



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Schlussbericht zum Thema

08. April 2024

Reduktion der Lagerverluste bei ökologisch erzeugtem Obst und Gemüse durch ein optimiertes Lagerungsmanagement auf Basis von sensorgestützten und adaptiven Modellen zur Prognose der Qualitätsentwicklung und Haltbarkeit

FKZ: 2819OE039

Projektnehmer/Projektnehmerin: Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische Landwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der BÖL-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in die Praxis umgesetzt. Das Programm gliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder - das Forschungs- und das Informationsmanagement.

Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter:

www.bundesprogramm.de
www.oekolandbau.de/forschung

Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Bundesprogramm Ökologischer Landbau
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Tel.: 0228-6845-3280
E-Mail: boel-forschung@ble.de

Schlussbericht zum Forschungsprojekt

**Reduktion der Lagerverluste bei ökologisch
erzeugtem Obst und Gemüse durch ein optimiertes
Lagerungsmanagement auf Basis von sensorgestützten
und adaptiven Modellen zur Prognose der
Qualitätsentwicklung und Haltbarkeit
(OpLaMa)**

Zuwendungsempfänger: Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Zentrum für Forschung und Wissenstransfer
Institut für Gartenbau
Am Staudengarten 9

85354 Freising

Projektleitung: Prof. Dr. Eckhard Jakob
Prof. Dr. Elke Meinken
Prof. Dr. Dominikus Kitemann
Dr. Dieter Lohr

Projektbearbeitung: Julia Pauly
Fredo Hornung
Elke Weinmann
Michael Taubmann

Laufzeit: 15.09.2020 bis 31.12.2023

Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
KURZFASSUNG	7
ABSTRACT	8
1 EINFÜHRUNG	9
1.1 Gegenstand des Vorhabens	9
1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts und Bezug zu den förderpolitischen Zielen	9
1.3 Planung und Ablauf des Projektes	9
2 STAND DES WISSENS	10
2.1 Qualität und Haltbarkeit von Obst und Gemüse	10
2.2 Qualitätserhalt von Obst und Gemüse in der Nacherntephase	12
3 MATERIAL UND METHODEN	14
4 ERGEBNISSE	19
4.1 Qualitätsbestimmung mittels NIRS	19
4.1.1 Kalibrationsentwicklung	19
4.1.2 Kalibrationstransfer	22
4.2 Sensornetzwerk	22
4.2.1 Entwicklung eines (mobilen) Sensornetzwerkes	22
4.2.2 Metalloxid(MQ)-Sensorarray zur Ethenmessung	28
4.2.3 Erprobung der Sensornetzwerke unter Praxisbedingungen	30
4.3 Lagerversuche	31
5 DISKUSSION	42
6 VERWERTUNG DER ERGEBNISSE IN DER PRAXIS	44
7 GEGENÜBERSTELLUNG DER ERREICHTEN ZIELE UND DER URSPRÜNGLICHEN PLANUNG	44
8 ZUSAMMENFASSUNG	45
9 LITERATURVERZEICHNIS	46
10 VERÖFFENTLICHUNGEN	51
11 ANLAGEN	52

Abkürzungsverzeichnis

C ₂ H ₄	Ethen
CO ₂	Kohlendioxid
ESP-WIFI-MESH	WiFi-basiertes Kommunikationsprotokoll für ESP-Mikrokontroller-Netzwerke
g	Gramm
GSM	Mobilfunkstandard (Global System for Mobile Communications)
kg	Kilogramm
HSWT	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
LOD	Nachweisgrenze (Limit of detection)
LOQ	Bestimmungsgrenze (Limit of Quantification)
LoRa	stromsparende und weitreichende Funktechnik
m	Meter
mA	Milliampere
mAh	Milliamperestunde
Mbps	Megabit pro Sekunde
mg	Milligramm
min	Minute
N	Stickstoff
nm	Nanometer
NIRS	Nah-Infrarot-Spektroskopie
N _{lös}	wasserlöslicher, organischer Stickstoff in der Pflanze
N _t	Gesamtstickstoff in der Pflanze (Dumas-Verfahren)
nPLS	Anzahl latente Variablen in den Kalibriermodellen
O ₂	Sauerstoff
PLS	Multivariates Regressionsverfahren (partial least square regression)
ppm	Parts per million
Rcal ² /Rval ²	Bestimmtheitsmaß der PLS-Regressionsmodelle für den Kalibrier-/Validierdatensatz
RER	Verhältnis der Spannbreite der Referenzwerte im Validierdatensatz zum RMSE für die Validierung (Ratio of error to range)
RPD	Verhältnis der Standardabweichung der Referenzwerte im Validierdatensatz zum RMSEV (Ratio of prediction to deviation)
RMSEC/RMSEV	Mittlere Abweichung der mittels NIRS prognostizierten von den Referenzwerten für den Kalibrier-/Validierdatensatz (Root mean squared error)
s	Sekunde
TM	Trockenmasse
TRL	Technologie-Reifegrad (Technology readiness level)
TS	Trockensubstanz
V	Volt
WLAN	Lokales Funknetzwerk

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ausgewählte Qualitätsparameter für die vier Modellkulturen (Einordnung: G = geschmacklicher Wert, L = Lagerfähigkeit, N = nutritiver/gesundheitlicher Wert; S = sensorischer Eindruck).....	15
Tab. 2: Übersicht über die während der Projektlaufzeit durchgeführten Lagerversuche	18
Tab. 3: Exemplarische Sensorausstattung des Sensorknotens	26
Tab. 4: Zusammenstellung der für die erste Evaluierung ausgewählten Sensoren	52

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vergleich von fünf kostengünstigen Sensoren zur Messung von Lufttemperatur und -feuchte (BME280) im Vergleich zum kalibrierten Referenzsensor (SHT25)	17
Abb. 2: Kalibrationsmodelle für [a] die Trockensubstanz, [b] das Verhältnis von $N_{\text{lös}}$ zu N-Gesamt, [c] $N_{\text{lös}}$ und [d] N-Gesamt bei Brokkoli aufgeteilt für den Kalibrier- und den Validierdatensatz (n = Anzahl Proben im Kalibrier-/Validierdatensatz, $R_{\text{cal}}^2/R_{\text{val}}^2$ = Bestimmtheitsmaß für die Kalibrierung/Validierung, RMSEC/RMESV = Standardfehler der Kalibrierung/Validierung, nPLS = Anzahl latente Variablen im PLS-Modell).....	20
Abb. 3: Kalibrationsmodelle für [a] die Trockensubstanz, [b] die Summe der löslichen Feststoffe (mg Saccharose/kg TS) bei Erdbeeren aufgeteilt für den Kalibrier- und den Validierdatensatz (n = Anzahl Proben im Kalibrier-/Validierdatensatz, $R_{\text{cal}}^2/R_{\text{val}}^2$ = Bestimmtheitsmaß für die Kalibrierung/Validierung, RMSEC/RMESV = Standardfehler der Kalibrierung/Validierung, nPLS = Anzahl latente Variablen im PLS-Modell).....	21
Abb. 4: Schaltplanentwürfe und Platinenlayout in KiCad 6.0 der Zentralplatine (A und B) sowie der Sensorplatine (C und D) sowie Sensorknotenprototyp mit Gehäuse (voll ausgestattete Sensorplatine montiert mit Schutzkäfig)	23
Abb. 5: Verfügbare Schnittstellen zur Kommunikation zwischen Mikrocontroller und Sensoren	24
Abb. 6: Schematischer Aufbau eines MESH-Netzwerkes mittels ESP-WIFI-MESH (Quelle: www.espressif.com)	24
Abb. 7: Schematischer Aufbau des Sensornetzwerkes mit den verschiedenen Datenübertragungstechnologien zwischen Sensormodulen und Endgerät	25
Abb. 8: Verlauf der Lufttemperatur im Lager bzw. der Oberflächentemperatur von Erdbeeren während einer Unterbrechung der Kühlkette für sechs Stunden bei einer Solltemperatur des Lagerraum von [a] 1 °C und [b] 10 °C	27
Abb. 9: Regelung der Ethenkonzentration durch ein Aktormodul.....	28
Abb. 10: Versuchsaufbau für die Entwicklung des MQ-Sensorrays mit der Mischkammer mit Septum (zur definierten Zudosierung von Ethen), der eigentlichen Messkammer mit dem MQ-Sensorarray und einem nachgeschalteten Handmessgerät zur Quantifizierung der aktuellen Ethen-Konzentration	29

Abb. 11:Erste Ableitung der MQ-Sensorsignale (Glättung n = 20) als Reaktion auf volatilen Ausscheidungen von Äpfeln (1. Peak nach 10 min) und zusätzlich 6 ppm Ethen (2. Peak nach 45 min)	29
Abb. 12:Kalibrierung im Bereich von 0 bis 5 ppm Ethen für den MQ2- und 1 bis 5 ppm für den MQ4-Sensor (ΔC_2H_4 = mittlere Abweichung von den Ist-Werten; LOD = Nachweisgrenze (3 σ des kleinsten Standards), LOQ = Nachweisgrenze (10 σ des kleinsten Standards); 3 Messzyklen)	30
Abb. 13:Intensität der Bildung von Neuaustrieben an den Karotten in Abhängigkeit von der Ethenkonzentration in der Lageratmosphäre sowie der Lagertemperatur und -dauer in Wochen; das Foto links zeigt das angelegte Boniturschema).....	31
Abb. 14:Geschmackliche Bewertung der Karotten in Abhängigkeit von der Ethenkonzentration in der Lageratmosphäre sowie der Lagertemperatur und -dauer in Wochen (Bewertung nach dem Schulnoten-system (1 = sehr gut bis 6 = absolut ungenießbar)	32
Abb. 15:Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) der Karotten in Abhängigkeit von der Ethenkonzentration in der Lageratmosphäre sowie der Lagertemperatur und -dauer in Wochen (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler).....	32
Abb. 16:Darstellung der geschmacklichen Abweichung bei Karotten in Abhängigkeit von der Lagerung mit und ohne Ethen sowie der Lagertemperatur über die Lagerdauer in Tagen. Der Farbintensität der Kreise zeigt die vom Verkostungspanel zugeordneten Bewertungsadjektive, während die Größe der Kreise die Häufigkeit ihrer Nennung reflektiert	34
Abb. 17:Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) bei Karotten in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Ethen sowie der Lagertemperatur und -dauer in Tagen (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnet den Standardfehler	35
Abb. 18:Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) bei Karotten in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie der Lagerdauer in Tagen (n = 6, Fehlerbalken kennzeichnet den Standardfehler). Die gestrichelte Linie veranschaulicht den theoretischen Verlauf der Karotten die im Zwischenlager bei optimalen Bedingungen gelagert werden.	37
Abb. 19:Darstellung der geschmacklichen Abweichung bei Karotten in Abhängigkeit von der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie die Lagerdauer in Tagen. Der Farbintensität der Kreise zeigt die vom Verkostungspanel zugeordneten Bewertungsadjektive, während die Größe der Kreise die Häufigkeit ihrer Nennung reflektiert. Die zweifarbig gestrichelten Kreise stellen dabei die Bewertung der optimal gelagerten Karotten im Zwischenlager vor dem Versand dar.....	37
Abb. 20:Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) der Brokkoliköpfe in Abhängigkeit von der Lageratmosphäre und der Lagerdauer in Tagen (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler)	38
Abb. 21:Verhältnis des wasserlöslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff (angegeben in Prozent) in Abhängigkeit der Lageratmosphäre und der Lagerdauer (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler).....	39

Abb. 22:[a] Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) und [b] Verhältnis des löslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff bei Brokkoli in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie der Lagerdauer in Tagen (n = 6, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler). Die gestrichelte Linie veranschaulicht den theoretischen Verlauf der Brokkoli die im Zwischenlager bei optimalen Bedingungen gelagert werden..... 40

Abb. 23:[a] Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) und [b] Verhältnis des löslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff bei Brokkoli in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie der Lagerdauer in Tagen (n = 6, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler). Die gestrichelte Linie veranschaulicht den theoretischen Verlauf der Brokkoli die im Zwischenlager bei optimalen Bedingungen gelagert werden..... 41

Kurzfassung

Ziel war die Reduktion von Lagerverlusten bei Obst und Gemüse durch ein optimiertes Lagermanagement. Dabei wurden zwei Ansätze verfolgt: Zum einen sollten Verfahren zur nah-infrarotspektroskopischen Messung qualitäts- bzw. haltbarkeitsbestimmender Inhaltsstoffe erprobt werden. Dabei wurden keine klassischen Laborspektrometer, sondern einfache, handgeführte Geräte eingesetzt. Zudem wurde auf eine Probenaufbereitung verzichtet. Der zweite Ansatz war die Entwicklung von günstigen und flexiblen Sensornetzwerken, um die Umweltbedingungen im Lager engmaschig zu überwachen und gegebenenfalls bei Abweichungen gegenzusteuern. Zum Abschluss sollten die beiden Ansätze verschmolzen und darauf aufbauend Prognosemodelle für die Resthaltbarkeit entwickelt werden. Ziel war es, das bisher übliche „First-In-First-Out“ Prinzip bei der Auslagerung durch ein intelligentes „First-Expired-First-Out“ zu ersetzen.

Beide Ansätze zeigten Potential Lagerverluste zu reduzieren: So konnte ein Kalibriermodell zur Bestimmung des löslichen Stickstoffs bei Brokkoli entwickelt werden, dessen Anteil zum Ende der Haltbarkeit steil ansteigt, bevor Seneszenz-Symptome sichtbar werden. Bei Karotten wurde in Abhängigkeit von der Ethenbelastung ein Anstieg der Antioxidativen Kapazität beobachtet, der mit der Bildung von Bitterstoffen assoziiert war. Zwar ließ sich die Antioxidative Kapazität nicht mittels NIRS bestimmen, da aber die Laboranalytik recht einfach ist, bietet sich auch hier Optimierungspotential in der Qualitätsüberwachung.

Zur Optimierung der Umweltbedingungen im Lager konnten flexible Sensorknoten entwickelt werden, die eine engmaschige Überwachung u. a. der Lufttemperatur und -feuchte erlauben. Diese lassen sich mit Aktorknoten kombinieren, durch die korrigierend eingegriffen werden kann. Zudem wurden vielversprechende Ansätze zur Überwachung der Kondenswasserbildung auf Früchten bei Temperaturwechseln sowie zur Bestimmung von Ethen mittels günstiger Metalloxid-Halbleiter(MQ)-Sensoren erprobt.

Abstract

The aim was to reduce storage losses of fruit and vegetables through optimized storage management. Two approaches were pursued: On the one hand, methods for near-infrared spectroscopic measurement of quality and shelf-life determining ingredients were to be tested. Simple, hand-held devices were used instead of conventional laboratory spectrometers. Sample preparation was also dispensed with. The second approach was the development of inexpensive and flexible sensor networks to closely monitor the environmental conditions in the warehouse and, if necessary, take countermeasures in the event of deviations. Finally, the two approaches should be combined and predictive models for residual shelf life developed on this basis. The aim was to replace the common "first-in-first-out" principle with an intelligent "first-expired-first-out" approach.

Both approaches showed potential to reduce storage losses: For example, a calibration model could be developed to determine the soluble nitrogen in broccoli, the proportion of which rises steeply towards the end of the shelf life before senescence symptoms become visible. In carrots, an increase in antioxidant capacity was observed as a function of ethylene load during storage, which was associated with the formation of bitter substances. Although it was not possible to determine the antioxidant capacity by NIRS, laboratory analysis is quite simple, so there is potential for optimization in quality monitoring here too.

To optimize the environmental conditions in the warehouse, flexible sensor nodes were developed that allow close monitoring of air temperature and humidity, among other things. These can be combined with actuator nodes, which can be used for corrective intervention. In addition, promising approaches for monitoring the formation of condensation on fruit following temperature changes and for determining ethylene using inexpensive metal-oxide-semiconductor(MQ)-sensors were tested.

1 Einführung

1.1 Gegenstand des Vorhabens

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte ein innovatives System zur Optimierung des Lagerungsmanagements insbesondere im Groß- und Zwischenhandel von ökologisch erzeugtem Obst und Gemüse entwickelt werden. Das Projekt gliederte sich dabei in zwei Teilbereiche: Zum einen sollte erprobt werden, ob sich bestimmte qualitätsbestimmende Inhaltsstoffe mittels handgeführter und kostengünstiger NIR-Spektrometern Vor-Ort nicht invasiv bestimmen lassen. Zum zweiten sollte basierend auf kostengünstigen Sensoren und Mikrokontrollern ein engmaschiges Netzwerk zur Überwachung und darauf aufbauend auch Regelung der Lageratmosphäre entwickelt werden. Abschließend sollten die beiden Aspekte zusammengeführt werden, um aus den Daten Prognosemodelle zur Abschätzung der Resthaltbarkeit der Waren zu entwickeln.

1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts und Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war die Ablösung des bisher in der Lagerung von Obst und Gemüse vorherrschenden Prinzips „First-In-First-Out“ durch ein intelligentes „First-Expired-First-Out“ abzulösen und durch eine engmaschige Überwachung der Lagerbedingung diese zu optimieren. Beide Ziele könnten dazu beitragen, Verluste während der Lagerung von Obst und Gemüse zu minimieren. Damit hat das Forschungsvorhaben einen konkreten Bezug zu folgenden Themenfeldern der Bekanntmachung "Beitrag ökologisch und nachhaltig erzeugter Lebensmittel zu zukunftsfähigen Ernährungssystemen":

- Minimierung von Lebensmittelabfällen, einschließlich Nachernteverluste
- Verbesserung der Haltbarkeit von ökologisch und nachhaltig erzeugten Lebensmitteln
- Entwicklung schneller und günstiger Analyseverfahren zur Bestimmung der Qualität ökologisch und nachhaltig erzeugter Lebensmittel
- Erhöhung der Ressourceneffizienz bei Lagerung und Transport ökologisch und nachhaltig erzeugter Lebensmittel

1.3 Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt wurde mit den vier Modellkulturen Erdbeere, Zucchini, Brokkoli und Karotte durchgeführt und war in drei Teilaspekte gegliedert. Teil A beinhaltete die Entwicklung von Kalibrationsmodellen für eine nicht-destruktive Analyse verschiedener wertgebender Inhaltsstoffe und qualitätsbestimmender sensorischer Eigenschaften mittels nah-infrarotspektroskopischer Messungen. Dazu zählen klassische Geschmacksparameter, sensorische Eigenschaften und gesundheitsförderliche Stoffe sowie Parameter zur

Abschätzung der weiteren Haltbarkeit. Für die NIRS-Messungen sollten dabei keine klassischen Laborspektrometer, sondern handgeführte, kostengünstige Geräte genutzt werden. Schwerpunkt der Arbeiten im Rahmen von Teil B war die Entwicklung von kostengünstigen Sensornetzwerken zur Überwachung der Lagerungsbedingungen, insbesondere Temperatur und Luftfeuchte sowie Zusammensetzung der Lageratmosphäre (O₂, CO₂, Ethen). Im Anschluss an die Entwicklung der Sensornetzwerke wurden Lagerversuche durchgeführt und gezielt einzelne Lagerungsbedingungen variiert. Gleichzeitig wurde die Qualitätsveränderung der gelagerten Produkte –möglichst mittels NIRS – ermittelt. Basierend auf den Ergebnissen der beiden Teilaspekte sollten im dritten und letzten Teil C, die Ergebnisse zusammengeführt und Prognosemodelle zur Abschätzung der Resthaltbarkeit basierend auf dem aktuellen Qualitätsstatus sowie den Lagerbedingungen erarbeitet werden.

Geplant war, dass die beiden Teilaspekte A und B jeweils von einem wissenschaftlichen Bearbeiter im Rahmen einer Promotion bearbeitet und anschließend die Ergebnisse der beiden Teile in Teil C zusammengeführt werden. Im ersten Schritt sollten die technologischen Grundlagen (Auswahl geeigneter Qualitätsparameter, Messprotokolle für die NIRS-Messungen, Auswahl geeigneter Sensoren, Konzeption des Sensornetzwerkes) geschaffen und praktisch umgesetzt werden. In einer ersten Serie von Lagerungsversuchen war geplant wichtige Einflussgrößen auf die Qualität (Lufttemperatur und –feuchte, Zusammensetzung der Lageratmosphäre) herauszuarbeiten und deren Einfluss auf die Qualitätsveränderung in aufbauenden Versuchen zu validieren. Parallel sollten die Lagerversuche zur Erzeugung von Referenzproben für die NIRS-Kalibrationsentwicklung mit einer möglichst breiten Streuung der ausgewählten Qualitätsparameter genutzt werden. Im letzten Projektabschnitt sollten die entwickelten Technologien (NIRS-Messung und Sensornetzwerke) unter Realbedingungen in Lagereinrichtungen der etepete GmbH (München) sowie der TAGWERK Genossenschaft e.G. (Dorfen) getestet werden.

2 Stand des Wissens

2.1 Qualität und Haltbarkeit von Obst und Gemüse

Die Qualität von Lebensmitteln definiert Kramer (1955) folgendermaßen:

>>Quality of foods may be defined as the composite of those characteristics that differentiate individual units of a product, and have significance in determining the degree of acceptability of that unit to the user<<

Die Frische ist bei Obst und Gemüse das Qualitätsmerkmal, das vermutlich am stärksten über die Akzeptanz des Verbrauchers entscheidet. Bestimmt wird die Frische dabei maßgeblich vom Wassergehalt (Müller et al., 2002; Watkins und Nock, 2012). Dementsprechend ist die Prognose des Wasserverlusts in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen ein wesentlicher Baustein der Haltbarkeitsabschätzung. Müller et al. (2002)

beschreiben ein entsprechendes Modellkonzept zur Frischeprognose empfindlicher gartenbaulicher Produkte (Tomaten, Erdbeeren, Bundmöhren). Neben dem Wassergehalt sind natürlich sensorische Eigenschaften und wertgebende Inhaltsstoffe wesentlich für die Qualität von Obst und Gemüse. Bei den sensorischen Eigenschaften handelt es sich um Parameter wie z. B. Aroma, Textur und Festigkeit. Die wertgebenden Inhaltsstoffe können grob in geschmacksgebende Inhaltsstoffe, hierunter fallen insbesondere Zucker und Säuren sowie Bitterstoffe (Barrett et al., 2010), sowie Inhaltsstoffe die den nutritiven (Vitamine, Mineralstoffe) bzw. gesundheitlichen (z. B. Polyphenole) Wert von Obst und Gemüse definieren (Kaur und Kapoor, 2001, Tomas-Barberán und Espin, 2001, Barrett et al., 2010), unterschieden werden, wobei die Zuordnung in vielen Fällen nicht eindeutig ist. Hinzu kommen Inhaltsstoffe, die nicht direkt wertgebend sind, die aber für eine weitergehende Haltbarkeitsabschätzung genutzt werden können. So nimmt z. B. bei Spargel und Brokkoli während der Lagerung der Proteingehalt ab, während im Gegenzug der Gehalt an löslichen N-Verbindungen (u. a. Aminosäuren) zunimmt (King et al., 1990; King und Morris, 1994; Page et al., 2001). Diese Veränderungen beginnen bereits kurz nach der Ernte, lange bevor Schadsymptome (u. a. Vergilbungen) sichtbar werden.

Ein wesentliches Problem bei der laufenden Qualitätsbeurteilung von Obst und Gemüse ist die Bestimmung der qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffe. Die klassischen nass-chemischen Verfahren sind hierfür in der Regel ungeeignet. Eine gewisse Rolle spielen die refraktrometrische Zuckerbestimmung (lösliche Trockensubstanz) sowie die Titration des Säuregehalts. Allerdings sind hierbei auf Grund des destruktiven Charakters nur stichprobenartige Messungen möglich. Bei anderen Verbindungen wie Phenolen sind die nass-chemischen Verfahren selbst für stichprobenartige Messungen zu aufwendig und teuer. Zudem dauern die Analysen zu lange, um sie im Qualitätsmanagement nutzen zu können. Als schnelle, einfache und vor allem zerstörungsfreie Alternative mit der zudem eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter gleichzeitig gemessen werden können, haben sich in den vergangenen Jahren zunehmend spektralphotometrische Verfahren im ultravioletten (UV: 190-400 nm), sichtbaren (VIS: 400-780 nm) sowie im kurz- (NIR-A: 780-1100 nm) bzw. langwelligen nahinfraroten (NIR-B: 1100-2500 nm) Bereich des elektromagnetischen Spektrums etabliert. Während im UV-VIS-Bereich insbesondere Pigmente (Chlorophyll, Anthocyane, Carotinoide, Falcone) erfasst werden, können im NIR-Bereich zusätzlich auch Inhaltsstoffe wie Zucker, organische Säuren oder eine Vielzahl stickstoffhaltiger Verbindungen sowie Wasser sehr gut detektiert werden. Einen Überblick über die Möglichkeiten zur Qualitätsbestimmung mittels NIRS bei Obst und Gemüse geben unter anderem Slaughter und Abbott (2004), Magwaza und Opara (2015) sowie Sun et al. (2017), wobei sich die meisten Arbeiten mit der Bestimmung sensorischer (z. B. Fruchtfleischfestigkeit) und geschmacklicher Parameter (insbesondere Zucker und Säuren) beschäftigen. Parameter, die den gesundheitlichen Wert von Obst und Gemüse definieren,

finden sich ebenfalls, allerdings konzentrieren sich die meisten Arbeiten auf eine kleine Anzahl Parameter bei einzelnen Obst- und Gemüsearten. So gibt es z. B. eine Reihe von Arbeiten zur nicht-destruktiven Bestimmung des Gehaltes an Lycopenen und anderer Carotinoide von Tomaten (u. a. Saad et al., 2017; Ciaccheri et al., 2018; Tilahun et al., 2018). Arbeiten zu weiteren Parametern (z. B. dem Phenolgehalt oder der antioxidativen Aktivität) finden sich zwar auch vereinzelt (Kljusurić et al., 2015; Toledo-Martín et al., 2018), hierbei erfolgten die Messungen aber destruktiv. Zudem gibt es Ansätze die Haltbarkeit bzw. die Lagerungsdauer mittels NIRS-Messungen abzuschätzen (Jacobs et al., 2016), wobei in dieser Arbeit die Lagerungsdauer die direkte Zielgröße in der Kalibrationsentwicklung war. Eine zweite Möglichkeit ist die Bestimmung von Parametern, die sich während der Lagerung kontinuierlich verändern, um darauf aufbauend ein Prognosemodell zur Abschätzung der weiteren Haltbarkeit zu treffen. Ein entsprechender Ansatz wird von Lohr et al. (2016) sowie Zerche et al. (2019) für Zierpflanzenstecklinge beschrieben.

Das Potential von mobilen NIR-Scannern zur Qualitätskontrolle und Haltbarkeitsabschätzung von Lebensmitteln konnte in dem an der HSWT durchgeführten Forschungsprojekt "Zerstörungsfreie Messmethode zur schnellen Qualitätsbewertung und Haltbarkeitsabschätzung von Lebensmitteln mit Hilfe von Food-Scannern (NIR-Qualitätsbestimmung)" am Beispiel Tomaten gezeigt werden. So kann z. B. mittels NIRS-Messungen eine sensorische Qualitätseinstufung anhand der Festigkeit vorgenommen werden und aufbauend darauf eine (temperaturabhängige) Prognose der weiteren Haltbarkeit abgegeben werden (Goisser et al., 2019). Des Weiteren ist eine Bestimmung des Wassergehaltes und damit der Frische, des Zuckergehaltes als wesentlichen Geschmacksparameter sowie der Lycopenenkonzentration als Beispiel für einen wertgebenden Inhaltsstoff möglich (Goisser und Mempel, 2019). Damit stellt das Projekt unter Beweis, dass die Miniaturisierung der Spektrometertechnologie inzwischen soweit fortgeschritten ist, dass mit relativ kostengünstigen, handgeführten Geräten für die Vor-Ort-Messungen vergleichbare Vorhersageleistungen erzielt werden können wie sie bisher nur mit teuren Laborspektrometern möglich waren.

2.2 Qualitätserhalt von Obst und Gemüse in der Nacherntephase

Um die Qualität von Obst und Gemüse während der Nacherntephase möglichst lange zu erhalten, sind drei Aspekte von besonderer Bedeutung:

- Reduktion von Wasserverlusten
- Minimierung von metabolischen Prozessen, bei denen wertgebende Inhaltsstoffe abgebaut werden
- Vermeidung von Nacherntekrankheiten

Die beiden fundamentalen Werkzeuge zur Optimierung der Lagerungsbedingungen sind die Steuerung der Temperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit (Paull, 1999). Durch eine Absenkung der Temperatur werden metabolische Prozesse verlangsamt und

eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte wirkt Wasserverlusten entgegen. Bei der Temperatur muss dabei die Sensitivität der verschiedenen Obst- und Gemüsearten beachtet werden. Während Möhren z. B. im Bereich um 0 °C gelagert werden können bzw. sollen, treten bei Tomaten bereits bei Temperaturen knapp unter 10 °C Kälteschäden ("Chilling injuries") sowie Geschmacksverluste auf (ATB, 2005; Watkins und Nock, 2012). Zudem muss während der Lagerung eine Unterschreitung des Taupunktes unbedingt vermieden werden, da dies das Auftreten von Fäulepilzen wie z. B. Botrytis fördert. Dies stellt vor allem bei Produkten, die bei einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit gelagert werden, eine große Herausforderung dar. Die Gefahr der Taubildung besteht des Weiteren bei der Auslagerung von kühl gelagerten Produkten bzw. auch bei Temperaturwechsel während Lagerung und Transport. Vor allem bei Beerenobst sind die Nachernteverluste auf Grund von Taubildung und nachfolgenden Pilzinfektionen erheblich. Bei ökologisch erzeugten Beerenfrüchten ist dieses Risiko besonders hoch, da bei ökologisch produziertem Obst und Gemüse auf Grund des Verzichts auf Fungizide die Grundbelastung mit Schimmel- und Fäulniserregern in der Regel höher ist als bei konventionell erzeugtem (Mditshwa et al., 2017). Ein weiterer Aspekt bei der Regelung der Lufttemperatur und -feuchte im Lager ist die Gleichmäßigkeit, so können in der Nähe der Kühlluftzufuhr bei einer unzureichenden Luftzufuhr deutlich niedrigere Temperaturen herrschen als in weiter entfernten Bereichen. Zudem strömt beim Öffnen der Tür warme und feuchte Luft in das Lager strömt, kühlt diese anschließend ab, kann es punktuell zu einer Taupunktunterschreitung kommen. Um dies zu vermeiden, ist eine ausreichende Luftzirkulation notwendig (Foster et al., 2002; Ho et al., 2010).

Bei der Langzeitlagerung von Kernobst – insbesondere von Äpfeln – ist zudem die Steuerung der Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration in der Lageratmosphäre von besonderer Bedeutung. Für die Kurzzeitlagerung von Obst und Gemüse hat dies aber keine Bedeutung. Wichtiger ist in diesem Zusammenhang die Ethenkonzentration (Kader, 1985) vor allem, wenn unterschiedliche Obst- und Gemüsearten gemeinsam gelagert bzw. transportiert werden, die zum einen sehr viel Ethen abgeben (z. B. Äpfel, Bananen oder Pfirsiche), und zum anderen eine hohe Ethen-Sensitivität aufweisen (z. B. viele Kohlarten, Salate, Gurken oder Tomaten). Die technisch einfachste Möglichkeit einer Ethenanreicherung entgegen zu wirken ist eine gute Belüftung der Lagerräume. Dies ist aus energetischer Sicht allerdings kritisch zu sehen, da mit dem erhöhten Luftwechsel der Energiebedarf für die Kühlung stark ansteigt. Bei konventionell erzeugtem Obst und Gemüse können etheninduzierte Haltbarkeitsverluste durch die Behandlung mit 1-MCP deutlich reduziert werden (Watkins, 2008), für biologisch und nachhaltig erzeugte Produkte ist dies aber nicht zulässig. Hier könnte eine laufende Messung der Ethenkonzentration und eine darauf aufbauende Steuerung des Luftwechsels sowie der Luftbewegung im Lager eine

interessante Alternative sein. In den letzten Jahren wurden kostengünstige elektrochemische Sensoren entwickelt, die für diesen Ansatz nutzbar erscheinen (Krivec et al., 2015; Ma et al., 2016). Auf Basis einer kontinuierlichen, engmaschigen Erfassung von Temperatur, relativer Luftfeuchte, Ethenkonzentration und gegebenenfalls weiterer Umweltparameter lassen sich dynamische Prognosemodelle für die Qualitätsentwicklung erstellen, die das bisher in der Logistik übliche starre "First-In-First-Out"-Prinzip durch ein flexibles "First-Expired-First-Out"-System ablösen und qualitätsbedingte Verluste reduzieren könnten (Hertog et al., 2015). Ein optimiertes Lagerungsmanagement könnte insbesondere bei Bio-Obst und -Gemüse helfen die Lagerungsverluste zu reduzieren, die auf Grund der oben angesprochenen größeren Anfälligkeit für biotische Lagerschäden sowie der kleineren Absatzmengen und größeren Sortimentsbreite und damit der längeren Umschlagzeiten in der Regel höher sind als bei konventioneller Ware (ATB, 2003; Watkins und Nock, 2012). Zudem spielt der Erhalt geschmacksgebender und gesundheitsfördernder Inhaltsstoffe bei biologisch erzeugten Produkten eine besondere Rolle. Diese werden vom Verbraucher bei Bio-Obst- und Gemüse als besonders hoch eingestuft und sind der wesentliche Grund für die Bereitschaft einen höheren Preis für die Produkte zu bezahlen (Padel und Forster, 2005; Teng und Wang, 2015).

3 Material und Methoden

Im Folgenden werden die technologischen Grundlagen, die in der ersten Projektphase auf Grundlage von Literatur- und Marktrecherchen erarbeitet wurden und auf denen die eigentliche Entwicklungsarbeit im weiteren Projektverlauf aufbauten kurz dargestellt.

Festlegung der Qualitätsparameter und der NIRS-Messprotokolle

Auf Grundlage einer Literaturrecherche zu Projektbeginn wurden die in Tab. 1 aufgeführten Qualitätsparameter festgelegt, die entweder die sensorische, nutritive/gesundheitliche bzw. geschmackliche Qualität bestimmen oder für die Abschätzung der Resthaltbarkeit genutzt werden können. Bei einer Reihe von Parametern wurden zudem Informationen über eine erfolgreiche Bestimmung mittels NIRS in der Literatur gefunden. Basierend auf den genannten Referenzen wurden die Bestimmungsverfahren – sofern diese an der HSWT nicht bereits in der Routine etabliert waren – etabliert.

Tab. 1: Ausgewählte Qualitätsparameter für die vier Modellkulturen (Einordnung: G = geschmacklicher Wert, L = Lagerfähigkeit, N = nutritiver/gesundheitlicher Wert; S = sensorischer Eindruck)

Parameter	Methode	Einordnung	Erdbeere	Karotte	Zucchini	Brokkoli	Referenzen (exemplarisch)
Lösliche Feststoffe	Refraktometrie	G	X	X			Montero et al., 1996; Rady et al., 2018
Titrierbare Säure	pH-Titration	G/L	X			X	Montero et al., 1996; Sabir, 2012; Mancini et al., 2020
Gesamtzucker	Spektralphotometrie	G/L	X	X			Zude et al., 2007; Kjellenberg, 2007; Basson et al., 2010
Chlorophyll a und b	Spektralphotometrie	L		X	X	X	Blanco-Diaz et al., 2014; Shakeel et al., 2019
Extrahierbare N-Fraktionen	Griess-Ilosvay	L			X	X	King & Morris, 1994; Page et al., 2001
Gesamtstickstoff	Dumas-Verfahren	L			X	X	King & Morris, 1994; Page et al., 2001
Polyphenole	Folin-Ciocalteu	N	X	X	X	X	Cieslik et al., 2007; Sharma et al., 2010
L-Ascorbinsäure	Spektralphotometrie	N/G	X	X	X	X	Montero et al., 1996; Blanco-Diaz et al., 2014
Anthocyane	pH-Differentialmethode	N/G/L	X				Montero et al., 1996; Mancini et al., 2020
Antioxidative Kapazität	Briggs-Rauscher	N/L	X	X	X	X	Kevers et al., 2007; Höner & Cervelatti, 2002
Carotinoide	Spektralphotometrie	N/L		X	X	X	Quilitzsch et al., 2005; Luo et al., 2019
Fruchtfleischfestigkeit	Penetrometrie	S/L	X	X	X		Liu et al., 2016; Lewers et al., 2020
Wassergehalt	Gravimetrie	S/L	X	X	X	X	Toivonen, 1996; Lewers et al., 2020; Lufu et al., 2020

Für die Durchführung der NIRS-Messungen wurde basierend auf einer Marktrecherche das Gerät ASP-NIR-M der Firma Allied Scientific Pro (Canada) ausgewählt, wobei zwei Bauformen genutzt wurden einmal der Typ Reflect mit interner Optik und einmal der Typ Fiber mit einem Lichtwellenanschluss für eine externe Optik. Das Gerät arbeitet im Wellenlängenbereich von 900 bis 1.700 nm mit einer optischen Auflösung von 10 nm (1,17 nm/Pixel) und einem Signal-Rausch-Verhältnis von 6000:1 bei einer Messdauer von einer Sekunde. Als externe Optik für das ASP-NIR-M-Fiber-Gerät wurde eine aktiv beleuchtete Ulbricht-Kugel (ISP-REF, Ocean Optics, Germany) über einen Lichtwellenleiter angeschlossen.

Vor der Kalibrationsentwicklung wurde die Art und Weise erprobt, wie die NIRS-Messungen bei den vier Modellkulturen – Erdbeere, Karotte, Zucchini und Brokkoli – durchgeführt werden sollten. Basierend auf Serienmessung wurde festgelegt, dass je Probe fünf Messungen (bei Zucchini, Brokkoli und Karotte an unterschiedlichen Stellen einer Frucht; bei Erdbeere durch fünfmaliges Neuauflegen der Frucht) durchgeführt werden. Damit konnte die Streuung der Messungen an einer Frucht im Vergleich zu den Unterschieden zwischen verschiedenen Früchten auf ein akzeptables Niveau reduziert werden.

Sensorauswahl und Grundkonzept des Sensornetzwerkes

Die für die erste Evaluierung ausgewählten Sensoren sind in Tab. 4 im Anhang aufgeführt. Von diesen Sensoren wurden jeweils einzelne Exemplare ausgewählt und ihre Eignung durch Vergleichsmessungen in den Versuchslagerkabinen der HSWT geprüft. Die Messung belegten, dass die kostengünstigen Sensoren für die Messung von Lufttemperatur und/oder -feuchte in der Regel nur eine systematische Abweichung aufweisen, die durch eine einfache Referenzierung behoben werden konnte. Abb. 1 zeigt beispielhaft den Vergleich von vier (referenzierten) BME280-Sensoren im Vergleich zu einem kalibrierten Referenzsensor (SHT25) während der ersten 60 Minuten nach Platzierung im Versuchslager. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für (fast) alle der geprüften kostengünstigen Sensoren gefunden. Die Festlegung auf den BME280 als Standardlufttemperatur und -feuchtefühler hatte drei Gründe: (i) die Genauigkeit war vergleichbar wie bei den anderen Sensoren, (ii) der BME280 lässt sich gemeinsam mit anderen Bauteilen über den I²C-Bus ansprechen, wodurch die Anzahl der benötigten GPIO-Pins reduziert werden kann, und (iii) der BME280 erfasst gleichzeitig die Lufttemperatur, die Luftfeuchte und den Luftdruck (letzteres könnte im Zusammenhang mit CO₂- und/oder Ethenmessungen von Interesse sein). Die erste Auswahl der weiteren Sensoren erfolgte auf Grundlage vergleichbarer Messungen sowie an Hand der Aspekte: Anbindung/Kommunikationsprotokoll, Energieverbrauch, Störverhalten, Preis. Nach einer ersten Serie von Langzeitmessungen wurden dann nochmals einzelne Sensoren ersetzt, da sie sich als störanfällig erwiesen.

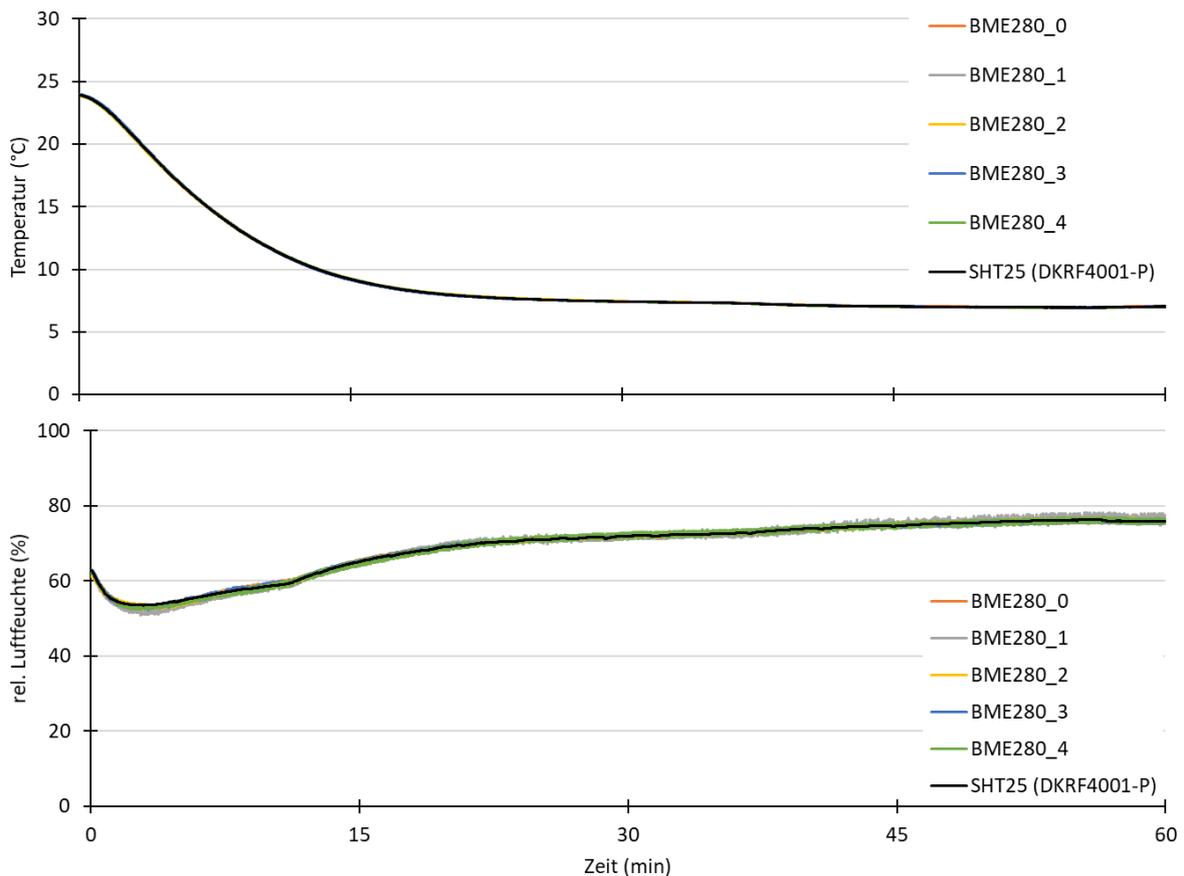


Abb. 1: Vergleich von fünf kostengünstigen Sensoren zur Messung von Lufttemperatur und -feuchte (BME280) im Vergleich zum kalibrierten Referenzsensor (SHT25)

Parallel zur Sensorauswahl wurde ein erstes Konzept für das Sensornetzwerk erstellt. Als Grundlage wurden ESP32/ESP8622 ausgewählt, da diese über unterschiedlichste Protokolle drahtlos kommunizieren können (Bluetooth, WLAN/ESP_NOW, LoRa) und zudem sehr kompakt und energiesparend sind. Dies eröffnet die Möglichkeit die Sensorknoten über einen Akku mit Strom zu versorgen, was diese mobil einsetzbar macht. Im Rahmen der Entwicklung der Sensornetzwerke wurde erprobt welche Art der Datenkommunikation sich am besten eignet.

Lagerversuche

Für die Lagersuche wurden Versuchslager an der HSWT genutzt. Es handelt sich dabei um kleinräumige, dicht abschließende Plexiglasboxen (Raumvolumen ca. $0,6 \text{ m}^3$) die in einem Kühlraum untergebracht sind. Insgesamt verfügt die HSWT über drei Kühlräume mit jeweils neun Lagerabteilen. Die Temperatur in den kleinräumigen Lagerabteilen wird über die Temperatur im jeweiligen Lagerraum gesteuert. Zusätzlich kann in jedem einzelnen Lagerabteil die Lageratmosphäre (Zufuhr von CO_2 oder Ethen, Belüftung mit Umgebungsluft) sowie in begrenztem Umfang die Luftfeuchte (Trocknungsmittel) gesteuert werden. Für die Lagerversuche wurden Lagergut in praxisüblichen Gebinden (Kisten,

Schalen) sowie (i. d. R.) ein mobiler Sensorknoten in die kleinräumigen Lagerabteile eingebracht und die gewünschten Parameter (Lufttemperatur, Lageratmosphäre) entsprechend variiert. Zu den jeweiligen Auslagerungsterminen wurden jeweils mehrere Zucchini, Erdbeeren, Brokkoliköpfe bzw. Karotten entnommen und als Mischprobe für die Qualitätsanalyse genutzt. Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt elf Lagerversuche mit den vier Modellkulturen durchgeführt. Eine Übersicht über alle Versuche, aufgeteilt in die jeweilige Kultur, die Lagerdauer und die jeweiligen Lagervarianten, befindet sich in Tab. 2.

Allerdings wurde bei Zucchini bereits während des ersten Lagerversuches festgestellt, dass Veränderungen bei den gewählten Inhaltsstoffen erst dann auftraten, wenn äußerlich Qualitätsmängel erkennbar waren (dies wurde durch Beobachtungen im Rahmen der Qualitätsbestimmung mittels NIRS bestätigt). Ähnliches zeigte sich auch bei den Erdbeeren: Zwar ergaben die Inhaltsstoffanalysen große Differenzen zwischen verschiedenen Chargen und teilweise auch zwischen Früchten aus derselben Charge, jedoch waren keine systematischen Veränderungen während der Lagerung zu erkennen. Aus diesen Gründen wurde auf die Durchführung weitere Versuche und die detaillierte Darstellung der bereits durchgeführten Versuche verzichtet.

Tab. 2: Übersicht über die während der Projektlaufzeit durchgeführten Lagerversuche

Kultur	Lagerdauer (Tage)	Varianten
Karotte	57	Temperatur, Ethen
Karotte	42	Temperatur, Ethen
Karotte	49	Versandbedingungen, Ethen
Brokkoli	14	Ethen, CO ₂
Brokkoli	25	Temperatur, Ethen
Brokkoli	14	Versandbedingungen, Ethen
Brokkoli	21	Versandbedingungen, Ethen
Zucchini	15	Ethen
Erdbeere	10	Temperatur
Erdbeere	10	Temperatur
Erdbeere	10	Temperatur, Unterbrechung der Kühlkette

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der NIRS-Kalibrierung und der Lagerungsversuche sowie die Entwicklung der mobilen Sensorknoten getrennt dargestellt, wobei die Untersuchungen zum Teil miteinander verknüpft waren. An diesen Stellen sind entsprechende Querverweise eingefügt.

4.1 Qualitätsbestimmung mittels NIRS

4.1.1 Kalibrationsentwicklung

In den ersten zwei Jahren wurden für alle in Tab. 1 aufgeführten Parameter Referenzanalysen für die NIRS-Kalibrationsentwicklung durchgeführt. Dann wurden die Arbeiten aus Kapazitätsgründen auf die zielführendsten Kulturen und Parameter beschränkt. Auf weitere Analysen bei den Zucchini wurde gänzlich verzichtet, da keine systematischen Veränderungen bei den gewählten Parametern bis zu dem Zeitpunkt erkennbar waren, wenn die Früchte alleine auf Grund ihres äußeren Erscheinungsbilds nicht mehr verkäuflich waren. Beim Brokkoli wurden die Antioxidative Kapazität, die Trockensubstanz sowie der lösliche und der Gesamt-N-Gehalt analysiert. Bei den Erdbeeren beschränkten sie die Arbeiten zum Ende hin auf die Trockensubstanz sowie den Brix-Wert und bei der Karotte auf Trockensubstanz, Brix-Wert und die Antioxidative Kapazität. Die übrigen zu Projektbeginn ausgewählten Parameter wurden zurückgestellt, weil sich entweder keine Hinweise auf lagerungsbedingte Veränderungen ergaben (z. B. Carotinoide bei Karotten) oder die Parameter eng mit anderen korreliert (z. B. N-Fractionen und Chlorophyll bei Brokkoli) oder die Bestimmbarkeit mittels NIRS auf Grundlage der bis zum Beginn des letzten Projektjahres vorliegenden Ergebnisse äußerst unwahrscheinlich erschien. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der Kalibrationsentwicklung für die drei Kulturen beschrieben. Die Darstellung beschränkt sich dabei auf die Messungen des Geräts mit der internen Optik, da hiermit durchgängig deutlich bessere Ergebnisse erzielt wurden als mit dem Gerät mit der über einen Lichtwellenleiter angeschlossenen Optik.

Brokkoli

Für die NIRS-Kalibrationen beim Brokkoli wurden die Einzelmessung je Kopf gemittelt und zufällig jede dritte Probe für den Validierdatensatz entnommen. Die übrigen Proben wurden für die Kalibrationsentwicklung genutzt. Im Rahmen der Kalibrationsentwicklung wurden mehrere Verfahren zur Datenvorbehandlung (Glättung, Detrending, Standardisierung, Streulichtkorrektur) verwendet. Grundsätzlich nutzbare Kalibrationsmodelle ergaben sich für den Trockensubstanzgehalt, sowie den löslichen und den Gesamt-N-Gehalt bzw. den Quotient aus den beiden N-Fractionen (Abb. 2). Für die Antioxidative Kapazität wurde keine zufriedenstellende Vorhersagegenauigkeit erreicht (Daten nicht dargestellt). Die besten Ergebnisse wurden bei allen Parametern mit der Kombina-

tion der ersten Ableitung (Savitzky-Golay-Filter mit Fensterbreite 10) und einer nachfolgenden Streulichtkorrektur (Multiplicative Scatter Correction) erzielt. Die Zahl der optimalen Anzahl Variablen (Kreuzvalidierung) lag je nach Parameter zwischen 10 und 13. Die alleinige Verwendung der ersten Ableitung ergab im Hinblick auf die Vorhersagegüte vergleichbare Modelle, allerdings wurden ein bis zwei Variablen mehr benötigt. Die Genauigkeit der Modelle ist mit RER-Werten (Verhältnis der Spannweite der Referenzwerte im Validierdatensatz zum RMSEV) von um die sieben allerdings nur für eine grobe Klassifizierung geeignet (Williams, 2001), wobei einschränkend zu sagen ist, dass die ungleichmäßige Werteverteilung (Häufung im unteren Bereich) die Aussagekraft der statistischen Maßzahlen etwas eingrenzt.

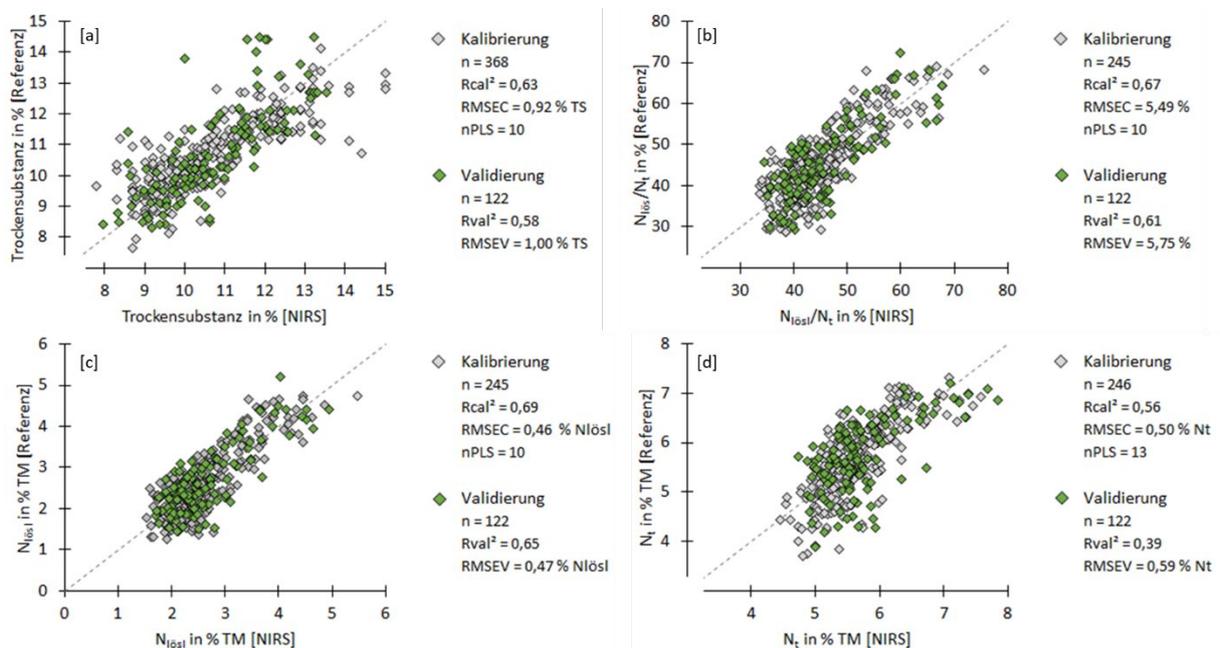


Abb. 2: Kalibrationsmodelle für [a] die Trockensubstanz, [b] das Verhältnis von $N_{lös}$ zu N-Gesamt, [c] $N_{lös}$ und [d] N-Gesamt bei Brokkoli aufgeteilt für den Kalibrier- und den Validierdatensatz (n = Anzahl Proben im Kalibrier-/Validierdatensatz, R_{cal}^2/R_{val}^2 = Bestimmtheitsmaß für die Kalibrierung/Validierung, RMSEC/RMSEV = Standardfehler der Kalibrierung/Validierung, nPLS = Anzahl latente Variablen im PLS-Modell)

Bei der Trockensubstanz muss zudem die Genauigkeit der Referenzmethode (Trockenschrank) berücksichtigt werden. Aus Wiederholmessungen für frisches Pflanzenmaterial wurde ein Fehler von 0,5 % ermittelt. Der RMSEV beträgt damit ziemlich genau das doppelte. Eine deutliche Verbesserung des Kalibriermodells ist damit vor allem über eine Verbesserung des Referenzverfahrens zu erzielen (Tillmann, 1996). Es ist auch zu erkennen, dass bei allen drei Stickstoffparametern ($N_{lös}$, N_t und Quotient aus $N_{lös}$ und N_t) die Modelle vor allem bei den Proben im unteren Wertebereich größere Abweichungen zeigen. Auch dies könnte auf die ungleiche Datenverteilung zurückzuführen sein (Williams,

2001). Allerdings waren die Datensätze mit jeweils gut 360 Proben zu klein, um eine größere Anzahl Proben mit niedrigen Gehalten aus dem Kalibrierdatensatz herauszunehmen.

Erdbeeren

Die Aufteilung der Daten in den Kalibrier- und den Validierdatensatz erfolgte bei den Erdbeeren nach demselben Prinzip wie beim Brokkoli beschrieben – zwei Drittel der Proben für die Kalibrierung und ein Drittel für die Validierung. Auch das weitere Vorgehen (Datenvorbehandlung usw.) entsprach dem Vorgehen beim Brokkoli. Von den analysierten Parametern (Trockensubstanz, Summe der löslichen Feststoffe/Brix, Antioxidative Kapazität, Anthocyane, Titrierbare Säure und Fruchtfleischfestigkeit) konnten nur die Trockensubstanz und die Summe der löslichen Feststoffe (ausgedrückt als g Saccharose je kg Trockensubstanz) einigermaßen zufriedenstellend kalibriert werden (Abb. 3). In beiden Fällen wurden die besten Vorhersagemodelle bei Verwendung der ersten Ableitung (Savitzky-Golay-Filter mit Fensterbreite 8) erzielt.

Die RER-Werte liegen bei beiden Parametern zwischen 10 und 11, damit für eine Klassifizierung bzw. ein grobes Screening geeignet (Williams, 2001). Die RPD-Werte liegen bei 2,0 für die Trockensubstanz und 1,8 für die Summe der löslichen Feststoffe, was nach der Definition von Williams (2001) einer sehr schwachen Vorhersageleistung entspricht. Allerdings ist dabei die bei beiden Parametern sehr ungleichmäßige Verteilung der Werte zu beachten.

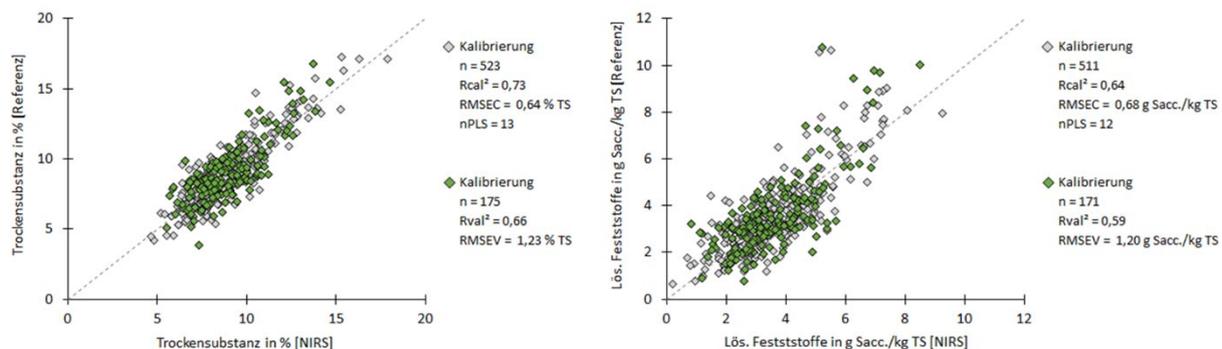


Abb. 3: Kalibrationsmodelle für [a] die Trockensubstanz, [b] die Summe der löslichen Feststoffe (mg Saccharose/kg TS) bei Erdbeeren aufgeteilt für den Kalibrier- und den Validierdatensatz (n = Anzahl Proben im Kalibrier-/Validierdatensatz, R_{cal}^2/R_{val}^2 = Bestimmtheitsmaß für die Kalibrierung/Validierung, RMSEC/RMSEV = Standardfehler der Kalibrierung/Validierung, nPLS = Anzahl latente Variablen im PLS-Modell)

Karotten

Bei den Karotten konnten nicht einmal für die in der Regel gut kalibrierbare Trockensubstanz zufriedenstellende Kalibriermodelle erzielt werden. Ursächlich ist sicher der deutlicher kleinere Datensatz von nur rund 200 Proben. Dies dürfte aber nicht die alleinige Ursache sein, da auch bei der Verwendung aller Proben und einer Leave-One-

Out-Kreuzvalidierung keine zufriedenstellenden Modelle erreicht werden konnten und schon bei der Verwendung von drei bis fünf latenten Variablen ein starkes Overfitting zu beobachten war. Dies deutet darauf hin, dass auch mit einem deutlich größeren Datensatz keine erfolgreiche Kalibration möglich gewesen wäre. Ursächlich hierfür könnte die relativ dicke und leicht wachsige Schale der Karotten sein. Zum einen sorgt diese für verstärkte Streulichteffekte und zum zweiten ist fraglich, ob die Konzentration der Inhaltsstoffe in der Schale mit denen im Fruchtfleisch für eine erfolgreiche Kalibration eng genug korreliert ist. Auf eine detaillierte Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet.

4.1.2 Kalibrationstransfer

Im Rahmen dieser Arbeiten sollte geprüft werden in wieweit die für eines der beiden Geräte entwickelten Kalibrationsmodelle mit möglichst geringem Aufwand auf das zweite Gerät übertragen werden können, umso die Grundlage für eine universelle/geräteunabhängige Anwendung der Kalibrationen zu schaffen. Da allerdings die Qualität der Kalibrationsmodelle für das Gerät mit der externen Optik alleine schon nicht zufriedenstellend war, war ein Kalibrationstransfer nicht möglich.

4.2 Sensornetzwerk

4.2.1 Entwicklung eines (mobilen) Sensornetzwerkes

Im Folgenden wird der finale Aufbau der Sensorknoten sowie des gesamten Sensornetzwerkes beschrieben, wobei letztlich basierend auf einer gemeinsamen Plattform zwei unterschiedliche Bauformen des Sensorknotens entwickelt wurden. Bei der ersten Bauform handelt es sich um einen akkubetriebenen Sensorknoten mit reduzierter Sensorausstattung. Bei der zweiten Bauform erfolgt die Spannungsversorgung über ein 5-Volt-Lastnetzteil, da einige der Sensoren (u. a. CO₂, Ethen, Strömungsgeschwindigkeit) auf Grund einer aktiven Heizung und/oder sehr langer Einlaufzeiten nicht mittels Akku betrieben werden können.

Datenerfassung und Verarbeitung

Der (mobile) Sensorknoten (Abb. 4[e]) besteht aus zwei Hauptelementen, der Zentralplatine (Abb. 4[a und b]) und der Sensorplatine (Abb. 4[c und d]), die mittels einer 14 poligen IDC-Buchse verbunden werden. Das Kernstück der Zentralplatine ist ein ESP8266-Mikrocontroller (Wemos D1 Mini Pro), der gegenüber den ursprünglich ange-dachten AVR-Mikrocontrollern zwei wesentliche Vorteile bietet: Zum einen sind auf diesen Modulen unterschiedliche Möglichkeiten für eine drahtlose Datenübertragung implementiert, zum anderen haben sie bei höherer Rechenleistung (Taktfrequenz, Flash Speicherkapazität und SRAM) und einen deutlich geringeren Energieverbrauch. Als Stromversorgung dient ein Lithium-Polymer-Akku mit einer Kapazität von 4000 mAh und einer Nennspannung von 3,7 V. Diese wird von einem Aufwärtswandler (MT3608) für das ESP8266-Modul auf 5 V angehoben. Für das Lademanagement kommt ein TC4056A-La-

deregler zum Einsatz. Die vom Mikrocontrollermodul bereitgestellten Ausgangsspannungen 3,3 V und 5 V werden von der Zentralplatine über Reed-Relais (SIL05-1A72-71L) nach Bedarf zur Sensorplatine durchgeschaltet. Dies ermöglicht ein Ein- und Ausschalten einzelner Sensorschaltkreise, was Strom spart und die Akkulaufzeit erhöht. Die Akkuspannung kann per Reed-Relais durch einen Messwiderstand an den Analogeneingang des ESP8266 durchgeleitet werden, um den Ladezustand des Akkus zu ermitteln. Um unerwünschte Schaltvorgänge während des Aufwachens des ESP8622 aus dem Deep-Sleep-Modus zu verhindern, werden die Schaltzustände der Reed-Relais in einem Schieberegister (74HC595) festgehalten.

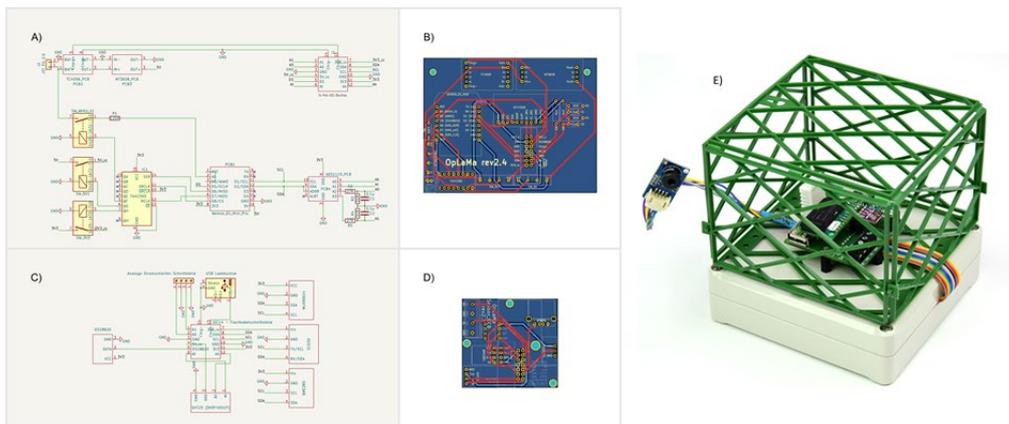


Abb. 4: Schaltplanentwürfe und Platinenlayout in KiCad 6.0 der Zentralplatine (A und B) sowie der Sensorplatine (C und D) sowie Sensorknotenprototyp mit Gehäuse (voll ausgestattete Sensorplatine montiert mit Schutzkäfig)

Für die Anbindung von Sensoren an das Modul stellt die Zentralplatine vier physische Schnittstellen bereit, davon zwei digital und zwei analog. Ein I²C-Bus (SM-Bus kompatibel) und ein asynchroner serieller Bus (1-Draht-Bus) für die digitale Kommunikation. Analoge Signale können über zwei 4-20 mA-Stromschleifen (weit verbreiteter Industriestandard) sowie zwei analoge Spannungseingänge (Spannungspegel 0-1 V) aufgenommen werden. Analoge Eingangssignale werden von einem 4-Kanal, 16-Bit A/D-Wandler (ADS1115) digitalisiert und über den I²C-Bus übertragen (Abb. 5).

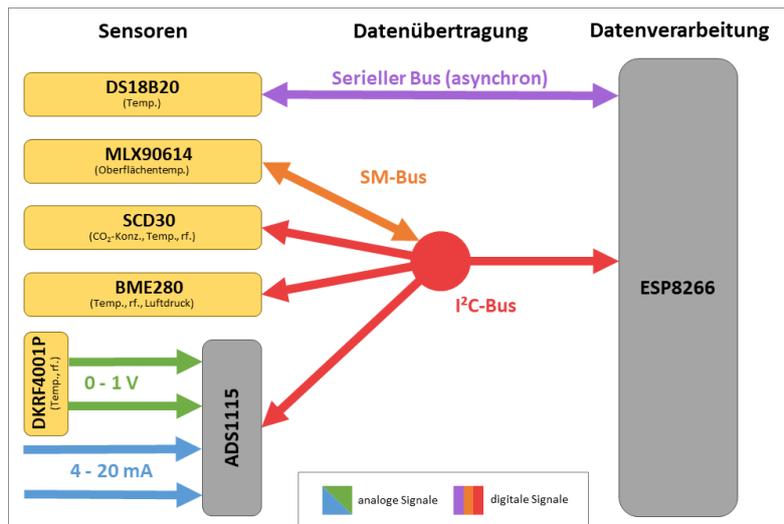


Abb. 5: Verfügbare Schnittstellen zur Kommunikation zwischen Mikrocontroller und Sensoren

Datenübertragung

Die beschriebenen Sensormodule bilden zusammen mit einem Mastermodul ein drahtloses Sensornetzwerk. Sensorausstattung und Messintervalle werden vom Nutzer an einem Endgerät bestimmt und entlang der Übertragungskette an die einzelnen Sensormodule übermittelt (Abb. 4). Nach der Konfiguration agieren die Sensormodule eigenständig, sie führen die konfigurierten Messungen in den vorgegebenen Intervallen durch und übermitteln die Daten an das Mastermodul. Zwischen den Messintervallen wird das Sensormodul in einen Ruhezustand versetzt, der den Stromverbrauch senkt und so die Akkulaufzeit erheblich steigert. Zur Kommunikation zwischen Sensor- und Mastermodul innerhalb des Lagerraums wurde das ESP-WIFI-MESH-Protokoll gewählt. Dabei handelt es sich um ein energieeffizientes WLAN-basiertes Kommunikationsprotokoll, dass selbstbildende und -heilende Netzwerke mit bis zu 1000 Sensorknoten (Stations) und 10 Mbps Datentransfer ermöglicht, dabei kann die Entfernung von einem Modul zum nächsten bis zu 200 m betragen (Abb. 6)

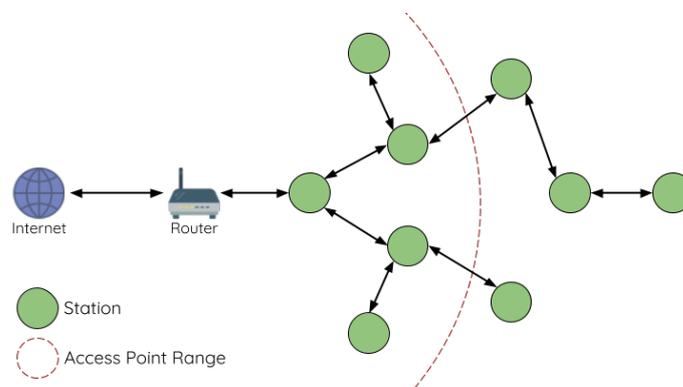


Abb. 6: Schematischer Aufbau eines MESH-Netzwerkes mittels ESP-WIFI-MESH (Quelle: www.espressif.com)

Eine Kommunikation durch die stark isolierten Wände von Kühlräumen ist damit jedoch nicht möglich. Daher wird als Mastermodul ein ESP32-Modul verwendet, das zusätzlich über LoRa verfügt. Je nach den örtlichen Gegebenheiten kann das Mastermodul via USB mit einem Endgerät oder via WLAN direkt mit dem Internet verbunden werden und so die Messdaten in eine SQL-Datenbank übertragen (ortsunabhängig Zugriff). Sollte es nicht möglich sein, ein entsprechendes Endgerät im Inneren des Lagerraums zu platzieren, bzw. im Lagerraum kein WLAN-Netzwerk vorhanden sein, werden die Daten vom Mastermodul via LoRa an ein weiteres Gatewaymodul übertragen, das die Weiterleitung an die SQL-Datenbank oder einen PC übernimmt. Für das Mastermodul bzw. das Gateway könnte alternativ auch ein ESP32-Board mit GSM-Chip genutzt werden oder es könnte ein GSM-Modul direkt auf den ESP8622 des Sensormoduls aufgesetzt werden. Damit könnte das System z. B. zur Echtzeitüberwachung der Transportbedingungen in LKWs oder sogar in einzelnen Versandkartons genutzt werden.

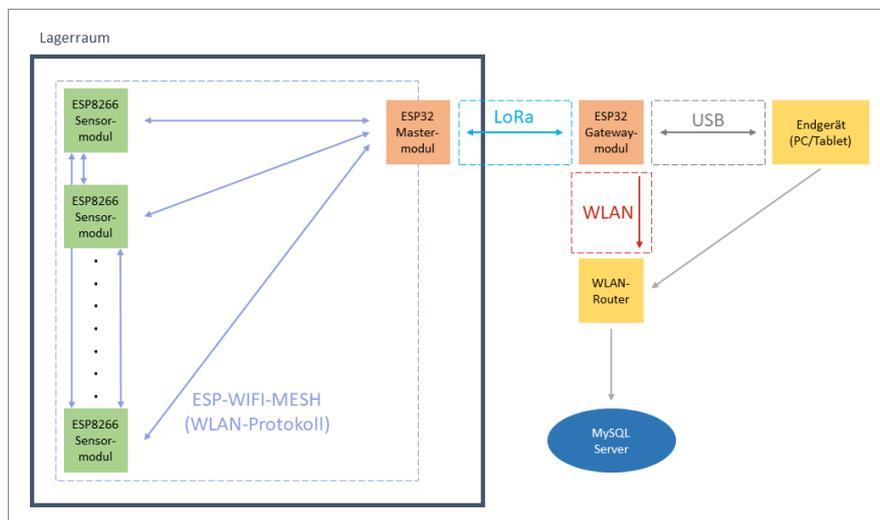


Abb. 7: Schematischer Aufbau des Sensornetzwerkes mit den verschiedenen Datenübertragungstechnologien zwischen Sensormodulen und Endgerät

Sensoren und Sensorplatine

In Tab. 3 ist eine exemplarische Sensorausstattung des Sensorknotens inklusive der Kommunikationsschnittstellen dargestellt. Da der Sensorknoten über insgesamt vier, flexibel konfigurierbare analoge Eingänge (0 bis 1 Volt bzw. 4 bis 20 mA) verfügt, können auch mehrere Analogsensoren gleichzeitig betrieben werden. Damit könnte z. B. zusätzlich noch ein Strömungsmesser angeschlossen werden. Die unten gezeigte Sensorausstattung wurde zumeist in den Lagerversuchen verwendet, wobei der Ethensensor (E2618-C2H4) zwar für Versuchszwecke aber nicht für einen breiten Praxiseinsatz geeignet ist. Zudem war es bei der Verwendung dieses Sensors notwendig das Modul über ein Lastnetzteil zu betreiben.

Tab. 3: Exemplarische Sensorausstattung des Sensorknotens

Bezeichnung	Hersteller	Messgrößen	Kommunikation
BME280	Bosch	Umgebungstemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, Luftdruck	I ² C
DS18B20	Maxim Integrated	Umgebungstemperatur	Eigenes Protokoll (1-Wire)
MLX90614	Melexis	Umgebungstemperatur, Oberflächentemperatur	SM-Bus (I ² C-kompatible)
SCD30	Sensirion	CO ₂ -Konz., Umgebungstemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit	I ² C
E2618-C2H4	Evikon	C ₂ H ₂ -Konzentration	Analog (4-20 mA)

Die beiden für die Messung der Lufttemperaturmessung ausgewählten Sensoren BME280 und DS18B20 lieferten auch über einen längeren Zeitraum zuverlässige Messwerte. Allerdings sollten die Sensoren in regelmäßigen Abständen neu referenziert werden, um eine eventuell auftretende Empfindlichkeitsdrift auszugleichen. Ein Aspekt muss allerdings beim BME280 beachtet werden: Die wiederholte Abfrage in kurzen Abständen (>10 Hz Abfragefrequenz) und anschließende Bildung eines Mittelwerts, führt zu einer nicht unbedeutenden Eigenerwärmung des Sensors und damit zur Verfälschung der Messwerte.

Einen insbesondere für Logistiküberwachung interessanten Ansatz ergab die Kombination der Lufttemperatur- und -feuchtemessung mit dem BME und der Messung der Oberflächentemperatur mittels des MLX90614.: Beim Transport von Erdbeeren sind Temperaturwechseln von kalt nach warm besonders kritisch. Dies wurde in mehreren Versuchen simuliert, bei denen die Temperatur kurzfristig um einige Grad angehoben wurde. Bereits sehr kurze und relativ geringen Temperaturanstiege führten zu erheblichen Ausfällen durch Botrytis, da es bei solch negativen Temperaturdifferenzen zwischen Fruchtoberfläche und umgebender Luft zu Taupunktunterschreitungen an der Fruchtoberfläche kommen kann. Abb. 8 zeigt, dass dieser Vorgang mit dem Sensorknoten sehr gut erfasst werden kann. Während die Lufttemperatur direkt nach der Unterbrechung stark ansteigt, ist bei den Erdbeeren eine deutliche Verzögerung zu erkennen. Etwa 30 Minuten nach der Unterbrechung besteht bei sehr kühler Lagerung (Abb. 8[a]) eine negative Temperaturdifferenz von -16,5 °K zwischen den Früchten und der umgebenden Luft. Dies würde im konkreten Fall (Auslagerung von bei 1 °C gelagerten Früchten bei einer Außentemperatur von 22 bis 25 °C) bereits bei einer relativen Luftfeuchte von 55 bis 60 % eine Taupunktunterschreitung an der Fruchtoberfläche und damit die Bildung von Kondenswasser bedeuten. Dies gilt bedingt selbst dann, wenn die Erdbeeren relativ warm

bei 10 °C (Abb. 8[b]) gelagert wurden: Hier läge die kritische Grenze bei einer relativen Luftfeuchte von etwa 75 %.

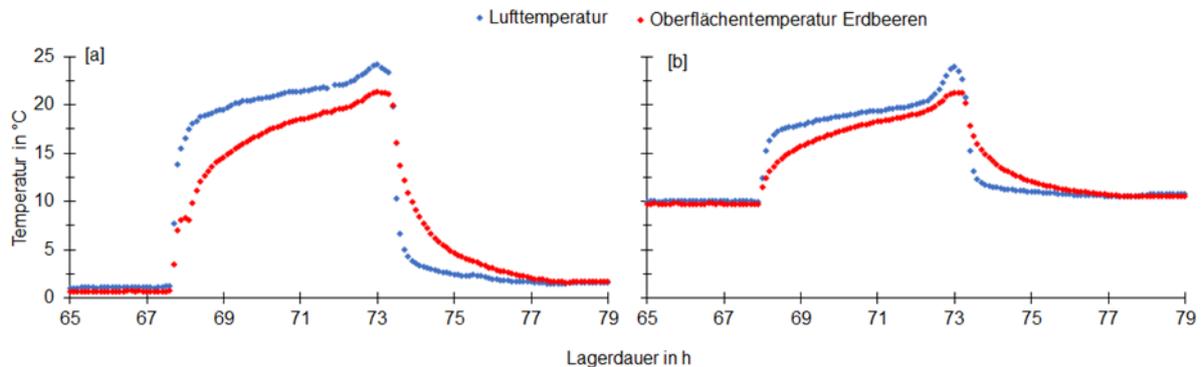


Abb. 8: Verlauf der Lufttemperatur im Lager bzw. der Oberflächentemperatur von Erdbeeren während einer Unterbrechung der Kühlkette für sechs Stunden bei einer Solltemperatur des Lagerraum von [a] 1 °C und [b] 10 °C

Der SCD30 zeigte sich im Praxistest als nur bedingt tauglich: Die Messwerte sind zwar stabil und zuverlässig, jedoch führt sein hoher Stromverbrauch dazu, dass andere Sensoren Fehlmessungen liefern, wenn sie gleichzeitig aktiv sind. Zudem gestaltet sich die Kalibrierung als schwierig, die integrierte „Automatic Selfcalibration“ (ASC) funktionierte nicht zuverlässig und die Alternative, Kalibriergase zu verwenden ist teuer und einem Endnutzer nicht zumutbar.

Für die Ethen-Messungen im Rahmen des Projekts wurden feucht-elektrochemischen Sensoren verwendet (E2618-C2H4). Diese sind aufgrund des Preises (ca. €750), der geringen Lebensdauer (ca. 2-3 Jahre) und enger Rekalibrierintervalle (6 Monate) allerdings nicht für den Einsatz in engmaschigen Sensornetzwerken geeignet, sondern könnten allenfalls punktuell eingesetzt werden. Da sie zudem einen sehr hohen Energieverbrauch und lange Einschaltzeiten haben, können sie nicht mit Akkus betrieben werden, sondern benötigen eine kabelgebundene Spannungsversorgung. Als alternativer Ansatz wurde ein Array aus kostengünstigen Metalloxid-Sensoren erprobt. Die für den Ethensensor genannten Probleme bestehen gleichermaßen für die Sensoren zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit sowie für kapazitive Feuchtesensoren auf die daher an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Zwar wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein stationäres Sensormodul mit entsprechend umfangreicher Sensorausstattung konzipiert, dieses konnte aber aus Kapazitätsgründen nicht realisiert werden.

Mobile Aktormodule als Ergänzung des Sensornetzwerkes

Zusätzlich zu den Sensormodulen wurden Aktormodule gebaut, mit denen beispielsweise Magnetventile oder Ventilatoren kabellos geschaltet werden können, um die Lageratmosphäre gezielt zu beeinflussen. So wurde unter anderem für die Lagerversuche

z. B. eine Ethenkonzentrationsregelung implementiert (Abb. 9). Der Aktorknoten (in diesem Fall ein Magnetventil) fragt beim Mastermodul laufend die aktuelle Ethenkonzentration ab. In Abhängigkeit davon wird die Ethen-Zudosierung über eine Proportional-Integral-Differential-Reglung (Schaltfrequenz und -dauer des Magnetventils) geregelt. In der Praxis könnte über dieses Prinzip einfach entweder eine Belüftung des Lagerraums oder ein Ethen-Scrubber zugeschaltet werden.

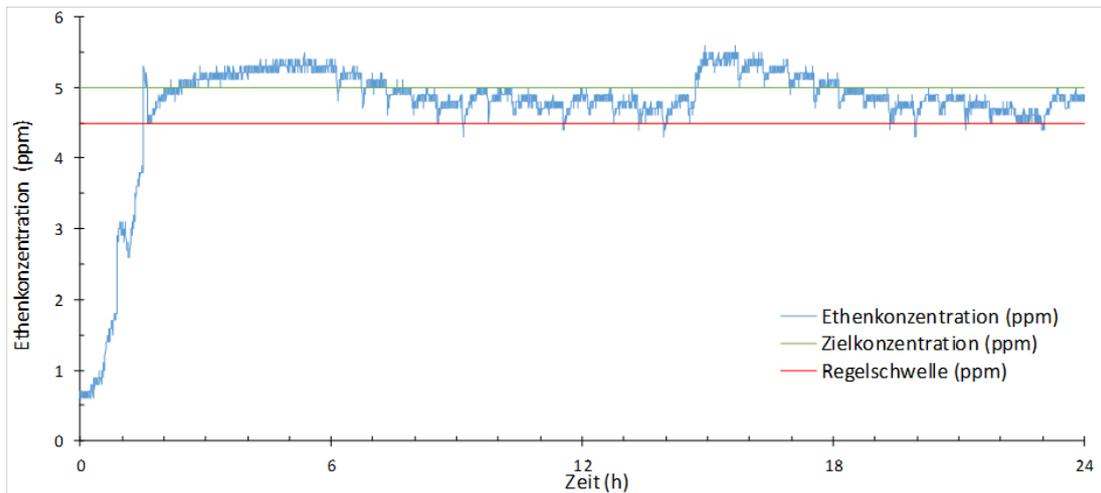


Abb. 9: Regelung der Ethenkonzentration durch ein Aktormodul

4.2.2 Metalloxid(MQ)-Sensorarray zur Ethenmessung

Wie im Abschnitt zuvor erwähnt eignen sich die üblichen feucht-elektrochemischen Ethen-Sensoren nicht für den Einsatz in engmaschigen Sensornetzwerken. Als Alternative wurde der Einsatz von trocken elektrochemischen Metalloxid-Halbleiter Sensoren (MQ-Sensoren) als Sensorarray untersucht. Diese gibt es zur Detektion von verschiedenen Gasen. Allerdings haben sie nur eine geringe Spezifität, sind dafür aber sehr günstig (Nettopreis im Februar 2024: 1 bis 3 €/Sensor). Die verwendeten MQ-Sensoren liefern ein analoges Spannungssignal, das mit einem A/D-Wandler (ADS1115) und einem Mikrocontroller (ESP8266) an einen Computer zur Speicherung und Darstellung übertragen wird.

Im Rahmen des Projekts wurden 9 verschiedene MQ-Sensoren (MQ2-9 und MQ135) in einem Sensorarray auf ihre Eignung zur Erfassung von Ethen untersucht. Dazu wurde als Grundrauschen eine „Apfel-Atmosphäre“ (akkumulierte volatile Ausscheidungen von Äpfeln) bzw. ein Ethen-Luft-Gemisch in einer Mischkammer erzeugt (Abb. 10). Das Sensorarray wurde nach einer Einlaufzeit von 10 min mit der reinen Apfel-Atmosphäre und nach weiteren 35 min mit 6 ppm Ethen durchströmt. Zwischen dem Einleiten der beiden Gemische wurde die Messkammer mit dem Sensorarray nicht mit Frischluft gespült.

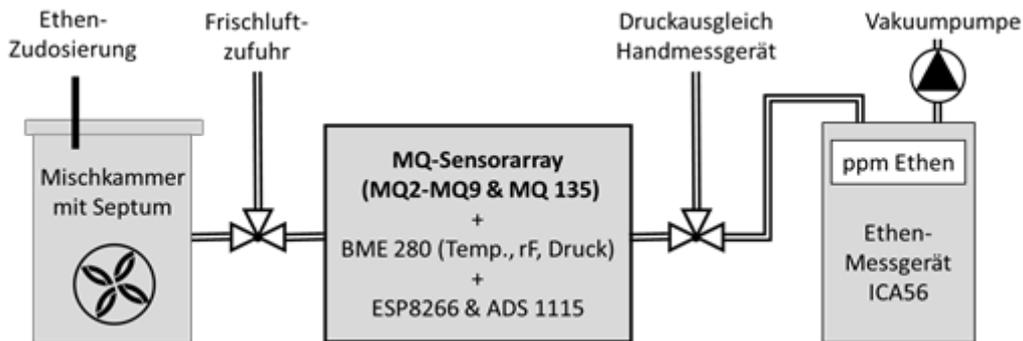


Abb. 10: Versuchsaufbau für die Entwicklung des MQ-Sensorarrays mit der Mischkammer mit Septum (zur definierten Zudosierung von Ethen), der eigentlichen Messkammer mit dem MQ-Sensorarray und einem nachgeschalteten Handmessgerät zur Quantifizierung der aktuellen Ethen-Konzentration

Zur Signalanalyse wurde die 1. Ableitung des Sensorsignals gebildet. Diese zeigt die Signalzunahme, entgegen der tatsächlichen Signalstärke, diese Herangehensweise hebt die Reaktionsereignisse hervor (Abb. 2). Alle Sensoren zeigen eine positive Signalveränderung als Reaktion auf volatilen Ausscheidungen von Äpfeln, von denen drei ein deutlich stärkeres Signal zeigen (MQ2 bis 4). Mit Ausnahme der beiden Sensoren MQ3 und MQ135 zeigen zudem alle MQ-Sensoren eine schnelle und deutliche Reaktion auf die Zudosierung von 6 ppm Ethen.

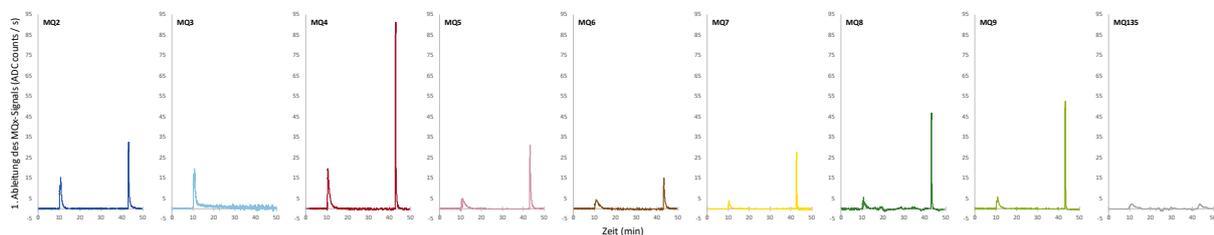


Abb. 11: Erste Ableitung der MQ-Sensorsignale (Glättung $n = 20$) als Reaktion auf volatilen Ausscheidungen von Äpfeln (1. Peak nach 10 min) und zusätzlich 6 ppm Ethen (2. Peak nach 45 min)

Basierend auf den gezeigten Ergebnissen und weitere Untersuchungen zum Ansprechverhalten wurde die beiden Sensoren MQ2 und 4 ausgewählt und untersucht, ob mittels der beiden Sensoren (bei Frischluft als Hintergrund) eine Quantifizierung der Ethenkonzentration im physiologisch interessanten Bereich bis 5 ppm möglich ist. Abb. 12 zeigt die Kalibriergeraden für die beiden Sensoren (MQ2 und MQ4) für Ethenkonzentrationen von 0 – 5 ppm bzw. 1 – 5 ppm.

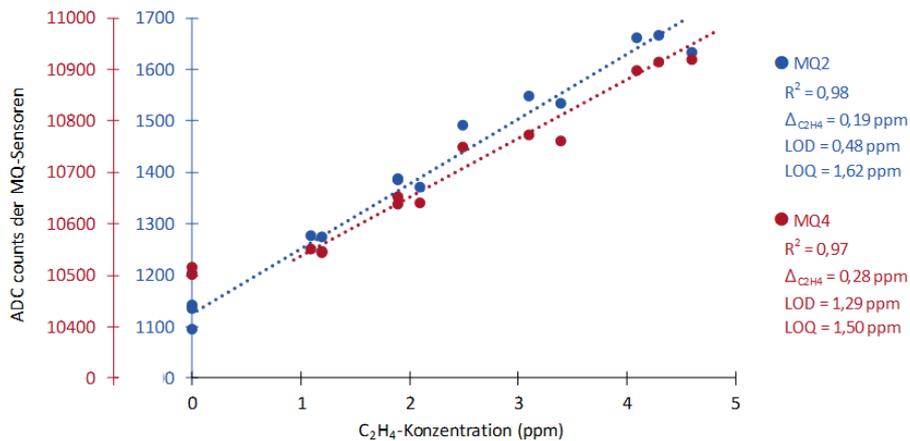


Abb. 12: Kalibrierung im Bereich von 0 bis 5 ppm Ethen für den MQ2- und 1 bis 5 ppm für den MQ4-Sensor (ΔC_2H_4 = mittlere Abweichung von den Ist-Werten; LOD = Nachweisgrenze (36 des kleinsten Standards), LOQ = Nachweisgrenze (106 des kleinsten Standards); 3 Messzyklen)

Grundsätzlich scheint die halbquantitative Bestimmung von Ethen mit kostengünstigen MQ-Sensorarrays im physiologisch bedeutsamen Bereich möglich zu sein. Notwendig hierfür sind allerdings komplexe Kalibriermodelle in denen Störungen durch andere Gase bzw. Gasgemische berücksichtigt werden. Unter Einbeziehung von z. B. MQ3 können Fehlinterpretationen der Signalveränderungen der MQ2- bzw. MQ4-Sensoren als Ethen-signale vermieden werden, sollte MQ3 auch einen Ausschlag zeigen. Allerdings sind weitere Untersuchungen notwendig, um geeignete Sensorkombination zu finden, die verlässlich die geringe Spezifität ausgleichen. Weniger aufwendig dürfte die rein qualitative Detektion von Ethenwarnschwellen sein. Ein Ansatz zur Erhöhung der Empfindlichkeit und damit auch der Selektivität könnte die Kombination des MQ-Sensorarrays mit einem vorgeschalteten Gassammler zur Aufkonzentrierung des Ethens sein. Der Einsatz von MQ-Sensoren könnte ein erhebliches Optimierungspotential für das Lagermanagement ergeben, insbesondere da angesichts der geringen Kosten der Sensoren engmaschige Ethenwarnnetze umsetzbar wären.

4.2.3 Erprobung der Sensornetzwerke unter Praxisbedingungen

Während der letzten beiden Projektmonate war geplant die Sensorknoten in Kooperation mit der TAGWERK Genossenschaft unter Praxisbedingungen zu testen. Der mehrwöchige Testaufbau war bereits fertig konzipiert und terminlich abgestimmt. Musste dann aber auf Grund aufeinanderfolgender Erkrankungen verschiedener Projektbearbeiter kurzfristig abgesagt werden.

4.3 Lagerversuche

Karotten

Die Lagerungsversuche mit Karotten fokussierten sich insbesondere auf den Einfluss von Ethen auf die Qualitätsentwicklung. In einem ersten Lagerversuch über einen Zeitraum von 57 Tagen wurden Karotten bei drei verschiedenen Temperaturstufen sowohl unter Einfluss von Ethen (5 ppm) als auch ohne Ethen gelagert. Positiv wirkte sich das Reifegas dabei auf den Neuaustrieb bei den Karotten aus. Dieser wird, wie in Abb. 13 zu erkennen ist, deutlich reduziert.

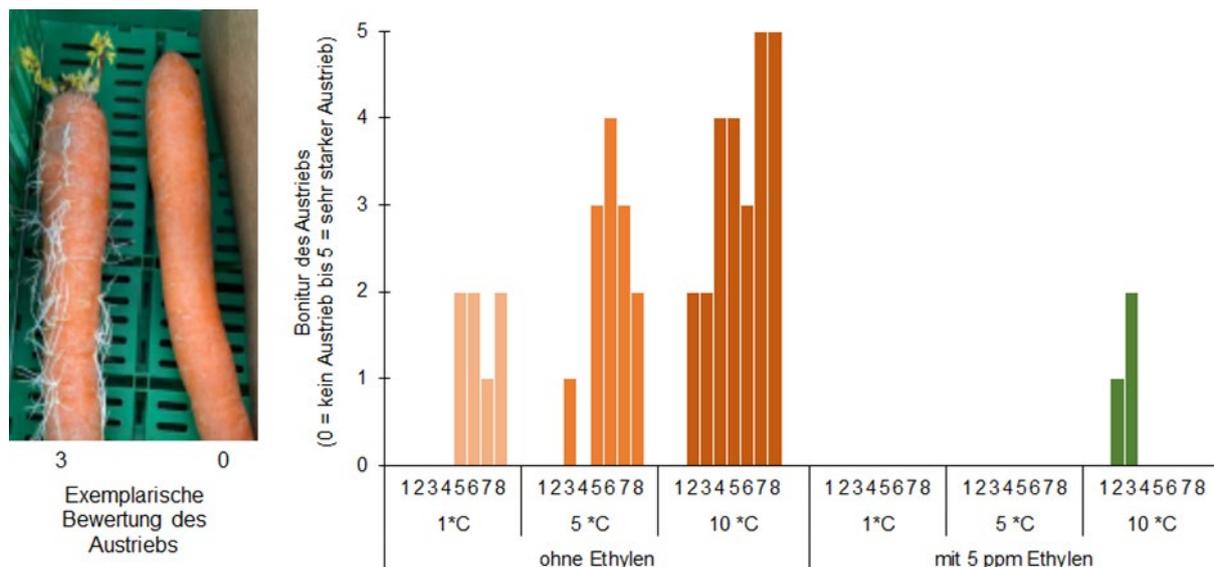


Abb. 13: Intensität der Bildung von Neuaustrieben an den Karotten in Abhängigkeit von der Ethenkonzentration in der Lageratmosphäre sowie der Lagertemperatur und -dauer in Wochen; das Foto links zeigt das angelegte Boniturschema)

Gleichzeitig kann sich Ethen aber negativ auf den Geschmack auswirken, da es die Bildung von Bitterstoffen induziert (Lafuente et al., 1996). Um diese Problematik zu erfassen, wurde im Lagerversuch zusätzlich zu den Inhaltsstoffanalysen (Trockensubstanz, Chlorophyll, Carotinoide, Polyphenole, Antioxidative Kapazität, Brix und Festigkeit) eine sensorische Qualitätsprüfung mit zufällig ausgewählten Probanden vorgenommen. Abb. 14 zeigt, dass der Geschmack von Karotten mit zunehmender Lagerdauer tendenziell schlechter bewertet wird. Dabei beeinflusst vor allem die steigende Lagertemperatur in Verbindung mit Ethen die geschmackliche Qualität negativ.

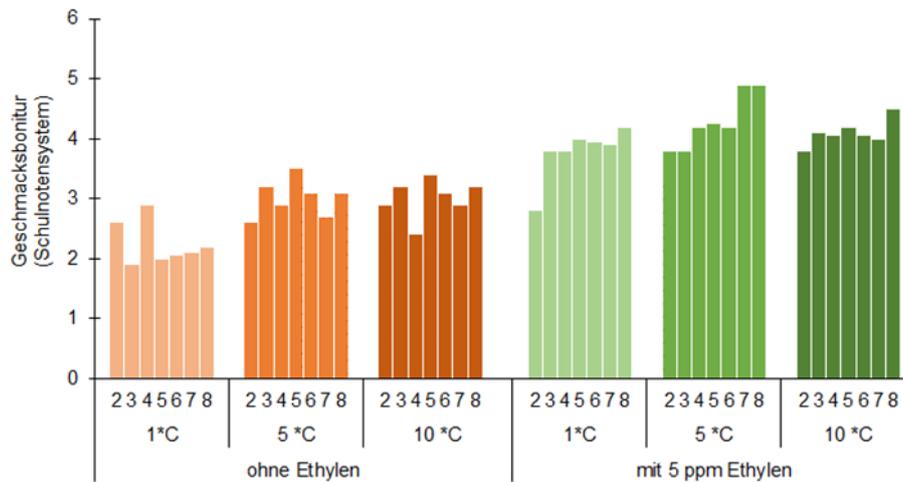


Abb. 14: Geschmackliche Bewertung der Karotten in Abhängigkeit von der Ethenkonzentration in der Lageratmosphäre sowie der Lagertemperatur und -dauer in Wochen (Bewertung nach dem Schulnoten-system (1 = sehr gut bis 6 = absolut ungenießbar))

Dieser Einfluss der Lagerdauer sowie der Lagerbedingungen zeigte sich auch bei der antioxidativen Kapazität (Abb. 15): Analog zur Verschlechterung des Geschmack stieg die antioxidative Kapazität an. Die Antioxidative Kapazität könnte damit eventuell als indirekter Parameter für die geschmackliche Bewertung von Karotten herangezogen werden.

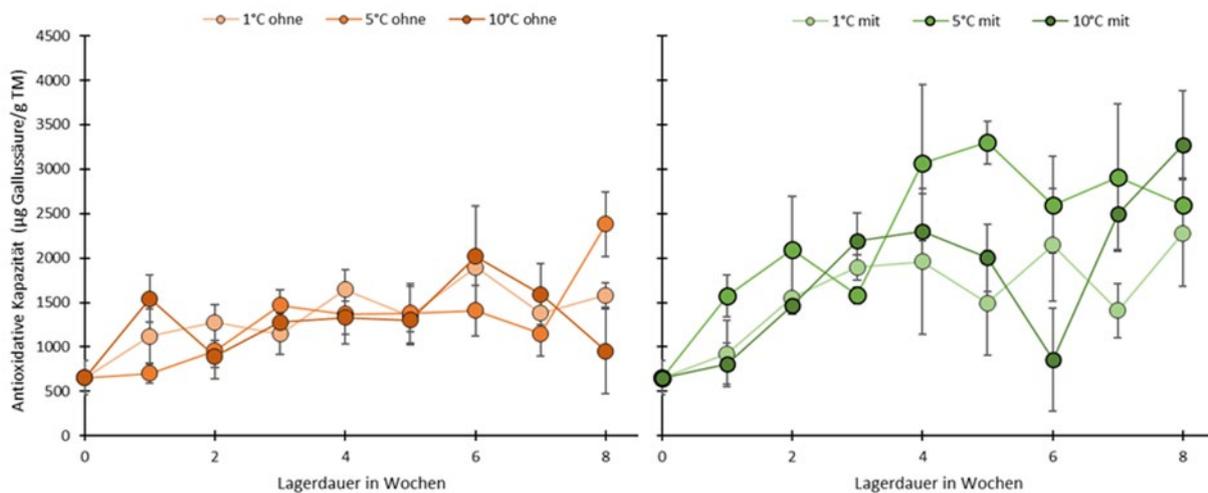


Abb. 15: Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) der Karotten in Abhängigkeit von der Ethenkonzentration in der Lageratmosphäre sowie der Lagertemperatur und -dauer in Wochen (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler)

Für die restlichen Inhaltsstoffe konnten im Verlauf des Lagerversuchs keine systematischen Veränderungen festgestellt werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden

bei den Folge-versuchen der Umfang der Inhaltsstoffanalysen auf die Antioxidative Kapazität und die sensorische Prüfung reduziert. Die weitere Untersuchung und Validierung des Zusammenhangs zwischen der Antioxidativen Kapazität und der Geschmacksentwicklung stand dabei im Fokus. Um die sensorische Bewertung eindeutiger zu gestalten, wurde in einem zweiten Lagerversuch anstelle von zufällig gewählten Probanden ein gleichbleibendes Verkostungspanel aus Mitarbeitern des Instituts für Gartenbau eingesetzt. Dabei musste neben einer Bewertung über die Abweichung des Geschmacks von einer normal schmeckenden Karotte, auch ein beschreibendes Adjektiv (normal, nicht zuordenbar, fad oder bitter) dem verkosteten Lagergut zugeordnet werden. Die Lagerung der Karotten erfolgte bei zwei Temperaturstufen (1 °C und 5 °C), mit und ohne Ethen (2 ppm) über einen Zeitraum von 42 Tagen. In Abb. 16 sind die Ergebnisse der sensorischen Qualitätsbestimmung zusammengefasst dargestellt. Die geschmackliche Abweichung bei allen Varianten nimmt mit zunehmender Lagerdauer zu. Dabei wurden die wärmer gelagerten Karotten bereits in der ersten Woche häufiger mit einer leichten bis mittleren Abweichung benotet, während bei den kühl gelagerten Karotten dieser Anstieg erst nach 14 Tagen erkennbar ist.

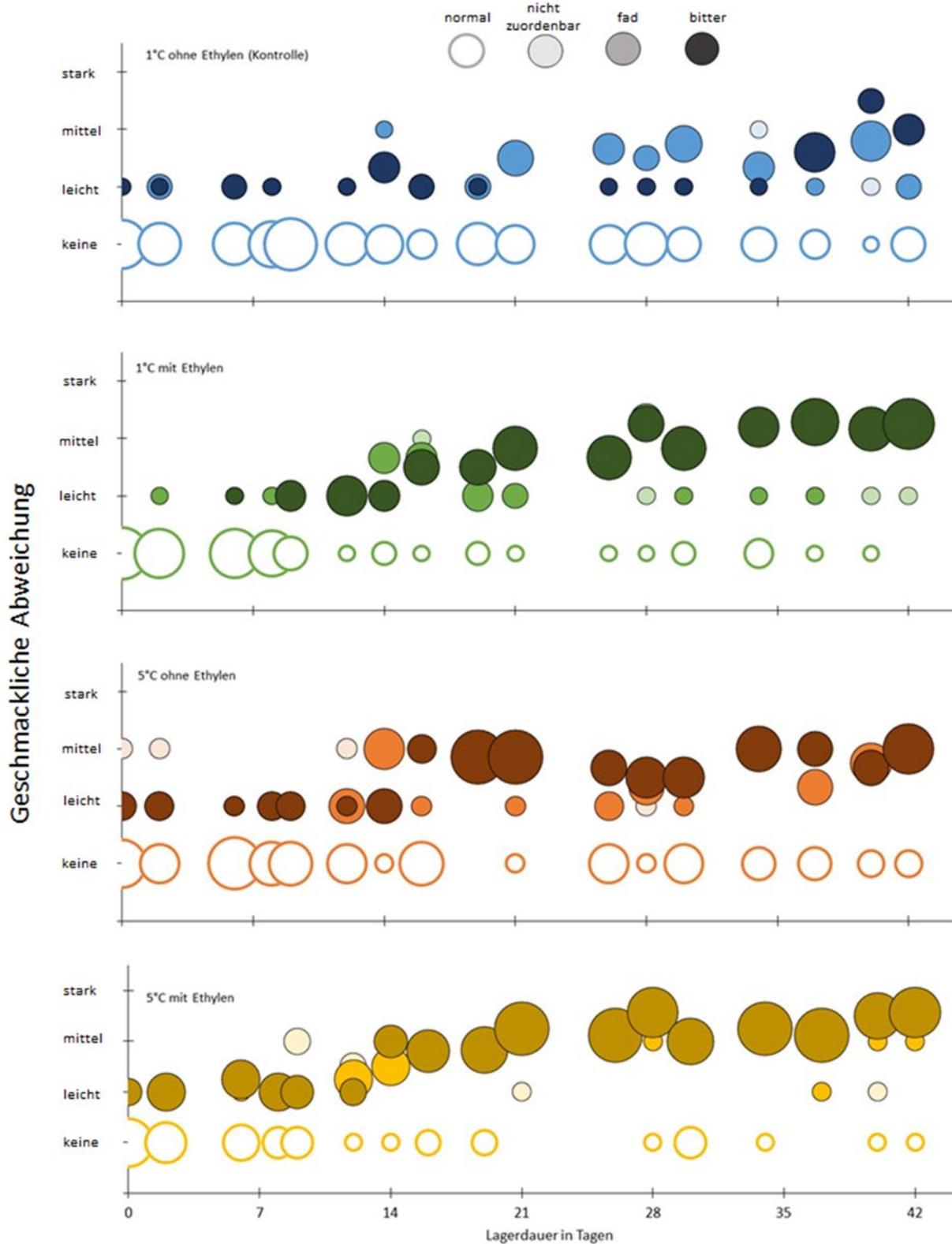


Abb. 16: Darstellung der geschmacklichen Abweichung bei Karotten in Abhängigkeit von der Lagerung mit und ohne Ethen sowie der Lagertemperatur über die Lagerdauer in Tagen. Der Farbintensität der Kreise zeigt die vom Verkostungspanel zugeordneten Bewertungsadjektive, während die Größe der Kreise die Häufigkeit ihrer Nennung reflektiert

Das bewertende Adjektiv 'bitter' wird im Vergleich zur Kontrolle (1°C, ohne Ethen) vermehrt bei den warmen Varianten und der kühlen Variante mit Ethen vergeben. Hier ist ein Anstieg der Nennung über die Lagerzeit zu erkennen. Die wärmer gelagerte Variante mit Ethen wird im Verlauf am eindeutigsten mit 'bitter' bewertet, während bei der Kontrolle keine klare Tendenz zu einem bestimmten Adjektiv festgestellt werden kann. Der im vorangegangenen Lagerversuch festgestellte Einfluss durch Temperatur und Ethen auf den Geschmack konnte in diesem Versuch bestätigt werden. Auch der Einfluss von Ethen auf die Bildung von Bitterstoffen ließ sich durch die vermehrte Charakterisierung des abweichenden Geschmacks in Richtung 'bitter' erkennen. In Bezug auf die antioxidative Kapazität (Abb. 17), zeigt sich erneut ein Anstieg in allen Varianten. Dabei fällt auf, dass der Anstieg in den Varianten mit Ethen deutlicher ausfällt, wobei die wärmere Lagertemperatur diesen Effekt nochmals verstärkt. Durch die Übereinstimmung dieser Entwicklung mit der geschmacklichen Veränderung konnte bestätigt werden, dass sich die antioxidative Kapazität als indirekter Parameter für eine geschmackliche Bewertung und damit auch für eine Bewertung der Qualität der Karotte eignet.

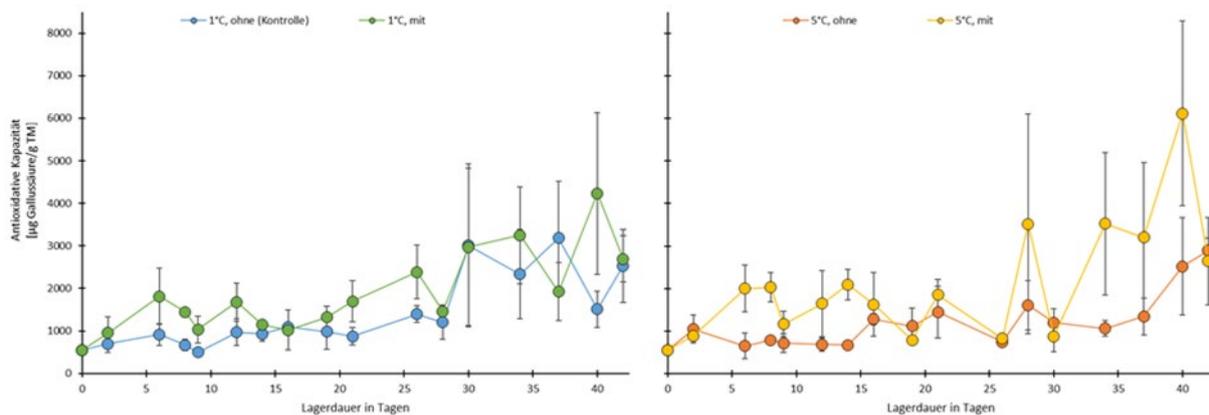


Abb. 17: Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) bei Karotten in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Ethen sowie der Lagertemperatur und -dauer in Tagen (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnet den Standardfehler)

Der beobachtete Effekt in den vorangegangenen Versuchen wurde durch die künstliche Zugabe von Ethen zum Lagergut erzeugt. Um die Auswirkungen einer natürlichen Ethenquelle zu erproben, wurde im letzten Karotten-Lagerversuch ein praxisnaher Versuchsansatz gewählt, der dem Versandprozess bei einem der beiden Kooperationspartner (etepetete GmbH) nachempfunden war. Der Versuch wurde in eine Variante mit Ethenquelle und eine ohne eingeteilt, wobei Äpfel als natürliche Quelle dienen. Der simulierte Versand erfolgte in DHL Versandkartons nach folgendem Ablauf: Am Versandtag (vor Versand) wurde die Ausgangsware aus einem Zwischenlager mit optimalen Lagerbedin-

gungen in zwölf Kartons verpackt (sechs mit Ethenquelle, sechs ohne) und bei Raumtemperatur gelagert. Zur Überwachung des Temperatur- und Ethenverlaufs wurden Sensoren in jeweils ein Paket einer Variante mit verpackt. Für die Auslagerung wurden drei Termine festgelegt, um die Ankunft des Pakets beim Kunden, nach einem, zwei und drei Tagen zu simulieren. Am Versandtag sowie an den ersten beiden Tagen wurden die Analysen am selben Tag durchgeführt, während am dritten Tag eine zusätzliche Lagerung im Kühlschrank für einen weiteren Tag erfolgte. Dieser Ablauf wurde dreimal innerhalb von 49 Tagen wiederholt, wobei die Ausgangsware einmalig für den gesamten Versuch beschafft und optimal zwischengelagert wurde. Der Verlauf der antioxidativen Kapazität ist in Abb. 18 dargestellt. Beim ersten Versandzyklus kann kein deutlicher Unterscheid zwischen den Varianten festgestellt werden. In den weiteren Wochen steigt die antioxidative Kapazität insgesamt bei beiden Variante über die Lagerdauer an, wobei die Variante mit Äpfel tendenziell auf einem höheren Niveau liegt. Die Ergebnisse für die Analyse vor dem Versand unterscheiden sich in den ersten zwei Durchgängen kaum. Ein Anstieg ist erst ab der dritten Versandwoche zu beobachten. Bei der geschmacklichen Qualitätsbestimmung (Abb. 19), welche erneut nach dem Bewertungsschema des vorangegangenen Versuchs durchgeführt wurde, kann insgesamt eine stärkere Abweichung des Geschmacks im Verlauf der Lagerdauer festgestellt werden. Ein Unterschied zwischen den Varianten oder eine Tendenz zu einem bestimmten bewertenden Adjektiv ist jedoch nicht ersichtlich. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass der Versand mit Obst oder Gemüse, dass verstärkt Ethen abgibt zumindest bei der Modellkultur Karotte geschmacklich kein Problem darstellt. Dies gilt auch nach einer längeren Zwischenlagerung.

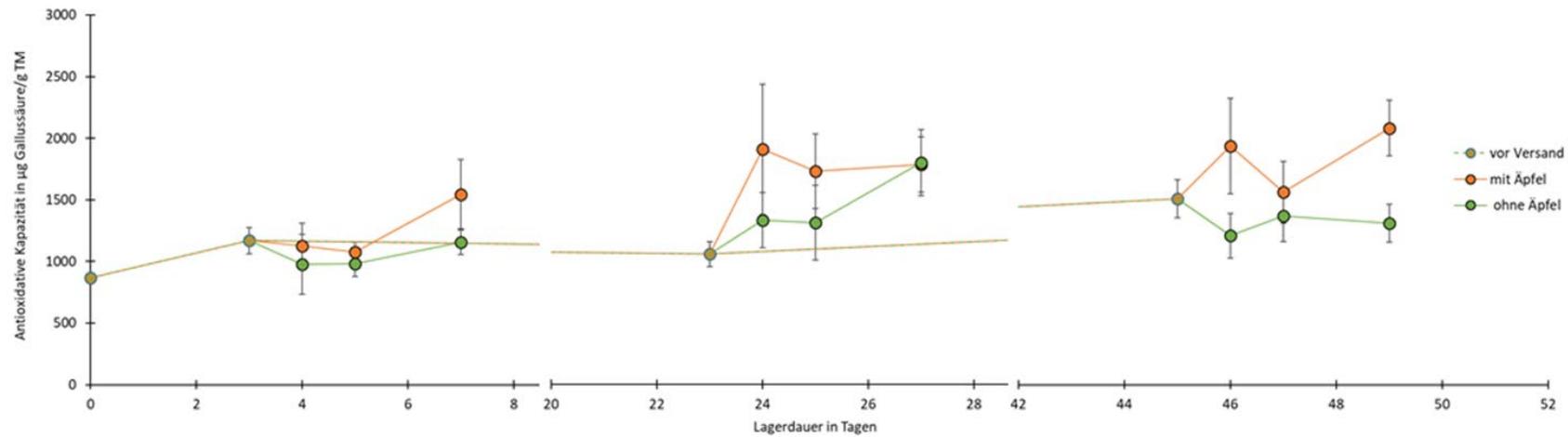


Abb. 18: Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) bei Karotten in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie der Lagerdauer in Tagen (n = 6, Fehlerbalken kennzeichnet den Standardfehler). Die gestrichelte Linie veranschaulicht den theoretischen Verlauf der Karotten die im Zwischenlager bei optimalen Bedingungen gelagert werden.

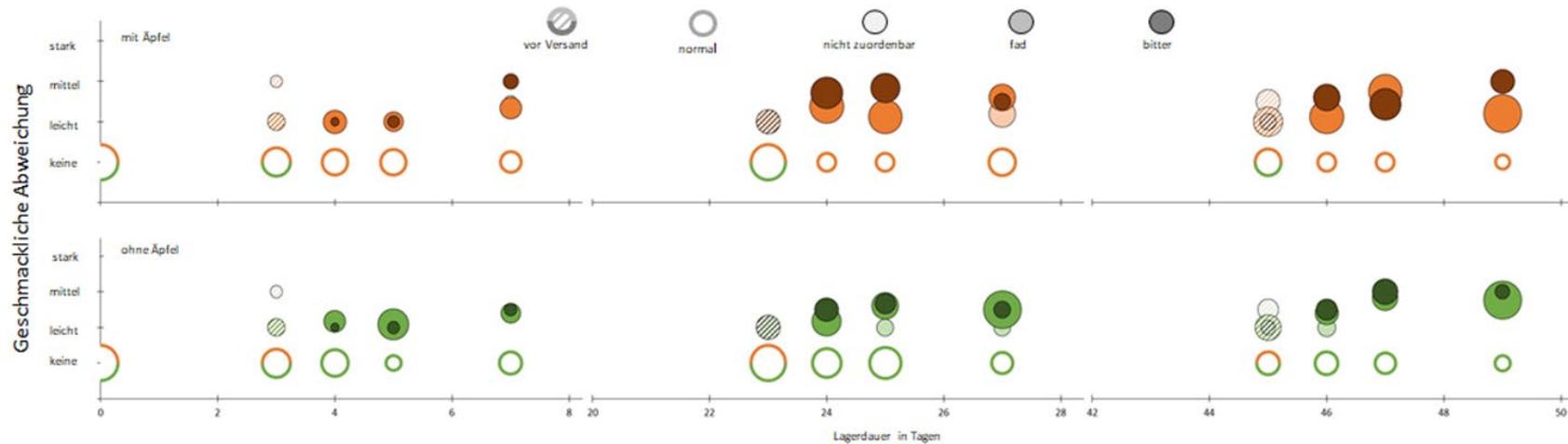


Abb. 19: Darstellung der geschmacklichen Abweichung bei Karotten in Abhängigkeit von der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie die Lagerdauer in Tagen. Der Farbintensität der Kreise zeigt die vom Verkostungspanel zugeordneten Bewertungsadjektive, während die Größe der Kreise die Häufigkeit ihrer Nennung reflektiert. Die zweifarbig gestrichelten Kreise stellen dabei die Bewertung der optimal gelagerten Karotten im Zwischenlager vor dem Versand dar

Brokkoli

Im ersten Lagerversuch über 14 Tage wurde bei gleichbleibender Temperatur (5 °C) entweder der CO₂-Gehalt auf 0,4 % bzw. 4 % erhöht oder es erfolgte eine zeitweise Beaufschlagung mit Ethen (3 ppm für 24 Stunden zu Lagerbeginn; 3 ppm für 24 Stunden zu Lagerbeginn und nochmals zwei Tage später; 9 ppm für 24 Stunden zu Lagerbeginn). Ähnlich wie bei den Karotten wurde ein Anstieg der antioxidativen Kapazität mit zunehmender Lagerdauer beobachtet (Abb. 20), der durch die Beaufschlagung mit Ethen zusätzlich gefördert wurde. Allerdings war der Einfluss von Ethen aufgrund der niedrigen Lagertemperatur vermutlich nur schwach ausgeprägt (Li et al., 2017).

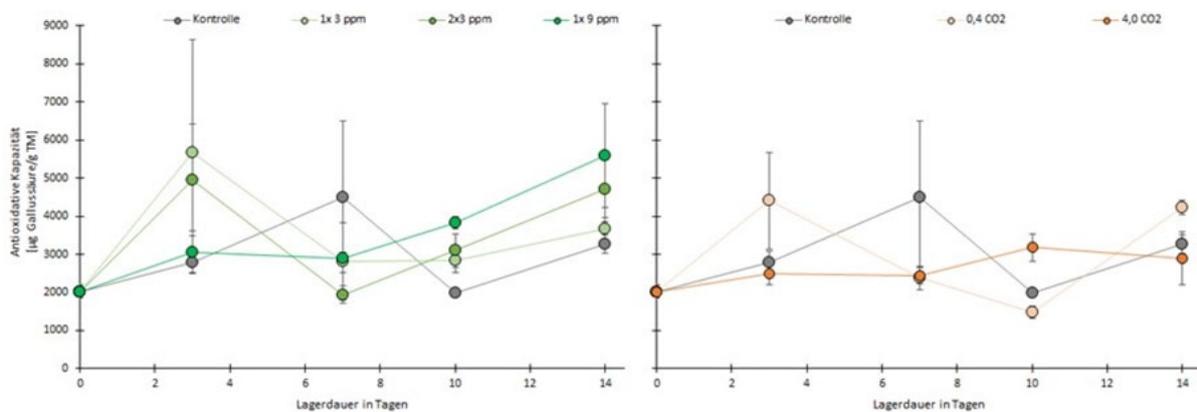


Abb. 20: Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) der Brokkoliköpfe in Abhängigkeit von der Lageratmosphäre und der Lagerdauer in Tagen (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler)

Zudem war während der Lagerung beim organischen Stickstoff eine Verschiebung von der wasserunlöslichen hin zur wasserlöslichen Fraktion zu beobachten (Abbildung 9). Diese Veränderung ging einher mit einem Rückgang der Chlorophyll-Gehalte und war bereits signifikant bevor an den Köpfen Seneszenz-Symptome sichtbar wurden. Diese Beobachtung deckt sich mit Angaben in der Literatur (King et al., 1994; Yamauchi et al., 1998). Beide Parameter scheinen daher interessant für die Abschätzung der Haltbarkeit zu sein und wurden in den Folgeversuchen fokussiert.

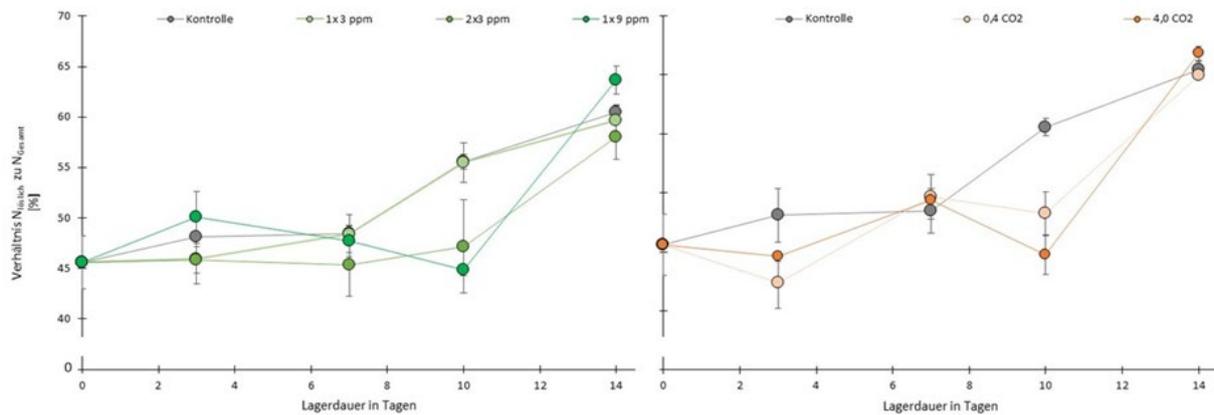


Abb. 21: Verhältnis des wasserlöslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff (angegeben in Prozent) in Abhängigkeit der Lageratmosphäre und der Lagerdauer (n = 3, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler)

Um diese Vermutung zu bestätigen, wurde Brokkoli über einen Zeitraum von 25 Tagen bei Temperaturen von 1°C und 5°C sowohl mit als auch ohne Zugabe von Ethen (2 ppm) gelagert. Schon bei der Einlagerung fiel auf, dass die Brokkoliköpfe klein und von Schädlingen befallen waren. Die Messwerte der Analysen zur Qualitätsbestimmung zeigten während des Lagerversuchs starke Schwankungen, sodass keine eindeutigen Rückschlüsse auf den Einfluss von Ethen und Temperatur auf die Qualität gezogen werden konnten. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse verzichtet. Auffällig war jedoch, dass das Niveau der Antioxidativen Kapazität bereits zu Beginn der Lagerung im Vergleich zu Messdaten aus vorherigen Versuchen und der Referenzanalytik deutlich höher lag. Dies spricht für den Einsatz der antioxidativen Kapazität als Indikator für Stress und damit auch für die Qualitätsentwicklung.

Auch bei Brokkoli sollte der Einfluss von natürlichem Ethen auf Brokkoli untersucht werden. Dafür wurde zunächst ein 14-tägiger Versandversuch mit natürlicher Ethenquelle (Äpfel) durchgeführt. Der Versuchsablauf entsprach dabei der Vorgehensweise des Karottenversandversuchs (Details siehe im vorangegangenen Kapitel). Die antioxidative Kapazität (Abb. 22[a]) steigt in beiden Versandwochen leicht an, wobei dieser Anstieg in der zweiten Woche deutlicher ist, ein Unterschied zwischen der Lagerung mit und ohne Äpfel ist jedoch nicht zu erkennen. Bei den vor Versand analysierten Proben wird zunächst ein deutlicher Anstieg der antioxidativen Kapazität festgestellt, danach bleibt sie jedoch auf einem ähnlichen Niveau. Auch beim Verhältnis des wasserlöslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff ist vor allem während des Versandes erneut eine Verschiebung hin zur wasserlöslichen Fraktion zu beobachten (Abb. 22[b]).

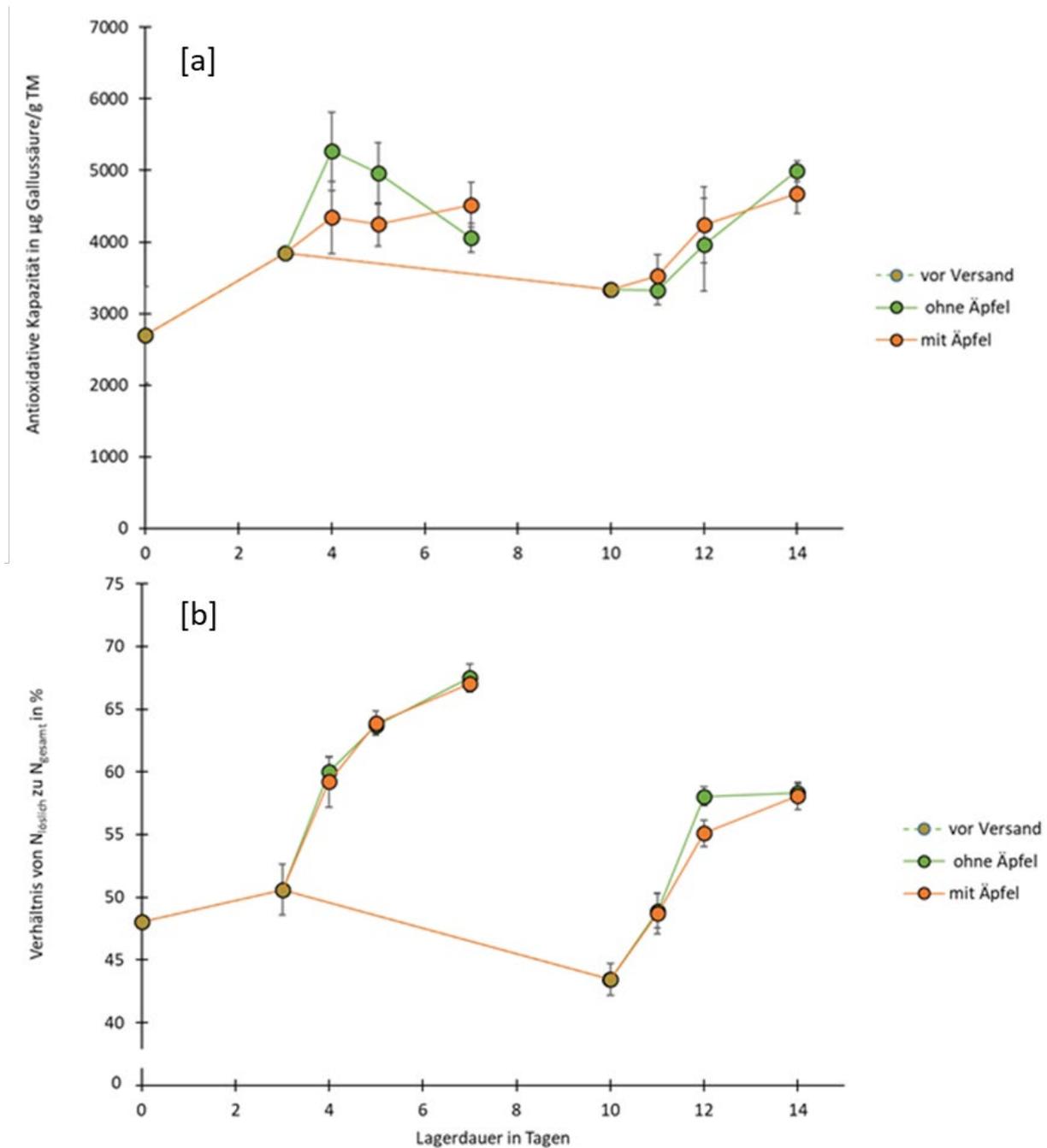


Abb. 22: [a] Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) und [b] Verhältnis des löslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff bei Brokkoli in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie der Lagerdauer in Tagen ($n = 6$, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler). Die gestrichelte Linie veranschaulicht den theoretischen Verlauf der Brokkoli die im Zwischenlager bei optimalen Bedingungen gelagert werden

Um sicherzustellen, dass der fehlende Unterschied zwischen den Varianten nicht auf die kurze Lagerdauer zurückzuführen ist, wurde der Versuch unter denselben Bedingungen wiederholt, jedoch mit einer Woche Pause zwischen den Versandwochen. Abb. 23[a] zeigt, dass sich die antioxidative Kapazität in der ersten Lagerwoche kaum verändert,

während sie in der zweiten Woche deutlich ansteigt. Die Variante mit Äpfel als Ethenquelle weist dabei in Woche eins eine leichte und in Woche zwei eine deutlich höhere Antioxidative Kapazität auf. Die Analyse des Stickstoffverhältnisses ergab hingegen keine Unterschiede im Vergleich zum kürzeren Lagerversuch. Die Verschiebung zur löslichen Fraktion ist in beiden Wochen deutlich erkennbar, wobei kein Unterschied zwischen der Lagerung mit und ohne Ethenquelle festgestellt wird. Auch der vor dem Versand analysierte Brokkoli bleibt auf dem gleichen Niveau (Abb. 23[b]).

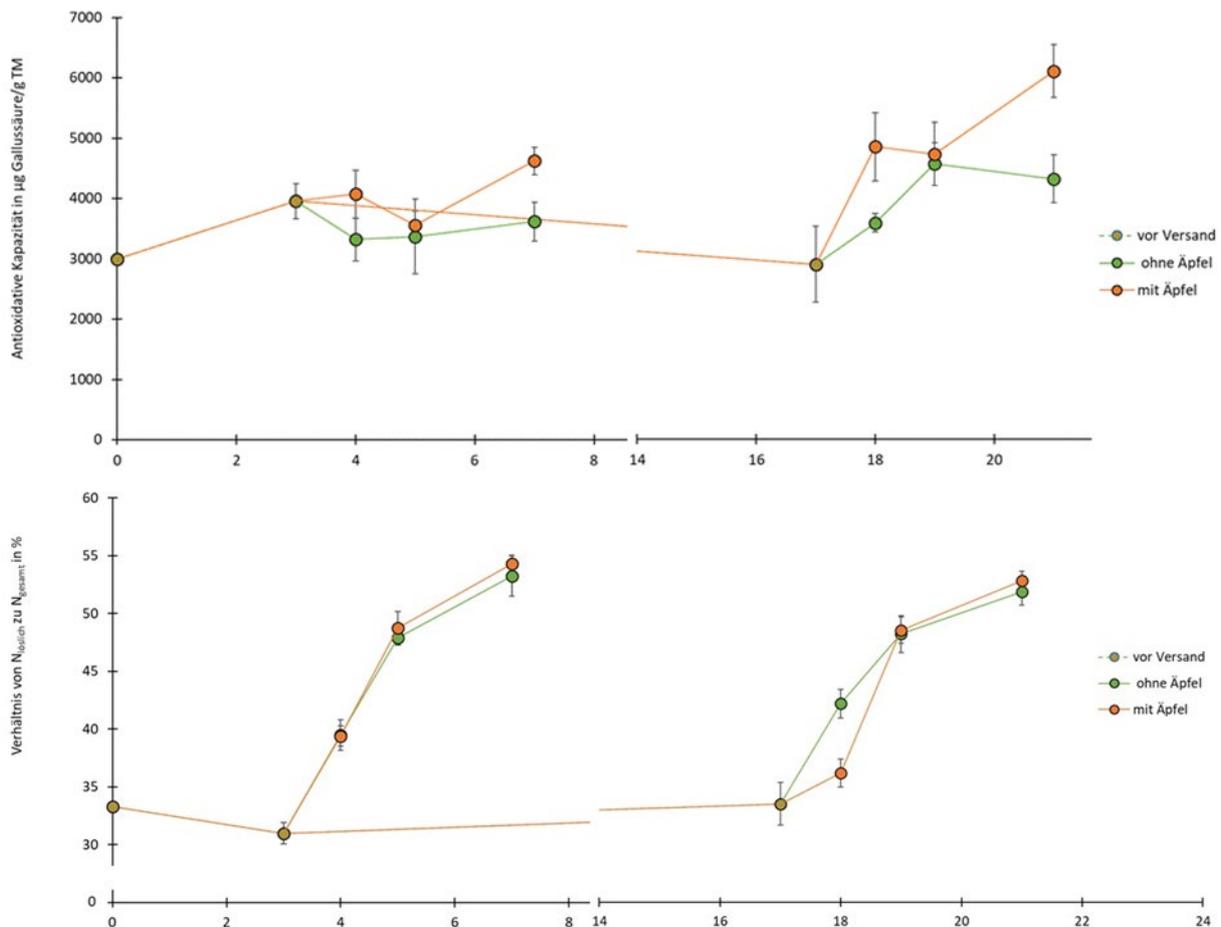


Abb. 23: [a] Antioxidative Kapazität (ausgedrückt in Gallussäureäquivalenten) und [b] Verhältnis des löslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff bei Brokkoli in Abhängigkeit der Lagerung mit und ohne Äpfel als Ethenquelle sowie der Lagerdauer in Tagen ($n = 6$, Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler). Die gestrichelte Linie veranschaulicht den theoretischen Verlauf der Brokkoli die im Zwischenlager bei optimalen Bedingungen gelagert werden

Die Ergebnisse aus beiden Versuchen bestätigen, dass sich sowohl die antioxidative Kapazität als auch das Verhältnis des löslichen Stickstoffs zum Gesamtstickstoff als Indikator für die Qualitätsbestimmung eignen. Die antioxidative Kapazität nach Briggs-Rauscher stellt jedoch die günstigere und einfachere Methode dar, da sie ohne die Anschaf-

fung teurer Geräte für die Stickstoffanalysen auskommt und auch durch angelernstes Personal ermittelt werden kann. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass der Versand von Brokkoli mit Ethen abgebenden Obst oder Gemüse ein eher geringeres Problem darstellt, ursächlich für Qualitätsveränderung scheinen vor allem die Versandzeit und die der Temperaturverlauf während des Transports zu sein.

5 Diskussion

Im Rahmen der Diskussion sollen die in den drei einzelnen Arbeitspaketen – Überwachung und Optimierung der Lagerbedingungen mittels kostengünstiger Sensornetzwerke, die zerstörungsfreie Bestimmung von qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffen mittels der Nah-Infrarot-Spektroskopie sowie die Veränderung qualitätsgebender Inhaltsstoffe – gemeinsam diskutiert und eingeordnet werden: Sowohl bei Karotte als auch Brokkoli ist ein Anstieg der Antioxidativen Kapazität mit zunehmender Lagerdauer zu beobachten, wobei sich der Anstieg zum Ende der Haltbarkeit deutlich beschleunigt. Dies ist als Reaktion der Pflanze auf den zunehmenden oxidativen Stress während der Lagerung zu verstehen (Hodges et al., 2004). Beschleunigt wird dieser Prozess durch ungünstige Lagerbedingungen, insbesondere erhöhte Temperaturen und die Einwirkung von Ethen. Besonders bei der Karotte könnten sich hier interessante Ansätze ergeben, da der Anstieg der Antioxidativen Kapazität mit einer geschmacklichen Verschlechterung, insbesondere einem zunehmend bitteren Geschmack korreliert war. Dies stimmt mit Ergebnissen von Seljåsen et al. (2013) für vom Möhrenblattfloh befallenen Karotten überein. Verursacht wird der Bittergeschmack vor allem von Polyacetylen und Isocumarinen (Kreutzmann et al., 2008), die nur mit einem erheblichen instrumentellen Aufwand bestimmt werden können bzw. sich schon in sehr geringen Konzentrationen geschmacklich negativ bemerkbar machen (Kreutzmann et al., 2008; Pferschy-Wenzig et al., 2009; Lai et al., 2023).

Zudem könnte die Antioxidative Kapazität nicht nur im Rahmen einer Haltbarkeitsbewertung, sondern allgemein für die Qualitätsbeurteilung interessant sein, wie die Untersuchungen der für den zweiten Brokkoli-Lagerversuch angelieferten Köpfe andeuten: Die Pflanzen waren bereits während der Kultur erheblichem Stress (Hitze/Trockenheit sowie Blattlausbefall) ausgesetzt und haben darauf mit einer verstärkten Bildung von antioxidativ wirkenden Substanzen reagiert. Dies bietet interessante Ansätze nicht nur für den Handel, sondern auch die Produktion. Zwar konnte die Antioxidative Kapazität nicht mittels NIRS bestimmt werden, aber auch die nasschemische Analyse mittels des Briggs-Rauscher-Verfahrens ist nicht besonders kompliziert und benötigt auch keine aufwendige technische Ausstattung. Es reicht eine Redox-Elektrode und ein Datenlogger zur Aufzeichnung der Daten. Im Rahmen des Projektes wurde dieser auf Basis eines einfachen Mikrocontrollers und eines Schnittstellenboards selbst gebaut. Zumindest für spezialisierte Betriebe wäre es damit eine Option.

Beim Brokkoli markiert eine Vergilbung der Köpfe in der Regel das Ende der Haltbarkeit. Diese wird durch eine verstärkte Proteolyse verursacht und ist an einem Anstieg der löslichen Stickstofffraktionen erkennbar, bevor sie äußerlich sichtbar wird. Dies bestätigt Ergebnisse von King et al. (1994) und macht den Anteil löslicher Stickstofffraktionen zu einem interessanten Parameter für die Haltbarkeitsabschätzung. Obwohl mittels der handgeführten, kostengünstigen NIR-Spektrometer nur eine grobe Klassifizierung des Anteils der löslichen N-Fraktionen am Gesamt-N möglich ist, könnte der Ansatz praxistauglich sein, da der Anteil in der Regel zwischen 30 und 50 % liegt und erst zum Ende der Haltbarkeit ein starker Anstieg um rund 20 %-Punkte zu beobachten ist. Dabei scheint auch weniger der absolute Anteil als vielmehr die Veränderung entscheidend zu sein. Durch regelmäßige NIRS-Messungen ließe sich dieser Anstieg eventuell frühzeitig erkennen.

Alle Ergebnisse haben – wenig überraschend – die Bedeutung der richtigen Temperatur für den Qualitätserhalt gezeigt. Ein Problem dabei sind räumliche Temperaturgradienten im Kühllager (Ambaw et al., 2016). Diesem Problem könnte durch engmaschige Sensornetzwerke entgegengewirkt werden (Jedermann et al., 2011) wie sie mit den im Projekt entwickelten Sensorknoten einfach etabliert werden können. Insbesondere wenn diese mit einfachen Aktoren, z. B. kleinen Ventilatoren zur Luftumwälzung, direkt gekoppelt werden. Die Kopplung der IR-basierten Messung der Oberflächentemperatur mit einer Messung der Lufttemperatur und -feuchte erwies sich als interessanter Ansatz, um dem Problem der Taupunktbildung bei Erdbeeren (oder anderem Weichobst) entgegenzuwirken (Mirzaee and Bishop, 2010). Die im Projekt erprobte Prototyp ist sehr klein und leicht und könnte einfach an Transportkisten befestigt werden. Besteht auf Grund eines ungünstigen Temperaturwechsels (Auslagerung von kalten Früchten) das Risiko einer Taupunktunterschreitung wäre eine direkte Warnung z. B. via SMS oder Email möglich.

Ein weiterer interessanter Ansatzpunkt ist die Kombination kostengünstiger MQ-Sensoren zur Detektion von Ethen. Ein vollständiger Satz der neun verwendeten Sensoren liegt preislich bei etwa 15 € im Vergleich mehreren hundert Euro für einen herkömmlichen nass-chemischen Ethensensor. Es konnte gezeigt werden, dass mit den Sensoren sogar eine Quantifizierung grundsätzlich möglich ist und die Selektivität durch die Kopplung der Signale mehrere Sensoren erhöht werden kann. Diese Ergebnisse decken sich mit aktuellen Ergebnissen aus der Literatur (Mukesh et al., 2023). Ob eine Quantifizierung unter Praxisbedingungen wirklich möglich ist, ist aber eher fraglich. Es sollte aber möglich sein ein einfaches Warnschwellsystem zu etablieren, das abwechselnd mit Frisch- bzw. Lagerluft beaufschlagt wird und bei dem nur die Signaländerung (1. Ableitung) ausgewertet wird. Bei einem solchen System könnte zudem die Empfindlichkeit durch die Kombination mit einem Ethensammler (Janssen et al., 2014; Dow et al., 2011) deutlich gesteigert werden.

6 Verwertung der Ergebnisse in der Praxis

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse – insbesondere die entwickelten Technologien und Verfahren – sind aktuell noch nicht reif für den Praxiseinsatz. Aber sie bieten eine Reihe interessanter Ansätze für Weiterentwicklungen zur Optimierung des Lagerungsmanagements insbesondere im Groß- und Zwischenhandel sowie auf dem Transportweg. Dies gilt insbesondere für die kostengünstigen Sensor- und Aktorknoten auf Grundlage von Mikrokontrollern, da diese für Jedermann erhältlich sind und mit etwas technischem Geschick kostengünstige und gleichzeitig sehr betriebsindividuelle Lösungen selbst entwickelt werden können. Auch die Nutzung von relativ kostengünstigen handgeführten NIR-Spektrometern könnte zukünftig für die Praxis interessant sein, wenngleich die Genauigkeit vermutlich nie über eine Klassifizierung hinausreichen wird. Aber zumindest eine Abschätzung der internen Qualität sollte damit möglich sein. Davor muss aber vor allem die Robustheit der Kalibriermodelle durch eine Vergrößerung des Datensatzes noch gesteigert werden.

7 Gegenüberstellung der erreichten Ziele und der ursprünglichen Planung

Letztlich konnten die ursprünglich gesteckten Ziele nicht vollumfänglich erreicht werden. Dies betrifft insbesondere den Entwicklungsstand der erarbeiteten Lösungen. Eigentlich sollte diese die Schwelle der Praxistauglichkeit (TRL 6 bis 7) erreichen. Tatsächlich sind sie mit TRL von 3 bis 4 noch ein ganzes Stück davon entfernt. Zudem mussten sowohl aus fachlichen aber auch aus Kapazitätsgründen, beim Umfang der Arbeiten Abstriche gemacht werden. Dies galt insbesondere für die Arbeiten mit Zucchini: Da sich in keinem der durchgeführten Versuche Hinweise für praxisrelevante Erkenntnisse ergaben, wurden die Arbeiten zu Gunsten der drei anderen Modellkulturen vorzeitig beendet. Gleiches galt bei der NIRS-Kalibration für die Karotte bzw. die Lagerungsversuche mit Erdbeeren sowie die Praxiserprobung der Technologien und Verfahren.

Die größten Abweichungen zwischen der ursprünglichen Planung bestanden aber bei der Entwicklung von Prognosemodellen zur Haltbarkeitsabschätzung. Diese sollten in Kombination mit der Entwicklung der NIRS-Kalibrationsmodelle bzw. den kostengünstigen Sensornetzwerken das Kernstück von zwei geplanten Dissertationen sein. Da allerdings keine geeigneten Kandidaten hierfür gefunden werden konnten, entfielen diese Arbeiten quasi gänzlich.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „OpLaMa – Reduktion der Lagerverluste bei ökologisch erzeugtem Obst und Gemüse durch ein optimiertes Lagerungsmanagement auf Basis von sensorgestützten und adaptiven Modellen zur Prognose der Qualitätsentwicklung und Haltbarkeit“ wurden drei Ansätze verfolgt. Zum ersten sollte ein Verfahren zur Vor-Ort-Bestimmung qualitätsbestimmender Inhaltsstoffe mittels kostengünstigen, handgeführten NIR-Spektrometer bei den vier Modellkulturen Erdbeere, Zucchini, Karotte und Brokkoli entwickelt werden. Die für die Kalibrationsentwicklung ausgewählten Inhaltsstoffe waren dabei für die Beurteilung der gesundheitlichen/nutritiven, sensorischen oder geschmacklichen Qualität geeignet oder dienten der Abschätzung der Resthaltbarkeit. Parallel zur Entwicklung der Kalibrationsmodelle erfolgten Lagerversuche mit den vier Kulturen, bei denen die Umweltbedingungen im Lager (Temperatur, Luftfeuchte, Zusammensetzung der Lageratmosphäre) gezielt variiert wurden. Zudem wurden auf Grundlage von Mikrokontrollern (ESP32 bzw. ESP8266) kostengünstige Sensor- und Aktorknoten entwickelt, um die Umweltbedingungen im Lager engmaschig überwachen und bei Fehlentwicklungen rechtzeitig gegensteuern zu können.

Bei Brokkoli konnte gezeigt werden, dass zum Ende der Haltbarkeit die Proteolyseaktivität stark ansteigt, was sich in einer Verschiebung im Verhältnis der löslichen zu den nicht löslichen organischen Stickstoffverbindungen äußert. Diese Verschiebung lässt sich mittels NIRS messen, bevor Seneszenz-Symptome (Vergilbung der Röschen) äußerlich sichtbar sind. Bei den Karotten wurde vor allem unter dem Einfluss von Ethen ein Anstieg der Antioxidativen Kapazität beobachtet, der relativ eng mit einer Bildung von Bitterstoffen und damit einem starken Rückgang der geschmacklichen Qualität assoziiert war. Die Antioxidative Kapazität könnte daher als einfach zu bestimmender Qualitätsparameter genutzt werden, wenngleich eine Bestimmung mittels NIRS nicht möglich war. Bei Erdbeeren und Zucchini konnten solche Zusammenhänge zwischen der Veränderung der Qualität und der Lagerdauer nicht gefunden werden. Allerdings konnte mittels der kostengünstigen Sensorknoten ein Lösungsansatz für ein weitverbreitetes Problem bei der Logistik von Erdbeeren (und anderen Weichfrüchten) – die Bildung von Kondenswasser auf den Früchten bei Temperaturwechseln – gefunden werden. Durch die Kombination von IR-Oberflächentemperaturfühlern und Fühlern für die Messung der Lufttemperatur und -feuchte kann ein einfaches Warnsystem aufgebaut werden.

Auch zur engmaschigen Überwachung von Temperatur oder Feuchtigkeitsgradienten innerhalb von Lagerräumen sind die drahtlose arbeitenden und akkubetriebenen Sensorknoten gut geeignet. Zudem können diese einfach mit Aktorknoten, die z. B. Ventilatoren zur Luftumwälzung oder Ventile für die Frischluftzufuhr steuern können, vernetzt werden. Des Weiteren wurde in dem Projekt die grundlegende Eignung von kostengünstigen MQ-Sensoren zur Detektion von Ethen gezeigt werden.

9 Literaturverzeichnis

- Ambaw, A., Bessemans, N., Gruyters, W., Gwanpua, S. G., Schenk, A., De Roeck, A., ... , Nicolai, B. M. (2016). Analysis of the spatiotemporal temperature fluctuations inside an apple cool store in response to energy use concerns. *International Journal of Refrigeration*, 66, 156-168.
- ATB (2003): Möglichkeiten zur Qualitätssicherung ökologisch erzeugter Gartenbauprodukte durch Koordinierung der Wertschöpfungsketten. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FKZ 02OE482.
- ATB (2005): Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 48.
- Barrett, D. M., Beaulieu, J. C., Shewfelt, R. (2010): Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 50(5), 369-389.
- Basson, C. E., Groenewald, J. H., Kossmann, J., Cronjé, C., Bauer, R. (2010). Sugar and acid-related quality attributes and enzyme activities in strawberry fruits: Invertase is the main sucrose hydrolysing enzyme. *Food Chemistry*, 121(4), 1156-1162.
- Blanco-Díaz, M. T., Del Río-Celestino, M., Martínez-Valdivieso, D., Font, R. (2014). Use of visible and near-infrared spectroscopy for predicting antioxidant compounds in summer squash (*Cucurbita pepo* ssp. *pepo*). *Food chemistry*, 164, 301-308.
- Ciaccheri, L., Tuccio, L., Mencaglia, A. A., Mignani, A. G., Hallmann, E., Sikorska-Zimny, K., ... , Agati, G. (2018): Directional versus total reflectance spectroscopy for the in situ determination of lycopene in tomato fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 71, 65-71.
- Cieślík, E., Gręda, A., Adamus, W. (2006). Contents of polyphenols in fruit and vegetables. *Food chemistry*, 94(1), 135-142.
- Dow, A. B. A., Sklorz, A., Lang, W. (2011). A microfluidic preconcentrator for enhanced monitoring of ethylene gas. *Sensors and Actuators A: Physical*, 167(2), 226-230.
- Foster, A. M., Barrett, R., James, S. J., Swain, M. J. (2002). Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International journal of refrigeration*, 25(8), 1102-1109.
- Goisser, S., Krause, J., Fernandes, M., Mempel, H. (2019): Determination of tomato quality attributes using portable NIR-sensors. 4th International Conference on Optical Characterization of Materials (OCM), 1-12.
- Goisser, S., Mempel, H. (2019): Mobile Nahinfrarottechnik im Post-Harvest-Management. Vortrag im Forum "Auf einer Wellenlänge" des Forschungsprojekts "Food-Scanner" am 26.10.2019 in Freising.

- Hertog, M.L.A.T.M., Vollebregt, M., Unzueta, I., Hoofman, R.J.O.M., Lammertyn, J. (2015): From sensor output to improved product quality. *Acta Horticulturae* 1091, 165-173.
- Ho, S. H., Rosario, L., Rahman, M. M. (2010). Numerical simulation of temperature and velocity in a refrigerated warehouse. *International Journal of Refrigeration*, 33(5), 1015-1025.
- Hodges, D. M., Lester, G. E., Munro, K. D., Toivonen, P. M. (2004). Oxidative stress: importance for postharvest quality. *HortScience*, 39(5), 924-929.
- Höner, K., Cervellati, R. (2002). Measurements of the antioxidant capacity of fruits and vegetables using the BR reaction method. *European Food Research and Technology*, 215(5), 437-442.
- Jacobs, B. A., Verlinden, B. E., Bobelyn, E., Decombel, A., Bleyaert, P., Van Lommel, J., ..., Nicolai, B. M. (2016): Estimation of the prior storage period of lamb's lettuce based on visible/near infrared reflectance spectroscopy. *Postharvest biology and technology*, 113, 95-105.
- Janssen, S., Tessmann, T., Lang, W. (2014). High sensitive and selective ethylene measurement by using a large-capacity-on-chip preconcentrator device. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 197, 405-413.
- Jedermann, R., Palafox-Albarrán, J., Barreiro, P., Ruiz-Garcia, L., Robla, J. I., Lang, W. (2011, October). Interpolation of spatial temperature profiles by sensor networks. In *SENSORS, 2011 IEEE* (pp. 778-781). IEEE.
- Kader, A.A. (1985): Ethylen-induced senescence and physiological disorders in harvested horticultural crops. *HortScience* 20(1), 54-56.
- Karadeniz, F., Ekşi, A. (2002). Sugar composition of apple juices. *European Food Research and Technology*, 215(2), 145-148.
- Kaur, C., Kapoor, H. C. (2001): Antioxidants in fruits and vegetables—the millennium's health. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(7), 703-725.
- Kevers, C., Falkowski, M., Tabart, J., Defraigne, J. O., Dommès, J., Pincemail, J. (2007). Evolution of antioxidant capacity during storage of selected fruits and vegetables. *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(21), 8596-8603.
- King, G.A., Morris, S.C. (1994): Early Compositional Changes during Postharvest Senescence of Broccoli. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 199(5), 1000-1005.
- King, G. A., Woollard, D. C., Irving, D. E., Borst, W. M. (1990): Physiological changes in asparagus spear tips after harvest. *Physiologia plantarum*, 80(3), 393-400.
- Kjellenberg, L. (2007). Sweet and bitter taste in organic carrot. Introductory Paper at the Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp.

- Kljusurić, G.J., Mihalev, K., Bečić, I., Polović, I., Georgieva, M., Djaković, S., Kurtanjek, Ž. (2016): Near-infrared spectroscopic analysis of total phenolic content and antioxidant activity of berry fruits. *Food technology and biotechnology*, 54(2), 236-242.
- Kramer, A. (1955): Food Quality and Quality Control. Chapter 23, *Handbook of Food and Agri-culture* (ed. by Blanck), Reinhold Publ. Co., New York, p. 733.
- Kreutzmann, S., Christensen, L. P., Edelenbos, M. (2008). Investigation of bitterness in carrots (*Daucus carota* L.) based on quantitative chemical and sensory analyses. *LWT-Food Science and Technology*, 41(2), 193-205
- Krivec, M., Gunnigle, G., Abram, A., Maier, D., Waldner, R., Gostner, J., Leitner, R. (2015): Quantitative ethylene measurements with MOx chemiresistive sensors at different relative air humidities. *Sensors*, 15(11), 28088-28098.
- Lafuente, M. T., López-Gálvez, G., Cantwell, M., Yang, S. F. (1996). Factors influencing ethylene-induced isocoumarin formation and increased respiration in carrots. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(3), 537-542.
- Lai, J. X., Dai, S. F., Xue, B. X., Zhang, L. H., Chang, Y., Yang, W., Wu, H. H. (2023). Plant polyacetylenoids: Phytochemical, analytical and pharmacological updates. *Arabian Journal of Chemistry*, 105137.
- Lee, C.Y., Shallenberger, R.S. Vittum, M.T. (1970). Free sugars in fruits and vegetables, *New York's Food and Life Science Bulletin* 1, 1-12.
- Lewers, K. S., Newell, M. J., Park, E., Luo, Y. (2020). Consumer preference and physiochemical analyses of fresh strawberries from ten cultivars. *International Journal of Fruit Science*, 20(sup2), 733-756.
- Li, Y., Wills, R. B. H., Golding, J. B. (2017). Interaction of ethylene concentration and storage temperature on postharvest life of the green vegetables pak choi, broccoli, mint, and green bean. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 92(3), 288-293.
- Liu, Y., Sun, Y. H., Yang, L., Yu, L. B., Mao, Q., Hou, J. M., ..., Liu, C. (2017). Relationship between carrot firmness with acoustic signal characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 40(2), e12384.
- Lohr, D., Tillmann, P., Zerche, S., Druège, U., Rath, T., Meinken, E. (2016): Non-destructive measurement of nitrogen status of leafy ornamental cuttings by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for assessment of rooting capacity. *Biosystems Engineering* 148, 157-167.
- Lufu, R., Ambaw, A., Opara, U. L. (2020). Water loss of fresh fruit: Influencing pre-harvest, harvest and postharvest factors. *Scientia Horticulturae*, 272, 109519.
- Luo, F., Cheng, S. C., Cai, J. H., Wei, B. D., Zhou, X., Zhou, Q., ... Ji, S. J. (2019). Chlorophyll degradation and carotenoid biosynthetic pathways: gene expression and pigment content in broccoli during yellowing. *Food chemistry*, 297, 124964.

- Ma, L., Wang, L., Chen, R., Chang, K., Wang, S., Hu, X., Sun, X., Lu, Z., Sun, H., Guo, Q., Jiang, M., ... Hu, J. (2016): A Low Cost Compact Measurement System Constructed Using a Smart Electrochemical Sensor for the Real-Time Discrimination of Fruit Ripening. *Sensors* 16(5), 501.
- Magwaza, L.S., Opara, U.L. (2015): Analytical methods for determination of sugars and sweetness of horticultural products—A review. *Scientia Horticulturae* 184, 179–192.
- Mancini, M., Mazzoni, L., Gagliardi, F., Balducci, F., Duca, D., Toscano, G., ... and Capocasa, F. (2020). Application of the non-destructive NIR technique for the evaluation of strawberry fruits quality parameters. *Foods*, 9(4), 441.
- Matissek, R., Fischer, M., and Steiner, G. (2018). *Lebensmittelanalytik*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- Mauz, M., van Kesteren, B., Junkermann, W., zum Berge, K., Schön, M., Platis, A., and Bange, J. (2020). Miniature high-frequency chilled-mirror hygrometer for atmospheric measurements aboard fixed wing UAS. *Meteorologische Zeitschrift*, 439-449.
- Mditshwa, A., Magwaza, L. S., Tesfay, S. Z. und Mbili, N. (2017). Postharvest quality and composition of organically and conventionally produced fruits: A review. *Scientia Horticulturae*, 216, 148-159.
- Mirzaee, M., Bishop, C. F. H. (2010). The packaging implications of the 'last mile of the strawberry supply chain'. *Acta Horticulturae* 877, 967-972.
- Montero, T. M., Mollá, E. M., Esteban, R. M., and López-Andréu, F. J. (1996). Quality attributes of strawberry during ripening. *Scientia Horticulturae*, 65(4), 239-250.
- Mukesh, C. S., Jadhav, B. T., Bhat, M. I., Rajeshree, K. (2023). A fuzzy approach with sensor array for assessing Banana Ripeness. *Proceedings of 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1-10.
- Müller, K., Linke, M., Ackermann, I., Geyer, M. (2002): Modellkonzept zur Frischeproggnose empfindlicher gartenbaulicher Produkte. *Landtechnik* 2, 102-103.
- Padel, S., Forster, C. (2005): Exploring the gap between attitudes and behavior: Understanding why consumers buy or do not buy organic food. *British Food Journal* 107(8), 606-625.
- Page, T., Griffiths, G., Buchanan-Wollaston, V. (2001): Molecular and biochemical characterization of postharvest senescence in broccoli. *Plant Physiology* 125(2), 718-727.
- Paull, R.E. (1999): Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality. *Postharvest Biology and Technology* 15, 263-277.
- Pferschy-Wenzig, E. M., Getzinger, V., Kunert, O., Woelkart, K., Zahrl, J., Bauer, R. (2009). Determination of falcarinol in carrot (*Daucus carota* L.) genotypes using liquid chromatography/mass spectrometry. *Food Chemistry*, 114(3), 1083-1090.

- Quilitzsch, R., Baranska, M., Schulz, H., and Hoberg, E. (2005). Fast determination of carrot quality by spectroscopy methods in the UV-VIS, NIR and IR range. *Journal of applied botany and food quality*, 79(3), 163.
- Rady, A. M., Sugiharto, S., and Adedeji, A. A. (2018). Evaluation of carrot quality using visible near infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Journal of Food Research*, 7(4), 80-93.
- Saad, A. G., Pék, Z., Szuvandzsiev, P., Gehad, D. H., Helyes, L. (2017): Determination of carotenoids in tomato products using Vis/NIR spectroscopy. *Journal of Microbiology, Biotechnology & Food Sciences*, 7(1), 27-31.
- Sabir, F. K. (2012). Postharvest quality response of broccoli florets to combined application of 1-methylcyclopropene and modified atmosphere packaging. *Agricultural and Food Science*, 21(4), 421-429.
- Sanaeifar, A., Mohtasebi, S. S., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ahmadi, H., and Lozano, J. (2014). Development and application of a new low cost electronic nose for the ripeness monitoring of banana using computational techniques (PCA, LDA, SIMCA and SVM). *Czech Journal of Food Sciences*, 32(6), 538-548.
- Schoefs, B. (2002). Chlorophyll and carotenoid analysis in food products. Properties of the pigments and methods of analysis. *Trends in food science & technology*, 13(11), 361-371.
- Seljåsen, R., Vogt, G., Olsen, E., Lea, P., Høgetveit, L. A., Tajet, T., ..., Bengtsson, G. B. (2013). Influence of field attack by carrot psyllid (*Trioza apicalis* Forster) on sensory quality, antioxidant capacity and content of terpenes, falcarindiol and 6-methoxymellein of carrots (*Daucus carota* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(11), 2831-2838.
- Shakeel, M., Khan, S. N., Saleem, Y., Burgess, P. J., and Shafiq, S. (2019). Colour, water and chlorophyll loss in harvested broccoli (*Brassica oleracea* L. Italica) under ambient conditions in Pakistan. *Scientia Horticulturae*, 246, 858-861.
- Slaughter, D.C., Abbott, J.A. (2004): Analysis of fruits and vegetables. In *Near-infrared spectroscopy in agriculture*. Agronomy 44.
- Sun, J., Künnemeyer, R., McGlone, A. (2017): Optical methods for firmness assessment of fresh produce: A review. In: *Postharvest Handling*. IntechOpen, 2017.
- Symmank, C., Zahn, S., Rohm, H. (2018): Visually suboptimal bananas: How ripeness affects consumer expectation and perception. *Appetite*, 120, 472-481.
- Teng, C.-C., Wang Y.-M. (2015): Decisional factors driving organic food consumption: Generation of consumer purchase intentions. *British Food Journal* 117 (3), 1066-1081.
- Tilahun, S., Park, D. S., Seo, M. H., Hwang, I. G., Kim, S. H., Choi, H. R., Jeong, C. S. (2018): Prediction of lycopene and β -carotene in tomatoes by portable chromameter and VIS/NIR spectra. *Postharvest Biology and Technology*, 136, 50-56.

- Tillmann, P. (1996). Kalibrationsentwicklung für NIRS-Geräte: Eine Einführung. Cuvillier-Verlag, Göttingen.
- Toivonen, P. M. (1997). The effects of storage temperature, storage duration, hydro-cooling, and micro-perforated wrap on shelf life of broccoli (*Brassica oleracea* L., Italica Group). *Postharvest Biology and Technology*, 10(1), 59-65.
- Toledo-Martín, E., García-García, M., Font, R., Moreno-Rojas, J., Salinas-Navarro, M., Gómez, P., del Río-Celestino, M. (2018): Quantification of total phenolic and carotenoid content in Blackberries (*Rubus fruticosus* L.) using near infrared spectroscopy (NIRS) and multivariate analysis. *Molecules*, 23(12), 3191.
- Williams, P. C. (2001). Chapter 8: Implementation of near-infrared Technology. In P. C. Williams, K. Norris (Eds.), *Near-infrared technology in the agricultural and food industries* (2nd ed., pp. 145-169). St. Paul (Mn): American Association of Cereal Chemists.
- Yamauchi, N., Watada, A. E. (1998). Chlorophyll and xanthophyll changes in broccoli florets stored under elevated CO₂ or ethylene-containing atmosphere. *HortScience*, 33(1), 114-117.
- Zerche, S., Lohr, D., Meinken, E., Druège, U. (2019): Metabolic nitrogen and carbohydrate pools as potential quality indicators of supply chains for ornamental young plants. *Scientia Horticulturae* 247, 449-462.
- Zude, M., Birlouez-Aragon, I., Paschold, P. J., and Rutledge, D. N. (2007). Non-invasive spectrophotometric sensing of carrot quality from harvest to consumption. *Postharvest Biology and Technology*, 45(1), 30-37.

10 Veröffentlichungen

- Hornung, F. (2023). Erfassung der Lager- und Transportbedingungen bei Obst und Gemüse mittels flexiblen Sensormodulen in einem funkbasierten Netzwerk. Vortrag auf den IVLV-Zukunftstagen 2023 – Erhalt der Lebensmittelqualität 2023, vom 16. bis 17.03.2023 in Freising.
- Hornung F., Lohr, D. (2024). Entwicklung einer kostengünstigen elektronischen Nase zur Detektion von Ethen, basierend auf Metalloxidsensoren. BHGL - Schriftenreihe Band 36, 93 (Posterbeitrag auf der 56. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung in Braunschweig).
- Hornung, F., Lohr, D., Kitemann, D. (2023). Erfassung von Lagerbedingungen von ökologisch produziertem Obst und Gemüse mittels eines drahtlosen Sensornetzwerks. BHGL - Schriftenreihe Band 35, 90 (Posterbeitrag auf der 55. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung in Osnabrück).
- Rauscher, J., Weinmann, E., Pauly, J., Lohr, D., Kitemann, D. (2023). Einfluss von Ethylen auf die antioxidative Kapazität sowie die Bildung von Bitterstoffen während der Lagerung von *Daucus carota*. BHGL - Schriftenreihe Band 35, 89 (Posterbeitrag auf der 55. Gartenbauwissenschaftliche Jahrestagung in Osnabrück).

11 Anlagen

Tab. 4: Zusammenstellung der für die erste Evaluierung ausgewählten Sensoren

Name (ggf. Modulbezeichnung)	Hersteller	Messgröße (ggf. Messverfahren)	Messbereich (\pm Genauigkeit) ⁽¹⁾
PT1000D10	n. b.	Umgebungstemperatur (PTC)	-40-105 °C (\pm n. b.) ⁽²⁾
DS18B20	Maxim Integrated	Umgebungstemperatur	-10-85 °C (\pm 0,5 °C)
LM75B	NXP	Umgebungstemperatur	-25-100 °C (\pm 2,0 °C)
MCP9808	Microchip Technology	Umgebungstemperatur	-40-125 °C (\pm 0,25)
BME280	Bosch	Umgebungstemperatur	-40-85 °C (\pm 1,0 °C)
		Relative Luftfeuchte (kapazitiv)	0-100 % (\pm 3 %)
		Atmosphärischer Druck	300-1100 hPa (\pm 1 hPa)
AM2302 (DHT22)	ASAIR	Umgebungstemperatur	-40-80 °C (\pm 0,25 °C)
		Relative Luftfeuchte (kapazitiv)	0-100 % (\pm 2,5-4,5 °C)
SHT25 (DKRF4002-P)	Driesen+Kern	Umgebungstemperatur	-20-80 °C (\pm 0,3-0,6 °C)
		Relative Luftfeuchte (kapazitiv)	0-100 % (\pm 2,0-3,5 %)
MLX90614 (GY-906)	Melexis	Oberflächentemperatur (IR-Emmision)	-70-380 °C (\pm 0,5 °C)
		Umgebungstemperatur	-40-125 °C (\pm 0,5 °C)
OPTCSMVL15SF0505	Optris	Oberflächentemperatur (IR-Emmision)	-50-1030 °C (\pm 1,0 °C / 1,0 % v. Messwert) ⁽⁴⁾
OPTCSTCL15	Optris	Oberflächentemperatur (IR-Emmision)	-40-1030 °C \pm (1,5 °C / 1,5 % v. Messwert) ⁽⁴⁾
		Umgebungstemperatur (Typ K-Thermoelement)	-20-80 °C (\pm n. b.) ⁽²⁾
237	Campbell Scientific	Oberflächen-kondensation (Resistiv)	50-200 k Ω (\pm n. b.) ⁽²⁾
HP3501.5	DeltaOHM	Oberflächen-kondensation (Kapazitiv)	0-100 % (\pm 5 %)
S20.250	Schmidt Technology	Strömung-geschwindigkeit	0-10 ms ⁻¹ (\pm 0,02 ms ⁻¹ / 5 % v. Messwert)
STF1	TiTec	Strömungsgeschwindigkeit	0-20 ms ⁻¹ (\pm 0,51 ms ⁻¹ / 5 % v. Messwert) ⁽³⁾

Fortsetzung Tab. 4

Bezeichnung (ggf. Modulbezeichnung)	Hersteller	Messgröße (ggf. Messverfahren)	Messbereich (\pm Genauigkeit)(1)
E2618-C2H4	Evikon	C ₂ H ₄ -Konzentration	0-200 ppm (± 2 % v. Messwert)
			0-10 ppm (± 2 % v. Messwert)
MC2-0-E1189-C-0-P	MSR-Electronic	C ₂ H ₄ -Konzentration	0-200 ppm (n. b.)
MC2-0-S2189-A-0-P	MSR-Electronic	C ₂ H ₄ -Konzentration	20-2000 ppm (n. b.)
SCD30	Sensirion	CO ₂ -Konzentration (ND-IR)	400-10000 ppm (± 30 ppm/ 3 % v. Messwert) ⁽³⁾
		Umgebungstemperatur	0-50 °C ($\pm 0,4 + (\text{Wert} - 25) \times 0,0023$ °C)
		Relative Luftfeuchte	0-100 % (± 3 %)
MH-Z14A	Winsen	CO ₂ -Konzentration (ND-IR)	0-5000 ppm (± 50 ppm/ 3 % v. Messwert) ⁽³⁾
MH-Z19B	Winsen	CO ₂ -Konzentration (ND-IR)	0-5000 ppm (± 50 ppm/ 3 % v. Messwert) ⁽³⁾
S8	SenseAir	CO ₂ -Konzentration (ND-IR)	400-2000 ppm (± 70 ppm/ 3 % v. Messwert) ⁽³⁾
Sunrise HVAC	SenseAir	CO ₂ -Konzentration (ND-IR)	400-5000 ppm (± 30 ppm/ 3 % v. Messwert) ⁽³⁾
EZO-CO2	Atlas Scientific	CO ₂ -Konzentration (ND-IR)	0-10000 ppm (± 30 ppm/ 3 % v. Messwert) ⁽³⁾
MQ-Serie (2 bis 9 und 135)	Flying Fish	Verschiedene Sensoren zur Konzentrationsbestimmung von entflammenden Gasen, Alkoholdämpfen und Rauch, (CNG, LPG, CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₆ H ₆ , NH ₃ , NO _x und H ₂)	n. b.

n.b. = nicht bekannt

⁽¹⁾Angegeben für die in der Lagerung relevanten Messbereiche: 0-20 °C; 80-100 % relative Luftfeuchte; 0-10 m/s Luftstrom;

⁽²⁾Abhängig von der verwendeten Messtechnik/Konfiguration

⁽³⁾Der jeweils größere Wert