

**Steuerung der Reifeprozesse von
Musa x paradisiaca (Dessertbananen)
auf der Basis von Luft-Ionisation**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktorin der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

M. Sc.

Johanna Katharina Weber

geboren am 15.12.1983 in Marburg

2015

Referent: Prof. Dr. Dr. R. G. Berger

Korreferent: PD Dr. Ulrich Krings

Tag der Promotion: 20.01.2015

Danksagung

Herzlichst danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. Ralf G. Berger für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, die stete Diskussionsbereitschaft, das entgegengebrachte Vertrauen und den eingeräumten Freiraum zur Bearbeitung des Themas sowie die Bereitstellung der hervorragenden Arbeitsbedingungen am Institut.

Des Weiteren möchte ich Herrn PD Dr. Ulrich Krings für seine herausragende Betreuung und sein offenes Ohr für Anliegen aller Art danken. Seine Anregungen, wertvollen Tipps und geduldigen Erklärungen haben entscheidend zum erfolgreichen Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Zudem möchte ich ihm für die Übernahme des Korreferats danken.

Mein weiterer Dank gilt der kooperativen Zusammenarbeit der Firma Biolclimatic, die neben der Konstruktion der miniaturisierten Kühlcontainer sich stets die Zeit nahmen Reparaturen bzw. Veränderungen an den Kühlcontainern vorzunehmen.

Herrn Prof. Dr. Andreas Hahn (Institut für Lebensmittelwissenschaft und Humanernährung, Leibniz Universität Hannover) für die Bereitschaft, den Vorsitz meiner Disputation zu übernehmen.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Lebensmittelchemie für die hervorragende Arbeitsatmosphäre und die hilfsbereite Zusammenarbeit.

Vor allem möchte ich von ganzem Herzen meiner gesamten Familie danken die immer hinter mir stand. Hier gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, Elisabeth Weber und Reiner Holle, die mich immer unterstützt und gefördert haben, meinen Wünschen und Plänen im Studium, wie auch privat gegenüber offen waren und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Ein besonders herzlicher Dank gilt zudem meinem Freund und meinen Freunden, die immer für einen da waren, wenn man sie gebraucht hat und zur nötigen Ablenkung und zum Spaß während dieser Zeit beigetragen haben.

Vormerkung

Die vorliegende Arbeit wurde im Zeitraum vom Februar 2012 bis Dezember 2014 am Institut für Lebensmittelchemie der Leibniz Universität Hannover unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Dr. Ralf G. Berger angefertigt.

Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens ZIM (KF2956701 AK1) durchgeführt.

Teile dieser Dissertation wurden auf dem 42. Deutschen Lebensmittelchemikertag im Zuge eines Posters und einer darauf basierenden Publikation vorgestellt und veröffentlicht.

Publikation:

Weber, J., Schwickert, J, Schroeder, W., Krings, U. und Berger, R.G.
„Steuerung der Reifeprozessen von Früchten auf der Basis von Luft-Ionisation“
Lebensmittelchemie, 2013, **67**, 167-168

Poster:

Weber, J., Schwickert, J, Schroeder, W., Krings, U. und Berger, R.G.
„Steuerung der Reifeprozessen von Früchten auf der Basis von Luft-Ionisation“
42. Deutscher Lebensmittelchemikertag, Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	III
ZUSAMMENFASSUNG	IV
ABSTRACT	VI
1. EINLEITUNG	1
1.1 Bananen – Fokus: Dessertbanane (<i>Musa x paradisiaca</i>)	1
1.2 Klimakterische Früchte – Fokus: Banane	2
1.3 Biosynthese - Bananenaroma.....	2
1.4 Biosynthese und Wirkmechanismus von Ethen in Pflanzen.....	3
1.5 Im- und Export – Weltwirtschaftspflanze <i>Musa x paradisiaca</i>	5
1.5.1 Transport – eine Herausforderung an die Logistik	6
1.5.2 Die Idee - Luftionisation während des Früchtetransports	7
1.5.2.1 Das Prinzip der Bioclimatic – Luftionisationssysteme	7
1.6 Ziel der Promotionsarbeit	8
2. MATERIAL UND METHODEN	9
2.1 Chemikalien, Gase und Lösungsmittel	9
2.2 Geräte, Gaschromatografen und Sensoren.....	10
2.2.1 Bau und Optimierung - Miniaturisierte Kühlcontainer	11
2.3 Ionisationsstufen und Röhrentypen	12
2.4 Ionisationsintensität und Ionenproduktion in den miniaturisierten Kühlcontainern.....	13
2.4.1 Intensität verschiedener Ionisationsstufen anhand von gebildetem Ozon	13
2.4.2 Ionenmessungen	13
2.4.3 Ionenproduktion bei verschiedenen Ionisationsstufen	13
2.4.4 Abhängigkeit der Ionenproduktion von Temperatur	13
2.4.5 Abhängigkeit der Ionenproduktion vom Luftstrom	14
2.4.6 Abhängigkeit der Ionen- und Ozonproduktion von Bananen und Verpackung	14
2.5 Ethenabbau in den miniaturisierten Kühlcontainern	15
2.6 Lagerungsversuche	15
2.7 Extraktions- und Analysemethoden.....	19
2.7.1 Isolierung und Identifizierung der Gesamtaromastoffe von Bananen	20
2.7.2 Isolierung und Identifizierung der flüchtigen Aromastoffe im Luftraum des miniaturisierten Kühlcontainers	22
2.7.3 Zuckerextraktion und enzymatischer Assay zur Bestimmung der Gesamtzucker (Glucose-, Fructose- und Saccharose)	24
2.7.4 Reifegradbestimmung anhand der visuellen Beurteilung	25
2.8 Prüfung der Vergleichbarkeit der Bananenchargen und Container	25
3. ERGEBNISSE	27
3.1 Probelagerungen zur Ermittlung von Eckdaten	27
3.1.1 Lagerungsversuch im miniaturisierten Kühlcontainer – Probelagerung I	27
3.1.2 Lagerungsversuch im miniaturisierten Kühlcontainer – Probelagerung II	29
3.1.3 Lagerungsversuch im miniaturisierten Kühlcontainer – Probelagerung III	32
3.1.4 Vergleich der Probelagerungsversuche anhand analytischer Parameter	34
3.2 Simulierte Lagerungsversuche mittels identischen miniaturisierten Kühlcontainern.....	36
3.2.1 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB Vergleich I	36

3.2.2 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich II	40
3.2.3 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich III	43
3.2.4 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich IV	45
3.2.5 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich V	48
3.2.6 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich VI	50
3.2.7 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich VII	52
3.2.8 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich VIII	61
3.3 Prüfung der Bananenchargen und Containervergleichbarkeit	71
3.4. Ionenproduktion in den miniaturisierten Kühlcontainern.....	72
3.4.1 Ionenbildung verschiedenen Ionisationsstufen	72
3.4.2 Abhängigkeit der Ionenproduktion von Temperatur	73
3.4.3 Ionenbildung unter variierenden Lufteinströmungen	74
3.4.4 Ionen- und Ozonproduktion mit und ohne Bananen	75
3.5 Ethenabbau in den miniaturisierten Kühlcontainern	76
4. DISKUSSION	79
4.1 Transportsysteme auf dem Weltmarkt.....	79
4.2 Ionisation im Fruchttransport – Erprobung im Miniaturmaßstab	81
4.2.1 Einflussfaktoren der Reifeverzögerung im Miniaturmaßstab	82
4.2.2 Luftumwälzung und Luftzufuhr vs. Regulation und Detektion der Atmungsgase	82
4.2.3 Vergleichbarkeit der Bananen und der miniaturisierten Kühlcontainer	83
4.2.4 Ionen/Ozon	84
4.3 Miniatur vs. Großmaßstab	86
4.4 Vorteil der Ionisation im Transport von klimakterischen Früchten.....	87
4.5 Etablierung auf dem Markt.....	89
5. FAZIT UND AUSBLICK	91
6. LITERATUR	93
7. ANHANG	96
7.1 Ergänzende Daten zu Kapitel 3.2.7	96
7.1.1 Vergleich der Chromatogramme aus dem Container Headspace	96
7.1.2 Darstellung der Fraktionen – Tabellen und dazugehörige Chromatogramme	96
7.2 Ergänzende Daten zu Kapitel 3.2.8	114
7.2.1 Vergleich der Chromatogramme aus dem Container Headspace	114
7.2.2 Darstellung der Fraktionen – Tabellen und dazugehörige Chromatogramme	114
8. LEBENS LAUF	133

Abkürzungsverzeichnis

ATP	Adenosintriphosphat
ACC	Aminocyclopropancarbonsäure
C1	Miniaturisierter Kühlcontainer Nr.1
C2	Miniaturisierter Kühlcontainer Nr.2
C ₂ H ₄	Ethen
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CTR	<i>constitutive triple response</i>
EIN	Ethen insensitive Protein
ERF	Ethenresistenzfaktor
EU	Europäische Union
FID	Flammenionisationsdetektor
GC	Gaschromatograf
HCN	Cyanid
IS	Ionisationsstufe/n
KAS	Kaltaufgabesystem
MeOH	Methanol
MS	Massenspektrometer
NaCl	Natriumchlorid
Na ₂ SO ₄	Natriumsulfat
O ₂	Sauerstoff
O ₃	Ozon
P/E	n-Pentan/Diethylether
RI	Retentionsindex/indices
TDS	Thermodesorptionssystem
V	Volumen
VE	Voll endmineralisiert
W	<i>Weight</i>

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, die Transport- bzw. Lagerungszeit klimakterischer Früchte, zunächst vor allem von Bananen, deutlich zu verlängern. Dieses Ziel sollte durch permanenten Abbau des von den Bananen gebildeten autokatalytischen Reifegases Ethen erreicht werden. Zu diesem Zweck wurde zunächst eine Kühltruhe so modifiziert, dass sie im Labormaßstab die Lagerbedingungen in einem handelsüblichen Schiffscontainer simuliert. Um eine Reifung der Bananen in den Versuchen belegen zu können, wurden neben der sensorischen (Aussehen, Textur, Geruch und Geschmack) Beurteilung auch analytische Parameter wie Zuckergehalt und Aromaprofil definiert.

In Vorversuchen wurde zunächst die Lagerung von Bananen in dem Container beobachtet und Änderungen der Lageratmosphäre analysiert, diese nachfolgend mit aktiver Luftzufuhr reguliert und in einem weiteren Vorversuch die Auswirkung der Ionisierung auf die Lagerfähigkeit der Bananen überprüft. Es konnte eine Verlängerung der Lagerzeit grüner Bananen von 2 Wochen gegenüber der Kontrolllagerung ohne Einsatz der Ionisation erzielt werden. Da diese Versuche unabhängig voneinander durchgeführt wurden, wurde eine zweite, baugleiche Kühltruhe für die im Labormaßstab simulierten Lagerbedingungen angefertigt.

Es wurden Probemessungen durchgeführt, bei denen die Minderung artifiziell vorgelegter Ethenkonzentrationen in den Containern unter regulären Lagerbedingungen mit und ohne Einsatz von Ionisationsröhren verfolgt wurde. Neben der Abnahme der Ethenkonzentration durch die Belüftung der Container wurde ein deutlich beschleunigter Ethenabbau mittels Ionisation festgestellt. Direkte AB-Vergleiche wurden unter verschiedenen Bedingungen (z. B. Temperatur, Luftzufuhr, Ventilation) durchgeführt. In den simulierten Lagerungen konnte eine Verlängerung der Lagerzeit grüner Bananen von zehn Tagen bei üblicher Lagertemperatur von 13,5 °C gegenüber der Kontrolllagerung ohne Einsatz der Ionisation erzielt werden. Die Vielzahl der zu untersuchenden Parameter machte es notwendig, die folgenden Versuche bei Raumtemperatur zu führen, um in einem kürzeren Zeitraum mehr Ergebnisse zu erzielen. Diese zeigten, dass eine zeitliche Verzögerung der Bananenreife nicht ausschließlich durch Luft-Ionisation hervorgerufen wurde, sondern auch von der jeweiligen Vorgeschichte der Früchte abhängig war. Trotz der statistischen Verteilung der Früchte aus verschiedenen Clustern wiesen die Chargen unterschiedliche Atmungsaktivitäten auf, die auf unterschiedliche Reifestadien hinwiesen, die optisch nicht

zu erkennen waren. Ein Gegensteuern durch Erhöhung der Belüftungsrate verhinderte, dass die Kohlendioxidkonzentration auf ein Anaerobiose verursachendes Niveau anstieg. Mit dem Entfernen des Kohlendioxids wurde gleichzeitig bereits gebildetes Ethen entfernt, was einen eindeutigen Beleg für die Wirkung der Ionisation erschwerte. Luftionisation und eine minimale Ozonbildung sind technisch nicht zu trennen und verursachen den beobachteten reifeverzögernden Effekt vermutlich synergistisch.

Schlagwörter: *Musa x paradisiaca*, Ethenabbau, Luft-Ionisation

Abstract

The aim of this work was to significantly increase the transport and storage time of climacteric fruits. Looking at the large trade volume, work was focused on bananas. This objective should be reached by a permanent degradation of the autocatalytic ripening gas ethene. For this purpose, a commercial refrigerator was modified to simulate the storage conditions of a standard shipping container on a laboratory scale. In order to demonstrate the ripening progress of bananas in the experiments, analytical parameters, such as sugar content and flavor profile, were defined in addition to the sensorial (color, texture, flavor) assessment.

In preliminary tests, the storage conditions of bananas in the container were observed. Changes in the storage atmosphere were regulated via an active air supply, and the effect of the ionization on the shelf life of bananas was examined. The shelf life of green bananas was extended for a period of two weeks compared to the control storage without the use of ionization. Since these experiments were carried out subsequently, a second, identical refrigerator was modified to enable lab scale storages with comparable banana batches

Measurements under regular storage conditions were carried out, in which the reduction of external ethene, with and without the use of ionization in the containers, was observed. Apart from the decrease of the ethene concentration by ventilation, the ethene degradation was significantly accelerated by ionization. Direct AB comparisons were carried under different conditions (e. g. temperature, air supply, ventilation). In the simulated storages, an extension of the shelf life of green bananas of ten days was observed under a storage temperature of 13.5 °C compared to the control storage without ionization.

The large number of parameters to be investigated made it necessary to carry out the following tests at room temperature in order to achieve more results in a shorter period. It was shown that a delay of ripening was not solely caused by air ionization, but also depended on the respective history of the fruit. Despite the statistical distribution of the fruits of different clusters, the batches showed different respiratory activities according to different stages of maturity, which were not optically visible. To prevent a rise of the carbon dioxide concentration to levels causing anaerobiosis, the aeration rate was increased. Together with the carbon dioxide, the meanwhile formed ethene was removed at the same time; thus, a clear evidence of the effect of the ionization could not be obtained. Ionization

of air and formation of low concentrations of ozone cannot be separated technically and are supposed to cause the observed delay of ripening in a synergistic manner.

Keywords: *Musa x paradisiaca*, ethene degradation, air-ionisation

1. EINLEITUNG

1.1 Bananen – Fokus: Dessertbanane (*Musa x paradisiaca*)

Die Gattung Banane (*Musa*) ist eine weltweit verbreitete Frucht, zählt zu den wichtigsten Weltwirtschaftspflanzen und ist in der Taxonomie der Familie der Bananengewächse (*Musaceae*) zugeordnet. Besonderes Interesse gilt wirtschaftlich den Kulturbananen (Kulturkomplex: *Musa x paradisiaca*), wozu zum einen die bekannte Dessertbanane (Obstbanane) und zum anderen die weniger bekannten Kochbananen (Stärkebananen/Mehlbananen) zählen [1]. Die weltweit am häufigsten für den Export angebaute Dessertbananensorte war bis in die sechziger Jahre hinein die *Gros Michel*. Allerdings ist diese bedingt durch einen Pilzbefall vernichtet worden (*Panama-Krankheit*). Seither wird die *Cavendish*-Banane alternativ angebaut, welche heutzutage unter den Dessertbananen, die für die Wirtschaft am bedeutendste Banane darstellt und welcher die meisten Dessertbananen entstammen. Allerdings ist diese auch zunehmend von Pilzen befallen, die die *Panama-Krankheit* oder andere Krankheiten, wie *Schwarze Sigatoka* auslösen und eine Bekämpfung ist nur durch den Einsatz von Pestizide möglich [2].

Bananen weisen einen hohen Kohlenhydratanteil von 25 % [w/w] auf, welcher in Form von Stärke oder Zuckern (Glucose, Fructose, Saccharose) vorliegt. Der Zuckeranteil resultiert aus dem Stärkeabbau im Zuge der Reifung und macht die Dessertbanane zu der wohl am meisten verzehrten Bananensorte. Der Abbau von Stärke zu Zuckern kommt bei der Kochbanane nicht zum Tragen, dem entsprechend sind diese Art von Bananen auch eher mehlig und weisen keinen süßlichen Geschmack auf [3]. Neben dem hohen Kohlenhydratanteil enthalten Bananen viele Vitamine und größere Mengen an Mineralstoffen (z.B. Kalium, Phosphor, Eisen, Magnesium). In den Industrieländern dienen Bananen (hauptsächlich Dessertbananen) daher oft als Zwischenmahlzeit, Baby- oder Sportlernahrung. Der Pro-Kopf-Verbrauch liegt in diesen Ländern bei etwa 12 kg pro Jahr. In Armutsländern stellen Bananen (hauptsächlich Kochbananen) hingegen ein Grundnahrungsmittel dar. Hier liegt der Pro-Kopf-Verbrauch bei 100 kg im Jahr [2].

1.2 Klimakterische Früchte – Fokus: Banane

Bananen gehören zu den klimakterischen Früchten und durchleben nach der Ernte drei verschiedene Phasen (pre-klimakterische, die klimakterische und die Reifephase). Die pre-klimakterische Phase zeichnet sich durch geringe Stoffwechselaktivitäten aus, sodass die Banane gewissermaßen metabolisch ruht. In der klimakterischen Phase kommt es zu einem drastischen Atmungsanstieg. Konzentrationen von $> 0,1 \text{ mg L}^{-1}$ Ethen lösen bei Bananen dann die Reifephase aus [4]. Bananen reagieren somit sehr sensitiv auf Ethen, verglichen zu anderen Früchten wie Avocados. Dafür sind Bananen keine starken Ethenproduzenten. Im klimakterischen Maximum werden ungefähr $40 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ Ethen produziert, wohingegen Avocados über das Zehnfache produzieren ($500 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$) [5]. Im Zuge der Reifung werden dann vielfältige Stoffwechselprozesse durch verschiedene Enzyme in Gang gesetzt, welche durch Ethen reguliert werden. Die Autokatalyse fungiert somit als eine Art Wirkkaskade. Äußerlich erkennbar ist der Reifeprozess daran, dass die grüne Schale gelb und weicher wird [6]. Des Weiteren wird u.a. Stärke zu Zuckern abgebaut und das charakteristische Bananenaroma ausgebildet.

1.3 Biosynthese - Bananenaroma

Die Biosynthese von Aromastoffen ist ein wichtiger, metabolischer Prozess, der stark an die Ethensynthese der Frucht gekoppelt ist. Nach Beginn der klimakterischen Phase, werden viele flüchtige Verbindungen gebildet, die zusammen einen Geschmack formen, den man mit der Banane assoziiert [7]. Kleinste Veränderungen in der Atmosphäre können zu einer geringeren Produktion an Aromen führen, wodurch die Bildung des typischen Bananenaromas negativ beeinflusst werden kann. Die Bildung ist z.B. von äußeren Faktoren, wie Temperatur oder Licht abhängig. Durch den täglichen Rhythmus des Sonnenauf- und Sonnenuntergangs kommt es zu Temperaturunterschieden in der Atmosphäre, die zu einer besseren Aromabildung beitragen. Um 60 % mehr flüchtige Substanzen werden so produziert, die bei konstanter Temperatur nicht entfaltet werden [5]. Mittlerweile wurden mehr als 250 verschiedene flüchtige Komponenten in Bananen identifiziert [8, 9], die mehr oder weniger zum Bananengeschmack beitragen. Die Schlüsselkomponenten des Bananenaromas, sind unter anderem 2-Pentanon, Ethansäure-

(2-methyl)propylester und Ethansäure-(3-methyl)butylester [10]. Der Ursprung der Synthese liegt im Stoffwechsel von Aminosäuren und Fettsäuren [9]. Beispielhaft kann hier die Aminosäure L-Leucine als *Precursor* des Ethansäure-(3-methyl)butylesters und des 3-Methyl-1-Butanols genannt werden [11]. Des Weiteren ist die Alkohol-acyl-CoA-Transferase in die Biosynthese involviert und wird durch den Reifeprozess aktiviert. Sie verestert Alkohole und CoA-Derivate von kurzkettigen Fettsäuren [12].

1.4 Biosynthese und Wirkmechanismus von Ethen in Pflanzen

Ethen ist ein Signalmolekül, welches in der Pflanzenwelt als Phytohormon in verschiedenen Prozessen (z.B. Blühinduktion, Wachstum, Seneszenz, Fruchtreife) involviert ist und stellt somit einen wichtigen Bestandteil im Pflanzenmetabolismus dar. Die Ethensynthese wird durch das Ethen selber oder auch über das Phytohormon Auxin stimuliert [13, 14].

Die Ethensynthese (Abbildung 1) beginnt mit einer enzymatischen Kopplung von Methionin und Adenosin über die S-Adenosylsynthetase, wobei unter ATP Verbrauch das S-Adenosylmethionin gebildet wird. Durch die ACC-Synthetase wird in einem weiteren Reaktionsschritt ACC (1-Aminocyclopropan-1-carbonsäure) und Methylthioadenosin synthetisiert. Letzteres kann über mehrstufigen Prozess wieder zum Ausgangsprodukt Methionin abgebaut werden. Dieser Abbau benötigt nur ein ATP Molekül und kann somit auch unter energetisch ungünstigen Bedingungen in den Zellen erfolgen. Das ACC wird über die ACC-Oxidase unter Sauerstoffverbrauch zu Ethen umgesetzt, wobei CO₂ und Cyanid (HCN) als Nebenprodukte entstehen [13, 15]. Das giftige HCN wird über das Enzym β -Cyanoalanin-Synthase zu Cyanoalanin detoxifiziert [16].

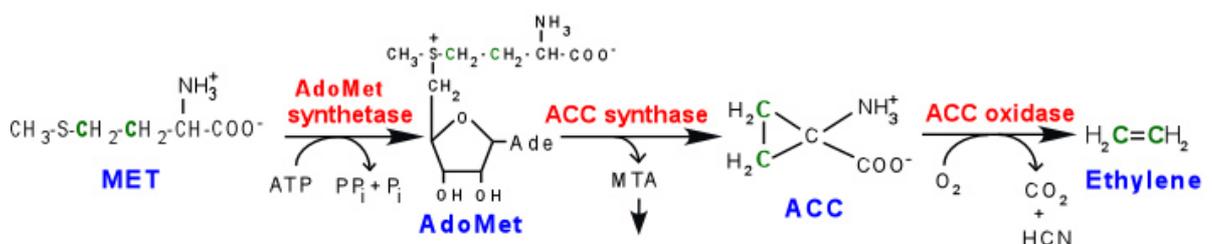


Abbildung 1: Ethensynthese; Methionin (MET), Adenosylmethionin (AdoMet) und 1-Aminocyclopropan-1-carbonsäure (ACC) [17].

Das freigesetzte Ethen bindet an spezifische Ethenrezeptormoleküle (ETR1 und ERS1) an den Zellmembranen. Diese Rezeptoren aktivieren in Abwesenheit von Ethen die Proteinkinase CTR1 (*constitutive triple response*), welche den Signalweg des Ethens hemmt (Abbildung 2). Durch die Bindung des Ethens an diese Rezeptoren wird die Proteinkinase CTR1 gehemmt und der Ethensignalweg wird freigegeben. Durch die Aktivierung des Signalwegs wirken Ethen insensitive Proteine (EIN) induzierend auf einander. Das EIN2-Protein aktiviert den Transkriptionsfaktor EIN3, woraufhin EIN3 den Transkriptionsfaktor ERF-1 (Ethenresistenzfaktor) induziert. Der Ethen-Response-Faktor 1 (ERF1) wird im Zytoplasma gebildet und in den Zellkern transportiert, welcher mehrere Gene reguliert. Diese Regulation erfolgt über die Bindung des ERF-1 an die Promotoren der Ethen regulierten Gene, sodass bei der Wirkung von Ethen auf dieses System immer eine ganze Reihe von genetischen Aktivitäten ausgelöst werden können [18]. Zum Beispiel reguliert das Ethen selbst (autokatalytisch) die Bildung der ACC-Oxidase, wodurch in benachbarten Zellen eine Kettenreaktion in Gang gesetzt wird, die die Ethenbildung vorantreibt. Neben der Regulation der ACC-Oxidase, gehören unter anderem die Expression von Seneszenz involvierten Enzymen (Chitinasen, Zellulasen), Reife involvierte Enzyme wie Amylasen für den Stärke Abbau oder Pektinasen, die zur Erweichung der Schale führen oder in die Abwehr involvierte Enzyme, die Substanzen gegen Schädlinge oder Verwundung synthetisieren (Glucanasen, Proteinase-Inhibitoren) [13].

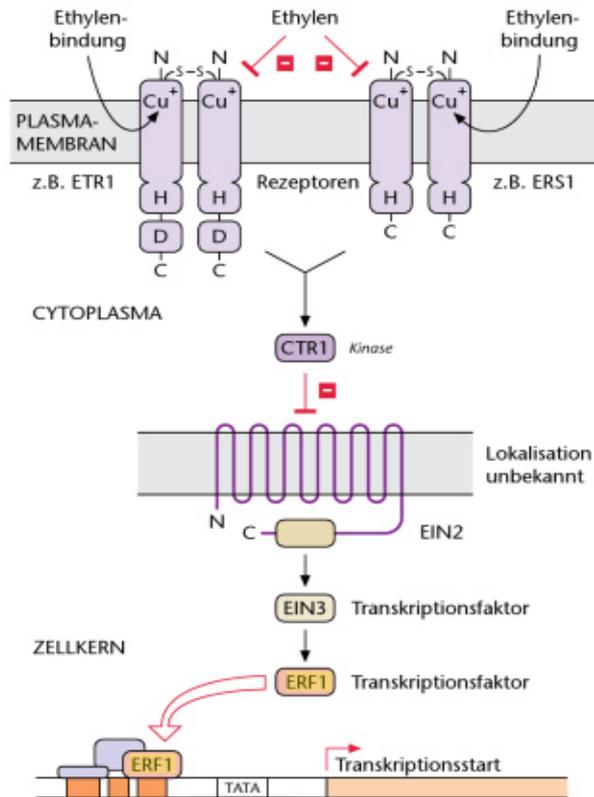


Abbildung 2: Ethensignalsweg in der Zelle [18]

1.5 Im- und Export – Weltwirtschaftspflanze *Musa x paradisiaca*

Bananen, bevorzugt Dessertbananen, werden weltweit verzehrt, können aber aufgrund ihrer Wachstumsbedingungen nicht weltweit angebaut werden. Sie benötigen ein gleichmäßig warmes Klima mit Jahresdurchschnittstemperaturen von mehr als 20 °C und gut verteilten Niederschlägen, wodurch nur die subtropischen und tropischen Länder als Anbaugelände von tragbarem Nutzen sind. Zu den fünf größten Produzenten gehören Indien, China, Philippinen, Ecuador und Brasilien. Hauptexportländer sind hingegen unter anderem Ecuador, Honduras, Costa Rica und Panama. In diesen Ländern wird hauptsächlich für den Export produziert, wodurch der Ernteanteil an der Gesamtwelternte lediglich bei 8 % (Ecuador) liegt. Hauptexportregionen sind Zentralamerika (46 %) und Südamerika (30 %) die zusammen Dreiviertel des Weltmarkts abdecken. In Europa findet man auch Anbauregionen, die Erträge von 650.000 Tonnen einbringen und somit 10 % des europäischen Bedarfs decken. Die EU ist mit Nordamerika die wichtigste Importregion. Allein die EU importiert jährlich 5,2 Millionen Tonnen. Die Nachfrage an Bananen nimmt

stetig zu, so wurden im Jahr 1994 50 Millionen Tonnen und 2010 doppelt so viele (100 Millionen Tonnen) Bananen geerntet. In vielen Anbauländern ist der lokale Verbrauch wesentlich höher als der zu exportierende Anteil. Somit werden von 100 Millionen Tonnen jährlicher Welternte nur 16 Millionen exportiert [2].

Teilweise sind auch statistisch Abnahmen im In- oder Export in bestimmter Regionen zu beobachten, welche aus verschiedensten Gründen zum Tragen kommen. So wurde 2012 von der EU etwa 4,5 Millionen Tonnen weniger Bananen importiert, die durch Anbau in heimischen Regionen wieder ausgeglichen wurden. Gleichzeitig sank die Exportrate in den betroffenen Exportregionen. Zudem kommt es vor, dass ganze Plantagen von Schädlingen (meist Bakterien oder Pilze) befallen werden und somit die Ernteerträge den Bedarf des Konsumenten nicht mehr abdecken können. So sank 2012 beispielsweise der Export Kolumbiens um eine Million Tonnen aufgrund der *Moko-Krankheit*. Ein weiterer Faktor der oft im In- und Export zu Einbußen führt, sind „klimakterische Unfälle“. Es kommt beispielsweise vor Ankunft am Zielort zu einer Reifung der Früchte und folglich zu einem Verderb, bevor die Ware für den Konsumenten erhältlich ist. Diese Problematik stellt weltweit große Anforderungen an den Transport von Bananen und anderen klimakterischen Früchten [19].

1.5.1 Transport – eine Herausforderung an die Logistik

Um den Export klimakterischer Früchte zu gewährleisten und den Weltmarkt bedienen zu können, muss meist eine weite Strecke zurückgelegt werden. An diese Transportstrecken sind hohe Anforderungen gestellt, da die Banane, aufgrund der beschriebenen physiologischen Eigenschaften eine Herausforderung an die Logistik darstellt. Um ein möglichst breites Zeitfenster im Transport zu gewährleisten, macht man sich die physiologischen Eigenschaften der Früchte zu nutze. Neben der Ernte im unreifen Stadium ist eine aufeinander abgestimmte Lieferkette notwendig, die von der Plantage, über Verpackung, Transport und Reifung bis in den Supermarkt reichen muss. Unter optimalen Lagerbedingungen (z.B. Atmosphären- und Temperaturregelung) sind bis zu vier Wochen Transportzeit meist problemlos möglich. Problematisch wird es wenn Ethen autokatalytisch gebildet wird und zu Kettenreaktionen im Transportraum führt. Geringe Konzentrationen von $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ [4] reichen aus, um bei Bananen eine Reifung zu induzieren. Eine reifende Banane kann in einem Container mit 20 t Bananen zur Reifung

der gesamten Ladung führen. Somit wird der Hauptfokus im Transport klimakterischer Früchte auf optimale Luftatmosphären und Temperaturen gelegt. Neben Reife induzierenden Temperaturen, die über dem optimalen Bereich von 13,5 °C liegen, darf es auch nicht zu einer Unterkühlung der Bananen kommen. Im schlimmsten Fall lösen zu tiefe Temperaturen eine *Chillphase* aus, welche zur Folge hat, dass es zu keiner Reifung der Früchte mehr kommen kann. Die Schale verfärbt sich bräunlich und die Frucht bildet Fehlgerüche.

Des Weiteren ist eine robuste Verpackung der Ware nötig, die zudem genügend Luftaustausch innerhalb und außerhalb der Fracht gewährleistet. Mit Polyethylen Verpackungen wird zu niedrigen Luftfeuchten entgegengewirkt, um unvollständige Reifungen und Gewichtsverluste zu vermeiden [20]. Zudem müssen die Bananen entsprechend verfrachtet werden, um Beschädigungen zu vermeiden. Bananen allgemein zeichnen sich durch eine dicke Schale aus. Wird die Schale im unreifen Zustand beschädigt, kann es zu einem Austritt des enthaltenen Latexsaftes führen, was an der Luft zum Oxidieren der im Saft befindlichen Tannine führt und im Verfärben der Frucht (schwarz-braune Flecken) endet [21].

1.5.2 Die Idee - Luftionisation während des Fruchttetransports

Um die Transportstrecken für tropische Früchte zu erweitern, könnte die Anwendung von Ionisationssystemen/röhren im Fruchtttransport eine Lösung darstellen. Die Idee ist, direkt in die Kinetik der Fruchtreife einzugreifen und den durch Ethen ausgelösten Prozess der autokatalytischen Reife deutlich zu verzögern, indem produziertes Ethen direkt über die Ionisation abgebaut wird, bevor Schwellenkonzentrationen von 0,1 mg L⁻¹ im Transportraum erreicht werden. Somit soll verhindert werden, dass die Frucht in die klimakterische Phase übergehen kann und dadurch eine deutliche Verlängerung der Transportzeit resultiert.

1.5.2.1 Das Prinzip der *Bioclimatic* – Luftionisationssysteme

Bioclimatic-Ionisationssysteme arbeiten nach dem Prinzip der Inaktivierung von Geruchsschadstoffen (Osmogenen) und Mikroorganismen durch Oxidation mit „aktiviertem Sauerstoff“. Aktivierter Sauerstoff wird hier als Sammelbegriff für die bei der

Ionisation von Luft entstehenden reaktiven Sauerstoffverbindungen verwendet. Der aktivierte Sauerstoff wird mit Hilfe der sogenannten Korona-Entladung an einer *Bioclimatic*-Ionisationsröhre produziert. Dabei wird zwischen den Elektroden der Ionisationsröhre, die durch ein nichtleitendes Dielektrikum (hier Glas) voneinander getrennt sind, eine Hochspannung angelegt und so der Entladungsprozess erzwungen. Die durch den Entladungsprozess freiwerdende Energie wird von Sauerstoff- und Wassermolekülen der Luft unter Bildung von aktiviertem Sauerstoffs aufgenommen. Hierbei handelt es sich im Einzelnen um Sauerstoff- und Hydroxylradikale, Sauerstoffionen und Ozonmoleküle, sowie Hydroxidionen und Wasserstoffionen, d. h. ein Gemisch von gasförmigen Oxidationsmitteln. Diese Spezies sind aufgrund ihres erhöhten Energie- und Ladungszustandes chemisch sehr reaktiv gegenüber oxidierbaren Stoffen wie organischen und anorganischen Geruchsstoffen. Der aktivierte Sauerstoff bewirkt somit eine Oxidation von Osmogenen. Diese werden dabei chemisch verändert, d. h. es bilden sich neue, nichtriechende und nicht-toxische Substanzen (z. B. Wasser, Kohlendioxid). Zudem ist der aktivierte Sauerstoff in der Lage, die Zellstruktur von Mikroorganismen wie Pilzen, Hefen und Bakterien zu schädigen und diese so zu inaktivieren [22].

1.6 Ziel der Promotionsarbeit

Ziel der Promotionsarbeit war es, die Lagerzeit und damit das Transportzeitfenster von klimakterischen Früchten zu verlängern. Die dafür notwendige Entfernung des Ethens (obsolet: Ethylen) aus der Umgebungsluft, sollte durch eine neu zu entwickelnde Technologie auf der Basis von Luftionisation durchgeführt werden. Begleitend sollte die Reifung, deren angestrebte Verzögerung, sowie der gesunde Zustand der Frucht während und nach der Lagerung anhand sensorischer und analytischer Daten verfolgt und belegt werden.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Chemikalien, Gase und Lösungsmittel

Tabelle 1: Verwendete Chemikalien und Lösungsmittel

Produkt	Reinheit	CAS-Nr.	Hersteller
Diethylether	rektifiziert	60-29-7	VWR
D-(-)-Fructose	reinst	57-48-7	Sigma-Aldrich
D-(+)-Glucose Monohydrat	reinst	14431-43-7	Sigma-Aldrich
Ethansäure-(3-methyl)butylester	98%	123-92-2	Sigma-Aldrich
Kieselgel 230-400 <i>mesh</i>	-	231-545-4	Merck
Methanol	rektifiziert	67-56-1	VWR
Decansäuremethylester	99,5%	110-42-9	Merck
Undecansäuremethylester	99,5%	1731-86-8	Merck
Natriumchlorid	-	7647-14-5	Roth
Natriumsulfat	-	7757-82-6	Roth
n-Pentan	rektifiziert	109-66-0	VWR
Saccharose	puriss	57-50-1	Sigma-Aldrich

Tabelle 2: Verwendete Gase

Produkt	Reinheit	UN-Nr.	Hersteller	Gaszustand
Gasgemisch	Ethen 9,95 mol.ppm Rest Stickstoff 5.0	1965	Messer	gasförmig
Helium	99,999 % [v/v]	1046	Westfalen	gasförmig
Stickstoff	99,999 % [v/v]	1066	Westfalen	gasförmig
Stickstoff	99,999 % [v/v]	1977	Linde	flüssig
Wasserstoff	99,999 % [v/v]	1049	Westfalen	gasförmig

2.2 Geräte, Gaschromatografen und Sensoren

Tabelle 3: Verwendete Geräte

Gerät	Model	Hersteller	Software
Gasprobenehmer	GS 312	Desaga	-
Ionometer	IM806	Holbach	IM806 1.0.3.0
<i>Micro Plate Reader</i>	Synergy 2	BioTek	Gen 5.0
Zentrifuge	Rotana 460R	Hettich	-

Tabelle 4: Verwendete Sensoren

Sensor	Model	Hersteller	Software
Ethensensor (Mischgassensor)	TGS - 2600	Figaro	ProfiLab 4.0
Ethensensor	ADT53 1189	MSR Electronic	ProfiLab 4.0
Kohlenstoffdioxidsensor	EE82-2C3	E+E Elektroniks	ProfiLab 4.0
Ozonsensor	A051020-SP61-02	FIS	ProfiLab 4.0
Sauerstoffsensoren	XGARD Type 1	CROWCON	ProfiLab 4.0

Tabelle 5: Verwendete GC-Modelle

GC-Model	Hersteller	Software
CP-3800	Varian	Varian Work Station
GC 6890	Agilent	Chemstation
GC 7890	Agilent	Chemstation
Sato	Satochrom	Chemstation
GC 8000	Fisons Instruments	XCalibur

2.2.1 Bau und Optimierung - Miniaturisierte Kühlcontainer

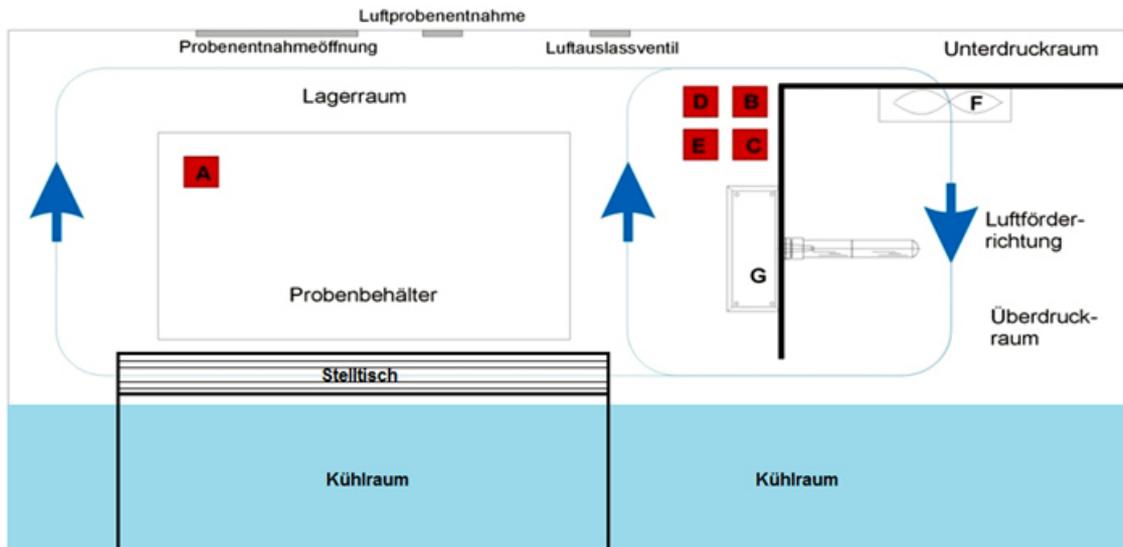
Um die Lagerung von Bananen unter Ionisation testen zu können, wurde zunächst eine handelsübliche Kühltruhe (Liebherr) so modifiziert, dass eine authentische Lagerung unter kontrollierten Bedingungen simuliert werden konnte. Die Planung des Miniaturcontainers erfolgte in enger Zusammenarbeit der Projektpartner, und die Konstruktion wurde von der Firma Bioclimatic durchgeführt. Im Folgenden sind stichpunktartig die baulichen und technischen Veränderungen der Kühltruhe aufgelistet:

- Wand zur Rauntrennung
- Drei Anschlüsse für *Corona*-Ionisationsröhren
- Ventilator (Luftumwälzungskapazität von $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$)
- Luftauslassventile (auch als Druckluftzufuhranschluss nutzbar)
- Neue Temperaturschaltung → auf $13,5 \text{ °C}$ reguliert
- Thermometer
- Sensoren (CO_2 , O_2 , O_3 und C_2H_4)
- Luftprobenentnahmestellen
- Probenentnahmeklappe
- Sichtfenster

Im Laufe der Arbeit wurde nach Bau des ersten Kühlcontainers ein zweiter baugleich angefertigt, damit der Fokus auf AB Vergleiche (direkt Vergleiche mit und ohne Luft-Ionisation) gelegt werden konnte. Zusätzlich wurden Verbesserungen und Anpassungen in beiden Minicontainern realisiert, die im Folgenden stichpunktartig aufgelistet sind:

- Stelltisch mit Rillen zur besseren Luftverteilung unterhalb der Bananen
 - Folge: Minimierung der Beladbarkeit mit Bananen von 36 kg auf 18 kg
- Zusätzliche Temperaturschaltung ($17,5 \text{ °C}$)
- Neuer Ethensensor

In der folgenden Abbildung ist eine Skizze des Innenraums der miniaturisierten Kühlcontainer dargestellt.



Nettovolumen des Lagerraumes ca. 220 l
 A - Temperatursensor (PT 100), Messbereich -50 - 150 Grd C
 B - CO₂ Sensor, Messbereich 0 - 2000 ppm
 C - O₂ Sensor, Messbereich 0 -25 Vol. %
 D - Ethylensensor, Messbereich 0 - 50 ppm
 E - O₃ Sensor, Messbereich 0 - 250 ppb
 F - Axialventilator, Förderbereich bis 120 m³/h
 G - Ionisationssystem, Ionisationsröhre Typ "C" (ca. 195 mm),
 Spannungsbereich 1250 - 3000V/50Hz
 H - Mess - Steuer und Regelleinheit zur Temperaturregelung,
 Sensormesswerterfassung mit Datenloggern und externem
 PC Anschluss zur Messwerterfassung und Auswertung



Abbildung 3: Skizze des Innenraums der miniaturisierten Container

2.3 Ionisationsstufen und Röhrentypen

In den folgenden Tabellen sind die einstellbaren Ionisationsstufen (IS), verschiedene Röhrentypen und Gitter dargestellt.

Tabelle 6: Einstellbare Ionisationsstufen und Anschlüsse

Ionisationsstufen (IS)	Anschlüsse für Ionisationsröhren
1 - 8	1-3

Tabelle 7: Einsetzbare *Corona*-Ionisationsröhren

Röhrentyp	Länge
Typ B	67 mm
Typ C	150 mm
Typ D	210 mm

Tabelle 8: Gittertypen innerhalb und außerhalb der *Corona*-Ionisationsröhren

Gittertyp	Länge
14 <i>mesh</i>	1,5 mm
40 <i>mesh</i>	0,5 mm

2.4 Ionisationsintensität und Ionenproduktion in den miniaturisierten Kühlcontainern

2.4.1 Intensität verschiedener Ionisationsstufen anhand von gebildetem Ozon

Um einen Anhaltspunkt über die Stärke der Ionisation im Container zu bekommen, wurden IS 1 bis IS 3 für eine *Corona*-Ionisationsröhre des *Typ C* im miniaturisierten Kühlcontainer getestet und die resultierenden Ozonwerte als Richtwerte für die Ionisationsintensität herangezogen. Die nächsthöhere Ionisationsstufe wurde eingestellt, sobald kein starker Anstieg an Ozon über eine Zeit von zehn Stunden mehr messbar war. Luftaustausch erfolgte über geöffnete Auslassventile. Die Luftumwälzung betrug $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

2.4.2 Ionenmessungen

In den folgenden Versuchen wurde die Ionenproduktion unter verschiedenen Bedingungen im Innenraum des C1 gemessen. Als Ionenmessgerät wurde das *Ionometer IM 806 (Holbach)* herangezogen. Der Abstand zwischen den Röhren und dem Messgerät lag bei 30 cm. Die Container waren (bis auf ggf. geöffnete Luftauslassventile) verschlossen. Die Bedienung des Ionometers erfolgte über die eingebauten Handschuhe.

2.4.3 Ionenproduktion bei verschiedenen Ionisationsstufen

Die Ionenproduktion mit IS1 bis IS8 wurde für drei eingebaute *Corona*-Ionisationsröhren des *Typ B* und einem 40 *mesh* Gitter, bei 22 °C für jeweils zehn Minuten verfolgt. Die Messung wurde in beiden Containern mit kontinuierlicher Luftumwälzung durch die Ventilatoren ($50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) durchgeführt.

2.4.4 Abhängigkeit der Ionenproduktion von Temperatur

Die Ionenproduktion wurde für drei eingebaute *Corona*-Ionisationsröhren des *Typ B* und einem 40 *mesh* Gitter, im C1 mit IS 1, 4, 5, 6 und 8 bei 13,5 °C und 22 °C für jeweils zehn

Minuten verfolgt. Die Messung im Container erfolgte mit kontinuierlicher Luftumwälzung von $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

2.4.5 Abhängigkeit der Ionenproduktion vom Luftstrom

Die Ionenproduktion wurde für drei eingebaute *Corona*-Ionisationsröhren des *Typ B* und einem *40 mesh* Gitter, im C1 mit den IS 0 bis IS 3 bei $22 \text{ }^\circ\text{C}$ und unter unterschiedlichen Luftströmungen für jeweils zehn Minuten verfolgt. In der folgenden Tabelle sind die Messbedingungen dargestellt.

Tabelle 9: Darstellung der eingestellten Ventilation und Luftzufuhr für die vier durchgeführten Messungen

Messung Nr.	Ventilation ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$)	Luftzufuhr (mL min^{-1})
1	0	0
2	50	0
3	50	400
4	50	5000

2.4.6 Abhängigkeit der Ionen- und Ozonproduktion von Bananen und Verpackung

Die Ionen- und Ozonproduktion wurde für zwei eingebaute *Corona*-Ionisationsröhren des *Typ C* und einem *40 mesh* Gitter, im C1 mit den IS 1-3 bei $22 \text{ }^\circ\text{C}$ mit und ohne Beladung von 18 kg Bananen (Tabelle 10) für jeweils zehn Minuten verfolgt.

Tabelle 10: Angaben zu den Versuchsbananen

Art	Herkunft	Reifegrad	Marke	Zeitfenster
<i>Musa x paradisiaca</i>	Kolumbien	3-4	Turbana	4 Wochen (Schiff) 2 Tage (Großmarkt)

2.5 Ethenabbau in den miniaturisierten Kühlcontainern

Um einen Anhaltspunkt zu bekommen, wie viel Ethen im Container in einem bestimmten Zeitrahmen abgebaut werden kann, wurde ein Ethen/Stickstoff Gasgemisch (*Messer*) direkt in C1 eingeleitet und mit verschiedenen IS die Ab- und Zunahme der Gase (C_2H_4 , CO_2 , O_2 und O_3) analysiert. In folgender Tabelle sind die Versuchsparameter aufgeführt. Die Container wurden komplett verschlossen, um den Austritt von Ethen bestmöglich zu unterbinden.

Tabelle 11: Parameter im Container

Messung Nr.	Ethen (ppm)	IS	Corona-röhren	Röhren-gitter	Temperatur (°C)	Ventilation ($m^3 h^{-1}$)
1	1	0	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	21 (± 1)	50
2	1	1	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	21 (± 1)	50
3	1	2	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	21 (± 1)	50

2.6 Lagerungsversuche

Um zu prüfen, ob eine Reifeverzögerung mittels Luft-Ionisation im Labormaßstab umzusetzen ist, wurden Lagerungsversuche in zunächst einem (Probelagerungen) und folgend in zwei miniaturisierten Kühlcontainern (AB Vergleiche) durchgeführt.

Um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Früchte vorzulegen, wurden die Cluster vor Beginn eines jeden Experimentes vermischt. Zudem erfolgten vor, während und nach der Lagerungen Probeentnahmen, so dass jeweils einzelne Bananen von drei bis fünf Clustern zu einer homogenen Probe vermischt wurden. Des Weiteren wurden die Atmungs- und Reifegase, sowie Ozon mittels der eingebauten Sensoren via *Online-Monitoring* (Profi Lab 4.0) detektiert. Eine Regulierung der Atmungsgase wurde mittels aktiver Druckluftzufuhr und dem Öffnen und Schließen der Luftauslassventile und Entnahmeklappe erreicht.

In den Versuchen 3.1.1-3.1.2 wurden Mischgassensoren zur Messung des Ethens herangezogen und in 3.2.7-3.2.8 ein Ethen spezifischer Sensor.

Die einzustellenden und resultierenden Parameter, wie Luftumwälzung, Beladungsmenge, Luftaustausch, sowie Gaskonzentrationen im Containerraum wurden einem Versuchstransport angelehnt, der von der Firma Bioclimatic in Kooperation mit der CMA CGM Gruppe im April/Mai 2011 durchgeführt wurde (Tabelle 12).

Tabelle 12: Darstellung der im Kühlcontainer eingestellten (grau) und aufgenommenen (schwarz) Parameter während des Versuchstransports April/Mai 2011 der Firma Bioclimatic

Parameter	Daten
Containergröße	60 m ³
Bananen	20 t
Luftumwälzung	Bis zu 300 m ³ h ⁻¹
Luftzufuhr	Klappe (auf-zu)
Temperatur	13,5 °C (± 0,7 °C)
O ₂ -Gehalt	15 %
CO ₂ -Gehalt	1500-2000 ppm
O ₃ -Gehalt	0-8 ppb

In den folgenden Tabellen werden die Herkunft der Versuchsbananen, sowie Bedingungen und Parameter der Lagerungsversuche dargestellt.

Tabelle 13: Information zu den einzelnen Parametern und Bedingungen in den Probelagerungen im miniaturisierten Kühlcontainern (C1).

Probe- lagerung	Container	Bananen (kg)	Temperatur (°C)	Luft- umwälzung (m³ h⁻¹)	IS	Corona- Röhren	Gitter- größe	Luftauslass- ventile	Druckluft- zufuhr (mL min⁻¹)	Probe- entnahme- klappe
I	C1	36	13,5 (± 0,7)	50	keine	keine	14 <i>mesh</i>	geschlossen	0	geschlossen
II	C1	36	13,5 (± 0,7)	50	keine	keine	14 <i>mesh</i>	geöffnet	600-900	geschlossen
III	C1	36	13,5 (± 0,7)	50	1	1 Typ C	14 <i>mesh</i>	geöffnet	600-900	geschlossen

Tabelle 14: Information zu den einzelnen Parametern und Bedingungen der simulierten Lagerungen in den miniaturisierten Kühlcontainern (C1 und C2).

AB-Vergleich	Container	Bananen (kg)	Temperatur (°C)	Luftumwälzung (m ³ h ⁻¹)	IS	Corona-Röhren	Gittergröße	Luftauslassventile	Druckluftzufuhr (mL min ⁻¹)	Klappe
I	C1	18	13,5 (± 0,7)	50	1	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	geöffnet	Bis 5000	geöffnet/geschlossen
	C2	18	13,5 (± 0,7)	50	keine	keine	keine	geöffnet	Bis 5000	geöffnet/geschlossen
II	C1	18	21 (± 1)	50 + 0	1	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	geschlossen	0	geschlossen
	C2	18	21 (± 1)	50	keine	keine	keine	geschlossen	0	geschlossen
III	C1	18	21 (± 1)	keine	keine	keine	keine	geöffnet	0	geschlossen
	C2	18	21 (± 1)	keine	1	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	geöffnet	0	geschlossen
IV	C1	18	21 (± 1)	50	keine	keine	keine	geöffnet	0	geschlossen
	C2	18	21 (± 1)	50	1	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	geöffnet	0	geschlossen
V	C1	18	21 (± 1)	50	keine	keine	keine	geöffnet	0	geschlossen
	C2	18	21 (± 1)	50	keine	keine	keine	geöffnet	0	geschlossen
VI	C1	18	21 (± 1)	50	keine	keine	keine	geöffnet	0	geschlossen
	C2	18	21 (± 1)	50	keine	keine	keine	geöffnet	0	geschlossen
VII	C1	18	21 (± 1)	50	1-3	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	geöffnet	0	geschlossen
	C2	18	21 (± 1)	50	keine	keine	keine	geöffnet	0	geschlossen
VIII	C1	18	13,5 (± 0,7)	50	1-3	3 Typ B	40 <i>mesh</i>	geöffnet	Bis 400	geöffnet/geschlossen
	C2	18	13,5 (± 0,7)	50	keine	keine	keine	geöffnet	Bis 400	geöffnet/geschlossen
	Labor	18	21 (± 1)	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 15: Eckdaten zu den Versuchsbananen (*Musa x paradisiaca*) welche jeweils in den Kühlcontainern C1 und C2 oder im Labor gelagert und untersucht wurden.

Versuch	Herkunft	Reifegrad	Marke	Zeitfenster
Probelagerung I	Ecuador	2	Calypso	4 Wochen (Schiff) 5 Tage (Großmarkt)
Probelagerung II	Kolumbien	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 1 Tag (Großmarkt)
Probelagerung III	Kolumbien	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 1 Tag (Großmarkt)
AB-Vergleich I	Costa Rica	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 5 Tage (Großmarkt)
AB-Vergleich II	Kolumbien	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 5 Tage (Großmarkt)
AB-Vergleich III	Kolumbien	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 3 Tage (Großmarkt)
AB-Vergleich IV	Kolumbien	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 5 Tage (Großmarkt)
AB-Vergleich V	Costa Rica	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 1 Tage (Großmarkt)
AB-Vergleich VI	Costa Rica	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 5 Tage (Großmarkt)
AB-Vergleich VII	Costa Rica	2-3	Turbana	4 Wochen (Schiff) 5 Tage (Großmarkt)
AB-Vergleich VIII	Karibik	2	Banane de Guadeloupe & Martinique	35 Stunden (Plantage → Labor)

2.7 Extraktions- und Analysemethoden

Neben den Lagerungsversuchen wurden im Laufe der Arbeit Methoden etabliert, welche den analytischen Nachweis des Reifegrades anhand von Reifeparametern, z.B. gebildete Aromastoffe, Zuckergehalt u.a., ermöglichen.

2.7.1 Isolierung und Identifizierung der Gesamtaromastoffe von Bananen

Die flüchtigen Substanzen der Banane wurden durch kontinuierliche Flüssig-flüssig-Extraktion gewonnen. Hierfür wurden 100 g Bananenprobe mit 400 mL MeOH und 1 mL Undecansäuremethylester als internen Standard versetzt ($250 \mu\text{g mL}^{-1}$ Diethylether), homogenisiert und anschließend bei $5 \text{ }^\circ\text{C}$ und 3000 g zentrifugiert. Die Überstände wurden jeweils in eine Flüssig/flüssig-Extraktionsapparatur überführt und mit NaCl 15 % [v/v] auf ein Volumen von 1000 mL verdünnt. Die Extraktionen erfolgten bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$ mit 250 mL P/E [Verhältnis 1:1,12 (v/v)] über zwölf Stunden. Anschließend wurden die Extrakte mit VE-Wasser re-extrahiert, die organische Phase über Na_2SO_4 getrocknet, an einer *Vigreux*-Kolonnen (Wasserbadtemperatur $40 \text{ }^\circ\text{C}$) auf 1 mL eingengt und abschließend mit $100 \mu\text{L}$ Decansäuremethylester als externem Standard ($2500 \mu\text{g mL}^{-1}$ Methanol) versetzt.

Um eine bestmögliche Chromatografie zu erzielen, wurden jeweils $500 \mu\text{L}$ eines Extrakts über eine Kieselgel-Fraktionierung aufgetrennt. Das Kieselgel wird durch Trocknung ($150 \text{ }^\circ\text{C}$, 24 h) und anschließende definierte Wasserzugabe von 4,5 % ($4,5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ getr. Kieselgel) exakt auf die Aktivitätsstufe II-III nach Brockmann [23] eingestellt. Die Homogenisierung erfolgte durch Rotation (12 h). Anschließend wurden 22 g des Kieselgels mit Pentan in eine Glassäule gespült. Die Fraktionierungen erfolgten mit einer Flussrate von max. 5 mL min^{-1} unter steigender Polarität mit 200 mL Eluent. Fraktion 1 wurde mit P/E (9:1), Fraktion 2 mit P/E (3:1) und Fraktion 3 mit Diethylether eluiert. Anschließend wurden die Fraktionen mit Na_2SO_4 getrocknet, an einer *Vigreux*-Kolonnen (Wasserbadtemperatur $40 \text{ }^\circ\text{C}$) auf 1 mL eingengt und mit $100 \mu\text{L}$ Decansäuremethylester als externem Standard ($2500 \mu\text{g mL}^{-1}$ Methanol) versetzt.

Die Bananenextrakte und Fraktionen wurden mittels GC-FID analysiert und quantifiziert. Die Identifikation erfolgte mittels GC-MS. Zudem wurde jede Fraktion um den Faktor 100 verdünnt und ebenfalls vermessen.

In den folgenden Tabellen sind die Geräteparameter der genutzten Gaschromatografen aufgelistet.

Tabelle 16: GC-FID, polare stationärer Phase

Gaschromatograf:	Agilent 7890
Säule:	Optima Wax; Länge: 30 m; Filmdicke: 0,25 μm ; ID: 0,32 mm (<i>Macherey & Nagel</i>)
Temperaturprogramm:	40 °C (3 min) // 3 °C min^{-1} // 150 °C (0 min) // 5 °C min^{-1} // 230 °C (5 min)
Trägergas:	Wasserstoff, 2 mL min^{-1}
Injektionsart:	<i>on column</i>
Injektionsvolumen:	1 μL

Tabelle 17: GC-FID, unpolare stationäre Phase

Gaschromatograf:	Sato
Säule:	DB-5; Länge: 30 m; Filmdicke: 0,25 μm ; ID: 0,32 mm (<i>Macherey & Nagel</i>)
Temperaturprogramm:	40 °C (3 min) // 3 °C min^{-1} // 150 °C (0 min) // 5 °C min^{-1} // 230 °C (5 min) // 10 °C min^{-1} // 325 °C (10 min)
Trägergas:	Wasserstoff, 2 mL min^{-1}
Injektionsart:	<i>on column</i>
Injektionsvolumen:	1 μL

Tabelle 18: GC-MS, polare stationäre Phase

Gaschromatograf:	GC 8000, <i>Fisons Instruments</i>
MS:	MD 800 (single quadrupol MS), <i>Fisons Instruments</i> Interface: 230 °C, Ionenquelle: 200 °C, Quadrupol: 100 °C, Elektron <i>impact</i> Ionisation 70 eV, Scan range m/z 33 to 300 amu
Säule:	Optima Wax; Länge: 30 m; Filmdicke: 0,25 μm ; ID: 0,32 mm (<i>Macherey & Nagel</i>)
Temperaturprogramm:	40 °C (3 min) // 3 °C min^{-1} // 150 °C (0 min) // 5 °C min^{-1} // 230 °C (5 min)
Trägergas:	Helium, 2 mL min^{-1}
Injektionsart:	<i>on column</i>
Injektionsvolumen:	1 μL

Tabelle 19: GC-MS, unpolare stationäre Phase

Gaschromatograf:	GC 8000, <i>Fisons</i> Instruments
Detektor:	MD 800 (single quadrupol MS), <i>Fisons</i> Instruments Interface: 230 °C, Ionenquelle: 200 °C, Quadrupol: 100 °C, Elektron <i>impact</i> Ionisation 70 eV, Scan <i>range</i> m/z 33 to 300 amu
Säule:	VF Wax MS; Länge: 30 m; Filmdicke: 0,25 µm; ID: 0,32 mm (<i>Macherey & Nagel</i>)
Temperaturprogramm:	40 °C (3 min) // 3 °C min ⁻¹ // 150 °C (0 min) // 5 °C min // 230 °C (5 min) // 10°C min ⁻¹ // 325 °C (10 min)
Trägergas:	Helium, 2 mL min ⁻¹
Injektionsart:	<i>on column</i>
Injektionsvolumen:	1 µL

2.7.2 Isolierung und Identifizierung der flüchtigen Aromastoffe im Luftraum des miniaturisierten Kühlcontainers

Die *Headspace*- Probeentnahme erfolgte mittels *Purge & Trap* [24], welche den Nachweis der Bildung von typischen Bananenaromastoffen [25], sowie von *off-flavours* (GC-O) beinhaltete. Es wurden 5 NL (Normliter) unter konstantem volumetrischen Fluß von 0,2 L min⁻¹, mit einem Gasprobennehmer (*Desaga*), auf Desorptionsröhrchen (*Gerstel*) ,gefüllt mit *TenaxTM 60/80 mesh*, gezogen. Die Tenaxproben wurden direkt analysiert oder zur Aufbewahrung mit Verschlusskappen (*Swagelog*) verschlossen und bei 4-8 °C bis zur Analyse gelagert. Die Proben wurden wie folgt mittels TDS-GC-MS (*Gerstel*) oder mittels TDS-GC-FID (*Gerstel*) analysiert und identifiziert. Die Identifizierung der Aromastoffe erfolgte anhand der RI und Vergleich der Massenspektren mit MS-Datenbanken (Wiley, NIST). Die Anwendung des FID wurde aufgrund eines Defekts der MS mit herangezogen. Da über die Detektion am FID keine Identifizierung über eine Datenbank möglich ist, wurde das Ethansäure-(3-methyl)butylester als Standard zur Identifizierung herangezogen.

Tabelle 20: TDS-GC-FID

GC:	<i>Agilent GC 6890</i>
Säule:	DB-5; Länge: 30 m; ID: 0,25 μm ; A: 0,32 mm
Temperaturprogramm:	40 °C (3min) // 3 °C min^{-1} // 150 °C // 25 °C min^{-1} // 325 °C (5 min)
Trägergas:	Wasserstoff, 2 mL min^{-1}
Injektionsart:	TDS-KAS
Temperaturprogramm:	TDS: 20 °C // 60 °C min^{-1} // 250 °C (5 min) KAS: -10 °C // 12 °C min^{-1} // 230 °C (3 min)

Tabelle 21: TDS-GC-MS

GC:	<i>Varian CP-3800</i>
MS:	<i>Varian 320 Triple Quadrupol MS</i> Interface: 230 °C, Ionenquelle: 200 °C, Quadrupol: 100 °C, Elektron <i>impact</i> Ionisation 70 eV, Scan range m/z 33 to 300 amu
Säule:	DB-5ms; Länge: 30 m; ID: 0,25 μm ; A: 0,25 mm
Temperaturprogramm:	40 °C (3min) // 3 °C min^{-1} // 150 °C // 25 °C min^{-1} // 325 °C (5 min)
Trägergas:	Helium, 2 mL min^{-1}
Injektionsart:	TDS-KAS
Temperaturprogramm:	TDS: 20 °C // 60 °C min^{-1} // 250 °C (5 min) KAS: -10 °C // 12 °C min^{-1} // 230 °C (3 min)

2.7.3 Zuckereextraktion und enzymatischer Assay zur Bestimmung der Gesamtzucker (Glucose-, Fructose- und Saccharose)

Zur Extraktion der Zucker wurden ungefähr 50 g Bananen in 200 mL Methanol 60 % [v/v] homogenisiert und bei 3000 g zentrifugiert. Der Überstand wurde abgenommen und bei -20 °C bis zur weiteren Anwendung gelagert. Die Bestimmung der Zucker erfolgte enzymatisch mittels eines Assay Kits (*Megazym*), welcher im Mikrotitermaßstab (Faktor zehn minimiert) durchgeführt und über eine Kalibrierfunktion quantifiziert wurde. Die folgende Abbildung zeigt die Kalibrierfunktionen zur Bestimmung der Zuckerkonzentrationen. Falls erforderlich, wurden die Proben verdünnt.

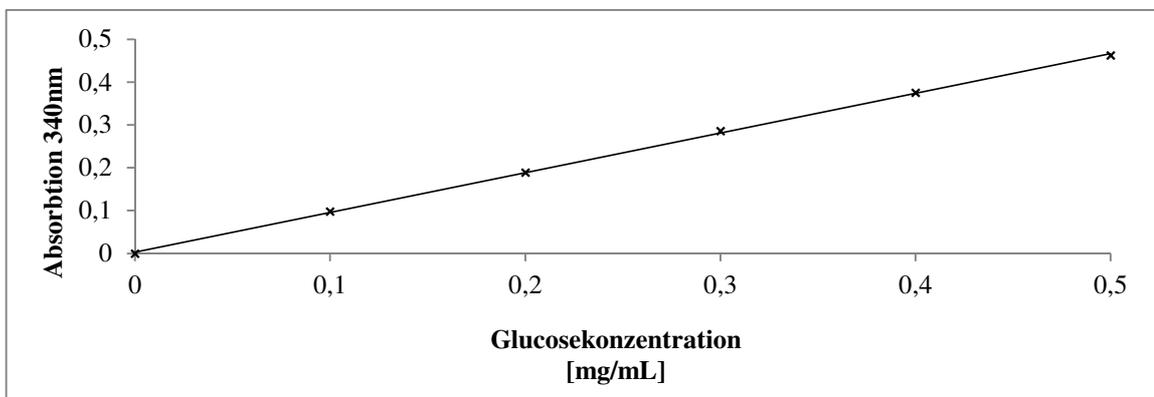


Abbildung 4: Kalibriergerade – Glucose ($y = 0.9263x + 0.0036$, $R^2 = 0.9996$)

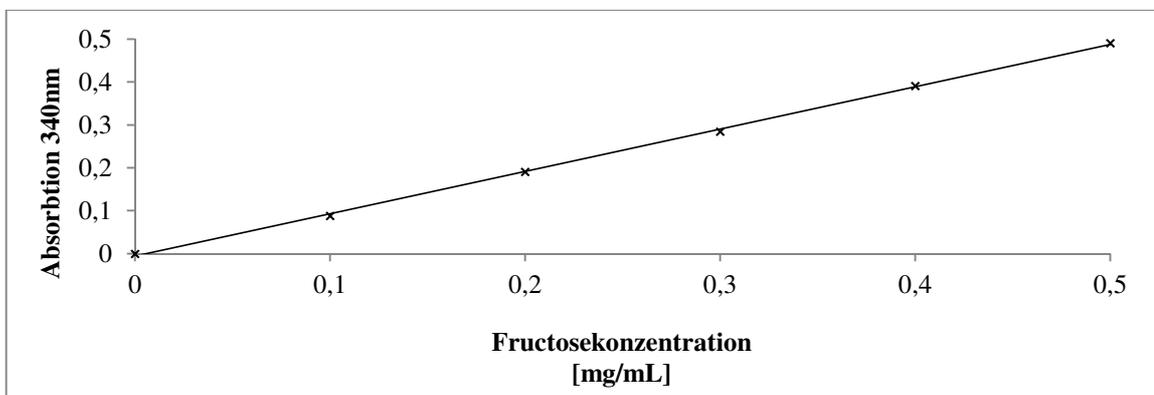


Abbildung 5: Kalibriergerade – Fructose ($y = 0.988x - 0.0058$, $R^2 = 0.9994$)

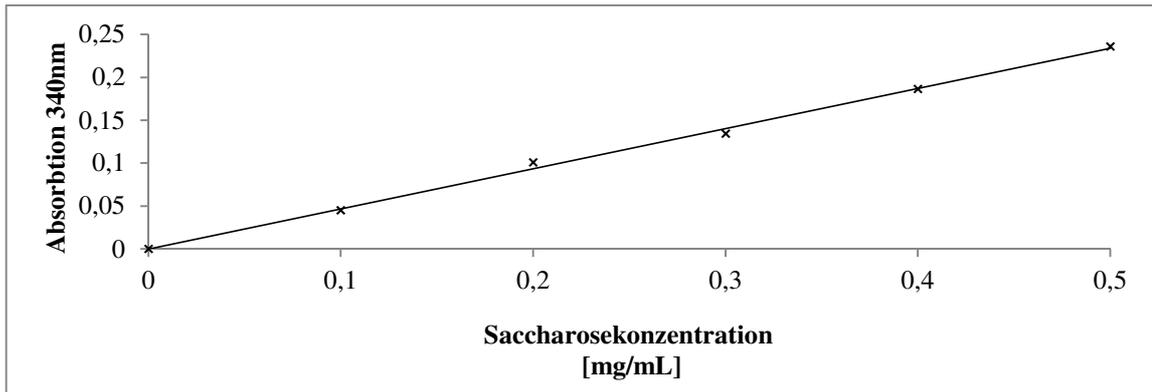


Abbildung 6: Kalibriergerade - Saccharose ($y = 0.468x + 0.0002$, $R^2 = 0.9975$)

2.7.4 Reifegradbestimmung anhand der visuellen Beurteilung

Der Reifefortschritt der Bananen während der Lagerungen wurde fotografisch dokumentiert. Zur Bestimmung des Reifegrades wurde eine Reife-Farbskala, welche in Abbildung 7 dargestellt ist, herangezogen.



Abbildung 7: Darstellung des Reifegrades von Bananen anhand der Farbgebung [26].

2.8 Prüfung der Vergleichbarkeit der Bananenchargen und Container

Um zu überprüfen, ob Reifeverzögerungen auf unterschiedliche Reifestadien der Bananen zurückzuführen waren, sind zwei Bananenchargen vom Großmarkt (Tabelle 22) in den Containern eingelagert worden. Nach 24 h wurden die Bananen, die in C1 gelagert waren, mit den aus C2 vertauscht und die Atmungsaktivität anhand des CO₂ Gehalts beobachtet. Sollte ein unterschiedlicher Anstieg in den Containern bei einem Wechsel der Bananenchargen von C1 zu C2 zu beobachten sein, wäre dies ein Indiz für die unterschiedlichen Atmungsaktivitäten der Bananen und somit auch ein Indiz für einen Unterschied im Reifefortschritt der einzelnen Chargen. Im anderen Fall würde dies auf unterschiedliche (Belüftungs-) Bedingungen in den Containern hinweisen.

Tabelle 22: Angaben zu den Versuchsbananen

Herkunft	Reifegrad	Marke	Zeitfenster
Kolumbien	2	Turbana	4 Wochen (Schiff) 5 Tage (Großmarkt)

Um die Containervergleichbarkeit zu überprüfen, wurde Stickstoff in die Kühlcontainer bis zum Erreichen einer Sauerstoffkonzentration von 10 % [v/v] eingeleitet. Es wurde der Zeitraum bis zum Erreichen der normalen Luftsauerstoffkonzentration von 22 % [v/v] gemessen. Nachfolgend konnte durch Justierung der Luftauslassventile an den Containern eine identische Belüftungsrate eingestellt werden.

3. ERGEBNISSE

3.1 Probelagerungen zur Ermittlung von Eckdaten

Um Basisdaten für die angestrebten Lagerungsversuche zu erhalten, wurden nach Bau des C1 Bananen zunächst unter drei unterschiedlichen Aspekten gelagert. Zum einen wurden im Container Sauerstoffzehrung und Kohlendioxidbildung ohne Einflussnahme von außen bei reifenden Bananen verfolgt, zum anderen wurde die Luftzusammensetzung während der Lagerung mithilfe von Druckluft aktiv reguliert. Zuletzt wurde erstmalig der Einfluss von Ionisation auf die Lagerung von Bananen untersucht.

3.1.1 Lagerungsversuch im miniaturisierten Kühlcontainer – Probelagerung I

In diesem Versuch wurden Ab- und Zunahme der Atmungs- und Reifegase bei unkontrollierter Lagerung verfolgt (Material und Methoden, Tabelle 13). Die folgenden Abbildungen zeigen die Konzentrationsverläufe der entsprechenden Gase (Abbildung 8) sowie die dazugehörigen Fotoaufnahmen der Bananen (Abbildung 9) der ersten simulierten Probelagerung im miniaturisierten Kühlcontainer.

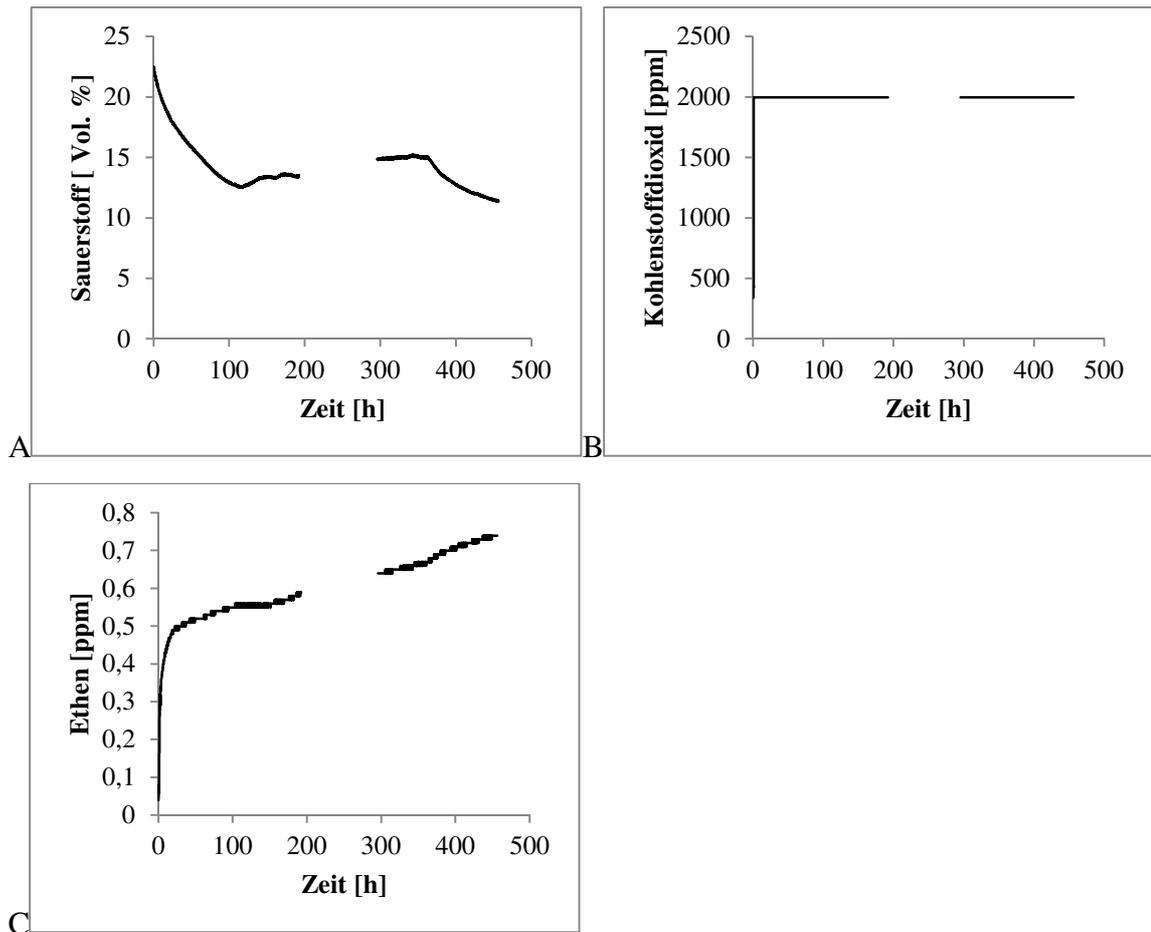


Abbildung 8: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-C), während der ersten simulierten Probelagerung in C1. Die Lagerung erfolgte 21 Tage mit einer Fracht von 36 kg *Calypso* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C ohne aktive Luftzufuhr und geschlossenem Auslassventil. Aufgrund eines Softwarefehlers konnten für den Zeitraum von 192 bis 295 Stunden keine Daten ermittelt werden.



Abbildung 9: Darstellung des Reifefortschritts der Versuchsbananen innerhalb (Tag 0, 12 und 21; A-C) und außerhalb (Kontrollbananen, Tag 0, 12 und 21; D-F) des miniaturisierten Kühlcontainers während der ersten simulierten Probelagerung. Die Lagerung erfolgte 21 Tage mit einer Fracht von 36 kg unreifen *Calypso* Bananen bei 13,5 °C ohne aktiver Luftzufuhr und geschlossenem Auslassventil.

Die CO₂ und O₂ Konzentrationen im Container zeigten den typischen und erwarteten Verlauf bei aktiver Reifung der Früchte: O₂ wurde verbraucht und CO₂ produziert. Zusätzlich bildet sich im Zuge der Atmung das Reifegas Ethen, welches autokatalysierend auf die Fruchtreifung wirkt. Der Anstieg des CO₂-Gehaltes konnte aufgrund des Messbereiches des Sensors (bis 2000 ppm) nicht vollständig erfasst werden. Der O₂ Gehalt sank bis Ende der Lagerung auf elf Volumenprozent. Ein starker Anstieg von Ethen (bis 0,5 ppm) konnte innerhalb der ersten 24 Stunden gemessen werden, danach kam es zu einem langsameren Anstieg (0,24 ppm in 400 Stunden) bis zu Endkonzentration von 0,74 ppm. Die klimakterische Phase wird in Bananen bei einer Ethenkonzentration von >0,1 ppm [4] ausgelöst. Der hier im miniaturisierten Container gemessene Wert beim Reifebeginn von 0,6 ppm lag somit über dem aus der Literatur bekannten Wert. Dies kann womöglich auf den eingebauten Mischgassensor zurückzuführen sein, der nicht spezifisch auf Ethen reagiert. Zudem blieb unklar, warum im Zeitraum der pre-klimakterischen Phase (0-150 Stunden) ein starker O₂ Verbrauch zu verzeichnen war und zum Zeitpunkt der Reifung ein minimaler Anstieg messbar war.

Die Farbveränderung der Bananen mit fortschreitender Lagerung zeigte den deutlichen Fortschritt der Reifung (Abbildung 9). Die Reifung der Bananen im Container setzte zwischen den Tagen acht bis zehn ein; zu diesem Zeitpunkt wurde ein Ethenwert von 0,6 ppm im miniaturisierten Kühlcontainer gemessen. Nach 21 Tagen im Container wurden alle Bananen mit einem Reifegrad von 6-7 eingestuft.

3.1.2 Lagerungsversuch im miniaturisierten Kühlcontainer – Probelagerung II

Im zweiten Versuch wurde die Luftzusammensetzung während der Lagerung mithilfe von Druckluft aktiv gesteuert (Material und Methoden, Tabelle 13). Die folgenden Abbildungen zeigen die Bildungskinetik (Abbildung 10), sowie die Fotoaufnahmen der Bananen (Abbildung 11) während der zweiten simulierten Probelagerung im miniaturisierten Kühlcontainer.

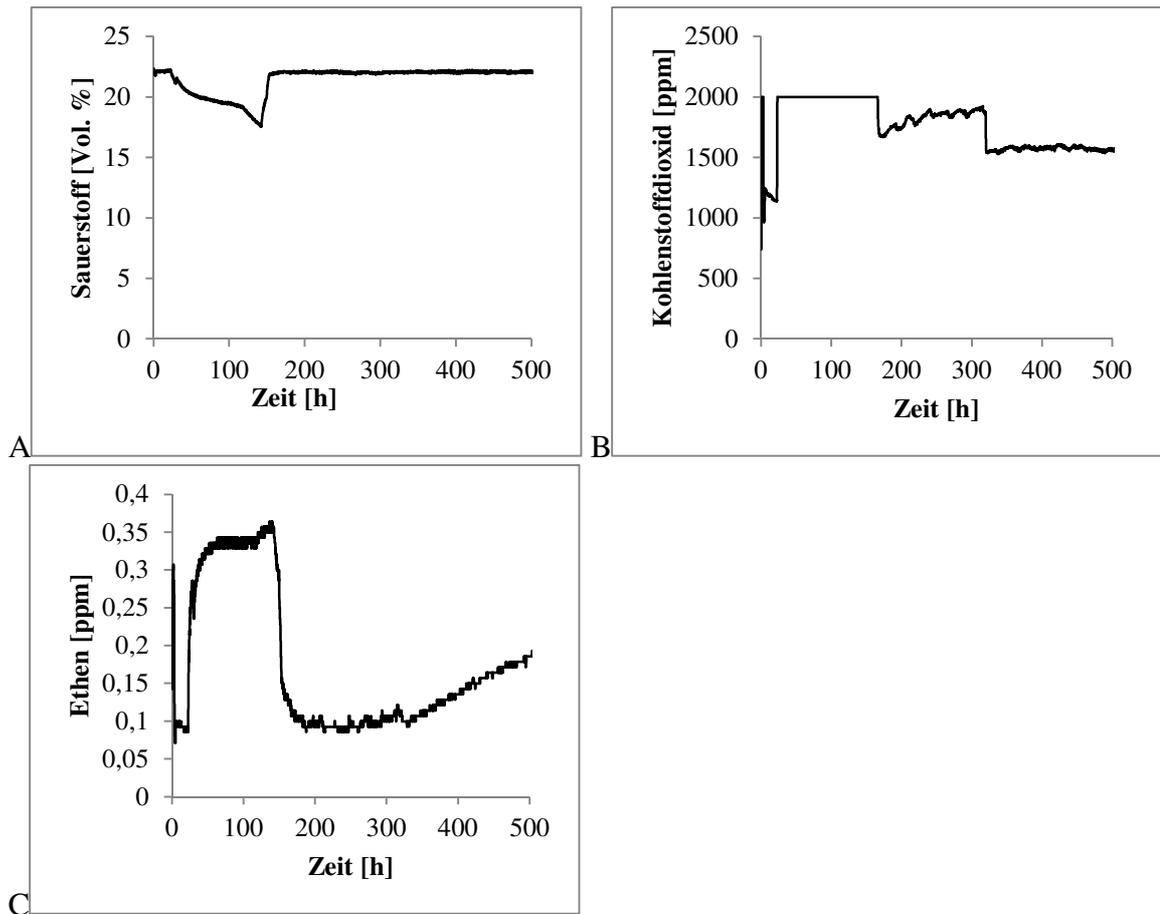


Abbildung 10: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-C), während der zweiten simulierten Probelagerung in C1 Die Lagerung erfolgte 21 Tage mit einer Fracht von 36 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr (600-900 mL min⁻¹) und offenem Auslassventil.

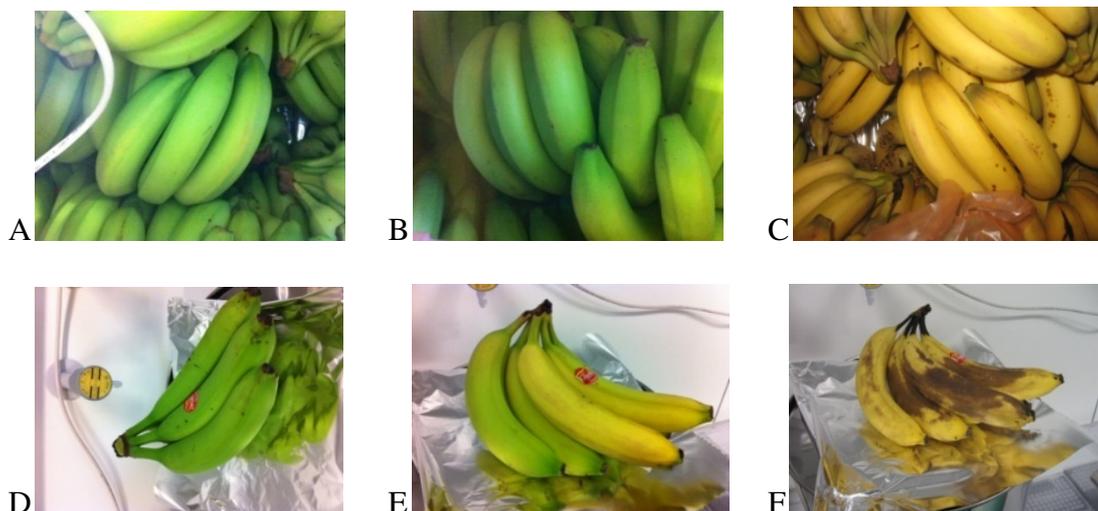


Abbildung 11: Reifefortschritt der Versuchsbananen innerhalb (Tag 0, 12 und 21; A-C) und Kontrollbananen außerhalb (Tag 0, 12 und 21; D-F), selbiger Charge, des miniaturisierten Kühlcontainers, während der zweiten simulierten Probelagerung in C1 Die Lagerung erfolgte 21 Tage mit einer Fracht von 36 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr (600-900 mL min⁻¹) und offenem Auslassventil.

Dieser Versuch zeigte, dass eine simultane Regulierung der O₂- und CO₂-Konzentrationen, anlehnend an die Daten des Großmaßstabversuchs (2. Material und Methoden, Tabelle 12), im Kühlcontainer mit der Druckluft schwierig zu bewerkstelligen war. Sobald Druckluft zugeführt wurde, war eine O₂ Konzentration von 21 % [v/v] festzustellen, die den Gehalt in der Luft widerspiegelt. Möglich ist eine Regulierung des CO₂ Gehalts im angestrebten Bereich von 1500-2000 ppm oder eine Regulierung des O₂ Gehalts im angestrebten Bereich von 15 % [v/v]. Eine parallele Regelung beider Gase war in diesem Fall nicht durchführbar (Abbildung 10). Deutlich wurde auch, dass die gemessenen Ethenkonzentrationen sich allein durch Luftzirkulation um den Faktor drei bis vier minimieren lassen.

Die Reifung der Bananen im Container trat in diesem Versuch an den Tagen 12 bis 16 ein, an denen eine Ethenkonzentration von 0,1 ppm festgestellt werden konnte. Diese Konzentration korreliert mit der Literatur [4]. Nach 21 Tagen im Container wurden alle Bananen mit einem Reifegrad von sechs bis sieben eingestuft. Zudem zeigte die zweite simulierte Lagerung, dass die Kontrolle der Atmosphäre durch aktive Luftzufuhr und Auslassventil, einen Einfluss auf die Reifeverzögerung haben kann. Die Reifung der Bananen trat etwa vier bis sechs Tage später ein als bei den Kontrollproben, die bei 18 °C parallel im Labor gelagert wurden (Abbildung 11).

3.1.3 Lagerungsversuch im miniaturisierten Kühlcontainer – Probelagerung III

In der dritten Probelagerung wurde erstmalig der Einfluss von Ionisation auf die Lagerung von Bananen im Container untersucht (2. Material und Methoden, Tabelle 13).

Um zunächst einen Eindruck über die Ionisationsintensitäten zu gewinnen, wurden diese anhand des dabei parallel gebildeten Ozons im nicht beladenen Container untersucht (2. Material und Methoden, 2.4.1). In Abbildung 12 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

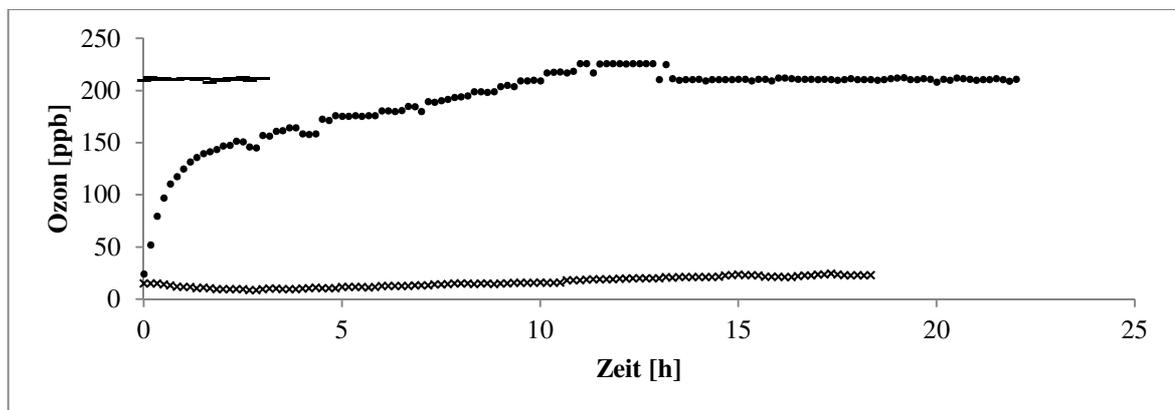


Abbildung 12: Ionisationsintensitäten; als Mess-Richtwert gilt das gebildete Ozon während der Ionisation. In diesem Versuch wurden die IS 1-3 und eine Typ C Röhre herangezogen. Die nächsthöhere Ionisationsstufe wurde eingestellt, sobald kein starker Anstieg an Ozon über eine Zeit von zehn Stunden mehr messbar war. Luftauslassventile waren geöffnet. Luftumwälzung betrug $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. IS 1 (Kreuze), IS 2 (Kreise) und IS 3 (Striche).

Die Messungen zeigten, dass schon mit einer *Corona*-Ionisationsröhre des *Typ C* und einer eingestellten IS 2 die maximal messbare Ozonmenge von 225 ppb im Container erreicht wurde. Im Großmaßstab-Versuch (2. Material und Methoden, Tabelle 12) wurde dauerhaft ein Höchstwert von 8 ppb gemessen. Um diesem Wert nahe zu kommen, wurde für die dritte Probelagerung die IS 1 gewählt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Konzentrationsverläufe der relevanten Gase (Abbildung 13) sowie die Fotoaufnahmen der Bananen (Abbildung 14) während dieser Lagerung im miniaturisierten Kühlcontainer.

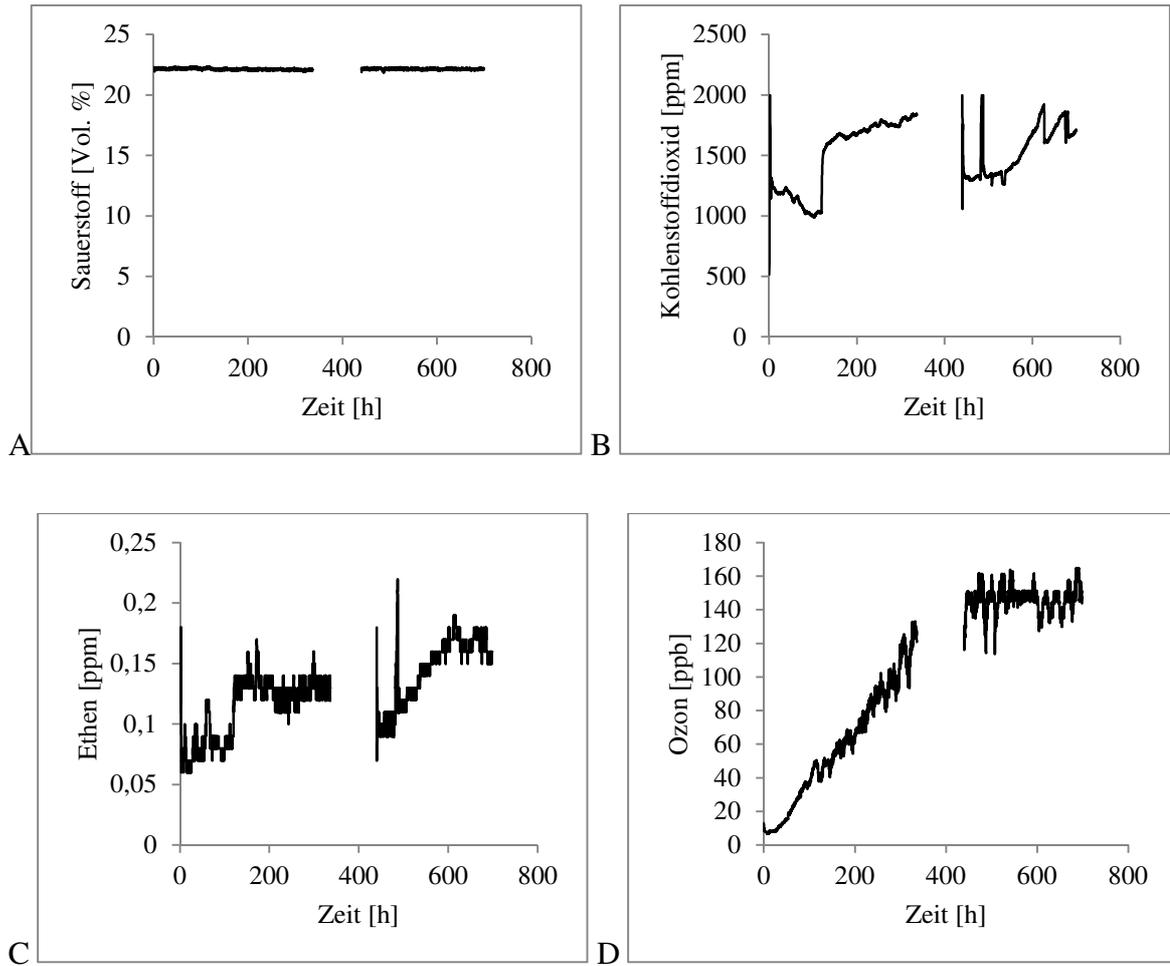


Abbildung 13: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-D) während der dritten simulierten Probelagerung. Die Lagerung erfolgte 29 Tage mit einer Fracht von 36 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr (600-900 mL min⁻¹ Druckluft), offenem Auslassventil und 50 m³ h⁻¹ Luftumwälzung. Die Ionisation erfolgte mit einer *Corona*-Röhre des Typ C und einer eingestellten IS 1. Der Ozonwert gilt hier als Richtwert für die Ionisation. Aufgrund eines Softwarefehlers konnten für den Zeitraum von 330 bis 440 Stunden keine Daten ermittelt werden.

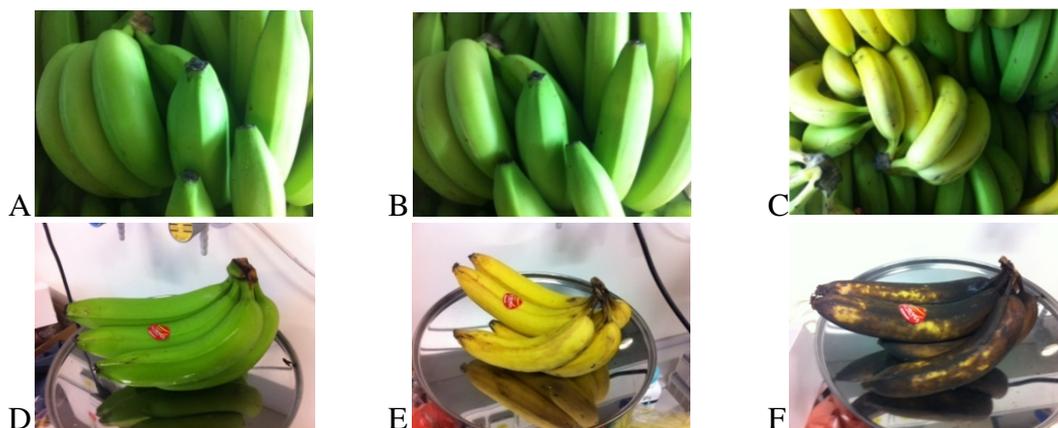


Abbildung 14: Reifefortschritts der Bananen innerhalb (Tag 0, 21 und 29; A-C) und Kontrollbananen außerhalb (Tag 0, 21 und 27; D-F, selbe Charge) des miniaturisierten Kühlcontainers während der dritten simulierten Probelagerung. Die Lagerung erfolgte 29 Tage mit einer Fracht von 36 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr (600-900 mL min⁻¹ Druckluft), offenem Auslassventil und 50 m³ h⁻¹ Luftumwälzung. Die Ionisation erfolgte mit einer *Corona*-Röhre des Typ C und einer eingestellten IS 1. Der Ozonwert gilt hier als Richtwert für die Ionisation. Aufgrund eines Softwarefehlers konnten für den Zeitraum von 330 bis 705 Stunden keine Daten ermittelt werden.

Während dieser Probelagerung wurde die CO₂ Konzentration im Kühlcontainer mit aktiver Druckluftzufuhr auf 1500 bis 2000 ppm geregelt, wohingegen der O₂ Gehalt sich automatisch auf 22 % [v/v] einstellte. Die Ionisationsstärke wurde indirekt über Ozongehalte als Richtwert gemessen. Im Verlauf der dritten Probelagerung wurde ein maximaler Ozonwert von 160 ppb gemessen. Die Reifung der Bananen setzte trotz angewandter Ionisation ab dem Tag 29 ein. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Ethenkonzentration im C1 0,1 ppm, welche mit der Konzentration in Probelagerungsversuch II vergleichbar war.

3.1.4 Vergleich der Probelagerungsversuche anhand analytischer Parameter

Neben der Bestimmung des Reifefortschritts anhand der visuellen Beurteilung wurden die Aromastoffe der Bananen im Container-*Headspace* und der Zuckergehalt der Bananen analysiert.

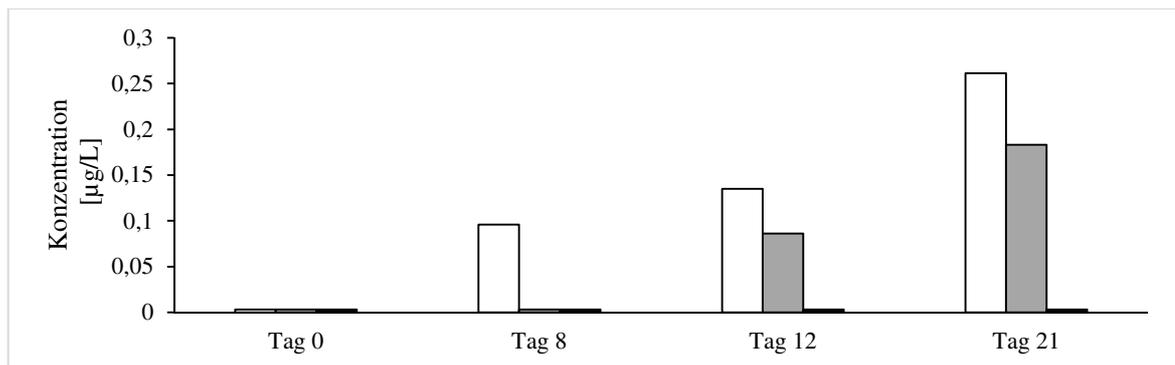


Abbildung 15: Vergleich der Aromastoffbildung im *Headspace* des Kühlcontainers anhand des Bananenschlüsselaromas (Ethansäure-(3-methyl)butylester) aus dem miniaturisierten Container der Probelagerungen I (weiß), II (grau) und-III (schwarz) an Tag 0 und 21.

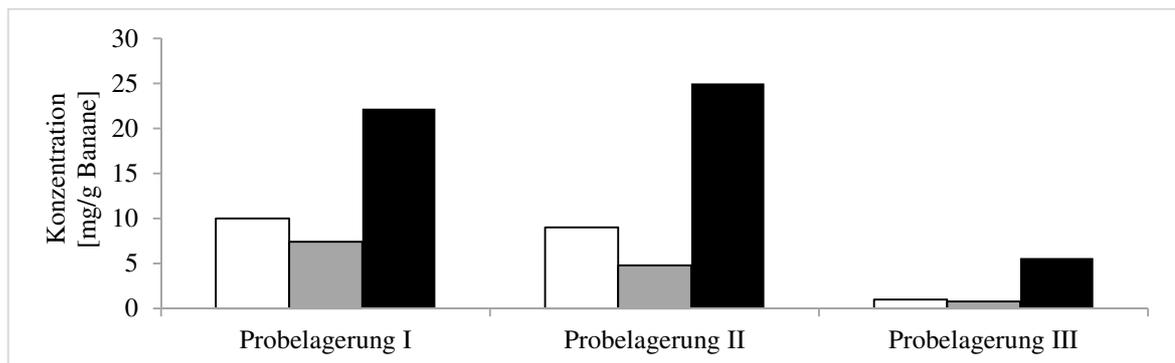


Abbildung 16: Zuckerkonzentrationen (Glucose, Fructose, Saccharose) der Versuchsbanane aus den Probelagerungen an Tag 21. Glucose (weiß), Fructose (grau) und Saccharose (schwarz).

Der Schlüsselaromastoff reifer Bananen, Ethansäure-(3-methyl)butylester [8] konnte in allen drei Versuchen erst nach Eintritt der Reifung nachgewiesen werden. Zudem zeigte

sich, dass nach 21 Tagen Lagerung bei den Bananen, die der Ionisation ausgesetzt waren (Probelagerung III), die Reifung und damit die Ausbildung des typischen Bananenaromas noch nicht erfolgt war (Abbildung 15). Zudem zeigt auch die Bestimmung des Zuckergehalts, dass die nicht gereiften Bananenproben der Probelagerung III gegenüber den beiden anderen Probelagerungen I und II am 21. Tag einen sehr viel geringeren Zuckergehalt aufwiesen (Abbildung 16).

Durch den Einsatz der Ionisation konnte eine Verlängerung der Lagerungszeit erzielt werden. Abweichend zu den Probelagerungsversuchen I und II (Reifegrad 6-7) wurden nach 21 Tagen im Container mit Ionisierung alle Bananen noch mit einem Reifegrad von zwei eingestuft. Summiert man die Verweilzeiten der getesteten Bananen vom Schiffstransport bis zur Beendigung der dritten Lagerung auf, wurden die Bananen insgesamt 8 bis 9 Wochen in ihrer pre-klimakterischen Phase gehalten, bevor die Reifung eintrat. Abweichend zu den Lagerungsversuchen I und II (Reifegrad 6-7) wurden nach 21 Tagen im Container mit Ionisierung alle Bananen noch mit einem Reifegrad von zwei eingestuft. Diese Ergebnisse bekräftigten die Zielsetzung dieser Arbeit. Dennoch muss dies mit Vorsicht betrachtet werden, da die Probelagerungen unabhängig voneinander, sowie mit unterschiedlichen Bananenchargen durchgeführt wurden. Um diese Unwägbarkeiten auszuschließen, wurde in weiteren Versuchen der Fokus auf direkte AB Vergleiche gelegt, die in identisch konstruierten Containern erfolgten.

3.2 Simulierte Lagerungsversuche mittels identischen miniaturisierten Kühlcontainern

Es wurden verschiedene simulierte Lagerungen in direkten AB-Vergleichen bei unterschiedlichen Bedingungen (2. Material und Methoden, Tabelle 14) durchgeführt, um eine Reifeverzögerung von Bananen durch Ionisation zu belegen.

Zunächst wurde ein Lagerversuch bei üblicher Transporttemperatur von 13,5 °C durchgeführt. Des Weiteren folgten Versuche bei Raumtemperatur, um die Lagerzeit zu verkürzen und resultierend in einem kürzeren Zeitfenster die Anzahl der Lagerversuche zu erhöhen und damit mehr Ergebnisse erzielen zu können. Variiert wurde in den Versuchen die Regelung von aktiver Luftzufuhr sowie der Luftumwälzung. Zudem wurden in beiden Containern Experimente ohne Ionisation durchgeführt. Damit sollte die Vergleichbarkeit der beiden Container und die Homogenität der Bananenproben bezüglich ihres Reifegrades zu Versuchsbeginn überprüft werden.

3.2.1 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB Vergleich I

Im ersten AB-Vergleich wurden unreife Bananen aus einer Charge mit und ohne Ionisation in den beiden baugleichen Containern bei 13,5 °C gelagert. Es wurde eine Regulierung des CO₂ Gehalts auf eine maximale Konzentration von ca. 1100 ppm über 2/3 des Lagerzeitraumes in den Containern mittels aktiver Luftzufuhr und dem Öffnen und Schließen der Entnahmeklappe gewährleistet.

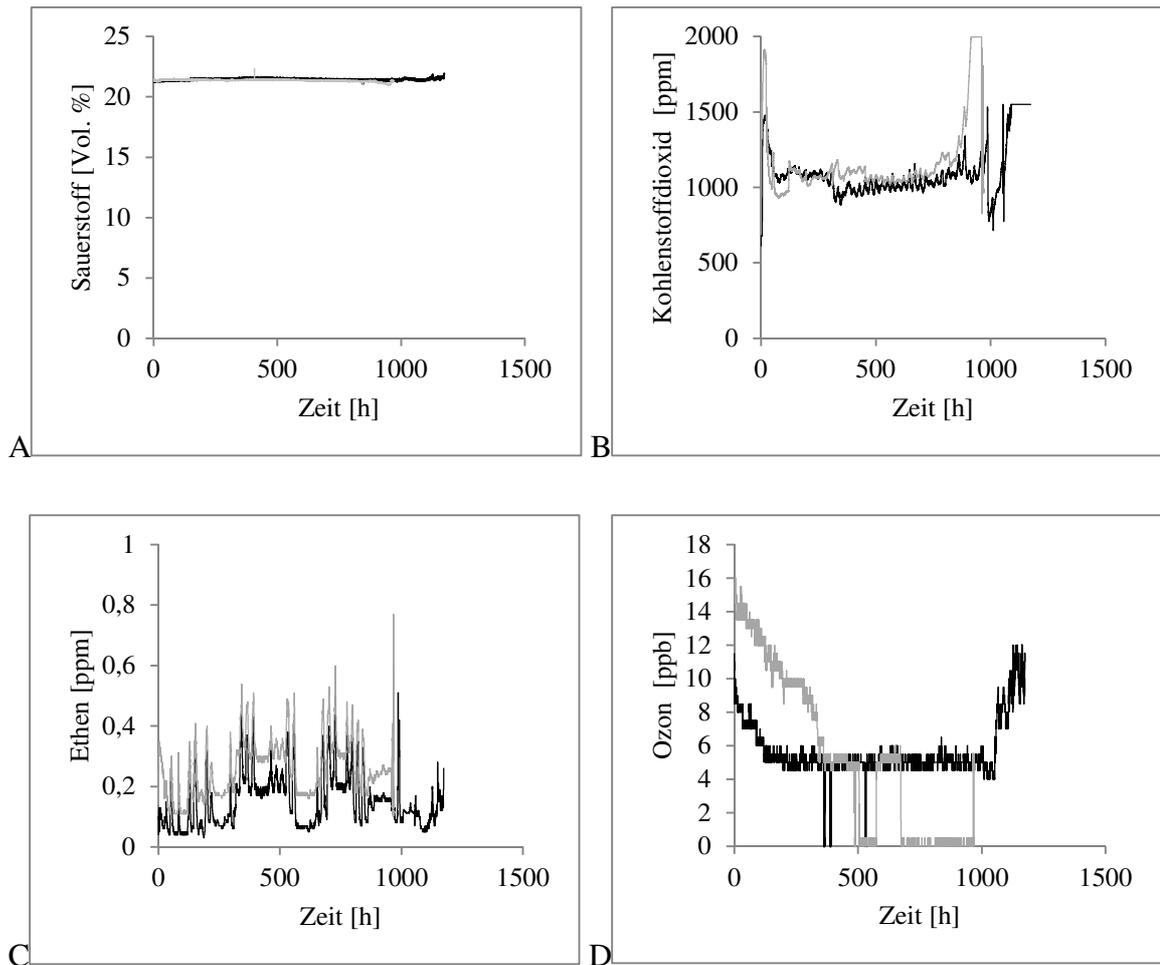


Abbildung 17: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-D), während des ersten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 40 Tage im C2 (grau) ohne Ionisation und 50 Tage im C1 (schwarz) mit Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr.

Der O₂ Gehalt konnte in beiden Containern über die aktive Luftzufuhr bei 22 % [v/v] normaler Luft gehalten werden (Abbildung 17, A). Um einen unerwünschten Anstieg des CO₂ Gehalts (Abbildung 17, B) zu vermeiden und um in beiden Containern einen vergleichbaren Gehalt zu erzielen, musste im Kontrollcontainer deutlich mehr Frischluft zugeführt werden, da hier der Reifeprozess bzw. der Anstieg der Atmung schneller zum Tragen kam. Die Atmungsaktivität war im Container mit Ionisation deutlich geringer und daher war eine Erhöhung der Frischluftzufuhr nicht notwendig. Ursächlich dafür wurde die durch die Ionisation bewirkte Verzögerung der Frucht reife postuliert. Der Sensor für das Ethen zeigte Gehalte im maximalen Messbereich (900 h, entsprechend Lagertag 37) beim Kontrollcontainer und fiel nach Erhöhung der Frischluftzufuhr unverzüglich ab. Diese Entwicklung konnte im Ionisationscontainer (C1) erst zehn Tage später beobachtet werden. Eine kontinuierliche Zunahme des Reifegases (Abbildung 17, C) konnte im Verlauf der

Lagerung jedoch nicht beobachtet werden. Dies ist auf die aktive Luftzufuhr zurückzuführen, die ein kontinuierliches Ausblasen des Gases aus dem Container bewirkte. Der Ozongehalt (Abbildung 17, D) im C1 lag in einem messbaren Bereich unter den üblich in der Laborluft gemessenen Werten. Nach einer Lagerdauer von 50 Tagen wurde ein Höchstwert von 12 ppb gemessen. Dies zeigt, dass während der Lagerung eine Ionenbildung erfolgte, die jedoch so niedrig war, dass es nicht zur Bildung höherer Ozonkonzentrationen kam. Auch im C2, der ohne Ionisation gefahren wurde, wurde der Ozongehalt mit aufgenommen. Hier lagen zu Beginn 15 ppb vor, und im Laufe der Lagerzeit konnte eine Abnahme beobachtet werden, die auf Reaktionen des Ozons mit anderen Gasmolekülen sowie Oberflächen (z.B. Bananen) im Container zurückzuführen waren und die nicht durch die Belüftung kompensiert wurden.



Abbildung 18: Darstellung des Reifefortschritts der Versuchsbananen in C1 (A und B) und C2 (C) während des ersten AB-Vergleichs. Die Lagerung erfolgte 40 Tage im C2 ohne Ionisation und 50 Tage im C1 mit Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr.

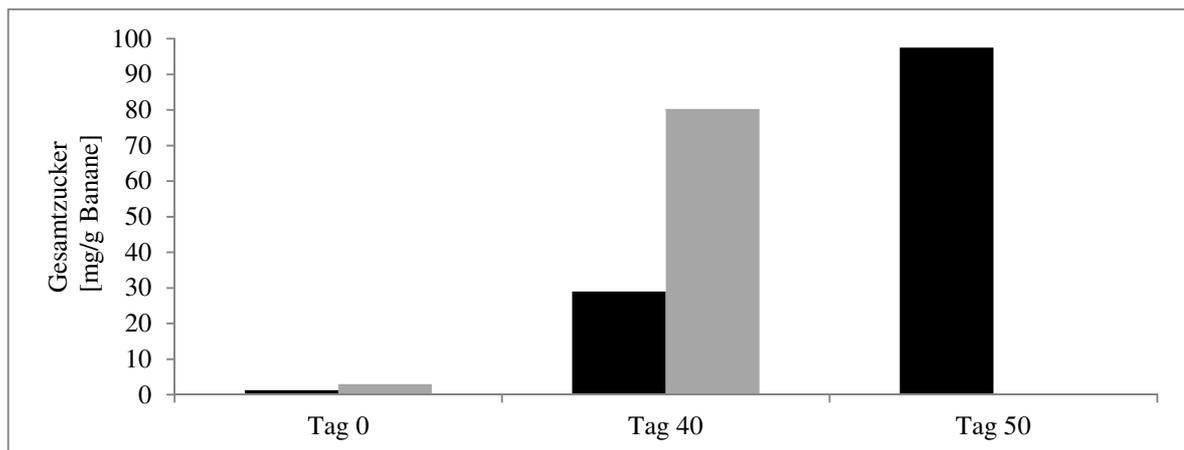


Abbildung 19: Gesamtzuckergehalt der Bananen während des ersten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 40 Tage im C2 (grau) ohne Ionisation und 50 Tage im C1 (schwarz) mit Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr.

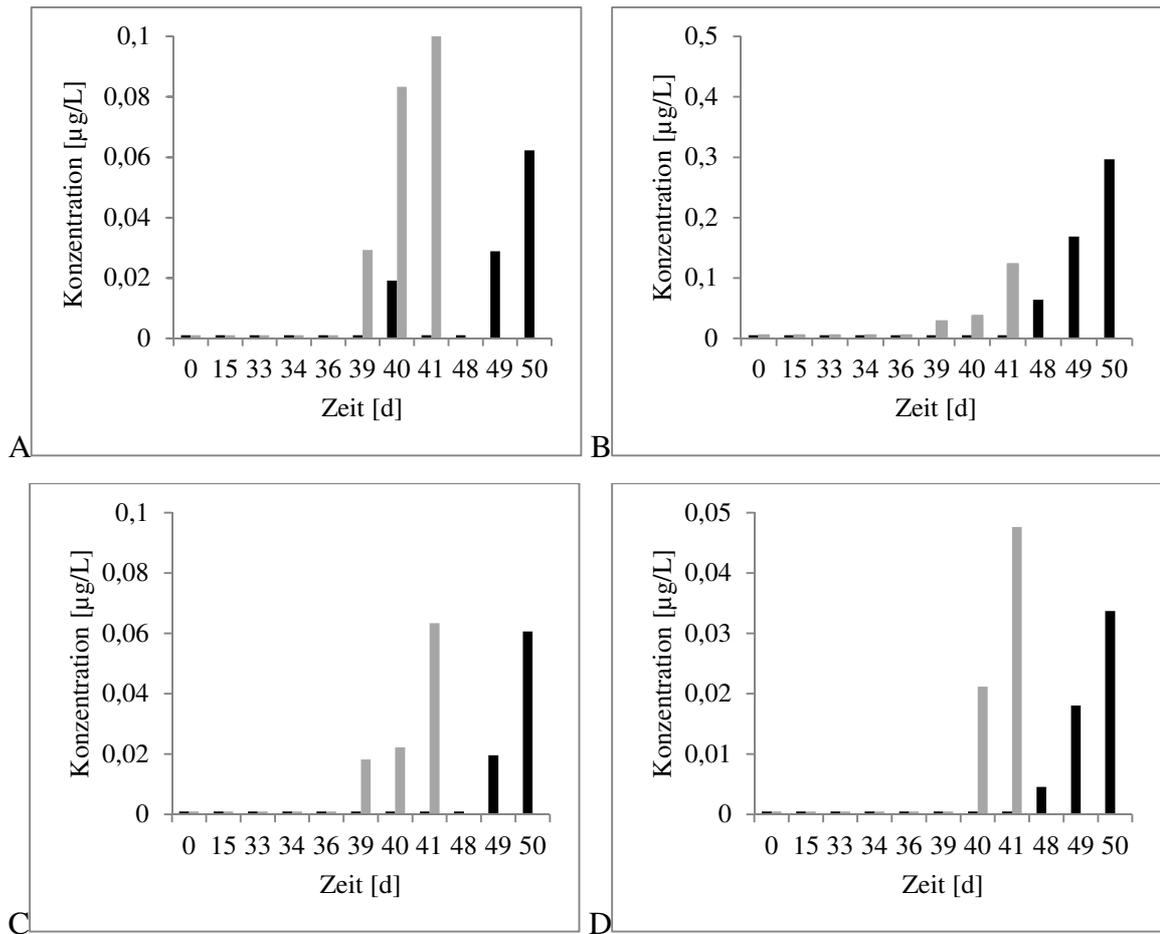


Abbildung 20: Gehalte ausgewählter Aromastoffe während des ersten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 40 Tage im C2 (grau) ohne Ionisation und 50 Tage im C1 (schwarz) mit Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr. A: Ethansäure-(3-methyl)butylester, B: 2-Pentanol, C: 3-Methyl-1-Butanol, D: Ethansäurebutylester

Anhand der analytischen Parameter und farblichen Veränderung konnte eine Reifeverzögerung der Bananen von zehn Tagen belegt werden. Eine Verfärbung der Früchte von grün zu gelb trat an Tag 40 im Container ohne Ionisation und an Tag 50 im Container mit Ionisation auf (Abbildung 18). Zudem zeigten die Messungen des Gesamtzuckergehalts, dass die Fruchtreifung im Container ohne Ionisation an Tag 40 weiter fortgeschritten war. Hier konnten 50 mg Gesamtzucker pro g TM mehr gemessen werden (Abbildung 19). Somit setzte die Stärkeumwandlung in Zucker schon vor der Farbveränderung ein. Messbare Konzentrationen typischer Aromastoffe (Abbildung 20) der Banane konnten bereits an Tag 39 im Kontrollcontainer gemessen werden, wohingegen im Container mit Ionisation diese erst an Tag 49 nachzuweisen waren.

3.2.2 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich II

Im zweiten AB-Vergleich wurden unreife Bananen aus einer Charge mit und ohne Luft-Ionisation in den beiden baugleichen Containern bei Raumtemperatur gelagert. Es wurde auf eine Regulierung des CO₂ Gehalts in den Containern verzichtet. Aufgrund eines Experiments, in dem ein Stromausfall einen Abbruch einer Lagerung zur Folge hatte, war eine Reifung schon nach drei Tagen aufgetreten. Aus diesem Grund wurde in diesem Experiment erprobt, ob mit dem Abschalten der Ventilation, hier an Tag neun in C1, eine schnellere Reifung eingeleitet wird.

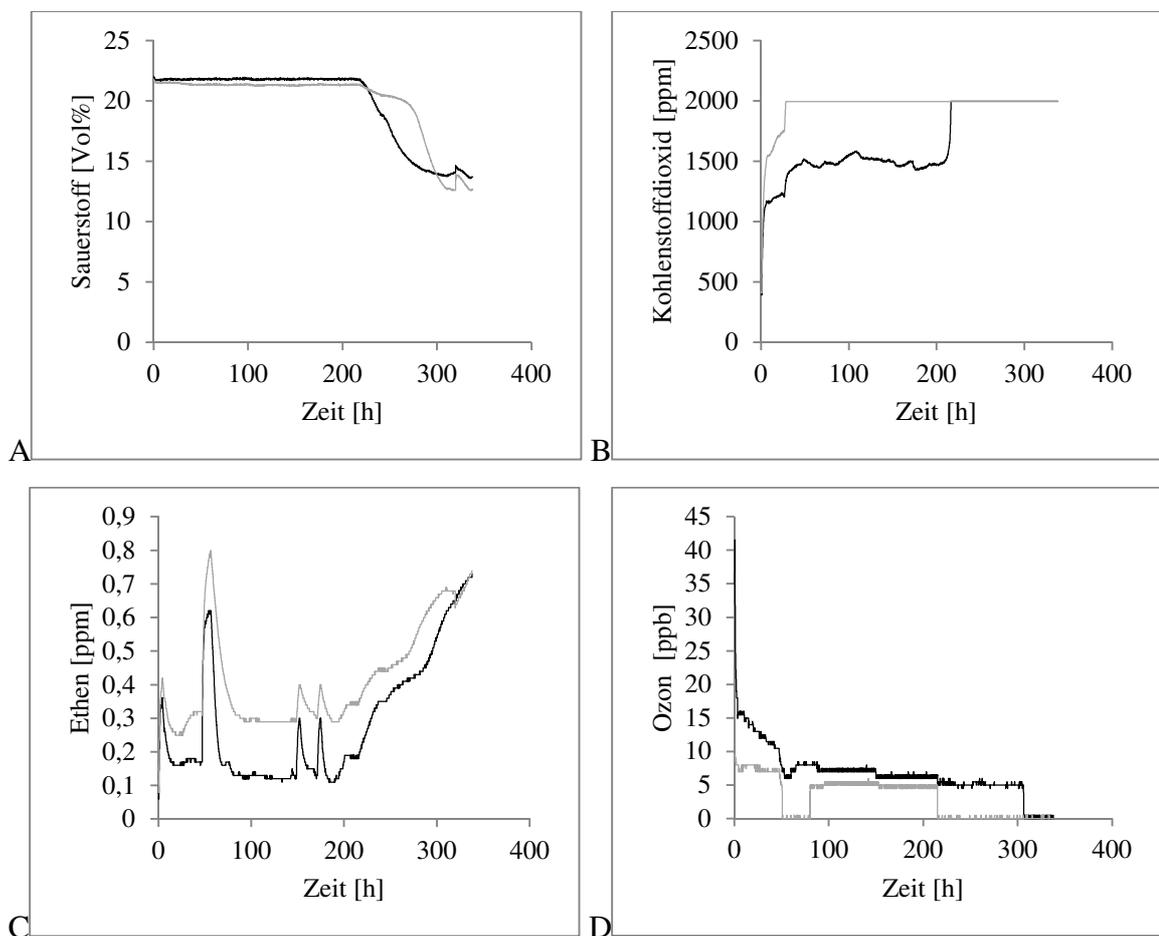


Abbildung 21: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-D), während des zweiten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 13 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr. Ventilation wurde in C1 an Tag neun abgestellt. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C1 angewandt. C1 (schwarz) und C2 (grau).



Abbildung 22: Darstellung des Reifefortschritts der Versuchsbananen an Tag 0, 10 und 13 in C1 (A-C) und C2 (D-E) während des zweiten AB-Vergleichs. Die Lagerung erfolgte 13 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr. Ventilation wurde in C1 an Tag neun abgestellt. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C1 angewandt.

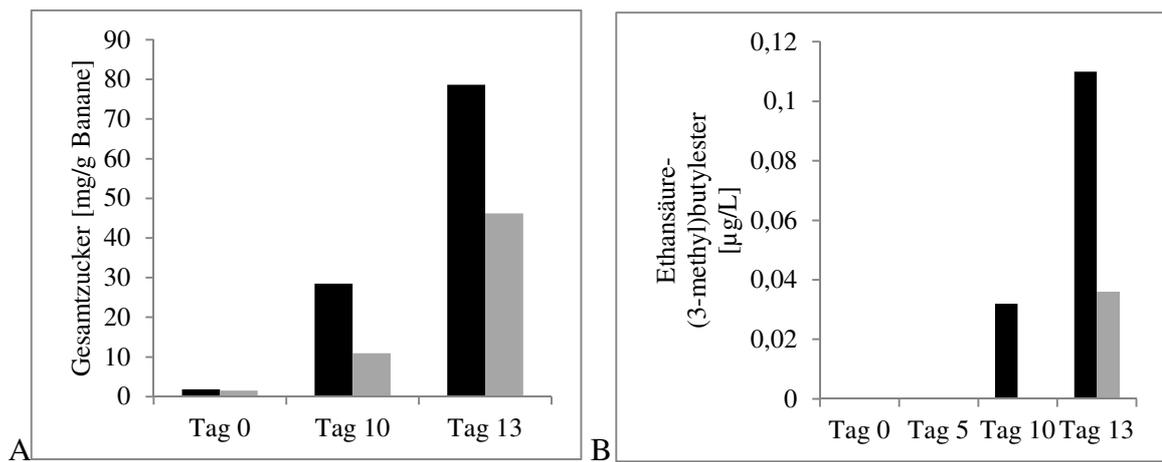


Abbildung 23: Gesamtzuckergehalt (A) und Ethansäure-(3-methyl)butylester (B) während des zweiten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 13 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr. Ventilation wurde in C1 an Tag neun abgestellt. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C1 angewandt. C1 (schwarz) und C2 (grau).

Die Reifung der Bananen trat in C1 unmittelbar nach Abschalten der Ventilation an Tag zehn und in C2 mit Ventilation erst verzögert an Tag zwölf ein. Dieser Reifefortschritt wird auch durch die Gesamtzuckerbestimmung bestätigt (Abbildung 23, A). Bei Betrachtung des Ethens (Abbildung 21, C) wurde deutlich, dass ein Anstieg ab Tag acht messbar war, da diesmal keine Luftzufuhr angewandt wurde und somit das Ausblasen des Ethens verringert wurde. Die rapide Zunahme und Abnahme des Sensorsignals nach 50 Stunden ist wohl nicht auf Schwankungen der Ethenkonzentration zurückzuführen, sondern eher artifiziell und gegebenenfalls auf den Sensor selbst, da er nicht spezifisch auf

Ethen reagiert, sondern Mischgase wahrnimmt, welche aus der Laborluft in den Container eingezogen werden können. Die Auslassventile waren zwar verschlossen; trotzdem wiesen die Deckel der Container Undichtigkeiten auf, z. B. durch die Arretierungen der Handschuhe. Auch wenn im C1 absolut eine geringere Ethenkonzentration im Lagerungsverlauf messbar war, wurde ab Tag neun ein schnellerer Anstieg an Ethen festgestellt. Der Ozongehalt (Abbildung 21, D) im Ionisationscontainer lag auch hier in einem akzeptablen Bereich. Der O₂ Gehalt (Abbildung 21, A) konnte in beiden Containern bis zu Tag acht ohne aktive Luftzufuhr 22 % [v/v] gehalten werden. Anschließend kam es zu einem Abfall der Konzentration bis zu 12 % [v/v], was mit der Abschaltung der Ventilation in C1 korreliert. Allerdings kam es auch in C2 zu einer Abnahme an O₂, welche womöglich auf die von Beginn an steigende Atmung der Bananen, belegt durch den Anstieg der CO₂ Konzentration (Abbildung 21, B), zurückzuführen ist. Die Atmungsaktivität im nicht ionisierten Container war wieder deutlich höher und hatte nach einem Tag schon den maximalen Messbereich des Sensors erreicht. In C1, kam es zu einer geringeren Zunahme an CO₂ und der maximale Messbereich wurde erst an Tag neun erreicht, einen Tag nachdem die Ventilation abgeschaltet wurde. Eine schnelle Zunahme an CO₂ kann auf einen Beginn der Reifung durch höhere Atmungsaktivität zurückzuführen sein. In diesem Experiment korrelierte dies nicht mit den erzielten Ergebnissen für C2, da in diesem die Reifung erst neun Tage nach dem drastischen Anstieg festzustellen war. In C1 korreliert der Atmungsanstieg mit dem Beginn der Reifung (Abbildung 21B, Abbildung 22, Abbildung 23). Zudem zeigte sich in diesem Experiment, dass eine Reifeverzögerung von zwei Tagen im Container ohne Ionisation auftrat. Dies bestätigte die Annahme, dass durch die fehlende Luftumwälzung eine Reifung schneller hervorgerufen wird. Möglich wäre auch, dass eine CO₂ Konzentration im C2 erreicht wurde (aufgrund des Sensor Maximums nicht messbar), die eine Reifeverzögerung der Bananen im C2 hervorrief. Wie in der Literatur beschrieben, können hohe CO₂ Gehalte ebenfalls eine Reifeverzögerung hervorrufen [27].

3.2.3 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich III

Im dritten AB-Vergleich wurden unreife Bananen aus einer Charge mit und ohne Luft-Ionisation in den beiden baugleichen Containern bei Raumtemperatur gelagert. Es wurde wieder auf eine Regulierung des CO₂ Gehalts in den Containern durch aktive Luftzufuhr verzichtet, um ein Austreten des Ethens zu vermeiden. Die Ventilation wurde diesmal von Beginn an abgestellt, um die Lagerung zu beschleunigen. Die Luft Auslassventile wurden geöffnet, um einen minimalen Luftaustausch zu gewährleisten.

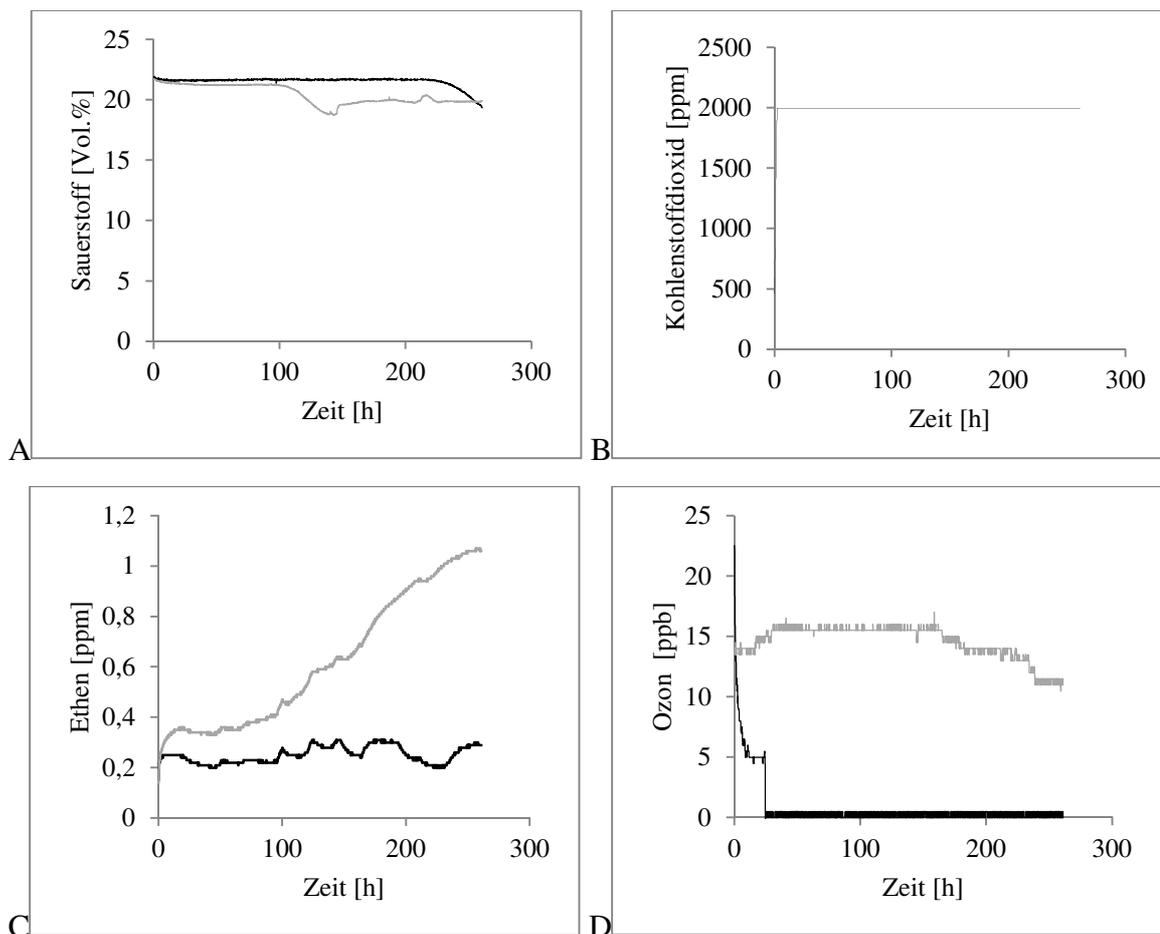


Abbildung 24: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-D), während des dritten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 11 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr und ohne Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C2 angewendet. C1 (schwarz) und C2 (grau).



Abbildung 25: Darstellung des Reifefortschritts der Versuchsbananen an Tag 0, 9 und 11 in C1 (A-C) und C2 (D-E) während des dritten AB-Vergleichs. Die Lagerung erfolgte 11 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr und ohne Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C2 angewendet.

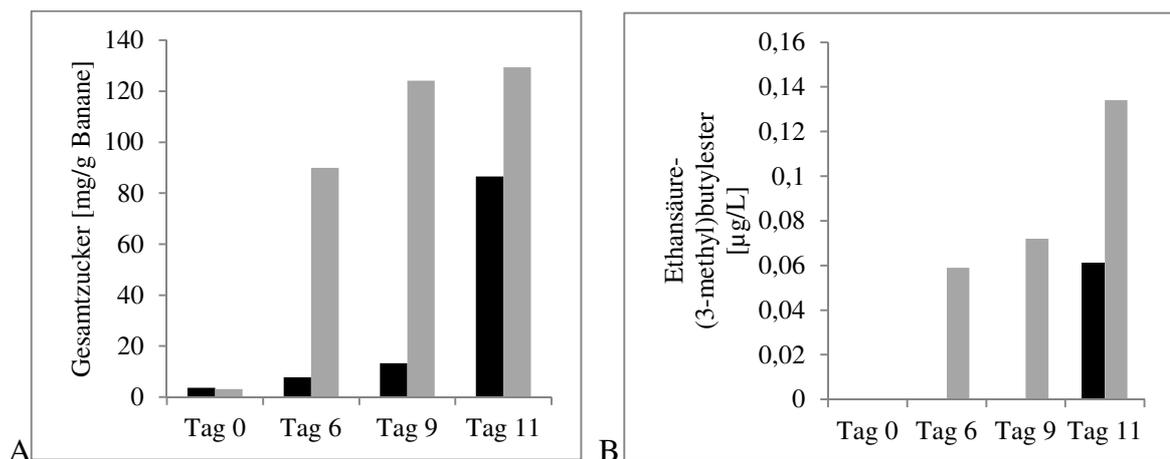


Abbildung 26: Gesamtzuckergehalt (A) und Ethansäure-(3-methyl)butylester (B) während des dritten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 11 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr und ohne Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C2 angewendet. C1 (schwarz) und C2 (grau).

Betrachtet man die CO₂ Konzentrationen (Abbildung 24B), waren diese wenige Stunden nach Beginn der simulierten Lagerung nicht mehr messbar, da der maximale Messbereich des Sensors in beiden Containern erreicht wurde. Der Ozongehalt (Abbildung 24D) lag über die Dauer des gesamten Experiments unterhalb des Messbereichs des Sensors im Container ohne Ionisation (C1). Im Container mit Ionisation (C2) konnte ein Maximalwert von 15 ppb gemessen werden, der mit Beginn der Ethenbildung langsam abnahm. Dies zeigt, dass ein Abbau des Ethens durch Ozon parallel zur Ionisation stattfand. Allerdings

kann ein Abbau des Ethens anhand der gemessenen Gehalte nicht belegt werden (Abbildung 24C). Da in diesem Experiment weder eine Luftzufuhr gewährleistet war, noch eine Umwälzung der Luft durch Ventilation, ist es naheliegend, dass nach einer bestimmten Zeit (C1, Tag elf und C2, Tag fünf) der O₂ Gehalt (Abbildung 24A) im Container abnimmt. Eine drastische Abnahme, wie im zweiten AB-Vergleich (Ergebnisse, 3.2.2) konnte nicht festgestellt werden, was wahrscheinlich auf die offenen Auslassventile in dieser Lagerung zurückzuführen ist. Der Abfall des O₂ (Abbildung 24A) korrelierte mit dem Reifebeginn. Dies zeigte, dass die Ionisation in diesem Fall keinen Fortschritt gegenüber der Lagerung ohne Ionisation gebracht hat. Betrachtet man die Ethenkonzentrationen (Abbildung 24C), wird auch hier deutlich, dass trotz angewandter Ionisation und Abbau des Ozons eine hohe Ethenbildung von den Bananen ausging, die im Container ohne Ionisation nicht zum Tragen kam. Des Weiteren zeigen auch die Ergebnisse der Gesamtzuckerbestimmung (Abbildung 26A) und der Aromabildung (Abbildung 26B), dass die Reifung im Ionisationscontainer (C2) weiter fortgeschritten war. Da in diesem Versuch von Beginn an auf jegliche Luftzufuhr und Luftumwälzung verzichtet wurde, könnte die fehlende Luftzirkulation und somit nicht gegebene kontinuierliche Zufuhr der Containerraumluft zum Erzeugungsort der Ionen und des Ozons eine Erklärung für die Unwirksamkeit der Ionisation sein. Zudem zeigte sich, dass ein Teil der Bananen eine ungewöhnliche Reifung in Bezug auf Textur (weich) und Farbe (grün) aufwiesen, was auf den Fotos nicht festzuhalten war. Womöglich kam es teils zu einer Gärung der Früchte. Indes konnte Wasser, das im Zuge der Atmung entsteht, in großen Mengen in den Verpackungen nachgewiesen werden. Es konnten bei der Verkostung der gelagerten Bananen jedoch keine Fehlgerüche, die auf eine Gärung deuten, detektiert werden.

3.2.4 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich IV

Im vierten AB-Vergleich wurden unreife Bananen aus einer Charge mit und ohne Ionisation in den beiden Containern bei Raumtemperatur gelagert. Es wurde auf eine Regulierung des CO₂ Gehalts in den Containern durch aktive Luftzufuhr verzichtet, um eine Detektion des Reifegases zu ermöglichen. Die Ventilation war in Betrieb, um eine Luftumwälzung und Verteilung der Ionen zu gewährleisten. Die Luftauslassventile waren geöffnet.

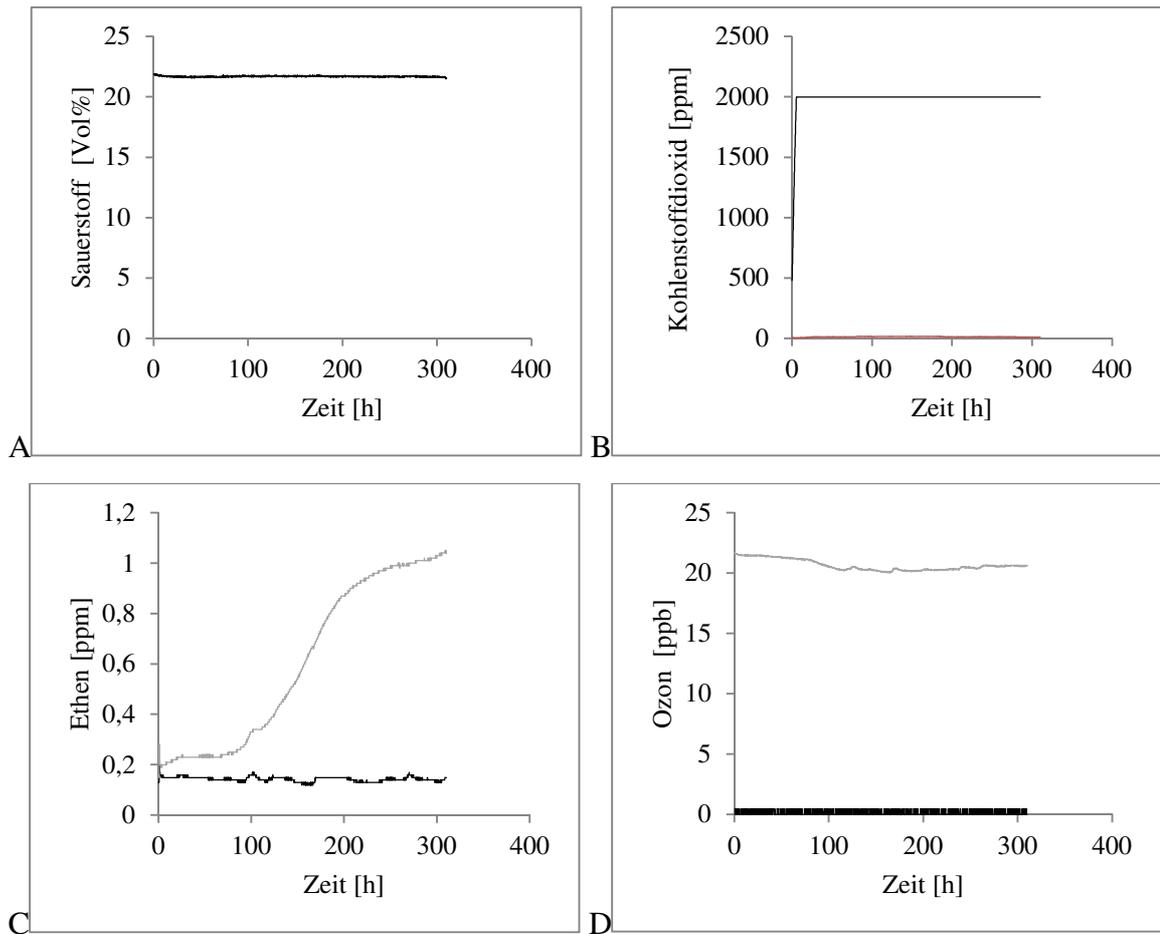


Abbildung 27: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-D), während des vierten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 11 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr und mit Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C2 angewendet. C1 (schwarz) und C2 (grau).



Abbildung 28: Darstellung des Reifefortschritts der Versuchsbananen an Tag 0, 8 und 11 in C1 (A-C) und C2 (D-E) während des vierten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 11 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktive Luftzufuhr und mit Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C2 angewendet.

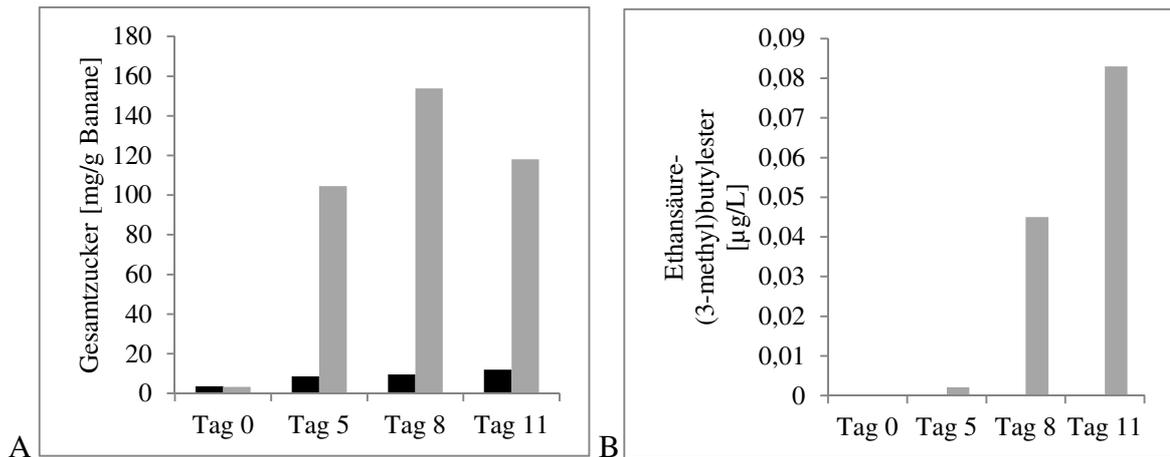


Abbildung 29: Gesamtzucker (A) und Ethansäure-(3-methyl)butylester (B) während des vierten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte vier Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbona* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktiver Luftzufuhr und mit Ventilation. C1 (schwarz) und C2 (grau). Es wurde keine Ionisation in den Containern angewandt.

Der O₂ Gehalt (Abbildung 27A) konnte aufgrund der Luftumwälzung und des daraus resultierenden Austauschs mit der Laborluft durch die Auslassventile im Bereich von 22 % [v/v] gehalten werden. Ein minimaler Abfall konnte nur in C2 festgestellt werden; hier fiel der Wert im Laufe des Experiments auf 20 % [v/v] ab. Diese minimale Abnahme korreliert mit der Zunahme der Ethenkonzentration (Abbildung 27C). Da keine Druckluft in die Container eingeleitet wurde und die Bananen hohe Atmungsaktivitäten aufwiesen, war nach kurzer Zeit, der mit dem Sensor maximal noch messbare CO₂-Gehalt erreicht und eine weitere Verfolgung des Atmungsgases daher nicht möglich (Abbildung 27B). Der Ozongehalt (Abbildung 27D) nimmt mit der Bildung des Ethens wie in Versuch 3.2.3 langsam ab. Eine Reifung der Bananen (Abbildung 28) konnte nach sechs Tagen im Ionisationscontainer festgestellt werden, wohingegen Bananen, die ohne Ionisation gelagert wurden, bis zum Ende des Experiments an Tag 13 im Reifestadium 2 verblieben. Auch die in den Containern gemessenen Ethenkonzentrationen (Abbildung 27C), Gesamtzuckergehalte (Abbildung 29A) und Aromabildung (Abbildung 29B) spiegeln diese Ergebnisse wieder. Somit war die Reifeverzögerung ohne Ionisation nicht nur der fehlenden Ventilation im AB-Vergleich II+III (Ergebnisse, 3.2.2, 3.2.3.) zuzuschreiben. Diese Tatsache stellt die bisher erzielten Ergebnisse so weit in Frage, als bei einer artifiziellen Schnellreifung der Reifegrad der Bananen zu Beginn der Lagerung sowie Ventilation und Belüftung die Reifung stärker beeinflussen als die Ionisation. Offensichtlich variieren die vom Großmarkt bezogenen Bananenchargen, auch innerhalb

einzelner Cluster, bereits stark in ihrem Reifefortschritt, so dass es unter diesen artifiziellen Bedingungen nicht mehr gelingt, den positiven Effekt der Ionisation eindeutig zu belegen.

3.2.5 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich V

Im fünften AB-Vergleich wurden unreife Bananen aus einer Charge ohne Ionisation in den beiden Containern bei Raumtemperatur gelagert, um zu sehen, ob containerbedingt eine unterschiedliche Reifung der gelagerten Bananen auftritt. Es wurde auf eine Regulierung des CO₂ Gehalts in den Containern durch aktive Luftzufuhr verzichtet, um eine Ethenakkumulation in den Containern zu ermöglichen. Die Ventilation war in Betrieb und die Luftauslassventile geöffnet.

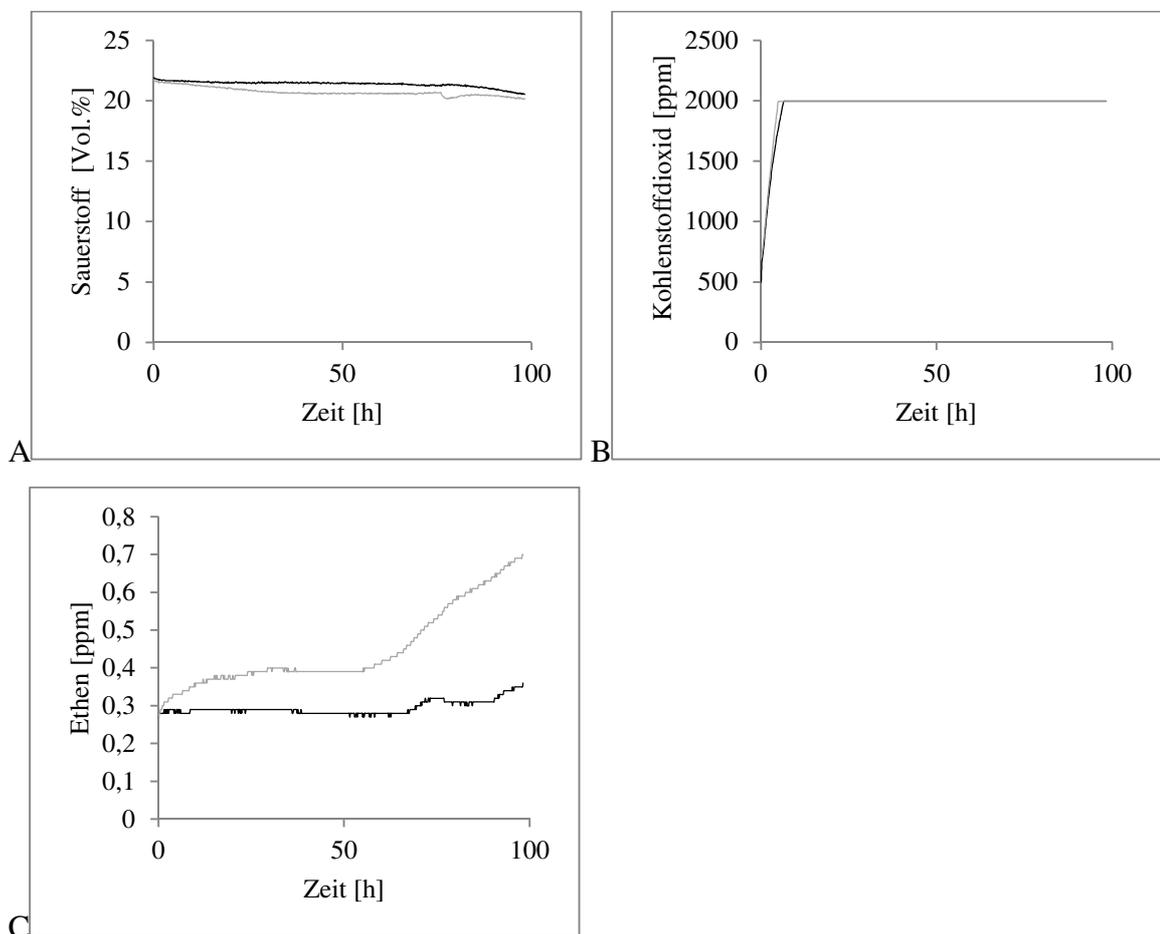


Abbildung 30: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-C) während des fünften AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte vier Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktiver Luftzufuhr und mit Ventilation. C1 (schwarz) und C2 (grau). Es wurde keine Ionisation in den Containern angewandt.

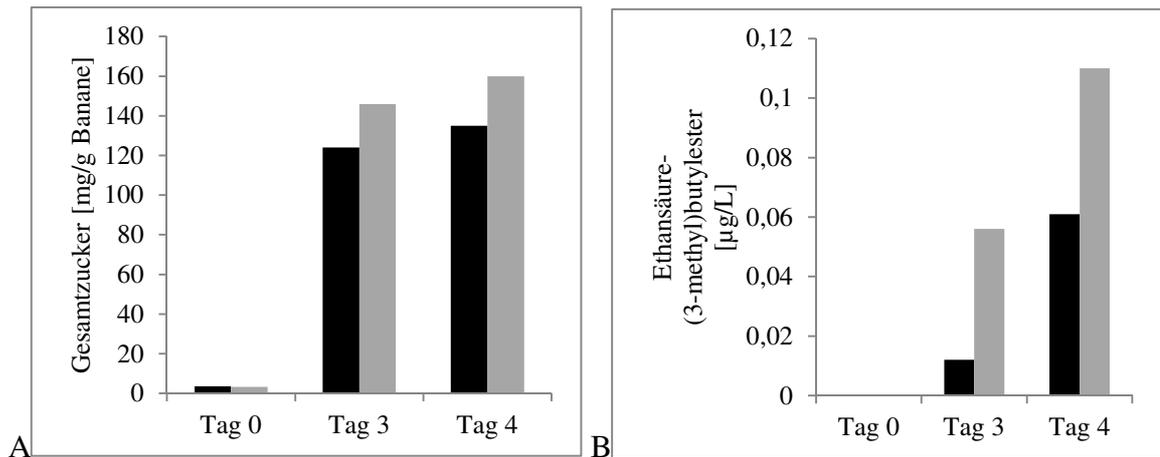


Abbildung 31: Gesamtzucker (A) und Ethansäure-(3-methyl)butylester (B) während des fünften AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte vier Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktiver Luftzufuhr und mit Ventilation. C1 (schwarz) und C2 (grau). Es wurde keine Ionisation in den Containern angewandt.

Die Ergebnisse zeigen erneut, dass beide Chargen bereits nach vier Tagen eine Reifung aufwiesen. Betrachtet man die CO₂ Zunahme und die O₂ Abnahme (Abbildung 30, A und B), wiesen die Bananen, die in C2 gelagert wurden, eine minimal höhere Atmungsaktivität auf. Die höheren gemessenen Ethenkonzentrationen (Abbildung 30C) im C2 weisen auf eine höhere Ethenproduktion hin, verglichen zu C1, in dem die Ethenkonzentration erst nach 70 Stunden langsam zunahm. Dies korrelierte auch mit der optischen Reifegradbestimmung, der Aromabildung und der Gesamtzuckerbestimmung (Abbildung 31, A und B). An Tag vier wiesen die Bananen in C2 einen Reifegrad von sechs und die in C1 einen von drei auf. Fotoaufnahmen sind hier nicht dargestellt, da der Reifefortschritt auf den Aufnahmen nicht deutlich zu erkennen war.

3.2.6 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich VI

Der sechste AB-Vergleich wurde wie AB-Vergleich V durchgeführt. Unreife Bananen aus einer Charge wurden ohne Ionisation in den beiden Containern bei Raumtemperatur gelagert. Es wurde auf eine Regulierung des CO₂ Gehalts in den Containern durch aktive Luftzufuhr verzichtet. Die Ventilation war in Betrieb. Die Luftauslassventile waren geöffnet.

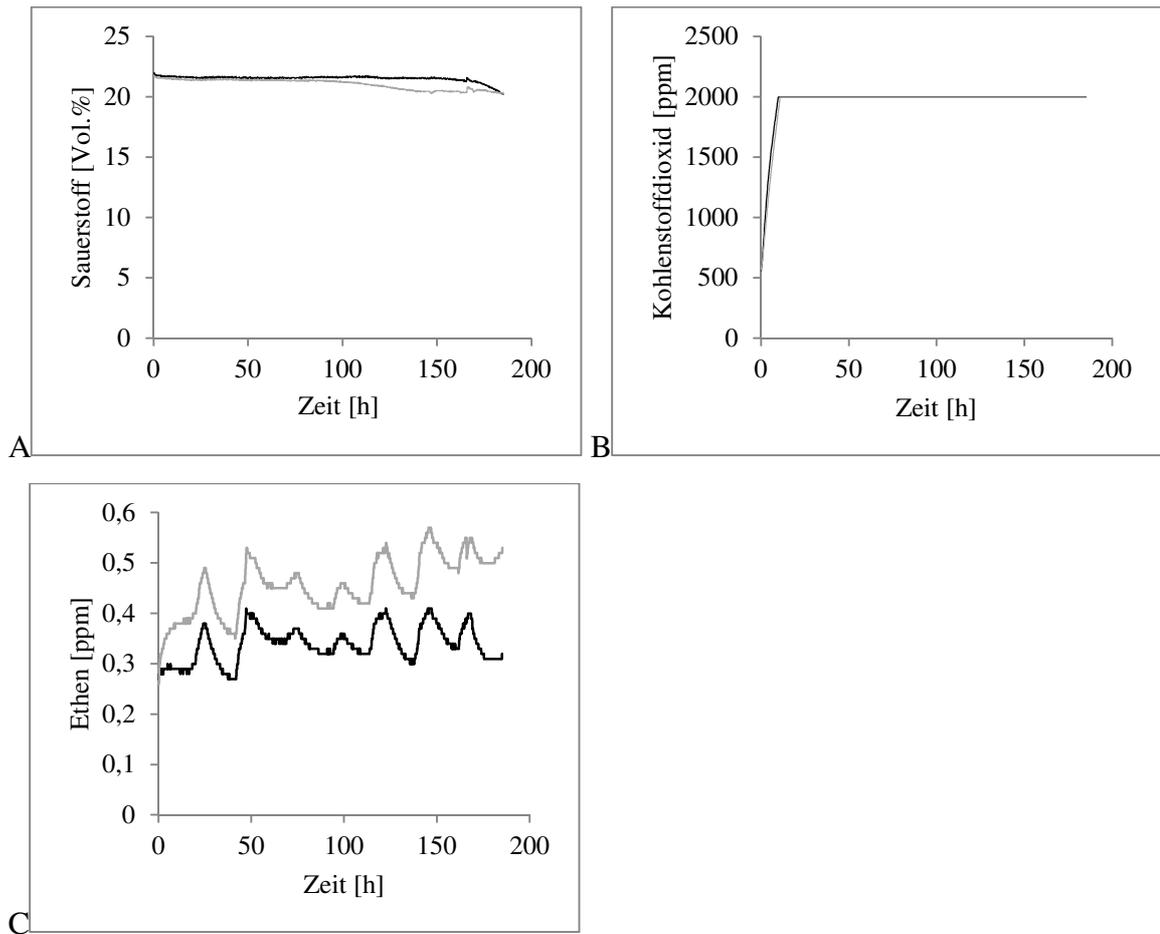


Abbildung 32: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-C) während des sechsten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte acht Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktiver Luftzufuhr und mit Ventilation. C1 (schwarz) und C2 (grau). Es wurde keine Ionisation in den Containern angewandt.



Abbildung 33: Darstellung des Reifefortschritts der Versuchsbananen an Tag 0, 6 und 8 in C1 (A-C) und C2 (D-E) während des sechsten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte acht Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktiver Luftzufuhr und mit Ventilation.

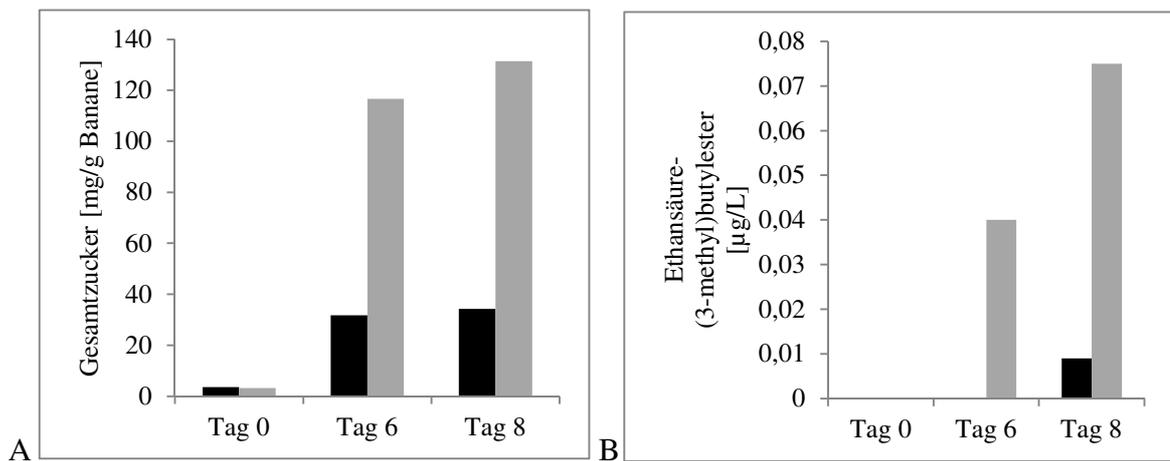


Abbildung 34: Gesamtzucker (A) und Ethansäure-(3-methyl)butylester (B) während des sechsten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte vier Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 22 °C ohne aktiver Luftzufuhr und mit Ventilation. C1 (schwarz) und C2 (grau). Es wurde keine Ionisation in den Containern angewandt.

Betrachtet man die O_2 Konzentrationen (Abbildung 32A), war eine minimale Abnahme im C2 nach 100 Stunden und in C1 nach 170 Stunden messbar. Der CO_2 Gehalt (Abbildung 32B) stieg in beiden Container zu Beginn gleichmäßig an und erreichte nach wenigen Stunden den Maximalwert des Sensors, so dass wie in den anderen Experimenten, in denen keine aktive Luftzufuhr gewährleistet war, keine Aussage mehr getroffen werden kann. Auffällig war die Ab- und Zunahme an Ethen (Abbildung 32C) in beiden Containern, die auftrat, obwohl keine Luft aktiv eingebracht wurde. Trotzdem war in C2, in dem bereits an Tag fünf eine Reifung der Bananen auftrat, ein höherer Anstieg an Ethen auf bis zu 5 ppb

messbar, wohingegen der Ethenwert in C1 im Bereich 3-4 ppb nicht überschritt. Betrachtet man die Gesamtzuckerbestimmung (Abbildung 34A) und Aromabildung (Abbildung 34B), bestätigen diese, dass in C2 die Reifung weiter fortgeschritten war als in C1. Nach dem Öffnen der Container konnte zudem festgestellt werden, dass der Großteil der in C2 gelagerten Bananen einen Reifegrad von sechs aufwies und in C1 nur zwei Cluster in die Reifung übergegangen waren (Reifegrad 5). Der Rest der C1 Lagerung wies einen Reifegrad von zwei auf.

Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen deutlich, dass eine Reifeverzögerung unter Stresslagerung nicht zwingend durch Ionisation erzielt wird, sondern durch den Reifegrad der Bananen und die Containerbelüftung stärker beeinflusst wird und schlechtere Ausgangsbedingungen nicht in jedem Fall durch Ionisation kompensiert werden.

3.2.7 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich VII

In diesem Versuch wurden unreife Bananen gleicher Chargen mit und ohne Ionisation in den beiden baugleichen Containern bei Raumtemperatur gelagert. Es wurde auf eine Regulierung des CO₂ Gehalts in den Containern mittels aktiver Luftzufuhr verzichtet. Allerdings wurde versucht, mittels der Probeentnahmeklappe zuweilen den CO₂-Gehalt zu senken. Die angewandte Ionisation wurde im Laufe der Lagerung zwischen IS 1 und IS 3 gesteuert.

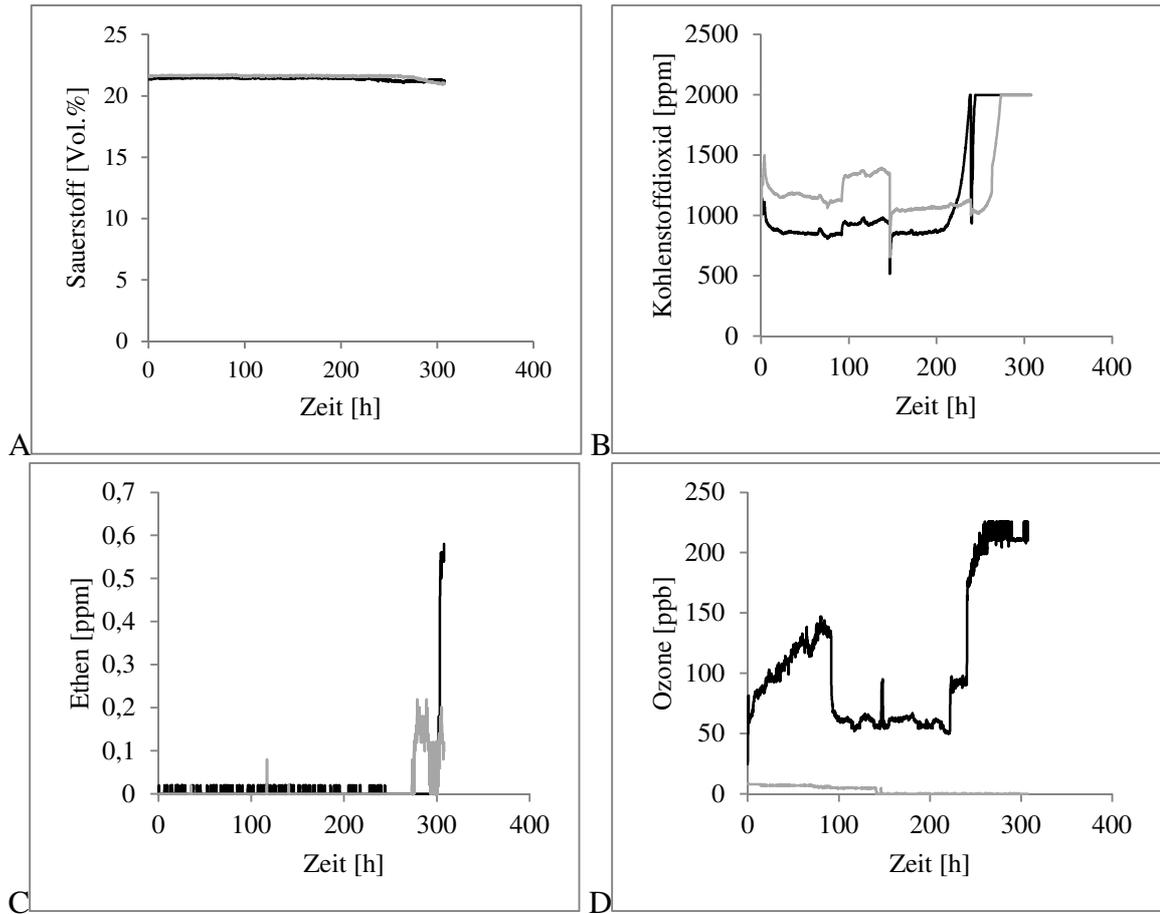


Abbildung 35: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-D), während des siebten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte elf Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2-3, bei 22 °C ohne aktive Druckluftzufuhr, aber mit öffnen und schließen der Entnahme Klappe und mit Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1-3) wurde in C1 angewendet. C1 (schwarz) und C2 (grau).



Abbildung 36: Darstellung des Reifefortschritts der Versuchsbananen an Tag 0, 11 und 14 in C1 (A-C) und C2 (D-E) während des siebten AB-Vergleichs. Die Lagerung erfolgte 14 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2-3, bei 22 °C ohne aktive Druckluftzufuhr, aber mit öffnen und schließen der Entnahme Klappe. Ventilation war angeschaltet. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1-3) wurde in C1 angewandt.

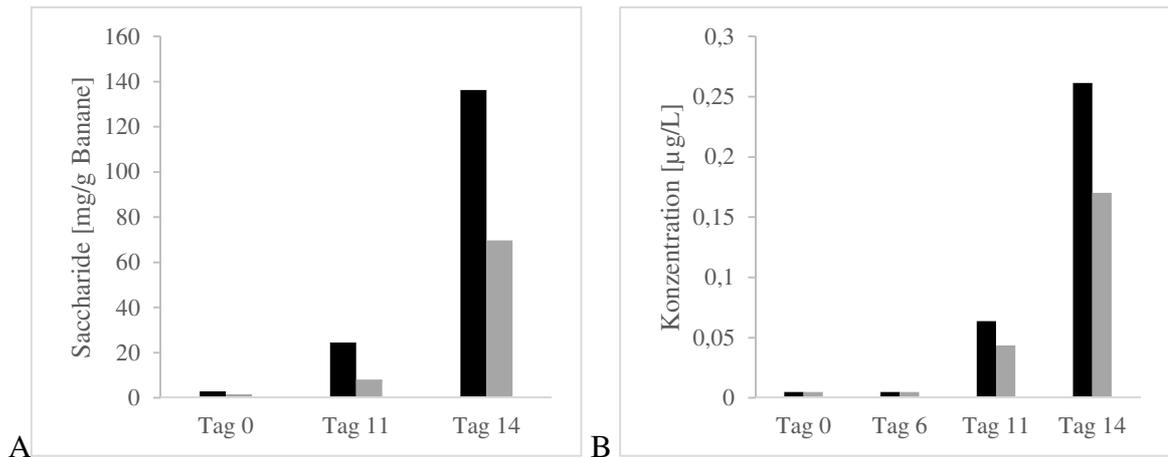


Abbildung 37: Gesamtzuckergehalt (A) und Ethansäure-(3-methyl)butylester im Containerluftraum (B) während des siebten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 14 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2-3, bei 22 °C ohne aktive Druckluftzufuhr, aber mit öffnen und schließen der Entnahme Klappe und Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1) wurde in C1 angewandt. C1 (schwarz) und C2 (grau).

Wie in vorherigen Versuchen, in denen Luftauslass ermöglicht wurde, konnte der O₂ Gehalt im Normalbereich der Luft gehalten werden (Abbildung 35). Der CO₂ Gehalt lag trotz gleich eingestellter Auslassventile im ionisierten C1 in einem geringeren Bereich als in C2. Diese Tatsache lässt wieder vermuten, dass die Container keine vergleichbare Dichtigkeit aufwiesen, da die Bananen im C1 anhand der Reifeparameter (Zucker und Reifearoma, Abbildung 37; weich werden der Schale, wie auch der Farbgebung, Abbildung 36 und Atmungsaktivität zum Ende der Lagerung, Abbildung 35B) eine fortgeschrittene Reifung aufwiesen.

Im C1 mit Ionisierung konnte ab Tag elf ein Anstieg des CO₂ (Abbildung 35B), eine Veränderung der Farbgebung von grün zu gelb (Abbildung 36), eine Bildung des Bananenaromas (Abbildung 37B), sowie eine erhöhte Wasserbildung beobachtet werden, wohingegen diese Reifeparameter in C2 erst an Tag 13 zu beobachten waren.

Da keine Verzögerung durch Ionisation und Ozonisierung zu beobachten war, kann somit nur auf die Eliminierung des Ethens eingegangen werden. Betrachtet man die Zunahme an Ethen in den Containern, so korreliert diese in C2 nahezu mit dem Reifebeginn (Abbildung 35C, Tag 11-12). In C1 konnte trotz Beginn der Reifung keine Zunahme an Ethen beobachtet werden, was auf die angewandte Ionisation und Ozonisierung zurückzuführen ist. Allerdings konnte ab dem Lagerungstag 12 ein rapider Anstieg im C1 detektiert werden. Hier war die Reifung schon zu weit fortgeschritten, und eine Eliminierung des Ethens mit angewandter IS 3 konnte keinen Effekt mehr erzielen. Anhand der Ozon Ab-

und Zunahme (Abbildung 35D) wird deutlich, zu welchem Zeitpunkt eine andere IS gewählt wurde. Zu Beginn wurde die IS 3 gewählt, die aber wie erwartend einen rapiden Anstieg des Ozons zufolge hatte. In diesem Versuch sollte auf Ozon nicht verzichtet werden, um im Nachhinein die Auswirkungen des Ozons auf das Bananenaroma im Luftraum untersuchen zu können. Allerdings war angestrebt, eine Anreicherung über den Messbereich des Sensors hinaus (bis 220 ppb) über die gesamte Lagerzeit zu vermeiden. Da zu Beginn noch keine Reifung der Bananen abzusehen war, wurde nach einer Ozonkonzentration von 150 ppb auf die IS 1 zurückreguliert, um eine weitere Anreicherung es Ozons zu vermeiden. Beginnend mit der Reifung (Tag 11) wurde die Ionisation wieder auf IS 3 (Abbildung 35D) gestellt.

Im Zuge der Aromaextraktionen der Versuchsbananen (Anhang 7.1.2) und der Luftprobenanalyse des Containerinnenraums (Tabelle 23 und Anhang 7.1.1) während der Lagerung, konnten keine qualitativen Unterschiede im Aromaprofil erkannt werden; zudem konnten olfaktorisch keine Geruchsunterschiede wahrgenommen werden. Somit konnten mit der verwendeten Analytik keine Ozonisierungsprodukte detektiert werden. In der folgenden Tabelle 23 sind die im *Headspace* identifizierten Substanzen qualitativ dargestellt und das dazugehörige Chromatogramm zum Vergleich im Anhang 7.1.1. In den folgenden Tabellen 24 und 25 sind die identifizierten Substanzen (auf polarer und unpolarer stationärer Phase) aus allen drei Fraktionen der Bananenextrakte zusammengefasst dargestellt. Im Anhang sind die identifizierten Substanzen einzeln für jede Fraktionen, sowie Chromatogramme zu finden (Anhang, 7.1). Vergleicht man die Proben aus C1 und C2 anhand der Chromatogramme so sind keine qualitativen, sondern nur quantitative Unterschiede in den einzelnen Fraktionen feststellbar (Anhang 7.1.2). Bei Addition der ermittelten Konzentrationen dieser Substanzen, konnten vergleichbare Mengen analysiert werden. Somit konnte auch unter dem Einfluss von Ozon bei der Reifung keine Minderung der gebildeten Aromen festgestellt werden. Hier besonders hervorzuheben sind die Hauptkomponenten des Bananenaromas [10], das 2-Pentanon, Ethansäure-(3-methyl)-butylester und Ethansäure-(2-methyl)propylester. Allerdings ist anzumerken, dass bei der Auftrennung der einzelnen Fraktionen auf der unpolaren Säule teilweise geringere Konzentrationen erfasst wurden (2-Pentanon, Ethansäure-(3-methyl)butylester) bzw. die Substanzen nicht nachgewiesen werden konnten (Ethansäure-(2-methyl)propylester).

Tabelle 23: Flüchtige Aromastoffe im Container-Headspace an Lagertag 14

Substanz	CAS-Nr.	Retentionszeit C1 und C2
2-Pentanon	107-87-9	3,22
2-Pentanol	6032-29-7	3,42
3-Methyl-1-butanol	123-51-3	3,08
Methylbenzen	108-88-3	4,65
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	7,19
o-xylene	95-47-6	7,87
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	8,20
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	11,68
Butansäurebutylester	109-21-7	13,61
3-Methylbutansäure-(2-methyl)propylester	589-59-3	14,07
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	15,06
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	16,13
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	16,79
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	19,19

Tabelle 24: Identifizierte Substanzen der Bananenextrakten (Fraktion 1, Fraktion 2 und Fraktion 3) aus C1 und C2 des AB-Vergleich VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 ($\mu\text{g/g}$ Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	süßlich	3,03	0,781	3,02	0,651
2-Butanon	78-93-3	Käse	3,2	0,011	3,15	0,012
Propansäuremethylester	554-12-1	fruchtig	3,25	0,623	3,24	0,756
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich, fruchtig	3,48	0,977	3,49	0,82
3-Methylbutanon	563-80-4	x	3,58	0,136	3,59	0,135
2-Pentanon	107-87-9	x	4,45	0,743	4,46	0,739
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	4,67	5,046	4,68	5,091
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,22	1,159	5,21	0,984
Ethansäure-(2-methyl)propylester	110-19-0	Banane	5,34	1,258	5,34	1,057
Methylbenzen	108-88-3	x	5,95	1,762	5,94	1,725
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,12	0,062	7,12	0
Hexanal	66-25-1	frisch	7,32	1,305	7,32	0,774
2-Methyl-1-propanol	78-83-1	x	7,72	0,409	7,72	0,108
2-Pentanol	6032-29-7	süßlich	8,75	0,95	8,75	0,712
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	Banane	8,78	2,187	8,77	2,075
Butanol	71-36-3	Käse	9,68	0,324	9,81	0,315
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	10,22	0,497	10,22	0,531

Fortsetzung zu Tabelle 24:

Substanz	CAS-Nr.	Geruchs- eindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1 (min)	C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	C2 (min)	C2 ($\mu\text{g/g}$ Banane)
2-Heptanon	110-43-0	Seife	11,05	0,007	11,07	0,008
3-Methylbutansäure-(2-methyl)propylester	589-59-3	fruchtig	11,47	0,217	14,48	0,186
3-Methyl-1-butanol	123-51-3	Käse	12,31	1,858	12,3	1,426
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	12,52	0,623	12,52	0,489
Butansäurebutylester	109-21-7	süßlich	12,67	0,224	12,67	0,368
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	13,93	0,226	13,93	0,192
5-Hepten-2-on	6714-00-7	x	13,99	0,085	14,13	0,083
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	süßlich	14,77	0,442	14,77	0,536
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,1	0,299	15,1	0,285
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	Apfel	16,02	0,489	16,02	0,553
Hexanol	111-27-3	getoastet	18,85	0,767	18,86	0,868
Butansäure-(1-methyl)hexylester	39026-94-3	x	20,77	0,392	20,78	0,284
2-Hexen-1-ol	928-95-0	nussig	21,18	0,424	21,19	0,426
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	21,5	0,321	21,51	0,348
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	22,77	0,471	22,78	0,384
Hexansäurehexylester	6378-65-0	fruchtig	29,79	0,008	29,8	0,003
Heptansäure	111-14-8	ranzig	31,09	0,3	31,1	0,286
Hexansäure	142-62-1	ranzig	39,44	0,38	39,45	0,528
2-Propensäure-(3-phenyl)methylester	1754-62-7	x	45,85	0,007	45,85	0,224

Fortsetzung zu Tabelle24:

Substanz	CAS-Nr.	Geruchs- eindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1	C1	C2	C2
			(min)	(µg/g Banane)	(min)	(µg/g Banane)
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	48,17	0,611	48,18	0,177
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)-benzol	487-11-6	süßlich	49,39	1,442	49,46	0,592
Hexadecansäuremethylester	112-39-0	ölig	49,39	0,451	49,39	0,326
(Z,Z)-9,12-Octadecadiensäuremethylester	112-63-0	x	54,8	0,362	54,8	0,196
(Z,Z) 9,12-Octadecadiensäureethylester	544-35-4	x	55,4	0,865	55,4	0,132
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl)phenol	6627-88-9	blumig	55,81	1,823	55,74	1,756
9,12,15 Octadecatriensäure	7361-80-0	x	56	0,401	56,01	0,215
Tetradecansäure	544-63-8	x	59,1	0,675	59,12	0,505
Pentadecansäure	1002-84-2	x	61,65	40,23	61,66	1,356
Hexadecansäure	57-10-3	ölig	65,55	13,123	65,54	11,531

Tabelle 25: Identifizierte Substanzen der Bananenextrakten (Fraktion 1, Fraktion 2 und Fraktion 3) aus C1 und C2 des AB-Vergleich VII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit	Retentionszeit	Konzentration	Konzentration
			C1 (min)	C2 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (µg/g Banane)
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich fruchtig	3,30	3,12	0,487	0,396
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	3,54	3,21	0,125	0,096
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	4,00	3,60	1,396	1,314
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,65	7,65	0,817	0,953
Hexanol	111-27-3	Toast	8,82	8,82	0,162	0,165
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	Banane	8,95	8,94	0,998	0,971
2-Heptanon	110-43-0	Seife	9,68	9,68	0,279	0,285
2-Methylpropansäure-(-2-methyl)propylester	97-85-8		12,92	12,94	0,198	0,154
2-Methylbutansäurepropylester	539-90-2	x	12,75	12,74	0,422	0,344
Butansäurebutylester	109-21-7	fruchtig, frisch	14,85	14,84	0,489	0,401
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,73	15,72	0,061	0,053
Hexansäure	142-62-1	x	15,75	15,76	0,498	0,511
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	16,42	16,43	0,778	0,750
Ethansäureheptan-2-yl-ester	5921-82-4	x	17,17	17,18	0,228	0,259
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	18,18	18,18	0,486	0,435
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig (Apfel)	20,85	20,82	1,397	1,032
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	25,22	25,22	0,267	0,185
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	27,65	27,65	0,186	0,160
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	32,79	32,78	0,255	0,216
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	x	41,35	41,34	0,371	0,348
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl)phenol	6627-88-9	x	43,35	43,35	1,317	1,241
Hexadecansäure	57-10-3	x	53,57	53,57	42,15	40,21
9,12-Octadecadiensäure	60-33-3	x	57,02	57,03	48,89	48,21

3.2.8 Lagerungsversuch in den miniaturisierten Kühlcontainern – AB-Vergleich VIII

In diesem Versuch wurden Bananen direkt aus der Karibik eingeflogen, um genauere Angaben über die Herkunft der Früchte zu besitzen. Die unreifen Bananen wurden mit und ohne Ionisation in den beiden baugleichen Containern bei 13,5 °C gelagert. Es wurde eine Regulierung des CO₂ Gehalts in den Containern mittels aktiver Luftzufuhr und dem Öffnen und Schließen der Entnahmeklappe gewährleistet. Um eine Ozonanreicherung direkt zu Beginn des Versuchs zu vermeiden, wurde die Ionisation im Laufe der Lagerung sukzessive bis zur IS 3 erhöht.

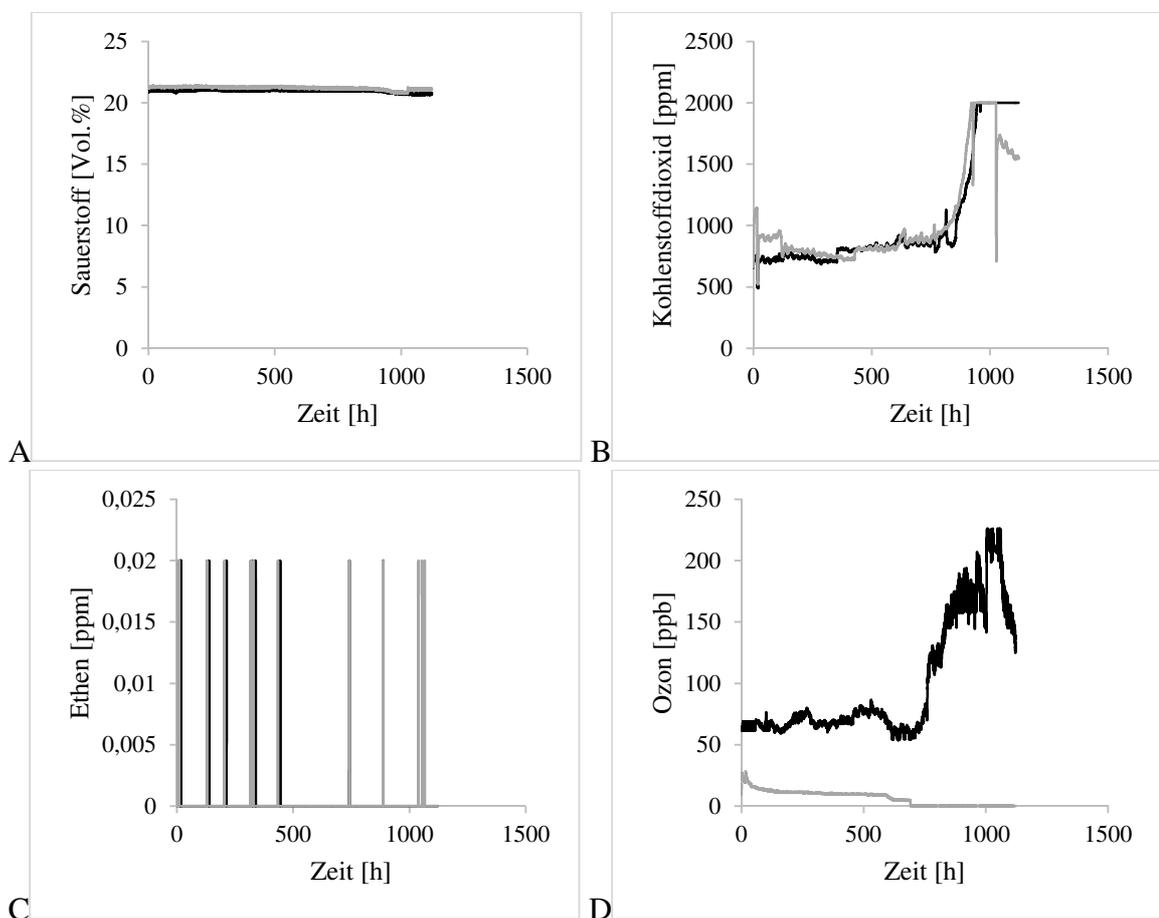


Abbildung 38: Bildungskinetik der einzelnen Gase (A-D), während des achten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 47 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Banane de Guadeloupe & Martinique* Bananen (direkt aus der Karibik eingeflogen), Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Druckluftzufuhr (400mL min⁻¹), dem öffnen und schließen von Luftauslassventilen und der Entnahmeklapp. Ventilation an. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1-3) wurde in C1 angewendet. C1 (schwarz) und C2 (grau).

Der O₂ Gehalt wurde in beiden Containern über die aktive Luftzufuhr im Normalbereich von 22 % [v/v] (Abbildung 40A) gehalten.

Um in beiden Containern einen vergleichbaren CO₂ Gehalt zu gewährleisten und zudem einen unerwünschten Anstieg zu vermeiden, musste dem Kontrollcontainer (C2), aufgrund höherer Atmungsaktivität, von Beginn an deutlich mehr Luft zugeführt werden. Die Regulierung des Atmungsgases konnte aufgrund rapider Zunahme an Lagertag 32 nicht mehr realisiert werden. Zudem wurde die Luftzufuhr verglichen zu Vorversuchen (Ergebnisse 3.2.1) minimiert, um eine Messung des Reifegases zu ermöglichen. Eine kontinuierliche Zunahme konnte im Verlauf der Lagerungen jedoch nicht beobachtet werden (Abbildung 38C). Da auch in C2 ohne Ionisation kein Ethen messbar war, ist dies mit großer Wahrscheinlichkeit wieder auf die aktive Luftzufuhr zurückzuführen, die ein Austreten des Gases aus dem Container hervorruft.

Die Erhöhung der Ionisation wurde anhand des Auftretens erster Reifeindikatoren (Wasserbildung, hoher CO₂ Anstieg, sowie Weichwerden der Schale) im C1 erhöht. Anhand der gemessenen Ozonkonzentrationen (Abbildung 38D) wird deutlich, zu welchem Zeitpunkt eine nächst höhere IS eingestellt wurde. Nach 780 Stunden (Tag 32) von IS 1 zu IS 2 und nach 900 Stunden (Tag 37) von IS 2 zu IS 3. Im C2 lag zu Beginn eine Ozonkonzentration von 30 ppb vor, die im Laufe der Lagerzeit abnahm. Der Abbau des Ozons ist durch die im Container gelagerten Bananen und im Container vorhandenen Komponenten zurückzuführen.

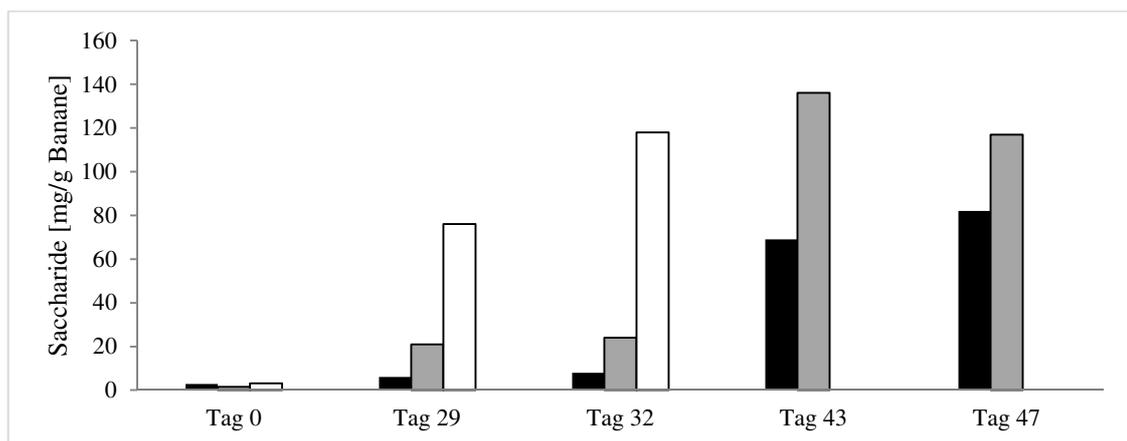


Abbildung 39: Gesamtzucker der Bananenproben vor, während und nach dem achten AB-Vergleich. Die Lagerung wurde bei 13,5 °C, mit einer Beladung von 18 kg Bananen mit einem initialen Reifegrad von 2 in den miniaturisierten Kühlcontainern 1 (schwarz) und 2 (grau) durchgeführt. Der Kohlenstoffdioxidgehalt wurde mittels aktiver Luftzufuhr kontrolliert. Zusätzlich wurde eine Laborlagerung mitgeführt (weiß).

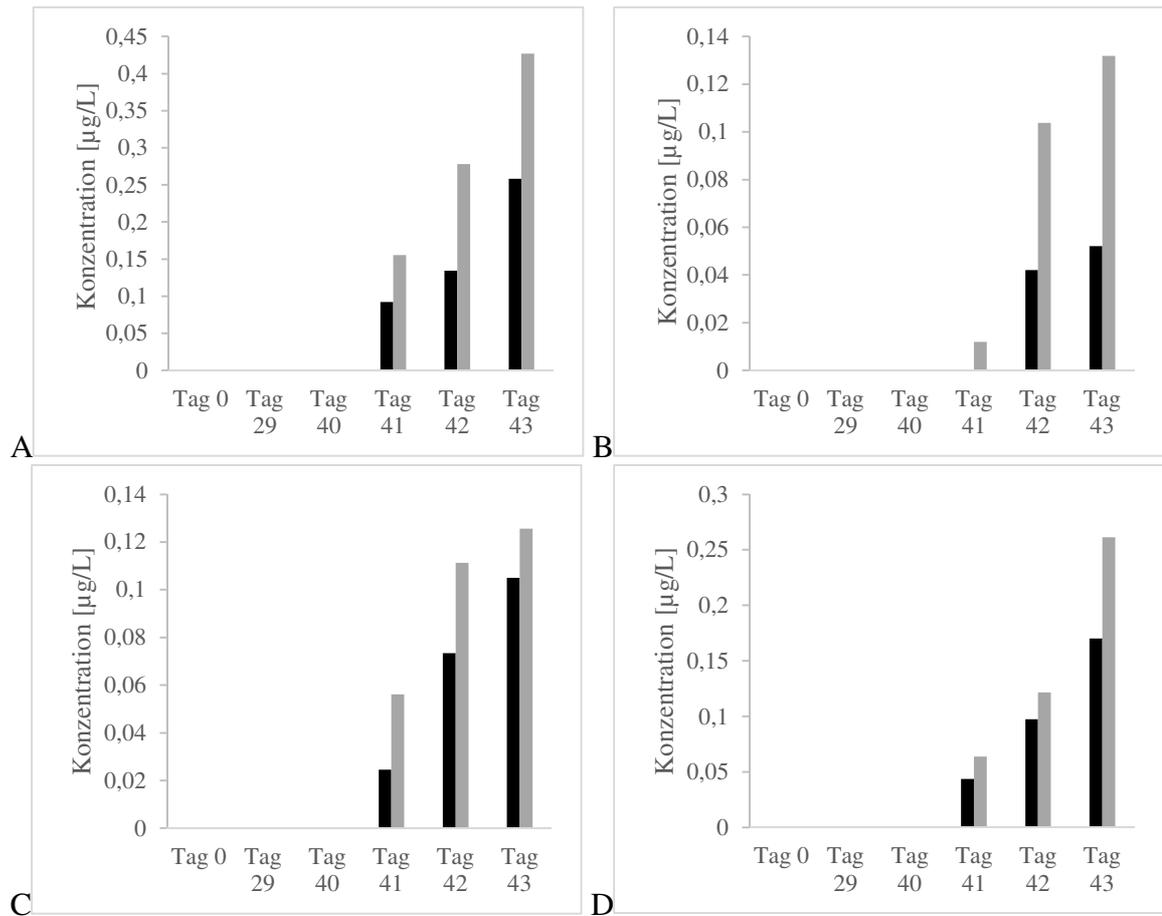


Abbildung 40: Gehalte ausgewählter Aromastoffe während des achten AB-Vergleichs in den miniaturisierten Kühlcontainern. Die Lagerung erfolgte 47 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Luftzufuhr. C1 (schwarz) mit Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1-3) und C2 (grau).

A: Ethansäure-(3-methyl)butylester, B: 2-Pentanol, C: 3-Methyl-1-butanol, D: Ethansäurebutylester

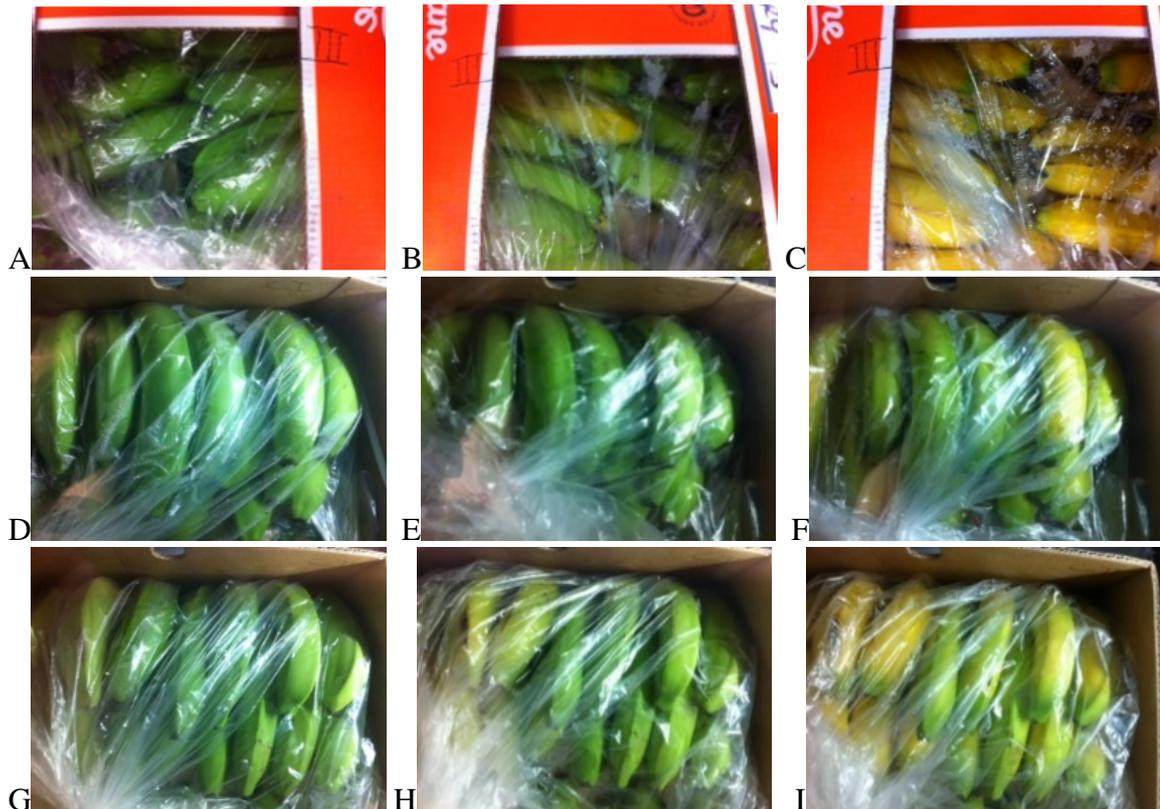


Abbildung 41: Darstellung des Reifefortschritts der Kontrollbananen an Tag 0, Tag 29 und Tag 32 (A-C), die im Labor unkontrolliert gelagert wurden, sowie der Versuchsbananen an Tag 0, 40 und 43 in C1 (D-F) und C2 (G-I) während des achten AB-Vergleichs. Die Lagerung erfolgte 47 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2, bei 13,5 °C mit aktiver Druckluftzufuhr, aber mit Öffnen und Schließen der Entnahme Klappe. Ventilation war angeschaltet. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, IS 1-3) wurde in C1 angewandt.

Es konnte eine Verzögerung der Reifung von vier Tagen im C1 mit Ionisation und Ozonisierung beobachtet werden (Abbildung 41). Allerdings war dieser Effekt eher auf einen unterschiedlichen Reifefortschritt, der von Beginn an vorlag, zurückzuführen. Diese Annahme wird durch die gemessenen Zuckergehalte (Abbildung 39) während der Lagerung und die von Beginn an höhere Atmungsaktivität in C2 bestätigt.

Neben den im Container gelagerten Bananen wurde eine dritte Box im Labor unkontrolliert gelagert. Die hier resultierenden Ergebnisse liegen sehr nah an den Container Lagerungen, obwohl hier keine Kühlung der Bananen vorlag. Diese Ergebnisse lassen wieder den Entschluss ziehen, dass eine ausreichende Belüftung einen erheblichen Effekt auf die Lagerung zulässt, obwohl die Bananen einer Reifetemperatur von 20 °C ausgesetzt waren.

Anhand der gebildeten Aromastoffe im Luftraum wird deutlich, dass an Tag 41 in C1 eine geringere Konzentration der Reifearomen vorlag, verglichen zu C2 (Abbildung 40). Diese Daten bestätigen einen vorzeitigen Reifebeginn in C2.

Da in diesem Versuch wieder erhebliche Mengen an Ozon gebildet wurden, ist die Containerluft, wie auch die Versuchsbananen, wieder auf mögliche Ozonisierungsprodukte hin untersucht worden. Wie in Versuch 3.2.7 zeigten die dem Ozon ausgesetzten Proben keine Unterschiede im Aromaprofil, zudem konnten olfaktorisch keine Geruchsunterschiede wahrgenommen werden. Somit konnten mit der verwendeten Analytik keine Ozonisierungsprodukte detektiert werden. Diese Ergebnisse sind ein positives Indiz dafür, dass Ozon in den während der Lagerung aufgetretenen Konzentrationen das Ethen wirksam bekämpfte, jedoch auf die Bananen keine negativen Auswirkungen hatte.

Im Zuge der Aromaextraktionen der Versuchsbananen (7.2.2) und der Luftprobenanalyse des Containerinnenraums (Tabelle 26 und Chromatogramm im Anhang 7.2.1) während der Lagerung, konnten keine qualitativen Unterschiede im Aromaprofil erkannt werden; zudem konnten olfaktorisch keine Geruchsunterschiede wahrgenommen werden. Somit konnten mit der verwendeten Analytik keine Ozonisierungsprodukte detektiert werden. In der folgenden Tabelle 26 sind die im *Headspace* identifizierten Substanzen qualitativ dargestellt und das dazugehörige Chromatogramm zum Vergleich im Anhang 7.2.1. In den folgenden Tabellen 27 und 28 sind die identifizierten Substanzen (auf polarer und unpolarer stationärer Phase) aus allen drei Fraktionen der Bananenextrakte zusammengefasst dargestellt. Im Anhang sind die identifizierten Substanzen einzeln für jede Fraktionen, sowie Chromatogramme zu finden (Anhang, 7.2). Vergleicht man die Proben aus C1 und C2 anhand der Chromatogramme so sind wie auch in Versuch 3.2.7 keine qualitativen, sondern nur quantitative Unterschiede in den einzelnen Fraktionen feststellbar (Anhang 7.2.2). Bei Addition der ermittelten Konzentrationen dieser Substanzen, konnten vergleichbare Mengen analysiert werden. Somit konnte auch unter dem Einfluss von Ozon bei der Reifung keine Minderung der gebildeten Aromen festgestellt werden. Hier besonders hervorzuheben sind die Hauptkomponenten des Bananenaromas [10], das 2-Pentanon, Ethansäure-(3-methyl)-butylester und Ethansäure-(2-methyl)propylester. Allerdings ist anzumerken, dass bei der Auftrennung der einzelnen Fraktionen auf der unpolaren Säule teilweise geringere Konzentrationen erfasst wurden (2-Pentanon, Ethansäure-(3-methyl)butylester) bzw. die Substanzen nicht nachgewiesen werden konnten (Ethansäure-(2-methyl)propylester).

Tabelle 26: Flüchtige Aromastoffe im Container-*Headspace* an Lagertag 43

Substanz	CAS-Nr.	Retentionszeit C1 und C2
2-Pentanon	107-87-9	3,21
2-Pentanol	6032-29-7	3,42
3-Methyl-1-butanol	123-51-3	3,08
Methylbenzen	108-88-3	4,58
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	7,19
o-xylene	95-47-6	7,87
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	8,26
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	11,78
Butansäurebutylester	109-21-7	13,60
3-Methylbutansäure-(2-methyl)propylester	589-59-3	14,07
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	15,07
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	16,10
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	16,71
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	19,10

Tabelle 27: Identifizierte Substanzen der Bananenextrakten (Fraktion 1, Fraktion 2 und Fraktion 3) aus C1 und C2 des AB-Vergleich VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchs- eindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration C2
			C1 (min)	C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	C2 (min)	($\mu\text{g/g}$ Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	süßlich, fruchtig	3,03	0,451	3,02	0,581
2-Butanon	78-93-3	Käse	3,2	0,012	3,15	0,011
Propansäuremethylester	554-12-1	fruchtig	3,25	0,756	3,24	0,823
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich, fruchtig	3,48	0,820	3,49	0,977
3-Methylbutanon	563-80-4	x	3,58	0,135	3,59	0,126
2-Pentanon	107-87-9	x	4,45	0,793	4,46	0,748
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich, fruchtig	4,67	5,091	4,68	5,046
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,22	0,984	5,21	1,159
Ethansäure-(2-methyl)propylester	110-19-0	fruchtig Banane	5,34	1,057	5,34	1,258
Methylbenzen	108-88-3	x	5,95	1,725	5,94	1,762
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,12	0	7,12	0,062
Hexanal	66-25-1	frisch, grün	7,32	0,774	7,32	1,305
2-Methyl-1-propanol	78-83-1	x	7,72	0,108	7,72	0,409
2-Pentanol	6032-29-7	süßlich	8,75	0,712	8,75	0,899
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	süßlich Banane	8,78	2,075	8,77	2,187
Butanol	71-36-3	Käse	9,68	0,315	9,81	0,324
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	10,22	0,531	10,22	0,487

Fortsetzung zu Tabelle 27:

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 ($\mu\text{g/g}$ Banane)
2-Heptanon	110-43-0	Seife	11,05	0,008	11,07	0,007
3-Methylbutansäure-(2-methyl)propylester	589-59-3	fruchtig	11,47	0,186	14,48	0,217
3-Methyl-1-butanol	123-51-3	Käse	12,31	1,426	12,30	1,658
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	12,52	0,489	12,52	0,623
Butansäurebutylester	109-21-7	frisch	12,67	0,368	12,67	0,224
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	13,93	0,192	13,93	0,226
5-Hepten-2-on	6714-00-7		13,99	0,083	14,13	0,095
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	süßlich	14,77	0,536	14,77	0,442
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,10	0,285	15,10	0,299
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig Apfel	16,02	0,553	16,02	0,489
Hexanol	111-27-3	Toast	18,85	0,868	18,86	0,778
Butansäure-(1-methyl)hexylester	39026-94-3	x	19,00	0,001	19,00	0,002
2-Hexen-1-ol	928-95-0	x	20,77	0,284	20,78	0,392
Butansäurehexylester	2639-63-6	nussig	21,18	0,426	21,19	0,424
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	fruchtig	21,50	0,348	21,51	0,329
Hexansäurehexylester	6378-65-0	x	22,77	0,384	22,78	0,471

Fortsetzung zu Tabelle 27:

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 ($\mu\text{g/g}$ Banane)
Heptansäure	111-14-8	ranzig	31,09	0,286	31,10	0,296
Hexansäure	142-62-1	ranzig	39,44	0,528	39,45	0,380
2-Propensäure-(3-phenyl)methylester	1754-62-7	x	45,85	0,224	45,85	0,007
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	48,17	0,177	48,18	0,611
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	süßlich	49,39	0,592	49,46	1,342
Hexadecansäuremethylester	112-39-0	ölig	49,39	0,126	49,39	0,431
(Z,Z)-9,12-Octadecadiensäuremethyl ester	112-63-0	x	54,80	0,196	54,80	0,362
(Z,Z) 9,12-Octadecadiensäureethylester	544-35-4	x	55,40	0,132	55,40	0,865
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl)phenol	6627-88-9	blumig	55,81	1,656	55,74	1,823
9,12,15-Octadecatriensäure	7361-80-0	x	56,00	0,215	56,01	0,401
Tetradecansäure	544-63-8	x	59,10	0,505	59,12	0,665
Pentadecansäure	1002-84-2	x	61,65	1,356	61,66	Nicht quantifizierbar
Hexadecansäure	57-10-3	ölig	65,55	10,531	65,54	12,123

Tabelle 28: Identifizierte Substanzen der Bananenextrakten (Fraktion 1, Fraktion 2 und Fraktion 3) aus C1 und C2 des AB-Vergleich VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	Süßlich, fruchtig	3,11	0,296	3,33	0,387
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	3,21	0,096	3,55	0,125
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	3,65	1,314	4,05	1,296
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,65	0,953	7,65	0,817
Hexanol	111-27-3	Toast	8,82	0,135	8,82	0,152
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	Banane	8,95	0,971	8,94	0,998
2-Heptanon	110-43-0	Seife	9,68	0,285	9,68	0,279
2-Methylpropansäure-(2-methyl)propylester	97-85-8		12,92	0,154	12,94	0,198
2-Methylbutansäurepropylester	539-90-2	x	12,75	0,344	12,74	0,422
Butansäurebutylester	109-21-7	fruchtig, frisch	14,85	0,401	14,84	0,499
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,73	0,053	15,72	0,061
Hexansäure	142-62-1	x	15,75	0,511	15,76	0,498
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	16,42	0,750	16,43	0,778
Ethansäureheptan-2-yl-ester	5921-82-4	x	17,17	0,259	17,18	0,228
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	18,18	0,425	18,18	0,486
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig	20,85	1,032	20,82	1,397
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	25,22	0,185	25,22	0,267
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	27,65	0,160	27,65	0,186
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	32,79	0,216	32,78	0,245
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	x	41,35	0,348	41,34	0,371
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl)phenol	6627-88-9	x	43,35	1,231	43,35	1,317
Hexadecansäure	57-10-3	x	53,57	40,21	53,57	42,15
9,12-Octadecadiensäure	60-33-3	x	57,02	48,21	57,03	48,89

3.3 Prüfung der Bananenchargen und Containervergleichbarkeit

Um zu klären, ob die Reifeverzögerungen durch einen Unterschied in den miniaturisierten Kühlcontainern, die Reifestadien der Bananen selber oder beides zurückzuführen ist, wurden verschiedene Experimente durchgeführt (Material und Methoden, 2.8).

Tabelle 29: Kohlenstoffdioxid in C1 und C2 vor und nach dem Wechsel der Bananenfrachten

C1	C2	C1	C2
(C1 Bananenfracht)	(C2 Bananenfracht)	(C2 Bananenfracht)	(C1 Bananenfracht)
1400-1500 ppm (konstant)	Sensormaximum (2000 ppm)	Sensormaximum (2000 ppm)	1400-1500 ppm (konstant)

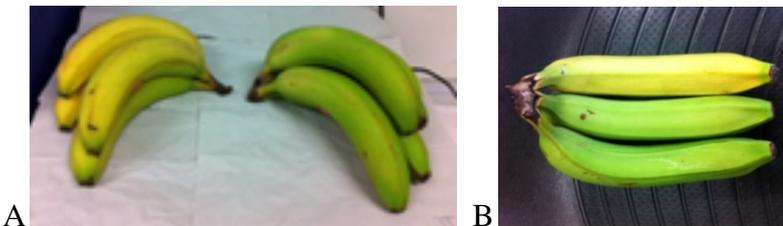


Abbildung 42: (A) zeigt zwei Cluster links einer Charge und (B) eine Hand unterschiedlicher Reifegrade.

Die Daten in Tabelle 29 zeigen, dass die Chargen unterschiedliche Atmungsaktivitäten aufweisen und somit ein Unterschied im Reifeprozess vorliegt. Des Weiteren zeigen auch die Abbildung 42 A und B, dass deutlich unterschiedliche Reifegrade in einer Charge und sogar bei Bananen in einem Cluster auftreten können. Somit ist ein direkter Vergleich, wie in den Versuchen angestrebt, nicht möglich.

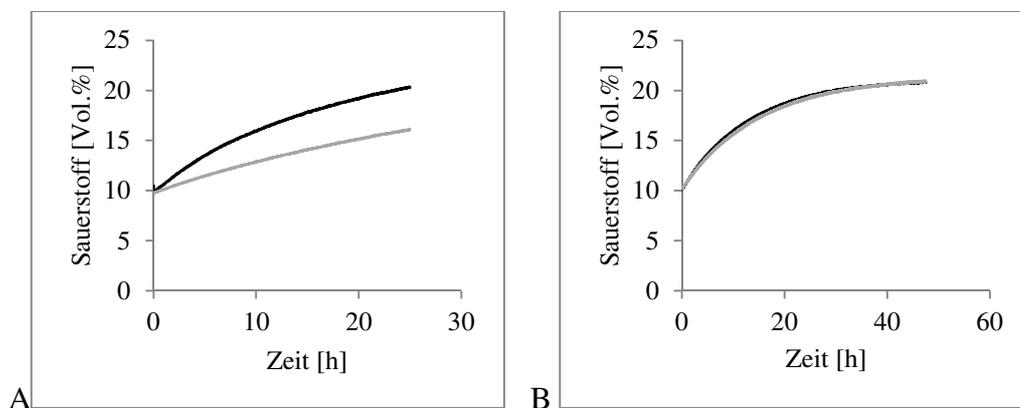


Abbildung 43: Dichtigkeitsvergleich (A) und Optimierung (B) der miniaturisierten Kühlcontainer. In beiden Versuchen wurde Stickstoff bis zu einer verdrängten Sauerstoffkonzentration von 10 Vol. % in die Kühlcontainer eingebracht. Es wurde die Dauer des Erreichens bis zur normalen Luftkonzentration von 22 Vol. % beobachtet. C1 (schwarz); C2 (grau).

Betrachtet man die Ergebnisse, die in Abbildung 43A dargestellt sind, wird deutlich dass der Luftaustausch in den miniaturisierten Kühlcontainern nicht vergleichbar war. In C1 ist ein deutlich höherer Luftaustausch zu verzeichnen. Diese Tatsache wirkt sich auch auf die durchgeführten Lagerungsversuche aus, da kein vergleichbarer Luftraum bzw. Luftaustausch für die gelagerten Früchte vorlag. Es kam unvermeidlich zu einem höheren Austausch von Ethen und CO_2 mit der Umgebungsluft durch den Austritt aus dem Container und dadurch zu einer Verzögerung der Reifung.

Um einen Vergleich möglich zu machen, besteht die Möglichkeit, die Container mithilfe der im Deckel angebrachten Ventile bezüglich des Gasaustausches mit der Umgebungsluft zu normieren (Abbildung 43B). Damit wäre aber keine Regulierung des Luftaustauschs anhand des CO_2 Gehalts mehr möglich.

3.4. Ionenproduktion in den miniaturisierten Kühlcontainern

3.4.1 Ionenbildung verschiedenen Ionisationsstufen

Um einen Anhaltspunkt zu bekommen, ob die angewendeten IS ausreichend für die durchgeführten Experimente gewesen sind, bzw. eine Vergleichbarkeit der eingebauten Röhren in den Containern gewährleistet ist, wurde die Ionenbildung unter verschiedenen Bedingungen mit IS 1 bis IS 8 verfolgt (Material und Methoden, 2.4.3).

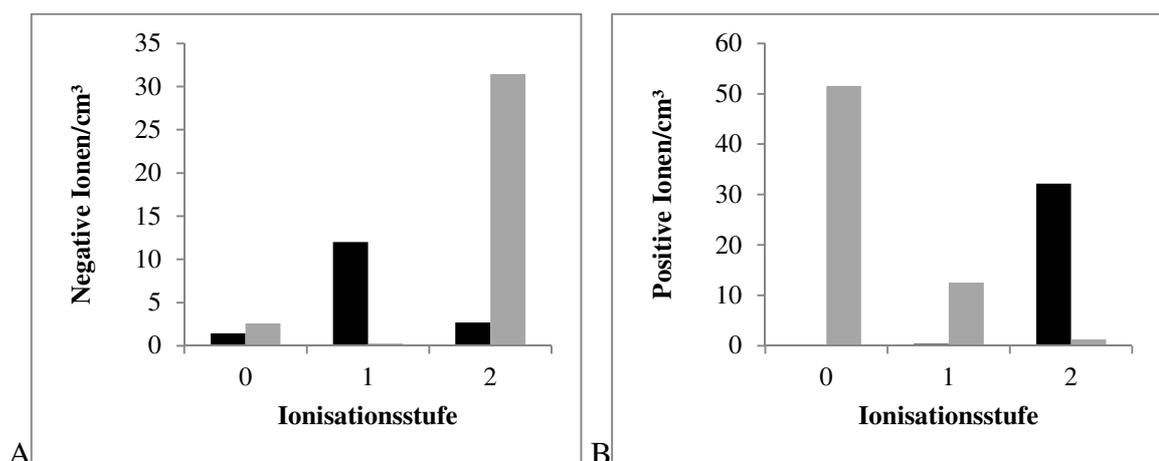


Abbildung 44: Ionenbildung negativer und positiver Ionen pro cm^3 in C1 (schwarz) und C2 (grau) bei 22 °C und angewendeten IS 0 – 2 mit drei eingebauten Typ B Röhren und einem 40 mesh Gitter.

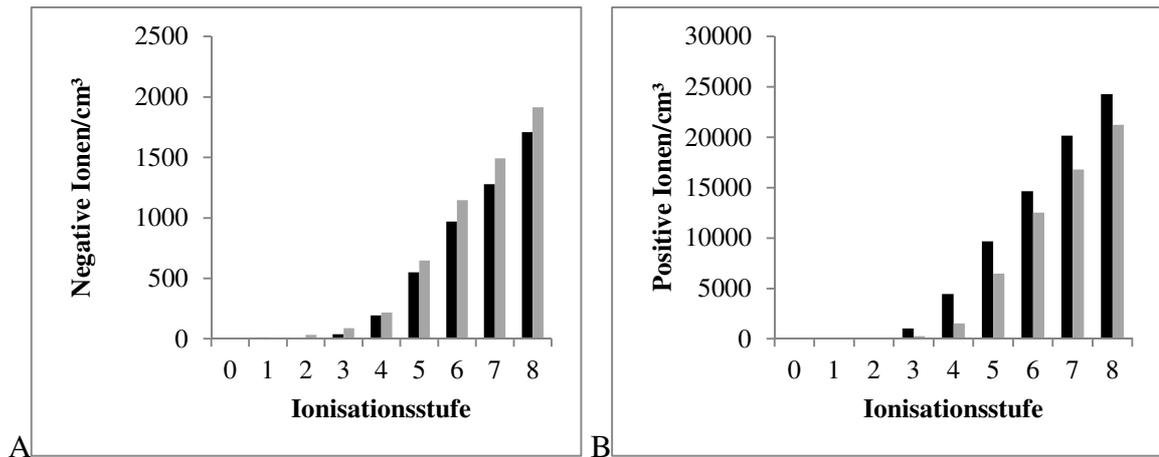


Abbildung 45: Ionenbildung negativer und positiver Ionen pro cm^3 in C1 (schwarz) und C2 (grau) bei $22\text{ }^\circ\text{C}$ und angewendeten IS 0 - 8 mit drei eingebauten Typ B Röhren und einem 40 mesh Gitter.

Betrachtet man die Ionenbildung bei IS 0-2 (Abbildung 44), so zeigt sich, dass die Ionenkonzentrationen sehr niedrig waren und daher nicht reproduzierbar gemessen werden konnten. Die Messungen wichen teils stark ab. Zudem war der Nullwert teils höher als die Messergebnisse bei angewandter Ionisation. Dies lässt vermuten, dass eine Messung im durchgeführten Abstand zur Röhre (30 cm) hier nicht ausreichend war, um eine Detektion zu gewährleisten.

Eine kontinuierliche Zunahme der Ionenbildung (Abbildung 45) und eine Ionenkonzentration weit über dem Wert der Raumluft (Nullwert) konnte ab IS 3 produziert werden. Zudem sind die Messungen in beiden Containern vergleichbar, sodass weitere Messungen bzgl. der Ionenbildung in C1 durchgeführt wurden.

Neben einer Ionenproduktion ist ab IS 3 parallel auch Ozon gebildet worden. Bei IS 3 wurde nach zehn Minuten 80 ppb Ozon gebildet. Ab IS 4 wurde jeweils der maximal messbare Wert des Sensors von 225 ppb erreicht.

3.4.2 Abhängigkeit der Ionenproduktion von Temperatur

Um zu sehen, ob die Ionenbildung von der Temperatur abhängig ist, wurden die in den Lagerungsversuchen erprobten Temperaturen ($13,5\text{ }^\circ\text{C}$ und $22\text{ }^\circ\text{C}$) bei IS 1, 4, 5, 6 und 8 verfolgt (Material und Methoden, 2.4.4).

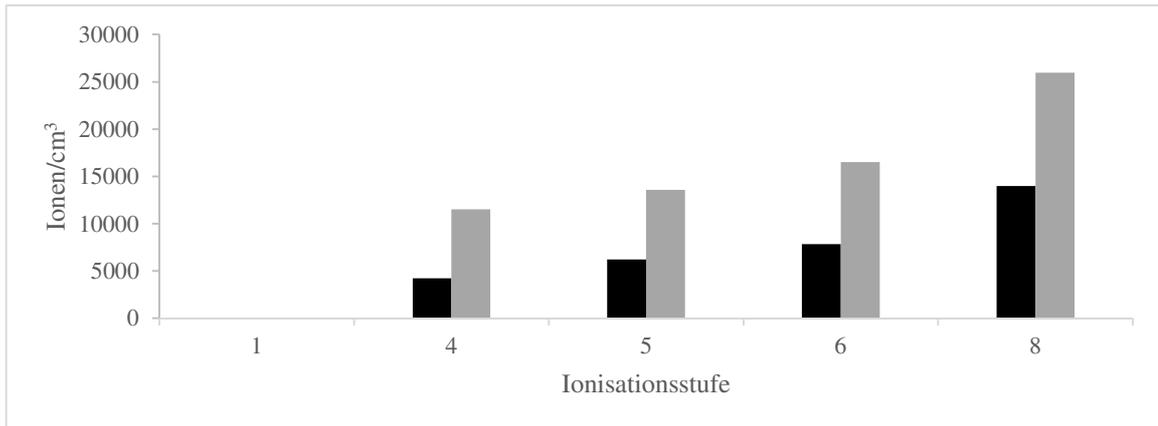


Abbildung 46: Ionenbildung (negativ und positiv) in C1 bei 13,5 °C (schwarz) und 22 °C (grau) und angewendeten IS 1, 4, 5, 6 und 8 mit drei eingebauten Typ B Röhren und einem 40 mesh Gitter.

Beim Vergleich der Ionenbildung in Abhängigkeit von Temperatur wurde deutlich, dass abnehmende Temperaturen eine Verringerung der Ionenkonzentration zu Folge hatte (Abbildung 46).

3.4.3 Ionenbildung unter variierenden Lufteinströmungen

Um zu sehen, wie stark die Ionenbildung von der Luftzufuhr und Umwälzung abhängt, wurden verschiedene IS bei unterschiedlichen Belüftungsbedingungen getestet.

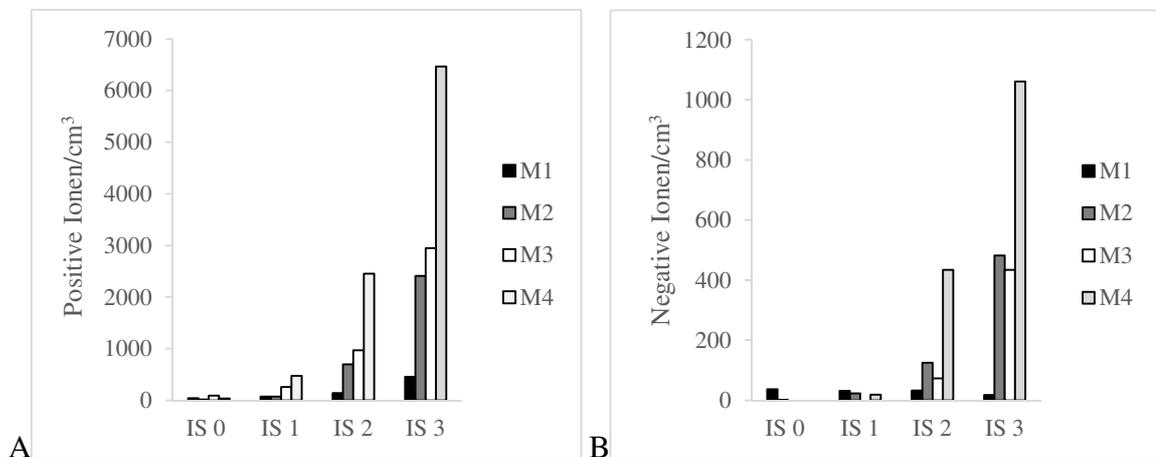


Abbildung 47: Gebildete positive (A) und negative (B) Ionen/cm³ im miniaturisierten Container unter verschiedenen Belüftungsbedingungen (M1-M4). IS 0-3, 3 Typ B Röhren (40 mesh).

M1: Ventilation aus, keine aktive Luftzufuhr

M2: Ventilation an, keine aktive Luftzufuhr

M3: Ventilation an, aktive Luftzufuhr (ca. 400 mL/min)

M4: Ventilation an, aktive Luftzufuhr (ca. 5000 mL/min)

Die Messung verschiedener Belüftungen im miniaturisierten Kühlcontainer zeigte deutlich, dass eine Luftumwälzung durch Ventilation, sowie eine Erhöhung der Luftzufuhr sich erheblich auf die Ionenproduktion auswirkt. Vergleicht man die Messungen, so wird

deutlich, dass die messbare Ionenkonzentration in einem Abstand von 30 cm zu den Röhren allein durch Ventilation um den Faktor vier bis fünf bei angewandter IS 1, IS 2 und IS 3 erhöht werden, zusätzlich mit aktiver Luftzufuhr von 5 L min^{-1} sogar um den Faktor 15 bis 20 (Abbildung 47).

3.4.4 Ionen- und Ozonproduktion mit und ohne Bananen

Um die Auswirkung eines beladenen Containers auf die Ionenkonzentration und Ozonbildung zu zeigen, wurden Messungen mit und ohne Bananen im miniaturisierten Kühlcontainer durchgeführt, die im Folgenden dargestellt sind.

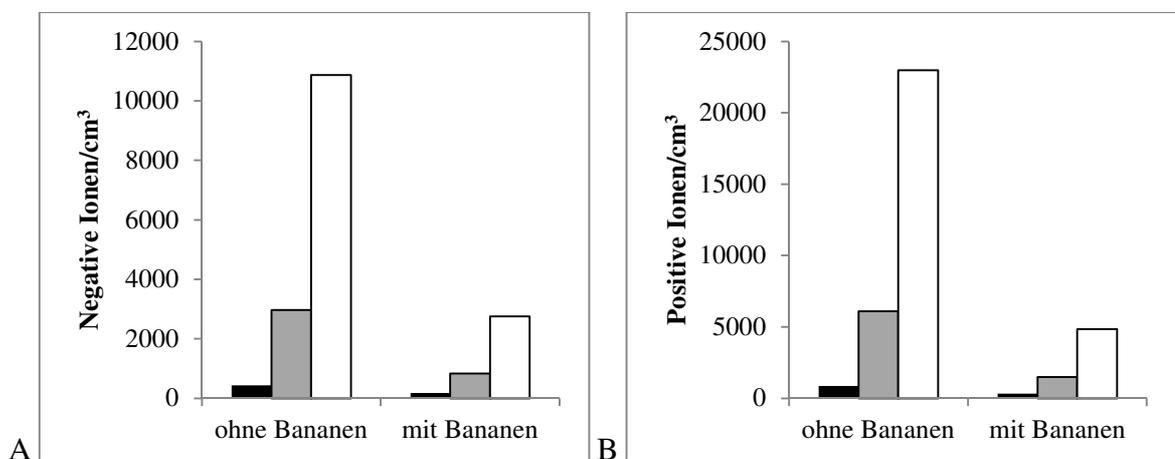


Abbildung 48: Negative und positive Ionen/cm³ mit zwei Typ D Röhren (40 mesh) und IS 1 (schwarz), IS 2 (grau) und IS 3 (weiß) bei 20°C, mit und ohne Bananen im Kühlcontainer.

In Abbildung 48 wird deutlich, dass durch eine Beladung der Container mit Bananen einen erheblichen Einfluss auf die Ionenkonzentration im Container hat. Betrachtet man die gebildeten Ionen mit IS 2 und IS 3, so wird ohne Bananen eine vierfach höhere Konzentration an positiven und negativen Ionen erzielt.

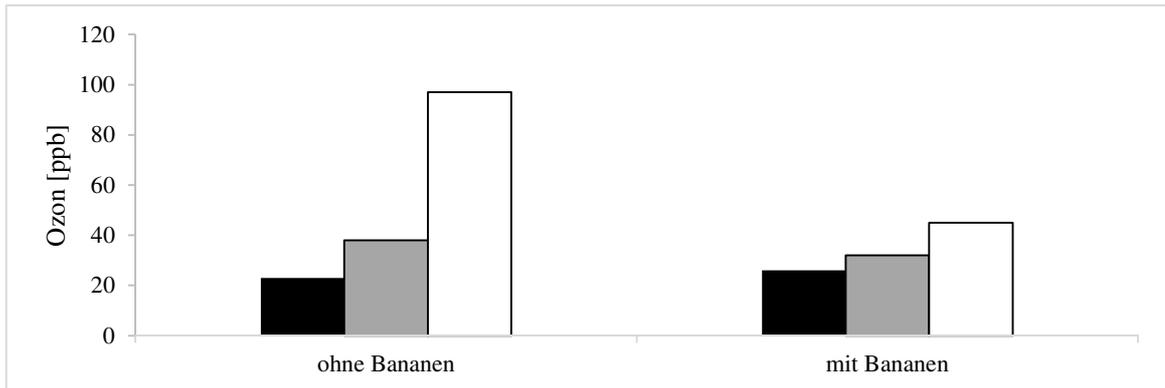


Abbildung 49: Ozongehalt gemessen nach zehn Minuten mit zwei Typ D Röhren (40 mesh) und IS 1 (schwarz), IS 2 (grau) und IS 3 (weiß) bei 20°C, mit und ohne Bananen im Kühlcontainer.

Auch das gebildete Ozon reagiert mit anderen Molekülen in der Gasphase und an den Oberflächen der Bananen ab. Nach einer eingeschalteten IS 3 für einen Zeitraum von zehn Minuten können ohne Bananen schon 100 ppb und mit Bananen nur 50 ppb Ozon im Luftraum nachgewiesen werden. Diese Messung zeigt, dass hier nicht nur von Ionisation, sondern auch von Ozonisierung gesprochen werden muss, da die Bildung von Ozon eine unmittelbare Folge der Ionisierung ist.

3.5 Ethenabbau in den miniaturisierten Kühlcontainern

Der Abbau von Ethen soll mittels Ionisation ermöglicht werden und somit die Bananen in ihrer Reifung zurückhalten. Um einen Anhaltspunkt zu bekommen, wie viel Ethen im Container in einem bestimmten Zeitrahmen mit und ohne Ionisation abgebaut werden kann, wurde, wie in 2. Material und Methoden 2.5 beschrieben, Ethen in C1 eingeleitet und die Abnahme verfolgt. In den folgenden Abbildungen sind die aufgenommenen Messwerte der beteiligten Gase dargestellt.

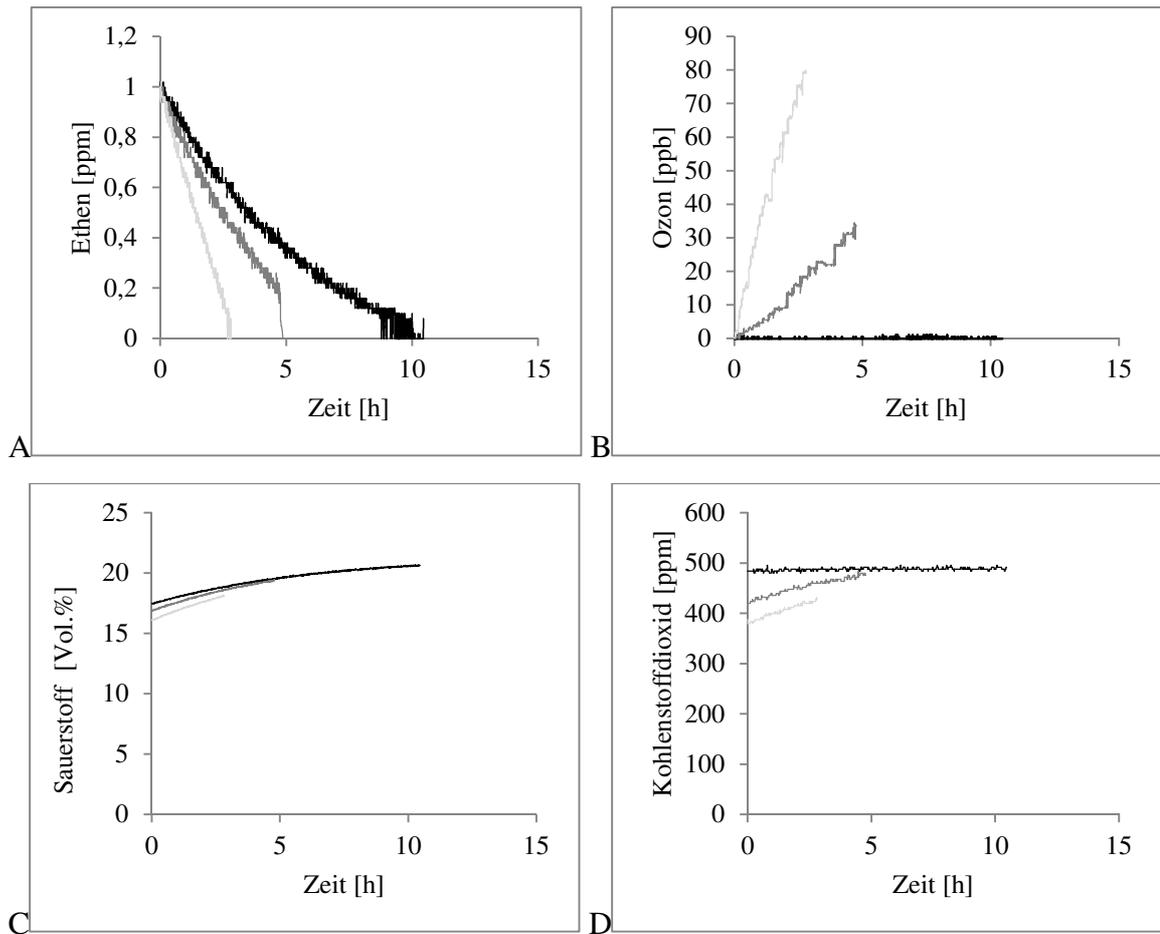


Abbildung 50: A) Ethenabbau und B) Ozonbildung C) Sauerstoffbildung und D) Kohlenstoffdioxidbildung in C2 bei 13,5 °C. Getestet wurden die IS 0 (schwarz), IS 1 (dunkelgrau) und IS 2 (hellgrau) mit drei eingebauten Typ B Röhren und einem 40 mesh Gitter. C1 wurde mit Ethen (10 ppm) auf eine Konzentration von 1 ppm begast.

Dieses Experiment zeigte, dass ein Abbau von Ethen in den miniaturisierten Containern möglich ist (Abbildung 50). Würde man den exponentiellen Abbau als linear annehmen, könnte ohne Anwendung von Ionisation $0,09 \text{ ppm h}^{-1}$ durch Gasaustausch entfernt werden, da die Container Undichtigkeiten (z.B. an den Arretierungen der Handschuhe u. a.) aufwiesen. Bei IS 1 konnten $0,21 \text{ ppm h}^{-1}$ und bei IS 2 $0,36 \text{ ppm h}^{-1}$ abgebaut werden.

Des Weiteren deuten die Zunahmen der Atmungsgase (Abbildung 50, C und D) während der Messung auf eine Ionen-Ozonreaktion hin. Zum Einen stieg der Sauerstoffgehalt, da Luft in den Container ein und Ethen austrat, da die Container, wie oben schon erwähnt nicht komplett gasdicht waren, zum anderen wird bei der Reaktion von Ozon z.B. mit Ethen, O_2 gebildet. Genauso verhält es sich für das CO_2 , welches auch im Zuge der Ozon-Ethen-Reaktion gebildet wird. Hier wird zudem deutlich, dass bei der IS 0 der CO_2 Gehalt unverändert vorlag und beim Anwenden von IS 1 und IS 2 der Gehalt zunahm. Die

Messungen der Ionenproduktion parallel zum Ethenabbau (nicht dargestellt) zeigten keine aussagekräftigen Ergebnisse. Es konnte kein Abbau von Ionen mit einem Abbau von Ethen in Verbindung gebracht werden, da eine messbare transiente Akkumulation von Ionen nicht auftrat.

4. DISKUSSION

4.1 Transportsysteme auf dem Weltmarkt

Wie in der Einleitung 1.5.1 beschrieben, ist der interkontinentale Transport von Bananen und anderen klimakterischen Früchten eine Herausforderung an die Logistik. Eine geschlossene Kühlkette von der Plantage über See bis ins Verbraucherland ist notwendig. Die wirtschaftlichste und umweltfreundlichste Methode ist der Einsatz von Kühlcontainern. Hier wird durch eine stabile Containertemperatur von ca. 13 °C und Verpackung der Bananen in z.B. Polyethylen zur Vermeidung von Wasserverlusten und passive Belüftung ein maximale Lagerstabilität von drei Wochen erreicht [28].

Zur Verlängerung der Lagerfähigkeit bzw. des Transportfensters gegenüber einfachen Kühltransporten sind aktuell unterschiedliche Modifikationen des Containertransports auf dem Markt etabliert oder werden erprobt. Eine häufig herangezogene Methode ist der Transport in kontrollierten Atomsphären in den Containern [29] [19]. Auf dem Markt für klimatisierte Container für den Fruchtettransport bieten verschiedene Hersteller Systeme mit kontrollierter Atmosphäre an, die in Kühlcontainer eingebaut werden können. Diese finden seit 1990 Anwendung [30].

Bei kontrollierter Atmosphäre werden Luftzusammensetzungen erzeugt, die unterschiedlich zur normalen Luftkonzentration, 21 % O₂ [v/v] und 0,05 % CO₂ [v/v], erhöhte CO₂ Gehalte von 5 bis 25 % [v/v] und reduzierte O₂ Gehalte von 1-3 % [v/v] aufweisen. Die Zusammensetzung, die die längste Haltbarkeit ergibt, variiert von Fruchtart zu Fruchtart [30]. Für Bananen wird eine Atmosphäre von bis zu 5 % [v/v] CO₂ und 2 % [v/v] O₂ in den Containern geschaffen [19, 37]. Erzeugt werden diese Atmosphären z. B. mit Stickstoff, der in die Lagerräume/Container eingespült wird. Oft finden auch CO₂-*Scrubber* Anwendung. Das Spülverfahren kann angewendet werden, sofern ein Stickstoffherzeuger vorhanden ist. Da der Restsauerstoffgehalt des erzeugten Stickstoffes in der Regel immer noch 2 bis 3 % [v/v] beträgt, kann der Sauerstoffgehalt im Lagerraum nicht nennenswert unter diesen Wert fallen. CO₂ reichert sich über die Atmung der Früchte an und wird über die Stickstoffzufuhr reguliert. CO₂-*Scrubber* hingegen entfernen das

überschüssige Gas aus dem Lagerraum. Diese arbeiten entweder mit Aktivkohle (die regeneriert wird) oder mit Kalk (der verbraucht wird) [31].

Diese Atmosphären können zu einer Inhibierung der Ethensynthese führen und zum Verzögern von Prozessen, die bei der Reifung zum Tragen kommen. Zum Beispiel bewirkt ein Mangel an O₂, dass die bei der Ethensynthese aktive ACC-Oxidase nicht arbeiten kann, da kein Elektronenakzeptor in Form von O₂ zur Verfügung steht [32, 33]. Weiterhin ist CO₂ ein Antagonist des Ethens [34] [35] und kann somit die Synthese hemmen, wodurch Signalwege geblockt werden.

Die Ausdehnung der Lager- und Transportfähigkeit kann auch durch Zugabe von starken Oxidationsmitteln wie Kaliumpermanganat in den Kühlcontainer erreicht werden [28].

Neben modifizierter oder kontrollierter Atmosphären wird seit 2009 versucht, ein membranbasiertes Verfahren zu etablieren, welches das überschüssige CO₂ selektiv aus der Containeratmosphäre herausfiltert und so eine mögliche Anaerobiose der Früchte verhindert. So kann eine Verlängerung der Transportzeit auf über vier Wochen ermöglicht werden. Die Durchströmung der CO₂-selektiven Membran mit Containerluft wird mit Hilfe von Vakuumpumpen bewerkstelligt, während der O₂-Gehalt aktiv über Lüftungsclappen reguliert werden kann. Durch das selektive Abtrennen von CO₂ und die regulierte Zufuhr von O₂ kann Energie eingespart werden, die zum Abkühlen der Austauschluft erforderlich wäre [38]. Ob das System den Anforderungen der Praxis standhält, ist nicht bekannt.

Des Weiteren wird zunehmend das hoch reaktive Ozon zum Abbau des Ethens herangezogen. Seit 2001 zählt Ozon zu den Substanzen, die als GRAS (*generally recognized as safe*) deklariert werden [39]. Die Nutzung von Ozon in Lagerräumen, Packhäusern oder Lagertransporten beinhaltet eine Kontrolle möglich entstehender Krankheiten nach der Ernte, das Verzögern von Sporenbildung, die Hygiene von Oberflächen, wie auch die Entfernung von Ethen. Anwendungen von Ozon in der Luft auf diesen Gebieten wurden im Laufe der Jahre erforscht [36, 40-45]. Bei hohen Ozonkonzentrationen von 200 ppm, die für eine Stunde angewandt wurden, zeigten Ergebnisse eine Woche nach Behandlung bei Zwiebeln, Zitrusfrüchten und Kiwis keine Beschädigung, wohingegen selbige Konzentrationen bei Steinfrüchten, Pilzen, Mangos, ungewachsenen Äpfeln und Birnen, sowie auch bei Bananen Beschädigungen an der Schale

hervorriefen. Bei Bananen wird dies durch eine Schwarzfärbung sichtbar; zudem verliert die Schale an Konsistenz und zerfällt [42].

Je nach Frucht und deren Ethensynthese werden unterschiedliche Konzentrationen des Ozons im Transportraum erzeugt. Für Handelswaren, wie Bananen, kann Ozon möglicherweise von großem Nutzen sein. Skog und Chu zeigten [43], dass eine Ozonkonzentration von 400 ppb bei Apfel- wie Birnenlagerungen den Ethengehalt reduzieren konnte, ohne Einbußen in der Qualität der Frucht hervorzurufen. Laut einer Internetpräsenz [44], die sich mit dem Thema Ozon in Lebensmittellagerungen befasst, wird berichtet, dass nur wenige ppm Ozon eine Reifeverzögerung bei Bananen hervorrufen, sofern die Bananen sich noch nicht in der klimakterischen Phase befinden. Bei *PurOtec* [46] wird damit geworben, dass eine kontinuierliche Anwendung von Ozon während der Lagerung von 80 bis 300 ppb den Ethengehalt auf 2 ppb halten kann. Eine Zuordnung der Fruchtart zur jeweils empfohlenen Ozonkonzentration wird von den Firmen nicht preisgegeben.

Neben der genannten Möglichkeiten wäre die Luftionisierung zur Neutralisierung der Reifegase dagegen ein schonendes, betriebsstabiles, chemikalienfreies und Energie sparendes Verfahren, das gleichzeitig nützliche Entkeimungseffekte auf der Fruchtschale erwarten lässt. Zudem könnte durch kontinuierlichen Ethenabbau das Transportfenster ausgedehnt werden.

Hierfür war es erforderlich, die Gaszusammensetzung und die Klimatisierung eines Containers zum Fruchtttransport gezielt zu steuern, was im Zuge dieser Arbeit im Miniaturmaßstab erprobt wurde.

4.2 Ionisation im Fruchtttransport – Erprobung im Miniaturmaßstab

Um ein neues Prinzip neben etablierten Transportsystemen zu erproben, wurden im Zuge dieser Arbeit verschiedene Versuche im Miniaturmaßstab durchgeführt, deren Einflussfaktoren hier näher diskutiert werden.

4.2.1 Einflussfaktoren der Reifeverzögerung im Miniaturmaßstab

Im Verlauf der Arbeit konnten mit den simulierten Lagerungen verschiedene Faktoren erkannt werden, die eine Anwendung der Ionisation im Miniaturmaßstab beeinflussen. Verschiedene angestrebte Ziele konnten parallel nicht erreicht werden und erforderten den Ausschluss einer Variablen. Hierunter fallen die Regelung der Atmungsgase- und Reifegase sowie die Produktion von ausreichend Ionen ohne eine Anreicherung von Ozon. Zudem war der Reifegrad der unreifen Bananen einer Charge zu Beginn einer jeden Lagerung nicht homogen und barg somit Schwierigkeiten in der Vergleichbarkeit.

4.2.2 Luftumwälzung und Luftzufuhr vs. Regulation und Detektion der Atmungsgase

Schon im Zuge der ersten Probelagerungsversuche (Ergebnisse, 3.1) konnte der Einfluss der Belüftung auf den Reifeprozess beobachtet werden. Es konnte durch die aktive Luftzufuhr, die in den Probelagerungen II und III angewandt wurde, eine deutliche Verminderung der Ethenkonzentration (Faktor drei bis vier) gegenüber der Probelagerung I erzielt werden. Dies konnte auch in weiteren Versuchen beobachtet werden, sofern eine Regulierung des CO₂ Gehalts mit aktiver Luftzufuhr erzielt wurde, da dies parallel ein kontinuierliches Ausblasen des Ethens aus dem Container bewirkte und somit eine genaue Erfassung des Ethens verhinderte. Somit wurde erprobt, welchen Einfluss die Luftumwälzung und ein Verzicht der CO₂ Regulierung auf den Reifeprozess hatte. Mit dem Verzicht auf einen Luftaustausch konnte eine Messung des gebildeten Ethens verfolgt werden; zudem konnte im Zuge des Verzichts auf Luftumwälzung durch Ventilation ein erhöhter Anstieg des Ethens beobachtet werden. Folglich konnte aber keine Regulierung der Atmungsgase erzielt werden, resultierend in einem drastischen Anstieg des CO₂-Gehalts und im Zuge des fehlenden Luftaustauschs auch eine Abnahme des O₂ Gehalts (Ergebnisse, 3.2.2). Diese Ergebnisse zeigten deutlich, wie wichtig eine gute Belüftung bei der Lagerung von klimakterischen Früchten ist. Es kann allein mit einer ausreichenden Belüftung und dem daraus resultierenden Luftaustausch eine deutliche Minderung des Ethens ermöglicht werden. Allerdings ist dieser Effekt nicht auf eine Lagerung im Großmaßstab übertragbar bzw. kann im Großmaßstab nicht ebenso umgesetzt werden. Gründe dafür liegen in Frachtmenge und der Art der Beladung der Transportcontainer. Hier werden bis zu 20 t Bananen übereinander gestapelt transportiert und füllen nahezu den gesamten Raum der Container aus. Durch spezielle Verpackungen und mit Luftrillen

konstruierte Böden (die auch im Miniaturcontainer umgesetzt wurden) wird ein Luftaustausch inmitten, neben, wie auch unterhalb der Fracht gewährleistet. Trotzdem ist der Austausch der Luft in einer Füllung von 20 t Bananen weit geringer als in den erprobten Miniaturkühlcontainern, in denen nur ein Karton mit 18 kg Platz fand. In den miniaturisierten Containern ist zum einen ein größerer nicht mit Bananen gefüllter Luftraum vorhanden, zum anderen wird die Luft direkt oberhalb der Bananen abgeführt. Des Weiteren konnte in AB-Vergleich 3.3.3 belegt werden, dass eine Luftumwälzung eine zentrale Rolle spielt, um das angestrebte Ziel, das Ethen durch Ionisation zu eliminieren, zu realisieren. Es kam erstmals zu einem Reifefortschritt im Container mit Ionisation. Hier wurde von Beginn an keine Luftumwälzung und Luftzufuhr gewährleistet, wodurch eine ausreichenden Produktion und Verteilung der Ionen nicht realisiert und die Wirkung somit stark eingeschränkt war. Die messbare Ionenkonzentration in einem Abstand von 30 cm zu den Röhren kann mit IS 1, IS 2 und IS 3 allein durch Ventilation um den Faktor vier bis fünf erhöht werden, zusätzlich mit aktiver Luftzufuhr von 5 L min^{-1} sogar um den Faktor 15 bis 20 (Ergebnisse, 3.4.2). Wichtig war ferner der Messabstand zu der Ionen produzierenden Corona-Entladung. Da Ionen nach der Bildung an der Röhre nicht lange verweilen und schnell abreagieren, wird unter den im Container bestehenden Bedingungen nur ein kleiner Teil der tatsächlich produzierten Ionen im Abstand von 30 cm zur Röhre erfasst. Diese Tatsache bestätigt nochmals die Wichtigkeit einer konstanten Luftzirkulation. Eine wirksame Nutzung der Ionisation zur Ethen-Eliminierung kann im Miniaturmaßstab nur erfolgen, wenn das Reifegas an den Röhren vorbei geleitet und dort abgebaut wird.

4.2.3 Vergleichbarkeit der Bananen und der miniaturisierten Kühlcontainer

Ein weiterer wichtiger Aspekt der sich schon in den Probelagerungen widerspiegelte, war der unterschiedliche Reifegrad der Versuchsbananen von Beginn an. Hier gaben die im Labor gelagerten Cluster, die parallel zu Kontrolle beobachtet wurden, ein Indiz zu unterschiedlichen Reifegraden der vom Großmarkt bezogenen Bananen. So zeigten Kontrollbananen (ohne Ionisation gelagert) aus der ersten und zweiten Lagerung nach gleicher Verweilzeit eine deutlich fortgeschrittene Reifung im Vergleich zur dritten Lagerung (Ergebnisse, 3.1.1-3.1.3, Abbildung 9, Abbildung 11, Abbildung 14). Allerdings wurden hier keine Bananen derselben Charge verwendet, da die Versuche nur in einem

Container und somit zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt wurden. Dies führte zu dem Schluss, dass ein direkter Vergleich nur möglich ist, sofern Bananen einer Charge (selbe Vorgeschichte) parallel gelagert werden. Um diese methodische Unschärfe zu eliminieren, wurde ein zweiter baugleicher Minicontainers beschafft, so dass direkte AB-Vergleiche mit und ohne Ionisierung mit Bananen einer Charge und damit identischer Vorgeschichte durchgeführt werden konnten. In den Versuchen 3.2.4-3.2.6 kristallisierte sich heraus, dass auch in einer Bananencharge gravierende Unterschiede im Reifefortschritt vorliegen können und somit eine unterschiedliche Reifung resultiert. Es kam zum einen zum vorzeitigen Reifebeginn im Ionisationscontainer, obwohl eine Luftumwälzung gewährleistet wurde, zum andern konnten auch ohne Ionisation in beiden Containern Unterschiede beobachtet werden. Die vom Großmarkt bezogen Bananenchargen variierten dementsprechend und wiesen auch innerhalb einzelner Cluster bereits unterschiedliche Reifefortschritte (Ergebnisse, 3.3) auf. Auch mit Bananen aus der Karibik, welche zum Zweck einer nachvollziehbaren Vorgeschichte herangezogen wurden, konnten zu Beginn der Lagerung anhand der Gesamtzucker und der höheren Atmungsrate deutlicher Unterschiede im Reifefortschritt festgestellt werden (Ergebnisse, 3.2.8). Neben der Inhomogenität der Bananen wurde festgestellt, dass der Luftaustausch in den miniaturisierten Kühlcontainern nicht vergleichbar war. In C1 war unter gleich eingestellten Bedingungen ein deutlich höherer Luftaustausch zu verzeichnen. Um einen Vergleich möglich zu machen, bestand die Möglichkeit, den Gasaustausch der Container mithilfe von Öffnen und Schließen der im Containerdeckel angebrachten Ventile mit der Umgebungsluft zu normieren (Ergebnisse 3.3, Abbildung 43B).

4.2.4 Ionen/Ozon

Da aufgrund der unterschiedlichen Reifezustände keine Verzögerung durch Ionisation und Ozonisierung zu beobachten war, kann nur auf die gemessene Eliminierung des Ethens eingegangen werden. Betrachtet man die Zunahme von Ethen in den Containern, so korrelierte diese in C2 gut mit dem Reifebeginn (Versuch 3.2.7). Im C1 konnte trotz Beginn der Reifung keine Zunahme an Ethen beobachtet werden, was auf die angewandte Ionisation und Ozonisierung zurückzuführen sein musste.

Ob die Ionisation allein oder anteilig auch durch das gebildete Ozon einen Abbau des Ethens hervorgerufen hat bzw. in welchen Verhältnis der Abbau zu beiden Faktoren stand,

konnte nicht belegt werden. Allerdings kann man aufgrund der hohen Reaktivität des Ozons von einer Beteiligung am Prozess ausgehen.

Ethen ist ein ungesättigter Kohlenwasserstoff, dessen Doppelbindung von Ionen, wie aber auch von Ozon elektrophil angegriffen werden kann. Als Endprodukte der Oxidation bilden sich im Idealfall CO_2 und H_2O . So kann das Ethen abgebaut werden und eine Reifeverzögerung hervorgerufen werden. Die Reaktion von Ozon mit Ethen ist bekannt und im Transport klimakterischer Früchte auf dem Markt etabliert. Neben einer Etheneliminierung hat Ozon auch eine antimikrobielle Wirkung, die einen vorzeitigen Verderb der Früchte und die Bildung von Pathogenen verhindern kann [40-41]. Eine Reifeverzögerung ausschließlich durch chemische Ozonisierung der Container wurde in dieser Arbeit jedoch nicht angestrebt, da hohe Ozonkonzentrationen neben der Oxidation des Ethens auch unerwünschte Nebenreaktionen mit Inhaltsstoffen der Banane zur Folge haben können. Es ist literaturbekannt [43], dass eine Ozonkonzentration von bis zu $0,4 \mu\text{L L}^{-1}$ bei Apfel- wie Birnenlagerungen den Ethengehalt reduzieren kann, ohne Einbußen in der Qualität der Frucht hervorzurufen. Deshalb galt es neben den AB-Vergleichen, erhöhte Ozonkonzentrationen durch die Ionisierung im Container zu vermeiden oder diese gezielt zu regulieren. Zudem wurden, um einen negativen Einfluss des Ozons ausschließen zu können, nach Versuchsende die Bananen sowie der Luftraum im Container auf mögliche Ozonisierungsprodukte hin untersucht. Hierbei konnten keine negativen Veränderungen durch das Ozon festgestellt werden (Ergebnisse, 3.2.1 und 3.2.8, Anhang 7.1 und 7.2). Des Weiteren ist die Ausprägung des typischen Bananenaromas ein wichtiges Kriterium für die Reifung, gerade unter dem Einfluss von Ozon. Die einzelnen Fraktionen zeigten zwar Unterschiede in den Substanzmengen, allerdings konnte nach Addition der in den Fraktionen mehrfach vorkommenden Substanzen vergleichbare Konzentration ermittelt werden. Hier ist deshalb nochmal hervorzuheben, dass keine Einbußen in der Quantität der Aromastoffbildung speziell bei den für das Bananenaroma ausschlaggebenden Komponenten [10], 2-Pentanon, Ethansäure-(3-methyl)butylester und Ethansäure-(2-methyl)propylester, festgestellt werden konnten. Somit konnte trotz der parallelen Ozonisierung eine optimale Fruchtreifung erzielt werden. Untypisch ist der Nachweis bestimmter Methylester (z.B. Hexadecansäuremethylester und 9,12-Octadecadiensäuremethylester), die detektiert wurden. Hier ist es wahrscheinlich, dass bei

der Homogenisierung der Bananen in Methanol eine Veresterung der aktivierter Fettsäuren (CoA-Ester) und dem Alkohol zum Tragen kam.

4.3 Miniatur vs. Großmaßstab

Um das „*Proof of Principle*“ zu erbringen, müsste ein mit Ionisierungsröhren ausgestatteter Container mit Bananen oder anderen Früchten auf den Seeweg gebracht werden. In dieser Arbeit konnte die Arbeitshypothese nicht abschließend bestätigt werden, da die angestrebten Ziele im Miniaturmaßstab nicht direkt umzusetzen waren. Allerdings kann man die im Miniaturmaßstab als kritisch ermittelten Einflussfaktoren nicht direkt auf den Großmaßstab übertragen. Zudem zeigten die Ergebnisse des ersten Großcontainertransports, dass die Kontrolle der Parameter, die im kleinen Maßstab zu Schwierigkeiten führte, realisierbar war (2. Material und Methoden, Tabelle 12).

In den hier durchgeführten Experimenten stellte der Luftaustausch einen zentralen Faktor dar, der dazu führte, dass die Arbeitshypothese im Miniaturmaßstab nicht belegt werden konnte.

Es konnten allein durch kontinuierliche Luftumwälzung und Frischluftzufuhr Verlängerungen der Lagerzeit auf zehn Wochen (Transportfenster Schiff plus Lagerzeit im Labor) erzielt werden. Dieser Effekt kann im Großmaßstab vermutlich nicht ebenso einfach erzielt werden. In einem üblichen Schiffscontainer werden bis zu 20 t Bananen gelagert. Durch eine spezielle Konstruktion der Verpackung (Stülpfaltschachtel) wird hier auch innerhalb der gestapelten Bananen ein geringer Luftaustausch gewährleistet. Dennoch ist der dort zum Tragen kommende Austausch weit geringer als mit den hier angewandten experimentellen Möglichkeiten. Im miniaturisierten Container wurde nur eine Box mit 18 kg Bananen gelagert, und der Luftaustausch fand direkt oberhalb der Box statt. Ethen konnte direkt entweichen. Im Großmaßstab kann das gebildete Ethen oberhalb der Bananen nicht direkt entweichen, sondern muss effizient abgebaut werden. Hier würde sich die Luftionisation als denkbare Lösung anbieten. Verglichen mit den im Miniaturmaßstab angewandten Luftumwälzungstärken und Ionisationsröhren werden im Großmaßstab Ventilatoren eingesetzt, die doppelt so starke Luftumwälzungen der

Containerluft erzeugen. Diese könnten im Bestfall eine ausreichende Zuführung des Reifegases zu den Röhren ermöglichen. Diese Belüftung konnte im Miniaturmaßstab nicht erprobt werden, da schon bei geringeren Luftumwälzungsgeschwindigkeiten das Ethen durch Luftaustausch aus dem Containerluftraum entfernt wurde. Zudem könnten durch effizientere Röhren wesentlich höhere Ionenkonzentrationen produziert werden, die ohne eine Ozonanreicherung direkt im Containerluftraum Ethen eliminieren. Im Miniaturmaßstab war eine Anreicherung des Ozons selbst im unteren Bereich der Ionisationsleistung nicht zu vermeiden. Diese Anreicherung findet im Großmaßstab nicht statt, was Daten eines Versuchstransports belegen (2. Material und Methoden, Tabelle 12). Beim Versuch im Großmaßstab vom April/Mai 2011 wurde im Laufe der Lagerung eine Höchstkonzentration von 8 ppb gemessen. Dies war hauptsächlich auf das Verpackungsmaterial der 20 t Bananen sowie die Bananen selbst zurückzuführen, an denen Ozon abreagieren konnte.

Positiv anzumerken ist, dass in den Lagerungsversuchen eine Anreicherung des Ethens verhindert werden konnte. Es wurde ohne Ionisation eine Bildung des Ethens direkt mit dem Reifebeginn beobachtet. Bei der Anwendung von Ionisation konnte im Zuge der Reifung zunächst keine Ethenzunahme beobachtet werden. Wie groß der Effekt der Ionen neben dem gebildeten Ozon war, konnte nicht aufgeklärt werden. Allerdings wurden bewusst nur geringe Ozonkonzentrationen unter 150 ppb während zweidrittel der Lagerzeit erlaubt, um sich von den auf den Markt etablierten Methoden abzugrenzen. Zum Ende, als eine Reifung schon begonnen hatte, wurde die Konzentration bewusst erhöht, um die Auswirkung auf das Aroma untersuchen zu können. Hier konnten keine Fehlgerüche festgestellt werden.

4.4 Vorteil der Ionisation im Transport von klimakterischen Früchten

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Transportmöglichkeiten wären die wesentlich niedrigeren Investitionskosten gegenüber anderen Verfahren. Zudem würden die Betriebskosten durch den verringerten Energieverbrauch entscheidend gesenkt.

Betrachtet man die kontrollierte Atmosphäre in Containern, ist diese zwar effizient, aber auch mit den hohen Energiekosten belastet. Sie birgt den Nachteil, dass sie technisch sehr aufwändig ist und nur mit speziell ausgerüsteten Containern realisiert werden kann. Zudem ist die Reparaturanfälligkeit hoch. In kontrollierter Atmosphäre muss zudem für jede Frucht eine bestimmte Luftzusammensetzung geschaffen werden [30]. Des Weiteren ist es bis jetzt noch nicht gelungen, die Fracht länger als bis zu fünf Wochen zu lagern, ohne dass eine unkontrollierte Reifung der Frucht eintrat und die Ware somit nicht mehr für den Lebensmittelgroßhandel verwendbar war [28]. Aufgrund der reduzierten O₂ Gehalte und erhöhten CO₂ Gehalte war es zudem zu Schädigung der Früchte kommen. Diese äußerten sich in Verfärbungen der Früchte, Bildung von *off-flavors* oder Weichwerden der Schale der noch unreifen Früchte, sobald einer dieser Parameter über- oder unterschritten wurde [32].

Ein handelsüblicher Kühlcontainer kostet bis zu 6.000 €. Eine Ausstattung mit den Bioclimatic-Ionisationssystemen würde den Stückpreis auf knapp 7.000 € erhöhen [47]. Die Ausstattung von verschiedenen Containern mit kontrollierter Atmosphäre liegt weit über 10.000 € [48].

Es gibt auch preisgünstigere Verfahren mit kontrollierter Atmosphäre, wie z. B. das etablierte TransFRESH System. Allerdings bergen auch diese Nachteile. In diesen Systemen wird beim Beladen des Containers eine Anfangsatmosphäre durch die Atmung der Früchte und durch passive Belüftung über zwei Öffnungen in der Seitenwand des Containers erzeugt. Das System kann diese Atmosphäre halten, indem Frischluft in den Container gegeben wird und ein CO₂-*Scrubber* mit gebranntem Kalk an- und ausgeschaltet wird. Voraussetzung für einen erfolgreichen Transport sind dabei sehr gasdichte Container. Nachteile dieses Systems sind zu einen der Kalk-*Scrubber*, welcher nach einer bestimmten Zeitperiode erschöpft ist. Bei unvorhersehbarer Verlängerung der Transportzeit durch z.B. Verzögerungen bei Auslieferung einer Fracht an einem Zielhafen, kann der *Scrubber* keine Leistung mehr erbringen und der CO₂ Gehalt steigt an, wodurch die Atmung der Früchte ansteigt oder bei zu hohen CO₂ Konzentrationen eine Gärung eintritt. Neben dem Nachteil, dass die CO₂ *Scrubber* nach bestimmter Zeit verbraucht sind, muss bedacht werden, dass der Ethen-Anteil nicht ansteigt, sobald es bei einigen Früchten zur Reifeinduktion kommt [31].

Zum Entfernen des Ethens werden heutzutage Oxidationsmittel wie z. B. Kaliumpermanganat herangezogen [28]. Alternativ wird die Ethensynthese mittels Inhibitoren wie 1-Methylcyclopropan gehemmt [49] oder das Ethen unreguliert (Grobregulierung lediglich über Stellung der Lüftungsschlitze der Container) durch ständige Belüftung mit großen Ventilatoren und einem aufwändigem Luftführungssystem aus dem Container entfernt. Nachteil der Oxidationsmittel ist, dass sie sich über die Zeit verbrauchen. Die unregulierte Belüftung mit Außenluft über die Stellklappe der Container führt in tropischen Breitengraden zu einem höheren Energiebedarf, da die einströmende Luft gekühlt werden muss. Ist dies nicht ausreichend gegeben, kommt es zu Veränderungen in der Luftfeuchte im Container. Zudem können bereits kurzzeitige Temperaturerhöhungen zu unerwünschten Induktionen der Fruchtreife führen.

Mit der Luftionisation ermöglichen sich hier neue Wege. Ethen kann durch Reaktion mit Ionen und Ozon direkt abgebaut werden und könnte z. B. gekoppelt mit einem CO₂ *Scrubber* und einer Kühlvorrichtung Anwendung finden. Es wäre ein schonendes, betriebsstabiles, Chemikalien freies und Energie sparendes Verfahren, das gleichzeitig nützliche Entkeimungseffekte auf der Fruchtschale hervorrufen kann. Hiermit könnte das Transportfenster gegenüber Containern, die lediglich über eine steuerbare Kühlung verfügen, ausgedehnt werden. Ferner stellt die Luftionisierung eine kostengünstigere Variante im Vergleich mit der bereits etablierten Lagerungen in kontrollierter Atmosphäre dar.

4.5 Etablierung auf dem Markt

Durch die Kontakte zu einer Reederei, die die Firma *Bioclimatic* pflegt, wurde bestätigt, dass ein beachtlicher Bedarf an einer innovativen, konkurrenzfähigen Technologie zur Reifeverzögerung im Vergleich zu den konventionellen Methoden besteht. Bei erfolgreicher Umsetzung und Vermarktung bedeutet das Prinzip der Luftionisation im Transport klimakterischer Früchte somit einen technischen Vorsprung im Markt. Die Firma *Bioclimatic* würde ein kombiniertes Klimatisierungssystem für Seecontainer mit deutlich verbesserten Gaszusammensetzungen und einer sensorgesteuerten Regelung am Markt anbieten und weitere neue Produktlösungen kreieren können (Kopplung mit anderen

Anwendungen). Es ist mit sehr guten Vermarktungschancen zu rechnen, da auf dem Gebiet der Containerklimatisierung in Bezug auf die verlängerte Transitzeit, unter dem Gesichtspunkt der Reifesteuerung, der Hygiene und der Energieeffizienz seit mehreren Jahren keine bahnbrechende Neuerung auf dem Markt eingeführt wurde.

Das System zur Kontrolle aller zur Verfügung stehenden Reifeparameter, welches auch schon im Versuchstransport Anwendung fand (2. Material und Methoden, Tabelle 12) wäre ein kostenoptimiertes System, welches sich sowohl in Bestandscontainer als auch in Neubaucontainer integrieren ließe. Das System würde eine leichte Wartung und Instandsetzung ermöglichen, wodurch keine hohen Folgekosten anfallen würden. Auch die Realisierung aller Funktionalitäten auf eine breite Anwendung an Früchten wäre umzusetzen, ohne Anpassungen der Luftatmosphäre an die Frucht vornehmen zu müssen, wie es in den Containern mit kontrollierter Atmosphäre der Fall ist.

5. FAZIT UND AUSBLICK

Zum Ende der Arbeit kann festgestellt werden, dass eine Eliminierung von Ethen durch Ionisation in den miniaturisierten Containern dann wirksam ist, wenn die Ionisation soweit hochreguliert wird, dass auch Ozon gebildet wird. Der Dauerbetrieb auf dieser Ionisationsstufe ist jedoch nicht sinnvoll, da es mit fortschreitender Betriebsdauer zu einer hohen Akkumulation von Ozon im miniaturisierten Container kommt. Im Gegensatz zum Ozon, welches sich als Gas gleichmäßig im Container verteilt, ist die Wirkung der Ionen auf die unmittelbare Umgebung beschränkt. Deshalb kommt der Luftumwälzung und der Belüftung zentrale Bedeutung zu. Nur bei ständiger Luftumwälzung ist gewährleistet, dass gebildetes Ethen den Ionisationsröhren schnellstmöglich zugeführt wird. In den miniaturisierten Container ist es ferner möglich, die Kohlendioxidkonzentration durch aktive Begasung auf einen Gehalt < 2000 ppm zu halten, was einem Übergang der Bananen in die Anaerobiose entgegenwirkt. Damit wird gleichzeitig gebildetes Ethen ebenfalls entfernt, was einen möglichen positiven Effekt der Ionisation überlagert.

Weiterhin wurde festgestellt, dass der Reifungsgrad der Bananen innerhalb einer Liefercharge nicht nur von Cluster zu Cluster, sondern auch innerhalb eines Clusters teilweise stark variiert. Bei unreifen grünen Bananen ist dies nicht erkennbar. Aufgrund der geringen Beladungskapazität der Container stellen der Reifegrad der einzelnen Bananen und damit die Inhomogenität und mangelnde Vergleichbarkeit der Proben ein Problem für valide Aussagen über den Effekt der Ionisation dar. Aufgrund der vielen Parameter, die einen Einfluss auf die Fruchtreife der gelagerten Bananen hatten, war es schwierig, experimentell eindeutige Belege für die Reifeverzögerung durch Ionisation zu erbringen. Der Einfluss der meisten dieser Variablen auf die Reifung gelagerter Bananen wurde durch die direkten AB-Vergleiche aufgedeckt. Dies führte in der ersten Phase zu Fehlinterpretation, da maßgebliche Einflussfaktoren nicht erkannt wurden.

Bis auf den Reifegrad der Bananen sind zum Ende der Promotionsarbeit alle wesentlichen Einflussgrößen der Bananenfruchtreifung in den simulierten Containern nunmehr erkannt und beherrscht.

Im Zuge weiterer Versuche wäre neben der Beachtung der Einflussfaktoren eine weitere Konstruktionsveränderung der Container von Vorteil. Zum einen könnte über die Regelung des Ozongehalts die Ionisation selbst reguliert werden. Somit könnte eine Anreicherung des Ozons über einem eingestellten Wert vermieden werden, ohne eine stetige Kontrolle im Prozess. Im Zuge dessen könnten modifizierte Ionisationsröhren konstruiert werden. Lagerung und Transport anderer klimatischer Früchte wie Kiwi oder Avocado könnten untersucht und mit Bananen verglichen werden. Auch der Transport besonders sensibler Tropenfrüchte wie z. B. Jaboticaba nach Europa könnte künftig realisiert werden.

Zudem wäre es sinnvoll die Luftauslassventile und den Ethensensor anders zu positionieren. In den jetzigen miniaturisierten Containern befinden sich die Luftauslassventile im Deckel und somit direkt oberhalb der Früchte, und der Sensor ist an der Innenwand seitlich zu den Früchten angebracht. Gebildetes Ethen steigt nach oben und wird bei hohen Belüftungsraten direkt aus dem Container entfernt, bevor der Sensor es detektiert. Schlussfolgernd wäre eine Positionierung der Ventile und des Sensors unterhalb der Ionisationseinrichtung sinnvoller. Somit würde Ethen im Luftkreislauf der Container zunächst an den Röhren, dann am Sensor und danach erst am Luftauslassventil vorbeigeleitet. Bei eingeschalteter Ionisation würde Ethen direkt abgebaut werden. Ohne Ionisation würde der Sensor das Ethen erfassen, bevor es aus dem Container austreten kann. Im Zuge dieser Anpassung könnten auch leistungsstärkere Ventilatoren im Miniaturmaßstab erprobt werden.

6. LITERATUR

1. Dörken V., M., Musasp. – Bananen (Musaceae) Jahrb. Bochumer Bot. Ver., 2011. **2**: p. 231-237.
2. Hütz-Adams F. & Ertener L., Von der Staude bis zum Konsumenten - Die Wertschöpfungskette von Bananen, 2012, Südwind e.V. - Institut für Ökonomie und Ökumene: Siegburg.
3. Nowak B. & Schulz B., Tropische Früchte. Biologie, Verwendung, Anbau und Ernte, 1998: München: blv.
4. Liu F.W., *Banana response to low concentrations of ethylene*. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 1976. **101**: p. 222-225.
5. Belitz H.-D., Grosch W. & Schieberle P., Lehrbuch der Lebensmittelchemie Obst- und Obstprodukte 2008.
6. Peacock B., *Role of ethylene in the initiation of fruit ripening*. J. Agric. and Ani. Sci., 1972. **29**: p. 137-145.
7. Wyllie S.G., Golding J. B., McGlasson W. B. & Williams M., *The Relationship Between Ethylene and Aroma Volatiles Production in Ripening Climacteric Fruit*. Developments in Food Science 40; Elsevier: Amsterdam, 1998: p. 375-384.
8. Shiota H., *New ester components in the volatiles of banana fruit (Musa sapientum L.)*. J. Agric. Food Chem., 1993. **41**(11): p. 2056-2062.
9. Tressl R. & Drawert F., *Biogenesis of banana volatiles*. J. Agric. Food Chem., 1973. **21**: p. 560-565.
10. Berger R.G., Drawert F. & Kollmannsberger H., Geruchsaktive Spurenkomponenten des Bananenaromas. Chem. Microbiol. Technol. Lebensm., 1986. **10**: p. 120-124.
11. Myres M.J., Issenberg P. & Wick E.L., *L-Leucine as a precursor of isoamyl alcohol and isoamyl acetate, volatile aroma constituents of banana fruit discs*. Phytochemistry, 1970. **9**: p. 1693-1700.
12. Harada M., Ueda Y. & Iwata T., *Purification and some properties of alcohol acetyltransferase from banana fruit*. Plant Cell. Physiol., 1985. **26**: p. 1067-1074.
13. Bleecker A.B. & Kende H., *Ethylene: A Gaseous Signal Molecule in Plants*. Annu. Rev. Cell Dev. Biol., 2000. **16**: p. 1-18.
14. Young T.E., Meeley R. B. & Gallie D.R., *ACC synthase expression regulates leaf performance and drought tolerance in maize*. Plant J., 2004. **40**: p. 813-825.
15. Kende H., *Enzymes of ethylene biosynthesis*. Plant Physiol., 1989. **91**: p. 1-4.
16. Poulton J.E., *Cyanogenesis in Plants*. Plant Physiol., 1990. **94**: p. 401-405.
17. N.N. *The biosynthesis of ethylene*. Available from: <http://labs.bio.unc.edu/Kieber/ethylene%20Biosynthesis%20page.htm>.
18. Kadereit J.W., Körner, C., Kost, B. & Sonnewald, U., Strasburger- Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften. 2014, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
19. N.N., *Banana market review and banana statistics 2012-2013*, 2014, Food and Agriculture organization of the united nations: Rom.
20. Bauer U., Verpackung, ed. Auflage 1981, Würzburg: Vogel-Verlag.
21. Franke G., Nutzpflanzen der Tropen und Subtropen, 1994, Berlin: Urania.
22. Schwickert J., Persönliche Mitteilung über das Prinzip der Bioclimatic - Luftionisationssysteme., Firma Bioclimatic, 2012

23. Brockmann H. & Schodder H., *Aluminiumoxyd mit abgestuftem Adsorptionsvermögen zur chromatographischen Adsorption*. Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series), 1941. **74**: p. 73-78.
24. Schindler S., Krings U., Berger R. G. & Orlien V., *Aroma development in high pressure treated beef and chicken meat compared to raw and heat treated*. Meat Sci., 2010. **86**: p. 317-323.
25. Shiota H., *New ester components in the volatiles of banana fruit (Musa sapientum L.)*. J. Agric. Food Chem., 1993. **41**(11): p. 2056-2062.
26. N.N. *Banana chart - ripening stages*. Available from: http://www.peak.ag/blog/wp-content/uploads/2011/04/Darstellung_Reifegrade_Bananen_2.jpg.
27. Saltveit M.E., *Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables*. Postharvest Biol. and Technol., 1999. **15**: p. 279-292.
28. N.N. *Bananas*. Available from: <http://www.CargoHandbook.com>
29. Yahia E.M., *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical*. Vol. 2. 2011: Woodhead Publishing. 178-180.
30. Dilley D.R., *Development of controlled atmosphere storage technologies*. Stewart Postharvest Review, 2006. **2**(6): p. 1-8.
31. Hochhaus K.-H. & Wild Y., *Kühlcontainerschiffahrt mit Porthole- und CA-Kühlcontainern*, 1997.
32. Kader A.A. *Modified and controlled atmosphere storage of tropical fruits*. 1994. Chiang Mai, Thailand.
33. Kader A.A., Zagory D. & Kerbel E.L., *Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables*. Food Sci. Nutr., 1989. **28**: p. 1-30.
34. Dhawan K.R., Pawan K.B. & Spencer M.S., *Effects of Carbon Dioxide on Ethylene Production and Action in Intact Sunflower Plants*. Plant Physiol., 1981. **68**: p. 831-834.
35. Abeles F., *Ethylene in Plant Biology*, 1973: Academic Press, Inc. 223-226.
36. Palou L., Smilanick J. L., Crisosto C. H., Mansour M. & Plaza, P., *Ozone gas penetration and control of the sporulation of Penicillium digitatum and Penicillium italicum within commercial packages of oranges during cold storage*. Crop Prot., 2003. **22**: p. 1131-1134.
37. Schallnus H. *Frisches Obst und Gemüse durch Controlled Atmosphere - Commercial Applications in the Perishable Industry*. 2009; Available from: www.cargofresh.com.
38. Knudsen H., *Innovations with focus on customer need*, in *Star Cool News*, 2009.
39. FDA U., *Secondary Direct Food Additives Permitted in Food for Human Consumption*. Federal Register, 2001. **66**(123): p. 33829-33830.
40. Liew C.L. & Prange R. K., *Effect of Ozone and Storage Temperature on Postharvest Diseases and Physiology of Carrots (Daucus carota L.)*. J. Amer. Soc. Hortic. Sci., 1994, **119**: p. 563-567.
41. Xu L., *Use of ozone to improve the safety of fresh fruits and vegetables*. Food Technology, 1999. **53**(10): p. 58-62.
42. Palou L., Crisosto C. H., Smilanick J. L. Adaskaveg, J. E. & Zoffoli, J. P., *Effects of continuous 0.3 parts per million ozone exposure on decay development and physiological responses of peaches and table grapes in cold storage*. Postharvest Biol. Technol., 2002. **24**: p. 39-48.
43. Skog L.J. & Chu C. L., *Effect of ozone on qualities of fruits and vegetables in cold storage*. Can. J. Plant Sci., 2001: p. 773-778.

44. N.N. *Ozone and Food Storage*. Available from: <http://www.ozonesolutions.com/info/ozone-and-food-storage>.
45. Jin L., Xiaoyu W., Honglin Y., Zonggan Y., Jiaxun W. & Yaguang L. , *Influence of discharge products on post-harvest physiology of fruit*, in *Proc. 6th International Symp. High Voltage Eng.* 1989: New Orleans, LA. p. 1-4.
46. N.N.; Available from: <http://www.purotecs.com/cold-storage/>.
47. Schwickert J., Persönliche Mitteilung Firma Bioclimatic, 2014.
48. Wild Y. *Kostenvergleich von Kühlcontainersystemen mit und ohne Kontrollierter Atmosphäre.*, 1994.
49. Watkin C.B. & Miller W.B., *1-Methylcyclopropene (1-MCP) based technologies for storage and shelf-life extension*. *Acta Hort.*, 2005. **687**: p. 201-207.

7. ANHANG

7.1 Ergänzende Daten zu Kapitel 3.2.7

7.1.1 Vergleich der Chromatogramme aus dem Container *Headspace*

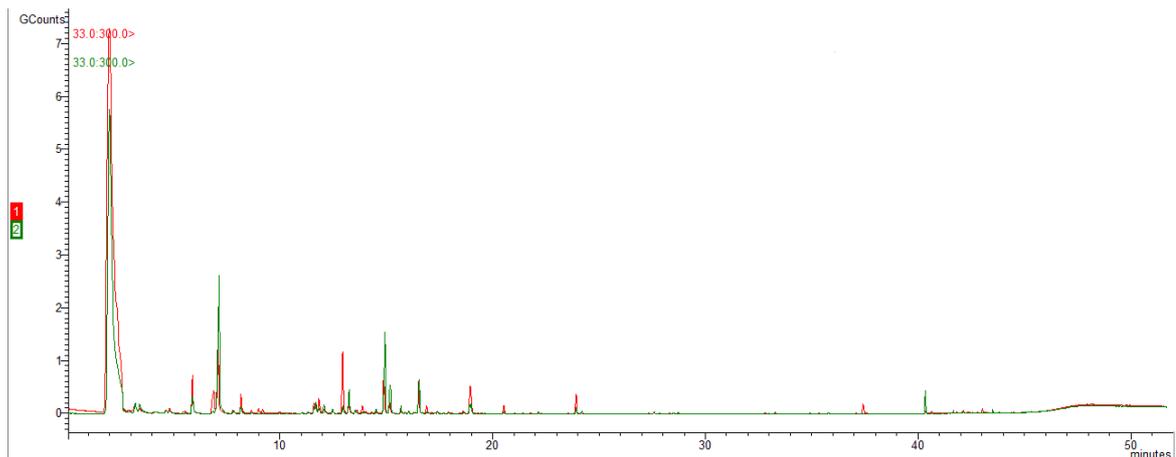


Abbildung 51: Proben des Containerlufttraums während der siebten simulierten Lagerung in den miniaturisierten Kühlcontainern (Lagertag 14). Die Lagerung erfolgte 14 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2-3, bei 22 °C ohne aktive Druckluftzufuhr, aber mit öffnen und schließen der Entnahme Klappe und Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 mesh, Stufe 1) wurde in Container I angewandt. Es wurden je 5 NL Luft mit einem Fluss von 0.2 mL min⁻¹ entnommen. Container I (rot) und Container II (grün). Es konnte qualitativer Unterschied festgestellt werden.

7.1.2 Darstellung der Fraktionen – Tabellen und dazugehörige Chromatogramme

Die folgenden Tabellen und Chromatogramme zeigen die Fraktionen der Bananenextrakte zu Kapitel 3.2.7

Tabelle 30: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 (µg/g Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 (µg/g Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	süßlich, fruchtig	3,02	0,214	3,03	0,124
Propansäuremethylester	554-12-1	fruchtig	3,24	0,823	3,25	0,756
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich, fruchtig	3,49	0,653	3,48	0,525
2-Pentanon	107-87-9	x	4,46	0,265	4,45	0,336
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich, fruchtig	4,68	3,763	4,67	3,625
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,21	0,627	5,22	0,520
Ethansäure-(2-methyl)propylester	110-19-0	Banane	5,34	1,423	5,34	0,036
Methylbenzen	108-88-3	x	5,94	1,248	5,95	1,237
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,12	0,062	7,12	0
Hexanal	66-25-1	frisch	7,32	0,853	7,32	0,621
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	süßlich Banane	8,77	0,701	8,78	1,651
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	10,22	0,405	10,22	0,453
3-Methylbutansäure-(2-methyl)propylester	589-59-3	fruchtig	14,48	0,217	11,47	0,186
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	12,52	0,623	12,52	0,489
Butansäurebutylester	109-21-7	fruchtig, frisch, süßlich	12,67	0,224	12,67	0,368
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	13,93	0,226	13,93	0,192
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	süßlich	14,77	0,442	14,77	0,536
Ethansäurehexylester	142-92-7	Kräuter	15,10	0,187	15,10	0,199
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig (Apfel)	16,02	0,489	16,02	0,553
Pentansäure-(3-methyl)butylester	2050-09-1	x	19,00	0,002	19,00	0,001
Butansäure-(1-methyl)hexylester	39026-94-3	x	20,78	0,298	20,77	0,211

Fortsetzung Tabelle 30:

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	21,51	0,204	21,50	0,267
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	22,78	0,359	22,77	0,315
Hexansäurehexylester	6378-65-0	fruchtig	29,80	0,008	29,79	0,002
2-Propensäure-(3-phenyl)methylester	1754-62-7	x	45,85	0,007	45,85	0,224
Hexadecansäuremethylester	112-39-0	ölig	49,39	0,431	49,39	0,126
(Z,Z)-9,12-Octadecadiensäuremethylester	112-63-0	x	54,80	0,362	54,80	0,196
(Z,Z) 9,12-Octadecadiensäureethylester	544-35-4	x	55,40	0,865	55,40	0,132
9,12,15-Octadecatriensäure	7361-80-0	x	56,01	0,401	56,00	0,215

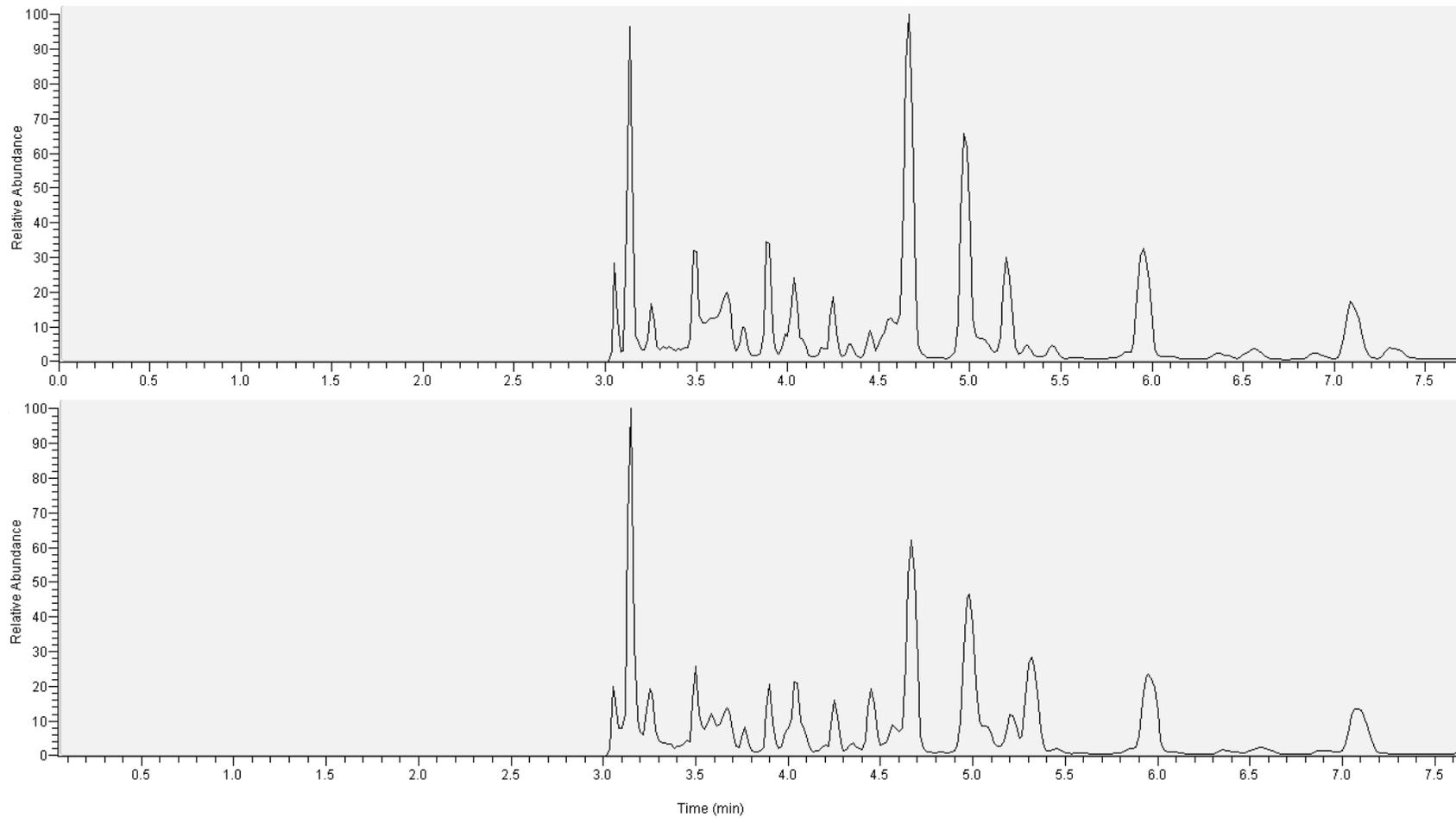


Abbildung 52: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

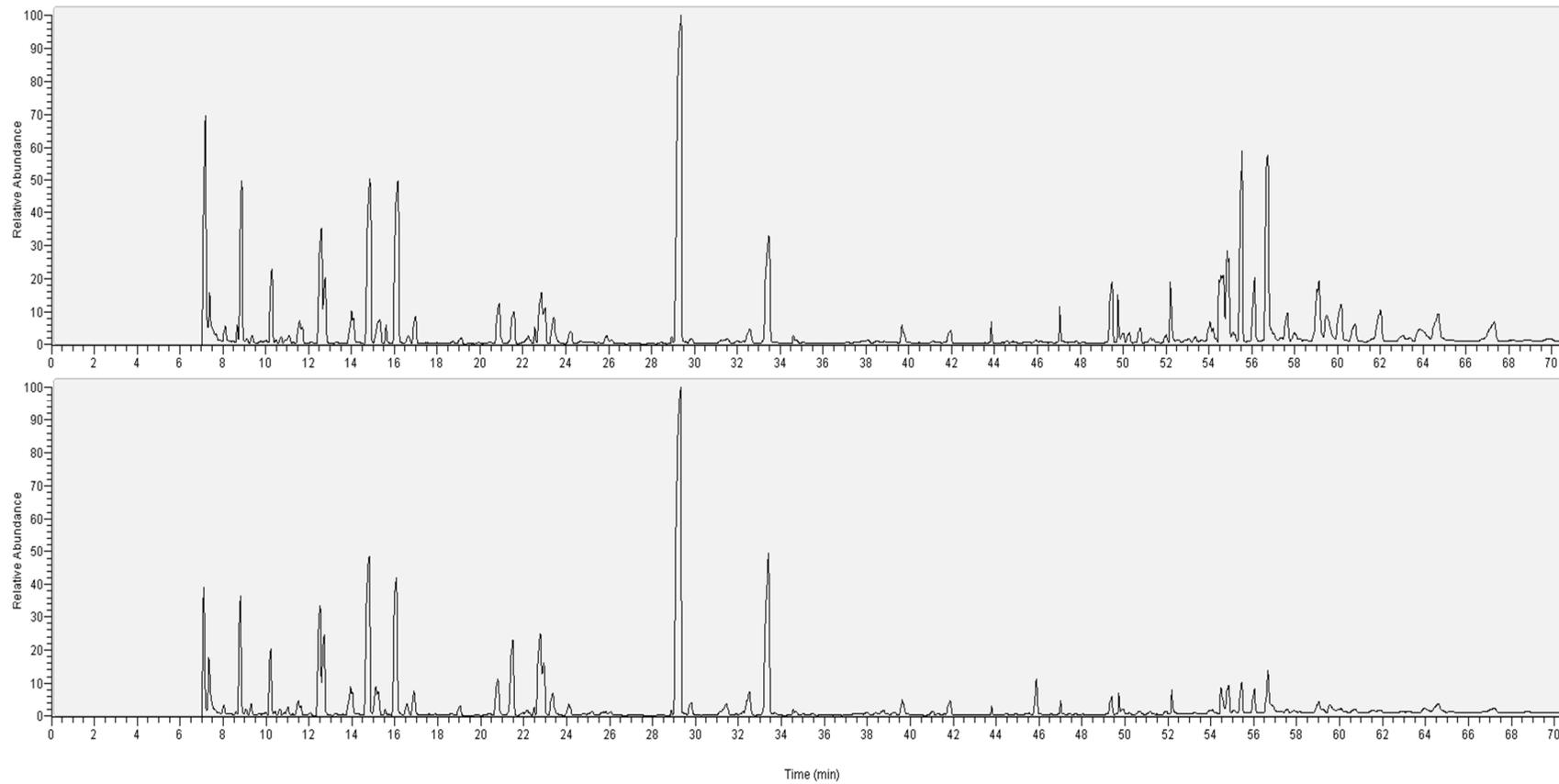


Abbildung 53: GCMS Chromatogramme (C2 oben, C1 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 31: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 (µg/g Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 (µg/g Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	x	3,03	0,193	3,02	0,294
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich, fruchtig	3,48	0,295	3,47	0,324
3-Methylbutanon	563-80-4	x	3,58	0,135	3,59	0,126
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	4,43	0,251	4,44	0,475
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	4,67	1,462	4,68	1,278
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,22	0,462	5,21	0,532
Ethansäure-(2-methyl)propylester	110-19-0	Blumen	5,33	1,021	5,33	0,835
Methylbenzen	108-88-3	stechend	5,93	0,436	5,92	0,453
Hexanal	66-25-1	frisch	7,35	0,153	7,34	0,452
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	Banane	8,82	0,514	8,83	1,496
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	10,22	0,078	10,25	0,082
2-Heptanon	110-43-0	Seife	11,05	0,008	11,07	0,007
5-Hepten-2-on	6714-00-7		13,99	0,083	14,13	0,095
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,10	0,086	15,12	0,112
Butansäure-(1-methyl)hexylester	39026-94-3	x	20,77	0,073	20,78	0,094
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	21,48	0,081	21,44	0,125
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	22,72	0,069	22,74	0,112
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	48,17	0,005	48,18	0,008
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	süßlich	49,39	0,061	49,46	0,086

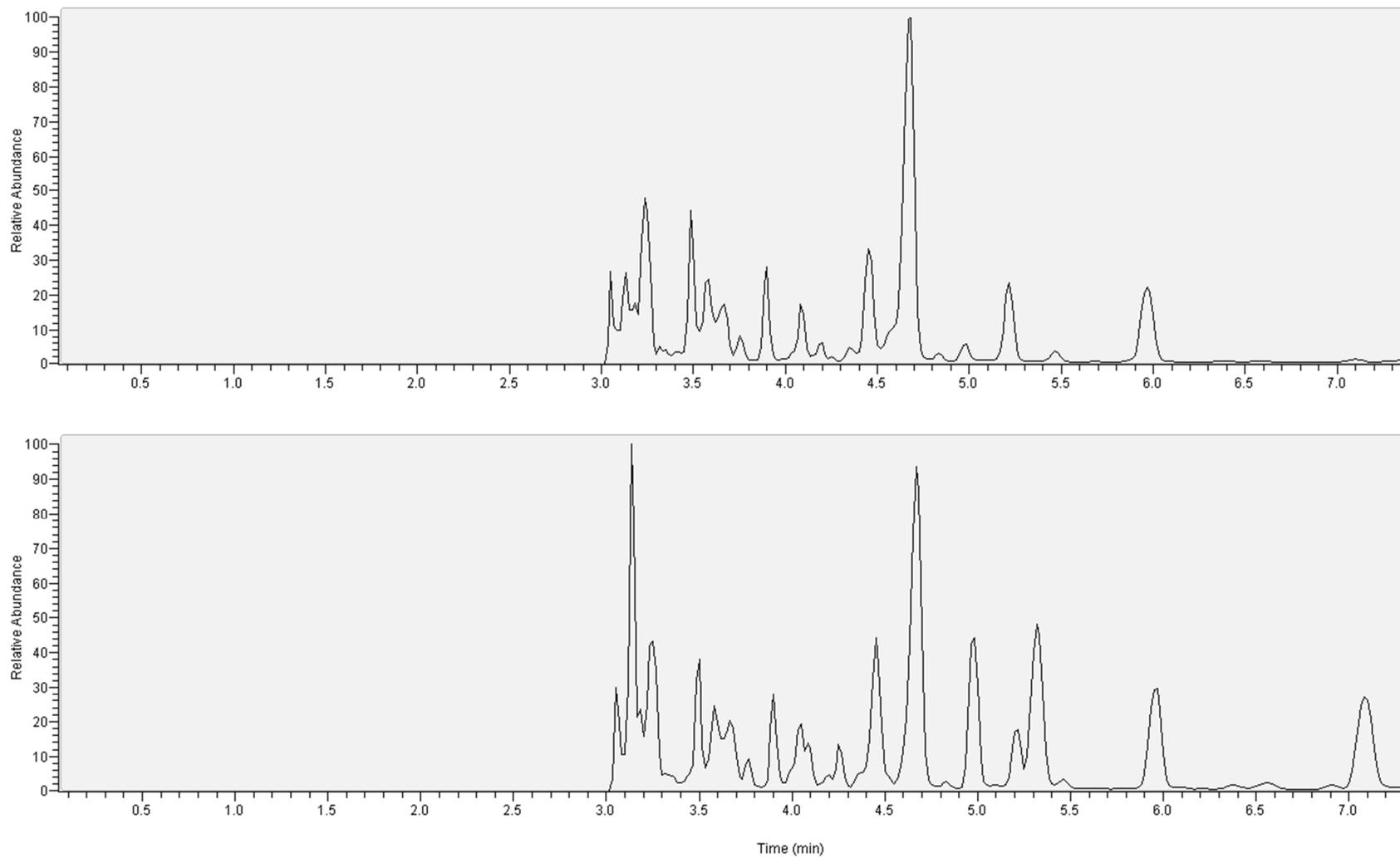


Abbildung 54: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

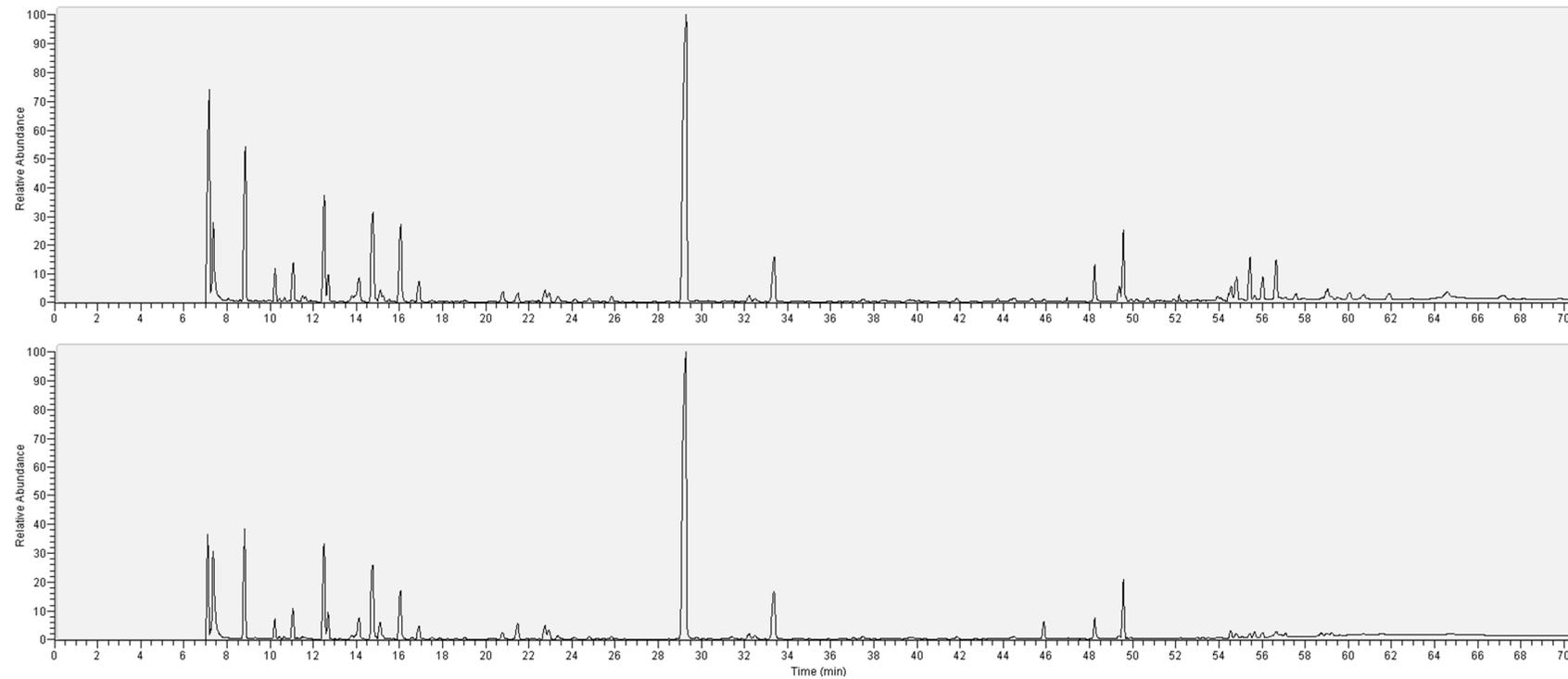


Abbildung 55: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 32: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit		Konzentration	
			C1 (min)	C2 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (µg/g Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	fruchtig	3,05	3,02	0,134	0,073
2-Butanon	78-93-3	Käse	3,2	3,15	0,012	0,011
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	4,43	4,41	0,006	0,008
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	4,67	4,67	0,004	0,005
Methylbenzen	108-88-3	stechend	5,93	5,93	0,052	0,011
2-Methyl-1-propanol	78-83-1	x	7,72	7,72	0,108	0,409
2-Pentanol	6032-29-7	süßlich	8,75	8,75	0,712	0,899
Butanol	71-36-3	Käse	9,68	9,81	0,315	0,324
3-Methyl-1-butanol	123-51-3	Käse	12,31	12,30	1,426	1,658
Hexanol	111-27-3	Toast	18,85	18,86	0,868	0,778
2-Hexen-1-ol	928-95-0	nussig	21,18	21,19	0,426	0,424
Heptansäure	111-14-8	ranzig	31,09	31,10	0,286	0,296
Hexansäure	142-62-1	ranzig	39,44	39,45	0,528	0,380
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	48,17	48,17	0,172	0,603
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	holzig	49,57	49,56	0,531	1,256
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl)phenol	6627-88-9	blumig	55,81	55,74	1,656	1,823
Tetradecansäure	544-63-8	x	59,10	59,12	0,505	0,665
Pentadecansäure	1002-84-2	x	61,65	61,66	1,356	Nicht quantifizierbar
Hexadecansäure	57-10-3	ölig	65,55	65,54	10,531	12,123

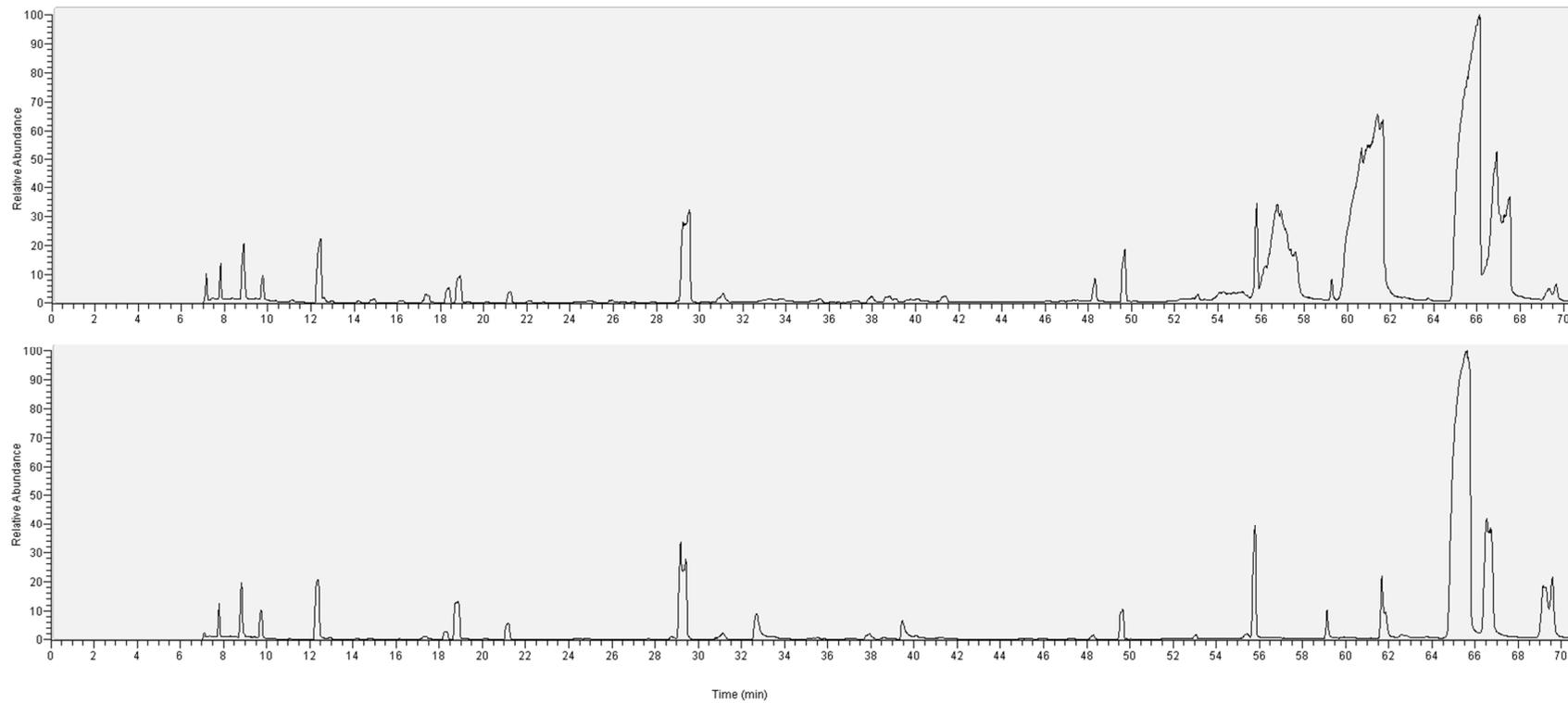


Abbildung 56: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 33: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	Süßlich, fruchtig	3,11	0,296	3,33	0,387
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	3,21	0,096	3,55	0,125
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	3,65	1,314	4,05	1,296
Ethansäure-2-pentylester	628-80-8	x	3,68	0,210	4,12	0,152
Methylbenzen	108-88-3	x	4,71	0,395	5,23	0,186
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,32	0,536	5,80	0,428
Ethansäurebutylester	123-86-4		6,72	0,499	6,92	0,389
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,62	0,524	7,61	0,536
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	Banane	8,85	0,456	8,84	0,426
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	12,73	0,188	12,73	0,196
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	16,2	0,524	16,18	0,536
Heptansäure (2-heptyl)ester	5921-82-4	x	17,07	0,134	17,07	0,129
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	süßlich	17,98	0,635	18,00	0,614
2-Methylbutansäureisopentylester	27625-35-0	x	20,18	0,036	20,18	0,041
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig	20,62	0,601	20,61	0,699
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	24,97	0,082	24,97	0,162
Hexansäurehexylester	6378-65-0	x	34,22	0,023	34,22	0,199
Hexadecansäuremethylester	112-39-0	fruchtig	51,92	0,173	51,91	0,052
(Z,Z)-9,12-Octadecadiensäuremethylester	112-63-0	ölig	55,52	0,241	55,51	0,105
(Z,Z) 9,12-Octadecadiensäureethylester	544-35-4	x	56,95	0,412	56,94	0,135

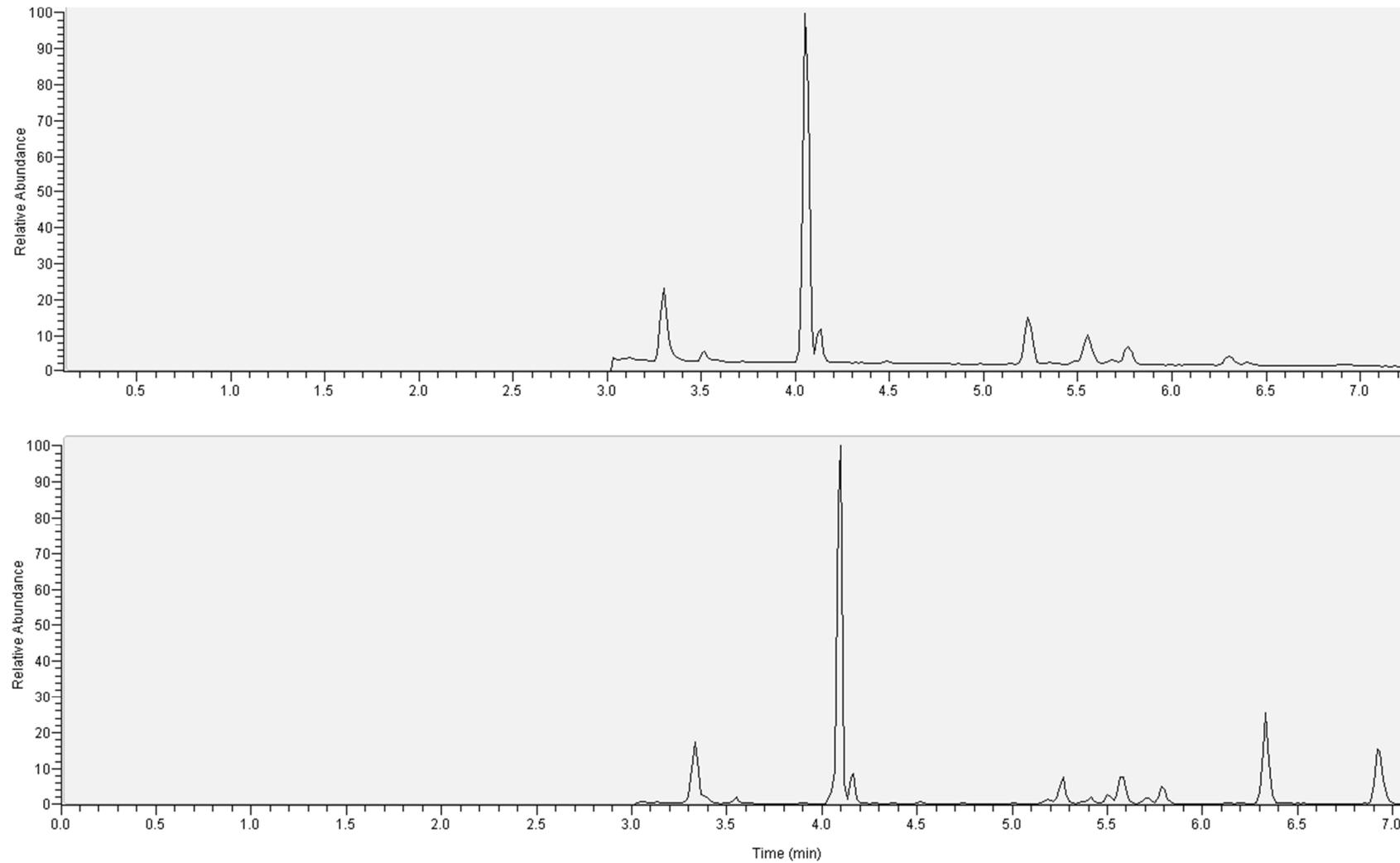


Abbildung 57: GCMS Chromatogramme (C1 oben und C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit unpolare stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

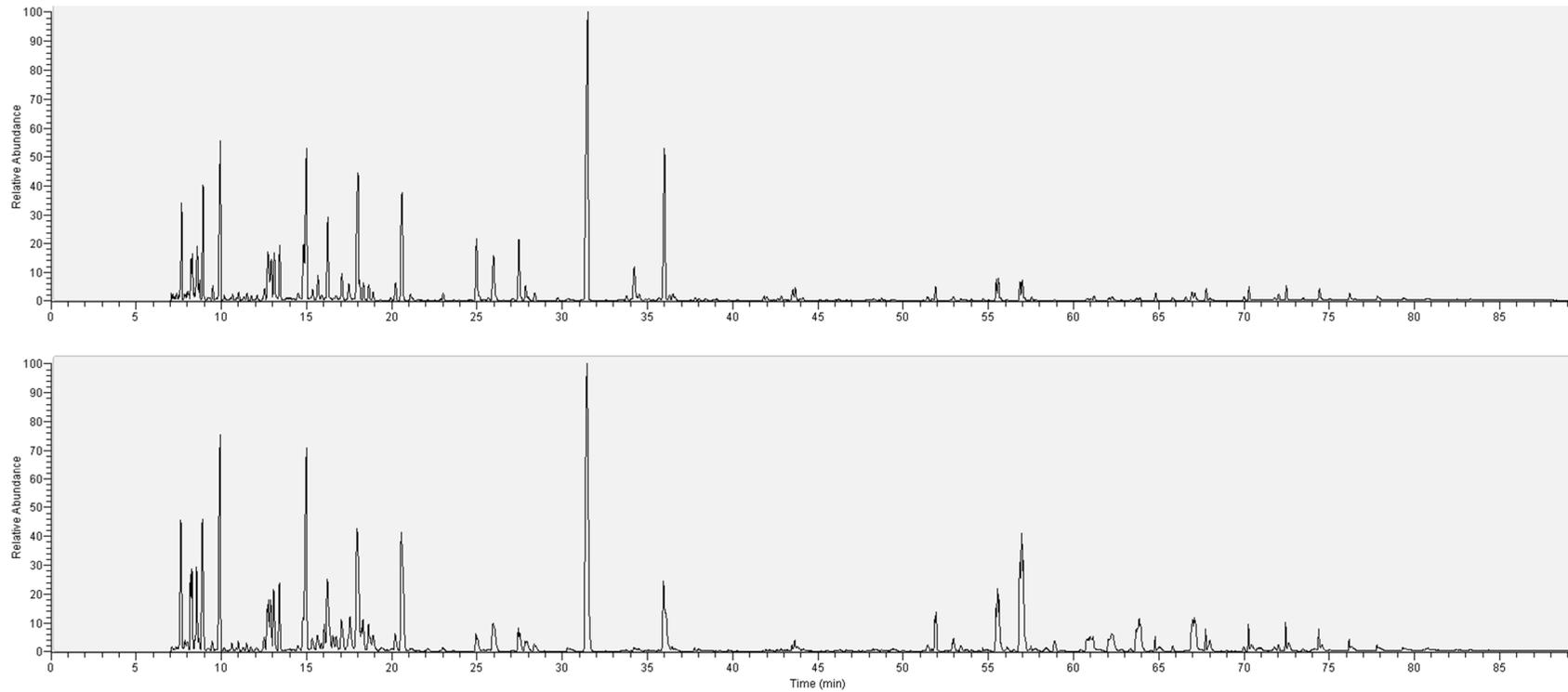


Abbildung 58: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 34: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 (µg/g Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 (µg/g Banane)
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,65	0,277	7,65	0,423
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	Banane	8,94	0,462	8,95	0,515
2-Heptanon	110-43-0	Seife	9,68	0,279	9,68	0,285
2-Methylpropansäure-(2-methyl)propylester	97-85-8	x	12,94	0,198	12,92	0,154
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	12,74	0,226	12,75	0,206
Butansäurebutylester	109-21-7	frisch	14,84	0,499	14,85	0,401
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,72	0,061	15,73	0,053
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	16,43	0,242	16,42	0,226
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	18,18	0,486	18,18	0,425
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig	20,82	0,398	20,85	0,431
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	25,22	0,105	25,22	0,103
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	27,65	0,103	27,65	0,105
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	32,78	0,245	32,79	0,216
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	x	41,34	0,371	41,35	0,348

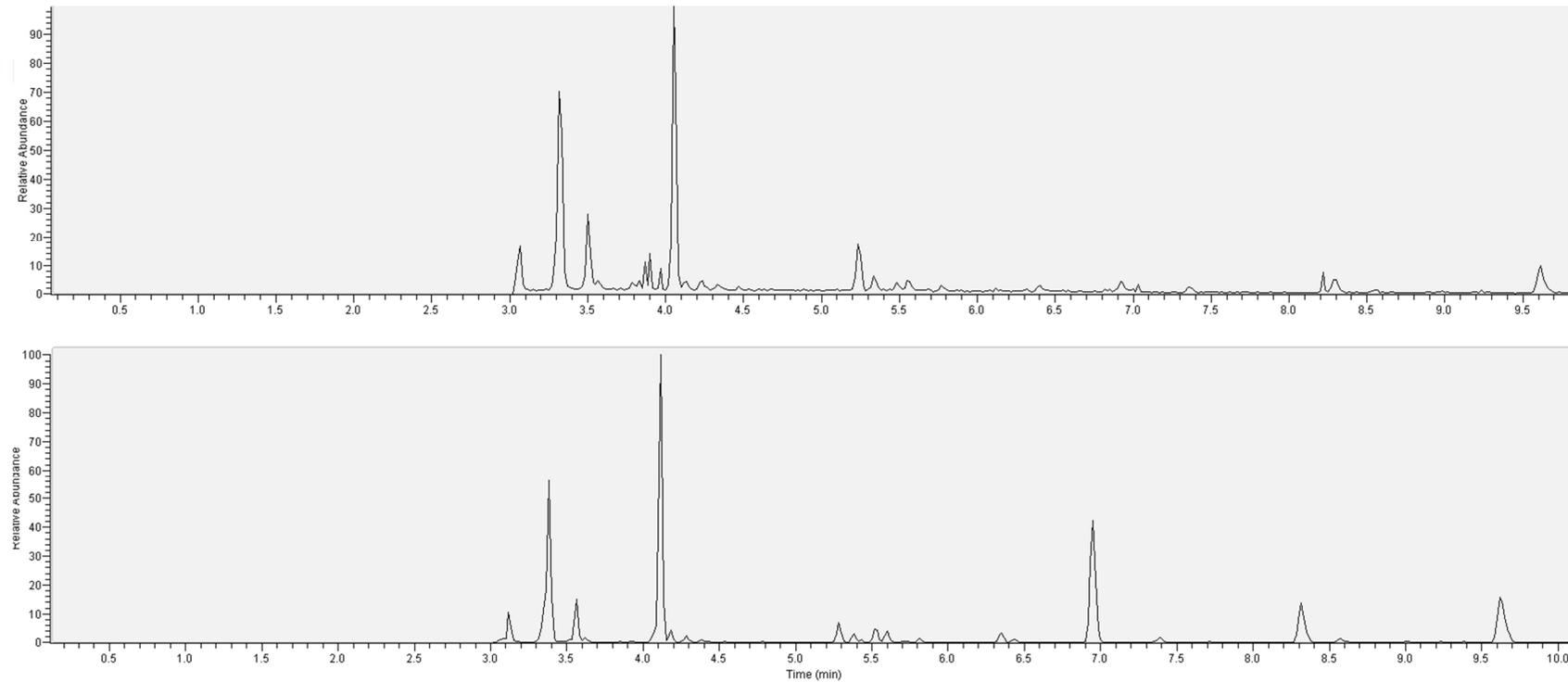


Abbildung 59: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

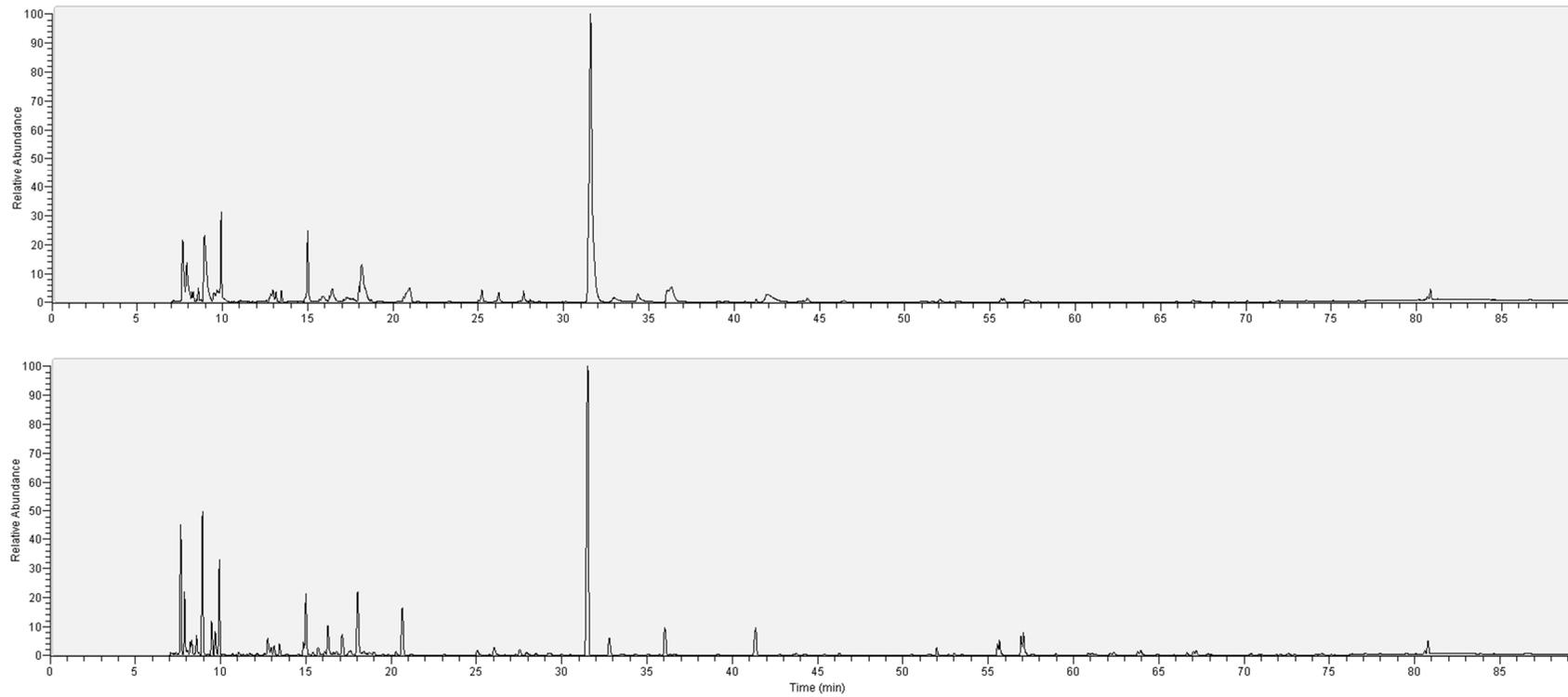


Abbildung 60: GCMS Chromatogramme zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 35: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 ($\mu\text{g/g}$ Banane)
Hexanol	111-27-3	geröstet	8,82	0,252	8,82	0,135
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl)phenol	6627-88-9	x	43,35	1,517	43,35	1,541
Hexadecansäure	57-10-3	x	53,57	42,55	53,57	30,21
9,12-Octadecadiensäure	60-33-3	x	57,02	50,89	57,03	47,21

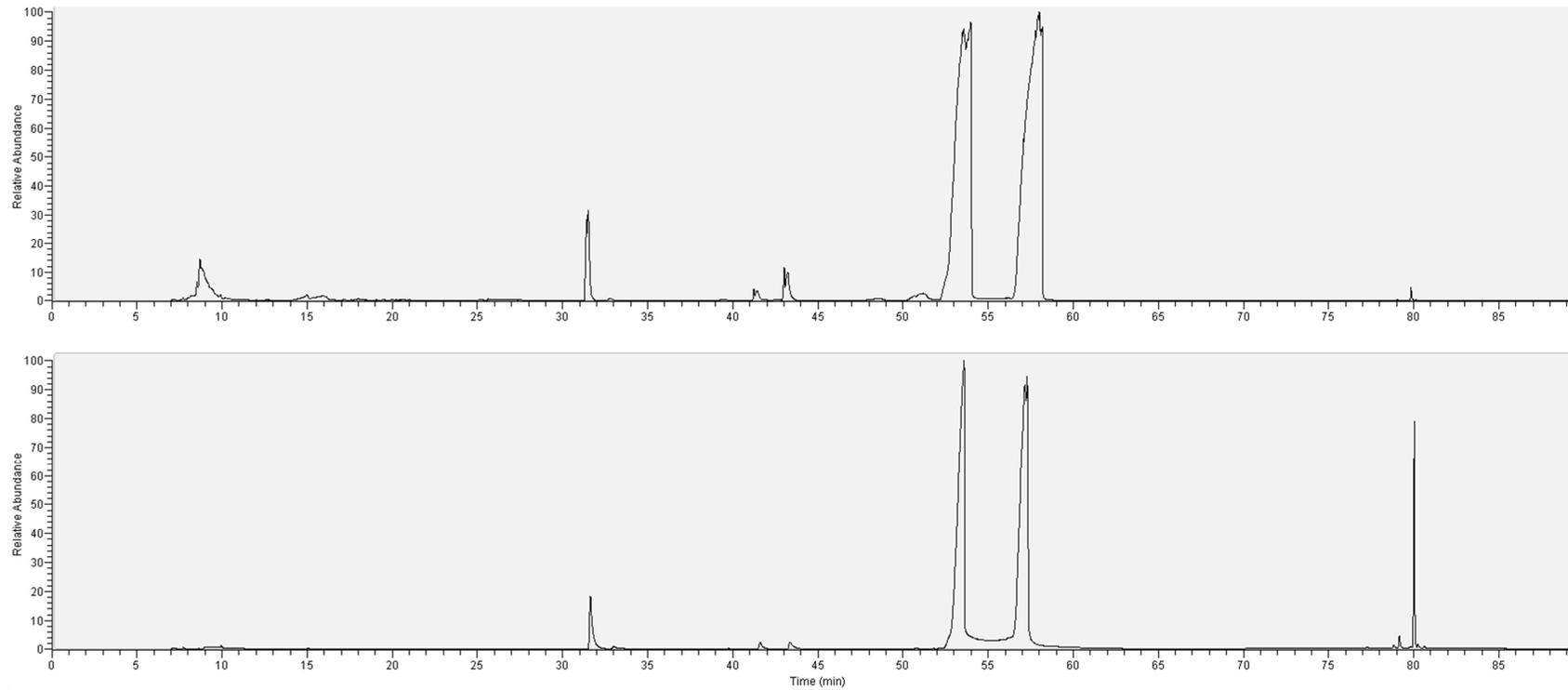


Abbildung 61: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VII. Auftrennung erfolgte mit unpolare stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

7.2 Ergänzende Daten zu Kapitel 3.2.8

7.2.1 Vergleich der Chromatogramme aus dem Container *Headspace*

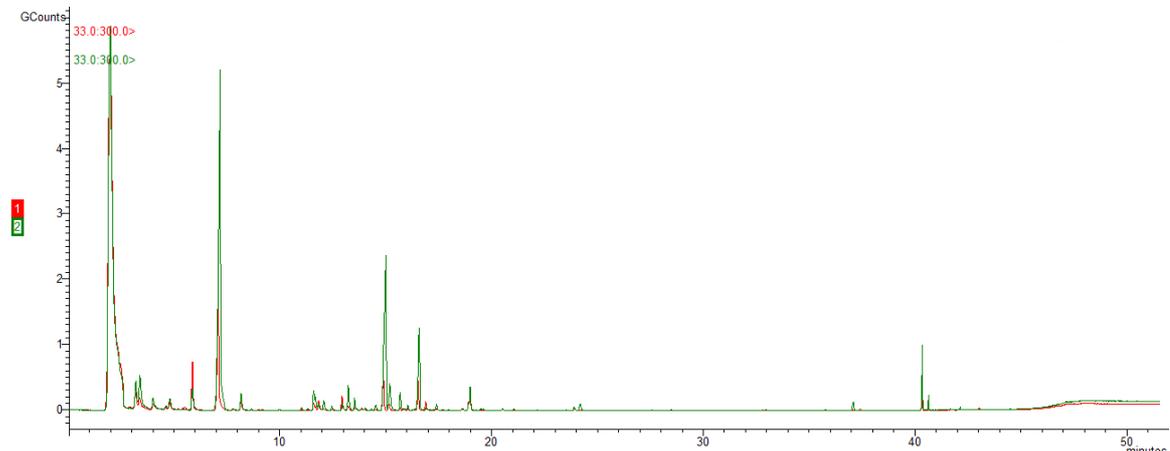


Abbildung 62: Proben des Containerlufttraums während der achten simulierten Lagerung in den miniaturisierten Kühlcontainern (Lagertag 47). Die Lagerung erfolgte 47 Tage mit einer Fracht von 18 kg *Turbana* Bananen, Reifegrad 2-3, bei 22 °C ohne aktive Druckluftzufuhr, aber mit Öffnen und Schließen der Entnahme Klappe und Ventilation. Ionisation (3 Typ B, 40 *mesh*, Stufe 1-3) wurde in Container I angewandt. Es wurden je 5 NL Luft mit einem Fluss von 0.2 mL min⁻¹ entnommen. Container I (rot) und Container II (grün). Es ist kein Unterschied im Peakmuster zu erkennen. Es konnte kein qualitativer Unterschied festgestellt werden.

7.2.2 Darstellung der Fraktionen – Tabellen und dazugehörige Chromatogramme

Die folgenden Tabellen und Chromatogramme zeigen die Fraktionen der Bananenextrakte zu Kapitel 3.2.8

Tabelle 36: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchs- eindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	süßlich, fruchtig	3,03	0,124	3,02	0,214
Propansäuremethylester	554-12-1	fruchtig	3,25	0,756	3,24	0,823
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich, fruchtig	3,48	0,525	3,49	0,653
2-Pentanon	107-87-9	x	4,45	0,336	4,46	0,265
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich, fruchtig	4,67	3,625	4,68	3,763
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,22	0,520	5,21	0,627
Ethansäure-(2-methyl)propylester	110-19-0	fruchtig (Banane)	5,34	0,036	5,34	1,423
Methylbenzen	108-88-3	x	5,95	1,237	5,94	1,248
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,12	0	7,12	0,062
Hexanal	66-25-1	frisch	7,32	0,621	7,32	0,853
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	süßlich (Banane)	8,78	1,651	8,77	0,701
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	10,22	0,453	10,22	0,405
3-Methylbutansäure-(2-methyl)propylester	589-59-3	fruchtig	11,47	0,186	14,48	0,217
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	12,52	0,489	12,52	0,623
Butansäurebutylester	109-21-7	fruchtig, frisch, süßlich	12,67	0,368	12,67	0,224
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	13,93	0,192	13,93	0,226
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	süßlich	14,77	0,536	14,77	0,442
Ethansäurehexylester	142-92-7	herbal	15,10	0,199	15,10	0,187
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig (Apfel)	16,02	0,553	16,02	0,489
Pentansäure-(3-methyl)butylester	2050-09-1	x	19,00	0,001	19,00	0,002
Butansäure-(1-methyl)hexylester	39026-94-3	x	20,77	0,211	20,78	0,298

Fortsetzung Tabelle 36:

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 ($\mu\text{g/g}$ Banane)
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	21,50	0,267	21,51	0,204
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	22,77	0,315	22,78	0,359
Hexansäurehexylester	6378-65-0	fruchtig	29,79	0,002	29,80	0,008
2-Propensäure-(3-phenyl)methylester	1754-62-7	x	45,85	0,224	45,85	0,007
Hexadecansäuremethylester	112-39-0	ölig	49,39	0,126	49,39	0,431
(Z,Z)-9,12-Octadecadiensäuremethylester	112-63-0	x	54,80	0,196	54,80	0,362
(Z,Z) 9,12-Octadecadiensäureethylester	544-35-4	x	55,40	0,132	55,40	0,865
9,12,15-Octadecatriensäure	7361-80-0	x	56,00	0,215	56,01	0,401

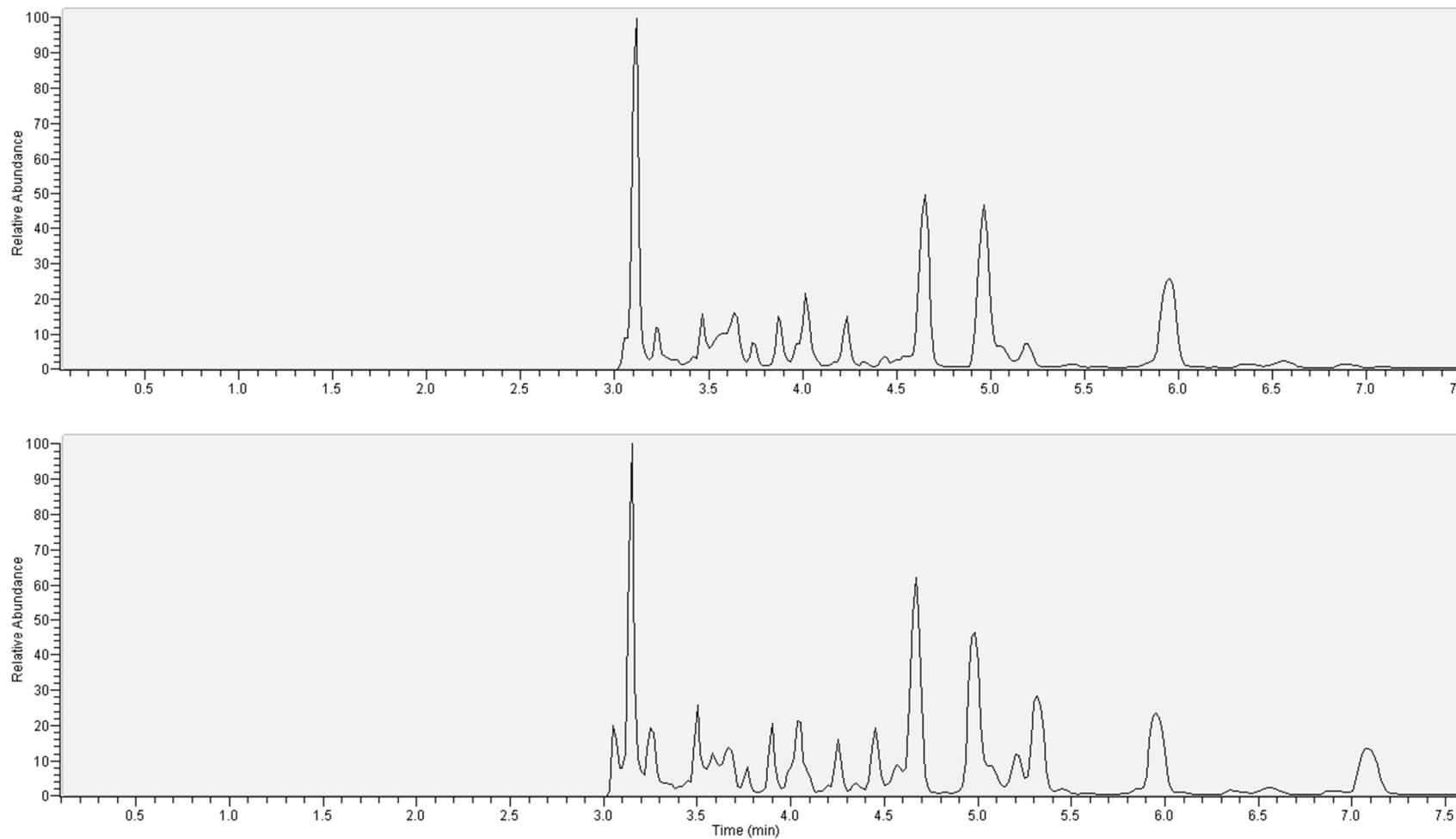


Abbildung 63: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2, unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

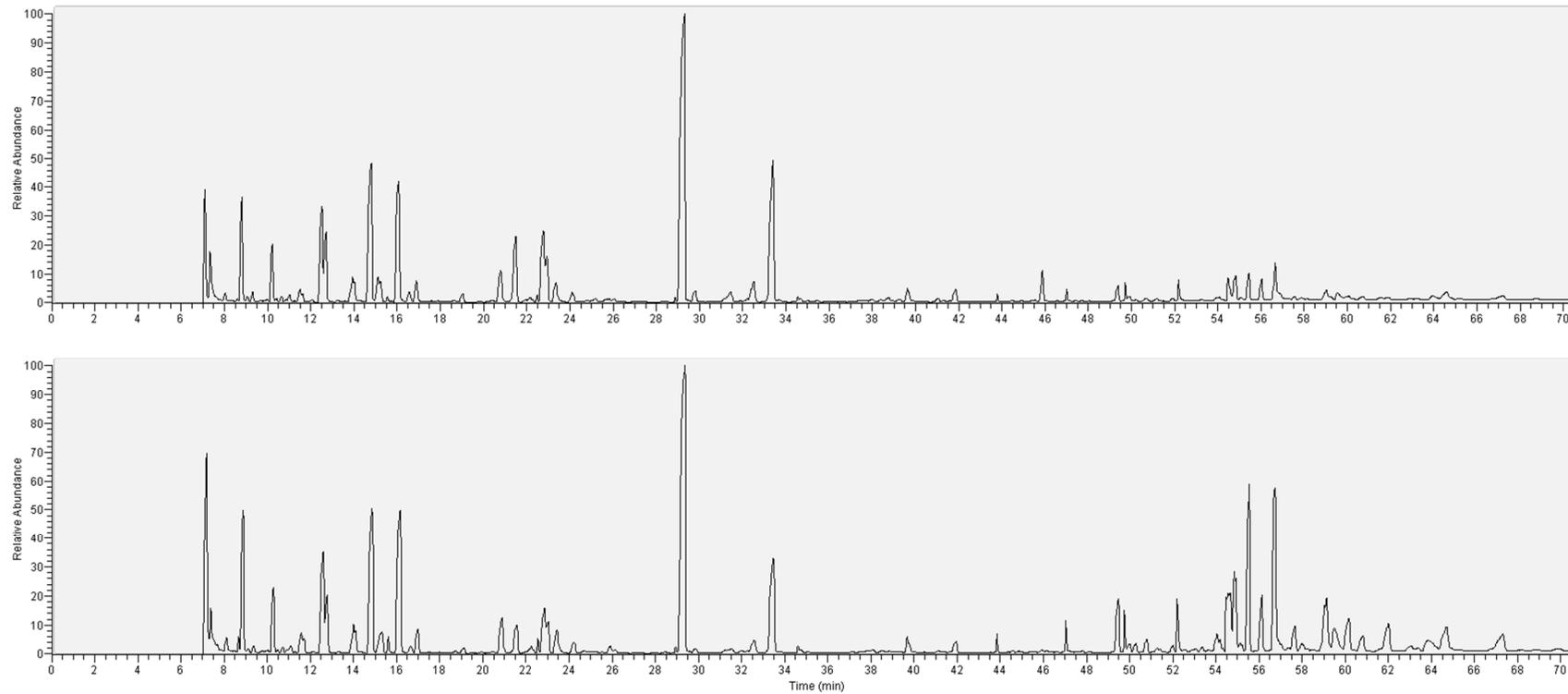


Abbildung 64: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 37: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit		Konzentration	
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	x	3,03	0,193	3,02	0,294
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich, fruchtig	3,48	0,295	3,47	0,324
3-Methylbutanon	563-80-4	x	3,58	0,135	3,59	0,126
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	4,43	0,251	4,44	0,475
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	4,67	1,462	4,68	1,278
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,22	0,462	5,21	0,532
Ethansäure-(2-methyl)propylester	110-19-0	blumen artig	5,33	1,021	5,33	0,835
Methylbenzen	108-88-3	stechend	5,93	0,436	5,92	0,453
Hexanal	66-25-1	frisch, grün	7,35	0,153	7,34	0,452
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	fruchtig (Banane)	8,82	0,514	8,83	1,496
Butansäure-(2-methyl)propylester	539-90-2	x	10,22	0,078	10,25	0,082
2-Heptanon	110-43-0	frisch, blumig	11,05	0,008	11,07	0,007
5-Hepten-2-on	6714-00-7		13,99	0,083	14,13	0,095
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,10	0,086	15,12	0,112
Butansäure-(1-methyl)hexylester	39026-94-3	x	20,77	0,073	20,78	0,094
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	21,48	0,081	21,44	0,125
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	22,72	0,069	22,74	0,112
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	48,17	0,005	48,18	0,008
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	süßlich, holzig	49,39	0,061	49,46	0,086

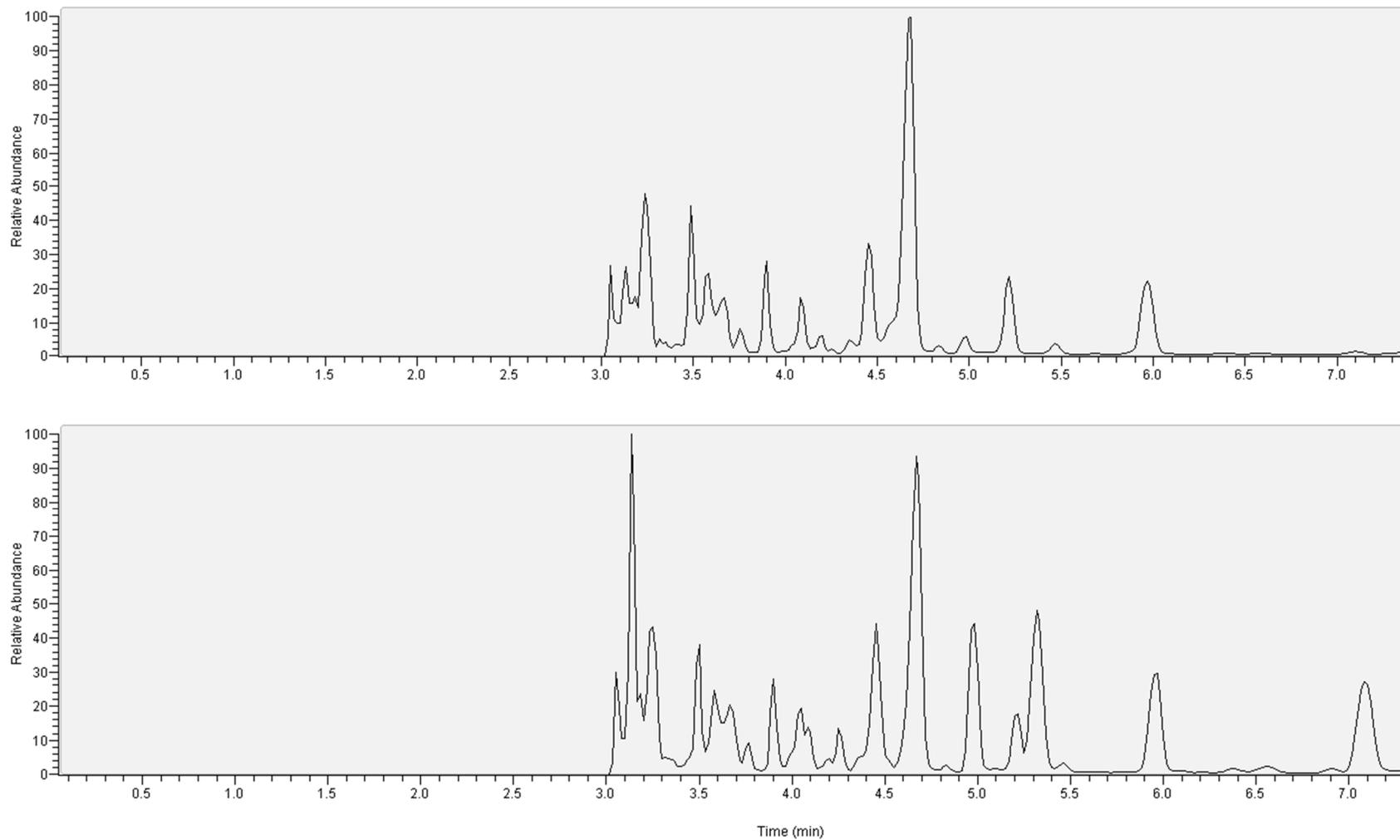


Abbildung 65: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2, unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

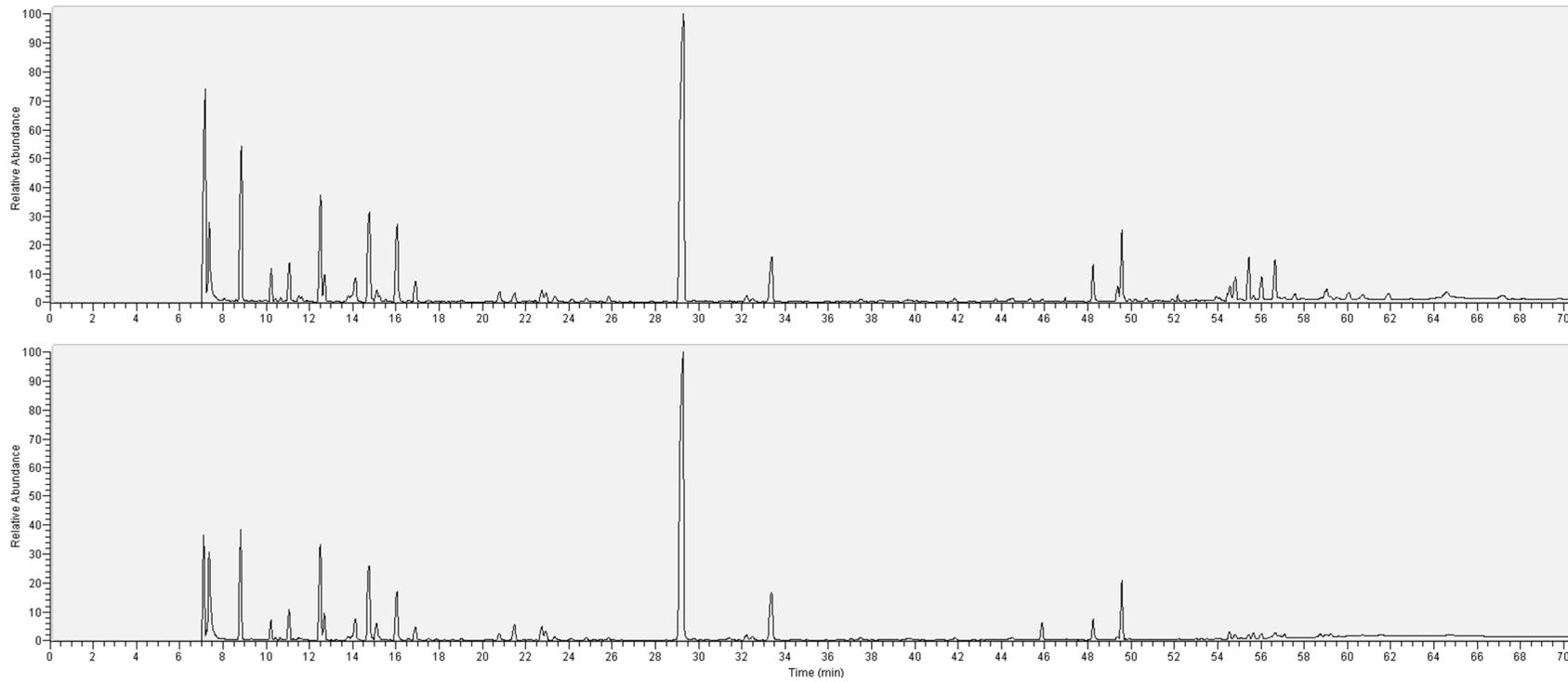


Abbildung 66: GCMS Chromatogramme (C2 oben, C1 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 38: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchseindruck	Retentionszeit		Konzentration	
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
Ethansäureethylester	141-78-6	fruchtig	3,05	0,134	3,02	0,073
2-Butanon	78-93-3	Käse	3,2	0,012	3,15	0,011
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	4,43	0,006	4,41	0,008
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	4,67	0,004	4,67	0,005
Methylbenzen	108-88-3	stechend	5,93	0,052	5,93	0,011
2-Methyl-1-propanol	78-83-1	x	7,72	0,108	7,72	0,409
2-Pentanol	6032-29-7	süßlich	8,75	0,712	8,75	0,899
Butanol	71-36-3	Käse	9,68	0,315	9,81	0,324
3-Methyl-1-butanol	123-51-3	Käse	12,31	1,426	12,30	1,658
Hexanol	111-27-3	Toast	18,85	0,868	18,86	0,778
2-Hexen-1-ol	928-95-0	nussig	21,18	0,426	21,19	0,424
Heptansäure	111-14-8	ranzig	31,09	0,286	31,10	0,296
Hexansäure	142-62-1	ranzig	39,44	0,528	39,45	0,380
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	48,17	0,172	48,17	0,603
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	holzig	49,57	0,531	49,56	1,256
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl)phenol	6627-88-9	blumig	55,81	1,656	55,74	1,823
Tetradecansäure	544-63-8	x	59,10	0,505	59,12	0,665
Pentadecansäure	1002-84-2	x	61,65	1,356	61,66	Nicht quantifizierbar
Hexadecansäure	57-10-3	ölig	65,55	10,531	65,54	12,123

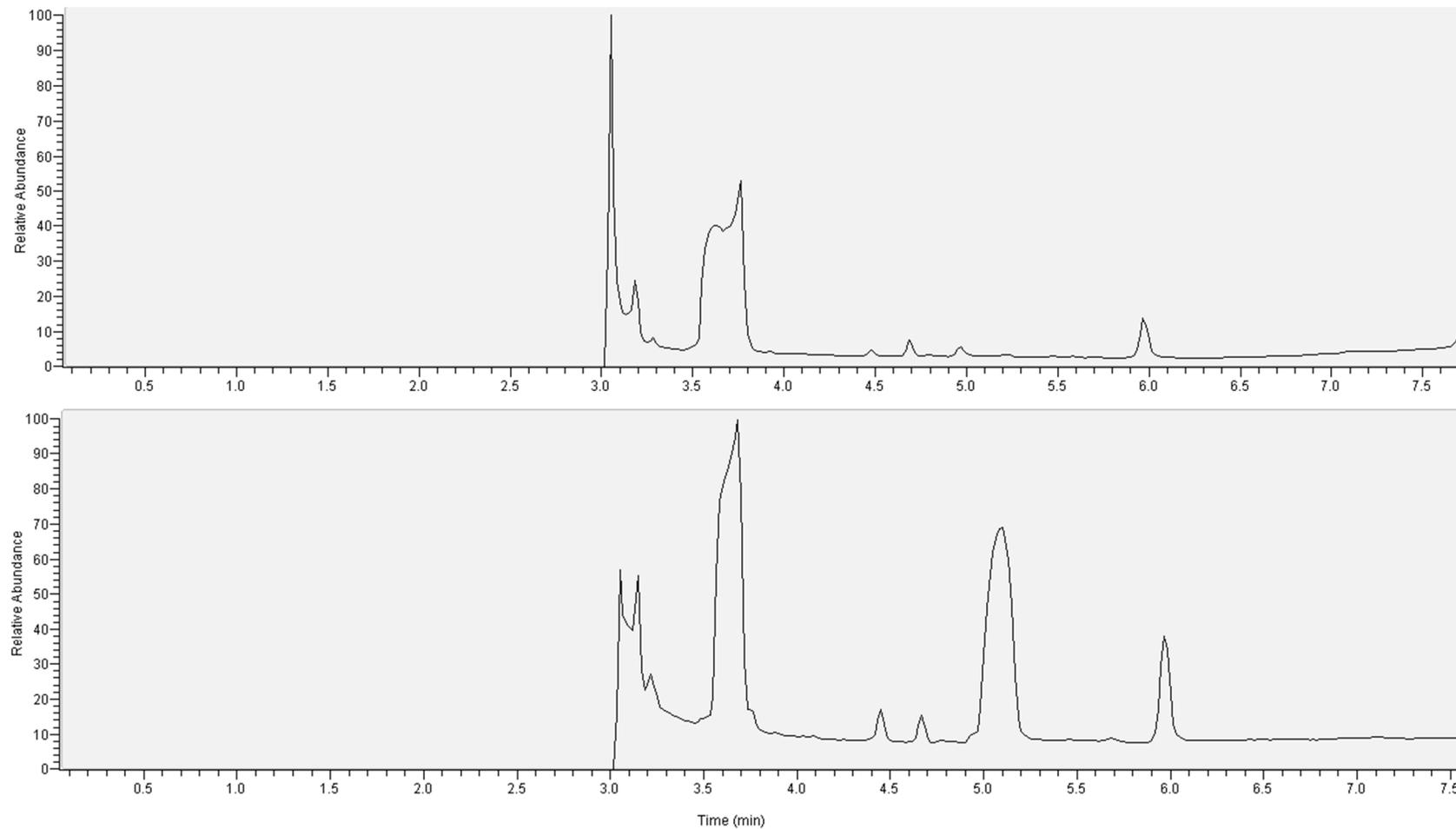


Abbildung 67: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

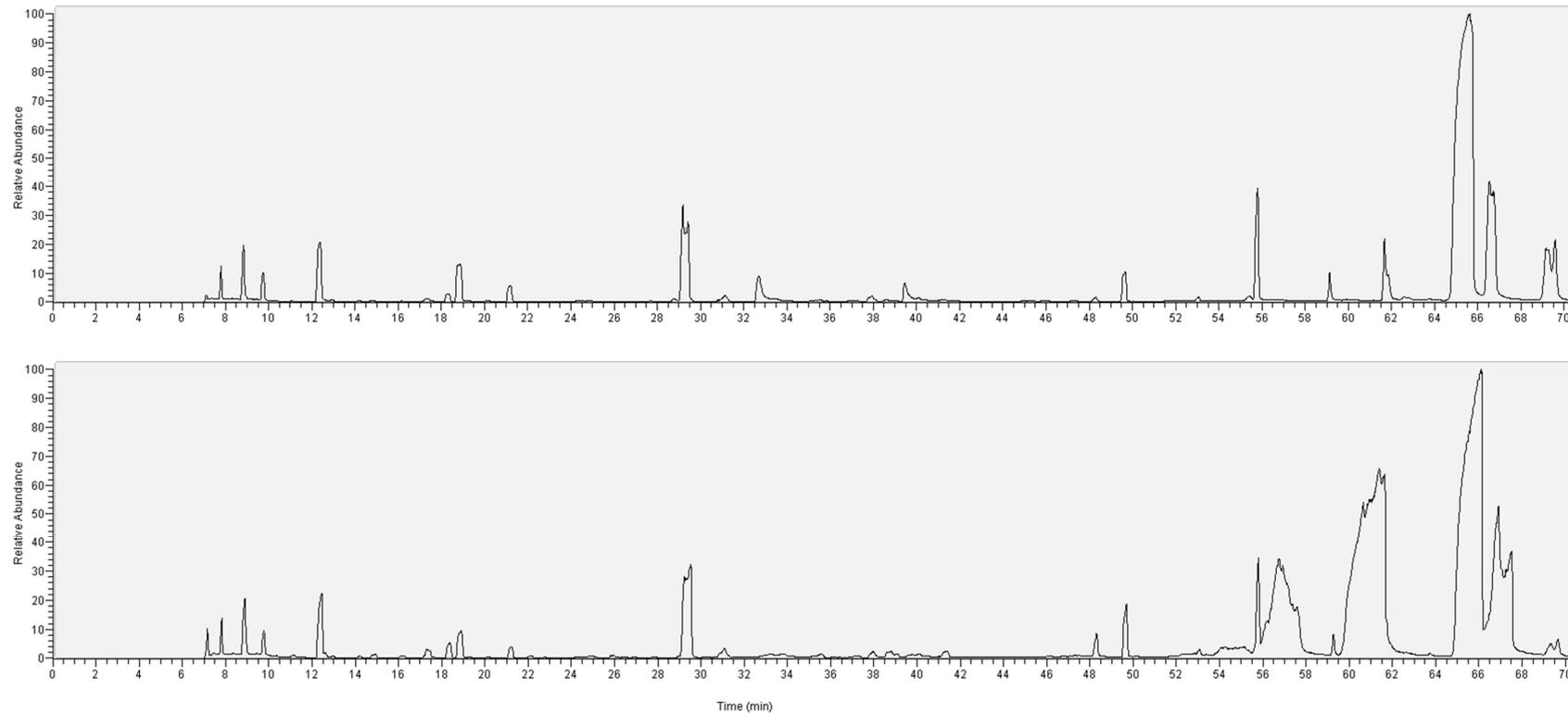


Abbildung 68: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit polarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 39: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchs- eindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
2-Methylpropansäuremethylester	547-63-7	süßlich fruchtig	3,11	0,296	3,33	0,387
2-Pentanon	107-87-9	fruchtig	3,21	0,096	3,55	0,125
Butansäuremethylester	623-42-7	süßlich	3,65	1,314	4,05	1,296
Ethansäure-2-pentylester	628-80-8	x	3,68	0,210	4,12	0,152
Methylbenzen	108-88-3	x	4,71	0,395	5,23	0,186
2-Methylbutansäuremethylester	868-57-5	fruchtig	5,32	0,536	5,80	0,428
Ethansäurebutylester	123-86-4		6,72	0,499	6,92	0,389
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,62	0,524	7,61	0,536
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	fruchtig bananig	8,85	0,456	8,84	0,426
2-Methylbutansäurepropylester	539-90-2	x	12,73	0,188	12,73	0,196
1-Methylbutansäurebutylester	60415-61-4	x	16,2	0,524	16,18	0,536
Heptansäure-(2-heptyl)ester	5921-82-4	x	17,07	0,134	17,07	0,129
Butansäure-(3-methyl)butylester	106-27-4	süßlich	17,98	0,635	18,00	0,614
2-Methylbutansäureisopentylester	27625-35-0	x	20,18	0,036	20,18	0,041
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig	20,62	0,601	20,61	0,699
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	24,97	0,082	24,97	0,162
Hexansäurehexylester	6378-65-0	fruchtig	34,22	0,023	34,22	0,199
Hexadecansäuremethylester	112-39-0	ölig	51,92	0,173	51,91	0,052
(Z,Z)-9,12-Octadecadiensäuremethylester	112-63-0	x	55,52	0,241	55,51	0,105
(Z,Z) 9,12-Octadecadiensäureethylester	544-35-4	x	56,95	0,412	56,94	0,135

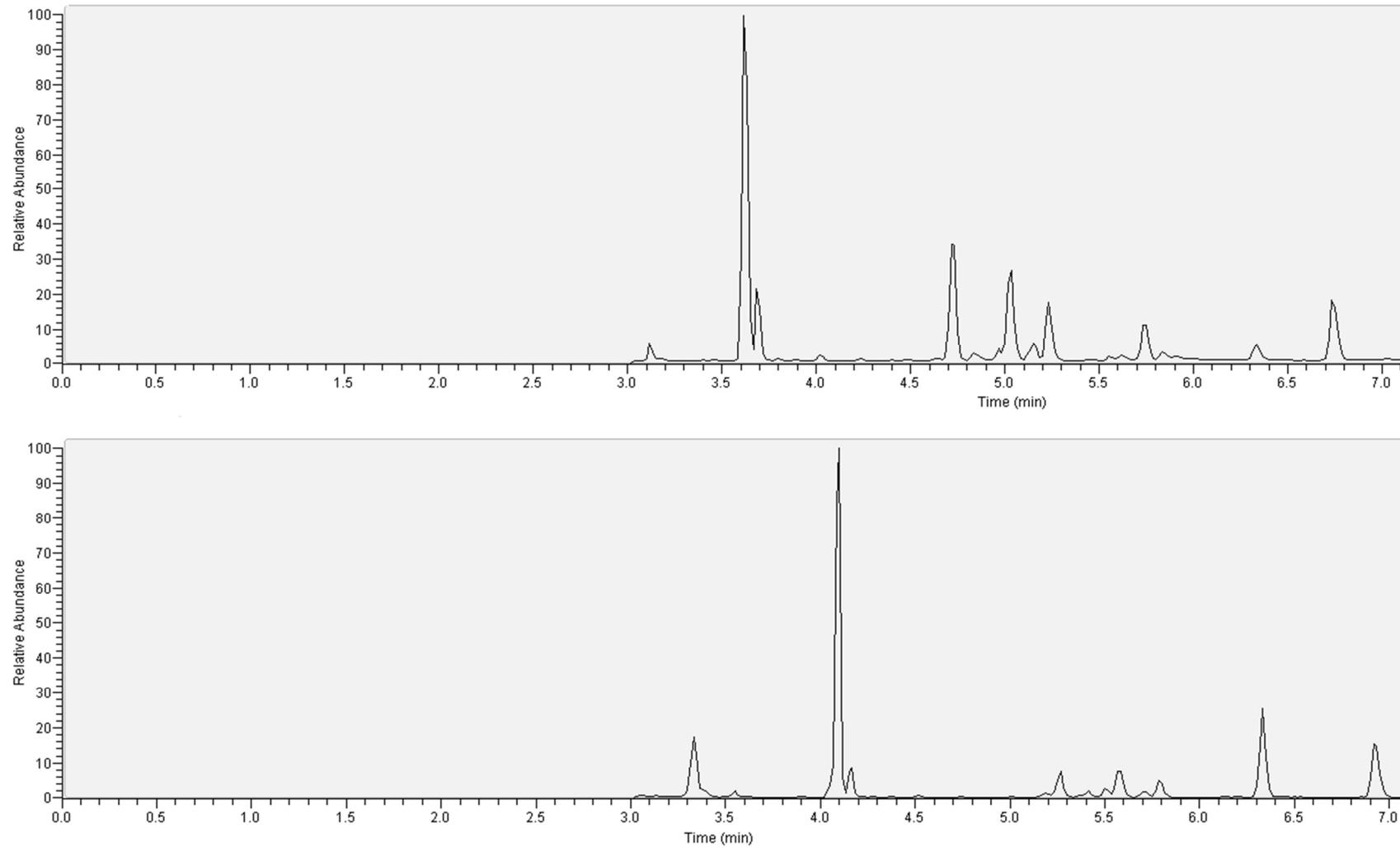


Abbildung 69: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

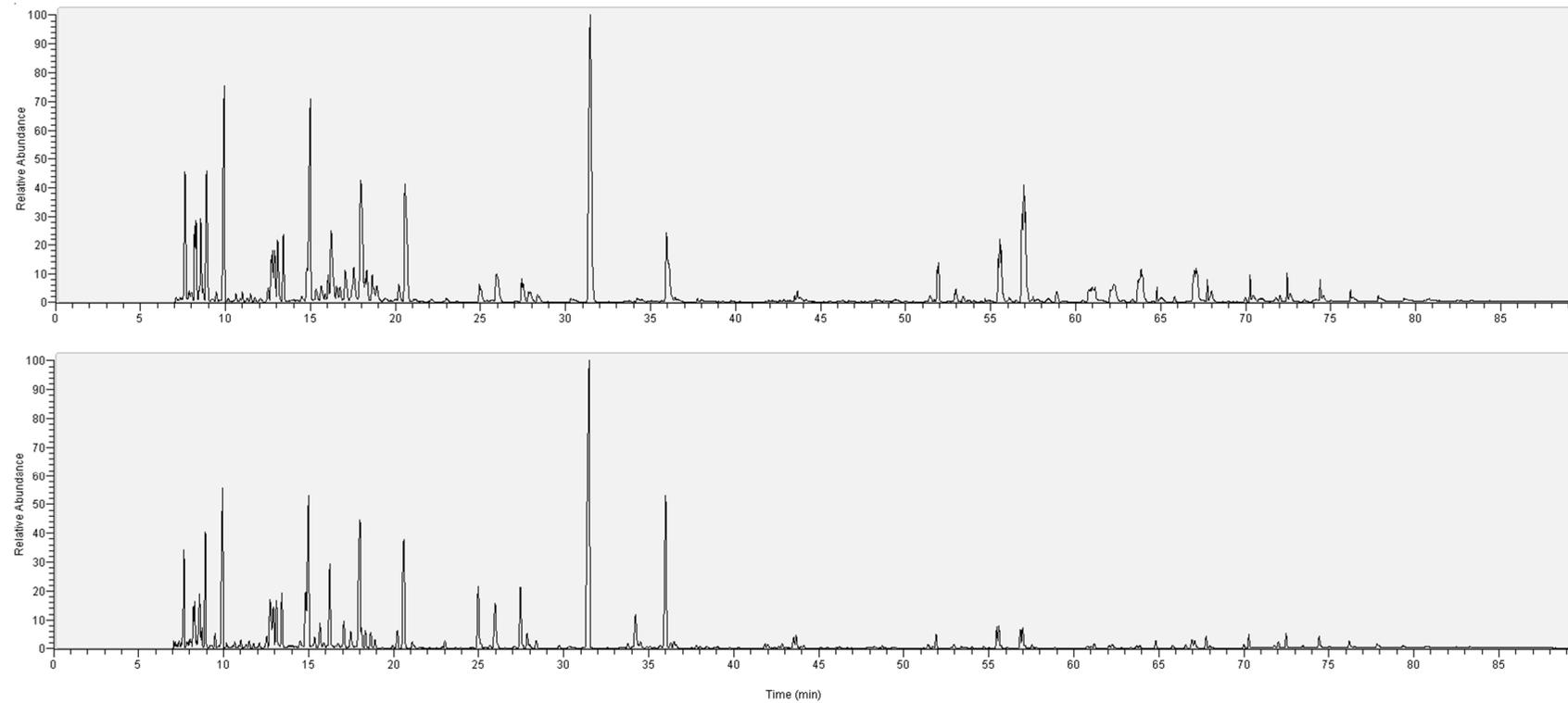


Abbildung 70: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 40: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID

Substanz	CAS-Nr.	Geruchs- eindruck	Retentionszeit	Konzentration	Retentionszeit	Konzentration
			C1 (min)	C1 (µg/g Banane)	C2 (min)	C2 (µg/g Banane)
2-Methyl-1-Propanol	78-83-1	x	4,10	1,021	4,10	1,099
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,65	0,423	7,65	0,277
Ethansäure-(3-methyl)butylester	123-92-2	Banane	8,95	0,515	8,94	0,462
2-Heptanon	110-43-0	frisch, blumig	9,68	0,285	9,68	0,279
2-Methylpropansäure-(2-methyl)propylester	97-85-8	x	12,92	0,154	12,94	0,198
2-Methylbutansäurepropylester	539-90-2	x	12,75	0,206	12,74	0,226
Butansäurebutylester	109-21-7	fruchtig	14,85	0,401	14,84	0,499
Ethansäurehexylester	142-92-7	würzig	15,73	0,053	15,72	0,061
Butansäure-(1-methyl)butylester	60415-61-4	x	16,42	0,226	16,43	0,242
Ethansäureheptan-2-yl-ester	5921-82-4	x	17,17	0,125	17,18	0,099
3-Methylbutansäurebutylester	109-19-3	x	18,18	0,425	18,18	0,486
3-Methylbutansäure-(3-methyl)butylester	659-70-1	fruchtig	20,85	0,431	20,82	0,398
Butansäurehexylester	2639-63-6	fruchtig	25,22	0,103	25,22	0,105
3-Methylbutansäurehexylester	10032-13-0	x	27,65	0,105	27,65	0,103
4-Allyl-2-methoxyphenol	97-53-0	würzig	32,79	0,216	32,78	0,245
1,2,3-Trimethoxy-5-(2-propenyl)benzol	487-11-6	x	41,35	0,348	41,34	0,371

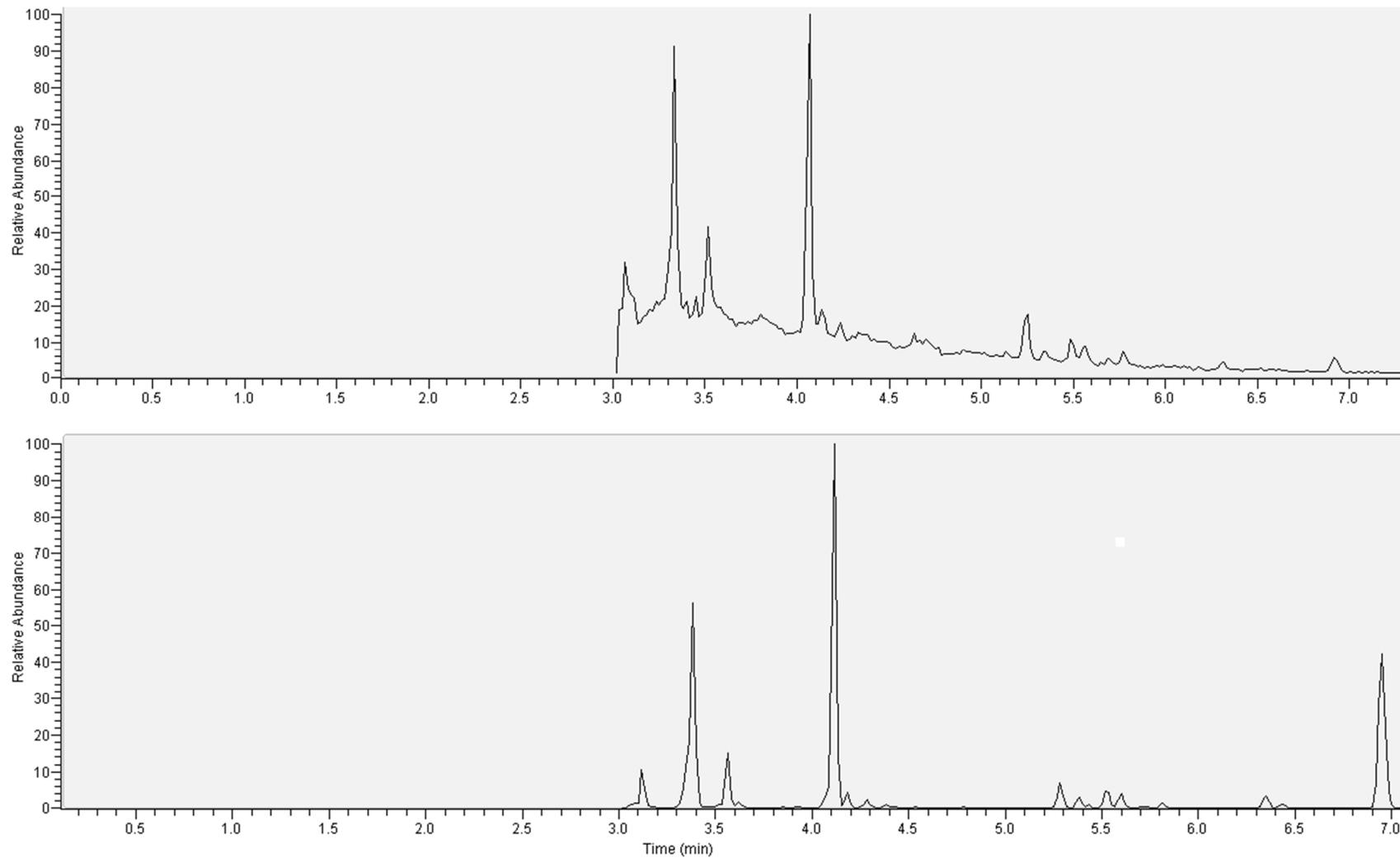


Abbildung 71: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der verdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

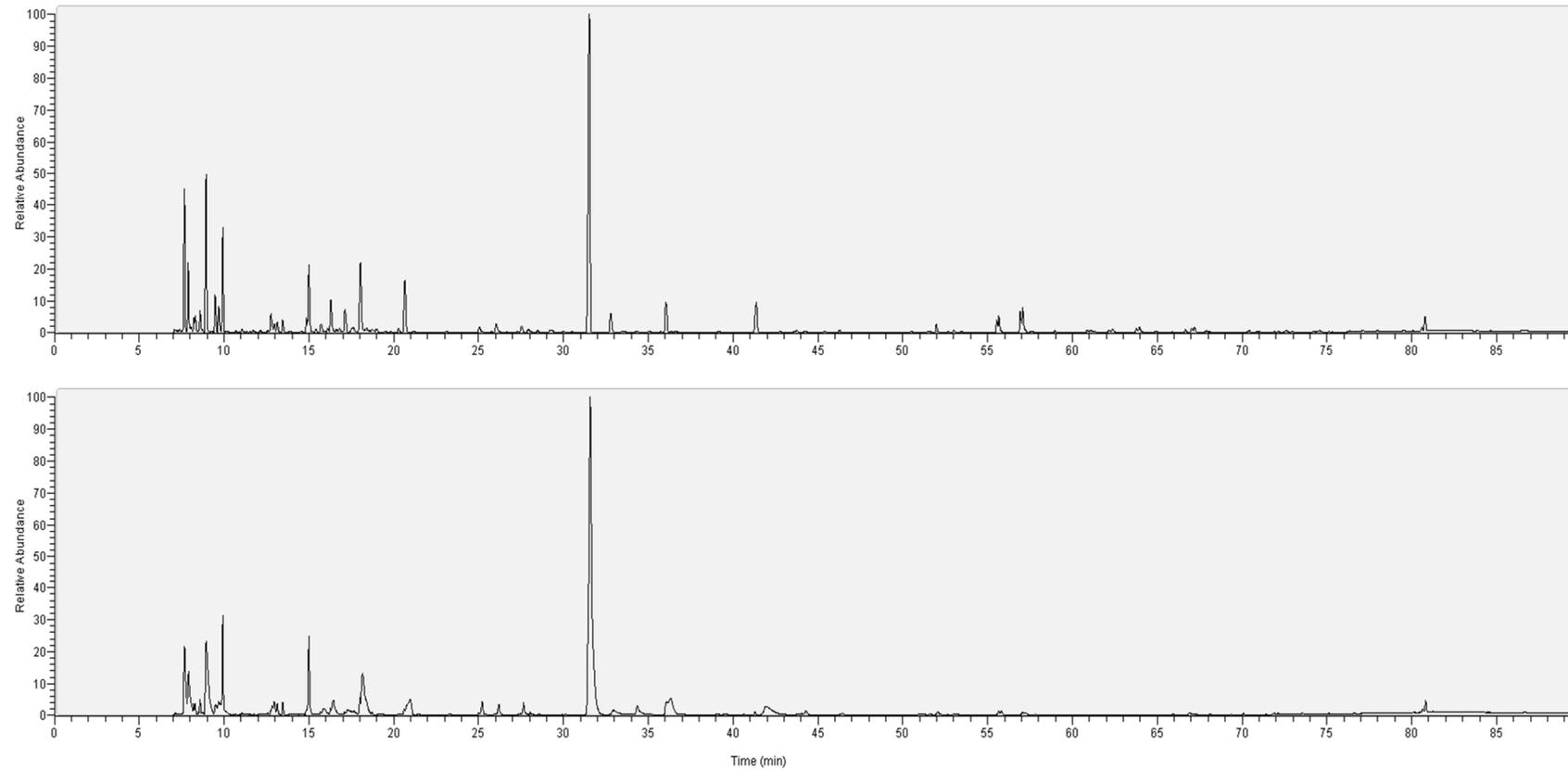


Abbildung 72: GCMS Chromatogramme (C1 oben, C2 unten) zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 2 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolare stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Tabelle 41: Identifizierte Substanzen der Bananenextraktfraktion Nr. 1 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

Substanz	CAS-Nr.	Geruchs- eindruck	Retentionszeit C1 (min)	Konzentration C1 ($\mu\text{g/g}$ Banane)	Retentionszeit C2 (min)	Konzentration C2 ($\mu\text{g/g}$ Banane)
Ethansäure-2-pentylester	626-38-0	x	7,72	0,006	7,71	0,004
Hexanol	111-27-3	geröstet	8,82	0,135	8,82	0,152
Hexansäure	142-62-1	x	15,75	0,511	15,76	0,498
2,6-Dimethoxy-4-(2-propenyl) phenol	6627-88-9	x	43,35	1,231	43,35	1,317
Hexadecansäure	57-10-3	x	53,57	40,21	53,57	42,15
9,12-Octadecadiensäure	60-33-3	x	57,02	48,21	57,03	48,89

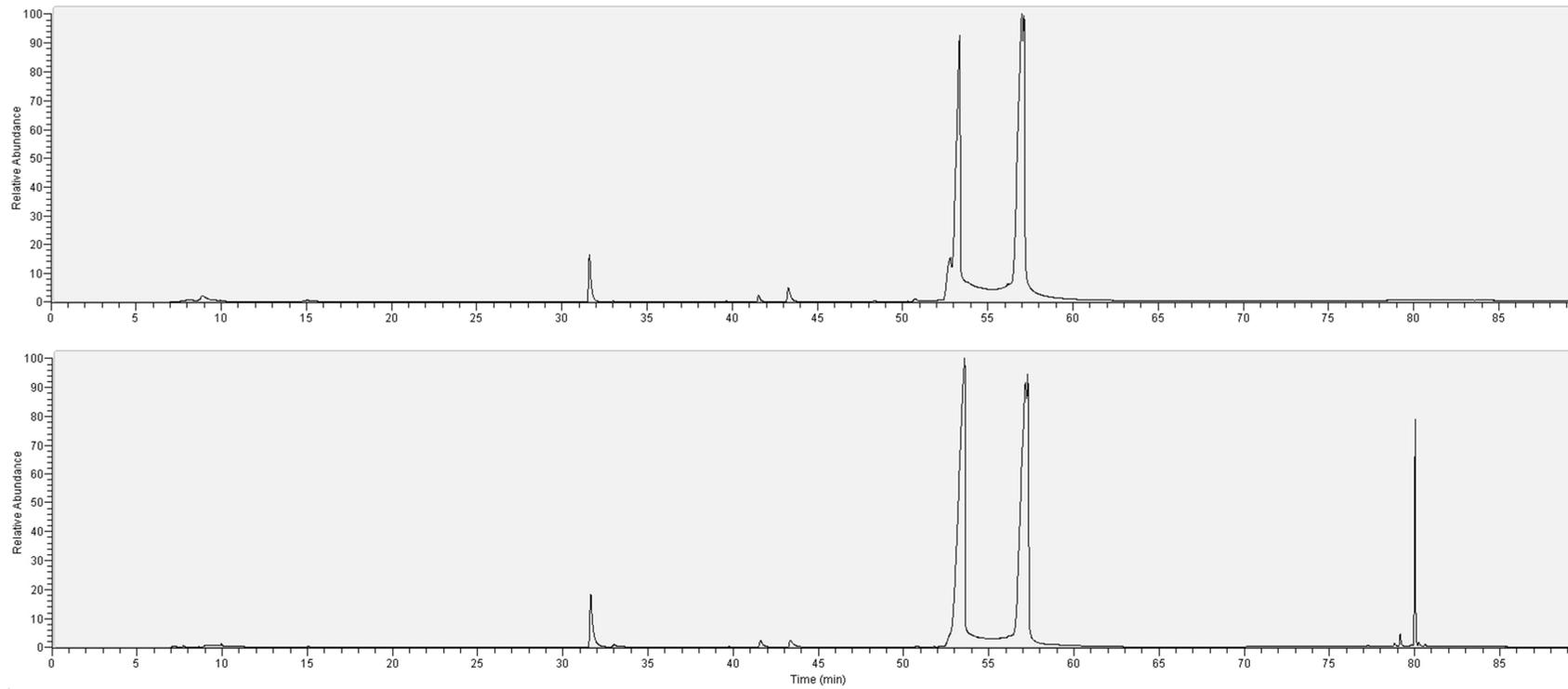


Abbildung 73: GCMS Chromatogramme zu den identifizierten Substanzen der unverdünnten Fraktion Nr. 3 aus C1 und C2 des AB-Vergleichs VIII. Auftrennung erfolgte mit unpolarer stationärer Phase. Identifizierung mittels GCMS und GC-O, Quantifizierung mittels GC-FID.

8. LEBENS LAUF

Johanna Weber
geboren am 15.12.1983 in Marburg

PROMOTION

02/2012 - dato

Institut für Lebensmittelchemie,
Hannover

Thema:
Chemische Qualitätsmarker bei der
Langzeitlagerung
sensitiver Lebensmittel

MASTERARBEIT

03/2010 - 11/2010

**Max-Planck-Institut für Marine
Mikrobiologie,**
Bremen

Thema:
Eine Geranial Dehydrogenase aus *Castellaniella
defragrans*: Überexpression in *E. coli* BL21Star
und initiale Charakterisierung

BACHELORARBEIT

09/2008 - 01/2009

Virtuelle Firma **TiGer BioTec,**
Hochschule Bremen

Thema:
Entwicklung eines enzymatischen Fassaden-
Reinigers zur Entfernung von Biofilmen
(Machbarkeitsstudie)
Teilprojekt: Prüfung technischer Enzyme

STUDIUM

- 03/2009 - 11/2010 **Master of Science,
Technische und Angewandte Biologie,**
Hochschule Bremen (Note: 1.6)
- 10/2005 - 02/2009 **Bachelor of Science,
Technische und Angewandte Biologie,**
Hochschule Bremen (Note: 1.7)
- 07/2007 - 11/2007
 Auslandssemester, University of Auckland,
 Neuseeland
- 02/2008 - 06/2008 **Auslandspraxissemester,** Molecular Vision
 Laboratory, Department of Physiology,
 University of Auckland, Neuseeland

BERUFSAUSBILDUNG

- 08/2001 - 06/2003 Staatlich geprüfte **biologisch-technische
Assistentin,** Schulzentrum Utbremen, Bremen

SCHULISCHE BILDUNG

- 08/2003 - 06/2004 **Fachoberschule,** Schulzentrum Utbremen,
 Bremen

TÄTIGKEITEN

- 02/2012 - dato **Wissenschaftliche Mitarbeiterin,**
Institut für Lebensmittelchemie,
Leibniz Universität Hannover
- 11/2011 - 01/2012 **Wissenschaftliche Mitarbeiterin,**
Abteilung für Experimentelle Innere Medizin,
Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg
- 03/2009 - 08/2011 **Wissenschaftliche Hilfskraft,**
Abteilung Mikrobiologie,
Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie,
Bremen
- 06/2005 - 06/2007 **Hilfskraft als biologisch-technische**
Assistentin,
HPLC-Abteilung,
Medizinischen Labor Bremen
- 09/2001 - 01/2005 **Hilfskraft** im Innendienst, Schwan Apotheke, Bremen

PRAKTIKA

- 01/2005 - 03/2005 **Praktikantin als biologisch-technische Assistentin,**
Landesuntersuchungsamt für Chemie, Hygiene und
Veterinärmedizin, Bremen
- 10/2004 - 12/2004 **Praktikantin als biologisch-technische Assistentin,**
Institut für Allgemeine Hygiene, Krankenhaushygiene
und Umwelthygiene, Bremen

WETTBEWERBE

- 11/2003 - 03/2004 Teilnahme an Jugend forscht; Gebiet: Biologie

PUBLIKATIONEN

Lüddeke, F., Wülfig, A., Timke, M., Germer, F., Weber, J., Dikfidan, A., Rahnfeld, T., Linder, D., Meyerdierks, A. und Harder, J., Geraniol dehydrogenase and geraniol dehydrogenase induced in the anaerobic monoterpene degradation of *Castellaniella defragrans*“ Applied and environmental microbiology, 01/2012, 78(7):2128-36.

Weber, J., Schwickert, J., Schroeder, W., Krings, U. und Berger, R.G.
„Steuerung der Reifeprozessen von Früchten auf der Basis von Luft-Ionisation“
Lebensmittelchemie, 2013, **67**, 167-168

POSTER

Weber, J., Schwickert, J., Schroeder, W., Krings, U. und Berger, R.G.
„Steuerung der Reifeprozessen von Früchten auf der Basis von Luft-Ionisation“
42. Deutscher Lebensmittelchemikertag, Braunschweig

SPRACHEN

Deutsch (Muttersprache), **Englisch** (Arbeitsprache)