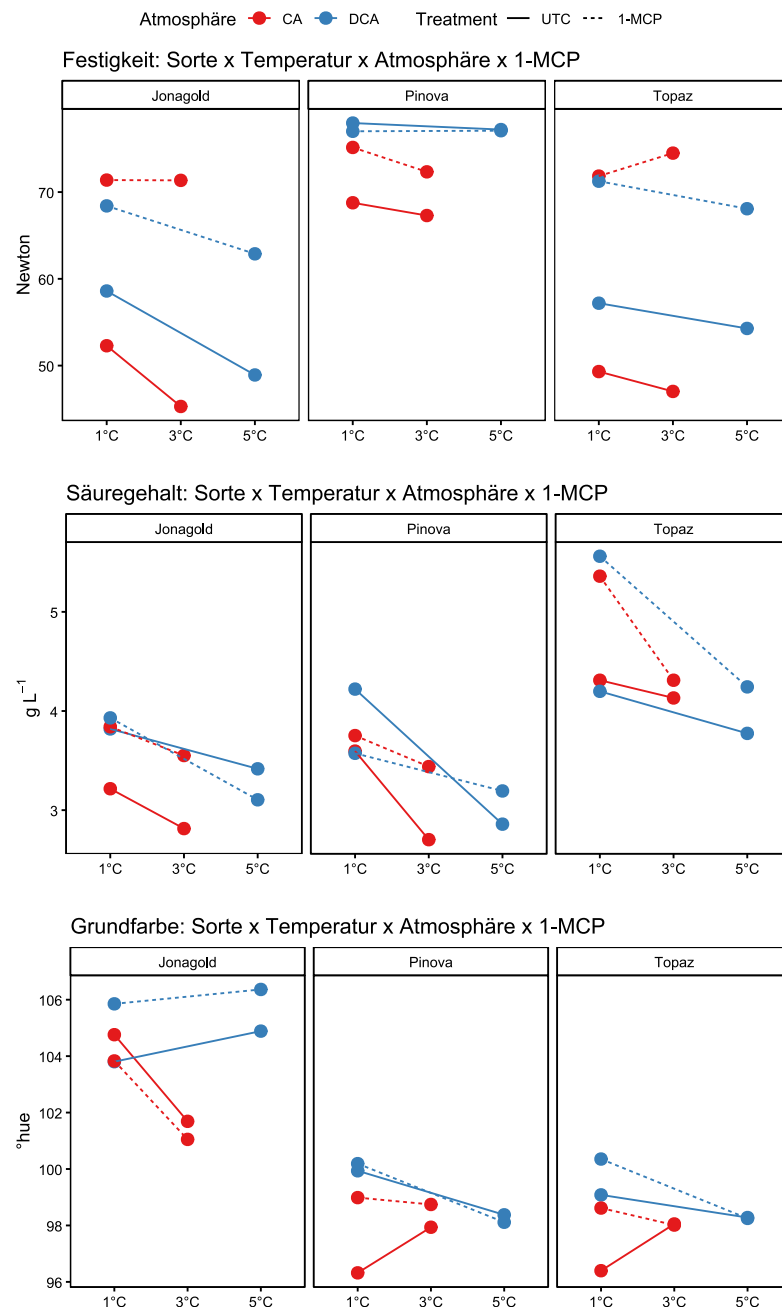


Abbildung 9. Interaktionsplot der Qualitätsparameter Festigkeit, Säuregehalt und Grundfarbe nach 7 Tage shelf life bei 20°C. Versuchsvariablen Temperatur (X-Achse), Sorte, Lageratmosphäre (CA rot, DCA blau) und 1-MCP Anwendung.

Pack-Out

Die Ergebnisse der Bonituren nach Lagerung zeigen einen wesentlichen Einfluss des Genotyps auf das Vorkommen von physiologischen Lagerkrankheiten und parasitären Lagerfäulen. Erschwert wird die Interpretation von stellenweise erheblicher Standardabweichung innerhalb eines Treatments (Lagerbedingung). Dies lässt auf einen starken Faktor biologische Variabilität schließen. Die Lagerbedingungen allein erlauben es somit nicht, das Risiko von Verlusten einzuschätzen und Vorerntefaktoren bzw. der erhebliche Sorteneinfluss müssen berücksichtigt werden.

Für Topaz konnte unabhängig der Lagervariante ein höheres Risiko von Fleisch- und Kernhausbräune festgestellt werden. Interessanterweise war bei dieser Sorte die Inzidenz von Fleischbräune bei erhöhten Lagertemperaturen reduziert. Ob dies ein tatsächlich positiver Einfluss von erhöhten Lagertemperaturen darstellt, muss allerdings noch bestätigt werden. Niedrige Temperaturen im Lager können bei einzelnen Sorten zu Kälteschäden führen, und tragen zu oxidativem Stress in der Frucht bei. Somit kann ebenso argumentiert werden, dass die höheren Temperaturbereiche bei Kälte-empfindlichen Apfelsorten vorteilhaft sind.

In Jonagold und Pinova wurde kein einheitlich negativer Effekt von erhöhten Lagertemperaturen hinsichtlich Fleischbräune-Symptome beobachtet werden. Allerdings wurde bei Pinova vermehrt Bräunesymptome im Kerngehäuse beobachtet, vermutlich ein Symptom zurückzuführen auf eine Überreife. Bei Jonagold wurde dieser Effekt nicht einheitlich beobachtet, bei Topaz war die Performance höherer Temperaturen vergleichbar wie bei CA 1°C.

Hinsichtlich Fäulnis zeigte sich ein leichter Trend, dass höhere Temperaturen die Ausbreitung pathogener Pilzarten fördern kann. Dem gegenüber stehen Studien aus der Vergangenheit, die zeigten, dass insbesondere bei Pinova eine leicht erhöhte Lagertemperatur zu geringeren Fäulnisproblemen führen kann.²⁷ Grundsätzlich muss geschlussfolgert werden, dass bei Sorten die grundlegend eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Lagerfäulnis und Pathogene wie *neofabraea* spp. und *Penicillium* exp. aufweisen, höhere Lagertemperaturen kritisch betrachtet werden müssen.

Tabelle 4. Mittelwert und Standardabweichung physiologisch und parasitär bedingte Verluste in Abhängigkeit von Sorte und Lagervariante.

Sorte	Treatment	Fleischbräune	Kernhausbräune	Fäulnis
Jonagold	CA 1°C + 1-MCP	0.0 ± 0.0 %	0.4 ± 0.8 %	3.5 ± 1.9 %
	DCA 1°C + 1-MCP	1.6 ± 0.5 %	0.0 ± 0.0 %	1.7 ± 0.6 %
	DCA 5°C + 1-MCP	3.4 ± 1.2 %	2.1 ± 1.9 %	4.1 ± 2.0 %
Pinova	CA 1°C + 1-MCP	0.0 ± 0.0 %	0.0 ± 0.0 %	13.0 %
	DCA 1°C + 1-MCP	0.0 ± 0.0 %	0.0 ± 0.0 %	11.3 %
	DCA 5°C + 1-MCP	0.0 ± 0.0 %	9.6 ± 2.0 %	17.4 %
Topaz	CA 1°C + 1-MCP	16.2 ± 22.3 %	74.8 ± 30.2 %	3.5 ± 1.1 %
	DCA 1°C + 1-MCP	19.2 ± 27.2 %	55.1 ± 42.7 %	3.7 ± 0.8 %
	DCA 5°C + 1-MCP	3.7 ± 3.1 %	71.8 ± 14.6 %	11.4 ± 7.8 %

Die Metabolismus Intensität während der simulierten Vermarktungsphase sowie der Effekt der jeweiligen Lagerbedingungen zeigte sich als stark sortenabhängig. Für Jonagold wurde unabhängig der Lagervariante grundlegend eine höhere Respirationsrate als bei Pinova und Topaz gemessen. Die niedrigste Ex-situ Atmungsaktivität wurde bei einer DCA-Lagerung bei 1°C gemessen. Im Falle der CA-Lagerung unterschieden sich die beiden Temperaturbereiche nicht signifikant. Interessanterweise wurde für DCA 5°C eine signifikant höhere CO₂-Produktionsrate nach 10 Tagen shelf life gemessen. Somit ist ein negativer Effekt dieser deutlich erhöhten Lagertemperaturen erst nach einer längeren Vermarktungsphase bei Jonagold festzustellen.

Die Sorte Pinova zeigte grundlegend die niedrigere Atmungsaktivität nach der Langzeitlagerung. Generell scheinen die gemessenen Werte einen abnehmenden Trend aufzuweisen, ein Indiz, dass unabhängig von Lagervariante das Klimakterium der Früchte bereits überschritten war. Für DCA 1°C + 1-MCP wurden mit längerer Vermarktungsphase steigende CO₂-Produktionsraten festgestellt. Dies legt die Annahme nahe, dass die Früchte in dieser Variante in ihrer Reife weniger weit fortgeschritten waren und das Klimakterium noch nicht erfolgt war. Generell zeigt sich kein negativer Einfluss von höheren Temperaturen bei dieser Sorte.

Für Topaz wurde interessanterweise die höchste Atmungsaktivität bei CA 1°C + 1-MCP gemessen. Dies stellt kein nachvollziehbares Ergebnis dar, da für CA 3°C 1-MCP mindestens gleichwertige, wenn nicht sogar höhere Werte erwartet werden müssten. Möglicherweise ist dieser Effekt auf die gewählte Stichprobe zurückzuführen. DCA-Lagerung zeigte für Topaz keinen zusätzlichen Vorteil im Vergleich zur statischen CA-Lagerung. Höhere Lagertemperaturen bewirkten keine intensivierte CO₂-Produktion während shelf life.

Respirationsrate mit LOESS Kurve

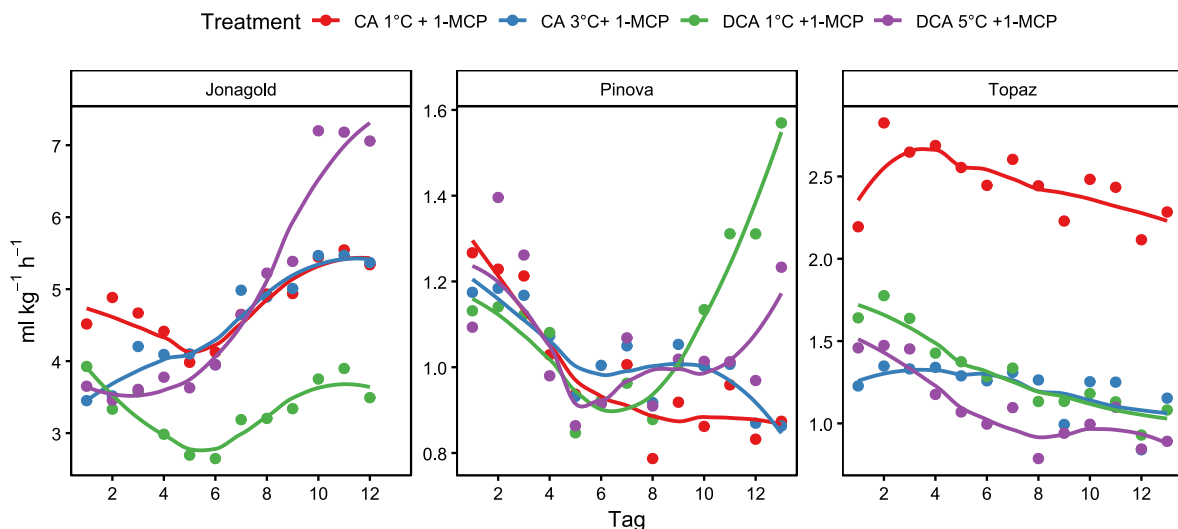


Abbildung 10. CO₂-Produktionsrate während der shelf life Phase in Abhängigkeit von Sorte und vorhergehenden Lagerbedingungen.

Hinsichtlich Ethylenproduktionsrate zeigte Jonagold deutlich höhere Werte, unabhängig von der Lagervariante. Die niedrigste Ethylenproduktion wurde in der Variante DCA 1°C + 1-MCP festgestellt. CA-Lagerung oder erhöhte Temperaturen intensivierten die Produktion. Interessanterweise waren die Werte von DCA 5°C + 1-MCP vergleichbar wie CA 1°C + 1-MCP. Wie zuvor bereits diskutiert, scheint DCA-Lagerung den Temperatureffekt dahingehend zu

kompensieren, dass die Aktivität der Früchte auf einem Niveau wie bei einer CA-Lagerung bei Standardtemperaturbereichen ist. 3°C resultierte in einer höheren Ethylen-Produktion in CA-Bedingungen, selbst bei 1-MCP Anwendung. Dies verdeutlicht erneut das große Potential und der zusätzliche Nutzen der niedrigen Sauerstoffwerte in der DCA-Lagerung.

Ethylen wurde bei Pinova nur in Spuren gemessen, ein Einfluss der Lagerbedingungen lässt sich folglich nicht identifizieren. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass die Y-Achsen der Sorten unterschiedlich skaliert sind.

Für Topaz wurden ähnliche Beobachtungen gemacht, allein in CA 1°C + 1-MCP wurde Ethylen gemessen, mit einem tendenziellen Anstieg während der shelf life Phase.

Grundlegend reagieren somit alle Sorten positiv auf den Einsatz von 1-MCP, wobei aufgrund der fehlenden Kontrollvariante der Effekt nicht isoliert werden kann. 1-MCP blockiert die Ethylen-Rezeptoren in Früchten und somit die Wirkungskaskade. Dennoch, insbesondere aufgrund der autokatalytischen Produktionsdynamik von Ethylen in Äpfeln, und der generell runtergefahrenen Expression von Genen involviert in der Ethylensynthese, kann der Einsatz von 1-MCP auch generell mit einer niedrigeren Produktion verbunden sein.

Ethylen-Produktion mit LOESS-Trendkurve

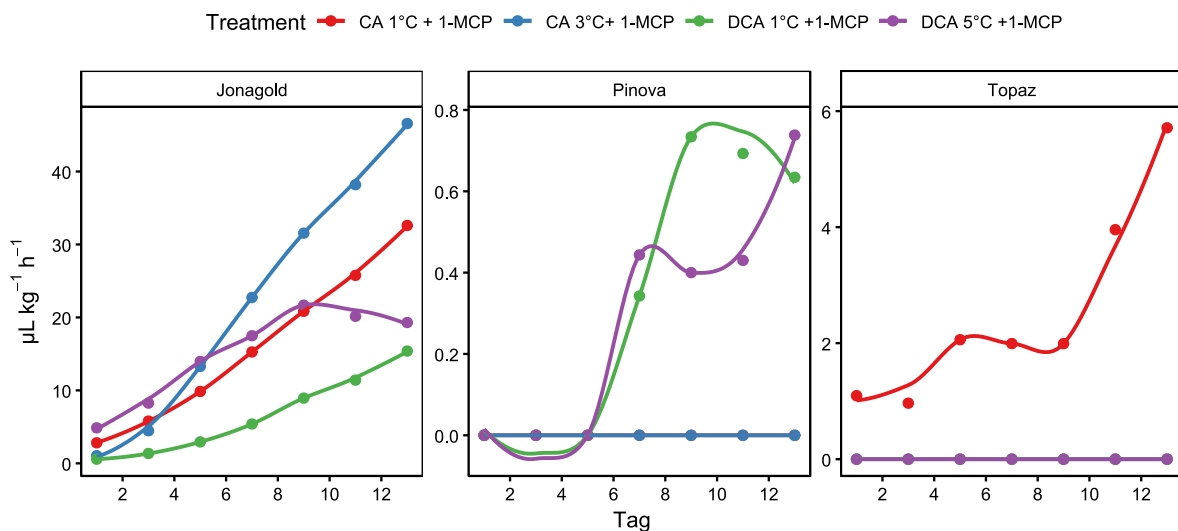


Abbildung 11. Ethylen-Produktionsrate während der simulierten shelf life Phase in Abhängigkeit von Sorte und vorhergehenden Lagerbedingungen.

Verkostung

Mit Abschluss der 7 Tage Vermarktungssimulation wurde eine blinde Verkostung mit einem Trained-Panel des Kompetenzzentrums durchgeführt. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse auf einer Benotungsskala von 1 bis 5 dargestellt. Ziel der Verkostung war es, mögliche negative Effekte der erhöhten Lagertemperaturen hinsichtlich des Geschmacksbild sowie der Optik der Früchte festzustellen. Somit steht nicht die Erwartungshaltung, dass die Variante 5°C + DCA besser in der Verkostung abschneiden muss, lediglich nicht signifikant schlechter.

Die generell optische, aber auch visuelle Akzeptierbarkeit der Äpfel war in keiner Sorte durch höhere Temperaturen negativ beeinflusst, interessanterweise zeigte sich ein leicht positiveres Bild bei Topaz und Jonagold in der Variante DCA 5°C. Die Lagerung unter erhöhten Temperaturen zeigte bei allen Sorten ein mindestens gleichwertiges bis zu tendenziell leicht besserem Aroma als in den Vergleichsvarianten. Die Schalenfarbe der Früchte wurde generell positiv eingeschätzt, lediglich bei Pinova zeigte sich eine leicht negative Tendenz durch höhere Temperaturen. Dies ist in der Hinsicht überraschend, da bei Topaz eine intensivere Gelbfarbe im Labor gemessen wurde, die für gewöhnlich von Konsumenten als Überreif wahrgenommen wird.²⁸ Die durch Laborgeräte festgestellten Unterschiede treten anscheinend bei einem Panel nicht signifikant hervor. Zudem wurde eine ganzheitliche Bewertung der Optik des Fruchtmaterials abgefragt; bei Jonagold schnitt die DCA 1°C Variante tendenziell am besten ab. Für Topaz lag die Variante mit höheren Temperaturen im Mittelfeld bzw. bei Pinova schnitt sie am schlechtesten ab, wobei die Unterschiede marginal waren. Hinsichtlich der Textur des Fruchtfleischs, in der Verkostung als Knackigkeit betitelt, schnitt DCA 5°C bei Topaz und Jonagold deutlich besser ab als die beiden Vergleichsvarianten. In der Sorte Pinova schnitt CA 1°C tendenziell am besten ab, wobei die Unterschiede zwischen den Varianten geringfügig ausfielen. Damit zusammenhängend wurde der Faktor „Saftigkeit“ des Fruchtmaterials als Bewertungsparameter berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen generell keinen negativen Effekt der höheren Lagertemperaturen, unabhängig von Sorte. Bezüglich des Parameters Säure schnitten bei Topaz die DCA-Varianten, unabhängig von Lagertemperatur, positiver ab als die CA-Variante. Da Topaz tendenziell eine eher Säure-lastige Sorte ist, kann argumentiert werden, dass die höheren Temperaturen mit einem intensiveren Säureabbau zu einem ausgewogeneren Geschmack geführt haben. In Jonagold wurden vergleichbare Beobachtungen gemacht, während bei Pinova kein signifikanter Unterschied erkennbar war.

Grundsätzlich kann geschlussfolgert werden, dass der Einfluss der Lagerbedingungen auf die optische- und geschmackliche Qualität der Früchte stark von den Sorten abhängig ist, jedoch kein einheitlich negativer Effekt durch höhere Temperaturen bei einer DCA-Lagerung mit 1-MCP Einsatz festgestellt werden konnte.

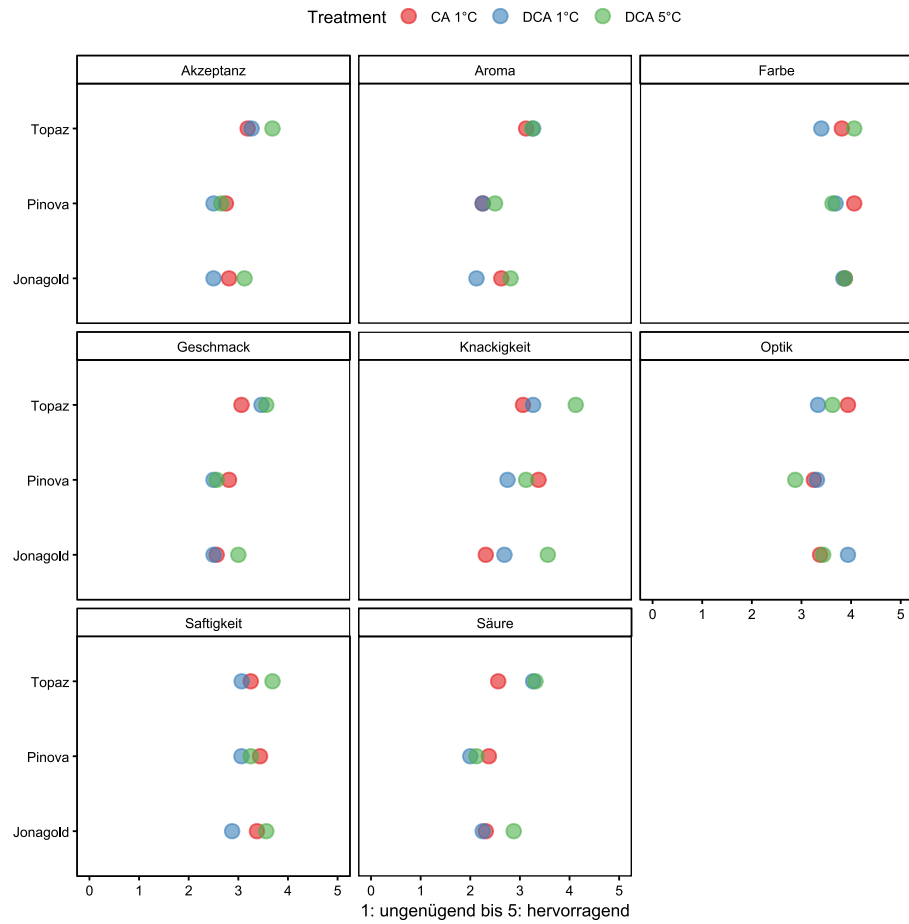


Abbildung 12. Ergebnisse der sensorischen Studie mit einem trained panel (n=15).

Profil flüchtiger Aromastoffe

In den verglichenen Datensätzen zeigen sich klare, über die drei Sorten hinweg überwiegend konsistente Muster — zugleich aber wichtige sortenspezifische Unterschiede in Basiskonzentrationen und in der Stärke, mit der Lagerfaktoren wirken.

Generell und über alle Sorten hinweg reduziert die 1-MCP-Behandlung systematisch die Konzentrationen zahlreicher Ester und primärer Alkohole. Beispiele aus den Daten: Hexyl-acetat fällt bei Pinova von ~633 auf ~42 (Mittelwerte ohne vs. mit MCP) und bei Jonagold von ~581 auf ~92; 2-Methylpropyl-acetat reduziert sich bei Pinova von ~25.3 auf ~8.0 und bei Jonagold von ~15.8 auf ~4.2. Ebenso sinken 1-Hexanol und 1-Butanol deutlich in allen drei Sorten (z. B. 1-Hexanol: Pinova ~55.7 → 12.7, Jonagold ~90.9 → 34.6, Topaz ~109.4 → 35.1). Diese Effekte sind statistisch robust (p -Werte für den MCP-Haupteffekt in den untersuchten Verbindungen häufig $\ll 0.01$) und deuten darauf hin, dass die Blockade der Ethylenwirkung die enzymatische Ester- und Alkoholbildung stark dämpft.

Trotz dieser gemeinsamen Tendenz existieren deutliche sortenspezifische Unterschiede in Ausmaß und Kontext der Effekte:

Größenordnung der Basiskonzentrationen: Topaz und Jonagold zeigen in einigen Verbindungen (z. B. 1-Hexanol) höhere Ausgangswerte als Pinova; die absoluten Reduktionen durch MCP sind daher oft größer, bleiben aber proportional vergleichbar.

Kontextabhängigkeit durch Temp $\times$ Atmosphäre: Für Ethanol und mehrere Alkohole wurden signifikante Interaktionen zwischen Temperatur und Atmosphärenführung vor allem in Pinova und Topaz nachgewiesen (z. B. Temp $\times$ Atmosphäre für Ethanol: Pinova $p \sim 7e-6$, Topaz $p \sim 0.027$), während Jonagold in diesen spezifischen Wechselwirkungen schwächer reagiert. Praktisch bedeutet das: Ethanol-Peaks treten vornehmlich in bestimmten Kombinationsbedingungen (z. B. DCA bei höheren Temperaturen) auf — und diese Konstellationen unterscheiden sich in ihrer Relevanz je Sorte.

MCP ist nicht immer rein additiv: In mehreren Fällen interagiert MCP mit Temperatur oder Atmosphärenart (signifikante MCP:Temp oder MCP:Atmosphäre-Terme), sodass die hemmende Wirkung von MCP auf flüchtige Verbindungen von der konkreten Lagerkonstellation abhängt. Beispielsweise zeigt Pinova bei 1-Butanol eine signifikante MCP:Temp-Interaktion ($p \sim 0.009$), Topaz zeigt eine signifikante MCP:Atmosphäre-Interaktion für 1-Butanol ($p \sim 0.02$). Das heißt: MCP reduziert die Verbindung zwar generell, die Stärke dieser Reduktion variiert mit Temp oder CA/DCA.

Aus diesen Befunden ergeben sich drei zusammenfassende Aussagen zur Wirkung der Lagerfaktoren über die drei Sorten:

- (1) 1-MCP ist ein starker, generalisierbarer Inhibitor der Ester- und Alkoholbildung, mit großen absoluten und relativen Reduktionen über alle betrachteten Sorten hinweg. Dadurch ist mit einer merklichen Abschwächung fruchtiger Ester-Noten zu rechnen.
- (2) Temperatur und Atmosphärenführung modulieren die Bildung flüchtiger Verbindungen in sortenspezifischer Weise. Bei Pinova und Topaz zeigen sich klare Temp $\times$ Atmosphäre-Effekte (insbesondere für Ethanol und einige Alkohole), während Jonagold in den vorliegenden Messungen weniger stark kontextabhängig reagiert. Höhere Temperaturen unter DCA begünstigen z. T. die Akkumulation alkoholischer Nebenprodukte (z. B. Ethanol), wobei MCP diese Peaks abschwächen kann — aber nicht immer vollständig eliminiert.
- (3) Die Kombinationen aus Sortencharakteristik und Lagerbedingungen bestimmen das qualitätsrelevante Ergebnis. Topaz und Jonagold können höhere absolute Gehalte bestimmter Alkohole/ester aufweisen, sodass dieselbe

relative Reduktion durch MCP unterschiedliche sensorische Konsequenzen hat (bei Topaz bleibt trotz Reduktion oft noch mehr Restkonzentration als bei Pinova). Zudem führen unterschiedliche Wechselwirkungsstrukturen dazu, dass eine Lagerstrategie (z. B. DCA + leicht höhere Temperatur + MCP) bei einer Sorte günstige Textur-/Aroma-Kompromisse ergibt, bei einer anderen Sorte hingegen zu unerwünschten Aromeveränderungen.

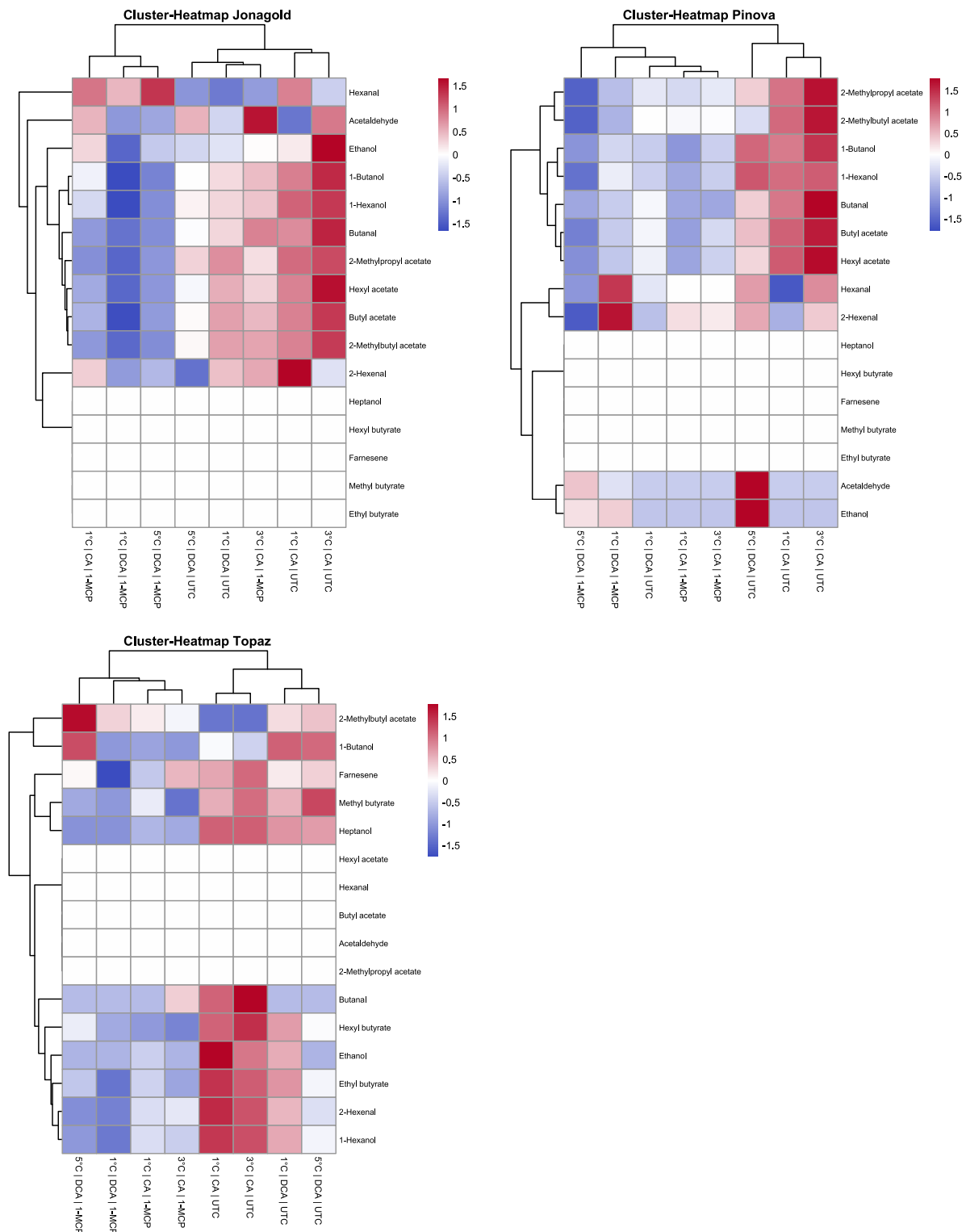


Abbildung 13. Heatmaps der flüchtigen Aromastoffe der drei Apfelsorten in Abhängigkeit der Lagerbedingungen

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ziel des Projektvorhabens war es einen Kompromiss zwischen Energieeinsparungen im Obstlager und einem bestmöglichen Erhalt der Fruchtqualität bei minimalen Verlusten zu erzielen. Das Projekt ist von der Grundannahme ausgegangen, dass die in der Praxis üblichen Temperaturbereiche von 0° bis 1°C für den primären Energieverbrauch verantwortlich sind, und durch den Einsatz von innovativen Lagertechnologien wie dem Einsatz der dynamisch kontrollierten Atmosphäre und dem Ethylenblocker 1-Methylcyclopropen, der Lagertemperaturbereich bei Äpfeln erhöht werden kann, ohne zwangsläufig negative Effekte hinsichtlich Fruchtqualität oder Packout akzeptieren zu müssen. Höhere Lagertemperaturen sollen in der theoretischen Betrachtung zu einem geringeren Kühlbedarf führen und somit den Stromverbrauch und Kostenfaktor reduzieren. Verglichen wurden Temperaturbereiche von 1°, 3° und 5°C in Interaktion mit Atmosphäre (Standard CA und DCA), 1-MCP Anwendung (Mit und ohne) sowie Apfelsorte (Jonagold, Pinova, Topaz).

Die Projektergebnisse zeigen klar, dass eine vielseitige Betrachtungsweise erforderlich ist, um diese Strategie ganzheitlich bewerten zu können. Energieeinsparungen der Kälteanlage müssen zwangsläufig in Relation zu anderen Energie-Verbrauchern wie CO₂-Scrubbern gesetzt werden und unter Einbezug verschiedener Qualitätsparameter wie Festigkeit, Grundfarbe, Aroma, Fäulnisbefall, Metabolismusintensität etc. eingeordnet werden.

Grundlegend wird aus diesem Projekt ersichtlich, dass das Potential dieser Strategie im Wesentlichen vom Genotyp des gelagerten Fruchtmaterials abhängig ist. Neuzüchtungen die generell eine hohe Lagerfähigkeit und niedrigere Metabolismusintensität besitzen, bieten folglich auch ein enormes Potential für Energieeinsparungen, da sie voraussichtlich weniger empfindlich gegenüber Temperaturerhöhungen sind. Apfelsorten wie ein Elstar oder Gala die grundlegend als schwer lagerfähig gelten aufgrund des intensiven Weichwerdens oder einer speziellen Empfindlichkeit gegenüber Kernhausverbräunungen sind somit für diese Strategie weniger geeignet als Neuzüchtungen wie ein *Cosmic Crisp*, *Magic Star* / *Natyra*, *Tonik* oder *Sunrise Magic*. Zudem kommt dem Erntetermin wahrscheinlich eine hohe Bedeutung zu, da bei überreif geernteter Ware von einem grundsätzlich geringeren Lagerpotential und einem erhöhten Risiko von Seneszenzlagerschäden wie einer Kernhausbräune ausgegangen werden muss. Gleichzeitig besitzen unreife bzw. unterentwickelte Früchten eine höhere Empfindlichkeit gegenüber physiologischen Schäden wie Schalennekrosen oder Schalenbräune. Dies Einflussfaktoren vor der Lagerung müssen folglich berücksichtigt werden.

In Abhängigkeit von der Sorte zeigen die Ergebnisse, dass die DCA-Lagerung insbesondere in Kombination mit 1-MCP Temperaturerhöhungen kompensieren kann. Dennoch sind Bereiche um 5°C vermutlich als zu riskant zu bewerten, insbesondere wenn man von einem fäulnisfördernden Effekt ausgehen muss. Bereiche um 3°C scheinen hier deutlich realistischer und können bereits zu einem geringeren Energieverbrauch der Kälteanlage führen. DCA-Lagerung bei 5°C mit 1-MCP resultierte in einer vergleichbaren Metabolismusintensität und Nachreifeverhalten wie CA-Lagerung bei 1°C. Somit kann geschlussfolgert werden, dass DCA bei 1°C weiterhin ein besseres Lagerergebnis hinsichtlich Fruchtqualität und Packout bietet; insbesondere bei sehr langen Lagerzeiten von >10 Monaten sollte eine risikoaverse Strategie bevorzugt werden. Für < 8 Monate deuten die Ergebnisse allerdings darauf hin, dass Temperaturerhöhungen durchaus eine realistische und praxisreife Strategie sind, vorausgesetzt die richtige Apfelsorte wird gelagert. Geschmacksbestimmende Aspekte wie Festigkeit, Säuregehalt und Aroma sowie die visuelle Bewertung bestätigen dies, da kein einheitlich negativer vom Konsumenten wahrnehmbarer Effekt zu beobachten war.

Öffentlichkeitsarbeit

Im Zuge der Projektarbeiten sind mehrere Veröffentlichungen und Vorträge entstanden.

Anlässlich des XIV International Controlled and Modified Atmosphere Research Conference - CAMA2025 in Wenatchee – USA vom 18.05. bis 22.05. hielt Dr. Daniel Neuwald vom KOB einen Vortrag mit dem Titel „*Synergy of dynamic controlled atmosphere and 1-MCP application in preserving apple fruit quality under increased storage temperatures in response to rising energy costs*“. Im Vortrag wurden die vorläufigen Ergebnisse des QS-Projekts einem internationalen Fachpublikum zur Obstlagerung präsentiert.



Abbildung 14. Impressionen zum Vortrag anlässlich des CAMA Symposium in den USA.

Unter diesem Titel wurde zudem ein Konferenzbeitrag für die Tagungsbandreihe „Acta Horticulturae“ der „International Society for Horticultural Science eingereicht“. Dieser Beitrag ist derzeit noch in Revision, eine Veröffentlichung 2026 ist realistisch. In allen Veröffentlichungsformen wurde auf die Förderung seitens des QS-Wissenschaftsfonds Obst, Gemüse und Kartoffeln hingewiesen.

Synergy of dynamic controlled atmosphere and 1-MCP application in preserving apple fruit quality under increased storage temperatures in response to rising energy costs

F. Büchele¹, A. Lugesari¹, F. Thewes², D. Neuwald¹ and ³

¹Lake of Constance Research Centre for Fruit Cultivation (KOB), Ravensburg, Germany

²Department of Plant Science, Postharvest Research Center, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Brazil

³ Department Production Systems of Horticultural Crops, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany

ABSTRACT

This study investigates the interactive effects of dynamic controlled atmosphere (DCA-CD, dynamic O₂ and ~1.4 kPa CO₂), 1-methylcyclopropene treatment (1-MCP, 0.625 µL L⁻¹), and temperature (1°C and 5°C) during the nine-month storage of three apple cultivars (Jonagold, Topaz, and Pinova). Since both DCA and 1-MCP are known to suppress metabolic activity and thereby minimize postharvest ripening, this study assesses the potential to increase storage temperatures in order to reduce energy consumption without compromising fruit quality. Each

CONCLUSION

Although the experiment is still undergoing at the time of writing of this paper, some conclusions can be drawn from these initial findings:

- Apples stored under DCA + 1-MCP at 5°C show a similar respiratory activity than CA + 1-MCP at 1°C.
- The 4°C temperature increase reduces refrigeration time and energy usage of compressors and defrosting system
- Compared to DCA+1-MCP 1°C, DCA + 1-MCP at 5°C results in slightly increased CO₂ scrubber run times
- A similar storage potential of DCA + 1-MCP at 5°C and CA + 1-MCP at 1°C can be proposed
- Effects are cultivar dependent, consequently there is an immense energy savings potential in breeding of new varieties with greater storability

ACKNOWLEDGEMENT

This experiment has been conducted as part of the project "Integration und Synergie moderner Technologien für einen reduzierten Energieverbrauch und Vermeidung Lebensmittelverluste in der Obstlagerung", funded by the QS-Wissenschaftsfonds Obst, Gemüse und Kartoffeln.

Abbildung 15. Ausschnitte des Beitrags zum Tagungsband.

Zusätzlich wurde im Rahmen des KOBstbau Tags 2025 am 17. Juli 2025 am Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee ein Vortrag mit dem Titel „Steigende Temperaturen – jetzt auch im Lager“ vor einem Publikum von Obstbauern, Beratung und Obstvermarktung gehalten. Diese Beiträge sollen einen direkten Transfer der Projektergebnisse in die Praxis gewährleisten.



Abbildung 16. Impressionen zur Veranstaltung KOBstbau Tag mit ungefähr 100 Gästen aus landwirtschaftlicher Praxis und Vermarktung.

Der finale Projektbericht wird zudem auf der Webseite des KOBs zum Download frei zur Verfügung gestellt.

Im Projektbudget ist die Finanzierung einer Veranstaltung zur Vermittlung der Projektergebnisse sowie Förderung des Austauschs der landwirtschaftlichen Praxis und Forschung vorgesehen. Am 20. August 2025 wurde ein sogenanntes „Lagerseminar“ veranstaltet mit 80-100 Teilnehmern aus dem Obstbau, der Vermarktung, der Beratung sowie Forschung. Im Zuge des Programms wurde auf die finanzielle Unterstützung der QS-Förderung zur Realisierung der Veranstaltung hingewiesen. Diese Verweise sind auch auf der [Veranstaltungswebseite](#) des KOBs zu finden.



Abbildung 17. Einblicke in das Lagerseminar 2025, umgesetzt durch Mittel der QS-Förderung.

Anlässlich des Symposiums „Postharvest management of Mediterranean Crops“, veranstaltet vom 17. bis 19. September in Palermo, Italien, wurden Teilergebnisse des QS-Projekts im Oral-Beitrag „Energy-saving strategies in postharvest storage without compromising fruit quality“ präsentiert. Ein Ausschnitt aus dem Tagungsband ist folgend abgebildet:





9th Workshop GDL SOI Postharvest
Postharvest Management of Mediterranean Crops



September 17-19, 2025
Palermo
www.postharvestmed.com

Energy-saving strategies in postharvest storage without compromising fruit quality

Felix Büchele¹, Adriana Lugaresi¹, Fabio Rodrigo Thewes², Luis Carlos Argenta³, Tuany Gabriela Hoffmann⁴, Pramod Mahajan⁴, Reiner Jedermann⁵, Daniel Alexandre Neuwald^{1,*}

¹Lake of Constance Research Centre for Fruit Cultivation, Schuhmacherhof 6, D-88213 Ravensburg, Germany
²Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Brazil
³Leibniz Institute for Agricultural, Engineering and Bioeconomy ATB, Potsdam, Germany
⁴Institute for Microsensors, -Actuators and -Systems (IMSAS), University of Bremen, Germany

Abbildung 18. Abstract aus dem Beitrag zum Postharvest Workshop in Palermo

Das Projekt wurde von einer kontinuierlichen Social Media Kampagne auf LinkedIn und Facebook begleitet, um über die Projekthinhalte zu informieren. Die Förderung seitens des QS-Wissenschaftsfonds wurde dabei genannt.

This work is part of the project "Integration und Synergie moderner Technologien für einen reduzierten Energieverbrauch und Vermeidung von Lebensmittelverlusten in der Obstlagerung", funded by the [#QSWissenschaftsfonds](#) Obst Gemüse und Kartoffeln.

[Adriana Lugaresi](#), @Tejaswini Ananda Kumar, @Adnan Sallom
Less waste, lower carbon footprint, and delicious apples from orchard to table.

[#FruitStorage](#) [#Sustainability](#) [#PostharvestScience](#) [#KOB](#) [#AppleResearch](#) [#SmartAgriculture](#) [#FoodLossPrevention](#) [#InnovationInAgriculture](#)



The project "Integration und Synergie moderner Technologien für einen reduzierten Energieverbrauch und Vermeidung Lebensmittelverluste in der Obstlagerung", funded by the [#QSWissenschaftsfonds](#) Obst, Gemüse und Kartoffeln.



Abbildung 19. Ausschnitte zu der laufenden Social Media Kampagnen zu Fortschritten und Meilensteinen im Projekt.

Budget

Im Folgenden dargestellt ist der ursprüngliche Kostenplan aus dem Projektantrag, gestellt 2024, aufgeteilt nach QS-Förderung und Eigenleistung finanziert durch den Projektträger KOB.

Kostenplan		Förderbetrag	Eigenleistung
I. Personalkosten			
Technische Angestellte	50% EG08 Stufe 1 (TV-L) für 12 Monate	25 638.40 €	
Wissenschaftlicher Mitarbeiter	30% EG13 Stufe 1 (TV-L) für 12 Monate		21 439.32 €
II. Sachkosten			
II.a Versuchsmaterial			
Versuchsmaterial Raum A	11 t Äpfel: Auszahlungspreis ca. 0.65 €/kg		7 150.00 €
Versuchsmaterial Raum B	11 t Äpfel: Auszahlungspreis ca. 0.65 €/kg		7 150.00 €
Versuchsmaterial Raum C	11 t Äpfel: Auszahlungspreis ca. 0.65 €/kg		7 150.00 €
II.b Kosten Versuchsdurchführung			
1-MCP Anwendung Raum A	6€ * 53 m3	318.00 €	
1-MCP Anwendung Raum B	6€ * 53 m3	318.00 €	
Labor- und Büromaterial		1 500.00 €	
Energiekosten	ca. 1800 kWh pro Raum und 0.3 €/kWh		1 620.00 €
II.c Öffentlichkeitsarbeit			
Lagerseminar 2025	Verpflegung, Technik, Honorare, etc...	2 000.00 €	
C. Reise		0.00 €	
D. Investitionen		0.00 €	
Gesamt		29 774.40 €	44 509.32 €

Im Folgenden sind die tatsächlichen über das Projekt abgerechneten Kosten zusammenfassend dargestellt. Aufgrund eines inflationsbedingten Anstiegs der Personalkosten wurden Mittel aus dem Posten „Sachkosten“ zu den „Personalkosten“ umgebucht.

Kostenplan	Projektantrag	IST	Dif
I. Personalkosten	25 638.40 €	27 698.17 €	-2 059.77 €
II. Sachkosten	4 136.00 €	1 962.40 €	2 173.60 €
Gesamt	29 774.40 €	29 660.57 €	113.83 €

Die abgerechneten Kosten des Projektvorhabens im Detail sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Kosten der Lagerung bzw. der Versuchsdurchführung wie Stromkosten oder die 1-MCP Anwendungen wurden komplett als Eigenleistung vom Projektträger KOB finanziert.

Datum	Posten	Empfänger	Betreff	Betrag
31.08.2024	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Aug/24	2 212.21 €
30.09.2024	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Sep/24	2 212.21 €
31.10.2024	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Okt/24	2 212.21 €
30.11.2024	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Nov/24	2 988.79 €
31.12.2024	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Dez/24	2 212.21 €
31.01.2025	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Jan/25	2 226.54 €
28.02.2025	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Feb/25	2 226.54 €
31.03.2025	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Mrz/25	2 226.54 €
30.04.2025	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Apr/25	2 295.23 €
31.05.2025	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Mai/25	2 295.23 €
30.06.2025	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Juni/25	2 295.23 €
21.07.2025	Sach	Carl Roth GmbH + Co.KG	Laborbedarf	157.10 €
31.07.2025	Personal	Adriana Lugaresi	Lohn Jul/25	2 295.23 €
20.08.2025	Sach	Der Stotz Hof	Lagerseminar 2025	1 805.30 €

Anhang

Linear mixed model Koeffizienten

Festigkeit

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Cultivar	(Intercept)	15.95	3.994
	Residual	10.14	3.185

Number of obs: 72, groups: Cultivar, 3

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value
(Intercept)	51.765	4.300	12.038
Temp3°C	-5.276	2.123	-2.485
Temp5°C	-8.388	2.123	-3.951
AtmosphereDCA	5.848	2.123	2.754
Treatment1-MCP	20.140	1.839	10.954
CultivarPinova	17.445	6.011	2.902
CultivarTopaz	-2.375	6.011	-0.395
Temp3°C:CultivarPinova	1.373	2.600	0.528
Temp5°C:CultivarPinova	7.259	2.600	2.792
Temp3°C:CultivarTopaz	3.695	2.600	1.421
Temp5°C:CultivarTopaz	4.562	2.600	1.754
AtmosphereDCA:CultivarPinova	3.859	2.600	1.484
AtmosphereDCA:CultivarTopaz	1.978	2.600	0.761
Treatment1-MCP:CultivarPinova	-14.650	1.839	-7.967
Treatment1-MCP:CultivarTopaz	2.232	1.839	1.214
Temp3°C:Treatment1-MCP	3.521	2.123	1.658
Temp5°C:Treatment1-MCP	1.570	2.123	0.739
AtmosphereDCA:Treatment1-MCP	-8.360	2.123	-3.938

Säuregehalt

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Cultivar	(Intercept)	0.1415	0.3762
	Residual	0.1911	0.4372

Number of obs: 72, groups: Cultivar, 3

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value
(Intercept)	3.27835	0.43511	7.535
Temp3°C	-0.31639	0.29146	-1.086
Temp5°C	-0.55833	0.29146	-1.916
AtmosphereDCA	0.51367	0.29146	1.762
Treatment1-MCP	0.50064	0.25241	1.983
CultivarPinova	0.21775	0.60226	0.362
CultivarTopaz	1.06921	0.60226	1.775
Temp3°C:CultivarPinova	-0.25683	0.35696	-0.719
Temp5°C:CultivarPinova	-0.25683	0.35696	-0.719
Temp3°C:CultivarTopaz	-0.26800	0.35696	-0.751
Temp5°C:CultivarTopaz	-0.25683	0.35696	-0.719
AtmosphereDCA:CultivarPinova	-0.12283	0.35696	-0.344
AtmosphereDCA:CultivarTopaz	-0.30150	0.35696	-0.845
Treatment1-MCP:CultivarPinova	-0.14517	0.25241	-0.575
Treatment1-MCP:CultivarTopaz	0.47458	0.25241	1.880
Temp3°C:Treatment1-MCP	-0.05956	0.29146	-0.204
Temp5°C:Treatment1-MCP	-0.11167	0.29146	-0.383
AtmosphereDCA:Treatment1-MCP	-0.33500	0.29146	-1.149

Grundfarbe

Random effects:

Groups	Name	Variance	Std.Dev.
Cultivar	(Intercept)	0.3029	0.5504
	Residual	2.3606	1.5364

Number of obs: 72, groups: Cultivar, 3

Fixed effects:

	Estimate	Std. Error	t value
(Intercept)	103.7593	0.9450	109.797
Temp3°C	-2.2867	1.0243	-2.232
Temp5°C	1.1950	1.0243	1.167
AtmosphereDCA	0.5972	1.0243	0.583
Treatment1-MCP	1.0714	0.8871	1.208
CultivarPinova	-6.8300	1.2607	-5.418
CultivarTopaz	-6.9712	1.2607	-5.530
Temp3°C:CultivarPinova	3.6117	1.2545	2.879
Temp5°C:CultivarPinova	-2.6150	1.2545	-2.085
Temp3°C:CultivarTopaz	3.4517	1.2545	2.751
Temp5°C:CultivarTopaz	-2.2500	1.2545	-1.794
AtmosphereDCA:CultivarPinova	1.8767	1.2545	1.496
AtmosphereDCA:CultivarTopaz	1.6783	1.2545	1.338
Treatment1-MCP:CultivarPinova	0.3767	0.8871	0.425
Treatment1-MCP:CultivarTopaz	0.3658	0.8871	0.412
Temp3°C:Treatment1-MCP	-1.2767	1.0243	-1.246
Temp5°C:Treatment1-MCP	-0.7967	1.0243	-0.778
AtmosphereDCA:Treatment1-MCP	-0.1278	1.0243	-0.125

Referenzen

1. Konsum von Obst in Deutschland bis 2023/24. *Statista*
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/29107/umfrage/verbrauchsmenge-von-obst-in-deutschland/>.
2. Anbaufläche von Baumobst im Markto Obstbau in Deutschland nach Obstsorten bis 2024. *Statista*
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/166874/umfrage/anbauflaeche-von-baumobst-nach-obstsorte/>.
3. Prange, R. K. & Wright, A. H. A Review of Storage Temperature Recommendations for Apples and Pears. *Foods* **12**, 466 (2023).
4. du Plessis, M. J., van Eeden, J. & Goedhals-Gerber, L. L. The Carbon Footprint of Fruit Storage: A Case Study of the Energy and Emission Intensity of Cold Stores. *Sustainability* **14**, 7530 (2022).
5. Watkins, C. B. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. *Biotechnology Advances* **24**, 389–409 (2006).
6. Prange, R. K., Wright, A. H., DeLong, J. M. & Zanella, A. History, current situation and future prospects for dynamic controlled atmosphere (DCA) storage of fruits and vegetables, using chlorophyll fluorescence. *Acta Horticulturae* **1012**, 905–916 (2013).
7. Büchele, F. *et al.* Novel Energy-Saving Strategies in Apple Storage: A Review. *Sustainability* **16**, 1052 (2024).
8. Xuan, H. & Streif, J. Effect of 1-MCP on the respiration and ethylene production as well as on the formation of aroma volatiles in 'Jonagold' apple during storage. *Acta Horticulturae* **682**, 1203–1210 (2005).
9. Büchele, F., Khera, K., Thewes, F. R., Kitemann, D. & Neuwald, D. A. Dynamic Control of Atmosphere and Temperature Based on Fruit CO₂ Production: Practical Application in Apple Storage and Effects on Metabolism, Quality, and Volatile Profiles. *Food Bioprocess Technol* (2023) doi:10.1007/s11947-023-03079-0.
10. Kitemann, D., McCormick, R. & Neuwald, D. A. Effect of high temperature and 1-MCP application or dynamic controlled atmosphere on energy savings during apple storage. *European Journal of Horticultural Science* **80**, 33–38 (2015).
11. Thewes, F. R., Brackmann, A. & Neuwald, D. A. Dynamic controlled atmosphere method and apparatus. (2022).
12. Prange, R. K., Delong, J. M. & Harrison, P. A. Quality management through respiration control: Is there a relationship between lowest acceptable respiration, chlorophyll fluorescence and cytoplasmic acidosis? *Acta Horticulturae* **682**, 823–830 (2005).
13. Boeckx, J., Hertog, M. L. A. T., Geeraerd, A. H. & Nicolai, B. M. Balancing between respiration and fermentation. *Acta Horticulturae* **1194**, 689–694 (2018).
14. Wright, A. H., Delong, J. M., Arul, J. & Prange, R. K. The trend toward lower oxygen levels during apple (*Malus × domestica* Borkh) storage - A review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **90**, 1–13 (2015).
15. Espino-Díaz, M., Sepúlveda, D. R., González-Aguilar, G. & Olivas, G. I. Biochemistry of apple aroma: A review. *Food Technology and Biotechnology* **54**, (2016).
16. Linke, M. Water condensation on fruit surfaces during apple storage. (2021).
17. Bovi, G. G., Caleb, O. J., Linke, M., Rauh, C. & Mahajan, P. V. Transpiration and moisture evolution in packaged fresh horticultural produce and the role of integrated mathematical models: A review. *Biosystems Engineering* **150**, 24–39 (2016).
18. Hoffmann, T. *et al.* Heat transfer in large bins during the apples cool-down process. *International Journal of Refrigeration* **170**, (2024).
19. *ASHRAE Handbook - Refrigeration*. (Ashrae, Atlanta, 2014).
20. Geyer, M. & Praeger, U. *Lagerung Gartenbaulicher Produkte*. (2012).
21. Iqbal, N. *et al.* Ethylene Role in Plant Growth, Development and Senescence: Interaction with Other Phytohormones. *Frontiers in Plant Science* **08**, 1–19 (2017).
22. Zhang, Y. & Fernie, A. R. On the role of the tricarboxylic acid cycle in plant productivity: The role of TCA in the plant productivity. *J. Integr. Plant Biol.* **60**, 1199–1216 (2018).
23. Brookfield, P., Murphy, P., Harker, R. & MacRae, E. Starch degradation and starch pattern indices; interpretation and relationship to maturity. *Postharvest Biology and Technology* **11**, 23–30 (1997).
24. Brummell, D. Primary cell wall metabolism during fruit ripening. *New Zealand Journal of Forestry Science* **36**, 99 (2006).

25. Thewes, F. R., Both, V., Brackmann, A., Weber, A. & De Oliveira Anese, R. Dynamic controlled atmosphere and ultralow oxygen storage on 'Gala' mutants quality maintenance. *Food Chemistry* **188**, 62–70 (2015).
26. Watkins, C. *et al.* Harvest Date Effects on Maturity, Quality, and Storage Disorders of 'Honeycrisp' Apples. *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science* **40**, (2005).
27. Neuwald, D. A. & Kitemann, D. The incidence of *Neofabraea* spp. in 'Pinova' apples can be reduced at elevated storage temperatures. *Acta Horticulturae* **1144**, 231–236 (2016).
28. Hoehn, E., Baumgartner, D., Gasser, F. & Gabioud, S. Ripening regulation and consumer expectations. in *Acta Horticulturae* vol. 796 83–91 (2008).

Stand 18.09.2025

Ende des Dokuments.