

Birgit Schieber

**Phänomenologie und Kinetik der
L-Ascorbinsäure bei der Lagerung
von Gemüse am Beispiel Kohlrabi**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

**Phänomenologie und Kinetik der L-Ascorbinsäure
bei der Lagerung von Gemüse
am Beispiel Kohlrabi**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Ökotrophologie
(Dr. oec. troph.)
am Fachbereich 09 Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und
Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von

Dipl. oec. troph. Birgit Schieber
aus Gießen

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Mai 2010

Vorsitzender: Prof. Dr. Adalbert Evers

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Elmar Schlich

2. Gutachter: Prof. Dr. Karl H. Mühling

Prüfer: Prof. Dr. Bernd Honermeier

Prüfer: PD Dr. rer. nat. habil. Ralf Pätzold

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010

Zugl.: Gießen, Univ., FB Agrarwissenschaften, Ökotropologie
und Umweltmanagement, Diss., 2010

978-3-86955-551-5

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-551-5

Kurzfassung

Der L-Ascorbinsäure (AA) Gehalt von Nutzpflanzen wird durch eine Vielzahl von Vorernte- und Nacherntefaktoren beeinflusst. Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss verschiedener Lagerfaktoren, wie Lagerzeit, Lagertemperatur, spezifische Oberfläche und Lageratmosphäre auf den AA-Gehalt von Kohlrabi zu untersuchen, da insbesondere zum Einfluss der spezifischen Oberfläche bislang nur wenige Studien existieren. Des Weiteren werden Feuchtegehalt und Masse der Proben bestimmt. Als Vorerntefaktor wird zudem der Einfluss unterschiedlicher Schwefel- und Stickstoffernährung auf den AA-Gehalt der Frischware untersucht.

Kohlrabiprobe unterschiedlicher spezifischer Oberfläche (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel, Julienne, Raspel) werden bei verschiedenen Lagertemperaturen (0,5 °C, 6 °C, 12 °C) über einen Zeitraum von 6 Tagen offen eingelagert. AA-Gehalt, Feuchtegehalt und Masse der Proben werden jeden zweiten Tag bestimmt, der AA-Gehalt mit einer enzymatischen Nachweismethode (L-Ascorbinsäure Farbstest, R-Biopharm AG, Deutschland), der Feuchtegehalt thermogravimetrisch mittels eines Infrarot-Feuchtemessgeräts (MA 45 Sartorius, Deutschland).

Der relative AA-Gehalt (c/c_0) der Proben sinkt mit steigender spezifischer Oberfläche bei allen drei untersuchten Lagertemperaturen exponentiell. Eine Abnahme mit steigender Lagertemperatur wird nur bei Proben mit großer spezifischer Oberfläche (Raspel) beobachtet. Die durchgeführte multivariate lineare Regression ermöglicht zudem die Darstellung des AA-Gehalts als Funktion beider Lagerfaktoren und zeigt eindeutig, dass der Einfluss der spezifischen Oberfläche deutlich stärker ist als der Einfluss der Lagertemperatur im untersuchten Temperaturbereich. Eine Abnahme des AA-Gehalts mit zunehmender Lagerzeit wird nur bei Proben mit großer spezifischer Oberfläche (Julienne, Raspel) im Verlauf der ersten 24 h beobachtet. Der während der weiteren Lagerung nahezu gleich bleibende AA-Gehalt kann auf ein Recycling der Dehydro-L-Ascorbinsäure über den Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel zurückgeführt werden. Die Masse der Kohlrabiprobe nimmt mit zunehmender Lagerdauer, Lagertemperatur und spezifischer Oberfläche aufgrund der Abgabe von CO_2 durch die Atmung linear ab. Der Feuchtegehalt wird durch diese Faktoren nicht beeinflusst. Die Kompensation des verdunsteten Wassers wird auf die Bildung von H_2O im Verlauf von Atmung und Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel zurückgeführt.

Eine Abnahme des AA-Gehalts der Frischware in Folge gesteigerter Stickstoffernährung wird nur bei Betrachtung des AA-Gehalts pro Kohlrabiknolle beobachtet.

Abstract

The L-ascorbic acid (AA) content of horticultural crops is influenced by numerous pre- and post-harvest factors. The aim of this study is to determine the effect of different storage factors, like storage time, storage temperature, specific surface area, and storage atmosphere, on the AA content of kohlrabi samples. Few investigations have focused on these factors, especially the effect of different specific surface areas on the AA content of stored vegetables has hardly been studied. Furthermore, moisture content and mass of the samples are evaluated. Concerning the effect of pre-harvest factors, the AA content of fresh kohlrabi stems as influenced by sulfur and nitrogen nutrition is examined.

Kohlrabi samples with different specific surface areas (big cubes, sticks, small cubes, julienne, shreds) are stored openly at different temperatures (0.5 °C, 6 °C, 12 °C) for 6 days. AA content, moisture content, and mass of the samples are evaluated on alternating days, AA by an enzymatic method (L-ascorbic acid colorimetric method, R-Biopharm, Germany), moisture content by thermogravimetric analysis using a moisture analyser (MA 45 Sartorius, Germany) with infrared drying.

The relative AA content (c/c_0) is found to decrease exponentially with increasing specific surface area at all storage temperatures. A decrease with increasing storage temperature is only observed for samples with high specific surface areas (shreds). When plotting the relative AA content as $\ln c/c_0$ and conducting a multivariate linear regression the regression function shows clearly that the effect of the specific surface area is much stronger than the effect of the storage temperature within the examined temperature range. A decrease in AA-content with increasing storage time is only observed for samples with high specific surface areas (julienne, shreds) up to 24 h of storage. Possible recycling of Dehydro-L-ascorbic acid via ascorbate-glutathione cycle may be a reason for AA-retention in the following storage days. The mass of the samples decreases linearly with increasing storage time, storage temperature and specific surface area, due to the release of gaseous metabolic products. However, moisture content is not affected by these factors. The compensation of H₂O loss due to respiration and ascorbate-glutathione cycle provides an explanation for nearly 100 % moisture retention.

A decreasing AA-content with increasing nitrogen nutrition is only observed when evaluating the AA-content per stem, not per 100 g dry matter.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Verwendete Symbole und Abkürzungen	X
Formelverzeichnis	XII
1 Einleitung.....	1
2 Stand des Wissens und der Technik	3
2.1 Kohlrabi	3
2.1.1 Botanik und Inhaltsstoffe.....	3
2.1.2 Marktdaten	5
2.2 Vorgänge während der Lagerung von Gemüse.....	6
2.2.1 Photosynthese	6
2.2.2 Atmung.....	8
2.2.3 Transpiration	11
2.2.4 Alterung.....	12
2.3 L-Ascorbinsäure	13
2.3.1 Struktur und Eigenschaften.....	13
2.3.2 Biosynthese	14
2.3.3 Recycling der Semidehydro- und Dehydro-L-Ascorbinsäure	18
2.3.4 Aufgaben im pflanzlichen und tierischen Organismus.....	21
2.4 Einfluss von Vorerntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt.....	23
2.4.1 Sorte	23
2.4.2 Reifegrad zum Erntezeitpunkt.....	24
2.4.3 Klimatische Bedingungen.....	25
2.4.4 Düngung	26
2.5 Einfluss von Nacherntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt	29
2.5.1 Lagertemperatur	29
2.5.2 Lagerdauer.....	30
2.5.3 Relative Feuchte	32
2.5.4 Lichteinstrahlung	32
2.5.5 Art und Weise der Zerkleinerung	33
2.5.6 Lageratmosphäre.....	35
2.6 Arbeitshypothesen.....	36
3 Material und Methoden	39
3.1 Gemüseauswahl und Bezug der Frischware	39
3.2 Vorbereitung der Frischware und Einlagerung der Proben.....	40

3.3	Messung der Parameter in Frischware und Lagerproben	42
3.3.1	L-Ascorbinsäure (Versuchsreihen A bis F und H).....	42
3.3.2	L-Ascorbinsäure und Gesamtascorbinsäure (Versuchsreihe G)	46
3.3.3	Feuchte und Masse	48
3.4	Chemikalien, Geräte und Verbrauchsmaterialien.....	48
3.5	Statistische Auswertung.....	53
4	Ergebnisse	57
4.1	Einfluss von N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi.....	57
4.2	Einfluss der untersuchten Nacherntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi- proben	61
4.2.1	Lagerzeit.....	61
4.2.2	Lagertemperatur	63
4.2.3	Spezifische Oberfläche.....	65
4.2.4	Lageratmosphäre	72
4.3	Einfluss von Lagerfaktoren auf Feuchtegehalt und Masse der Kohlrabi- proben.....	73
4.3.1	Lagerzeit, Lagertemperatur und spezifische Oberfläche	73
4.3.2	Lageratmosphäre	77
4.4	L-Ascorbinsäure- und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalte von Kohlrabi im Verlauf der Lagerung.....	79
5	Diskussion.....	81
5.1	Einfluss der N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt.....	81
5.2	Einfluss der Lagerfaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt.....	84
5.2.1	Lagerzeit.....	84
5.2.2	Lagertemperatur	86
5.2.3	Spezifische Oberfläche.....	90
5.2.4	L-Ascorbinsäuregehalt als Funktion von Lagertemperatur und spezifischer Oberfläche	94
5.2.5	Verpackung / Lageratmosphäre	97
5.3	Einfluss der Lagerfaktoren auf Masse und Feuchtegehalt	98
5.4	Einfluss der Lagerfaktoren auf den L-Ascorbinsäure- und Gesamt- ascorbinsäuregehalt.....	101
5.5	Fazit	103
6	Zusammenfassung.....	107
7	Literaturverzeichnis	111
	Anhang	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Hauptanbauggebiete für Freilandkohlrabi in 2008, bezogen auf die Erntemenge	6
Abb. 2.2:	Oxidation der L-Ascorbinsäure	14
Abb. 2.3:	In der Vergangenheit postulierte Wege der L-Ascorbinsäuresynthese in Pflanzen: (a) Biosynthese nach Isherwood (b) Biosynthese nach Loewus	16
Abb. 2.4:	Biosynthese der L-Ascorbinsäure nach Wheeler.....	17
Abb. 2.5:	Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel	20
Abb. 3.1:	Vergleichende Messungen der L-Ascorbinsäure per HPLC und Enzymatik.....	43
Abb. 4.1:	Einfluss unterschiedlicher N- und S-Ernährung auf L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} und Masse m_{Knolle} der Kohlrabiknollen	58
Abb. 4.2:	Einfluss unterschiedlicher N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/g TM	59
Abb. 4.3:	Einfluss unterschiedlicher N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/Knolle	60
Abb. 4.4:	Relative Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 von Kohlrabiprobe unterschiedlicher spezifischer Oberfläche im Verlauf von 6 Tagen Lagerung bei 0,5 °C, 6 °C und 12 °C.....	62
Abb. 4.5:	Relative Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 von Kohlrabiprobe unterschiedlicher spezifischer Oberfläche im Verlauf von 6 Tagen Lagerung bei 6 °C.....	63
Abb. 4.6:	Einfluss der Lagertemperatur T auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 von Kohlrabi unterschiedlicher spezifischer Oberfläche nach 2 Tagen Lagerung.....	64
Abb. 4.7:	Einfluss der spezifischen Oberfläche a auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabiprobe am Tag 2 (a) als Einzelwerte und (b) als Mittelwerte und Standardabweichung.	67
Abb. 4.8:	Einfluss der spezifischen Oberfläche a auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabiprobe am Tag 2, ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Lagertemperaturen.....	71
Abb. 4.9:	Einfluss der Verpackung unter modifizierter Atmosphäre (MAP) auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 von Kohlrabi im Vergleich zur offenen Lagerung	72
Abb. 4.10:	Einfluss unterschiedlicher Lagerformen auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert bei 0,5 °C.....	74
Abb. 4.11:	Einfluss unterschiedlicher Lagerformen auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert bei 6 °C.....	75
Abb. 4.12:	Einfluss unterschiedlicher Lagerformen auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert bei 12 °C.....	76

Abb. 4.13: Einfluss unterschiedlicher Verpackungsarten auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert als Stäbchen bei 12 °C.....	77
Abb. 4.14: Einfluss unterschiedlicher Verpackungsarten auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert als Julienne bei 12 °C.	78
Abb. 4.15: L-Ascorbinsäuregehalt und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt von in Form von (a) Julienne und (b) Raspeln gelagerten Kohlrabi im Verlauf von 6 Tagen Lagerung bei 6 °C.	79
Abb. 5.1: L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/g TM in Abhängigkeit von N- und S-Ernährung	82
Abb. 5.2: L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/Knolle in Abhängigkeit von N- und S-Ernährung	83
Abb. 5.3: Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 der offen gelagerten Kohlrabiprobe(n) (Julienne und Raspel) mit steigender Lagertemperatur T der Proben am Lagertag 2.....	87
Abb. 5.4: Einfluss der Lagertemperatur T auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabiprobe(n) am Lagertag 2 nach Logarithmierung der y-Werte.	88
Abb. 5.5: Exponentielle Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 der offen gelagerten Kohlrabiprobe(n) mit steigender spezifischer Oberfläche a der Proben am Lagertag 2.....	90
Abb. 5.6: Einfluss der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabiprobe(n) am Lagertag 2 nach Logarithmierung der y-Werte.	91
Abb. 5.7: Einfluss der spezifischen Oberfläche a und der Lagertemperatur T auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabiprobe(n) am Lagertag 2 nach Logarithmierung der y-Werte.	95
Abb. 5.8: Einfluss von spezifischer Oberfläche, Lagertemperatur und Lagerzeit auf die relative Masse m/m_0 der Kohlrabiprobe(n).....	99
Abb. 5.9: Relative Masseveränderung m/m_0 der offen gelagerten Kohlrabiprobe(n) am Lagertag 6 in Abhängigkeit von der Lagertemperatur T	100

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Hauptbestandteile und ausgewählte einzelne Inhaltsstoffe der Kohlrabiknolle	4
Tab. 3.1: Übersicht der Einstellungen des Kühlgeräts in den einzelnen Versuchsreihen.....	41
Tab. 3.2: Pipettierschema zur Bestimmung des Gehalts an L-Ascorbinsäure	44
Tab. 3.3: Pipettierschema zur Bestimmung des Gehalts an Gesamtascorbinsäure	47
Tab. 3.4: Verwendete Chemikalien.....	50
Tab. 3.5: Verwendete Geräte	51
Tab. 3.6: Verbrauchsmaterialien.....	52
Tab. 4.1: N- und S-Gehalt der untersuchten Düngevarianten.....	57
Tab. 4.2: Zieltemperatur und tatsächlich gemessene Lagertemperatur der eingelagerten Stäbchen, Julienne und Raspel.	63
Tab. 4.3: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der Lagertemperatur auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe unterschiedlicher spezifischer Oberfläche	65
Tab. 4.4: Anhand von Stichproben ermittelte spezifische Oberfläche <i>a</i> der untersuchten Lagerformen.	66
Tab. 4.5: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der spezifischen Oberfläche <i>a</i> auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 0,5 °C.....	68
Tab. 4.6: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der spezifischen Oberfläche <i>a</i> auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 6 °C.....	69
Tab. 4.7: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der spezifischen Oberfläche <i>a</i> auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 12 °C.....	70

Verwendete Symbole und Abkürzungen

<i>a</i>	spezifische Oberfläche
AA	L-Ascorbinsäure
AA ⁻	L-Ascorbat
AAO	Ascorbat-Oxidase
ADP	Adenosin-5'-diphosphat
ANOVA	analysis of variance
ATP	Adenosin-5'-triphosphat
<i>c</i>	Konzentration
CA	Controlled atmosphere
<i>d</i>	Schichtdicke
DHA	Dehydro-L-Ascorbinsäure
DHA ⁻	Dehydro-L-Ascorbat
DNA	desoxyribonucleic acid
DTT	1,4-Dithiothreitol
<i>E</i>	Extinktion
ε	Extinktionskoeffizient
GAP	Glycerinaldehyd-3-phosphat
GDP	Guanosin-5'-diphosphat
GMP	Guanosin-5'-monophosphat
GSH	reduziertes Glutathion
GSSG	Glutathiondisulfid
GTP	Guanosin-5'-triphosphat
<i>hν</i>	Lichtquanten
HPLC	High-performance liquid chromatography
HSD	honestly significant differences
korr	korrigiert
KS-Test	Kolmogoroff-Smirnoff-Test
<i>M</i>	Feuchte
<i>m</i>	Masse
MAP	Modified atmosphere packaging
MDHA	Monodehydro-L-Ascorbinsäure (Semidehydro-L-Ascorbinsäure)
<i>M_G</i>	Molmasse
MTT	3-(4,5-Dimethylthiazolyl-2)-2,5-diphenyltetrazoliumbromid

n	Stichprobenumfang
n. s.	nicht signifikant
NAD	Nicotinamid-adenin-dinucleotid (oxidiert: NAD ⁺ , reduziert: NADH)
NADP	Nicotinamid-adenin-dinucleotidphosphat (oxidiert: NADP ⁺ , reduziert NADPH)
ox	oxidiert
PE	Polyethen (veraltet: Polyethylen)
P _i	anorganisches Phosphat
PMS	5-Methylphenaziniummethosulfat
Q ₁₀	Temperaturquotient der Atmung
R ²	Bestimmtheitsmaß
red	reduziert
ROS	reactive oxygen species
s	Standardabweichung
T	Temperatur
t	Zeit
tab	tabelliert
TM	Trockenmasse
UDP	Uridinphosphat
v	Freiheitsgrade
V	Gesamtvolumen
v	Probevolumen
VR	Versuchsreihe
\bar{x}	Mittelwert

Formelverzeichnis

(Gl. 2-1)	Lichtreaktion der Photosynthese (Bruttogleichung).....	7
(Gl. 2-2)	Calvin-Zyklus (Bruttogleichung).....	7
(Gl. 2-3)	Atmung (Bruttogleichung).....	8
(Gl. 3-1)	Oxidation des L-Ascorbats im Leerwertansatz durch Zugabe von Ascorbat-Oxidase.....	44
(Gl. 3-2)	Reaktion von MTT mit L-Ascorbat zum photometrisch messbaren MTT-Formazan.....	44
(Gl. 3-3)	Berechnung der L-Ascorbinsäurekonzentration der Probe auf Grundlage des Lambert-Beer'schen Gesetzes.....	45
(Gl. 3-4)	Reduktion des Dehydro-L-Ascorbat zu L-Ascorbat durch Zugabe von DTT.....	46
(Gl. 3-5)	Berechnung der Dehydro-L-Ascorbinsäurekonzentration anhand der bestimmten Gesamtascorbinsäure- und L-Ascorbinsäurekonzentrationen.....	47
(Gl. 3-6)	Berechnung des korrigierten Bestimmtheitsmaß.....	55
(Gl. 5-1)	Regressionsgerade zur Abnahme von $\ln c/c_0$ mit steigender Lagertemperatur der gelagerten Raspel am Tag 2.....	88
(Gl. 5-2)	Exponentielle Abnahme von c/c_0 mit steigender Lagertemperatur der gelagerten Raspel am Tag 2.....	88
(Gl. 5-3)	Regressionsgerade zur Abnahme von $\ln c/c_0$ mit steigender spezifischer Oberfläche der bei 0,5 °C gelagerten Proben am Tag 2.....	92
(Gl. 5-4)	Regressionsgerade zur Abnahme von $\ln c/c_0$ mit steigender spezifischer Oberfläche der bei 6 °C gelagerten Proben am Tag 2.....	92
(Gl. 5-5)	Regressionsgerade zur Abnahme von $\ln c/c_0$ mit steigender spezifischer Oberfläche der bei 12 °C gelagerten Proben am Tag 2.....	92
(Gl. 5-6)	Exponentielle Abnahme von c/c_0 mit steigender spezifischer Oberfläche der bei 0,5 °C gelagerten Proben am Tag 2.....	92
(Gl. 5-7)	Exponentielle Abnahme von c/c_0 mit steigender spezifischer Oberfläche der bei 6 °C gelagerten Proben am Tag 2.....	92
(Gl. 5-8)	Exponentielle Abnahme von c/c_0 mit steigender spezifischer Oberfläche der bei 12 °C gelagerten Proben am Tag 2.....	92
(Gl. 5-9)	Regressionsgleichung der multivariaten Regression anhand der unabhängigen Variablen Lagertemperatur und spezifische Oberfläche.....	94
(Gl. 5-10)	Regressionsgleichung der multivariaten Regression nach Ausschluss zweier Stichproben (Würfel und Raspel bei 6 °C).....	95
(Gl. 5-11)	Exponentielle Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts der gelagerten Proben am Tag 2 mit zunehmender Lagertemperatur und spezifischer Oberfläche.....	96

1 Einleitung

Um dem Wunsch der Bevölkerung nach einer saisonunabhängigen Bereitstellung möglichst aller Obst- und Gemüsesorten in stets gleichbleibend hoher Qualität nachzukommen, ist eine geeignete Lagerung sowohl zur Saisonverlängerung der heimischen Produkte als auch während des Transports importierter Waren unerlässlich. Auch nimmt der Verbrauch küchenfertiger Obst- und Gemüseprodukte, zum Beispiel in Form bereits vorgeschnittener Salate, stetig zu. Diese stellen besonders hohe Anforderungen an die Lagerbedingungen.

Pflanzliche Lebensmittel dienen in der menschlichen Ernährung nicht nur als Energielieferanten durch die Bereitstellung von Kohlenhydraten oder Lipiden. Ihre ernährungsphysiologische Qualität wird vielmehr zu einem entscheidenden Teil durch ihren Gehalt an weiteren Nährstoffen, wie zum Beispiel Vitaminen, Mineralstoffen und Spurenelementen, bestimmt [Zacharias 1992, DGE 2004]. So ist der Mensch unter anderem nicht in der Lage, Vitamin C zu synthetisieren und somit auf die Zufuhr dieses Vitamins mit der Nahrung angewiesen [Smirnof 1996a, Elmadfa 2004, Valpuesta 2004].

Sowohl der Vitamin- als auch der Mineralstoffgehalt von Pflanzen wird durch eine Vielzahl von Vorerntefaktoren, wie zum Beispiel den Nährstoffgehalt des Bodens und klimatische Bedingungen, aber auch Nacherntefaktoren, wie Transport- und Lagerbedingungen, beeinflusst [DGE 2004]. Zur Beurteilung der Qualität vieler pflanzlicher Lebensmittel spielt Vitamin C eine wichtige Rolle. Aufgrund seiner geringen Stabilität wird es häufig als Parameter genutzt, um sowohl Verarbeitungs- als auch Lagerprozesse im Hinblick auf ihre Nährstofferhaltung zu untersuchen [Henninger 1981, Klein 1982, Vanderslice 1990, Favell 1998]. Der Sammelbegriff Vitamin C umfasst die physiologisch wirksamen Formen L-Ascorbinsäure und Dehydro-L-Ascorbinsäure [Burton 1982, Elmadfa 2004]. In vielen Kulturpflanzen wie Brokkoli, Rosenkohl oder Blumenkohl beträgt der Anteil an Dehydro-L-Ascorbinsäure am Vitamin C-Gehalt weniger als 10 % in der Frischware [Wills 1984], weshalb in Studien zum Einfluss von Lagerfaktoren auf den Vitamin C-Gehalt häufig nur der L-Ascorbinsäuregehalt als Parameter untersucht wird.

Aus der Literatur ist bekannt, dass der Vitamin C-Gehalt von Lebensmitteln im Verlauf der Lagerung durch verschiedene Faktoren wie Lagerdauer, Lagertemperatur, spezifische Oberfläche und Lageratmosphäre beeinflusst wird [Lee 2000]. Ziel dieser

Arbeit ist es, den Einfluss der genannten Lagerfaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi zu untersuchen. Betrachtet werden soll hierbei sowohl die Phänomenologie als auch die Kinetik der L-Ascorbinsäure. Insbesondere zum Einfluss der spezifischen Oberfläche, die zum Beispiel bei bereits vorgeschnittenen Gemüseprodukten deutlich vergrößert ist, existieren bislang nur wenige Studien. Meist wird im Hinblick auf die spezifische Oberfläche nur deren Einfluss auf die Atmungsaktivität untersucht. Eine größere spezifische Oberfläche müsste jedoch, unter anderem aufgrund eines gesteigerten oxidativen Abbaus im Verlauf der Lagerung, auch einen größeren Verlust an L-Ascorbinsäure zur Folge haben. Kohlrabi wird als geeignetes Gemüse insbesondere zur Untersuchung des Einflusses der spezifischen Oberfläche betrachtet, da sich die Sprossknolle der Kohlrabipflanze in Würfel oder Quader mit definierter Kantenlänge zerteilen lässt, was eine Berechnung der spezifischen Oberfläche der jeweiligen Lagerproben ermöglicht. Zusätzlich wird im Hinblick auf den Einfluss von Vorerntefaktoren anhand verschiedener Düngervarianten der Einfluss von Stickstoff- und Schwefelernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware untersucht.

Zur Untersuchung des Einflusses von Lagerdauer, Lagertemperatur, spezifischer Oberfläche und Lageratmosphäre auf den L-Ascorbinsäuregehalt werden Kohlrabi-proben unterschiedlicher spezifischer Oberfläche bei verschiedenen Lagertemperaturen über einen Zeitraum von 6 Tagen offen in einem haushaltsüblichen Kühlgerät eingelagert. Die Messung des L-Ascorbinsäuregehalts wird jeweils unmittelbar vor der Einlagerung sowie an den Lagertagen 2, 4 und 6 vorgenommen. Die Bestimmung der L-Ascorbinsäure erfolgt hierbei enzymatisch mit einem Farb-Test (L-Ascorbinsäure Farbttest, R-Biopharm AG, Deutschland) und das Ergebnis wird als relativer L-Ascorbinsäuregehalt, bezogen auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware, angegeben. Der Feuchtegehalt der Kohlrabiproben wird thermogravimetrisch mittels eines Infrarot-Feuchtemessgeräts (MA 45 Sartorius, Deutschland) bestimmt.

2 Stand des Wissens und der Technik

2.1 Kohlrabi

2.1.1 Botanik und Inhaltsstoffe

Kohlrabi (*Brassica oleracea* convar. *acephala* var. *gongylodes* L.) zählt wie alle Kohlarten zur Familie der Brassicaceae. Bei der Kohlrabipflanze handelt es sich um eine zweijährige Pflanze mit gestielten Blättern. Sie ist gekennzeichnet durch ein Dickenwachstum der Hauptachse oberhalb des Hypokotyls, das zur Bildung einer orthotropen Sprossknolle führt, die der Pflanze als Speicherorgan dient. Da die Stammverdickung oberhalb des 4. bis 5. Internodiums (Laubblattes) stattfindet, wächst die Sprossknolle über der Erde, im Gegensatz zu zum Beispiel Radieschen oder Rote Bete, bei denen eine Verdickung vor allem des Hypokotyls vorliegt. Für den Anbau werden meist Jungpflanzen verwendet, die Kulturdauer von Pflanzung bis Ernte dauert je nach Jahreszeit 2 bis 3 Monate. Wird die Pflanze nicht geerntet, erfolgt im zweiten Jahr die Bildung des Blütenstandes, die Blüte kann jedoch auch bereits im Jungpflanzenstadium durch einen Kälte- oder Frostschock ausgelöst werden [Bickel-Sandkötter 2003, Wonneberger 2004, Van Wyk 2005]. Bei den Kohlrabipflanzen kann je nach Anbauzeit zwischen Früh- und Spätsorten und bezüglich der Färbung zwischen grünen und rotschaligen Sorten unterschieden werden. Bei den rotschaligen Sorten wird die Rotfärbung der Schale und häufig auch der Blattstiele und Blattrippen durch Anthocyane hervorgerufen [Bickel-Sandkötter 2003].

Bei Kohlrabi handelt es sich um ein frostempfindliches Gemüse. Temperaturen unter 0 °C verursachen in den Randschichten der Knolle Plasmolyse und Absterben der Zellen, so dass in diesen peripheren Bereichen physiologische Schäden auftreten [Böttcher 1996].

Mit einem Gesamtascorbinsäuregehalt von durchschnittlich 63 mg/100 g (41 - 92 mg/100 g) zählt Kohlrabi zu den Vitamin C-reichen Gemüsearten [Souci 2008]. 100 g Kohlrabi decken ca. 60 % der empfohlenen täglichen Zufuhr an Vitamin C für Erwachsene (25 bis 50 Jahre), die bei 100 mg/d liegt [DGE 2000].

Tab. 2.1: Hauptbestandteile und ausgewählte einzelne Inhaltsstoffe der Kohlrabiknolle [Souci 2008]

Energiegehalt	
der verdaulichen Bestandteile aus 100 g essbarem Anteil (Abfall: 34 %)	105 kJ
Hauptbestandteile in 100 g essbarem Anteil	
Wasser	91,6 g
Protein (N x 6,25)	1,94 g
Fett	0,16 g
Kohlenhydrate	3,7 g
Ballaststoffe	1,44 g
Organische Säuren	0,16 g
Mineralstoffe	0,95 g
Einzelne Inhaltsstoffe in 100 g essbarem Anteil	
Mineralstoffe	
Natrium	20 mg
Kalium	322 mg
Magnesium	43 mg
Calcium	59 mg
Mangan	110 µg
Eisen	475 µg
Cobalt	1,7 µg
Kupfer	47 µg
Zink	246 µg
Nickel	6 µg
Phosphor	50 mg
Chlorid	37 mg
Iodid	728 ng
Selen	700 ng
Vitamine	
Vitamin A (Retinoläquivalent)	33 µg
Gesamtcarotinoide	200 µg
β-Carotin	200 µg
Vitamin K	7 µg
Vitamin B ₁	48 µg
Vitamin B ₂	46 µg
Nicotinamid	1,8 mg
Pantothensäure	100 µg
Vitamin B ₆	71 µg
Biotin	2,7 µg
Folsäure	70 µg
Vitamin C	63 mg
Bioaktive Inhaltsstoffe	
Glucosinolate	19 mg

Neben Vitamin C liefert die Kohlrabiknolle auch weitere Vitamine (Vitamin K, Nicotinamid, Folsäure) und Mineralstoffe (Kalium, Magnesium) und ist reich an Glucosino-

laten (siehe Tab. 2.1). Unter der Bezeichnung Glucosinolate wird eine Gruppe schwefelhaltiger Metabolite des Sekundärstoffwechsels der Pflanzen zusammengefasst. Sie kommen insbesondere in Pflanzen der Familie Brassicaceae vor und bestehen aus einem β -Thioglucose-Rest, einem sulfonierten Oxim-Rest und einer variablen Seitenkette, die sich von einer Aminosäure (häufig Valin, Phenylalanin oder Methionin) ableitet. Die Hydrolyse der Glucosinolate wird durch das Enzym Myrosinase (β -Thioglucosidase) katalysiert, das unter anderem als Folge mechanischer Verletzungen des Gewebes in Kontakt mit den Glucosinolaten tritt. Ascorbinsäure wirkt hierbei vermutlich als Coenzym (siehe Kapitel 2.3.4). Bei der Hydrolyse der Glucosinolate entsteht eine Vielzahl an Abbauprodukten, zu denen die Isothiocyanate (ITC), Nitrile und Thiocyanate zählen [Mithen 2001, Watzl 2001]. Den Isothiocyanaten wird in der jüngsten Vergangenheit eine anticancerogene Wirkung zugesprochen. In Kohlrabi sind vor allem die Isothiocyanate Methylthiobutyl-ITC, Sulforaphan, Allyl-ITC und Phenylethyl-ITC vertreten [Gerendás 2008].

2.1.2 Marktdaten

Kohlrabi wird weltweit angebaut, die Hauptanbauggebiete liegen jedoch in Mitteleuropa [Bickel-Sandkötter 2003].

Im Jahr 2008 werden in Deutschland von insgesamt 2.618 Betrieben auf einer Anbaufläche von $23.170 \times 10^3 \text{ m}^2$ (2.317 ha) Kohlrabi im Freiland angebaut. Bei einem durchschnittlichen Flächenertrag von $3,08 \text{ kg/m}^2$ (308 dt/ha) ergibt sich somit eine Erntemenge von 71.365.700 kg (713.657 dt) für 2008. Unter Glas wird Kohlrabi 2008 von insgesamt 1.044 Betrieben angebaut. Mit einer Erntemenge von 1.566.600 kg (15.666 dt) auf einer Anbaufläche von $365 \times 10^3 \text{ m}^2$ (36,51 ha) kommt dieser Anbauform eine deutlich geringere Bedeutung zu [Stabu 2009a, Stabu 2009b].

Bezogen auf Anbaufläche und erzielte Erntemenge liegen die Hauptanbauggebiete innerhalb Deutschlands für Freilandkohlrabi in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Rheinland-Pfalz (siehe Abb. 2.1).

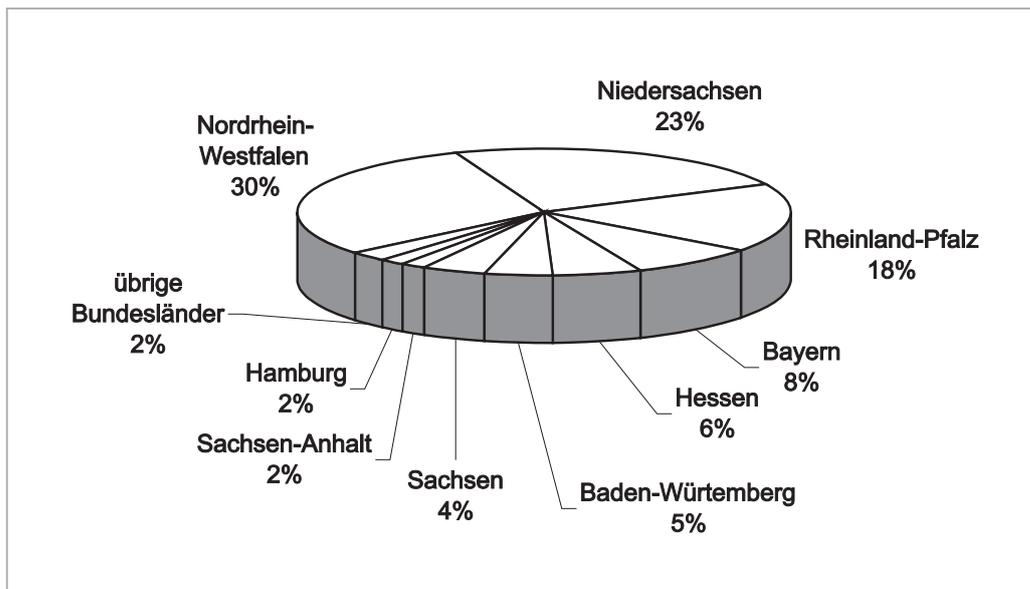


Abb. 2.1: Hauptanbauggebiete für Freilandkohlrabi in 2008, bezogen auf die Erntemenge, modifiziert nach [Stabu 2009a]

Der Anbau von Kohlrabi in Unterglasanlagen findet vor allem Anwendung in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Bayern (> 60 % der Anbauflächen des Unterglasanbaus) [Stabu 2009a].

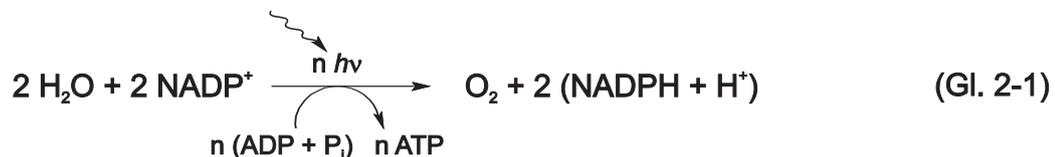
2.2 Vorgänge während der Lagerung von Gemüse

Bei geerntetem Gemüse handelt es sich um lebende Pflanzenorgane, in deren Gewebe auch nach der Ernte noch eine Vielzahl physiologischer Vorgänge ablaufen, zu denen unter anderem Photosynthese, Atmung, Transpiration und Alterung zählen [Böttcher 1996]. So sind zum Beispiel die während der Lagerung zu beobachtenden Frischmasseverluste vor allem auf Atmungsverluste und Verluste durch die Transpiration zurückzuführen.

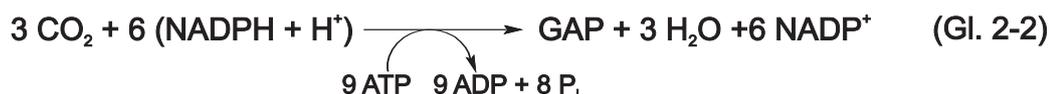
2.2.1 Photosynthese

Im Rahmen der Photosynthese nutzen Pflanzen das Sonnenlicht als Energiequelle für biochemische Reaktionen, und sind so in der Lage, aus Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) Kohlenhydrate aufzubauen.

In der Lichtreaktion (Gl. 2-1) wird bei der Spaltung von Wasser Sauerstoff (O_2) freigesetzt und Wasserstoff auf $NADP^+$ (Nicotinamid-adenin-dinucleotidphosphat) übertragen, gleichzeitig erfolgt die Bildung von ATP (Adenosin-5'-triphosphat) aus ADP (Adenosin-5'-diphosphat) und anorganischem Phosphat (P_i). Die für die Wasserspaltung erforderliche Energie wird durch die Absorption von Lichtquanten ($h\nu$) durch Farbstoffmoleküle (vor allem Chlorophyll a und b, aber auch Carotinoide) geliefert. Antennenpigmente sammeln hierzu die Lichtenergie und leiten sie an die Chlorophyllmoleküle der Reaktionszentren (P_{680} bzw. P_{700}) der Photosysteme II und I weiter. Sowohl die Farbstoffmoleküle, als auch die für die Lichtreaktion erforderlichen Enzymkomplexe (unter anderem Photosystem II und I) sind in grünen Pflanzen und Algen in den Thylakoidmembranen der Chloroplasten lokalisiert [Doenecke 2005].



Die Lichtreaktion ist über die Bereitstellung von ATP und NADPH mit dem Calvin-Zyklus (Dunkelreaktion) verbunden, der die Biosynthese von Kohlenhydraten aus CO_2 ermöglicht. Im ersten Schritt des Calvin-Zyklus wird hierzu zunächst CO_2 an Ribulose-1,5-bisphosphat angelagert, anschließend folgt die hydrolytische Spaltung in zwei Moleküle 3-Phosphoglycerat. Das entstehende 3-Phosphoglycerat wird unter ATP-Verbrauch mit NADPH als Reduktionsmittel zu Glycerinaldehyd-3-phosphat (GAP) reduziert. Aus fünf Molekülen Glycerinaldehyd-3-phosphat können durch Umkehrung des Pentosephosphat-Zyklus wiederum drei Moleküle Ribulose-1,5-bisphosphat aufgebaut werden, so dass der Calvin-Zyklus geschlossen wird.



Nach drei Umläufen des Calvin-Zyklus, in denen jeweils ein CO_2 fixiert wird, entsteht somit ein Molekül Glycerinaldehyd-3-phosphat (Gl. 2-2), das von der Pflanze zur Synthese von Saccharose sowie zum Aufbau von Stärke genutzt werden kann [Doenecke 2005].

2.2.2 Atmung

Im Verlauf der Atmung werden Kohlenhydrate zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) oxidiert. Dieser Stoffwechselprozess geht einher mit einer Regeneration von ATP (Adenosin-5'-triphosphat) aus ADP (Adenosin-5'-diphosphat) und anorganischem Phosphat (P_i). Die so in Form von ATP bereitgestellte Energie kann wiederum für innere Stoffwechselprozesse genutzt werden, unter anderem zur Synthese der für die Atmung benötigten Enzyme oder verschiedener Zellmembranbestandteile. Ausgangsstoffe der Atmung sind vor allem in den Zellen gespeicherte Kohlenhydrate. Da es sich bei der Atmung um einen aeroben Prozess handelt, ist des Weiteren das Vorhandensein von Sauerstoff (O₂) erforderlich. Im Verlauf der Atmung findet somit neben der Bereitstellung von Energie auch ein Gasaustausch mit der umgebenden Luft statt, da zum einen Sauerstoff in die Zelle aufgenommen und zum anderen das im Verlauf der Atmung gebildete Kohlendioxid an die Umgebungsluft abgegeben werden muss. Der klassische Weg der Atmung erfolgt über Glykolyse, Tricarbonsäurezyklus und Atmungskette und lässt sich anhand folgender Bruttogleichung darstellen:



Über diese Stoffwechselprozesse kann ca. 40 % der in den Kohlenhydraten gespeicherten Energie zur Regeneration von ATP genutzt werden, die restliche Energie wird weitgehend als Atmungswärme abgegeben. Einen alternativen Weg der Atmung, insbesondere in älteren pflanzlichen Geweben, stellt der Pentosephosphatweg dar, der an Zwischenprodukten des Tricarbonsäurezyklus anknüpft. Der Energiegewinn liegt hier bei 36 mol ATP pro 1 mol veratmeter Glucose und ist somit nur geringfügig niedriger im Vergleich zur klassischen Atmung. Findet an Stelle der aeroben Atmung jedoch die anaerobe Gärung zum Abbau organischer Substanzen statt, wird wesentlich weniger ATP generiert und für Stoffwechselprozesse bereitgestellt.

Die Atmungsaktivität wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, unter anderem von der Lagertemperatur, der Lagerdauer, der Gemüseart (Wurzel-, Blüte-, Sprossgemüse etc.), dem Blattanteil, dem Grad der Beschädigung/ Zerkleinerung und der

Luftzusammensetzung. Als Maß für die Atmungsaktivität wird häufig die an die Umgebungsluft abgegebene Kohlendioxidmenge verwendet ($\text{mg CO}_2/\text{kg/h}$) [Böttcher 1996].

Eine Erhöhung der **Lagertemperatur** bewirkt eine Steigerung der Atmungsaktivität des gelagerten Gemüses, die durch den Temperaturquotienten Q_{10} der Atmung angegeben werden kann. Wird in einem Temperaturbereich von 0 bis 20 °C die Lagertemperatur um 10 °C erhöht, steigt die Atmungsaktivität bei den meisten Gemüsearten um den Faktor 2,2 bis 2,8 ($Q_{10} = 2,2 - 2,8$). Einige Gemüsearten reagieren jedoch deutlich empfindlicher auf Temperaturerhöhungen (unter anderem Möhren, Paprika, Knollensellerie, Bleichsellerie, Radieschen, Kopfsalat, Spinat, Rettich) andere dagegen weniger empfindlich (zum Beispiel Rote Rüben, Kohlrabi). So steigt bei Kohlrabi und Roten Rüben in einem Temperaturbereich von 10 bis 20 °C die Atmungsaktivität bei einer Erhöhung der Lagertemperatur um 10 °C um weniger als das 1,6-fache [Böttcher 1996]. Für den Temperaturbereich von 0 bis 10 °C sind für Kohlrabi jedoch deutlich höhere Werte ($Q_{10} = 3,5$) bekannt [Escalona 2007b]. Nicht nur eine langfristige Temperaturerhöhung, auch häufige kurzzeitige Temperaturanstiege können eine Steigerung der Atmungsaktivität zur Folge haben, da sich die Atmung als enzymatisch gesteuerter Prozess nicht unmittelbar wieder an die niedrigere Temperatur anpassen kann [Böttcher 1996].

Je nach **Gemüseart** wirkt sich die **Lagerdauer** unterschiedlich auf die Atmungsaktivität aus. Bei den meisten Gemüsearten (vor allem Frucht-, Blatt- und Stängelgemüsearten) nimmt die Atmungsaktivität mit längerer Lagerdauer ab [Böttcher 1996]. Auch bei Kohlrabi zeigt sich dieser Effekt. Werden Kohlrabi mit Laub bei 0 °C und 95 % relativer Feuchte unter kontinuierlicher Frischluftzufuhr (1 - 2 l/h) in Glasgefäßen gelagert, verringert sich die Atmungsaktivität von anfangs ca. 20 $\text{mg CO}_2/\text{kg/h}$ im Verlauf von 10 Tagen auf 10 – 11 $\text{mg CO}_2/\text{kg/h}$ [Escalona 2007b]. Bei zweijährigen Gemüsearten zeigt sich dagegen im Verlauf der Lagerung mit beginnender Entwicklung der Sprossanlagen meist ein Anstieg der Atmungsaktivität (zum Beispiel Dauerzwiebeln, Kopfkohl). Ein klimakterischer Verlauf zeigt sich bei Fruchtgemüsearten, die nach der Ernte stark nachreifen (zum Beispiel Paprika, Tomate). Im Verlauf der Reife steigt bei diesen Gemüsearten die Atmungsaktivität zwischenzeitlich stark an [Böttcher 1996].

Der **Blattanteil** der gelagerten Gemüse hat ebenfalls einen Einfluss auf die Atmungsaktivität. Werden Gemüse wie zum Beispiel Radieschen mit einem Anteil an

frischem Laub gelagert, ist die Atmungsaktivität um das 2 bis 3-fache höher, verglichen mit Lagerung ohne Laub [Böttcher 1996]. So lassen sich Kohlrabi mit Laub bei Kaltlagerung (0 bis 0,5 °C) maximal 2 Wochen lagern. Werden die Knollen ohne Laub gelagert, verlängert sich die mögliche Lagerdauer, unter anderem aufgrund der verringerten Atmungsaktivität, auf bis zu 4 Monate [Wonneberger 2004].

Gemüse, das bei der Ernte mechanische **Beschädigungen** erfährt, weist eine deutlich erhöhte Atmungsintensität auf. Hierzu reichen bereits geringfügige Verletzungen aus, die zum Teil mit dem Auge nicht wahrnehmbar sind (Haarrisse, Abschürfungen, Stoßverletzungen etc.). Fallen zum Beispiel Speisezwiebeln zweimal in Folge aus 1,20 m Höhe auf einen Betonboden, steigt ihre Atmungsintensität auf das 1,7-fache im Vergleich zu nicht beschädigten Zwiebeln [Böttcher 1996]. Fertig geschnittenes Obst und Gemüse weist im Vergleich zu nicht verarbeitetem in der Regel eine erhöhte Atmungsaktivität auf. In Abhängigkeit von Gemüseart, Lagertemperatur und Grad der Zerkleinerung steigt die Atmungsaktivität um das 1,2 bis 7-fache. So weisen Kohlrabiprüben in Form kleiner Würfel (10 x 10 x 10 mm) im Vergleich zu intakten Kohlrabiknollen eine um das 2-fache erhöhte Atmungsaktivität auf, werden sie bei 0 °C 14 Tage gelagert [Ahvenainen 1996, Escalona 2003, Aguayo 2004, Del Aguila 2006, Escalona 2007a].

Durch eine Steuerung der **Luftzusammensetzung** im Lagerraum kann die Atmungsaktivität der gelagerten Gemüse aktiv beeinflusst werden (Controlled Atmosphere oder CA-Lagerung). Erhöhte CO₂- und verringerte O₂-Konzentrationen bewirken eine verringerte Atmungsaktivität. So verringert eine Erhöhung des CO₂-Gehalts auf 3 – 5 % bei gleichzeitiger Verringerung des O₂-Gehalts auf 2 – 3 %¹ die Atmungsintensität von Pflanzenorganen um 40 – 70 %. Eine zu geringe O₂-Konzentration sollte jedoch aufgrund der Gefahr des anaeroben Abbaus organischer Substanzen (Gärung) vermieden werden. Einige Gemüsearten (unter anderem Möhren) reagieren bereits bei leicht erhöhten CO₂-gehalten mit einsetzender Gärung [Böttcher 1996].

¹ Vom Autor nicht näher spezifiziert, handelt es sich hierbei vermutlich um Volumenprozent.

2.2.3 Transpiration

Bei der Transpiration handelt es sich um einen Massen-Transport-Vorgang, der die Abgabe von Zellwasser in Form von Wasserdampf an die umgebende Luft zur Folge hat. Ist die Oberfläche der Pflanzen wasserbedeckt, findet unmittelbar an dieser Oberfläche Verdunstung statt. Liegt keine wasserbedeckte Oberfläche vor, verdunstet zunächst Zellwasser in den Interzellularraum der Pflanzenorgane und wird von dort als Wasserdampf an die umgebende Luft abgegeben. Die Transpirationsrate (ausgetauschte Wassermenge pro Zeiteinheit und Oberfläche) ist hierbei proportional zu Wasserdampfdruckdefizit und Produktoberfläche sowie umgekehrt proportional zum Diffusionswiderstand (Fick'sches Gesetz). Besonders entscheidend für die Transpirationsrate ist das absolute Wasserdampfdruckdefizit zwischen Interzellularraum und umgebender Luft. Der Wasserdampfdruck des pflanzlichen Gewebes wird unter anderem von der Temperatur beeinflusst und verringert sich bei der Wahl einer niedrigeren Lagertemperatur deutlich. Da die Transpirationsrate auch durch den Diffusionswiderstand beeinflusst wird, hat der Aufbau der austauschenden Grenzschichten ebenfalls einen großen Einfluss. So beeinflussen unter anderem Aufbau und Struktur der Kutikula sowie deren vollständiges Fehlen bei geschältem Gemüse, vorhandene Wachsauflagen unterschiedlicher Dicke, Permeabilität der Schichten aufgrund von Poren und Mikrokapillaren, Verletzungen der Schichten während der Ernte sowie Anzahl von Lentizellen und Stomata die Transpirationsrate. Auch eine größere spezifische Oberfläche, wie sie unter anderem bei Blattgemüsearten vorliegt, hat eine erhöhte Transpirationsrate zur Folge.

Die Transpiration während der Lagerung kann durch verschiedene Faktoren, wie Erntezeitpunkt, Luftbewegung im Lagerraum, Lagertemperatur, Vermeidung von Verletzungen, beeinflusst werden. So hat ein zu früher Erntezeitpunkt bei Kopfkohl, Blumenkohl und Wurzelgemüsearten eine erhöhte Transpiration zur Folge, da die Deckgewebe zum Zeitpunkt der Ernte noch nicht vollständig ausgebildet sind. Durch Luftbewegungen im Lagerraum wird die Transpiration ebenfalls erhöht, da durch diese die wasserdampfgesättigten Luftschichten auf der Oberfläche des gelagerten Gemüses kontinuierlich abgetragen werden. Ebenso führen unverschlossene Schnittflächen oder Gewebeverletzungen aufgrund von Ernte und Verarbeitung zu einer deutlich erhöhten Wasserabgabe. Ein Senken der Lagertemperatur hat dagegen eine verringerte Transpiration zur Folge.

Bei der Transpiration handelt es sich um einen endothermen Vorgang, da zur Freisetzung der Wassermoleküle von den verdunstenden Oberflächen Energie aufgewendet werden muss. Die benötigte Energie wird während der Lagerung vor allem in Form von Wärmeenergie, die im Verlauf der Atmung entsteht (Atmungswärme), bereitgestellt [Böttcher 1996].

2.2.4 Alterung

Die Alterung von Pflanzen schließt unmittelbar an deren Wachstums- und Reifephase an, teilweise findet sie bereits währenddessen statt. Sie beginnt mit dem Verlust der Teilungsfähigkeit der Zellen und führt bis hin zum vollständigen Verfall der Gewebe. Der letzte Abschnitt dieses Alterungsprozesses wird auch als Seneszenz bezeichnet. Besonders ausgeprägte Erscheinungen der Alterung treten an Pflanzenteilen wie Stängel und Blätter auf, die nicht an der generativen Vermehrung der Pflanze beteiligt sind. Bekannte Alterungserscheinungen sind zum Beispiel eine verminderte Proteinbiosynthese sowie ein erhöhter Protein- und Ribonukleinsäureabbau.

Als Auslöser der Seneszenz werden das Vorhandensein von Ethen (veraltet: Ethylen) sowie verschiedener Seneszenzfaktoren (zum Beispiel Abscisinsäure) diskutiert. Auch wenn es sich bei der Seneszenz um einen genetisch gesteuerten Prozess handelt, variiert dieser stark je nach Gewebetyp und Gemüseart und wird zum Beispiel durch Mangelsituationen (Wasserstress, schlechte Nährstoffversorgung, aufgebrauchte zelleigene Reservestoffe) beschleunigt.

Die Seneszenz kann durch verschiedene Vorernte- und Nacherntefaktoren, wie Sortenwahl, Erntezeitpunkt und eine schnelle Abkühlung nach der Ernte, aktiv beeinflusst werden. So hat ein Erntezeitpunkt vor der Vollreife einen geringeren Gehalt an Seneszenzfaktoren und damit ein verzögertes Auftreten von Alterungserscheinungen zur Folge. Die Seneszenz des bereits geernteten Gemüses während der Lagerung kann zudem verlangsamt werden durch die Wahl einer geeigneten Lageratmosphäre ($O_2 < 5\%$ und $CO_2 > 2\%^1$), eine niedrige Lagertemperatur und die Vermeidung von Ethenanreicherung im Lagerraum [Böttcher 1996].

¹ Vom Autor nicht näher spezifiziert, handelt es sich hierbei vermutlich um Volumenprozent.

2.3 L-Ascorbinsäure

Die Bezeichnung Vitamin C stellt einen Sammelbegriff für alle Verbindungen dar, die mit der L-Ascorbinsäure vergleichbare biologische und physiologische Aktivität aufweisen. Neben der L-Ascorbinsäure selbst zählt hierzu insbesondere die Dehydro-L-Ascorbinsäure [Burton 1982, Elmadfa 2004]. In gängigen Nährwerttabellen wird der Begriff Vitamin C meist synonym für die Gesamtascorbinsäure, das heißt die Summe aus L-Ascorbinsäure und Dehydro-L-Ascorbinsäure, verwendet [Souci 2008].

2.3.1 Struktur und Eigenschaften

Ascorbinsäure kann in vier stereoisomeren Formen auftreten, von denen das L(+)-threo-Enantiomer die physiologisch aktive Form darstellt [Hahn 2006]. Bei L-Ascorbinsäure handelt es sich um ein 2,3-Endiol-L-Gulonsäure- γ -Lacton, dessen reduzierende Eigenschaften auf der reaktiven Endiol-Gruppe an den C-Atomen C₂ und C₃ beruhen [Smirnof 1996a, Rehner 1999]. Zusätzlich verfügt L-Ascorbinsäure auch über saure Eigenschaften, da die Hydroxylgruppe am C-Atom C₃ leicht ionisiert ($pK_s = 4,13$), so dass die L-Ascorbinsäure bei einem physiologischen pH als Monoanion (L-Ascorbat) vorliegt [Smirnof 1996a, Davey 2000].

In trockener Form ist die L-Ascorbinsäure stabil, liegt sie dagegen als wässrige Lösung vor, oxidiert sie sehr schnell, insbesondere in Gegenwart von Metallionen (Cu^{2+} und Fe^{3+}). Als Oxidationsprodukt des L-Ascorbats entsteht zunächst die Semidehydro-L-Ascorbinsäure (auch Monodehydro-L-Ascorbinsäure oder Ascorbyl-Radikal). Wird die Semidehydro-L-Ascorbinsäure nicht „aktiv“ zu L-Ascorbinsäure reduziert (siehe Kap. 2.3.3), disproportionieren zwei Moleküle Semidehydro-L-Ascorbinsäure spontan zu Dehydro-L-Ascorbinsäure und L-Ascorbinsäure [Davey 2000]. L-Ascorbinsäure (AA), das Monoanion L-Ascorbat (AA^-), Semidehydro-L-Ascorbinsäure (MDHA) und Dehydro-L-Ascorbinsäure (DHA) stellen ein reversibles Redoxsystem dar (Abb. 2.2). Wird die Dehydro-L-Ascorbinsäure unter hydrolytischer Ringspaltung spontan weiter zur vitaminunwirksamen 2,3-Dioxo-L-Gulonsäure oxidiert, so ist dieser Schritt nahezu irreversibel [Washko 1992, Deutsch 2000, Hahn 2006].

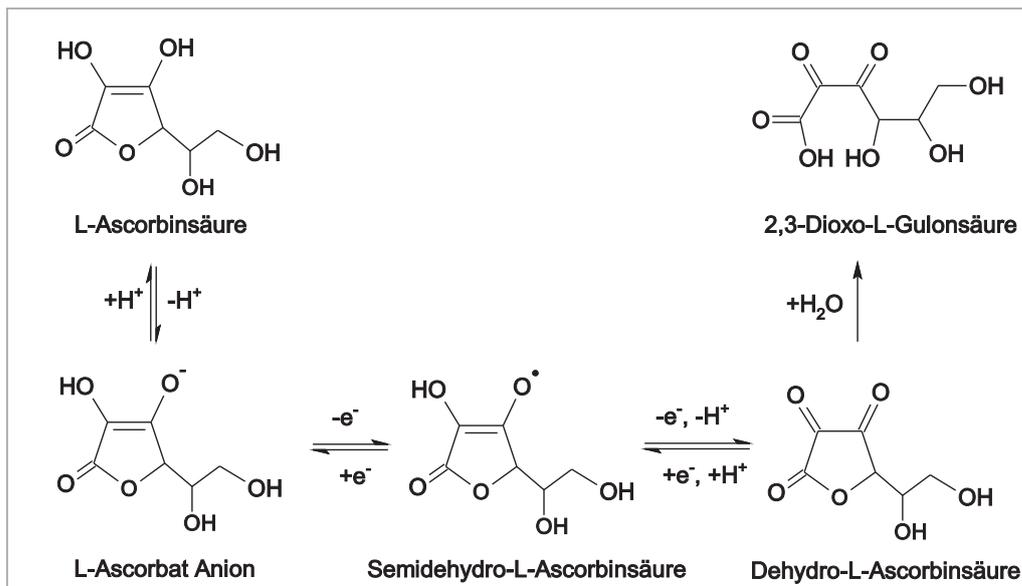


Abb. 2.2: Oxidation der L-Ascorbinsäure

In wässriger Lösung liegen sowohl die Semidehydro-L-Ascorbinsäure also auch die Dehydro-L-Ascorbinsäure überwiegend als bicyclische Halbacetale vor [Smirnof 1996a].

2.3.2 Biosynthese

Die meisten Tierarten sind in der Lage, L-Ascorbinsäure in Leber oder Niere aus D-Glucose zu synthetisieren, und so ihren Bedarf an Vitamin C zu decken. Bei diesem Biosyntheseweg wird zunächst UDP-D-Glucose (Uridinphosphat-Glucose) zu UDP-D-Glucuronsäure oxidiert und anschließend der UDP-Rest hydrolytisch abgespalten. Die nun vorliegende freie D-Glucuronsäure wird zu L-Gulonsäure reduziert (unter Inversion der Kohlenstoffkette), die wiederum durch die L-Gulono-Lacton-Lactonase in L-Gulono-1,4-Lacton umgewandelt wird. Im letzten Schritt des Synthesewegs oxidiert die L-Gulono-1,4-Lacton-Oxidase das L-Gulono-1,4-Lacton zu L-Ascorbinsäure. Der Mensch und einige wenige Tierarten (unter anderem Meerschweinchen und Primaten) verfügen jedoch nicht über das Enzym L-Gulono-1,4-Lacton-Oxidase, das für den letzten Schritt dieses Biosynthesewegs erforderlich ist, und sind somit auf die Zufuhr von Vitamin C mit der Nahrung angewiesen [Smirnof 1996a, Elmadfa 2004, Valpuesta 2004].

Im pflanzlichen Organismus werden verschiedene Wege zur Synthese von L-Ascorbinsäure vermutet. Isherwood und Mapson beschreiben 1962 einen Syntheseweg, der L-Galactono-1,4-Lacton als direkte Vorstufe der L-Ascorbinsäure annimmt, analog zum Syntheseweg im tierischen Organismus und wie bei diesem unter der Annahme, dass eine Inversion der Kohlenstoffkette erfolgt (siehe Abb. 2.3 a) [Isherwood 1962, Smirnoff 1996a]. Dieser Syntheseweg stützt sich insbesondere auf den Nachweis der für den letzten Schritt verantwortlichen L-Galactono-1,4-Lacton-Dehydrogenase und ihres Substrats L-Galactono-1,4-Lacton in verschiedenen Pflanzen. Die für diesen Syntheseweg erforderliche Inversion der Kohlenstoffkette ist jedoch zwischenzeitlich durch zahlreiche Studien mit ^{14}C -markierter Glucose widerlegt [Loewus 1963, Saito 1990, Loewus 1999, Smirnoff 2001].

Ein weiterer Syntheseweg geht von der Oxidation der D-Glucose (am C_2 -Atom) zu D-Glucoson aus, gefolgt von einer Epimerisation (am C_5 -Atom) zu L-Sorboson und letztendlich einer Oxidation des L-Sorboson (am C_1 -Atom) zu L-Ascorbinsäure (siehe Abb. 2.3 b). Gestützt wird dieser Syntheseweg durch Studien mit ^{14}C -markierter Glucose und ^{14}C -markiertem D-Glucoson, die Hinweise auf D-Glucoson als Zwischenprodukt der L-Ascorbinsäuresynthese liefern. So wird bei gleichzeitiger Gabe von nicht markiertem D-Glucoson und ^{14}C -markierter Glucose weniger ^{14}C -markierte Glucose in ^{14}C -markierte L-Ascorbinsäure umgewandelt. Die Belege für L-Sorboson als Zwischenprodukt sind weniger überzeugend. Untersuchungen von Loewus et al. belegen allerdings die Existenz einer NADP-abhängigen Dehydrogenase in Bohnen und Spinat, die die Umwandlung von L-Sorboson in L-Ascorbinsäure katalysiert. Bislang existiert jedoch kein Nachweis der für die Umwandlung von D-Glucose in D-Glucoson, bzw. von D-Glucoson in L-Sorboson notwendigen Enzyme in höheren Pflanzen. Es wird daher bezweifelt, dass D-Glucoson und L-Sorboson als Zwischenprodukte der L-Ascorbinsäuresynthese eine physiologische Bedeutung haben [Loewus 1963, Loewus 1990, Saito 1990, Smirnoff 1996a, Conklin 1998, Loewus 1999, Pallanca 1999, Davey 2000].

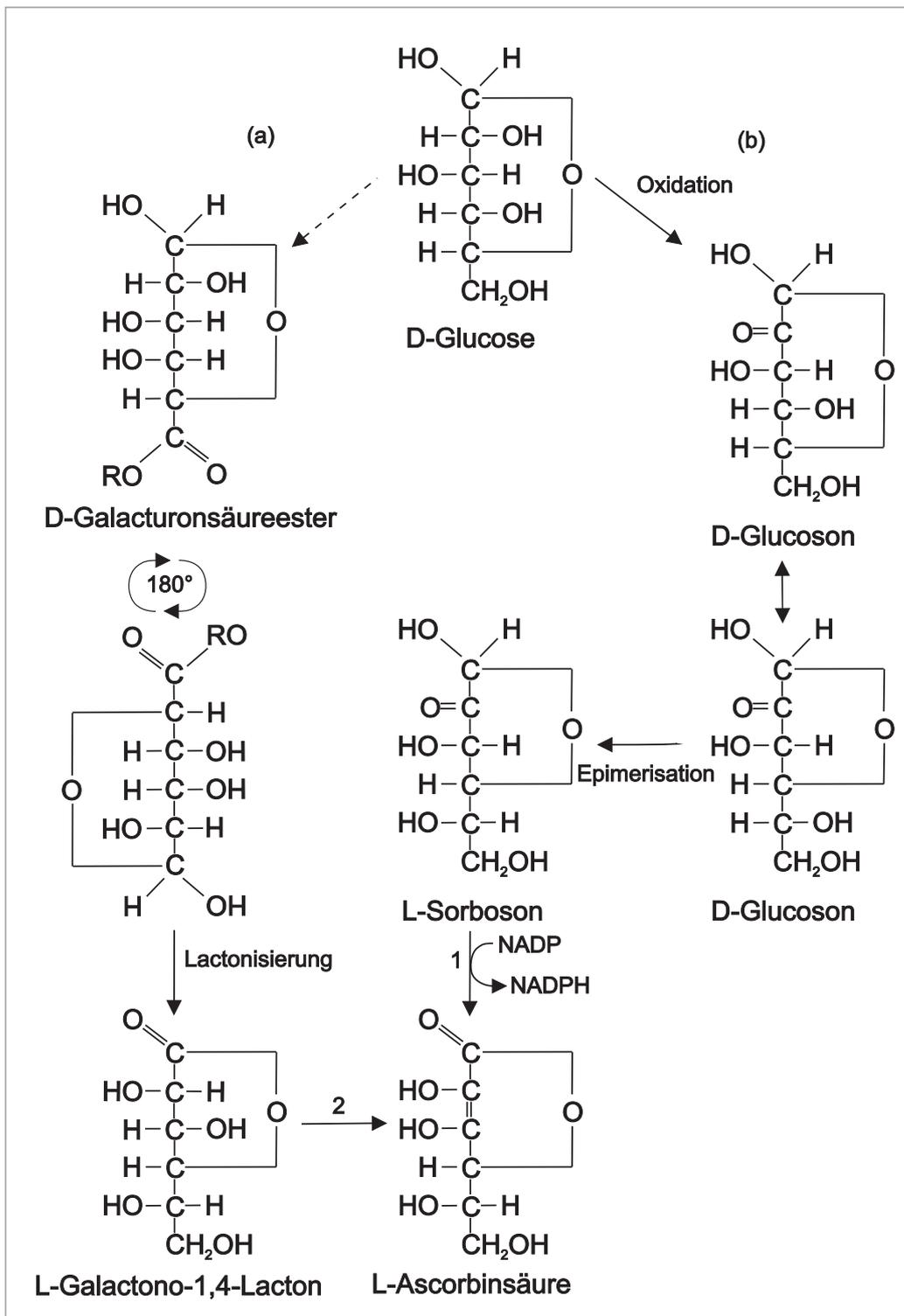


Abb. 2.3: In der Vergangenheit postulierte Wege der L-Ascorbinsäuresynthese in Pflanzen: (a) Biosynthese nach Isherwood (b) Biosynthese nach Loewus (1: Sorboson-Dehydrogenase, 2: L-Galactono-1,4-Lacton-Dehydrogenase), modifiziert nach [Smirnoff 1996a]

Als Hauptweg der L-Ascorbinsäuresynthese gilt zur Zeit der von Wheeler und Smirnoff postulierte Syntheseweg, der von den Zwischenstufen GDP-D-Mannose, GDP-L-Galactose, L-Galactose und L-Galactono-1,4-Lacton ausgeht (siehe Abb. 2.4). Untersuchungen von Wheeler et al. belegen unter anderem die Existenz des Enzyms L-Galactose-Dehydrogenase, das die NAD-abhängige Oxidation (am C₁) der L-Galactose zu L-Galactono-1,4-Lacton katalysiert [Wheeler 1998, Davey 2000]. L-Galactose-Dehydrogenase katalysiert zudem die Umwandlung von L-Sorbose in L-Ascorbinsäure, wenn auch mit niedriger Affinität, so dass es sich hierbei evtl. um das gleiche Enzym handelt, das Loewus et al. in Bohnen und Spinat nachweisen und zunächst als Sorbose-Dehydrogenase bezeichnen [Loewus 1990, Conklin 1998].

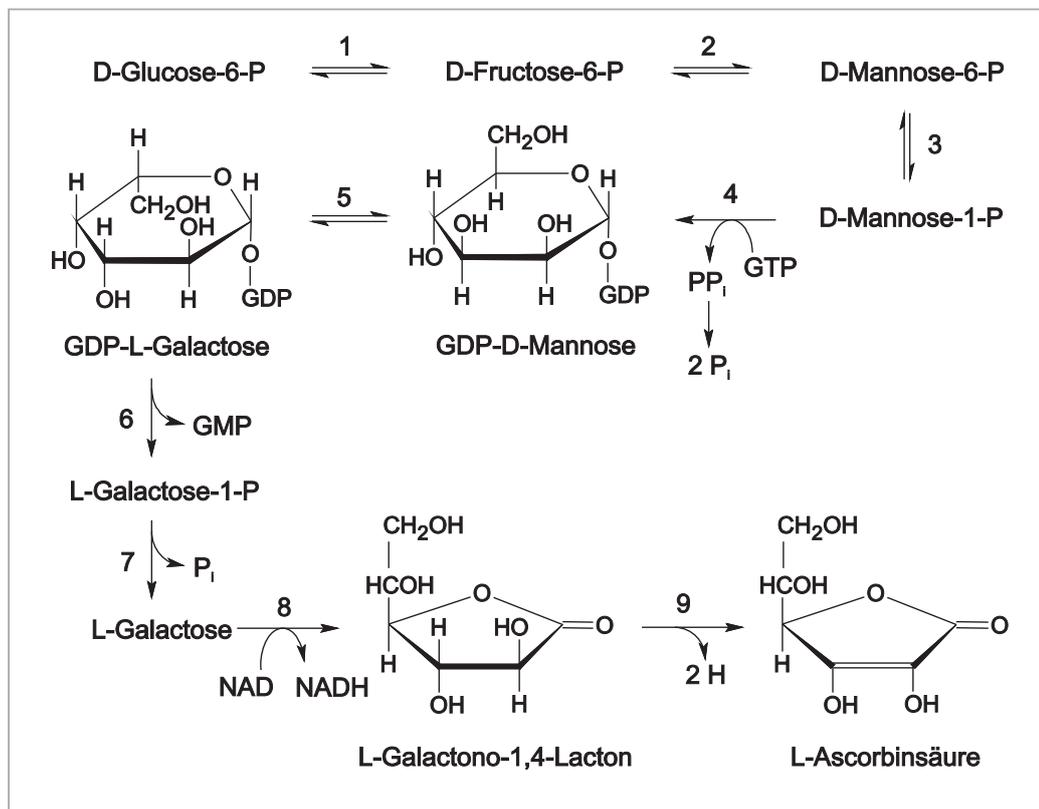


Abb. 2.4: Biosynthese der L-Ascorbinsäure nach Wheeler

(1: Glucose-6-Phosphat-Isomerase, 2: Mannose-6-Phosphat-Isomerase, 3: Phosphomannose-Mutase, 4: GDP-D-Mannose-Pyrophosphorylase, 5: GDP-D-Mannose-3,5-Epimerase, 6: L-Galactose-Guanyltransferase, 7: L-Galactose-1-P-Phosphatase, 8: L-Galactose-Dehydrogenase, 9: L-Galactono-1,4-Lacton-Dehydrogenase), modifiziert nach [Wheeler 1998, Laing 2004, Conklin 2006, Laing 2007].

In Studien mit ^{14}C -markierter D-Mannose werden mindestens 10 % der gegebenen ^{14}C -markierten D-Mannose in ^{14}C -markierte L-Ascorbinsäure umgewandelt. D-Mannose stellt somit ein wichtiges Zwischenprodukt der L-Ascorbinsäuresynthese dar [Wheeler 1998, Conklin 1999]. Die Enzyme zur Umwandlung der GDP-L-Galactose in L-Galactose sind zunächst noch nicht bekannt, werden jedoch später als L-Galactose-Guanyltransferase und L-Galactose-1-P-Phosphatase identifiziert [Laing 2004, Conklin 2006, Laing 2007].

2.3.3 Recycling der Semidehydro- und Dehydro-L-Ascorbinsäure

Die L-Ascorbinsäurekonzentration in Pflanzen ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Syntheserate und Umsatzrate, steuert diese jedoch gleichzeitig ihrerseits. So hat eine erhöhte L-Ascorbinsäurekonzentration in Embryoachsen von Erbsenkeimlingen eine verminderte Biosyntheserate bei gleichzeitig erhöhter Umsatzrate zur Folge. Umgesetzt wird L-Ascorbinsäure einerseits in Folge weiterer Stoffwechselforgänge, wie der Biosynthese von Oxalat und Tartrat, andererseits durch Oxidation zu Semidehydro-L-Ascorbinsäure und Dehydro-L-Ascorbinsäure aufgrund ihrer Funktion als Antioxidans (siehe Kapitel 2.3.4) [Pallanca 2000].

Für die oxidierten Formen der L-Ascorbinsäure (Semidehydro-L-Ascorbinsäure und Dehydro-L-Ascorbinsäure) existieren verschiedene Möglichkeiten des Recyclings. So wird Semidehydro-L-Ascorbinsäure, die bei der Reduktion von Wasserstoffperoxid (H_2O_2) in den Thylakoiden der Chloroplasten (siehe Kapitel 2.3.4) anfällt (katalysiert durch die thylakoidgebundene Ascorbat-Peroxidase), durch reduziertes Ferredoxin regeneriert [Miyake 1994, Noctor 2006]. Semidehydro-L-Ascorbinsäure (auch Monodehydro-L-Ascorbinsäure MDHA) kann jedoch auch als Elektronenakzeptor für Cytochrom b561 dienen und so in ihre reduzierte Form überführt werden [Verelst 2004, Noctor 2006], oder durch die NAD(P)H-abhängige Monodehydroascorbat-Reduktase reduziert werden (NADH als Elektronendonator bevorzugt). Welche Art des Recyclings vorrangig stattfindet, hängt unter anderem von dem Zellkompartiment ab, in dem die Semidehydro-L-Ascorbinsäure anfällt. In den Thylakoiden der Chloroplasten konkurrieren zum Beispiel Semidehydro-L-Ascorbinsäure und NAD^+ um reduziertes Ferredoxin als Elektronendonator. Da die Semidehydro-L-Ascorbinsäure deutlich schneller reduziert wird als NAD^+ , das für die Monodehydroascorbat-Reduktase benötigt wird, findet in den Thylakoiden bevorzugt die Variante des Recyclings über reduziertes Ferredoxin statt [Miyake 1994, Sano 1995, Asada 1999].

Wird die Semidehydro-L-Ascorbinsäure nicht regeneriert, entstehen aufgrund spontaner Disproportionierung Dehydro-L-Ascorbinsäure und Wasser. Eine Möglichkeit des Recyclings der Dehydro-L-Ascorbinsäure stellt der sogenannte Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel dar. Bereits 1976 weisen Foyer und Halliwell sowohl reduziertes Glutathion (GSH) als auch die Glutathion-Reduktase in intakten Chloroplasten von Spinatblättern nach und veröffentlichen infolge dessen ihre Idee des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels (Abb. 2.5). L-Ascorbat ist in der Lage sowohl spontan mit Hydroperoxidradikalen ($O_2^{\cdot-}$) zu reagieren, unter der Bildung von H_2O_2 , als auch katalysiert durch das Enzym Ascorbat-Peroxidase H_2O_2 zu entgiften, wobei Wasser entsteht. Bei beiden Reaktionen wird L-Ascorbat zu Monodehydro-L-Ascorbat ($MDHA^-$) oxidiert. Monodehydro-L-Ascorbat, das nicht durch die Monodehydroascorbat-Reduktase zu L-Ascorbat reduziert wird, disproportioniert zu L-Ascorbat und Dehydro-L-Ascorbat. Glutathion fungiert im Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel als Elektronendonator für die Dehydroascorbat-Reduktase und katalysiert so die Reduktion von Dehydro-L-Ascorbat zu L-Ascorbat. Die für die Reaktion benötigte Energie liefert die Oxidation von GSH zu Glutathiondisulfid (GSSG). Im letzten Schritt des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels wird Glutathiondisulfid in einer NADPH-abhängigen Reaktion durch die Glutathion-Reduktase wieder zu Glutathion reduziert. Das erforderliche NADPH kann im Rahmen der Lichtreaktion in den Chloroplasten bereitgestellt werden (siehe Kap. 2.2.1), aber auch Reaktionen der Glucose-6-Phosphat-Dehydrogenase und Malat-Dehydrogenase können zur Bereitstellung von NADPH dienen [Foyer 1976, Davey 2000, Potters 2004].

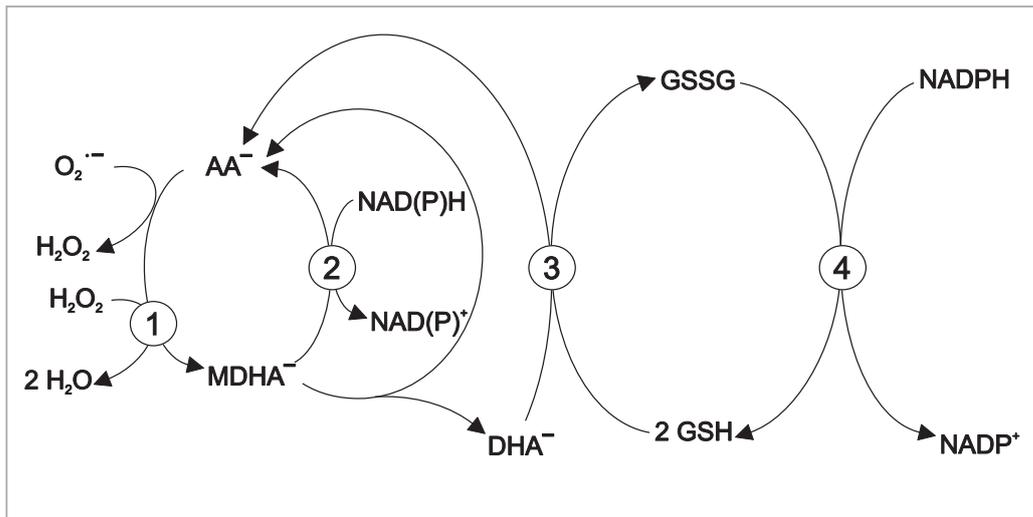


Abb. 2.5: Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel und die erforderlichen Enzyme (1: Ascorbat-Peroxidase, 2: Monodehydroascorbat-Reduktase, 3: Dehydroascorbat-Reduktase, 4: Glutathion-Reduktase) [Foyer 1976, Davey 2000]

Nachweise des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels existieren für die Chloroplasten verschiedener Pflanzen wie zum Beispiel Spinat [Foyer 1976, Nakano 1981] und Erbsen [Foyer 1994], sowie die Mitochondrien und Peroxisomen der Blätter von Erbsen [Jimenez 1997] und die Mitochondrien von grüner Paprika [Jiménez 2002]. Weiter gestützt werden diese Ergebnisse durch die Tatsache, dass die Überexpression der Glutathion-Reduktase in Pflanzen, unter anderem in transgenen Pappeln [Foyer 1995] und Tabak [Foyer 1991], einen erhöhten Ascorbatgehalt der Blätter zur Folge hat. In transgenem Tabak und Mais kann ein erhöhter Ascorbatgehalt durch Überexpression der Dehydroascorbat-Reduktase erreicht werden [Chen 2003].

Neben der Glutathion-abhängigen Reduktion der Dehydro-L-Ascorbinsäure über den Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel werden noch weitere Recyclingwege, unter anderem über Thioredoxin oder Glutaredoxin, vermutet [Potters 2004, Noctor 2006].

2.3.4 Aufgaben im pflanzlichen und tierischen Organismus

Die L-Ascorbinsäure erfüllt zahlreiche antioxidative und metabolische Funktionen sowohl im pflanzlichen als auch im tierischen Organismus. Zu den wichtigsten Aufgaben zählen die Funktion als Radikalfänger, Cofaktor verschiedener Enzyme und Donator/ Akzeptor im Elektronentransport. Im pflanzlichen Organismus dient die L-Ascorbinsäure zudem als Substrat für die Biosynthese von Oxalat und Tartrat [Smirnoff 1996a, Noctor 1998, Davey 2000].

Als **Cofaktor verschiedener Enzyme**, insbesondere Mono- und Dioxygenasen, steigert die L-Ascorbinsäure deren Aktivität. Sie fungiert als Elektronendonator und hält so die enzymgebundenen Metallionen in ihrer reduzierten Form (Fe^{2+} , Cu^{2+}). Auf diese Weise ist die L-Ascorbinsäure an verschiedenen Hydroxylierungsreaktionen beteiligt. Im tierischen Organismus zählen hierzu unter anderem Hydroxylierungsreaktionen der Biosynthese von Kollagen (Hydroxylierung von Prolin und Lysin), Serotonin (Hydroxylierung von Tryptophan), Carnitin und Catecholaminen sowie der Amidierung von Peptidhormonen [Davey 2000, Hahn 2006]. Im pflanzlichen Organismus ist die L-Ascorbinsäure unter anderem an Hydroxylierungsreaktionen der Biosynthese von Extensin, Zeaxanthin und verschiedener Pflanzenhormone (Ethen, Gibberellinsäure, Abscisinsäure) beteiligt. Des Weiteren beeinflusst sie den Abbau von Glucosinolaten, über die Aktivierung des Enzyms Myrosinase [Davey 2000, Arrigoni 2002].

Sowohl im tierischen als auch im pflanzlichen Organismus erfüllt die L-Ascorbinsäure eine Vielzahl **antioxidativer Funktionen**. Als primäres Antioxidans reagiert sie mit reaktiven Sauerstoffverbindungen (ROS reactive oxygen species), die unter anderem die DNA sowie Sulfhydrylgruppen von Proteinen oxidativ schädigen können. Zu den reaktiven Sauerstoffverbindungen zählen unter anderem Singulett-Sauerstoff ($^1\text{O}_2$), Hyperoxid ($\text{O}_2^{\cdot-}$), Wasserstoffperoxid (H_2O_2), Ozon (O_3) und das Hydroxylradikal (OH^{\cdot}). Im pflanzlichen Organismus fallen reaktive Sauerstoffverbindungen in Chloroplasten, Mitochondrien und Peroxisomen als Nebenprodukte im Rahmen des Metabolismus, wie zum Beispiel der Atmung, an. Durch verschiedene Stressfaktoren wie zum Beispiel Trockenheit (Wasserstress) oder Verletzungen kann sich die Menge der anfallenden reaktiven Sauerstoffverbindungen stark erhöhen. Als sekundäres Antioxidans ist die L-Ascorbinsäure im menschlichen Organismus unter anderem in der Lage, α -Tocopherolradikale, die bei der Begrenzung der Lipidperoxidation entstehen,

in ihre biologisch aktive Form zu reduzieren und so zu regenerieren [Smirnov 1996a, Gaßmann 1998, Davey 2000, Hahn 2006].

Weitere Funktionen der L-Ascorbinsäure im menschlichen Organismus sind die Beteiligung an der Übertragung von Eisen von Transferrin auf Ferritin, die Stimulation der Cytochrom-P-450-Synthese, die Verbesserung der Eisenabsorption aufgrund der Überführung von Fe^{3+} in Fe^{2+} im Dünndarm und der Bildung von Chelaten sowie die Hemmung der Nitrosaminbildung im Magen [Hahn 2006].

Im pflanzlichen Organismus spielt die L-Ascorbinsäure aufgrund ihrer Funktionen als Antioxidans, Elektronenakzeptor und Cofaktor von Enzymen eine zentrale Rolle in der Photosynthese. Sie reagiert zum einen als Antioxidans (katalysiert durch die thylakoidgebundene Ascorbat-Peroxidase) mit Wasserstoffperoxid, das am Photosystem I entsteht, und dient zum anderen in Form der Semidehydro-L-Ascorbinsäure, die bei der Reaktion mit Wasserstoffperoxid entsteht, als Elektronenakzeptor für das Photosystem I [Miyake 1992, Smirnov 1996a, Asada 1999]. Des Weiteren fungiert sie als Cofaktor der Deepoxidase, die die Biosynthese von Zeaxanthin katalysiert. Zeaxanthin ist ein Schutzpigment des Photosyntheseapparats und spielt eine wichtige Rolle bei der Umwandlung überschüssiger Anregungsenergie (zum Beispiel durch zu starke Beleuchtung) in Wärme und bietet so einen Schutz vor Photoinaktivierung [Neubauer 1992, Smirnov 1996a].

2.4 Einfluss von Vorerntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt

Der Vitamin- und Mineralstoffgehalt von Pflanzen, so auch der Gesamtascorbinsäuregehalt, wird durch eine Vielzahl von Vorerntefaktoren beeinflusst. Hierzu zählen interne Faktoren, wie Sorte oder Reifegrad, aber auch externe Faktoren wie klimatische Bedingungen oder die jeweilige Düngung der Pflanzen [Lee 2000, DGE 2004].

2.4.1 Sorte

Unter den Vorerntefaktoren ist die Wahl der „richtigen“ Sorte einer der wichtigsten Faktoren zum Erreichen eines möglichst hohen Gesamtascorbinsäuregehalts. Vielfach ist der Einfluss der Sorte deutlich größer als der Einfluss von klimatischen Bedingungen oder Anbaubedingungen wie zum Beispiel der Menge an verwendetem Dünger [Lee 2000]. Ein Einfluss der Sorte auf L-Ascorbinsäuregehalt oder Gesamtascorbinsäuregehalt ist unter anderem für Kartoffeln, Paprika, Gewürzpaprika, Erbsen, Nektarinen, Pfirsiche, Pflaumen, Äpfel und Sanddorn bekannt [Augustin 1975a, Lee 1982, Howard 1994, Lee 1995, Daood 1996, Gil 2002, Kallio 2002, Davey 2004].

Augustin weist bei der Untersuchung von 12 Kartoffelsorten eine große Variabilität des L-Ascorbinsäuregehalts in Abhängigkeit von der Sorte nach. So liegt der L-Ascorbinsäuregehalt bei der Sorte mit dem höchsten Gehalt um das 1,7 – 1,9-fache höher (je nach Anbaugebiet und Lagerdauer) als bei der Sorte mit dem niedrigsten [Augustin 1975a].

Für Paprika sind ebenfalls große Unterschiede im L-Ascorbinsäuregehalt zwischen den Sorten bekannt. So schwankt bei 18 untersuchten Paprikasorten der L-Ascorbinsäuregehalt der grünen Paprika zwischen 48,9 mg/100 g (Mitla) und 172,9 mg/100 g (Jalapeno-M). Im Vergleich zu der Sorte mit dem niedrigsten L-Ascorbinsäuregehalt liegt dieser somit bei der Sorte Jalapeno-M um das 3,5-fache höher [Howard 1994, Lee 1995]. Bei Gewürzpaprika ergeben entsprechende Untersuchungen ebenfalls sortenspezifische Unterschiede im L-Ascorbinsäuregehalt. Bei 13 untersuchten Sorten liegt der L-Ascorbinsäuregehalt der überreifen Paprika (37 – 42 % Trockenmasse) bei den Sorten mit dem höchsten Gehalt um mehr als das 5-fache höher als bei der Sorte mit dem niedrigsten [Daood 1996].

Auch bei Erbsen unterscheiden sich zum Beispiel die Sorten Early Sweet, Trojan, Reva und Freezer signifikant im L-Ascorbinsäuregehalt. Den höchsten Gehalt weist die Sorte Early Sweet auf, er liegt um das 1,6-fache höher als bei der untersuchten Sorte mit dem niedrigsten Gehalt [Lee 1982].

Laut Gil et al. schwanken die Gesamtascorbinsäuregehalte bei Nektarinen und Pfirsichen (je fünf gelb- und weiß-fleischige Sorten) zwischen 4 und 14 mg/100 g und bei Pflaumen (eine gelbe und vier rote Sorten) zwischen 3 und 10 mg/100 g. Der Gesamtascorbinsäuregehalt der Sorte mit dem höchsten Gehalt liegt somit jeweils um das 3-fache höher als bei der Sorte mit dem niedrigsten [Gil 2002].

Bei Äpfeln ergibt eine Untersuchung an 31 Sorten, dass der L-Ascorbinsäuregehalt zwischen der Sorte mit dem niedrigsten und dem höchsten Gehalt um das 3,6-fache schwankt [Davey 2004].

Besonders große sortenspezifische Unterschiede finden sich bei Sanddorn. So liegt der Gesamtascorbinsäuregehalt des Safts bei der Subspecies *sinensis* um mehr als das 15-fache höher als bei den Subspecies *rhamnoides* und *mongolica* [Kallio 2002].

2.4.2 Reifegrad zum Erntezeitpunkt

Der Reifegrad zum Erntezeitpunkt hat ebenfalls einen starken Einfluss auf den Vitamingehalt der entsprechenden Pflanzen. Bei einigen nehmen L-Ascorbinsäure- bzw. Gesamtascorbinsäuregehalt mit zunehmendem Reifegrad ab (Acerolafrucht, Kiwi, Orange, Grapefruit, Mandarine, Zitrone, Sanddornbeere, Apfel, Banane, Mango, Erbse, Kartoffel, Kohlrabi, Eissalat), bei anderen zu (Pfirsich, Aprikose, Papaya, Süßkirsche, Tomate, Paprika, Gewürzpaprika, Lauch) [Augustin 1975b, Betancourt 1977, Kader 1977, Nagy 1980, Lee 1982, Gonzalez Rodriguez 1993, Howard 1994, Sørensen 1994, Sørensen 1995, Daood 1996, Lee 2000, De Assis 2001, Kallio 2002, DGE 2004, Serrano 2005, Biesiada 2007].

Augustin weist in einer Untersuchung der Kartoffelsorte Russet Burbank nach, dass der L-Ascorbinsäuregehalt der Kartoffeln bei früher Ernte (103 Tage nach Pflanzung) deutlich höher ist als bei einer späteren Ernte (166 Tage nach Pflanzung). Als übliche Erntezeit werden 150 Tage nach Pflanzung angenommen. Da sich nicht ausgereifte Kartoffeln jedoch vermutlich negativ auf die Erhaltung der L-Ascorbinsäure im Verlauf der Lagerung auswirken, wird ein zu früher Erntezeitpunkt als nicht sinnvoll angesehen [Augustin 1975b].

Wird der L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiknollen 7 und 10 Wochen nach Pflanzung bestimmt, ist der Gehalt der später geernteten Kohlrabi signifikant niedriger [Biesiada 2007].

Bei Eissalat zeigt sich bei Untersuchung zu drei verschiedenen Erntezeitpunkten, mit jeweils einem Abstand von 3 bis 4 Tagen, ebenfalls eine Abnahme des Gesamtascorbinsäuregehalts im Verlauf der 7-tägigen Erntezeit [Sørensen 1994].

Bei untersuchten Zitrusfrüchten (Orange, Grapefruit, Mandarine, Zitrone) nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt im entsprechenden Fruchtsaft (angegeben in mg/ml) ebenfalls mit späterem Erntezeitpunkt ab. Wird jedoch der Gehalt pro Frucht betrachtet, so steigt dieser mit zunehmendem Reifegrad an, da zugleich auch die Masse und die Menge an Fruchtsaft pro Frucht zunehmen [Nagy 1980].

Bei Süßkirschen sinkt der L-Ascorbinsäuregehalt der Früchte bei Einteilung in 14 Entwicklungsstufen zunächst in den ersten Entwicklungsphasen (1 - 8) ab, steigt dann aber im Verlauf des weiteren Reifeprozesses (9 – 14) wieder stark an. Ihre maximale Größe erreichen die Früchte in Entwicklungsstufe 12 [Serrano 2005].

Ein genereller Anstieg des Gesamtascorbinsäuregehalts mit höherem Reifegrad wird von Sørensen et al. für Lauch berichtet, wenn ein späterer Erntezeitpunkt (230 statt 170 Tage nach Aussaat) gewählt wird [Sørensen 1995].

Auch bei Paprika steigt der L-Ascorbinsäuregehalt mit zunehmendem Reifegrad an. Je nach Sorte weisen die roten Paprika den 1,9-fachen L-Ascorbinsäuregehalt der grünen auf [Howard 1994]. Bei Gewürzpaprika steigt der L-Ascorbinsäuregehalt ebenfalls zunächst mit zunehmendem Reifegrad (grün bis rot) anschließend (dunkelrot) sinkt er jedoch wieder ab [Lee 1982].

2.4.3 Klimatische Bedingungen

Klimatische Bedingungen wie Sonneneinstrahlung, Tagesmitteltemperatur und Niederschlagsmenge wirken sich ebenfalls auf den Gesamtascorbinsäuregehalt aus. Sonneneinstrahlung ist nicht zwingend notwendig für die L-Ascorbinsäuresynthese in Pflanzen, da die L-Ascorbinsäure jedoch aus Zuckern synthetisiert wird, die durch Photosynthese bereitgestellt werden (siehe Kap. 2.3.2), kann sich das Ausmaß der Sonneneinstrahlung indirekt auf den L-Ascorbinsäuregehalt auswirken [Smirnoff 1996b, Davey 2000, Lee 2000].

Eine Studie zur Verteilung der L-Ascorbinsäure in Kopfsalat zeigt eine deutliche Zunahme des L-Ascorbinsäuregehalts von Innen (Strunk und Blattrippenansätze) nach Außen (dunkelgrüne Außenblätter) [Vogtmann 1987]. Bei Zitrusfrüchten ist bekannt, dass der L-Ascorbinsäuregehalt mit der Position der Frucht am Baum korreliert. Sind die Früchte der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, liegt ihr Gehalt deutlich höher als bei Früchten des gleichen Baums, die im Schatten wachsen [Harding 1942, Winston 1948, Nagy 1980].

Sowohl die Tagesmitteltemperatur als auch die Maximal- und Minimaltemperatur während des Wachstums der Pflanze beeinflusst deren Gesamtascorbinsäuregehalt [Lee 2000]. Bei Kiwifrüchten führt eine Erhöhung der Temperatur sowohl während der Phase der Zellteilung als auch der Phase der Stärkebildung zu einer Abnahme des Gesamtascorbinsäuregehalts. Wird die Temperatur erst in der Phase der Reifung der Früchte erhöht, wirkt sich das nicht auf den Gesamtascorbinsäuregehalt aus [Richardson 2004].

Auch die Niederschlagsmenge während des Wachstums kann sich auf den Gesamtascorbinsäuregehalt der Pflanzen auswirken. So führt ein moderater Wassermangel während des Wachstums zu einem erhöhten Gehalt in Lauch und Brokkoli [Toivonen 1994, Sørensen 1995, Lee 2000]. Dieser erhöhte Gesamtascorbinsäuregehalt dient der Pflanze evtl. als Schutz vor Schäden, die durch hohe Temperaturen und Trockenheit entstehen [DGE 2004].

2.4.4 Düngung

Eine Vielzahl von Studien zeigt einen Einfluss der Düngung auf entweder Gesamtascorbinsäuregehalt oder L-Ascorbinsäuregehalt von Nahrungspflanzen. Eine Metaanalyse zum Einfluss der Stickstoffernährung auf den Vitamingehalt verschiedener Pflanzen zeigt, dass eine erhöhte Stickstoffgabe bei vielen Nutzpflanzen zu einer Verringerung des L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalts führt, es werden jedoch auch zahlreiche Studien aufgeführt, die zum gegenteiligen Ergebnis gelangen. Die teilweise widersprüchlichen Ergebnisse lassen sich laut Mozafar unter anderem auf die zwischen den einzelnen Studien stark variierende Menge an eingesetztem Stickstoffdünger zurückführen, insbesondere in Relation zu der unter den entsprechenden Bedingungen als optimal angesehenen Düngermenge. Auch lassen einige Studien vermuten, dass für die jeweilige Pflanze ein Optimum bezüglich des Stickstoffdüngers existiert. Bis zu dieser Menge steigt der L-Ascorbinsäure-

oder Gesamtascorbinsäuregehalt an, wird die Stickstoffgabe jedoch weiter erhöht, sinkt der Gehalt wieder [Müller 1987, Mozafar 1993].

Eine Abnahme des L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalts mit steigender Stickstoffdüngermenge wird in Studien unter anderem bei Zitrusfrüchten (Orangen, Zitronen, Grapefruit und Mandarinen), Kohlarten (Blumenkohl, Weißkohl), Kartoffeln, Tomaten, Eissalat und Lauch nachgewiesen [Augustin 1975a, Nagy 1980, Müller 1987, Freyman 1991, Sørensen 1994, Sørensen 1995, Lisiewska 1996].

Augustin berichtet von sinkenden L-Ascorbinsäuregehalten einiger Kartoffelsorten mit zunehmender Stickstoffdüngung. Bei einer Stickstoffgabe von 45 kg/ha beträgt der L-Ascorbinsäuregehalt der Kartoffelsorte Russet Burbank 130,7 mg/100 g TM. Wird die Stickstoffgabe auf 135 kg/ha erhöht, verringert sich der L-Ascorbinsäuregehalt um 7,5 %, bei einer Erhöhung auf 225 kg/ha bereits um 14,1 % [Augustin 1975a, Lee 2000].

Ähnliche Effekte bei Erhöhung der Menge an ausgebrachtem Stickstoffdünger zeigen Lisiewska und Kmiecik für Blumenkohl. Wird die Stickstoffgabe von 80 kg/ha auf 120 kg/ha erhöht, verringert sich der Gesamtascorbinsäuregehalt des frischen Blumenkohls um 6 %. Der Anteil der Dehydro-L-Ascorbinsäure am Gesamtascorbinsäuregehalt wird von den Autoren als gering angegeben und nicht separat aufgeführt. Ein ähnlicher Effekt auf den Gesamtascorbinsäuregehalt von Brokkoli kann in dieser Studie jedoch nicht nachgewiesen werden [Lisiewska 1996].

Müller und Hippe weisen in Experimenten mit Blumenkohl, Kopfsalat, Kartoffeln, Spinat und Tomaten eine Abnahme sowohl des Gesamtascorbinsäuregehalts als auch des L-Ascorbinsäuregehalts mit steigender Stickstoffgabe (0,75-6 g pro Mitscherlich-Gefäß) bei Blumenkohl und Tomaten nach. Bei Kartoffeln hat die Steigerung der Stickstoffgabe keinen Einfluss auf den Gesamtascorbinsäuregehalt, der L-Ascorbinsäuregehalt sinkt jedoch mit zunehmender Stickstoffgabe, was sich mit den Ergebnissen von Augustin deckt [Müller 1987].

Bei Eissalat sinkt der Gesamtascorbinsäuregehalt um bis zu 21 % mit steigender Stickstoffgabe (N: 50 - 200 kg/ha) [Sørensen 1994], bei Lauch um bis zu 11 % (N: 100 - 280 kg/ha) [Sørensen 1995]. Eine deutliche Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts (bis zu 22 %) ist auch bei Weißkohl bei Steigerung der Stickstoffgabe (0 - 500 kg/ha) zu beobachten [Freyman 1991].

Ein Anstieg des L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalts mit steigender Stickstoffgabe wird unter anderem bei Kopfsalat beschrieben, kein Einfluss bei Brokkoli, Spinat und Kohlrabi [Müller 1987, Vogtmann 1987, Lisiewska 1996, Gerendás 2008].

Laut Müller und Hippe steigen bei Kopfsalat L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalt zunächst mit steigender Stickstoffgabe an, ab einer bestimmten Stickstoffmenge (> 3 g pro Mitscherlich-Gefäß) nehmen beide jedoch wieder ab [Müller 1987]. Vogtmann et. al weisen in einer Untersuchung von 4 verschiedenen Kopfsalatsorten ebenfalls einen Anstieg des L-Ascorbinsäuregehalts mit zunehmender Menge an Stickstoffdünger (0 - 240 kg/ha) nach [Vogtmann 1987].

Bei Spinat zeigt sich in einer Untersuchung von Müller und Hippe kein Zusammenhang zwischen Stickstoffernährung und L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalt [Müller 1987]. Auch bei Kohlrabi wirkt sich laut Gerendás et al. eine gesteigerte Stickstoffgabe nicht signifikant auf den Gesamtascorbinsäuregehalt der Kohlrabiknollen aus [Gerendás 2008].

Neben der Stickstoffernährung wirken sich auch Phosphorernährung und Kaliumernährung auf den L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalt aus. So wird in verschiedenen Studien bei einer gesteigerten Kaliumgabe ein Anstieg des Gehalts in Orangen, Grapefruit und Zitronen, bzw. deren Säften, beobachtet. Eine gesteigerte Phosphorgabe führt dagegen bei Überschreitung einer adäquaten Menge nicht mehr zu einem weiteren Anstieg sondern vielmehr zu einer Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts [Nagy 1980, DGE 2004].

2.5 Einfluss von Nacherntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt

Neben den Vorerntefaktoren beeinflussen auch eine Vielzahl von Nacherntefaktoren wie Temperatur, relative Luftfeuchte, Sauerstoffgehalt der Lageratmosphäre, Verletzungen im Verlauf der Ernte oder die Art der Zerkleinerung vor der Lagerung den L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalt von Obst und Gemüse maßgeblich. Es wird allgemein davon ausgegangen, dass der Verlust geringer ausfällt, je vorsichtiger das Gemüse behandelt und je niedriger die Lagertemperatur gewählt wird. Auch die Lagerdauer ist entscheidend. Meist ist der Gehalt in frisch geerntetem Obst und Gemüse deutlich höher als in gelagerten Produkten [Lee 2000, DGE 2004]. Auf den Einfluss der Art der Zubereitung (zum Beispiel verschiedener Garverfahren) wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

2.5.1 Lagertemperatur

Einen der wichtigsten Nacherntefaktoren stellt die Lagertemperatur dar. So ist nicht nur eine schnelle Abkühlung des Gemüses direkt nach der Ernte entscheidend für einen möglichst geringen Verlust an L-Ascorbinsäure, auch bei weiterer Lagerung wirkt sich eine möglichst niedrige Lagertemperatur meist positiv auf die Erhaltung der L-Ascorbinsäure aus [Lee 2000]. Im Handel sowie im Haushalt werden Obst und Gemüse in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 30 °C gelagert. Bei einer Erhöhung der Lagertemperatur um 10 K (im relevanten Temperaturbereich) erhöht sich die Geschwindigkeit der für den Abbau relevanten Oxidationsreaktionen um das 2- bis 3-fache. Als optimal werden im Allgemeinen Temperaturen von 0 bis 2 °C bei gleichzeitig möglichst hoher relativer Luftfeuchte angesehen, es sei denn, es handelt sich um kälteempfindliche Gemüse wie zum Beispiel Kartoffeln oder Paprika, bei diesen sind Lagertemperaturen von 5 bis 10 °C geeignet [Bognár 1995].

Eine negative Auswirkung höherer Lagertemperaturen auf den L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalt ist für eine Vielzahl von Obst- und Gemüsearten, wie zum Beispiel Eisbergsalat, Radieschen, Artischocken, Orangen, Ananas und Kiwi, bekannt [Adisa 1986, Agar 1999, Barry-Ryan 1999, Gil-Izquierdo 2001, Del Aguila 2006].

Eine Erhöhung der Lagertemperatur hat bei Eisbergsalat einen signifikant geringeren Gesamtascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung zur Folge. Nach 10 Tagen Lagerung bei 8 °C liegt der Gesamtascorbinsäuregehalt der Proben um ca. 25 %

niedriger im Vergleich zur Lagertemperatur 3 °C [Barry-Ryan 1999]. Werden Radieschen bei 1 °C, 5 °C und 10 °C gelagert, tritt der größte Verlust an L-Ascorbinsäure bei der höchsten Lagertemperatur auf. Nach 10 Tagen Lagerung bei 10 °C liegt der L-Ascorbinsäuregehalt bei 14 % des Ausgangsgehalts, bei den Lagertemperaturen 1 °C und 5 °C dagegen deutlich höher bei ca. 85 % bzw. ca. 75 % [Del Aguila 2006]. Auch bei der Lagerung von Orangen und Ananas bewirkt eine höhere Lagertemperatur (30 °C statt 10 °C) eine stärkere Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts [Adisa 1986]. Wird bei der Lagerung von Kiwifrüchten die Lagertemperatur von 0 °C auf 10 °C erhöht, beträgt der L-Ascorbinsäuregehalt nach 6 Tagen Lagerung statt 87 % nur noch 66 % des Ausgangsgehalts [Agar 1999].

Bei einer 14-tägigen Lagerung von Artischocken bei Lagertemperaturen von 0 °C, 2 °C, 5 °C, 7 °C und 10 °C sind nur geringe Unterschiede zwischen den Temperaturen zu erkennen. Die größte Abnahme erfolgt jedoch ebenfalls bei der höchsten Lagertemperatur [Gil-Izquierdo 2001].

2.5.2 Lagerdauer

Auch die Lagerdauer wirkt sich entscheidend auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Gemüse aus. Meist nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt mit steigender Lagerdauer ab, wie zum Beispiel bei Spinat, Kartoffeln (nicht zerkleinert), Eisbergsalat oder Bohnen [Augustin 1975b, Albrecht 1990, Barry-Ryan 1999, Gil 1999]. Bei einigen Gemüsen, insbesondere bei zerkleinerten Kartoffeln oder Staudensellerie, ist jedoch zunächst ein Anstieg des L-Ascorbinsäuregehalts zu beobachten, bevor der Gehalt im Laufe der weiteren Lagerzeit wieder absinkt [Mondy 1986, Tudela 2002, Viña 2006]. Weitere Gemüse, insbesondere der Familie Brassicaceae (Weißkohl, Blumenkohl, Brokkoli, Rosenkohl), zeigen nahezu keine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts im Verlauf der Lagerung [Albrecht 1990, Albrecht 1991].

Bei Spinat nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt bei Lagerung in perforierten Beuteln und einer Lagertemperatur von 10 °C im Verlauf einer 7-tägigen Lagerung kontinuierlich ab [Gil 1999]. Wird zerkleinerter Eisbergsalat 10 Tage lang in Beuteln aus orientiertem Polypropylen (OPP) bei 8 °C gelagert, sinken L-Ascorbinsäuregehalt und Gesamtascorbinsäuregehalt ebenfalls nahezu kontinuierlich im Verlauf der Lagerung [Barry-Ryan 1999]. Bei Kartoffeln der Sorte Russet Burbank verringert sich der L-Ascorbinsäuregehalt bei einer Lagerung bei 7,2 °C und 95 % relativer Feuchte

im Verlauf von ca. 9 Monaten Lagerung auf etwa ein Drittel des Ausgangsgehalts [Augustin 1975b].

Bei einem Vergleich des Einflusses dreier verschiedener Lageratmosphären sowie der Lagerung unter Umgebungsluft auf den L-Ascorbinsäure-, Dehydro-L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalt von Erdbeeren zeigt sich bei einer Lagertemperatur von 5 °C eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts im Verlauf der ersten 24 h gefolgt von einer Abnahme des Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalts bei gleichzeitiger Zunahme des L-Ascorbinsäuregehalts. Der Gesamtascorbinsäuregehalt sinkt bei allen Lageratmosphären bis zum Tag 7 [Wright 1997].

Im Gegensatz zur Lagerung unzerkleinerter Kartoffeln steigt bei zerkleinerten Kartoffeln (Scheiben oder Stäbchen) der L-Ascorbinsäuregehalt in den ersten Lagertagen zunächst an, sinkt jedoch im weiteren Verlauf der Lagerung wieder nahezu auf den Ausgangsgehalt ab. Wann das Maximum des L-Ascorbinsäuregehalts erreicht wird, hängt hierbei unter anderem von der Kartoffelsorte ab. Werden zum Beispiel Kartoffeln der Sorten Agria, Cara, Liseta, Monalisa und Spunta als Stäbchen mit einer Dicke von 8 x 8 mm bei einer Lagertemperatur von 4 °C gelagert, erreicht die Sorte Cara das Maximum bereits am Lagertag 2 (+30 %), die Sorten Agria und Liseta am Tag 3 (+31 % bzw. +108 %) und die Sorten Monalisa und Spunta am Tag 4 (+67 % bzw. +88 %) [Mondy 1986, Tudela 2002]. Auch bei zerkleinertem Staudensellerie zeigt sich im Verlauf der Lagerung innerhalb der ersten 14 Tage zunächst ein Anstieg des L-Ascorbinsäuregehalts. Im Verlauf weiterer 14 Tage sinkt der L-Ascorbinsäuregehalt wieder auf den Ausgangswert. Signifikant ist dieser Anstieg im Verlauf der ersten 14 Tage jedoch nur bei höheren Lagertemperaturen (kein signifikanter Anstieg bei Lagertemperatur 0 °C). Bei einer Lagertemperatur von 4 °C steigt der L-Ascorbinsäuregehalt innerhalb von 14 Tagen um das 1,4-fache, bei einer Lagertemperatur von 10 °C um das 1,6-fache [Viña 2006].

Albrecht et al. berichten bei verschiedenen Brassicaceae (Weißkohl, Blumenkohl, Brokkoli und Rosenkohl) von einer deutlich geringeren Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts im Verlauf der Lagerung im Vergleich zu Pflanzen anderer Pflanzenfamilien (Kartoffeln, grüne Bohnen, Erbsen, Spargel, Spinat, Rüben). Bleibt bei Weißkohl, Blumenkohl, Brokkoli und Rosenkohl der L-Ascorbinsäuregehalt auch nach 3-wöchiger Lagerung (bei 2 °C und 95 – 100 % relativer Feuchte) zu > 95 % erhalten, liegt der L-Ascorbinsäuregehalt von Kartoffeln bei 75 %, von Erbsen, Spinat

und Rüben bei 65 – 71 % und von grünen Bohnen und Spargel bei 9 – 26 % [Albrecht 1990, Albrecht 1991]. Vanderslice et al. weisen bei Brokkoli einen etwas größeren Verlust an L-Ascorbinsäure im Verlauf einer 4-tägigen Lagerung bei 4 °C nach. Die stärkste Abnahme findet hierbei im Verlauf der ersten 24 h statt bis auf ca. 85 % des Ausgangsgehalts der Frischware. Im Verlauf der übrigen Lagertage bleibt der Gehalt weitgehend konstant. Der Gesamtascorbinsäuregehalt nimmt ebenfalls innerhalb der ersten 24 h bis auf ca. 85 % des Ausgangsgehalts ab. Eine Aussage zur relativen Feuchte des Lagerraums wird nicht getroffen, was eine eher geringere relative Feuchte vermuten lässt, als in der Studie von Albrecht et al. [Vanderslice 1990]. Auch die Abnahme des Gesamtascorbinsäuregehalts fällt bei der Studie von Vanderslice et al. größer aus als bei vergleichbaren Studien. So ermitteln zum Beispiel Hussein et al. bei 10-tägiger Lagerung von Brokkoli (unzerkleinert in unverschlossenem Beutel) bei 4 °C einen Gesamtascorbinsäuregehalt von 92 % des Ausgangsgehalts. Da Brokkoli hier in Beuteln (wenn auch unverschlossen) gelagert wird, kann wiederum von einer höheren relativen Feuchte ausgegangen werden [Hussein 2000].

2.5.3 Relative Feuchte

Als optimale Lagerbedingungen für Obst und Gemüse werden im Allgemeinen Temperaturen von 0 – 2 °C bei gleichzeitig möglichst hoher relativer Luftfeuchte angesehen [Bognár 1995]. Eine Erhöhung der relativen Feuchte der Lageratmosphäre von 42 % auf 56 % (Lagertemperatur ca. 18 °C) durch Einsatz einer Sprühnebelanlage hat eine geringere Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts von Brokkoli zur Folge. Bei Einsatz der Sprühnebelanlage sind nach 72 h Lagerung noch 64,3 % der in der Frischware enthaltenen L-Ascorbinsäure vorhanden, ohne Einsatz der Sprühnebelanlage lediglich 38,7 % [Barth 1992].

2.5.4 Lichteinstrahlung

Lichteinstrahlung wirkt sich im Allgemeinen positiv auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Gemüse aus. Lagerung in Dunkelheit hat dagegen meist eine stärkere Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts zur Folge. Wird Chinesischer Brokkoli (Kai-Lan, *Brassica oleracea* var. *alboglabra*) bei einer Lagertemperatur von 1 °C und einer relativen Feuchte von 95 % gelagert, ist der L-Ascorbinsäureverlust bei Lagerung in

Dunkelheit um das 2-fache höher als bei Lagerung unter Lichteinstrahlung ($21,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) [Noichinda 2007]. Ähnliche Ergebnisse zeigen Toledo et al. für Spinat. Nach einer Lagerdauer von 24 Tagen bei 8°C liegt der L-Ascorbinsäuregehalt der in Dunkelheit gelagerten Spinatblätter bei 10 % des Gehalts der Frischware. Werden die Spinatblätter unter Lichteinstrahlung ($20 - 25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gelagert, liegt der L-Ascorbinsäuregehalt am Ende der Lagerdauer um das 3,6-fache höher als bei Lagerung in Dunkelheit [Toledo 2003]. Gleichzeitig weisen sowohl Chinesischer Brokkoli als auch Spinat bei Lagerung unter Lichteinstrahlung einen höheren Gehalt an löslichen Kohlenhydraten (zum Beispiel Glucose, Fructose) auf, was auf eine entsprechende Photosyntheseleistung hindeutet. Die so gebildeten Hexosen können als Ausgangsstoffe der Biosynthese von L-Ascorbinsäure dienen und könnten so die Biosyntheserate beeinflussen [Toledo 2003, Noichinda 2007]. Als wahrscheinlicher gilt jedoch, dass die Photosynthese die Aktivität der L-Galactono-1,4-Lacton-Dehydrogenase beeinflusst, die den letzten Schritt der L-Ascorbinsäuresynthese katalysiert [Bartoli 2006].

2.5.5 Art und Weise der Zerkleinerung

Die Art und Weise der Zerkleinerung wirkt sich ebenfalls auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Obst und Gemüse aus. So nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt bei Karotte, Pastinake, Staudensellerie, Kartoffel, Zucchini und Weißkohl nach Zerkleinerung des Gemüses (starke Zerkleinerung, zum Beispiel bei Kartoffel 5 Stücke pro g) und 2-tägiger Lagerung bei 15°C signifikant ab. Reyes et al. führen die Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts überwiegend auf den Einsatz von L-Ascorbinsäure als Antioxidans aufgrund des unmittelbaren Wundstressses und der dadurch vermehrt auftretenden reaktiven Sauerstoffverbindungen zurück, und nur zu einem geringen Anteil auf den aeroben Abbau von L-Ascorbinsäure [Reyes 2007].

Einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtascorbinsäuregehalt hat die Art und Weise der Zerkleinerung bei Eisbergsalat. Wird der Salat von Hand mit einem scharfen Messer in Streifen geschnitten statt gerissen, weisen die Proben einen um 18 % geringeren Gesamtascorbinsäuregehalt auf. Nach 10 Tagen Lagerung in verschlossenen OPP-Beuteln bei einer Lagertemperatur von 8°C beträgt der Unterschied bereits ca. 50 %. Die maschinelle Zerkleinerung resultiert im Vergleich zum manuellen Zerreißen ebenfalls in niedrigeren Gesamtascorbinsäuregehalten, wobei die Verwendung stumpfer Messer im Vergleich zu scharfen Messern noch einmal

einen signifikant niedrigeren Gesamtascorbinsäuregehalt zur Folge hat [Barry-Ryan 1999].

Wird dagegen Stangensellerie mit einem scharfen Messer in 4 cm lange Stücke zerteilt, ist keine anfängliche Verringerung des L-Ascorbinsäuregehalts aufgrund der Verletzung zu beobachten [Viña 2006]. In einer Untersuchung von Reyes et al. zeigen auch Süßkartoffel, Radieschen und Rotkohl keine signifikante Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts nach starker Zerkleinerung (zum Beispiel bei Radieschen 10 Stücke pro g) und 2-tägiger Lagerung bei 15 °C [Reyes 2007]. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu einer Studie von Del Aguila et al. zum Einfluss des Grads der Zerkleinerung und der Lagertemperatur auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Radieschen. Die Radieschen in dieser Studie werden unzerteilt, als Scheiben oder als Raspel (ca. 2 mm x 20 mm), jeweils verpackt in Schalen aus Polystyrol sowie PVC-Folie (Polyvinylchlorid), bei 10 °C und 90 % relativer Feuchte eingelagert. Bei den unzerteilten Radieschen und den Scheiben findet im Verlauf von 10 Tagen Lagerung keine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts statt, der L-Ascorbinsäuregehalt der Raspel sinkt dagegen auf 14 % des Gehalts der Frischware ab. Nach 2 Tagen Lagerung weisen jedoch auch Aguila et al. noch keine deutliche Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts in den gelagerten Raspeln nach. Erst ab dem Lagertag 6 unterscheidet sich der L-Ascorbinsäuregehalt deutlich vom Gehalt der Frischware und nimmt im weiteren Verlauf der Lagerung stark ab [Del Aguila 2006].

Auch bei Kartoffeln wirkt sich der Grad der Zerkleinerung auf den L-Ascorbinsäureverlustgehalt während der Lagerung aus. Je weniger stark die Kartoffeln zerkleinert werden, desto deutlicher steigt der L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung an. Werden Kartoffeln der Länge nach in Scheiben von 1 mm Dicke und Stäbchen von 10 x 20 mm Dicke geschnitten und bei 20 °C gelagert, dann steigt der L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bis zum Tag 2 bei den Scheiben um das 4-fache an, bei den Stäbchen um das 2,5-fache [Mondy 1986].

Beschädigungen von Kartoffeln aufgrund von Druckstellen haben eine signifikante Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts im geschädigten Gewebe zur Folge. Mondy und Leja vermuten als Ursache hierfür die Oxidation von L-Ascorbinsäure durch Ascorbat-Oxidase aufgrund der Zerstörung der Zellen oder die Reaktion von L-Ascorbinsäure mit phenolischen Substanzen in den durch die Druckstellen entstandenen schwarzen Flecken der Knollen [Mondy 1986].

2.5.6 Lageratmosphäre

Meist kann das Ausmaß von sowohl physiologischen als auch chemischen Veränderungen im Verlauf der Lagerung von Obst und Gemüse durch eine Veränderung der Lageratmosphäre¹ reduziert werden [Lee 2000]. Häufig wirkt sich eine hohe CO₂-Konzentration (zum Beispiel 10 %) in der Lageratmosphäre negativ auf den L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalt aus, wie zum Beispiel bei der Lagerung von Kiwifrüchten (in Scheiben geschnitten) verschiedenen Beerenfrüchten (Erdbeeren, Brombeeren, Johannisbeeren), Birnen, Kartoffeln (zerkleinert) und Mangold [Agar 1997, Gil 1998, Agar 1999, Veltman 1999, Tudela 2002]. Bei anderen Gemüsen, wie zum Beispiel zerkleinertem Spinat, ist dagegen kein nennenswerter Unterschied im L-Ascorbinsäuregehalt aufgrund erhöhter CO₂-Konzentrationen in der Lageratmosphäre zu beobachten [Gil 1999].

Eine geringfügig erhöhte CO₂-Konzentration (zum Beispiel 3 %) kombiniert mit einer niedrigen O₂-Konzentration (zum Beispiel 3 % oder 1 %) wirkt sich dagegen unter anderem bei der Lagerung von grünen Bohnen positiv auf den Gehalt an L-Ascorbinsäure und insbesondere Gesamtascorbinsäure aus [Sánchez-Mata 2003]. Positive Effekte erhöhter CO₂-Konzentrationen auf den Gesamtascorbinsäuregehalt sind für Spinat und Brokkoli bekannt [Paradis 1996, Gil 1999].

Bei der Lagerung von Kiwifrüchten wird die geringste Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts nach 6 Tagen Lagerung bei 0 °C mit einer Lageratmosphäre aus Sauerstoff (0,5 bis 4 %) in Stickstoff erreicht. Zu hohe CO₂-Konzentrationen (10 oder 20 kPa CO₂ in Luft) wirken sich dagegen negativ auf den L-Ascorbinsäuregehalt aus [Agar 1999]. Auch bei verschiedenen Beerenfrüchten, insbesondere bei Erdbeeren, in geringerem Ausmaß auch bei Brombeeren und Johannisbeeren, wird diese negative Auswirkung hoher CO₂-Konzentrationen (10 bis 30 %) in der Lageratmosphäre beobachtet [Agar 1997]. Ein ähnliches Resultat ergibt die Lagerung von Birnen bei 5 °C unter verschiedenen Lageratmosphären. Sowohl hohe CO₂-Konzentrationen (10 % CO₂ + 0,25 % O₂ oder 10 % CO₂ + 2 % O₂) als auch sehr niedrige O₂-Konzentrationen (0,25 % O₂ + 0 % CO₂) haben nach 60 Tagen Lagerung einen deutlich geringeren L-Ascorbinsäuregehalt der Birnen zur Folge, als die Lagerung unter üblichen CA (Controlled Atmosphere)-Bedingungen (2 % O₂ + 0 % CO₂) [Veltman 1999].

¹ Von den Autoren der zitierten Veröffentlichungen nicht näher spezifiziert, handelt es sich bei allen Prozentangaben in diesem Kapitel vermutlich um Volumenprozent.

Werden für die Lagerung von Kartoffeln in Form von Stäbchen (8 x 8 mm Dicke) Beutel aus einem Material mit geringer Sauerstoffpermeabilität gewählt, die eine modifizierte Atmosphäre mit einem verhältnismäßig hohen Anteil an CO₂ in der Verpackung erzeugen (nach 2 Tagen Lagerung bei 4 °C: 8,2-9,8 kPa CO₂ und 3,1-3,8 kPa O₂), so hat das sowohl einen geringeren L-Ascorbinsäure- als auch Gesamtascorbinsäuregehalt (um bis zu 36 % weniger im Vergleich zur Lagerung unter Luft) der Proben zur Folge [Tudela 2002]. Lagerung von zerkleinertem Mangold unter modifizierter Atmosphäre (nach 4 Tagen Lagerung bei 6 °C: ca. 9,5 % CO₂ und ca. 8 % O₂) bewirkt ebenfalls eine Reduktion des Gesamtascorbinsäuregehalts auf ca. 75 % des Ausgangsgehalts im Vergleich zur nahezu vollständigen Erhaltung bei Lagerung unter Luft [Gil 1998].

Bei der Lagerung von fertig geschnittenem Spinat beobachten Gil et al. zwar keinen Einfluss einer erhöhten CO₂-Konzentration auf den L-Ascorbinsäuregehalt, der Gesamtascorbinsäuregehalt nimmt jedoch weniger stark ab. Wird der Spinat unter Umgebungsluft verpackt, sinken L-Ascorbinsäuregehalt und Gesamtascorbinsäuregehalt im Verlauf von 7 Tagen Lagerung bei 10 °C kontinuierlich ab (L-Ascorbinsäuregehalt auf ca. 15 %, Gesamtascorbinsäuregehalt auf ca. 50 % des Ausgangsgehalts). Wird stattdessen eine modifizierte Atmosphäre in der Verpackung erzeugt (12 % O₂ und 7 % CO₂ bis zum Tag 3, 6 % O₂ und 14 % CO₂ bis zum Tag 7), dann sinkt zwar der L-Ascorbinsäuregehalt ebenfalls, der Gesamtascorbinsäuregehalt ist jedoch am Tag 7 noch nahezu identisch mit dem Ausgangswert [Gil 1999].

Nach 4-wöchiger Lagerung von Brokkoli bei 4 °C ist der Gesamtascorbinsäuregehalt bei Lagerung unter Luft geringfügig (nicht signifikant) niedriger als der Gehalt der Frischware, bei CA-Lagerung (2 % O₂ + 6 % CO₂) bleibt der Gesamtascorbinsäuregehalt dagegen nahezu vollständig erhalten [Paradis 1996].

2.6 Arbeitshypothesen

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit der Gehalt an L-Ascorbinsäure in Kohlrabi von verschiedenen Vorernte- und Nacherntefaktoren abhängt. Untersucht werden der Einfluss von N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware, sowie der Einfluss der Nacherntefaktoren Lagerzeit, Lagertemperatur, spezifische Oberfläche und Lageratmosphäre. Betrachtet werden hierbei sowohl die Phänomenologie als auch die Kinetik der L-Ascorbinsäure. Es wird angenommen,

dass der L-Ascorbinsäuregehalt in Kohlrabi im Verlauf der Lagerung abnimmt. Zusätzlich werden bei den Lagerversuchen die Veränderung der Masse und Feuchte der gelagerten Proben bestimmt.

Es werden folgende Thesen aufgestellt:

- Die Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts stellt, bei Konstanthaltung aller anderen Einflussfaktoren, eine Funktion der Temperatur dar, wobei die größten Verluste bei hohen Lagertemperaturen auftreten.
- Die Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts stellt, bei Konstanthaltung aller anderen Einflussfaktoren, eine Funktion der spezifischen Oberfläche dar. Je größer die spezifische Oberfläche, desto größer ist auch der L-Ascorbinsäure-Verlust.
- Die Art der Verpackung – insbesondere die Atmosphäre in der Verpackung - wirkt sich ebenfalls auf den L-Ascorbinsäuregehalt der gelagerten Gemüse aus. Die größten Verluste treten bei offener Lagerung auf.

3 Material und Methoden

Es werden insgesamt acht Versuchsreihen (A bis H) durchgeführt. Die Versuchsreihen A bis G untersuchen den Einfluss verschiedener Lagerfaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt (AA). Versuchsreihe H befasst sich mit dem Einfluss von N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware.

3.1 Gemüseauswahl und Bezug der Frischware

Als geeignetes Gemüse zur Untersuchung des Einflusses der Lagerfaktoren spezifische Oberfläche, Lagertemperatur, Lagerzeit und Lageratmosphäre auf den L-Ascorbinsäuregehalt wird Kohlrabi (*Brassica oleracea* convar. *acephala* var. *gongylodes* L.) gewählt. Kohlrabi zählt mit einem Gesamtascorbinsäuregehalt von durchschnittlich 65 mg/100 g zu den Vitamin C-reichen Gemüsen [Souci 2008] und ist insbesondere geeignet zur Überprüfung des Einflusses der spezifischen Oberfläche, da sich die Sprossknolle der Kohlrabipflanze in Würfel oder Quader mit definierter Kantenlänge zerteilen lässt.

Kohlrabi wird für die Lagerversuche (Versuchsreihen A bis G) als Kohlrabiknollen mit Laub von einer Gärtnerei in Gießen bezogen. Jahreszeitlich bedingt handelt es sich bei der Rohware um Freilandkohlrabi aus Italien (bis Ende April) oder Deutschland (ab Mitte Mai). Pflanzen, deren Sprossknollen einen zu geringen Durchmesser (< 70 mm) oder Verletzungen aufweisen, werden für die Lagerversuche nicht verwendet. Der L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware in den einzelnen Versuchswochen liegt zwischen 40 und 55 mg/100 g. Ein niedrigerer L-Ascorbinsäuregehalt (30 mg/100 g) der Frischware wird nur in einer Versuchswoche gemessen.

Die Untersuchung des Einflusses von N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware (Versuchsreihe H) erfolgt an Kohlrabi, die vom Institut für Pflanzenernährung der Justus-Liebig-Universität Gießen angebaut und zur Verfügung gestellt werden. Die Kohlrabipflanzen werden in Mitscherlich-Gefäßen kultiviert. Die Gefäße enthalten jeweils 6 kg nährstoffarme Erde sowie die festgelegte Menge an Stickstoff- und Schwefeldünger. Jeweils 6 Pflanzen erhalten die gleiche Düngevariante. Bei den Düngevarianten werden 3 N-Stufen (1, 2 und 4 g/Gefäß) und 3 S-Stufen (0, 0,2 und 0,6 g/Gefäß) entsprechend kombiniert, so dass sich insgesamt 9 Düngevarianten ergeben. Die Ernte der Kohlrabipflanzen erfolgt am 22. und 23. August 2006. Die Kohlrabiknollen werden gewaschen, gewogen und halbiert.

Eine Hälfte wird zerkleinert, unter flüssigem Stickstoff tiefgekühlt und bei -80 °C aufbewahrt bis zur Messung des L-Ascorbinsäuregehalts. Die andere Hälfte wird ebenfalls zerkleinert und von den Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenernährung zur Bestimmung der Trockenmasse genutzt. Die Messung des L-Ascorbinsäuregehalts erfolgt wie in Kap. 3.3.1 beschrieben.

3.2 Vorbereitung der Frischware und Einlagerung der Proben

Nach Anlieferung der Frischware werden die Kohlrabiknollen zunächst von den Blättern befreit und wenn nötig nach Größe sortiert, um die Zusammenstellung einer homogenen Mischung aus größeren und kleineren Kohlrabiknollen für die einzelnen Lagerformen zu ermöglichen.

Je nach Versuchsreihe werden die Kohlrabiknollen unterschiedlich stark zerkleinert. Als Lagerformen kommen zum Einsatz: große Würfel (ca. $40 \times 40 \times 40\text{ mm}$), Stäbchen (ca. $40 \times 10 \times 10\text{ mm}$), kleine Würfel (ca. $10 \times 10 \times 10\text{ mm}$), Julienne (ca. $40 \times 3 \times 2\text{ mm}$) und Raspel (ca. $40 \times 2 \times 1\text{ mm}$). Für die großen Würfel wird aus der Mitte jeder Kohlrabiknolle manuell mit Hilfe einer Schablone jeweils ein Würfel geschnitten. Für alle weiteren Lagerformen wird zunächst je nach Größe der Kohlrabiknolle ein Würfel (ca. $40 \times 40 \times 40\text{ mm}$) oder Quader (ca. $40 \times 40 \times 60\text{ mm}$) aus der Mitte der Knolle geschnitten. Dieser wird anschließend entweder manuell mit Hilfe eines Pommes-Schneiders (WMF AG, Deutschland) in Stäbchen und kleine Würfel geschnitten oder unter Verwendung des Durchlaufschnitzlers (MUZ 4D S2 Bosch Hausgeräte GmbH, Deutschland) der Küchenmaschine (MUM 4625 Bosch Hausgeräte GmbH, Deutschland) zu Julienne und Raspel verarbeitet. Verwendet werden hierzu die Julienne-Scheibe (MUZ 4J S1) bzw. die Raspel-Scheibe (fein) des Durchlaufschnitzlers. Von jeder Lagerform wird eine ausreichend große Menge für die Anzahl der einzulagernden Proben vorbereitet, durchmischt und anschließend je nach Versuchsreihe in Schalen oder Beutel aus Polyethen (PE) eingewogen.

In Abhängigkeit von der gewählten Lagertemperatur und dem zu erwartenden Masseverlust werden 230 – 280 g zerkleinerte Kohlrabi je Lagertag, Lagerform und Verpackung eingewogen und in einem handelsüblichen Kühlgerät (KB 4250-21B Liebherr, Deutschland) für eine Lagerdauer von 6 Tagen eingelagert. Das Kühlgerät verfügt über ein Kühlteil (mögliche Temperatureinstellung zwischen 4 °C und 9 °C) und ein Kaltlagerteil (BioFresh-Teil). Die Temperatur im Kaltlagerteil wird automatisch

geregelt zwischen 0 °C und 3 °, kann aber durch Auswahl der Einstellmöglichkeiten b1 (niedrigste Temperatur) bis b9 (höchste Temperatur) beeinflusst werden.

Als zu untersuchende Lagertemperaturen werden 0,5 °C, 6 °C und 12 °C gewählt. Um die Lagertemperatur 0,5 °C zu erreichen, werden die Proben im Kaltlagerfach, für die Lagertemperaturen 6 °C und 12 °C im Kühlteil des Kühlgeräts eingelagert. Tabelle 3.1 fasst die angestrebten und erreichten Lagertemperaturen sowie die gewählten Einstellungen des Kühlgeräts in den einzelnen Versuchsreihen zusammen. Da das Kaltlagerfach über 3 getrennte Schubladen verfügt und eine einzelne Schublade nicht genügend Platz für alle untersuchten Lagerformen bietet, ergeben sich die in Tab. 3.1 für Versuchsreihe E aufgeführten abweichenden Lagertemperaturen für Julienne/Raspel auf der einen und Stäbchen auf der anderen Seite.

Tab. 3.1: Übersicht der Einstellungen des Kühlgeräts in den einzelnen Versuchsreihen.

Versuchsreihe	Lagertemp. Ziel	Kühlgerät - Einstellungen und Einlagerungsort	Lagertemp. gemessen*
A	6 °C	Kühlteil 5 °C Biofresh-Fach b9 Kühlteil mitte (3./4. Boden v.o.)	6,2 (± 0,4) °C
B	6 °C	Kühlteil 5 °C Biofresh-Fach b9 Kühlteil mitte (3./4. Boden v.o.)	5,1 (± 0,3) °C
C	12 °C	Kühlteil 9 °C Biofresh-Fach b5 Kühlteil oben (2. Boden v.o.)	12,3 (± 0,5) °C
D	12 °C	Kühlteil 9 °C Biofresh-Fach b5 Kühlteil oben (2. Boden v.o.)	11,9 (± 1,1) °C
E	0,5 °C	Kühlteil 9 °C Biofresh-Fach b5 Biofresh-Fach mitte (Julienne/Raspel) und unten (Stäbchen)	Julienne/Raspel 0,7 (± 0,1) °C Stäbchen 0,4 (± 0,3) °C
F	12 °C	Kühlteil 9 °C Biofresh-Fach b5 Kühlteil oben (2. Boden v.o.)	12,3 (± 0,5) °C
G	6 °C	Kühlteil 5 °C Biofresh-Fach b9 Kühlteil mitte (3./4. Boden v.o.)	5,8 (± 0,4) °C

* Mittelwert der gemessenen Lagertemperatur in den beiden Versuchswochen

In den Versuchsreihen A bis E wird der Einfluss der Lagerfaktoren spezifische Oberfläche, Lagertemperatur und Lagerzeit auf den L-Ascorbinsäuregehalt untersucht.

Die Versuchsreihen D und F befassen sich mit dem Einfluss der Lageratmosphäre. Hierzu werden Proben offen in PE-Schalen oder verpackt in PE-Beutel eingelagert. Die verpackten Proben werden entweder mit einem Vakuumiergerät (VacBox ZS 11 VAMA) nahezu vollständig vakuumiert (Stufe 2 von 5) oder im Anschluss an die Erzeugung des Vakuums noch mit einem Schutzgas (ALIGAL 13 AIR LIQUIDE) begast. Das verwendete Schutzgas besteht aus 30 (± 3) Vol.-% CO₂ in N₂. Durch nicht vollständige Vakuumierung (erreichter Druck: 33,3 kPa) verbleibt ein Rest Umgebungsluft in der Verpackung.

Versuchsreihe G untersucht den Einfluss von spezifischer Oberfläche und Lagerzeit auf den L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalt.

Jede der Versuchsreihen besteht aus drei aufeinander folgenden Versuchswochen. In die Auswertung gehen in der Regel zwei Versuchswochen ein.

3.3 Messung der Parameter in Frischware und Lagerproben

Die Parameter L-Ascorbinsäure, Feuchte und Masse der Proben werden sowohl in der Frischware als auch in den Lagerproben nach zwei, vier und sechs Tagen bestimmt. Die Gehalte in den Lagerproben werden jeweils mit dem Gehalt der Frischware verglichen. In den Versuchsreihen A und G erfolgt zusätzlich eine Bestimmung der Parameter am ersten Lagertag. In der Versuchsreihe G wird neben dem Gehalt an L-Ascorbinsäure auch der Gesamtascorbinsäuregehalt der Proben bestimmt, die Aufbereitung und Messung der Proben unterscheidet sich hier zum Teil deutlich von der Vorgehensweise in den übrigen Versuchsreihen und wird daher unter Punkt 3.3.2 gesondert behandelt.

3.3.1 L-Ascorbinsäure (Versuchsreihen A bis F und H)

Zur Ermittlung des L-Ascorbinsäuregehalts wird für jede Probe eine Dreifachbestimmung durchgeführt (Einfachbestimmung bei Versuchsreihe H). Die Messung erfolgt hierbei enzymatisch mit einem Farb-Test zur Bestimmung der L-Ascorbinsäure in Lebensmitteln (L-Ascorbinsäure Farbttest, R-Biopharm AG, Deutschland), die Validierung der Methode durch vergleichende HPLC-Messungen eines zertifizierten externen Labors (Abb. 3.1). Die angegebenen Werte stellen Mittelwerte dar (Enzymatik: n = 3, HPLC: n = 2). Da aus der Bestimmung der L-Ascorbinsäure per HPLC nur Doppelbestimmungen vorliegen, wird auf die Angabe von Standardab-

weichungen verzichtet. Die Standardabweichung bei den enzymatisch bestimmten Konzentrationen liegt bis auf eine Ausnahme ($39,28 \pm 3,38$ mg/100 g) bei maximal 5 % (siehe Tab. A-1, Anhang).

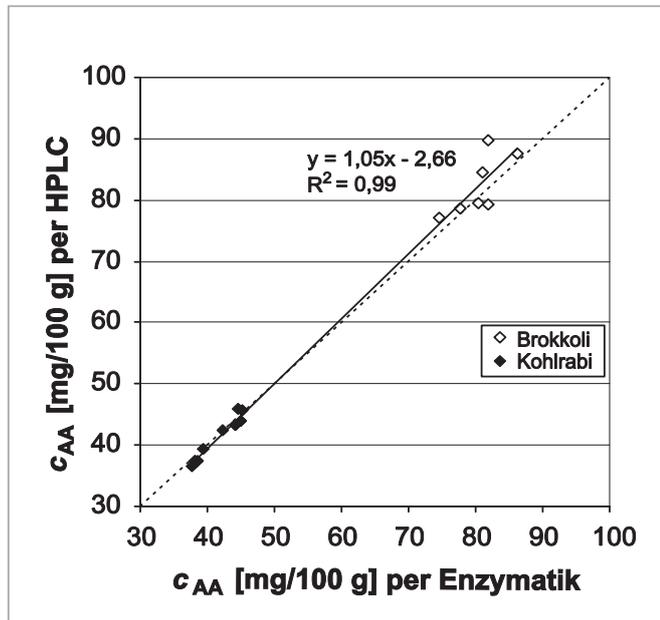


Abb. 3.1: Vergleichende Messungen der L-Ascorbinsäure per HPLC und Enzymatik, die angegebenen Werte stellen Mittelwerte dar (HPLC: $n=2$, Enzymatik: $n=3$).

Zusätzlich zu den vergleichenden HPLC-Messungen wird als externer Standard die L-Ascorbinsäurekonzentration zweier Arbeitsstandards (200 mg/l und 50 mg/l) bestimmt. Zur weiteren Überprüfung auf korrekte und störungsfreie Durchführung wird einer der Arbeitsstandards (200 mg/l) als interner Standard eingesetzt (siehe Anhang, Kap. 2 und 3).

In Abhängigkeit der zu erwartenden L-Ascorbinsäuregehalte der Proben werden $40 (\pm 0,5)$ g – $70 (\pm 0,5)$ g der Kohlrabi-proben (Versuchsreihe H: $20 (\pm 0,5)$ g) unter Zugabe von 50 ml oder 25 ml meta-Phosphorsäure (10 % w/v) mit Hilfe eines Pürierstabs homogenisiert. Der pH-Wert wird mit Kalilauge (KOH, 2 M) auf pH 3,5 – 4 eingestellt. Die Mischung wird quantitativ in einen Messkolben (500 ml bzw. 250 ml) überführt und bis zur Marke mit Wasser aufgefüllt, so dass die Konzentration an meta-Phosphorsäure in den Messkolben jeweils 1 % w/v beträgt. Das Gemisch wird

filtriert und 0,20 ml (in Versuchsreihe H: 0,40 ml) des Filtrats werden zur Messung eingesetzt (siehe Tab. 3.2).

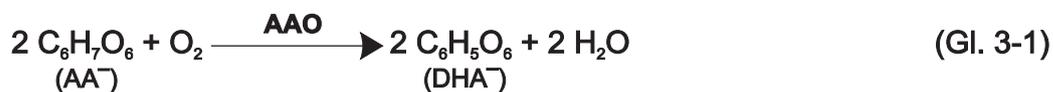
Eine L-Ascorbinsäurekonzentration von 0,03 bis 0,20 g/l in der Probelösung (Filtrat) ist notwendig zur Erzielung einer ausreichend hohen Extinktionsdifferenz ($\geq 0,100$).

Tab. 3.2: Pipettierschema zur Bestimmung des Gehalts an L-Ascorbinsäure

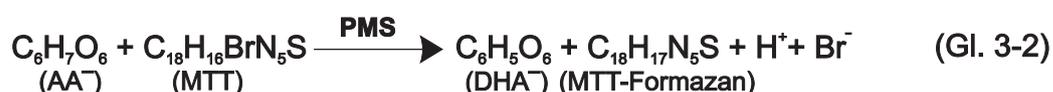
In Küvetten pipettieren	Probeleerwert	Probe
Lösung 1 des Farb-Tests zur AA-Bestimmung* (37 °C)	1,00 ml	1,00 ml
Probelösung (Filtrat)	0,20 ml	0,20 ml
Wasser (entionisiert)	1,40 ml	1,40 ml
AAO-Spatel	1	–
Mischen, 6 min inkubieren bei 37 °C, Inhalt der Leerwertküvetten im Abstand von 2 min jeweils mit dem AAO-Spatel rühren. Extinktion von Probeleerwert und Probe messen (E1).		
PMS-Lösung	0,10 ml	0,10 ml
Mischen, 15 min inkubieren bei 37 °C und anschließend die Extinktionen von Probeleerwert und Probe unmittelbar nacheinander messen (E2).		

* enthält MTT in Natriumphosphat/Citrat-Puffer

Im ersten Schritt der Messung wird in einem Leerwertansatz L-Ascorbat (AA^-) durch Zugabe von Ascorbat-Oxidase (AAO) zu Dehydro-L-Ascorbat (DHA^-) oxidiert (Gl. 3-1). Der Probeleerwert wird hierzu 6 min bei 37 °C mit einem Ascorbat-Oxidase-Spatel und dem Tetrazoliumsalz MTT (3-(4,5-Dimethylthiazolyl-2)-2,5-diphenyl-tetrazoliumbromid) in Natriumphosphat/Citrat-Puffer inkubiert.



Im zweiten Schritt wird PMS (5-Methylphenaziniummethosulfat)-Lösung zu Probeleerwert und Probe gegeben und beide für 15 min bei 37 °C inkubiert. MTT reagiert in Gegenwart des Elektronenüberträgers PMS mit dem L-Ascorbat (und weiteren reduzierenden Substanzen) der Probe zu einem Formazan (Gl. 3-2).



MTT-Formazan stellt die Messgröße dar und wird photometrisch bestimmt. Die Extinktionen von Probe und Probeleerwert werden jeweils vor (E1) und nach (E2) Inkubation mit MTT bei 578 nm gemessen und die Extinktionsdifferenz (E2 – E1) für beide berechnet. Subtraktion der Extinktionsdifferenzen von Probeleerwert und Probe ergibt einen Wert, der sich äquivalent zum L-Ascorbatgehalt der Probe verhält. Die Berechnung der L-Ascorbatkonzentration erfolgt auf Grundlage des Lambert-Beer'schen Gesetzes [Henninger 1981]. Es ergibt sich folgende Formel:

$$c = \frac{V \times MG}{\varepsilon \times d \times v} \times \Delta E \quad (\text{Gl. 3-3})$$

c = Konzentration der zu bestimmenden Substanz

v = Probevolumen

V = Gesamtvolumen

MG = Molekulargewicht der zu bestimmenden Substanz

d = Schichtdicke

ε = Extinktionskoeffizient von MTT-Formazan bei 578 nm

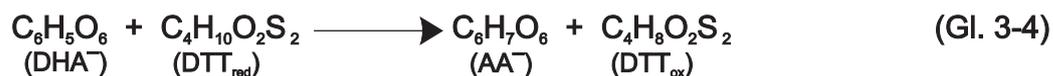
[R-Biopharm o.J.]

Das Gesamtvolumen beträgt in allen Messungen 2,70 ml, als Probevolumen werden jeweils 0,20 ml (Versuchsreihe H: 0,40 ml) eingesetzt. Da das Ergebnis als Gehalt an L-Ascorbinsäure angegeben werden soll, wird als Molekulargewicht 176,13 g/mol eingesetzt. Die Schichtdicke beträgt 1 cm und der Extinktionskoeffizient des MTT-Formazans 16,9 l/(mmol x cm). Die Ergebnisse werden im Anschluss auf die Einwaage bezogen und in g/100 g angegeben. Bei Lagerproben wird zusätzlich der Masseverlust der Proben während der Lagerung berücksichtigt, so dass das Ergebnis in g/100 g Frischware angegeben werden kann.

3.3.2 L-Ascorbinsäure und Gesamtascorbinsäure (Versuchsreihe G)

Nach Durchmischen der zu untersuchenden Frischware oder Lagerprobe, werden zur Bestimmung der L-Ascorbinsäure 70 – 90 g der Kohlrabiprobe in ein Becherglas eingewogen und 90 s homogenisiert. Das restliche Probenmaterial wird bis zur Messung der Gesamtascorbinsäure in einer verschlossenen Schale im Kühlgerät bei 5 – 8 °C aufbewahrt. Von der homogenisierten Probe werden abhängig von dem zu erwartenden L-Ascorbinsäuregehalt der Proben jeweils 18 – 25 g in 3 Bechergläser eingewogen und sofort mit meta-Phosphorsäure (10 % w/v) versetzt. Der pH-Wert wird mit Kalilauge (KOH, 2 M) auf pH 3,5 – 4 eingestellt, anschließend wird die Mischung quantitativ in einen Messkolben (100 ml) überführt und bis zur Marke mit Wasser aufgefüllt, so dass die Konzentration an meta-Phosphorsäure im Messkolben 1 % w/v beträgt. Die Mischung wird filtriert und das Filtrat wie in Kap. 3.3.1 beschrieben zur Messung eingesetzt.

Die Probenaufbereitung zur Messung der Gesamtascorbinsäure entspricht im Wesentlichen der Vorgehensweise zur Bestimmung der L-Ascorbinsäure. Der pH-Wert wird in diesem Fall jedoch auf pH 6 – 6,5 eingestellt. In Gegenwart von DTT (1,4-Dithiothreitol) wird DHA^- in der Probe zu AA^- reduziert (Gl. 3-4). Hierzu werden 0,44 ml des Filtrats und jeweils 0,22 ml der DTT-Lösung und der Reduktionspuffer-Lösung in ein Reaktionsgefäß pipettiert und durch mehrmaliges Einziehen in die Pipettenspitze durchmischt.



Nach 10 min Inkubation bei Raumtemperatur werden jeweils 0,40 ml dieses Gemischs zur Messung des Gesamtascorbinsäuregehalts eingesetzt (siehe Tab. 3.3). Die weitere Messung erfolgt wie unter Punkt 3.3.1 beschrieben.

Tab. 3.3: Pipettierschema zur Bestimmung des Gehalts an Gesamascorbinsäure

In Reaktionsgefäße pipettieren	Probeleerwert + Probe	
Probelösung (Filtrat)	0,44 ml	
DTT-Lösung	0,22 ml	
Reduktionspuffer-Lösung	0,22 ml	
Mischen durch mehrmaliges Einziehen in die Pipettenspitze und 10 min bei Raumtemperatur inkubieren.		
In Küvetten pipettieren	Probeleerwert	Probe
Lösung 1 des Farb-Tests zur AA-Bestimmung* (37 °C)	1,00 ml	1,00 ml
Lösung aus Reaktionsgefäßen	0,40 ml	0,40 ml
Wasser (entionisiert)	1,20 ml	1,20 ml
AAO-Spatel	1	–
Mischen, 6 min inkubieren bei 37 °C, Inhalt der Leerwertküvetten im Abstand von 2 min jeweils mit dem AAO-Spatel rühren. Extinktion von Probeleerwert und Probe messen (E1).		
PMS-Lösung	0,10 ml	0,10 ml
Mischen, 15 min inkubieren bei 37 °C und anschließend die Extinktionen von Probeleerwert und Probe unmittelbar nacheinander messen (E2).		

* enthält MTT in Natriumphosphat/Citrat-Puffer

Anhand der gemessenen L-Ascorbinsäure- und Gesamascorbinsäuregehalte in der Probe kann der Gehalt an Dehydro-L-Ascorbinsäure berechnet werden (Gl. 3-5) [Weisgerber 2005].

$$c_{\text{DHA}} = (c_{\text{DHA+AA}} - c_{\text{AA}}) \times \frac{MG_{\text{DHA}}}{MG_{\text{AA}}} \quad (\text{Gl. 3-5})$$

Um belastbare Aussagen bezüglich des Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalts treffen zu können, sollte das Verhältnis von L-Ascorbinsäure zu Dehydro-L-Ascorbinsäure kleiner 5:1 sein.

3.3.3 Feuchte und Masse

Die Parameter Feuchte und Masse werden für Frischware und Lagerproben jeweils einmal je Probe ermittelt.

Der Feuchtegehalt der Frischware (M_0) und der gelagerten Proben (M) wird thermogravimetrisch mittels eines Infrarot-Feuchtemessgeräts (MA 45 Sartorius, Deutschland) bestimmt. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine nicht selektive Messmethode. Neben Wasser werden weitere leicht und schwer flüchtige Bestandteile (zum Beispiel organische Lösungsmittel, Aromastoffe, Öle/Fette) aus der Probe entfernt [Nagel 2002]. In Abhängigkeit von der gewählten Lagerform werden einige Kohlrabiprogen vor der Messung homogenisiert (große Würfel, Stäbchen, kleine Würfel). Jeweils 5 – 6 g der Proben werden eingewogen und bei ca. 95 °C getrocknet bis zur Gewichtskonstanz. Das Messgerät gibt den Feuchtegehalt der Probe als Massenprozent an.

Die Massendifferenz wird durch Wiegen der Proben vor (m_0) und nach (m) der Lagerung ermittelt.

3.4 Chemikalien, Geräte und Verbrauchsmaterialien

Für die Bestimmung von L-Ascorbinsäure und Gesamtascorbinsäure sind verschiedene Lösungen erforderlich, deren Herstellung nachfolgend beschrieben wird.

meta-Phosphorsäure-Lösung (10 % w/v)

50 g der meta-Phosphorsäure-Stücke (stabilisiert mit Natriummetaphosphat) werden in ein Becherglas (500 ml) eingewogen, mit Wasser (entionisiert) bedeckt (ca. 200 ml) und unter Rühren mit Hilfe eines Magnetrührers gelöst. Die Lösung wird in einen 500 ml-Kolben überführt und mit Wasser (entionisiert) auf 500 ml aufgefüllt.

Kaliumhydroxid-Lösung (2 M)

Aufgrund der Molmasse des verwendeten Kaliumhydroxids ($M_G = 56,11$ g/mol) werden für 200 ml Kaliumhydroxid-Lösung (2 M) 22,4 g Kaliumhydroxid in Plätzchen eingewogen und in 200 ml Wasser (entionisiert) gelöst.

L-Ascorbinsäure-Stammlösung (2.000 mg/l)

Zur Herstellung werden 0,2 ($\pm 0,001$) g L-Ascorbinsäure eingewogen, in 10 ml meta-Phosphorsäure (10 % w/v) gelöst, in einen Messkolben (100 ml) überführt und mit Wasser (entionisiert) bis zur Marke aufgefüllt.

L-Ascorbinsäure-Arbeitsstandard (200 mg/l)

10 ml der Stammlösung werden in einen Messkolben (100 ml) pipettiert, 9 ml der meta-Phosphorsäure (10 % w/v) zugegeben und mit Wasser (entionisiert) auf 100 ml aufgefüllt.

L-Ascorbinsäure-Arbeitsstandard (50 mg/l)

5 ml der Stammlösung werden in einen Messkolben (200 ml) pipettiert, 19,5 ml der meta-Phosphorsäure (10 % w/v) zugegeben und mit Wasser (entionisiert) auf 200 ml aufgefüllt.

DTT-Lösung (1,3 mmol/l)

Aufgrund der Molmasse des 1,4-Dithiothreitol (DTT) ($MG = 154,2$ g/mol) werden 10 (± 1) mg eingewogen und in 50 ml Wasser (entionisiert) gelöst. Jeweils 1,5 ml der DTT-Lösung werden in Reaktionsgefäße pipettiert und bei -28 °C tiefgekühlt gelagert bis zur Messung.

Reduktionspuffer-Lösung (0,5 mol/l, pH = 7,5)

Zur Herstellung der Reduktionspufferlösung werden 1,63 ($\pm 0,001$) g Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4 , $MG = 136,09$ g/mol) und 20 ($\pm 0,001$) g Dikaliumhydrogenphosphat-Trihydrat ($K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$, $MG = 228,23$ g/mol) eingewogen, mit ca. 150 ml Wasser (entionisiert) gelöst, in einen Kolben (200 ml) überführt und auf 200 ml aufgefüllt. Im Kühlgerät bei 4 °C gelagert ist die Reduktionspuffer-Lösung 2 Wochen haltbar [Weisgerber 2005].

Tab. 3.4: Verwendete Chemikalien

Chemikalie	Hersteller / Lieferant
L-Ascorbinsäure Farb-Test	R-Biopharm, Darmstadt
L(+)-Ascorbinsäure $\geq 99\%$, p.a. $C_6H_8O_6$, $MG = 176,12$ g/mol	Roth, Karlsruhe
1,4-Dithiothreitol $\geq 99\%$, p.a. $C_4H_{10}O_2S_2$, $MG = 154,2$ g/mol	Roth, Karlsruhe
Kaliumdihydrogenphosphat $\geq 99,5\%$, p.a. KH_2PO_4 , $MG = 136,09$ g/mol	Roth, Karlsruhe
Dikaliumhydrogenphosphat-Trihydrat $\geq 99\%$, p.a. $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$, $MG = 228,23$ g/mol	Roth, Karlsruhe
Kaliumhydroxyd $\geq 85\%$, p.a. KOH , $MG = 56,11$ g/mol	Roth, Karlsruhe
Meta-Phosphorsäure p.a., Stücke (glasig) Meta-Phosphorsäure stabilisiert mit Natriummetaphosphat $(HPO_3)_n$	Roth, Karlsruhe Merck, Darmstadt
pH-Pufferlösung pH 4,01 und pH 7,01 ($\pm 0,01$ pH) Kalibrierkit mit Werkszertifikat	Roth, Karlsruhe

Tab. 3.5: Verwendete Geräte

Gerät	Modell / Typ	Hersteller / Lieferant
Küchenmaschine mit Durchlaufschnitzler und Julienne-Scheibe	MUM 4625 MUZ 4D S2 MUZ 4J S1	Bosch
Kühlgerät	KB 4250-21B	Liebherr, Biberach
Magnetrührer	R1000	Roth, Karlsruhe
Mikroliterpipette: 20-200 µl	Proline [®]	Roth, Karlsruhe
Mikroliterpipette: 100-1000 µl	Proline [®]	BIOHIT, Helsinki
pH-Tester	Checker [®] H7 98103	HANNA instruments
Pommes-Schneider	/	WMF, Geislingen/ Steige
Pürierstab (575 W)	Grandius [®] Ba 600+I	Hergestellt für GLOBUS Holding/ MAXUS
Spectral-Photometer	6300	Jenway/ Landgraf Laborsysteme, Langenhagen
Thermogravimetrischer Feuchtebestimmer	MA 45C	Sartorius, Göttingen
Trockenschrank	UM 500	Memmert, Schwabach
Vakuuiergerät	VacBox ZS 11	Vama, Wildpoldsried
Waage	572-57	Kern, Albstadt

Tab. 3.6: Verbrauchsmaterialien

Verbrauchsmaterial	Modell / Typ	Hersteller / Lieferant
Bechergläser	600 ml, Duran [®] Niedrige Form	Roth, Karlsruhe
Einmalküvetten (2,5 ml makro)	Plastibrand	Roth, Karlsruhe
Faltenfilter (Ø 185 mm)	MN 615	Macherey-Nagel, Düren
Messkolben	500 ml 250 ml 100 ml	Hirschmann, Eberstadt Isolab, Wertheim
Messpipetten	20 ($\pm 0,15$) ml 10 ($\pm 0,075$) ml	Hirschmann, Eberstadt
Probeschalen (Ø 90 mm)	/	Roth, Karlsruhe
Rührstäbchen	/	R-Biopharm, Darmstadt
Schutzgas ALIGAL 30 (± 3) Vol.-% CO ₂ in N ₂	ALIGAL 13	AIR LIQUIDE, Düsseldorf
Trichter (Ø 100 mm)	Duran [®]	Roth, Karlsruhe
Universal-Pipettenspitzen	1-200 µl 100-1.000 µl	Roth, Karlsruhe
PE-Beutel (200 x 300 mm) Dicke: 0,09 mm	PA 20/70 PE	Dagama, Willich
PE-Schalen	1 l 1,2 l	rotho / Karstadt

3.5 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Ergebnisse und zur Überprüfung der Signifikanz des Einflusses verschiedener Lagerfaktoren (spezifische Oberfläche, Lagertemperatur, Lagerzeit) auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Kohlrabiprobe werden MS EXCEL 2000 sowie ein Softwarepaket zur statistischen Datenanalyse (PASW Statistics, Version 17.0) eingesetzt. Die Berechnung der Mittelwerte, Standardabweichungen und Varianzen erfolgt mit MS EXCEL, die Überprüfung auf signifikante Mittelwertunterschiede und die multivariate lineare Regression mit PASW Statistics.

Test auf Normalverteilung

Die Stichproben ($n = 6$) werden mit dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test in der Lilliefors-Modifikation (KS-Test) und dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung getestet. Die Nullhypothese lautet in diesem Fall H_0 : „Verteilung der Stichprobe = Normalverteilung“. Da angenommen wird, dass die Nullhypothese bestätigt werden kann, sollte das α -Risiko nicht zu klein gewählt werden ($\alpha \geq 0,05$). Das Programm PASW gibt zu jeder getesteten Stichprobe einen p-Wert aus. Dieser p-Wert entspricht der Wahrscheinlichkeit, den beobachteten (oder einen noch größeren) Wert zu erhalten, obwohl in Wirklichkeit die Nullhypothese gilt. Er entspricht somit der wahren empirischen Irrtumswahrscheinlichkeit und ist nicht zu verwechseln mit dem vor dem Test festgelegten α -Risiko [Sachs 2006:323, Duller 2007:246]. Liefern KS- und Shapiro-Wilk-Test ein Ergebnis mit $p > 0,05$, kann die Nullhypothese nicht verworfen werden. Da nicht gezeigt werden kann, dass keine Normalverteilung vorliegt, wird eine Normalverteilung der Stichproben angenommen.

Test auf Varianzhomogenität

Die Voraussetzung der Varianzhomogenität wird von PASW mittels Levene-Test überprüft. Die Nullhypothese lautet hierbei, dass die Varianzen aller Stichproben gleich sind. Da auch hier, ebenso wie beim KS- und Shapiro-Wilk-Test angenommen wird, dass die Nullhypothese bestätigt werden kann, sollte das α -Risiko wiederum nicht zu klein gewählt werden. Ergibt die Überprüfung mit PASW Signifikanzen von $p > 0,05$, kann die Nullhypothese nicht verworfen werden und es wird Varianzhomogenität angenommen. Wenn die Varianz einer Stichprobe wesentlich größer ist als die der anderen und die Anzahl der Stichproben $k < 10$ ist, bietet sich zur

Überprüfung der Varianzhomogenität der Cochran-Test an. Hierbei wird die maximale Stichprobenvarianz dividiert durch die Summe der Varianzen aller zu vergleichenden Stichproben. Ist die so ermittelte Prüfgröße größer, als der für das gewählte Fehlerniveau ($\alpha = 0,05$) und die vorliegende Anzahl an Stichproben (k) und Freiheitsgraden ($v = n-1$) tabellierte Wert, muss die Nullhypothese (H_0 : „Varianzen sind gleich“) abgelehnt werden. Die Stichprobenumfänge sollten für diesen Test gleich sein [Sachs 2006:420].

ANOVA (Analysis of Variance)

Sind die Stichproben normalverteilt, wird mit PASW eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt, um Mittelwertdifferenzen der Stichproben auf ihre Signifikanz zu prüfen. Liegt Varianzhomogenität der Stichproben vor, wird der F-Test von R. A. Fischer eingesetzt, bei Varianzheterogenität der F-Test in der Variante von Welch bzw. Brown-Forsythe. Bei beiden Varianten des F-Tests handelt es sich um globale Signifikanztests, d. h. ein signifikantes Ergebnis ($p < 0,05$) zeigt nur an, dass mindestens zwei der verglichenen Gruppenmittelwerte sich signifikant unterscheiden. Zur Untersuchung, welche der Gruppenmittelwerte sich signifikant unterscheiden, werden multiple Paarvergleiche (Post-Hoc-Tests) durchgeführt. Liegt Varianzhomogenität vor, wird das Tuckey-Kramer-Verfahren (Tuckey HSD - honestly significant differences) verwendet, beim Vorliegen inhomogener Varianzen und etwa gleich großer Stichprobenumfänge der Games-Howell-Test. Die Nullhypothese (H_0 : „Mittelwerte sind gleich“) wird bei beiden Tests bei $p < 0,05$ verworfen, d. h. die Mittelwertdifferenz ist in diesen Fällen signifikant verschieden von Null.

Multivariate lineare Regression

Die Regressionsfunktion wird anhand der abhängigen Variable y und der unabhängigen Variablen x_1-x_i (Regressoren) geschätzt und mit Hilfe von Bestimmtheitsmaß und F-Statistik auf ihre globale Güte hin überprüft. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) gibt Aufschluss über die Güte der Anpassung der Regressionsfunktion an die tatsächlich gemessenen Werte. Je größer das Bestimmtheitsmaß ist, desto größer ist auch der Anteil der durch die Regressionsfunktion erklärten Streuung an der Gesamtstreuung der Messwerte. Da sich insbesondere bei einer geringen Anzahl an Beobachtungswerten mit zunehmender Zahl an Regressoren die Schätzeigen-

schaften des Modells verschlechtern, wird in diesen Fällen auch das korrigierte Bestimmtheitsmaß (R^2_{korrr}) betrachtet. Es vermindert das einfache Bestimmtheitsmaß um eine Korrekturgröße, die die Zahl der Beobachtungswerte (K) und Regressoren (J) berücksichtigt [Backhaus 2006].

$$R^2_{\text{korrr}} = R^2 - \frac{J \times (1 - R^2)}{K - J - 1} \quad (\text{Gl. 3-6})$$

Der F-Test ermöglicht eine Aussage darüber, ob die anhand der Stichprobe geschätzte Regressionsfunktion auch Gültigkeit für die Grundgesamtheit besitzt. Liegt der von PASW statistics ausgegebene empirische F-Wert über dem tabellierten F-Wert, dann wird die Nullhypothese (H_0 : „Es besteht kein linearer Zusammenhang, bzw. der Zusammenhang ist zufällig“) auf dem festgelegte Fehlerniveau ($\alpha = 0,05$) verworfen. Die Regressionsbeziehung kann in diesem Fall auch für die Grundgesamtheit als signifikant angesehen werden [Backhaus 2006].

Nach Nachweis der globalen Güte der Regressionsfunktion (mindestens ein Regressionskoeffizient ist signifikant verschieden von Null) wird anhand des t-Tests jeder einzelne Regressionskoeffizient geprüft. Die Nullhypothese (H_0 : „Regressionskoeffizient ist gleich Null“) wird auf dem festgelegten Fehlerniveau ($\alpha = 0,05$) verworfen, wenn der Absolutbetrag des von PASW statistics ausgegebenen empirischen t-Werts größer ist als der tabellierte t-Wert. Der Einfluss der entsprechenden unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable ist somit signifikant [Backhaus 2006].

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der enzymatischen Messung der L-Ascorbinsäuregehalte aller Kohlrabiprobe, gegliedert nach untersuchten Vorerntefaktoren (Einfluss von N- und S-Ernährung) und Nacherntefaktoren (Lagerzeit, Lagertemperatur, spezifische Oberfläche, Lageratmosphäre), dargestellt. Bei den untersuchten Nacherntefaktoren wird zusätzlich auf deren Einfluss auf Feuchtegehalt und Masse der gelagerten Proben eingegangen. Die Ergebnisse der Messung von L-Ascorbinsäuregehalt und Gesamtascorbinsäuregehalt gelagerter Kohlrabiprobe am Beispiel der Lagerung von Julienne und Raspeln bei 6 °C werden in Kapitel 4.4 erläutert.

4.1 Einfluss von N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi

In Versuchsreihe H wird der Einfluss von N- und S-Ernährung anhand neun verschiedener Düngevarianten mit jeweils unterschiedlichen N- und S-Gehalten (Tab. 4.1) auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiknollen untersucht.

Tab. 4.1: N- und S-Gehalt der untersuchten Düngevarianten.

Düngevariante	N [g/Gefäß]	S [g/Gefäß]
1	1	0
2	1	0,2
3	1	0,6
4	2	0
5	2	0,2
6	2	0,6
7	4	0
8	4	0,2
9	4	0,6

In Abb. 4.1 sind für jede Düngevariante jeweils der L-Ascorbinsäuregehalt pro 100 g Kohlrabi (c_{AA}) sowie die Masse der geernteten Kohlrabiknollen (m_{Knolle}) als Mittelwerte ($n = 6$) angegeben. Auf eine Angabe der Standardabweichungen wird bei den

Mittelwerten des L-Ascorbinsäuregehalts in dieser Grafik aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit verzichtet.

Je nach Düngevariante variiert die Masse der geernteten Kohlrabiknollen stark. Die geringste Masse weisen mit $113 (\pm 50)$ g die Kohlrabiknollen der Düngevariante 7 (4 g N/ 0 g S) auf, die höchste Masse mit $499 (\pm 299)$ g und $539 (\pm 106)$ g die Knollen der Düngevarianten 5 (2 g N/ 0,2 g S) und 6 (2 g N/ 0,6 g S). Bei den übrigen Düngevarianten liegt die Masse der Knollen bei $312 (\pm 94)$ g (siehe Tab. A-28, Anhang).

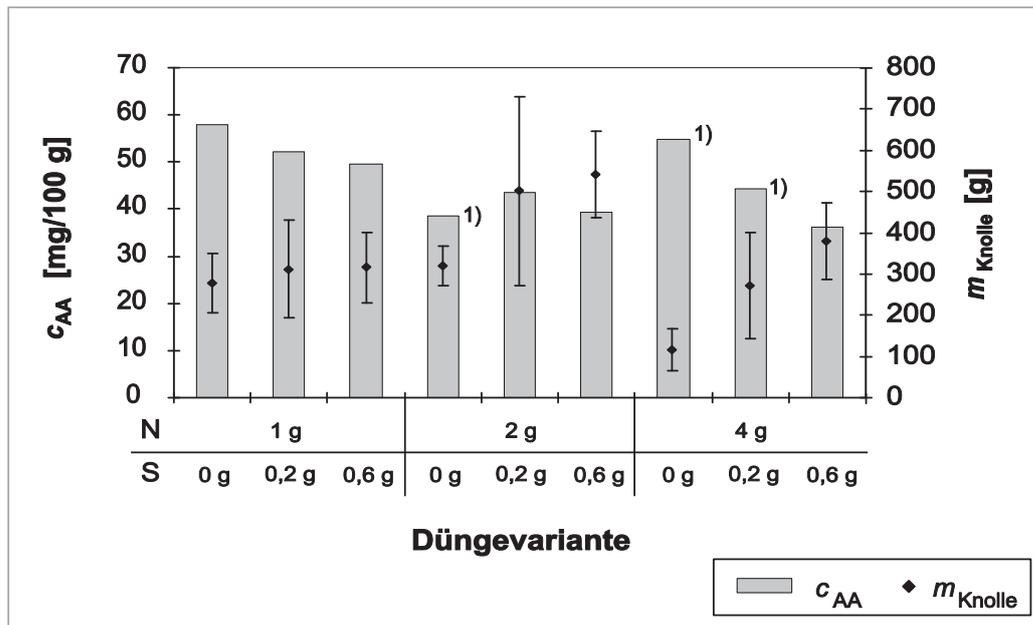


Abb. 4.1: Einfluss unterschiedlicher N- und S-Ernährung auf L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} und Masse m_{Knolle} der Kohlrabiknollen ($n = 6$). ¹⁾ $n = 5$

Die gemessenen L-Ascorbinsäuregehalte liegen zwischen $36,2 (\pm 3,1)$ mg/100 g bei Düngevariante 9 (4 g N/ 0,6 g S) und $58,0 (\pm 10,3)$ mg/100 g bei Düngevariante 1 (1 g N/ 0 g S). Die prozentuale Standardabweichung des mittleren L-Ascorbinsäuregehalts liegt bei allen Düngevarianten zwischen 8 % und 36 %. Eine Standardabweichung von $s > 20$ % weisen die Düngevarianten 2, 4 und 5 auf (siehe Tab. A-28, Anhang).

Werden die L-Ascorbinsäuregehalte in mg pro g Trockenmasse (TM) angegeben (Abb. 4.2), weist die Düngevariante 1 (1 g N/ 0 g S) mit $6,6 (\pm 0,8)$ mg/g ebenfalls den höchsten Gehalt auf, der niedrigste zeigt sich jedoch mit $4,4 (\pm 0,8)$ mg/g bei Düngevariante 6. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass im Vergleich zu Abb. 4.1 in diesem

Fall für die Düngevariante 6 nur fünf Kohlrabiknollen zur Auswertung herangezogen werden können, da für eine Knolle kein korrekter Wert der Trockenmasse vorliegt.

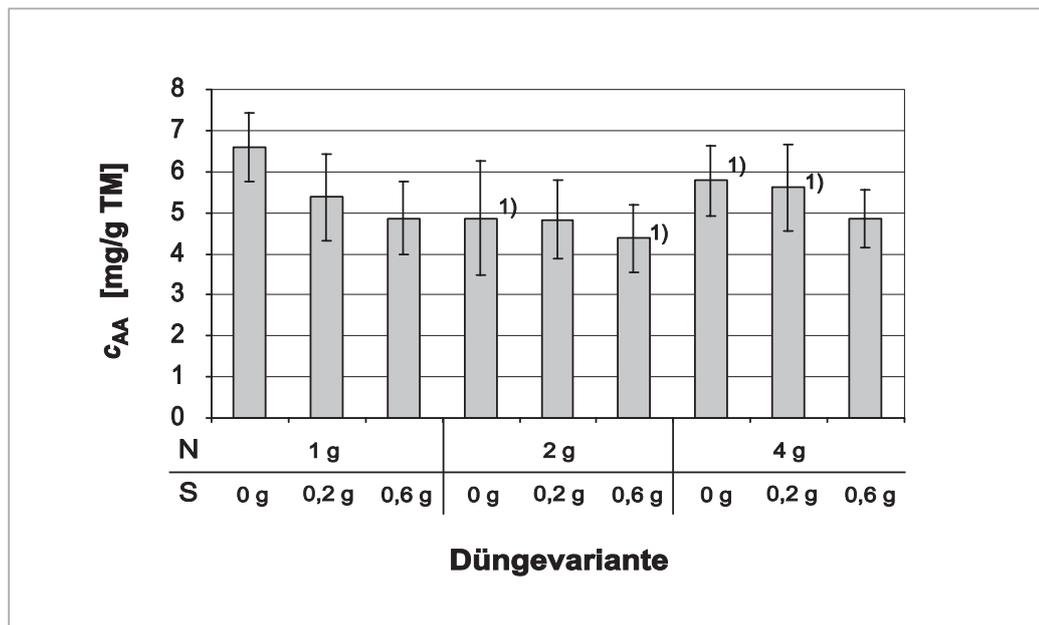


Abb. 4.2: Einfluss unterschiedlicher N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/g Trockenmasse ($n = 6$). ¹⁾ $n = 5$

Alle Stichproben mit Ausnahme der Düngevariante 8 sind laut KS-Test und Shapiro-Wilk-Test normalverteilt ($p > 0,05$). Bei Düngevariante 8 ist zumindest aufgrund des schwächeren KS-Tests Normalverteilung gegeben. Laut Levene-Test liegt zwischen allen Düngevarianten Varianzhomogenität vor ($p > 0,05$). Der F-Test zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten der einzelnen Düngevarianten an ($p < 0,05$). Ein signifikanter Unterschied liegt jedoch nur bei einem Vergleich der Düngevarianten 1 (1 g N/ 0 g S) und 6 (2 g N/ 0,6 g S) vor.

Aus Abb. 4.3 ist für jede Düngevariante der L-Ascorbinsäuregehalt in mg pro Knolle, errechnet anhand der L-Ascorbinsäuregehalte in mg pro g TM und der TM-Gehalte der jeweiligen Knollen, als Mittelwert ersichtlich. Die höchsten L-Ascorbinsäuregehalte weisen mit $200,0 (\pm 56,7)$ mg/Knolle und $205,3 (\pm 59,5)$ mg/Knolle die Düngevarianten 5 (2 g N/ 0,2 g S) und 6 (2 g N/ 0,6 g S) auf. Der niedrigste L-Ascorbinsäuregehalt wird mit $64,3 (\pm 32,6)$ mg/Knolle bei Düngevariante 7 (4 g N/ 0 g S) gemessen. Die prozentuale Standardabweichung liegt nur bei den Düngevarianten 1 bis 3 bei $s < 20 \%$ (siehe Tab. A-28, Anhang).

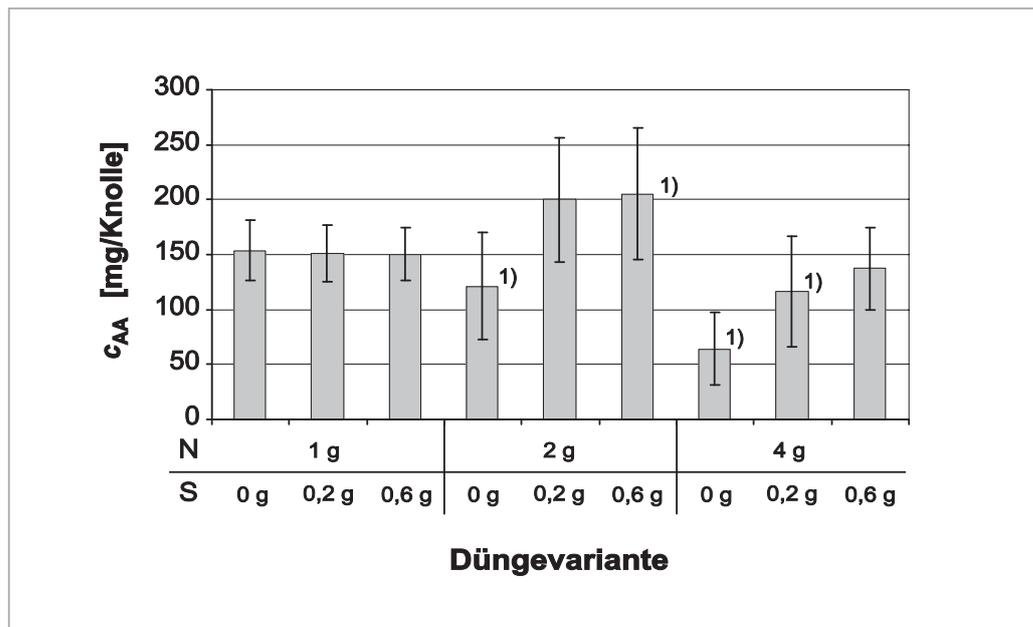


Abb. 4.3: Einfluss unterschiedlicher N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/Knolle, berechnet anhand der L-Ascorbinsäuregehalte in mg/g TM und der Trockenmassegehalte der jeweiligen Knollen ($n = 6$). ¹⁾ $n = 5$

Alle Stichproben sind laut KS-Test und Shapiro-Wilk-Test normalverteilt ($p > 0,05$) und es liegt laut Levene-Test zwischen allen Düngevarianten Varianzhomogenität vor ($p > 0,05$). Der F-Test zeigt höchst signifikante Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten der einzelnen Düngevarianten an ($p < 0,001$). So unterscheidet sich zum Beispiel der L-Ascorbinsäuregehalt bei der Düngevariante 7 signifikant von den Varianten 1 - 3, und höchst signifikant von den Varianten 5 und 6. Bei den Düngevarianten 1, 4 und 7 verringert sich der L-Ascorbinsäuregehalt pro Knolle mit ansteigendem N-Gehalt. Signifikant ist der Unterschied jedoch nur zwischen den Varianten 1 und 7 (1 g und 4 g N). Wird zusätzlich mit Schwefel gedüngt (0,2 g bzw. 0,6 g S), ist der L-Ascorbinsäuregehalt der Knollen jeweils bei den Düngevarianten mit 2 g N am höchsten. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant (siehe Tab. A-39, Anhang).

4.2 Einfluss der untersuchten Nacherntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiproben

In insgesamt sieben Versuchsreihen (A bis G) wird der Einfluss der Lagerfaktoren Lagerzeit, Lagertemperatur, spezifische Oberfläche und Lageratmosphäre auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiproben untersucht.

4.2.1 Lagerzeit

Bei offener Lagerung der Kohlrabiproben zeigt sich eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit zunehmender Lagerdauer bei den beiden Lagerformen Julienne und Raspel. Bei Lagerformen mit geringerer spezifischer Oberfläche (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) kann nahezu keine Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts im Verlauf von 6 Tagen Lagerung festgestellt werden. Eine Ausnahme bilden hier lediglich die Stäbchen bei 0,5 °C, bei denen eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts um ca. 12 % zu beobachten ist (Abb. 4.4).

Die Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts bei den Lagerformen Julienne und Raspel findet unabhängig von der Lagertemperatur vor allem innerhalb der ersten beiden Lagertage statt. Eine weitere Abnahme bis zum Lagertag 4 kann bei beiden Lagerformen nur bei einer Lagerung bei 12 °C beobachtet werden (Abb. 4.4). Abhängig von der Lagertemperatur nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt bei den Julienne innerhalb von 2 Tagen um 33 - 38 % ab, bei den Raspeln um 56 - 67 %.

Die L-Ascorbinsäuregehalte in Abb. 4.4 sind jeweils als Mittelwerte ($n = 6$) mit Standardabweichung angegeben. Bei einer Lagertemperatur von 12 °C kommt es bei den Lagerformen mit großer spezifischer Oberfläche häufig bereits am Tag 4, spätestens jedoch am Tag 6 zu Erscheinungen des Verderbs bei den gelagerten Proben. Bei diesen verdorbenen Proben ist keine Messung des L-Ascorbinsäuregehalts mehr möglich, da die Filtration der Probe kein klares Filtrat mehr liefert und somit die Extinktion von Probe und Probeleerwert bei $E > 1,000$ liegt. Bei dem Mittelwert des L-Ascorbinsäuregehalts der gelagerten Raspel am Tag 4 ist zudem zu beachten, dass hier die Konzentration der L-Ascorbinsäure im Probenansatz bei $c_{AA} < 0,02$ g/l liegt und nur bei einer der drei gemessenen Proben eine ausreichende Extinktionsdifferenz von $\Delta E \geq 0,100$ vorliegt.

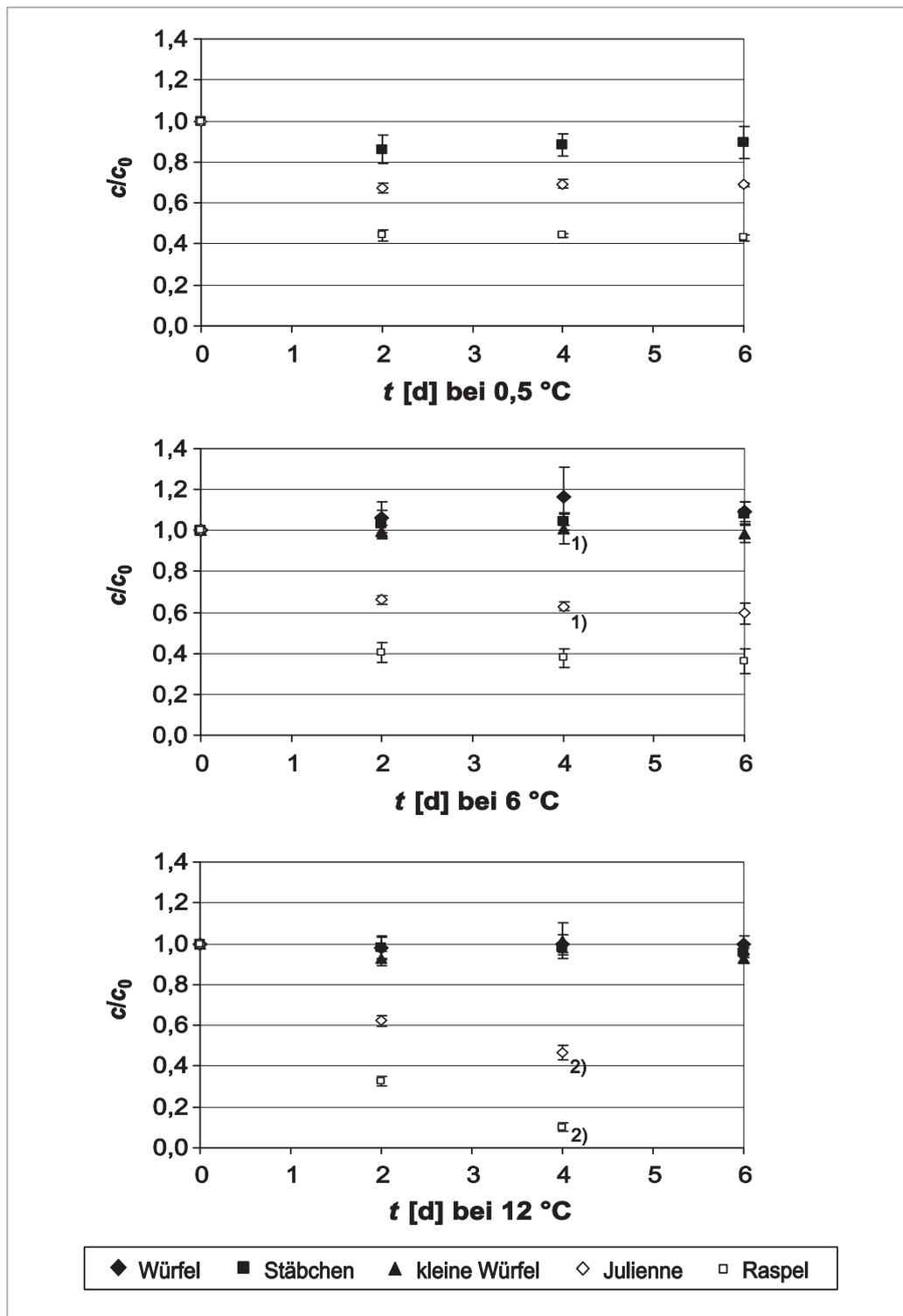


Abb. 4.4: Relative Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 von Kohlrabi-proben unterschiedlicher spezifischer Oberfläche im Verlauf von 6 Tagen Lagerung bei 0,5 °C, 6 °C und 12 °C ($n = 6$). ¹⁾ $n = 5$; ²⁾ $n = 3$.

In den Versuchsreihen A und G wird zusätzlich zu den Messungen an Lagertag 2, 4 und 6 auch der L-Ascorbinsäuregehalt am Tag 1 bestimmt. Hier zeigt sich, dass die Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts bei den Lagerformen Julienne und Raspel

bereits im Verlauf des ersten Lagertags erfolgt und sich der L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der weiteren Lagertage nahezu nicht mehr verändert (Abb. 4.5).

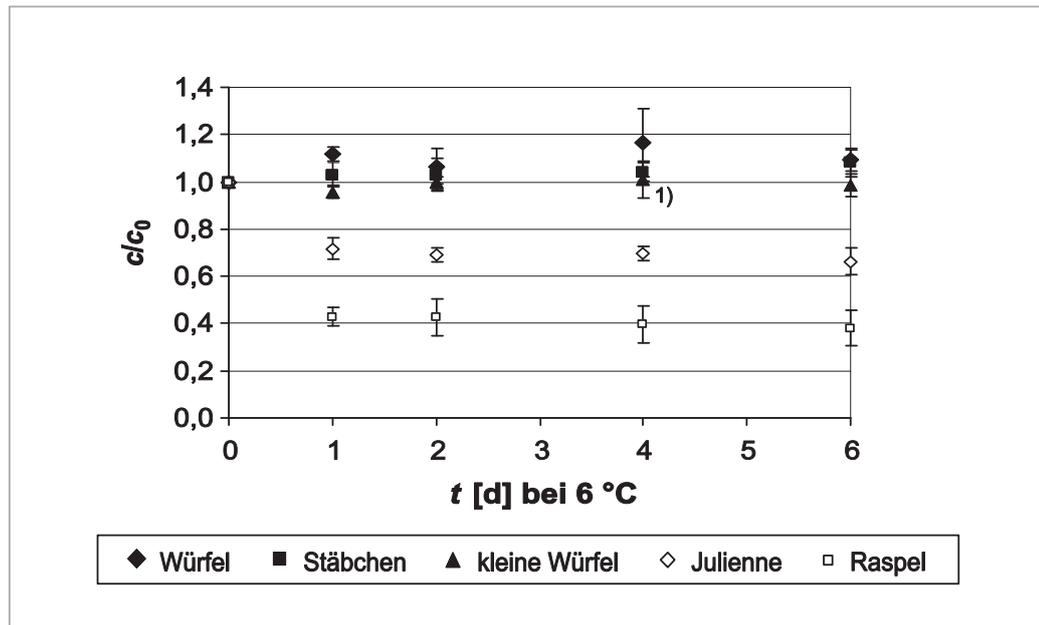


Abb. 4.5: Relative Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 von Kohlrabi-proben unterschiedlicher spezifischer Oberfläche im Verlauf von 6 Tagen Lagerung bei 6 °C ($n = 6$). ¹⁾ $n = 5$.

4.2.2 Lagertemperatur

In den durchgeführten Versuchsreihen wird der Einfluss der Lagertemperatur (T) auf den L-Ascorbinsäuregehalt von offen gelagerten Kohlrabi-proben anhand von drei verschiedenen Lagertemperaturen (0,5 °C, 6 °C, 12 °C) untersucht. Tabelle 4.2 fasst die tatsächlich gemessenen Lagertemperaturen für die untersuchten Lagerformen (Stäbchen, Julienne, Raspel) zusammen.

Tab. 4.2: Zieltemperatur und tatsächlich gemessene Lagertemperatur der eingelagerten Stäbchen, Julienne und Raspel.

	Lagertemperatur T [°C]					
	Stäbchen		Julienne / Raspel		alle Lagerformen	
	\bar{x} ($\pm s$)	n	\bar{x} ($\pm s$)	n	\bar{x} ($\pm s$)	n
0,5 °C	0,4 ($\pm 0,3$)	12	0,7 ($\pm 0,1$)	12	0,5 ($\pm 0,2$)	24
6 °C	6,2 ($\pm 0,4$)	11	5,1 ($\pm 0,3$)	12	5,6 ($\pm 0,7$)	23
12 °C	12,3 ($\pm 0,5$)	11	11,9 ($\pm 1,1$)	12	12,1 ($\pm 0,8$)	23

Der L-Ascorbinsäuregehalt offen gelagerter Proben zeigt am Tag 2 eine leichte Abnahme mit steigender Lagertemperatur sowohl bei den gelagerten Julienne ($a = 1,50 \text{ m}^2/\text{kg}$) als auch bei den Raspeln ($a = 3,17 \text{ m}^2/\text{kg}$). Bei der Lagerform Stäbchen nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt mit steigender Lagertemperatur bis zur Temperatur 6 °C zunächst zu, anschließend wieder leicht ab (Abb. 4.6).

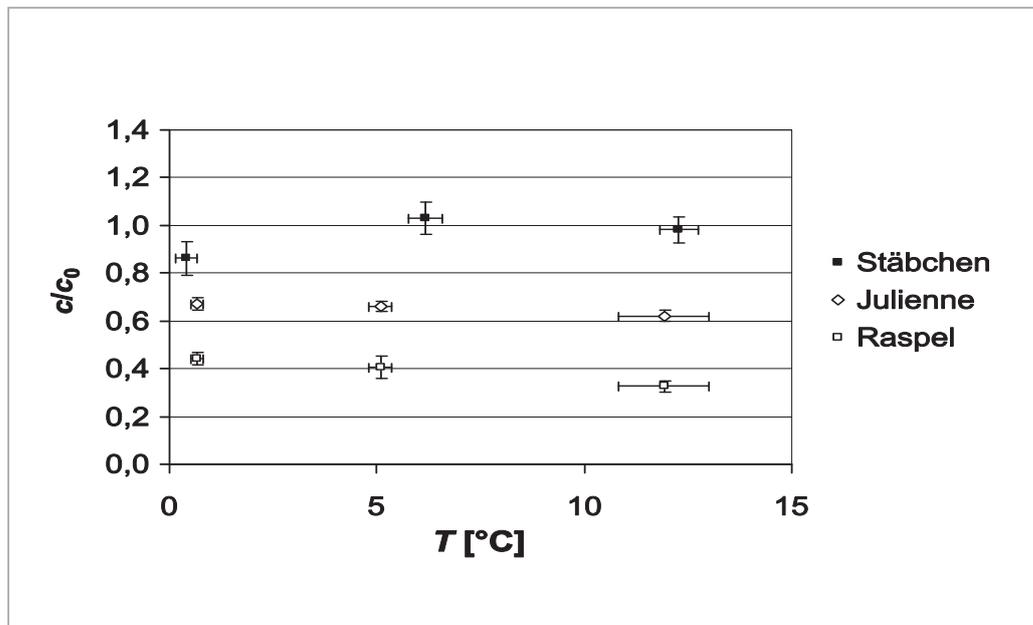


Abb. 4.6: Einfluss der Lagertemperatur T auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 von Kohlrabi unterschiedlicher spezifischer Oberfläche nach 2 Tagen Lagerung ($n = 6$).

Alle Stichproben sind laut KS-Test und Shapiro-Wilk-Test normalverteilt ($p > 0,05$) und für jede der drei Lagerformen liegt zwischen den Stichproben gleicher Lagertemperatur laut Levene-Test Varianzhomogenität vor ($p > 0,05$). Der F-Test zeigt bei allen drei Lagerformen hoch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten der einzelnen Lagertemperaturen an ($p < 0,01$). Ein signifikanter bzw. hoch signifikanter Unterschied der L-Ascorbinsäurekonzentrationen liegt bei den Lagerformen Julienne und Raspel jedoch nur bei einem Vergleich der Lagertemperaturen 6 °C und 12 °C vor (Raspel: $p < 0,01$; Julienne: $p < 0,05$), bei den gelagerten Stäbchen ist der Unterschied in der L-Ascorbinsäurekonzentration der Proben zwischen diesen beiden Lagertemperaturen nicht signifikant (Tab. 4.3).

Tab. 4.3: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der Lagertemperatur auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe unterschiedlicher spezifischer Oberfläche. Als abhängige Variable wird der relative L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der Proben am Lagertag 2 gewählt.

Lagerform	T [°C]		AA (c/c_0) Mittelwerts-Unterschied zwischen den Lager- temperaturen (I) und (J)	Standard- fehler	Tukey HSD
	(I)	(J)			
Stäbchen	0,4	6,2	-0,12 ¹⁾	0,04	**
		12,3	-0,12 ¹⁾	0,04	*
	6,2	12,3	0,05	0,04	n. s.
Julienne	0,7	5,1	0,01	0,01	n. s.
		11,9	0,05 ¹⁾	0,01	**
	5,1	11,9	0,04 ¹⁾	0,01	*
Raspel	0,7	5,1	0,04	0,02	n. s.
		11,9	0,12 ¹⁾	0,02	***
	5,1	11,9	0,08 ¹⁾	0,02	**

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha = 0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; n. s. = nicht signifikant

4.2.3 Spezifische Oberfläche

In den durchgeführten Versuchsreihen wird der Einfluss der spezifischen Oberfläche (a) auf den L-Ascorbinsäuregehalt offen gelagerter Kohlrabiprobe anhand von fünf verschiedenen Lagerformen (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel, Julienne, Raspel) untersucht. Tabelle 4.4 fasst die ermittelten spezifischen Oberflächen der Lagerformen zusammen. In die Berechnung der spezifischen Oberfläche gehen nur Stichproben aus Versuchswochen ein, deren Ergebnisse auch zur Ermittlung der Parameter L-Ascorbinsäuregehalt, Masse und Feuchte herangezogen werden. Beginnend bei den Würfeln, der Lagerform mit der geringsten spezifischen Oberfläche, bis hin zu den Raspeln vergrößert sich die spezifische Oberfläche der gelagerten Kohlrabiprobe um mehr als das 22-fache.

Tab. 4.4: Anhand von Stichproben ermittelte spezifische Oberfläche a der untersuchten Lagerformen.

	Spezifische Oberfläche a [m^2/kg]							
	0,5 °C		6 °C		12 °C		alle Temperaturen	
	\bar{x} ($\pm s$)	n	\bar{x} ($\pm s$)	n	\bar{x} ($\pm s$)	n	\bar{x} ($\pm s$)	n
Würfel	/	/	0,14 ($\pm 0,01$)	5	0,14 ($\pm 0,00$)	5	0,14 ($\pm 0,01$)	10
Stäbchen	0,39 ($\pm 0,01$)	5	0,37 ($\pm 0,03$)	5	0,40 ($\pm 0,02$)	5	0,38 ($\pm 0,02$)	15
Kleine Würfel	/	/	0,58 ($\pm 0,01$)	5	0,56 ($\pm 0,04$)	5	0,57 ($\pm 0,03$)	10
Julienne	1,54 ($\pm 0,13$)	10	1,50 ($\pm 0,13$)	10	1,47 ($\pm 0,14$)	20	1,50 ($\pm 0,13$)	40
Raspel	3,58 ($\pm 0,60$)	10	3,33 ($\pm 0,58$)	10	2,89 ($\pm 0,59$)	20	3,17 ($\pm 0,65$)	40

Der L-Ascorbinsäuregehalt der offen gelagerten Proben am Tag 2 zeigt bei allen drei untersuchten Lagertemperaturen eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit steigender spezifischer Oberfläche der Kohlrabiprobe (Abb. 4.7). Bei einer spezifischen Oberfläche von $a \leq 0,57 (\pm 0,03) \text{ m}^2/\text{kg}$ (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) bleibt der L-Ascorbinsäuregehalt unabhängig von der Lagertemperatur zu $98 (\pm 8) \%$ erhalten. Bei einer spezifischen Oberfläche von $a = 1,50 (\pm 0,13) \text{ m}^2/\text{kg}$ (Julienne) sind am Lagertag 2 noch $65 (\pm 3) \%$ des L-Ascorbinsäuregehalts der Frischware in den Proben enthalten, bei einer spezifischen Oberfläche von $a = 3,17 (\pm 0,65) \text{ m}^2/\text{kg}$ (Raspel) noch $39 (\pm 6) \%$ (siehe Tab. A-33, Anhang).

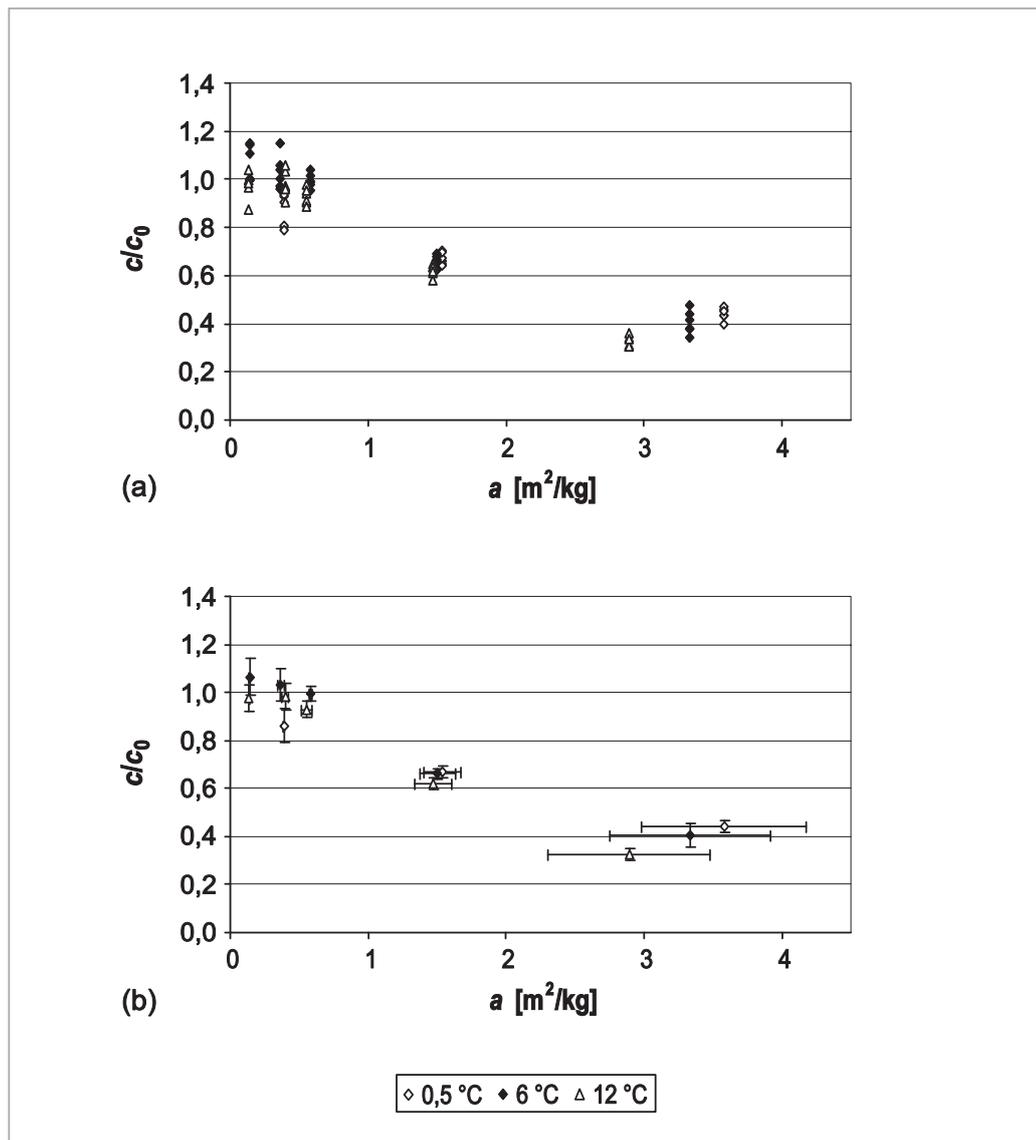


Abb. 4.7: Einfluss der spezifischen Oberfläche a auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabiprobe am Tag 2 (a) als Einzelwerte und (b) als Mittelwerte und Standardabweichung ($n = 6$).

Alle Stichproben mit Ausnahme der bei 6 °C gelagerten Würfel ($a = 0,14$ m²/kg) sind laut KS-Test und Shapiro-Wilk-Test normalverteilt ($p > 0,05$). Für die weitere statistische Auswertung wird der Einfluss der spezifischen Oberfläche auf den L-Ascorbinsäuregehalt getrennt nach Lagertemperaturen untersucht.

Lagerung bei 0,5 °C

Homogenität der Varianzen ist laut Levene-Test nicht gegeben ($p \leq 0,05$). Auch bei Verwendung des Cochran-Tests wird die Nullhypothese auf einem Fehlerniveau von $\alpha = 0,05$ verworfen. Sowohl der Welch-, als auch der Brown-Forsythe-Test auf Mittelwerts-Unterschiede ergeben jedoch einen höchst signifikanten Unterschied zwischen den Gruppenmittelwerten der untersuchten spezifischen Oberflächen ($p < 0,001$). Laut Games-Howell Test sind die Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten der Lagerformen Stäbchen und Raspel sowie Julienne und Raspel höchst signifikant, zwischen den Lagerformen Stäbchen und Julienne hoch signifikant (Tab. 4.5).

Tab. 4.5: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 0,5 °C. Als abhängige Variable wird der relative L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der Proben am Lagertag 2 gewählt.

T [°C]	a [m ² /kg]		AA (c/c_0) Mittelwerts-Unterschied zwischen den spez. Oberflächen (I) und (J)	Standard- fehler	Games- Howell
	(I)	(J)			
0,5	0,39	1,54	0,19 ¹⁾	0,03	**
		3,58	0,42 ¹⁾	0,03	***
	1,54	3,58	0,23 ¹⁾	0,01	***

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha = 0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; n. s. = nicht signifikant

Lagerung bei 6 °C

Da die Stichprobe der untersuchten Würfel nicht normalverteilt ist, wird diese Lagerform in der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt. Homogenität der Varianzen wird für die übrigen Stichproben laut Levene-Test angenommen ($p > 0,05$), der Cochran-Test liefert auf dem Fehlerniveau $\alpha = 0,05$ das gleiche Ergebnis. Der F-Test zeigt höchst signifikante Unterschiede der Gruppenmittelwerte an ($p < 0,001$). Laut Tukey Test sind die Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten der Lagerformen Stäbchen und kleine Würfel nicht signifikant. Die Gruppenmittelwerte aller übrigen Lagerformen unterscheiden sich höchst signifikant, sowohl von den Lagerformen Stäbchen und kleine Würfel als auch untereinander (Tab. 4.6).

Tab. 4.6: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 6 °C. Als abhängige Variable wird der relative L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der Proben am Lagertag 2 gewählt.

T [°C]	a [m ² /kg]		AA (c/c_0) Mittelwerts-Unterschied zwischen den spez. Oberflächen (I) und (J)	Standard- fehler	Tukey HSD
	(I)	(J)			
6	0,37	0,58	0,04	0,03	n. s.
		1,50	0,37 ¹⁾	0,03	***
		3,33	0,62 ¹⁾	0,03	***
	0,58	1,50	0,33 ¹⁾	0,03	***
		3,33	0,59 ¹⁾	0,03	***
		1,50	3,33	0,26 ¹⁾	0,03

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha = 0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; n. s. = nicht signifikant

Lagerung bei 12 °C

Homogenität der Varianzen wird für alle Stichproben laut Levene-Test angenommen ($p > 0,05$), der Cochran-Test kommt auf einem Fehlerniveau von $\alpha = 0,05$ zum gleichen Ergebnis. Der F-Test zeigt höchst signifikante Unterschiede der Gruppenmittelwerte an ($p < 0,001$). Laut Tukey Test sind die Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten der Lagerformen mit einer spezifischen Oberfläche von $a \leq 0,56 (\pm 0,04)$ m²/kg (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) nicht signifikant. Die Unterschiede der Gruppenmittelwerte aller übrigen Lagerformen sind höchst signifikant, sowohl im Vergleich zu den Lagerformen mit geringer spezifischer Oberfläche als auch untereinander (Tab. 4.7).

Tab. 4.7: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 12 °C. Als abhängige Variable wird der relative L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der Proben am Lagertag 2 gewählt.

T [°C]	a [m ² /kg]		AA (c/c_0) Mittelwerts-Unterschied zwischen den spez. Oberflächen (I) und (J)	Standard- fehler	Tukey HSD	
	(I)	(J)				
12	0,14	0,40	-0,01	0,02	n. s.	
		0,56	0,05	0,02	n. s.	
		1,47	0,36 ¹⁾	0,02	***	
		2,89	0,65 ¹⁾	0,02	***	
	0,40	0,56	0,05	0,02	n. s.	
		1,47	0,36 ¹⁾	0,02	***	
		2,89	0,66 ¹⁾	0,02	***	
		0,56	1,47	0,31 ¹⁾	0,02	***
	0,56	2,89	0,60 ¹⁾	0,02	***	
		1,47	2,89	0,30 ¹⁾	0,02	***
		2,89	0,30 ¹⁾	0,02	***	
		1,47	2,89	0,30 ¹⁾	0,02	***

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha = 0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; n. s. = nicht signifikant

Werden alle gemessenen L-Ascorbinsäuregehalte ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagertemperaturen gemeinsam gegen die spezifische Oberfläche der Proben aufgetragen, zeigt sich ebenfalls eine Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts mit steigender spezifischer Oberfläche (Abb. 4.8).

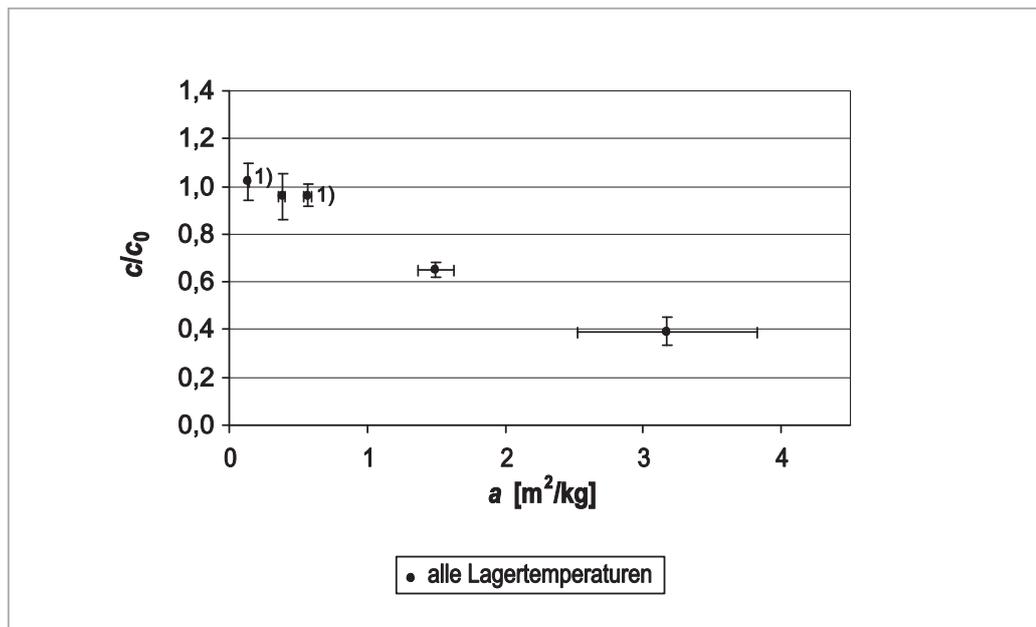


Abb. 4.8: Einfluss der spezifischen Oberfläche a auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabi-*proben* am Tag 2, ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Lagertemperaturen ($n = 18$). ¹⁾ $n = 12$

Alle Stichproben mit Ausnahme der Würfel ($a = 0,14 \text{ m}^2/\text{kg}$) sind laut KS-Test und Shapiro-Wilk-Test normalverteilt ($p > 0,05$), bei den Würfeln liegt Normalverteilung nur laut Shapiro-Wilk-Test vor. Homogenität der Varianzen ist laut Levene-Test nicht gegeben ($p \leq 0,05$). Sowohl der Welch-, als auch der Brown-Forsythe-Test auf Mittelwerts-Unterschiede ergeben jedoch einen höchst signifikanten Unterschied zwischen den Gruppenmittelwerten der untersuchten spezifischen Oberflächen ($p < 0,001$). Laut Games-Howell-Test sind die Unterschiede zwischen den Gruppenmittelwerten der Lagerformen mit einer spezifischen Oberfläche von $a \leq 0,56 (\pm 0,04) \text{ m}^2/\text{kg}$ (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) nicht signifikant. Die Unterschiede der Gruppenmittelwerte der übrigen Lagerformen (Julienne und Raspel) sind höchst signifikant, sowohl im Vergleich zu den Lagerformen mit geringer spezifischer Oberfläche als auch untereinander (siehe Tab. A-40, Anhang).

4.2.4 Lageratmosphäre

In den Versuchsreihen D und F wird der Einfluss der Lageratmosphäre auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi proben bei einer Lagertemperatur von 12 °C untersucht.

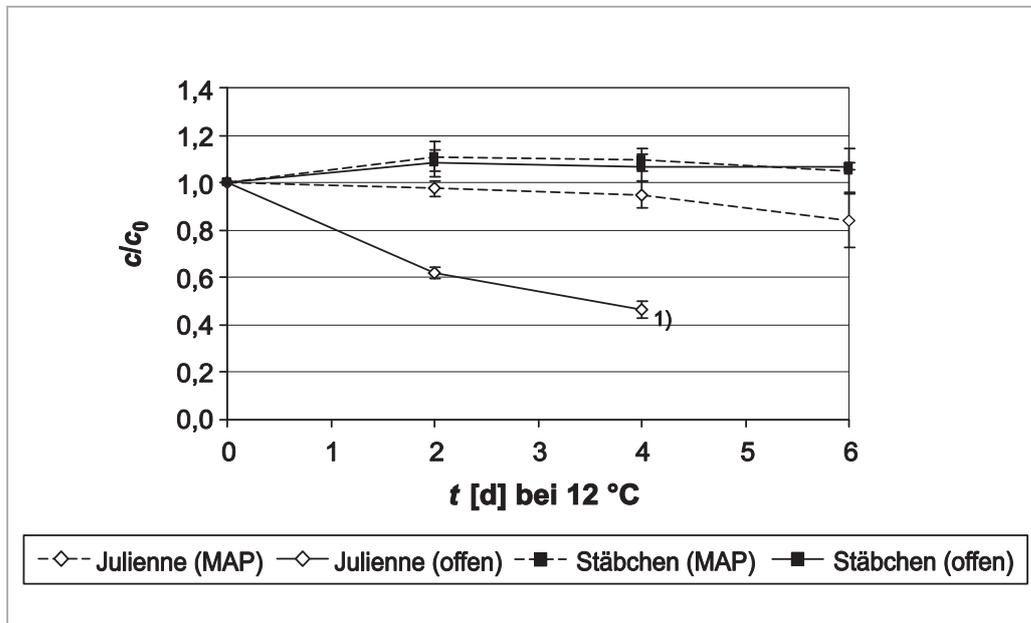


Abb. 4.9: Einfluss der Verpackung unter modifizierter Atmosphäre (MAP) auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 von Kohlrabi im Vergleich zur offenen Lagerung ($n = 6$). ¹⁾ $n = 3$

Bei der Lagerform Stäbchen bleibt der L-Ascorbinsäuregehalt der Proben unabhängig von der Lageratmosphäre im Verlauf von 6 Tagen Lagerung nahezu zu 100 % erhalten. Wird die Lagerform Julienne verwendet, nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt der offen gelagerten Proben bis zum Tag 2 um 38 %, bis zum Tag 4 um 54 % ab. Die Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts der unter MAP gelagerten Proben liegt zwischen 3 % bis zum Tag 2 und 16 % bis zum Tag 6 (Abb. 4.9).

4.3 Einfluss von Lagerfaktoren auf Feuchtegehalt und Masse der Kohlrabiprüfproben

In den Versuchsreihen A bis F werden neben der enzymatischen Bestimmung des L-Ascorbinsäuregehalts bei allen gelagerten Kohlrabiprüfproben thermogravimetrisch der Feuchtegehalt der Proben und zusätzlich die Masse der gelagerten Proben ermittelt. Die ermittelten Werte der relativen Feuchtegehalte (M/M_0) und der relativen Masse (m/m_0) der Proben sind in den Abb. 4.10 bis 4.12 dargestellt. Jeweils zwei Messwerte werden pro Lagertemperatur, Lagerform und Lagertag ermittelt.

Ausnahmen bezüglich des Feuchtegehalts bilden die Lagerformen Julienne und Raspel bei einer Lagertemperatur von 12 °C (Abb. 4.12) und die kleinen Würfel bei einer Lagertemperatur von 6 °C (Abb. 4.11). Aufgrund des bei hoher Lagertemperatur und großer spezifischer Oberfläche der Proben stark voranschreitenden Verderbs (siehe Kapitel 4.2.1) wird bei den Raspeln am Lagertag 6 bei keiner der gelagerten Proben der Feuchtegehalt bestimmt, bei den Julienne nur bei einer Probe. Bei der Lagerform Raspel steht zudem am Lagertag 2 nur ein Messwert zur Verfügung, da bei der zweiten Probe das Mischen des Probematerials vor Entnahme der erforderlichen Probemenge versäumt und dieser Messwert somit ausgeschlossen wird. Bei der Lagerform kleine Würfel steht aufgrund von technischen Schwierigkeiten mit dem Feuchtemessgerät am Lagertag 4 nur ein Messwert zur Verfügung.

4.3.1 Lagerzeit, Lagertemperatur und spezifische Oberfläche

Im Verlauf von 6 Tagen Lagerung kann unabhängig von Lagerform und Lagertemperatur bei offener Lagerung kein Feuchteverlust der Proben beobachtet werden, der Feuchtegehalt bleibt über die gesamte Lagerdauer bei nahezu 100 % (Abb. 4.10 a, 4.11 a, 4.12 a).

Die Masse der Proben nimmt mit zunehmender Lagerdauer und Lagertemperatur ab. Der Masseverlust bis zum Lagertag 6 liegt zwischen 4 % bei einer Lagertemperatur von 0,5 °C (Abb. 4.10 b) und 15 % bei einer Lagertemperatur von 12 °C (Abb. 4.12 b).

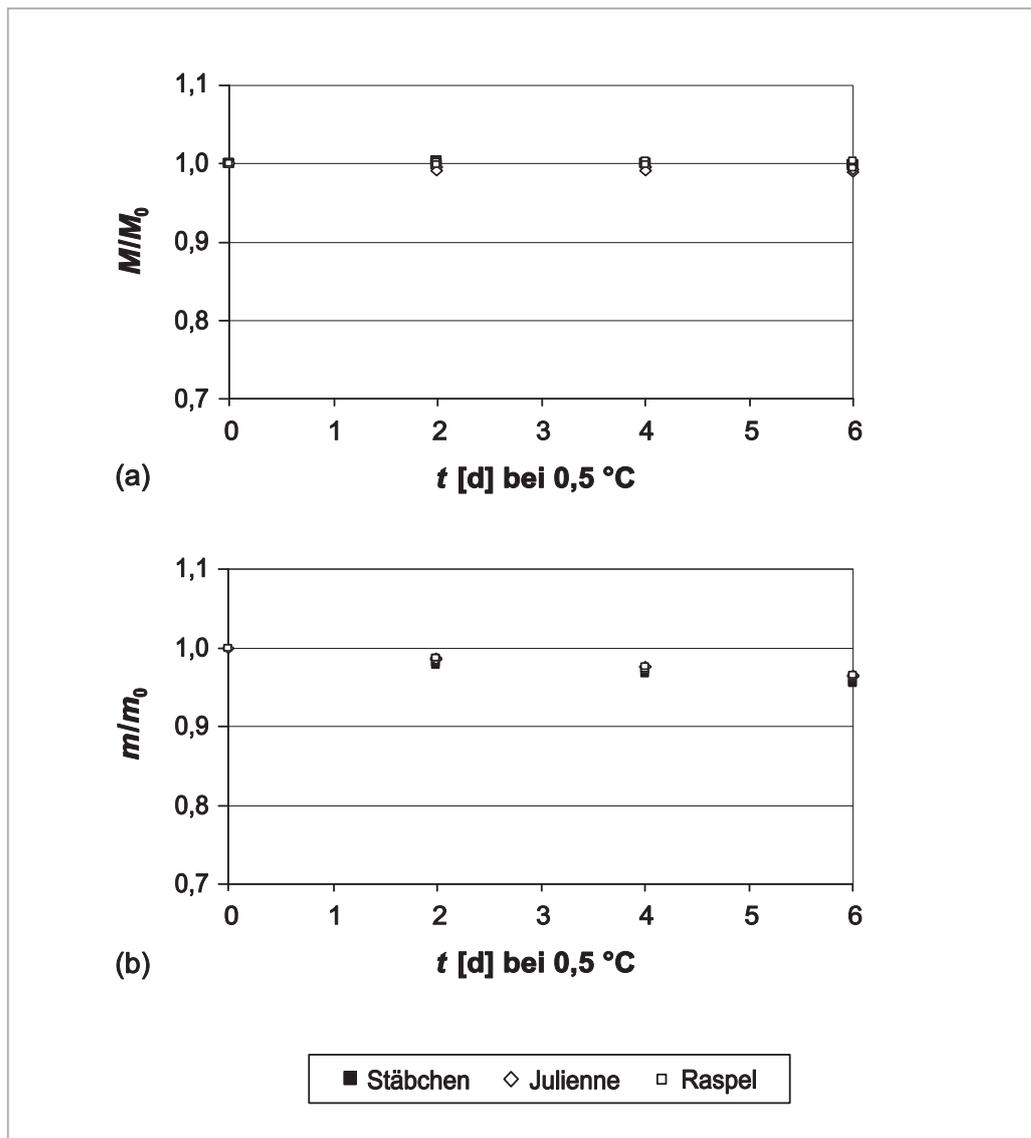


Abb. 4.10: Einfluss unterschiedlicher Lagerformen auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert bei $0,5\text{ °C}$.

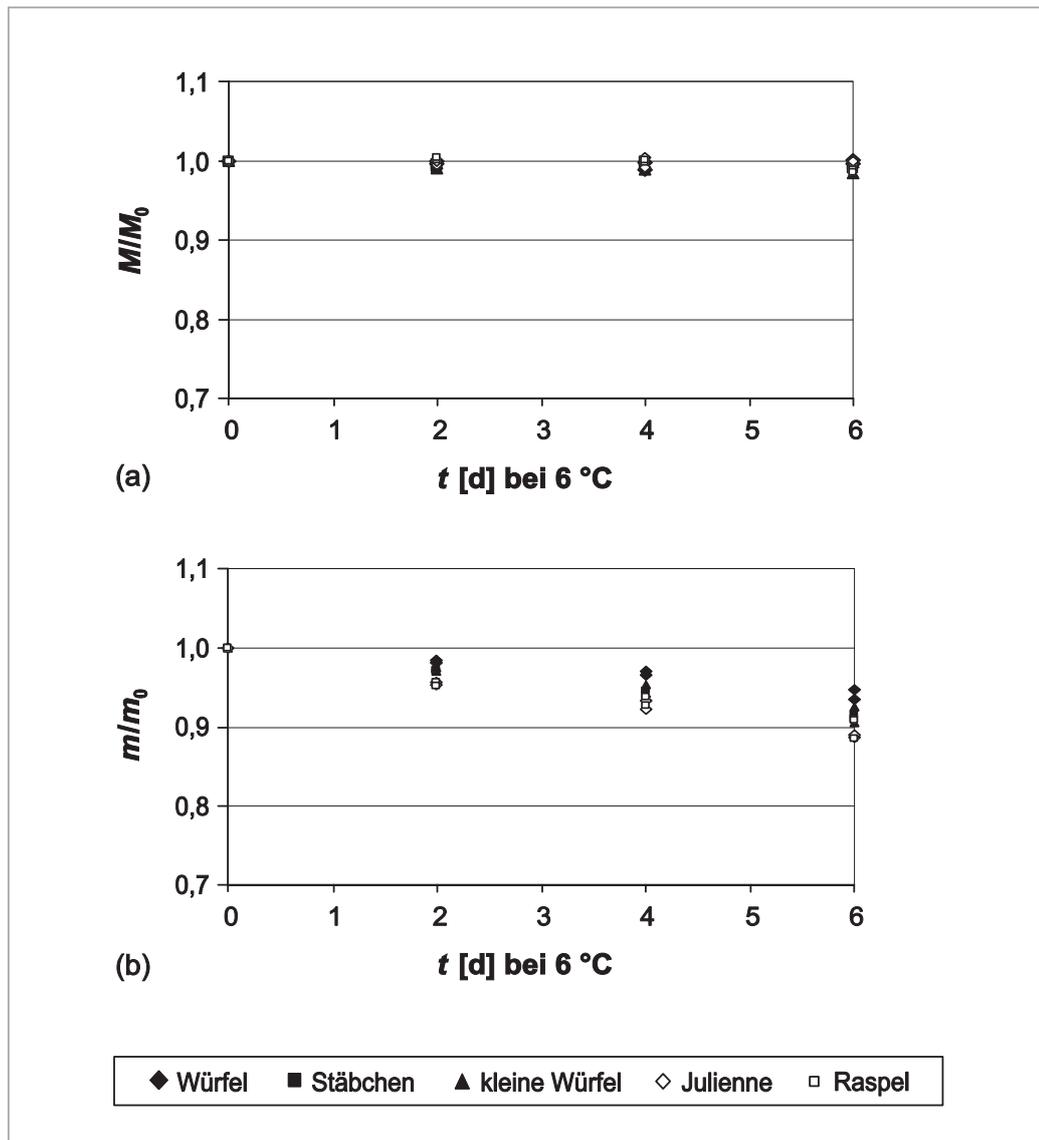


Abb. 4.11: Einfluss unterschiedlicher Lagerformen auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert bei 6 °C.

Der Masseverlust im Verlauf der Lagerung ist am stärksten ausgeprägt bei den Lagerformen mit der größten spezifischen Oberfläche (Julienne und Raspel). Bei einer spezifischen Oberfläche von $a \geq 1,47 (\pm 0,14) \text{ m}^2/\text{kg}$ beträgt der Masseverlust bei einer Lagertemperatur von $12 \text{ }^\circ\text{C}$ im Verlauf von 6 Tagen Lagerung 33 % (Abb. 4.12 b).

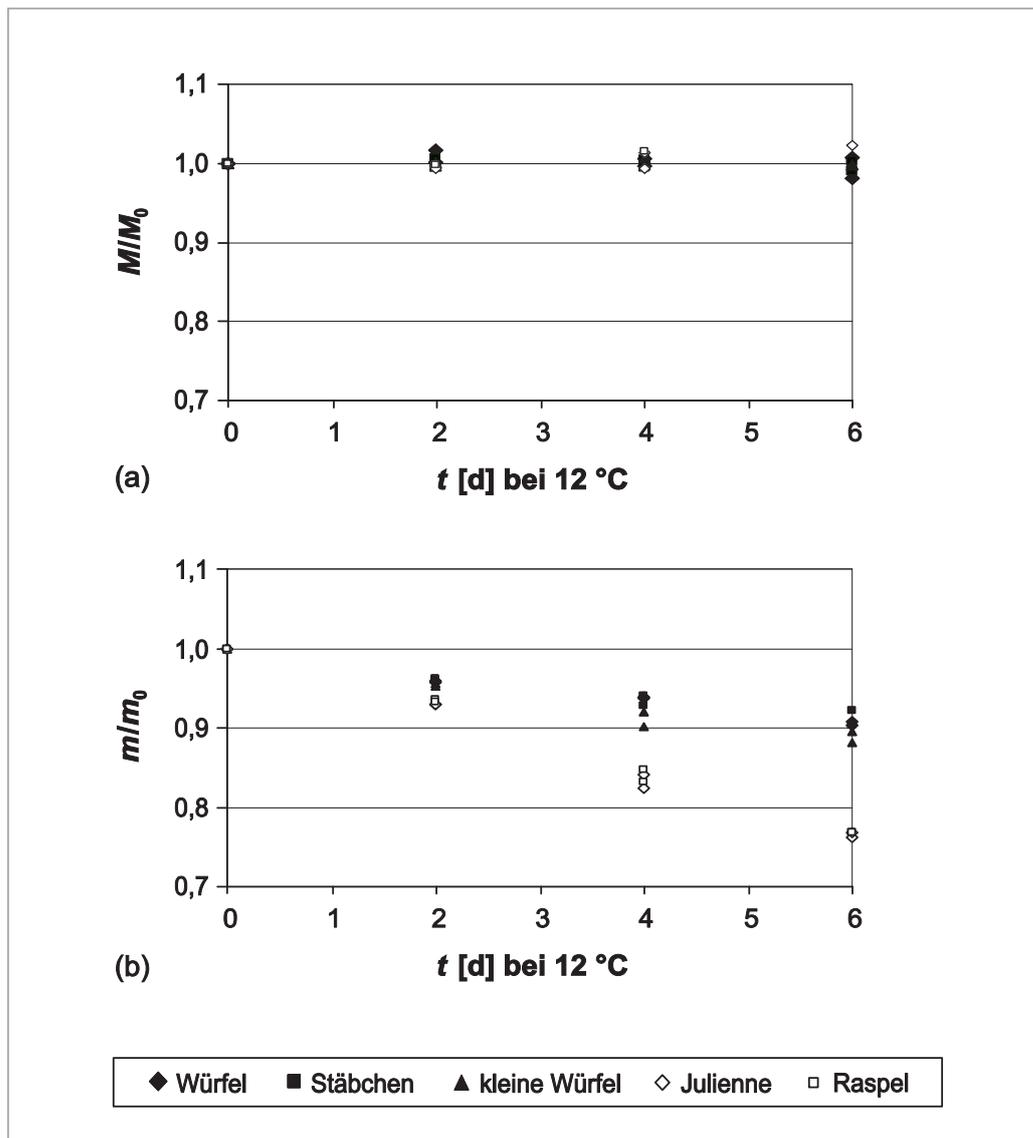


Abb. 4.12: Einfluss unterschiedlicher Lagerformen auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert bei $12 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.3.2 Lageratmosphäre

Werden Kohlrabiproben in Form von Stäbchen unterschiedlich verpackt (offen, Frischhaltebeutel, MAP) bei 12 °C gelagert, bleibt die Masse der verpackten Proben (Frischhaltebeutel und MAP) über die gesamte Lagerdauer zu 100 % erhalten, die Masse der offen gelagerten Proben nimmt mit zunehmender Lagerdauer ab bis auf 85 % (Abb. 4.13 b).

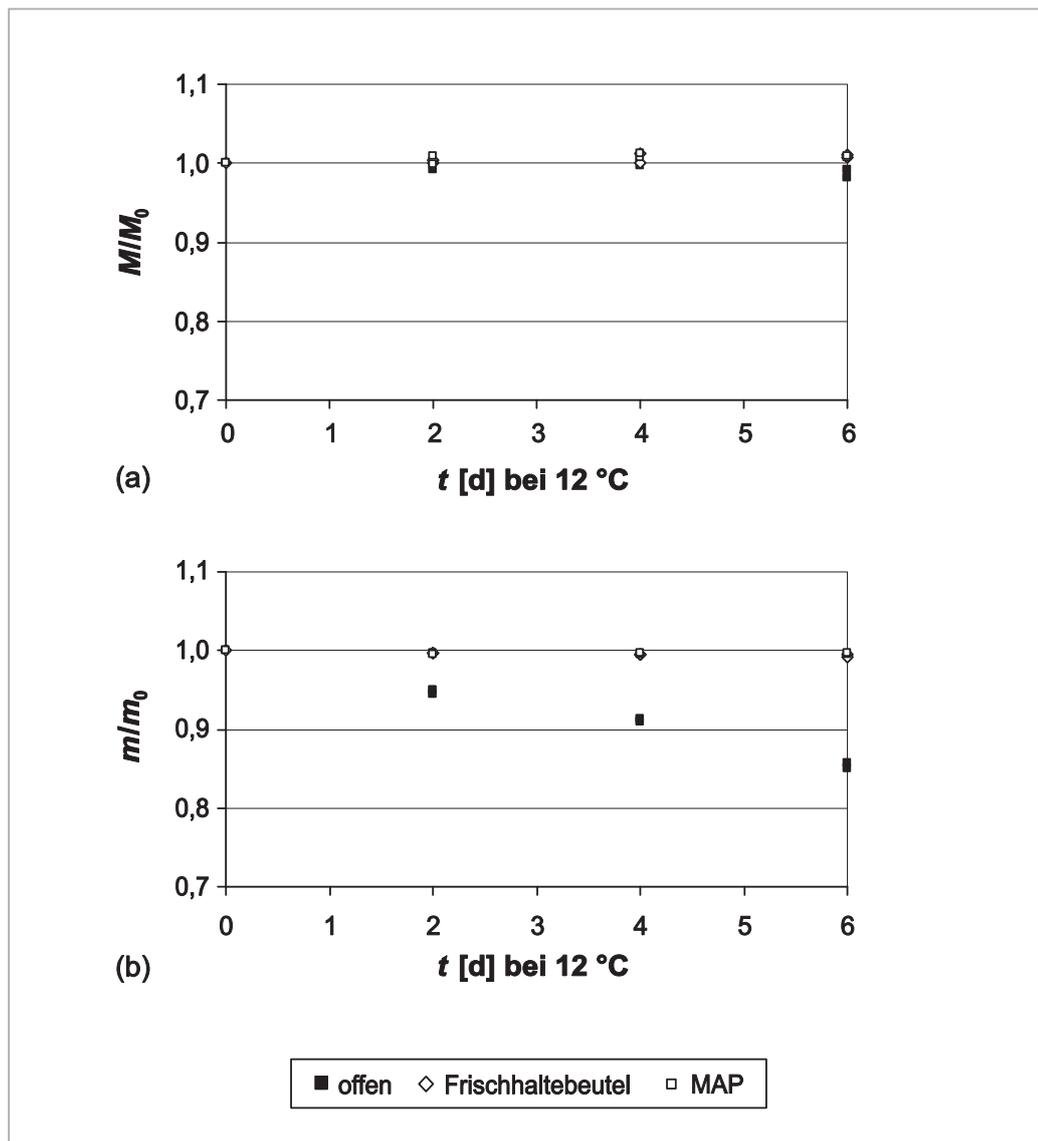


Abb. 4.13: Einfluss unterschiedlicher Verpackungsarten auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert als Stäbchen bei 12 °C.

Wird eine Lagerform mit größerer spezifischer Oberfläche, in diesem Fall die Lagerform Julienne, gewählt, bleibt bei unterschiedlich verpackten Proben (offen

und MAP) bei einer Lagerung bei 12 °C die Masse der verpackten Proben ebenfalls über die gesamte Lagerdauer zu 100 % erhalten, die Masse der offen gelagerten Proben nimmt mit zunehmender Lagerdauer ab bis auf 77 % der Ausgangsmasse (Abb. 4.14 b).

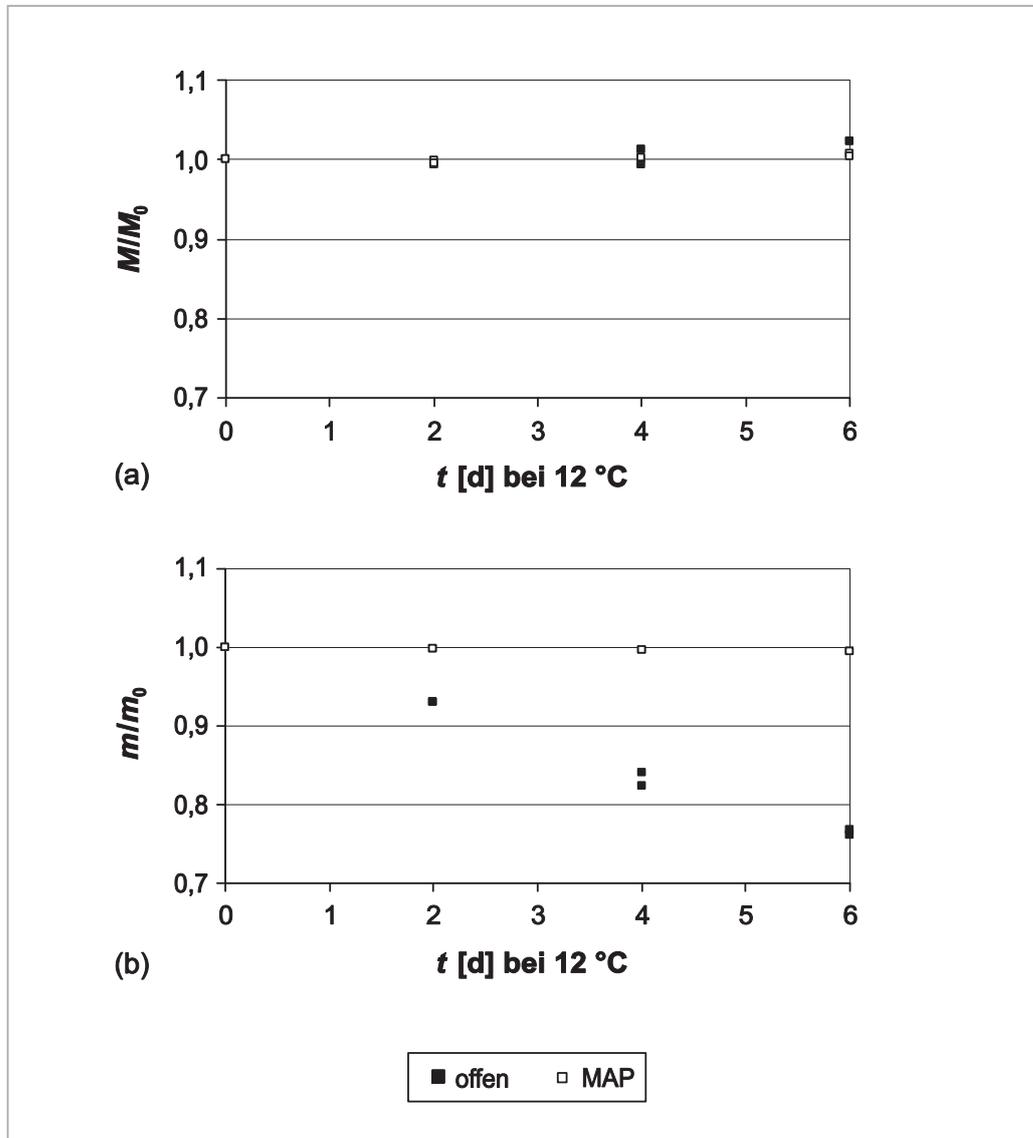


Abb. 4.14: Einfluss unterschiedlicher Verpackungsarten auf den (a) relativen Feuchtegehalt M/M_0 und (b) relativen Massegehalt m/m_0 von Kohlrabi gelagert als Julienne bei 12 °C.

4.4 L-Ascorbinsäure- und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalte von Kohlrabi im Verlauf der Lagerung

In Versuchsreihe G wird bei den Lagerformen Julienne und Raspel zusätzlich zum L-Ascorbinsäuregehalt der Proben im Verlauf der Lagerung bei 6 °C auch der Gesamtascorbinsäuregehalt ermittelt.

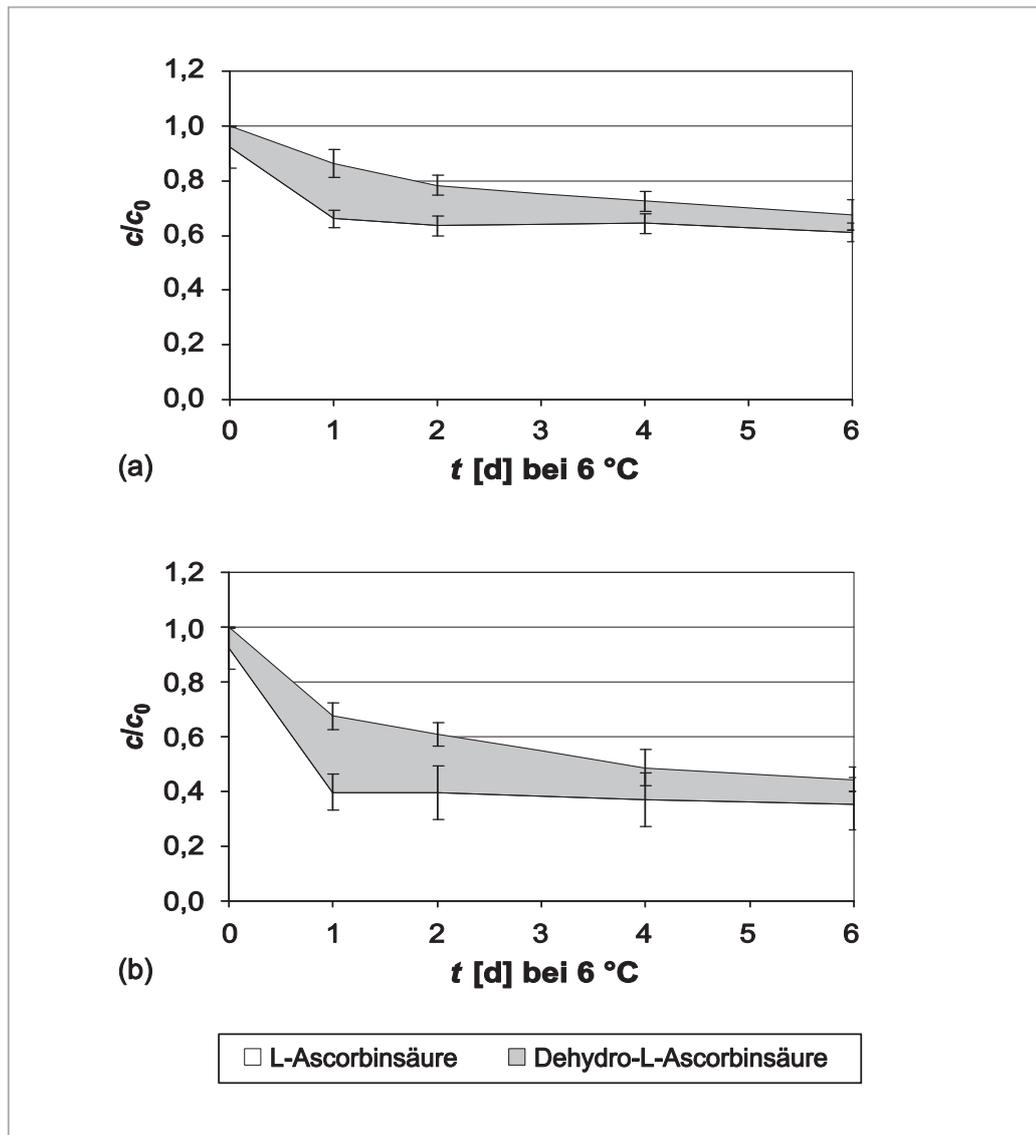


Abb. 4.15: L-Ascorbinsäuregehalt und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt von in Form von (a) Julienne und (b) Raspeln gelagerten Kohlrabi im Verlauf von 6 Tagen Lagerung bei 6 °C.

Bei beiden Lagerformen zeigt sich eine Abnahme sowohl des L-Ascorbinsäuregehalts als auch des Gesamtascorbinsäuregehalts bis zum Lagertag 1. Der Gesamtascorbinsäuregehalt sinkt bei den gelagerten Julienne auf 86 % und bei den Raspeln

auf 68 % des Gehalts der Frischware. Der Anteil der L-Ascorbinsäure am Gesamtascorbinsäuregehalt beträgt in der Frischware ca. 92 % und verringert sich bis zum Lagertag 1 bei den Julienne auf 66 %, bei den Raspeln auf 40 % des Gesamtascorbinsäuregehalts der Frischware. Im Verlauf der weiteren Lagerzeit bleibt der L-Ascorbinsäuregehalt auf diesem Niveau, der Gesamtascorbinsäuregehalt sinkt jedoch weiter ab auf 68 % des Ausgangsgehalts der Frischware bei den Julienne und 45 % bei den Raspeln (Abb. 4.15). Zu beachten ist bei diesen Ergebnissen, dass eine zuverlässige Aussage zum Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt der Proben anhand der gemessenen L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalte nur bei einem Verhältnis von L-Ascorbinsäure zu Dehydro-L-Ascorbinsäure kleiner 5:1 möglich ist. Diese Voraussetzung ist bei der Frischware, sowie den gelagerten Julienne am Tag 4 und 6 nicht erfüllt.

5 Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses verschiedener Vorernte- und Nacherntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi. Als möglicher Vorerntefaktor wird die N- und S-Ernährung der Kohlrabipflanzen anhand verschiedener Düngevarianten mit unterschiedlichen Stickstoff-(N) und Schwefelgehalten (S) untersucht.

Bezüglich des Einflusses verschiedener Lagerfaktoren werden drei Hauptthesen aufgestellt, die anhand der Ergebnisse aus Kapitel 4 bestätigt oder widerlegt werden sollen:

- Die Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts stellt, bei Konstanthaltung aller anderen Einflussfaktoren, eine Funktion der Temperatur dar, wobei die größten Verluste bei hohen Lagertemperaturen auftreten.
- Die Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts stellt, bei Konstanthaltung aller anderen Einflussfaktoren, eine Funktion der spezifischen Oberfläche dar. Je größer die spezifische Oberfläche, desto größer ist auch der L-Ascorbinsäureverlust.
- Die Art der Verpackung – insbesondere die Atmosphäre in der Verpackung – wirkt sich ebenfalls auf den L-Ascorbinsäuregehalt der gelagerten Gemüse aus. Die größten Verluste treten bei offener Lagerung auf.

Zusätzlich zum L-Ascorbinsäuregehalt werden auch Masse und Feuchtegehalt der gelagerten Proben bestimmt, sowie in Versuchsreihe G der Gesamtascorbinsäuregehalt. Auf diese Ergebnisse wird ebenfalls im Rahmen der folgenden Diskussion eingegangen.

5.1 Einfluss der N- und S-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt

Ein positiver oder negativer Effekt einer gesteigerten N-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt, wie es von vielen Gemüsen bekannt ist [Mozafar 1993], kann für Kohlrabi anhand der vorliegenden Ergebnisse in mg pro g Trockenmasse (TM) nicht bestätigt werden. In Abb. 5.1 sind zwar geringfügig schlechtere Werte bei den Düngevarianten mit 2 g Stickstoff zu sehen, die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant (siehe Kap. 4.1).

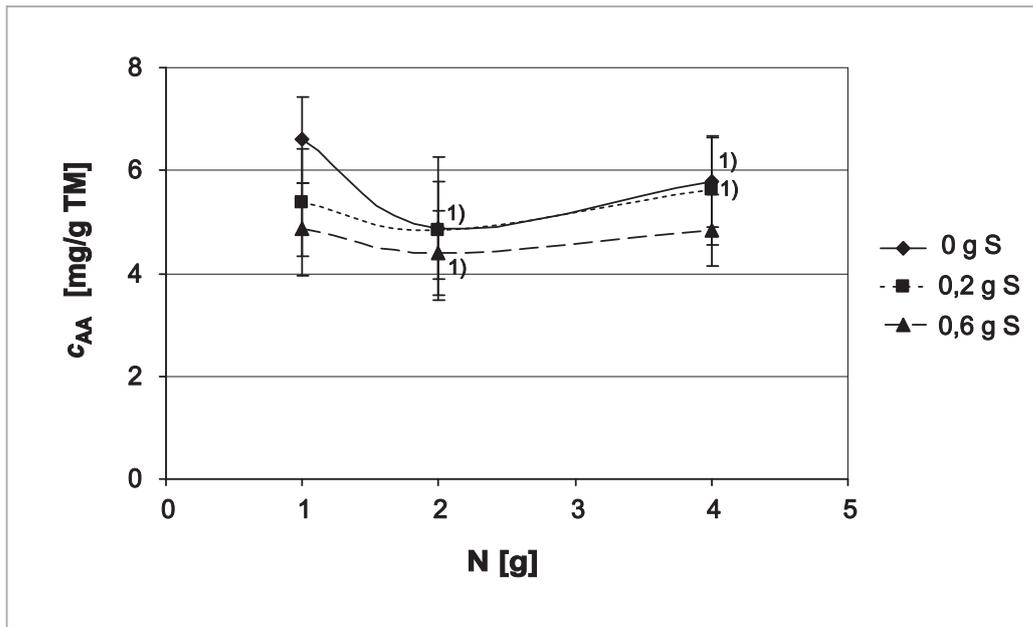


Abb. 5.1: L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/g TM in Abhängigkeit von N- und S-Ernährung ($n = 6$). ¹⁾ $n = 5$

Dieses Ergebnis stimmt überein mit den Messungen von Gerendás et al. zum Einfluss von N- und S-Ernährung (1 g, 2 g und 4 g Stickstoff, jeweils kombiniert mit 0 g, 0,05 g oder 0,2 g Schwefel) auf den Gesamtascorbinsäuregehalt von Kohlrabi. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Düngevarianten ist hier ebenfalls nicht nachweisbar [Gerendás 2008]. Auch beim Anbau von Spinat scheint eine Steigerung der Stickstoffgabe (0,75 g bis 4 g N pro Mitscherlich Gefäß) keinen Einfluss auf den L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalt zu haben, eine gesteigerte Kaliummenge wirkt sich dagegen positiv aus [Müller 1987].

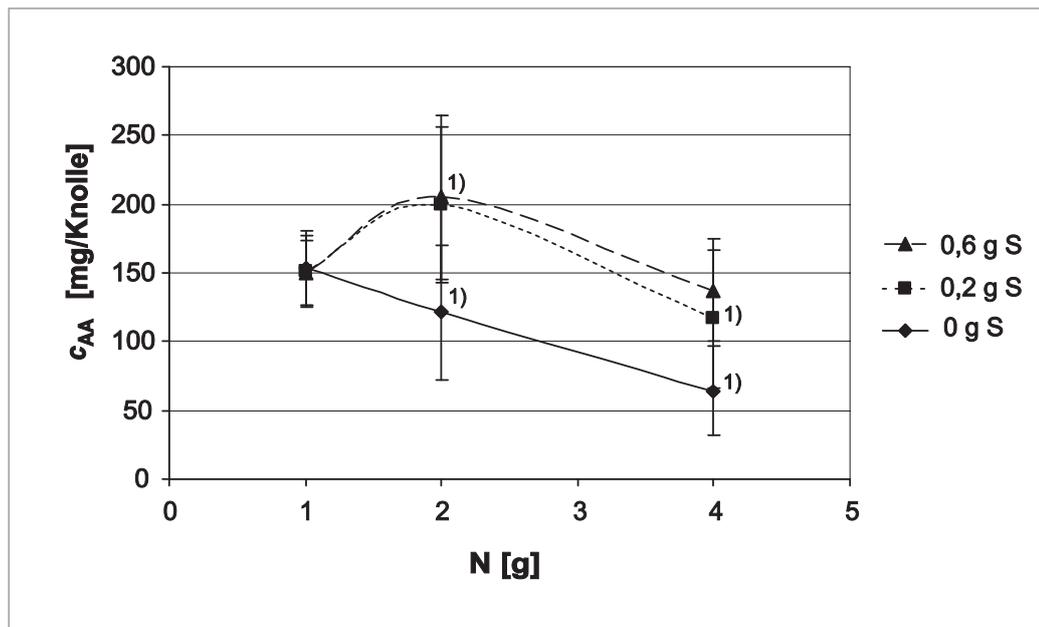


Abb. 5.2: L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} von Kohlrabi in mg/Knolle in Abhängigkeit von N- und S-Ernährung, berechnet anhand der L-Ascorbinsäuregehalte in mg/g TM und der Trockenmassegehalte der jeweiligen Knollen ($n = 6$). ¹⁾ $n = 5$

Wird bei der Bewertung der Ergebnisse die unterschiedliche Masse der Kohlrabiknollen berücksichtigt (Abb. 5.2), zeigt sich bei den Düngevarianten mit ansteigendem N-Gehalt (Variante 1, 4 und 7) eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts pro Knolle (berechnet anhand der L-Ascorbinsäuregehalte in mg/g TM und der Trockenmassegehalte der jeweiligen Knollen). Signifikant ist der Unterschied jedoch nur zwischen dem niedrigsten (1 g) und dem höchsten N-Gehalt (4 g). Wird zusätzlich mit Schwefel gedüngt (0,2 g bzw. 0,6 g S) ist der L-Ascorbinsäuregehalt der Knollen jeweils bei den Düngevarianten mit 2 g N am höchsten. Dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

Es existiert eine Vielzahl von Erklärungsmöglichkeiten für den unterschiedlichen Einfluss einer gesteigerten N-Ernährung auf den L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalt von Gemüsen. Stickstoff stellt eines der Grundelemente für Wachstum und Entwicklung von Pflanzen dar und ist unter anderem für die Synthese von Chlorophyll erforderlich. Eine erhöhte N-Aufnahme hat somit eine gesteigerte Photosyntheseleistung zur Folge, was wiederum die Aktivität der L-Galactono-1,4-Lacton-Dehydrogenase und letztendlich die L-Ascorbinsäuresynthese steigern kann [Bartoli 2006]. Da eine erhöhte N-Ernährung gleichzeitig zu einem starken Wachstum

der Pflanze führt, nimmt der L-Ascorbinsäure- oder Gesamtascorbinsäuregehalt pro 100 g Frischmasse aufgrund des Verdünnungseffekts mit steigender N-Menge häufig ab. Wird jedoch der Gehalt pro Pflanze betrachtet, zeigt sich zum Beispiel bei Grünkohl, Mangold und Rosenkohl ein deutlicher Anstieg des Gesamtascorbinsäurertrags [Scharrer 1957]. Zum Teil variieren die eingesetzten Mengen an Stickstoff zwischen den Studien stark, so dass die widersprüchlichen Ergebnisse der Untersuchungen gleicher Gemüsearten möglicherweise hierauf zurückzuführen sind. Auch lassen einige Studien vermuten, dass für die jeweilige Pflanze ein Optimum bezüglich der N-Ernährung existiert. Bis zu diesem Optimum steigt der Gesamtascorbinsäuregehalt an. Wird die Stickstoffgabe jedoch weiter erhöht, sinkt der Gesamtascorbinsäuregehalt wieder [Müller 1987, Mozafar 1993]. Ein weiterer Einflussfaktor kann die Art des eingesetzten N-Düngers sein. So führt laut Scharrer und Werner Nitratstickstoff (NO_3) meist zu höheren Gesamtascorbinsäuregehalten als die Ammoniumform (NH_4) [Scharrer 1957].

5.2 Einfluss der Lagerfaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt

Aus der Literatur ist bekannt, dass sowohl der L-Ascorbinsäure- als auch der Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt von Gemüse durch verschiedene Nacherntefaktoren wie Lagerzeit, Lagertemperatur, relative Feuchte, mechanische Verletzungen (zum Beispiel Abschürfungen der Oberfläche, Druckstellen oder Einschnitte) und Kälteschäden beeinflusst werden [Lee 2000].

5.2.1 Lagerzeit

Im Hinblick auf den Einfluss der Lagerzeit kann bei offen gelagerten Kohlrabiprüben mit einer geringen spezifischen Oberfläche von $a \leq 0,57 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) keine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit zunehmender Lagerdauer beobachtet werden, bei Proben mit einer spezifischen Oberfläche von $a \geq 1,50 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Julienne, Raspel) findet dagegen, unabhängig von der Lagertemperatur, eine Abnahme bis zum Lagertag 2 statt. Im Verlauf der weiteren Lagerdauer bleibt der L-Ascorbinsäuregehalt auch bei diesen Proben weitgehend konstant, lediglich bei der höchsten untersuchten Lagertemperatur ($12 \text{ }^\circ\text{C}$) findet eine weitere Abnahme bis zum Lagertag 4 statt (Abb. 4.4). Zusätzlich durchgeführte Untersuchungen mit den beiden Lagerformen Julienne und Raspel zeigen jedoch,

dass die größte Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts bereits im Verlauf des ersten Lagertags erfolgt (Abb. 4.5).

Albrecht et al. berichten bei Brassicaceae von einer deutlich geringeren Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts der nicht zerkleinerten Pflanzen während der Lagerung im Vergleich zu Pflanzen anderer Pflanzenfamilien. Bei einer Lagertemperatur von 2 °C, einer relativen Feuchte von 95-100 % und einer Lagerdauer von 3 Wochen liegt der mittlere L-Ascorbinsäuregehalt der meisten gelagerten Brassicaceae (Weißkohl, Blumenkohl, Brokkoli und Rosenkohl) bei > 95 % des Ausgangsgehalts, lediglich der gelagerte Wirsing zeigt mit einem Gehalt von 75 % eine deutliche Verringerung im Vergleich zur Frischware. Der L-Ascorbinsäuregehalt der unter den gleichen Bedingungen gelagerten Kartoffeln und Bohnen liegt mit 75 % bzw. 16 % deutlich unter dem der Mehrzahl der untersuchten Brassicaceae [Albrecht 1990]. Ähnliche Ergebnisse für Brokkoli zeigen Untersuchungen von Hussein et al., so liegt der Gesamtascorbinsäuregehalt von unzerkleinertem Brokkoli nach 10-tägiger Lagerung in unverschlossenen Beuteln bei 4 °C noch bei 92 % des Ausgangsgehalts [Hussein 2000]. Albrecht et al. weisen bei Brokkoli und weiteren Brassicaceae einen erhöhten Gehalt an wasserlöslichen Schwefelverbindungen nach. Der Gehalt an Schwefelverbindungen korreliert zudem mit dem L-Ascorbinsäuregehalt der untersuchten Gemüse. Da zu den wasserlöslichen Schwefelverbindungen auch die reduzierte Form des Glutathion zählt, kann dieses Ergebnis als Hinweis auf die Existenz des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels in Brassicaceae gesehen werden [Albrecht 1991, Lee 2000].

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Albrecht et al. und Hussein et al. weisen Vanderslice et al. für Brokkoli eine geringere Erhaltung des L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalts im Verlauf der Lagerung nach, was evtl. auf die geringere relative Feuchte in der Lageratmosphäre zurückgeführt werden kann. So liegt sowohl der L-Ascorbinsäure- als auch der Gesamtascorbinsäuregehalt der Proben nach 4-tägiger Lagerung bei 4 °C bei 85 % des Ausgangsgehalts und somit deutlich geringer als in den anderen Studien. Die stärkste Abnahme findet hierbei innerhalb der ersten 24 h statt. Im Verlauf der weiteren Lagertage bleiben beide Werte nahezu konstant [Vanderslice 1990].

Eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit zunehmender Lagerdauer kann für Kohlrabi nur bedingt bestätigt werden, da sie nur bei Proben mit großer spezifischer Oberfläche und nur im Verlauf des ersten Lagertags auftritt. Eine Regeneration der

im Verlauf der Lagerung entstehenden Dehydro-L-Ascorbinsäure über den Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel (siehe Kap. 2.3.3) könnte die nahezu vollständige Erhaltung der L-Ascorbinsäure der gelagerten Kohlrabiprobe mit geringer spezifischer Oberfläche (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) erklären. Eine gesteigerte Biosynthese der L-Ascorbinsäure aufgrund von Lichteinstrahlung kann ausgeschlossen werden, da die Lagerung aller Kohlrabiprobe im geschlossenen Kühlgerät erfolgt. Da jedoch aufgrund der mechanischen Verletzung die Menge an reaktiven Sauerstoffverbindungen deutlich ansteigen dürfte, ist mit einer Erhöhung der Konzentration antioxidativer Substanzen in den Zellen zu rechnen, zu denen auch die L-Ascorbinsäure zählt [Viña 2006]. Oxidativer Stress führt jedoch vermutlich nur dann zu einem Anstieg des L-Ascorbinsäuregehalts, wenn er nicht ernsthafte Schädigungen der Pflanze zur Folge hat [Smirnoff 1996b], was den deutlich erkennbaren Verlust an L-Ascorbinsäure bei den Kohlrabiprobe mit großer spezifischer Oberfläche (Julienne, Raspel) erklären könnte.

Ob innerhalb des ersten Lagertags tatsächlich eine kontinuierliche Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts stattfindet oder ob die Abnahme vielmehr auf unmittelbaren Wundstress nach der Zerkleinerung der Kohlrabi zurückzuführen ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht abschließend geklärt werden. Hierzu sind zusätzliche Messungen innerhalb der ersten 24 h erforderlich.

5.2.2 Lagertemperatur

Im untersuchten Temperaturbereich findet lediglich eine geringe Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit steigender Lagertemperatur bei den Lagerformen Julienne und Raspel statt. Die gelagerten Stäbchen zeigen nahezu keine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts (Abb. 5.3). Der untypisch niedrige L-Ascorbinsäuregehalt der bei 0,5 °C gelagerten Stäbchen wird auf Temperaturschwankungen innerhalb der gewählten Schublade des Kaltlagerfachs zurückgeführt. Die gemessenen Temperaturen sinken teilweise bis auf 0,1 °C ($T = 0,4 (\pm 0,3) \text{ °C}$), so dass Verluste durch Kälteschäden vermutet werden. Die gelagerten Julienne und Raspel sind hiervon nicht betroffen, da diese Lagerformen in einer Schublade mit geringfügig höherer Temperatur eingelagert werden, in der die gemessene Lagertemperatur bei $T = 0,7 (\pm 0,1) \text{ °C}$ liegt (siehe Kap. 3.2).

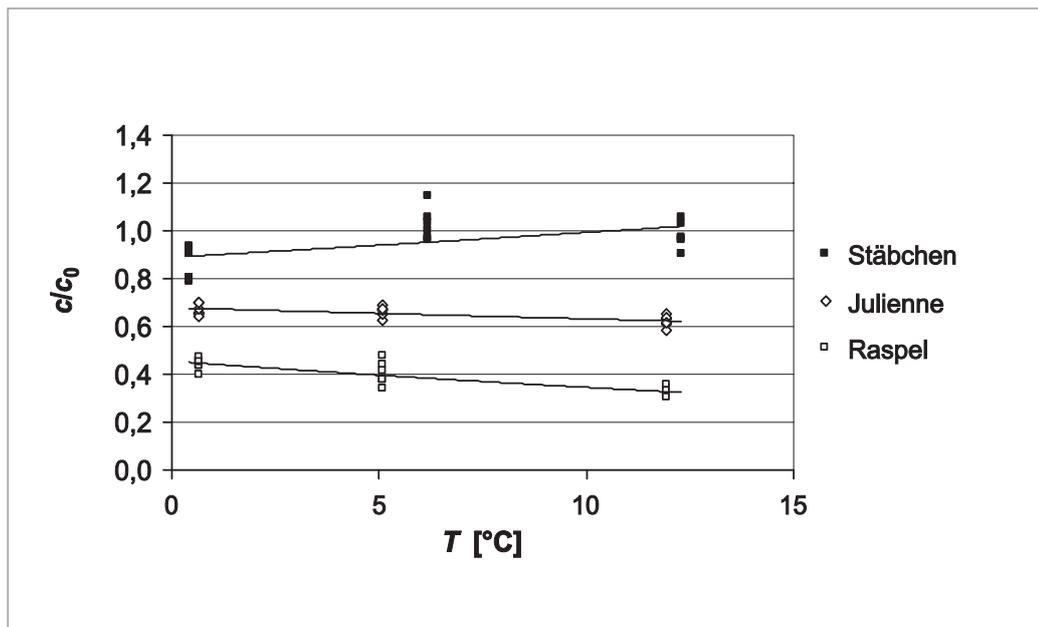


Abb. 5.3: Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 der offen gelagerten Kohlrabi-proben (Julienne und Raspel) mit steigender Lagertemperatur T der Proben am Lagertag 2.

Nach logarithmischer Transformation der y-Werte zeigt sich bei den Lagerformen Julienne und Raspel ein linearer Verlauf der Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit steigender Lagertemperatur. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden ist jedoch mit $R^2 = 0,47$ bei den gelagerten Julienne sehr gering. Lediglich bei der Lagerform Raspel deutet ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,72$ auf einen deutlichen Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable ($\ln c/c_0$) und der Lagertemperatur (T) der gelagerten Proben hin. (Abb. 5.4).

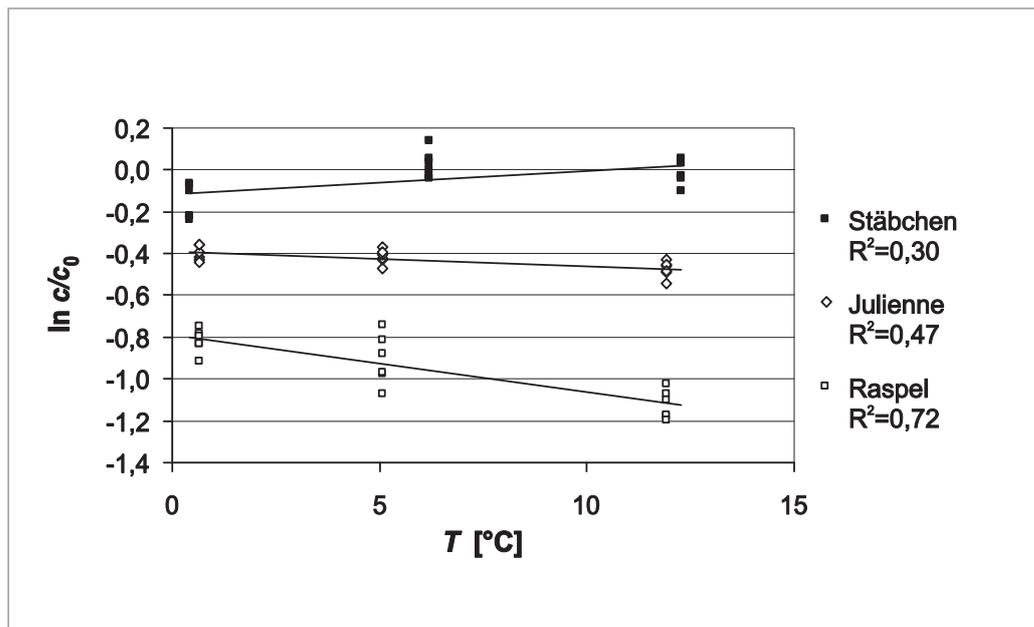


Abb. 5.4: Einfluss der Lagertemperatur T auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabiprobe am Lagertag 2 nach Logarithmierung der y-Werte.

Die aufgestellte These, dass die Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts, bei Konstanthaltung aller anderen Einflussfaktoren, eine Funktion der Temperatur darstellt, kann im untersuchten Temperaturbereich somit nur für die Lagerform Raspel eindeutig bestätigt werden. Die zugehörige Regressionsgerade liefert die Gleichung

$$\ln \frac{c}{c_0} = -0,03 T - 0,79 \quad (\text{Gl. 5-1})$$

so dass für den Verlauf der exponentiellen Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts (c/c_0) der offen gelagerten Kohlrabiprobe am Lagertag 2 für die Lagerform Raspel die Gleichung

$$\frac{c}{c_0} = -0,79 \times e^{-0,03 T} \quad (\text{Gl. 5-2})$$

angenommen wird.

Von der Überlegung ausgehend, dass sich die Geschwindigkeit der für den L-Ascorbinsäureabbau verantwortlichen oxidativen Vorgänge bei einer Temperaturerhöhung um 10 K um das 2- bis 3-fache steigert [Bognár 1995], erscheint es plausibel, dass bei den untersuchten Kohlrabiprobe (Julienne und Raspel) durch eine Erhöhung der Lagertemperatur um ca. 5 K noch keine signifikante Abnahme

des L-Ascorbinsäuregehalts erreicht wird. Durch eine Steigerung der Temperatur um $> 10 \text{ K}$ wird dagegen bei beiden Lagerformen eine hoch bzw. höchst signifikante Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts erreicht (siehe Tab. 4.3). Ähnliche Ergebnisse zeigen Untersuchungen von Del Aguila et al. zu Radieschen. Werden diese bei $1 \text{ }^\circ\text{C}$, $5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $10 \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert, tritt der größte Verlust (86 %) bei der höchsten Lagertemperatur auf, die beiden niedrigeren Lagertemperaturen haben deutlich geringere Verluste nach 10-tägiger Lagerung zur Folge (15 % bzw. 25 %). Obwohl die Temperaturdifferenzen beim Vergleich der Lagertemperaturen $5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $10 \text{ }^\circ\text{C}$ sowie $1 \text{ }^\circ\text{C}$ und $5 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr ähnlich sind (5 ° bzw. $4 \text{ }^\circ\text{C}$) unterscheiden sich die beiden niedrigeren Temperaturen deutlich weniger im Hinblick auf die Erhaltung der L-Ascorbinsäure [Del Aguila 2006]. Auch bei 14-tägiger Lagerung von Artischocken lassen sich zwischen den Lagertemperaturen $0 \text{ }^\circ\text{C}$, $2 \text{ }^\circ\text{C}$, $5 \text{ }^\circ\text{C}$, $7 \text{ }^\circ\text{C}$ und $10 \text{ }^\circ\text{C}$ nur geringe Unterschiede feststellen [Gil-Izquierdo 2001]. Um die Abhängigkeit des L-Ascorbinsäuregehalts von der Lagertemperatur am Beispiel Kohlrabi weiter zu untersuchen, sollte daher ein größerer Temperaturbereich gewählt werden, um so zum Beispiel einen Vergleich der L-Ascorbinsäuregehalte bei Temperaturerhöhungen um $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und $20 \text{ }^\circ\text{C}$ zu ermöglichen.

5.2.3 Spezifische Oberfläche

Bei den offen gelagerten Kohlrabiprobe n am Tag 2 sinkt der L-Ascorbinsäuregehalt mit steigender spezifischer Oberfläche bei allen drei untersuchten Lagertemperaturen exponentiell. Eine signifikante Abnahme kann jedoch erst für Proben mit einer spezifischen Oberfläche von $a > 0,57 (\pm 0,03) \text{ m}^2/\text{kg}$ (Julienne und Raspel) beobachtet werden (Abb. 5.5).

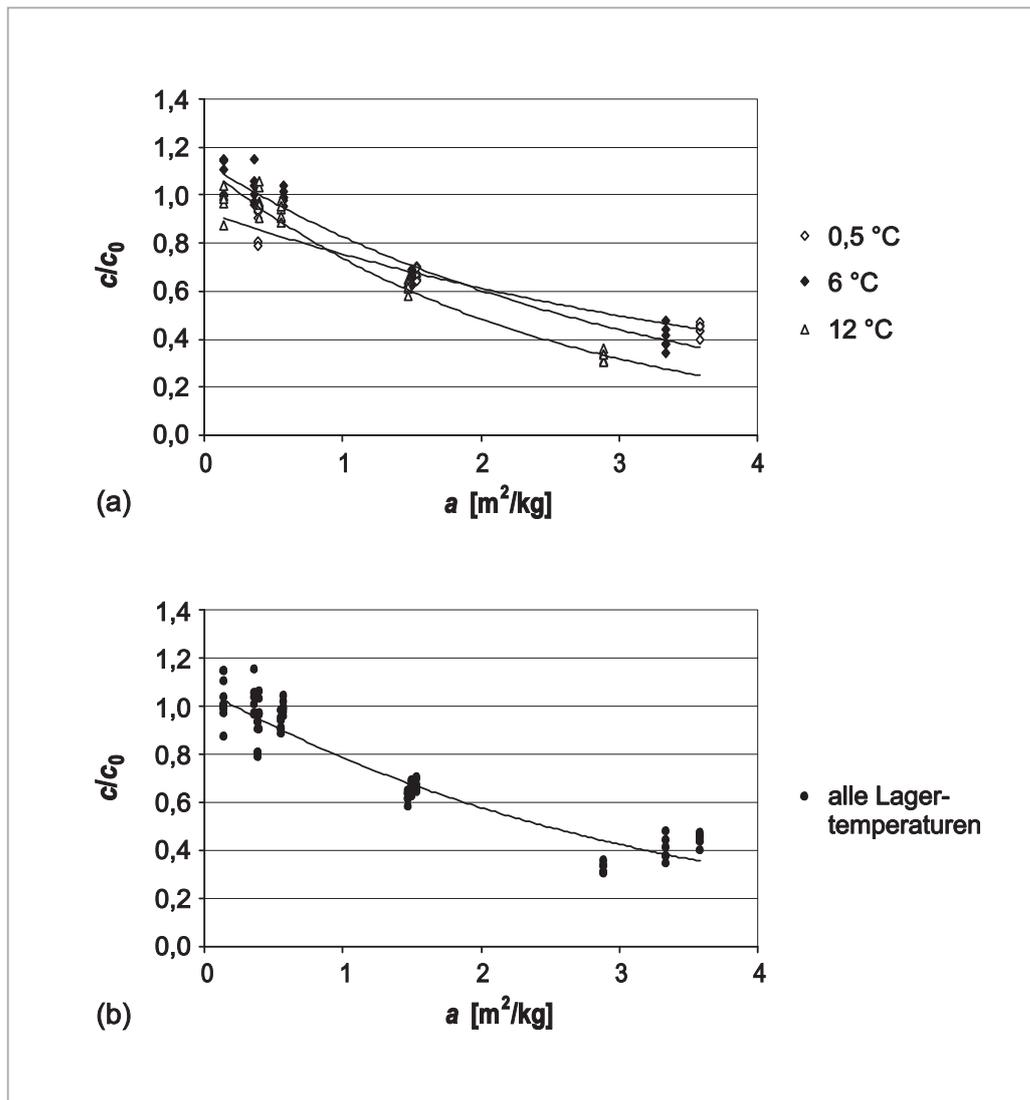


Abb. 5.5: Exponentielle Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts c/c_0 der offen gelagerten Kohlrabiprobe n mit steigender spezifischer Oberfläche a der Proben am Lagertag 2.

Nach logarithmischer Transformation der y-Werte zeigt sich bei allen untersuchten Lagertemperaturen (Abb. 5.6 a) sowie bei gemeinsamer Auswertung unabhängig von der gewählten Lagertemperatur (Abb. 5.6 b) eine lineare Abnahme mit steigender

spezifischer Oberfläche. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden liegt bei separater Auswertung der drei Lagertemperaturen jeweils bei $R^2 \geq 0,96$ und zeigt somit einen starken Zusammenhang zwischen der abhängigen Variablen ($\ln c/c_0$) und der spezifischen Oberfläche (a) der gelagerten Proben. Auch bei gemeinsamer Auswertung, unabhängig von der Lagertemperatur, wird mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,89$ ein starker Zusammenhang deutlich, was darauf hindeutet, dass der Einfluss der Lagertemperatur im untersuchten Temperaturbereich deutlich geringer ist, als der Einfluss der spezifischen Oberfläche.

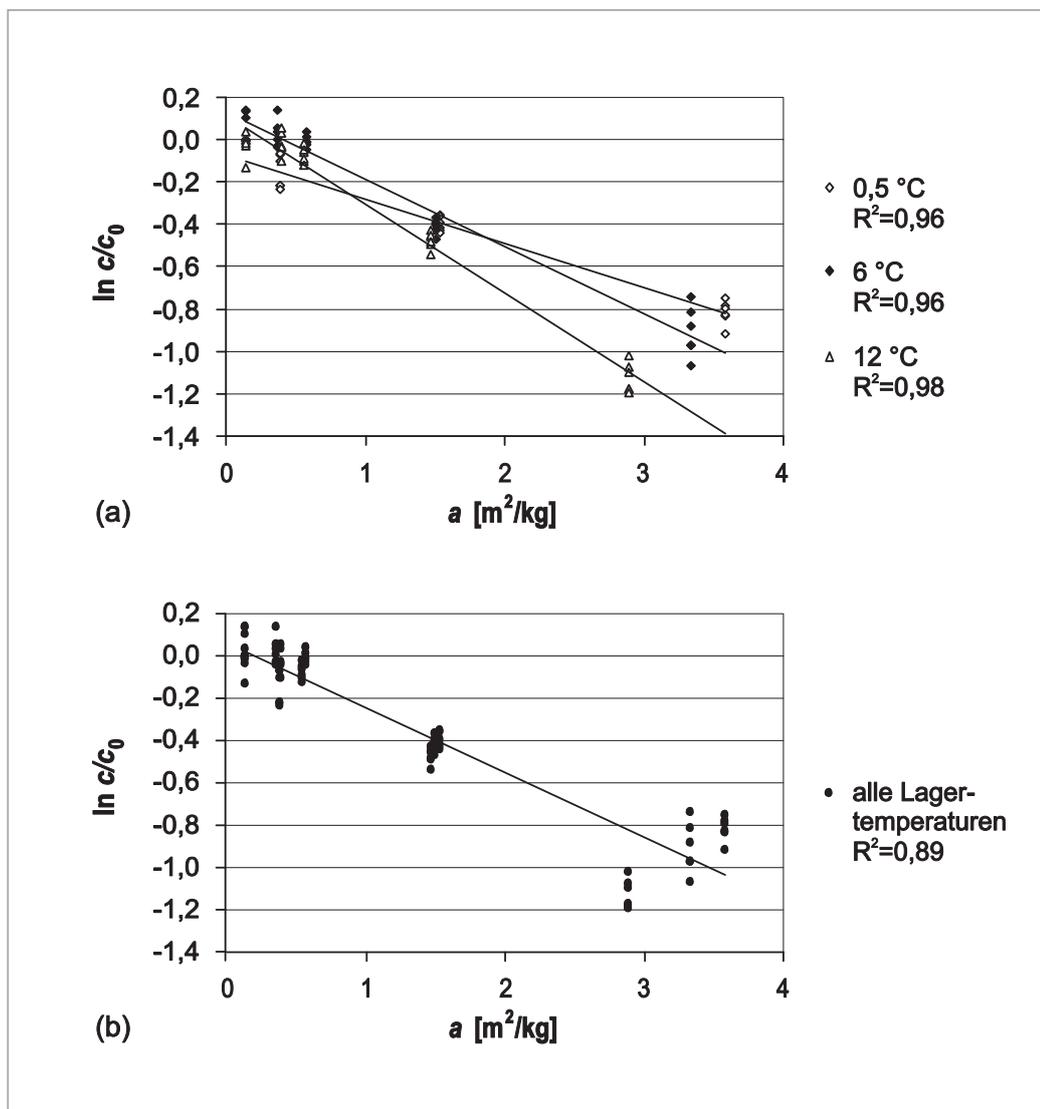


Abb. 5.6: Einfluss der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabipproben am Lagertag 2 nach Logarithmierung der y-Werte.

Aus den Regressionsgeraden lassen sich folgende Regressionsgleichungen ableiten:

$$0,5 \text{ °C: } \ln \frac{c}{c_0} = -0,21 a - 0,07 \quad (\text{Gl. 5-3})$$

$$6 \text{ °C: } \ln \frac{c}{c_0} = -0,32 a + 0,13 \quad (\text{Gl. 5-4})$$

$$12 \text{ °C: } \ln \frac{c}{c_0} = -0,42 a + 0,12 \quad (\text{Gl. 5-5})$$

Somit ergeben sich für die exponentielle Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts (c/c_0) der offen gelagerten Kohlrabiprobe am Lagertag 2 folgende Gleichungen:

$$0,5 \text{ °C: } \frac{c}{c_0} = -0,07 \times e^{-0,21 a} \quad (\text{Gl. 5-6})$$

$$6 \text{ °C: } \frac{c}{c_0} = 0,13 \times e^{-0,32 a} \quad (\text{Gl. 5-7})$$

$$12 \text{ °C: } \frac{c}{c_0} = 0,12 \times e^{-0,42 a} \quad (\text{Gl. 5-8})$$

Die aufgestellte These, dass die Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts, bei Konstanthaltung aller anderen Einflussfaktoren, eine Funktion der spezifischen Oberfläche darstellt, lässt sich somit bei allen untersuchten Lagertemperaturen eindeutig nachweisen.

Ähnliche Ergebnisse bezüglich des Einflusses der Lagerform werden von Del Aguila et al. für Radieschen berichtet, die unzerteilt, als Scheiben oder als Raspel eingelagert werden. Während eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts für unzerteilte Radieschen und Scheiben im Verlauf der 10-tägigen Lagerung bei 10 °C nicht nachgewiesen werden kann, nimmt der L-Ascorbinsäuregehalt der Raspel um 86 % ab im Vergleich zur Frischware, wobei eine deutliche Abnahme im Vergleich zur Frischware erst ab Lagertag 6 zu beobachten ist. Bei geringerer Lagertemperatur (1 °C und 5 °C) ist die Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts der eingelagerten Raspel mit 15 - 25 % deutlich schwächer ausgeprägt [Del Aguila 2006].

Escalona et al. berichten zudem von einer Zunahme der Atmungsaktivität gelagerter Kohlrabiprobe in Abhängigkeit vom Grad der erforderlichen mechanischen Verletzungen zur Herstellung der gewünschten Lagerformen (Stäbchen, Scheiben, kleine Würfel) und somit auch in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche der

Proben. Kohlrabi gelagert als Stäbchen (60 x 10 x 10 mm) weisen im Verlauf einer 14-tägigen Lagerung bei 5 °C eine Atmungsaktivität von 6 – 10 mg CO₂/kg/h auf [Escalona 2007a]. Kohlrabischeiben mit einer Dicke von 8 mm zeigen eine Atmungsaktivität von 6 – 12 mg CO₂/kg/h bei ebenfalls 14-tägiger Lagerdauer und identischer Lagertemperatur [Escalona 2006]. Im Gegensatz zu diesen beiden Lagerformen weisen Kohlrabiprüben in Form kleiner Würfel (10 x 10 x 10 mm) bei 14-tägiger Lagerung bei 0 °C mit 15 – 20 mg CO₂/kg/h eine etwas höhere Atmungsaktivität auf [Escalona 2003]. Verglichen mit der Atmungsaktivität intakter Kohlrabiknollen, die laut Escalona et al. bei 14-tägiger Lagerung und einer Lagertemperatur von 0 °C bei 7 – 10 mg CO₂/kg/h liegt, zeigen somit sowohl die gelagerten Kohlrabistäbchen als auch die Kohlrabischeiben keine veränderte Atmungsaktivität. Bei der Lagerform kleine Würfel ist die Atmungsaktivität dagegen nahezu verdoppelt, wobei diese Erhöhung der Atmungsaktivität von Escalona et al. auf den höheren Grad der mechanischen Verletzung zurückgeführt wird [Escalona 2007a].

Die Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit zunehmender spezifischer Oberfläche kann sowohl auf einen gesteigerten oxidativen Abbau durch den Kontakt mit Luft-sauerstoff, als auch auf einen höheren Verbrauch an L-Ascorbinsäure zur Reduktion entstehender reaktiver Sauerstoffverbindungen zurückgeführt werden. Erfolgt der Abbau der L-Ascorbinsäure in den gelagerten Proben kontinuierlich innerhalb des ersten Lagertags, könnte das auf einen gesteigerten oxidativen Abbau mit zunehmender spezifischer Oberfläche hindeuten. Ist der Abbau der L-Ascorbinsäure dagegen bereits kurz nach dem Vorgang der Zerkleinerung abgeschlossen, spielt vermutlich die Wirkung der L-Ascorbinsäure als Antioxidans eine größere Rolle beim Abbau, da sich durch den oxidativen Stress aufgrund der Zerkleinerung die Menge an anfallenden reaktiven Sauerstoffverbindungen erhöht (siehe Kap. 2.3.4), die mit Hilfe der L-Ascorbinsäure reduziert werden muss. Übersteigt die Oxidationsrate hierbei die Kapazität der Recyclingsysteme für Dehydro-L-Ascorbinsäure und Semidehydro-L-Ascorbinsäure, nimmt der Gehalt an L-Ascorbinsäure ab [Smirnof 1996b]. So führen zum Beispiel Reyes et al. den großen Verlust an L-Ascorbinsäure in verschiedenen stark zerkleinerten Gemüsen (Karotten, Zucchini, Pastinake, etc.) vor allem auf den unmittelbaren Wundstress und nur zu einem geringen Anteil auf aeroben Abbau zurück [Reyes 2007].

Bei weiteren Untersuchungen sollte zusätzlich zu dem L-Ascorbinsäuregehalt auch der Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt der Proben bestimmt werden, um so Hinweise

zu erhalten, ob eine vollständige Oxidation der L-Ascorbinsäure zu 2,3-Dioxo-L-Gulonsäure erfolgt, oder vielmehr überwiegend Dehydro-L-Ascorbinsäure entsteht, die wieder recycelt werden kann.

5.2.4 L-Ascorbinsäuregehalt als Funktion von Lagertemperatur und spezifischer Oberfläche

Die Ergebnisse der jeweils separaten Betrachtung des Einflusses der Nacherntefaktoren Lagertemperatur (T) und spezifische Oberfläche (a) auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Proben am Lagertag 2 legen nahe, dass die relative Veränderung des L-Ascorbinsäuregehalts (c/c_0) sich als Funktion der spezifischen Oberfläche und der Lagertemperatur abbilden lässt:

$$c/c_0 = f(a, T).$$

Zur Überprüfung dieser These wird nach logarithmischer Transformation der y-Werte eine multivariate lineare Regression durchgeführt, die folgende Regressionsgleichung liefert:

$$\ln \frac{c}{c_0} = -0,01 T - 0,32 a + 0,16 \quad (\text{Gl. 5-9})$$

Das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,90$ ($R^2_{\text{korr}} = 0,90$) verdeutlicht den starken Zusammenhang zwischen der abhängigen Variablen ($\ln c/c_0$) und den beiden unabhängigen Variablen (T und a).

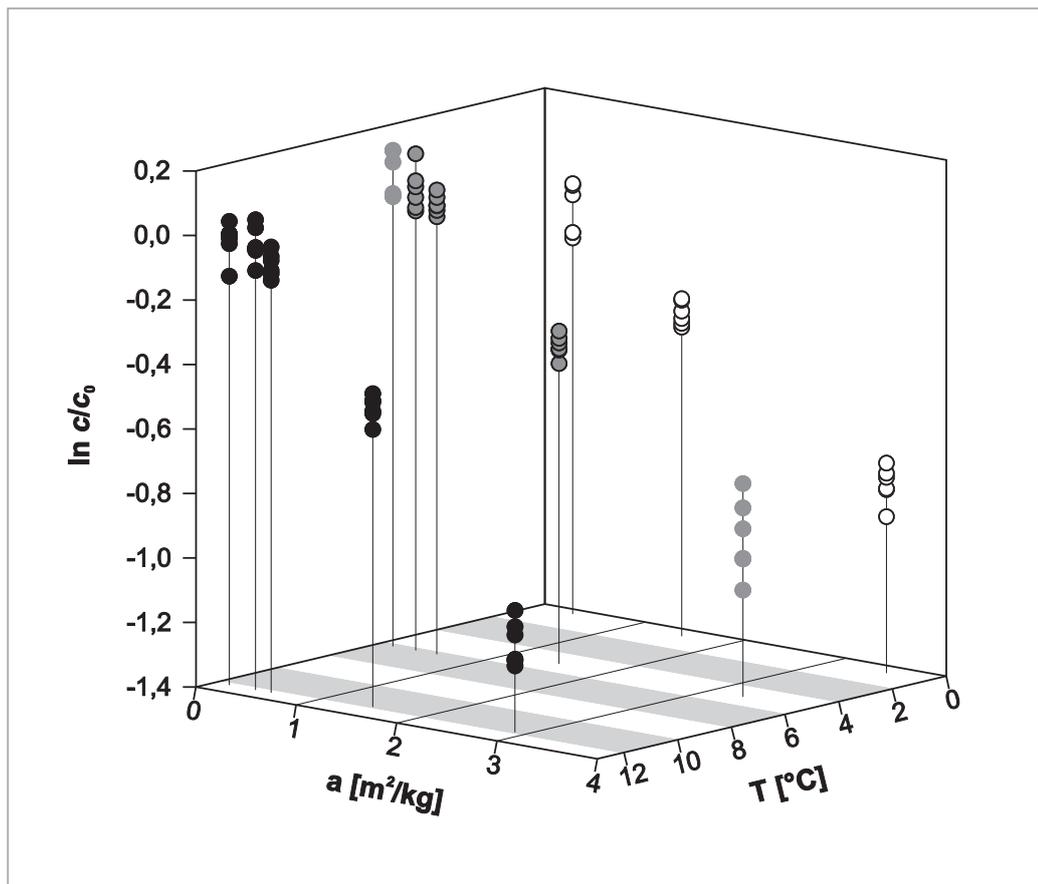


Abb. 5.7: Einfluss der spezifischen Oberfläche a und der Lagertemperatur T auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der gelagerten Kohlrabi-Proben am Lagertag 2 nach Logarithmierung der y-Werte. Dargestellt sind die L-Ascorbinsäuregehalte der Kohlrabi-Proben nach Lagerung bei 0,5 °C (○), 6 °C (●) und 12 °C (●). Zwei Stichproben, Würfel und Raspel bei 6 °C (●), erfüllen nicht die Voraussetzung der Normalverteilung bzw. der Varianzhomogenität.

Da eine Überprüfung der Residuen auf Normalverteilung und Varianzhomogenität ergibt, dass eine Stichprobe nicht normalverteilt ist (Würfel bei 6 °C) und aufgrund einer weiteren Stichprobe (Raspel bei 6 °C) keine Varianzhomogenität vorliegt, werden diese beiden Stichproben von der weiteren Auswertung ausgeschlossen (Abb. 5.7). Eine erneute multivariate Regression liefert folgende Regressionsgleichung:

$$\ln \frac{c}{c_0} = -0,01 T - 0,33 a + 0,16 \quad (\text{Gl. 5-10})$$

Das Bestimmtheitsmaß dieser Regressionsgleichung liegt mit $R^2 = 0,88$ ($R^2_{\text{korr}} = 0,88$) etwas niedriger als vor Ausschluss der beiden Stichproben. Die Regressionsgleichung selbst ändert sich jedoch nur geringfügig.

Da nun sowohl Normalverteilung der Residuen (laut KS-Test und Shapiro-Wilk-Test) als auch Varianzhomogenität vorliegen, ist die Durchführung des **F-Tests** zur Überprüfung der Zufälligkeit des Zusammenhangs zwischen x- und y-Variablen möglich. Die Nullhypothese H_0 lautet, dass der Zusammenhang zufällig ist. Es wird erwartet, dass H_0 abgelehnt wird, daher wird das α -Risiko mit $\alpha = 0,05$ klein gewählt. Der errechnete F-Wert ist mit $F = 233,99$ deutlich größer als der zugehörige kritische F-Wert $F_{\text{tab.}}(2;63) = 3,14$ (Interpolation des Zwischenwertes mit Hilfe der tabellierten Werte $F(2;60) = 3,15$ und $F(2;65) = 3,14$), die Nullhypothese wird demnach verworfen. Die Regressionsbeziehung kann somit auch für die Grundgesamtheit als höchst signifikant angesehen werden.

Der **t-Test** zur separaten Überprüfung der Regressionskoeffizienten zeigt, dass ein höchst signifikanter linearer Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variablen ($\ln c/c_0$) und der spezifischen Oberfläche (a) ($p < 0,001$) sowie ein hoch signifikanter Zusammenhang zwischen $\ln c/c_0$ und der Lagertemperatur (T) ($p < 0,01$) besteht. Bei beiden Einflussfaktoren ist der Absolutbetrag des errechneten t-Wertes größer als der tabellierte t-Wert $t_{\text{tab.}} = 1,9983$ bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ und der vorliegenden Anzahl von Freiheitsgraden $\nu = 63$. Somit kann die Nullhypothese, dass die Regressionskoeffizienten gleich Null sind, verworfen werden.

Aufgrund der ermittelten Regressionsgleichung nach logarithmischer Transformation der y-Werte kann für die exponentielle Abnahme des relativen L-Ascorbinsäuregehalts somit folgende Regressionsgleichung angenommen werden:

$$\frac{c}{c_0} = 0,16 \times e^{-0,01 T - 0,33 a} \quad (\text{Gl. 5-11})$$

Die Regressionsgleichung (Gl. 5-11) bestätigt die bereits in Kap. 5.2.3 geäußerte Vermutung, dass der Einfluss der Lagertemperatur (T) auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt (c/c_0) im untersuchten Temperaturbereich deutlich geringer ist als der Einfluss der spezifischen Oberfläche (a).

5.2.5 Verpackung / Lageratmosphäre

Wie aus Abb. 4.9 (Kap. 4.2.4) ersichtlich, ist bei einer Lagertemperatur von 12 °C und einem Vergleich von offen gelagerten und unter modifizierter Atmosphäre verpackten Kohlrabiprobe(n) (MAP) der Lagerform Julienne ein deutlicher Unterschied der Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts im Verlauf der 6-tägigen Lagerung zu erkennen. Während die offen gelagerten Proben eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts um 38 % bis zum Tag 2 und 54 % bis zum Tag 4 aufweisen, nimmt bei den unter MAP gelagerten Proben der L-Ascorbinsäuregehalt deutlich weniger ab von 3 % bis zum Tag 2 bis maximal 16 % am Ende der Lagerdauer. Dieser positive Einfluss einer modifizierten Atmosphäre mit hohem CO₂-Gehalt (ca. 30 Vol.-%) weicht von den Ergebnissen bisheriger Studien zur Lagerung verschiedener Gemüse ab. Ein Vergleich ist hier jedoch grundsätzlich schwierig, da zum einen keine Studien zu Kohlrabi in diesem Zusammenhang vorliegen, und zum anderen die untersuchte Zusammensetzung der Lageratmosphäre zwischen den einzelnen Studien stark variiert. Positive Effekte einer erhöhten CO₂-Konzentration der Lageratmosphäre werden meist nur im Hinblick auf den Gesamtascorbinsäuregehalt beschrieben, zum Beispiel bei fertig geschnittenem Spinat oder bei Brokkoli [Paradis 1996, Gil 1999].

Bei Kohlrabiprobe(n) mit geringerer spezifischer Oberfläche (Stäbchen) kann der positive Einfluss der MAP-Lagerung nicht bestätigt werden, da hier auch bei den offen gelagerten Proben der L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung nahezu vollständig erhalten bleibt.

Die positive Wirkung der MAP-Lagerung auf den L-Ascorbinsäuregehalt der gelagerten Kohlrabiprobe(n) ist vermutlich auf den geringen O₂-Gehalt in der Verpackung und den damit verbundenen geringeren oxidativen Abbau der L-Ascorbinsäure zurückzuführen. Aufgrund der erhöhten CO₂- und erniedrigten O₂-Gehalte in der Lageratmosphäre kann zudem von einer verringerten Atmungsaktivität der Proben ausgegangen werden (siehe Kap. 2.2.2), was mit einer geringeren Menge an reaktiven Sauerstoffspezies und somit einem geringeren Verbrauch von L-Ascorbinsäure als Antioxidans einhergehen könnte (siehe Kap. 2.3.4).

Die These, dass die Art der Verpackung – und hier insbesondere die Atmosphäre in der Verpackung – sich ebenfalls auf den L-Ascorbinsäuregehalt der gelagerten Gemüse auswirkt, kann somit nur für Kohlrabiprobe(n) mit einer spezifischen Oberfläche von $a \geq 1,50 \text{ m}^2/\text{kg}$ bestätigt werden, so dass für weitere Untersuchungen bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Verpackungen wie zum Beispiel Frischhaltebeutel,

Vakuumverpackung oder MAP mit unterschiedlicher Zusammensetzung des Schutzgases nur Proben mit entsprechend großer spezifischer Oberfläche herangezogen werden sollten.

5.3 Einfluss der Lagerfaktoren auf Masse und Feuchtegehalt

Wie aus den Abb. 4.10, 4.11 und 4.12 (Kap. 4.3) ersichtlich, kann im Verlauf von 6 Tagen Lagerung unabhängig von Lagerform und Lagertemperatur bei offener Lagerung kein Feuchteverlust der Proben beobachtet werden, die Masse der Proben nimmt jedoch im Verlauf der Lagerung ab. Das Ausmaß des Masseverlusts ist abhängig von den Faktoren spezifische Oberfläche, Lagerdauer, Lagertemperatur und Art der Verpackung. Die Bildung einer Korkschicht im Zuge einer Wundheilung (Suberinisierung), wie sie zum Beispiel bei Kartoffeln oder Möhren bekannt ist, wird bei den gelagerten Kohlrabi nicht beobachtet und kann somit als Grund für den nicht messbaren Feuchteverlust ausgeschlossen werden.

Bezüglich des Einflusses der **spezifischen Oberfläche** kann nur zwischen Proben mit einer geringeren spezifischen Oberfläche von $a \leq 0,57 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) und Proben mit einer großen spezifischen Oberfläche von $a \geq 1,50 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Julienne, Raspel) unterschieden werden, ein deutlicher Unterschied ist allerdings nur bei der höchsten gewählten Lagertemperatur zu erkennen (Abb. 5.8 c).

Der Masseverlust mit zunehmender **Lagerdauer** verläuft sowohl für Proben mit geringer spezifischer Oberfläche als auch für Proben mit großer spezifischer Oberfläche bei allen untersuchten Lagertemperaturen im untersuchten Zeitraum linear. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden liegt bei den Proben mit $a \leq 0,57 \text{ m}^2/\text{kg}$ jeweils bei $R^2 \geq 0,82$, bei den Proben mit $a \geq 1,50 \text{ m}^2/\text{kg}$ bei $R^2 \geq 0,94$, was auf einen starken Zusammenhang zwischen der relativen Masse (m/m_0) und der Lagerdauer (t) der Proben schließen lässt (Abb. 5.8).

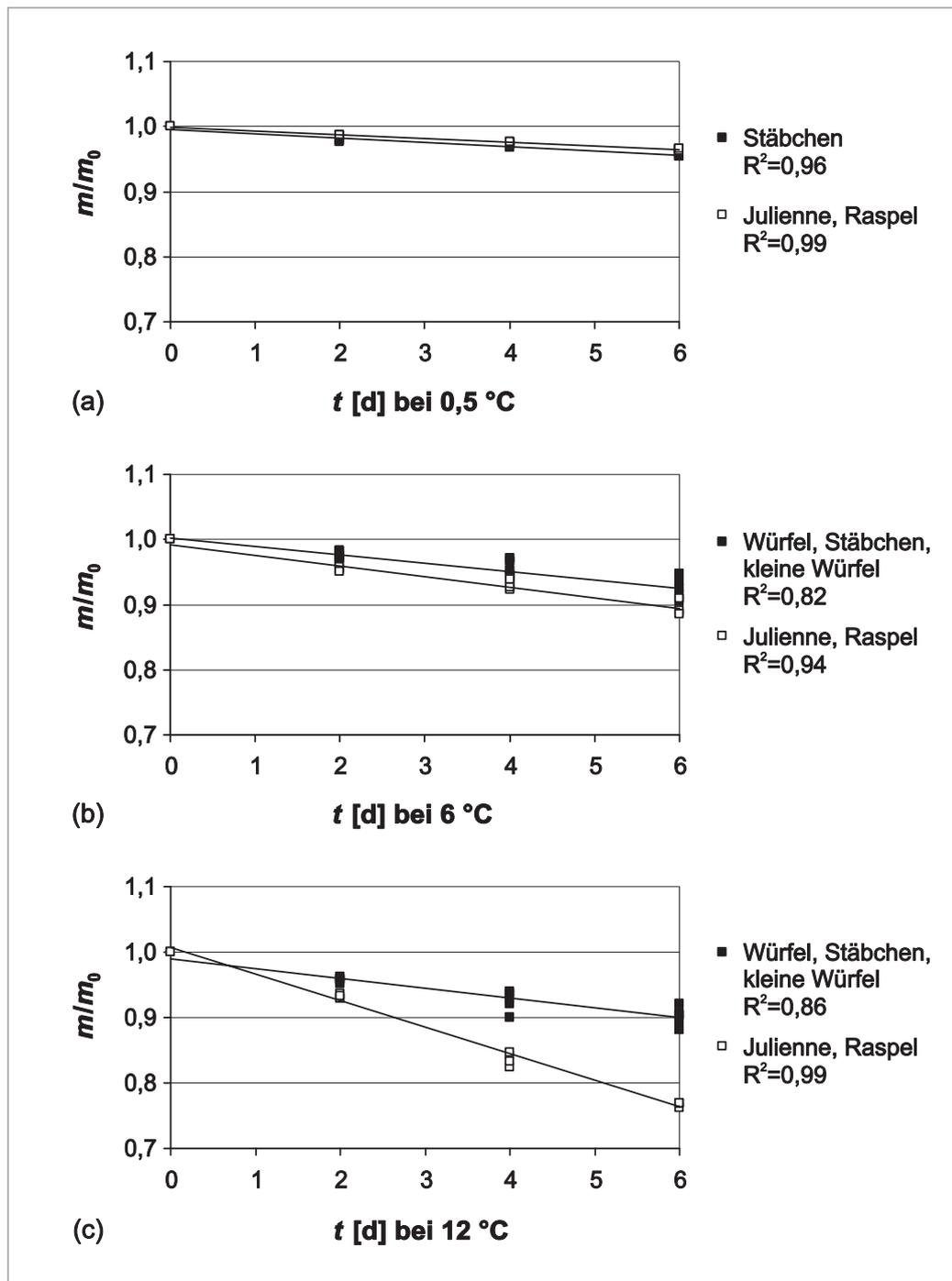


Abb. 5.8: Einfluss von spezifischer Oberfläche, Lagertemperatur und Lagerzeit auf die relative Masse m/m_0 der Kohlrabi-proben.

Am Lagertag 6 zeigt sich eine lineare Abnahme der relativen Masse mit steigender **Lagertemperatur** im untersuchten Temperaturbereich. Die Abnahme ist bei Proben mit einer geringen spezifischen Oberfläche von $a \leq 0,57 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel) jedoch kaum wahrnehmbar und auch das Bestimmtheitsmaß der

Regressionsgeraden ist mit $R^2 = 0,66$ gering. Bei Proben mit einer großen spezifischen Oberfläche von $a \geq 1,50 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Julienne, Raspel) ist die lineare Abnahme dagegen deutlich zu erkennen und das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$ lässt auf einen starken Zusammenhang zwischen der relativen Masse (m/m_0) und der Lagertemperatur (T) schließen (Abb. 5.9).

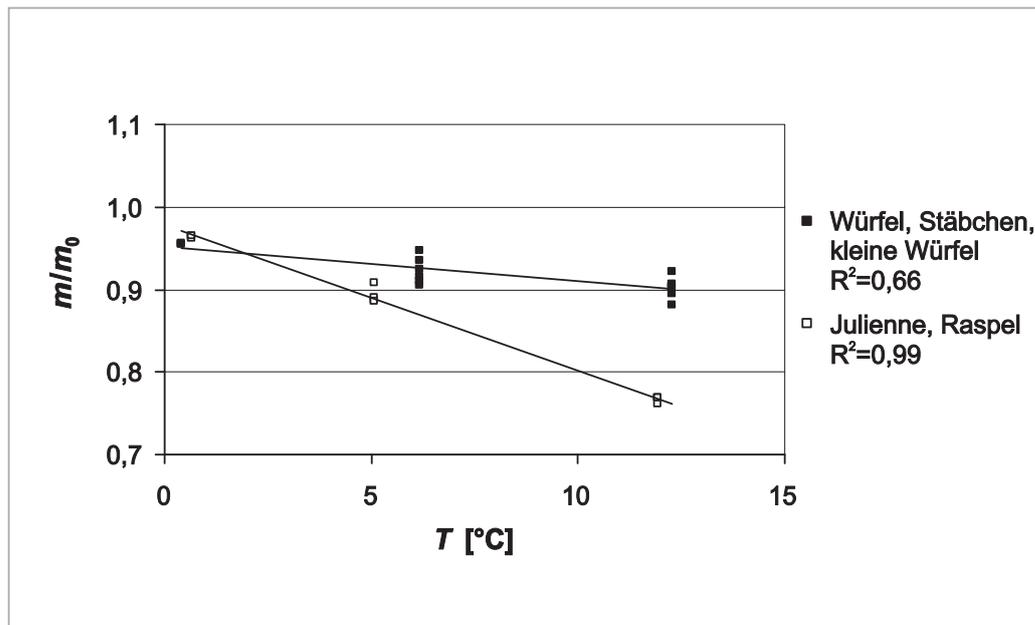


Abb. 5.9: Relative Masseveränderung m/m_0 der offen gelagerten Kohlrabi-proben am Lagertag 6 in Abhängigkeit von der Lagertemperatur T .

Wie aus Abb. 4.13 b und Abb. 4.14 b (Kap. 4.3) ersichtlich wird, wirkt sich auch die Art der **Verpackung** auf den Masseverlust aus. Im Vergleich zu offen gelagerten Proben findet bei verpackten Proben (Frischhaltebeutel oder MAP) nahezu kein Masseverlust im Verlauf der 6-tägigen Lagerung statt.

Bei der Lagerung von Brokkoli sind ähnliche Ergebnisse bezüglich Masseverlust und Feuchtegehalt der Proben bekannt. Wird Brokkoli bei einer Lagertemperatur von 7 - 9 °C offen im Kühlgerät gelagert, nimmt der Massegehalt im Verlauf von 7 Lagertagen um 21 % ab, der Feuchtegehalt verringert sich dagegen nur um 2 %. Wird Brokkoli in Frischhaltefolie oder PE-Beuteln verpackt gelagert, bleiben sowohl Masse- als auch Feuchtegehalt über den gesamten Lagerzeitraum unverändert [Bernhardt 2006].

Der Masseverlust der offen gelagerten Proben bei gleichzeitiger Feuchterhaltung von nahezu 100 % wird auf die Atmung der gelagerten Proben zurückgeführt, in

deren Verlauf Kohlenhydrate zu CO_2 und H_2O oxidiert werden. Während CO_2 an die Umgebung abgegeben wird, was in einem entsprechenden Masseverlust resultiert, kann das entstehende H_2O den Feuchteverlust durch Verdunstung ausgleichen. Wenn weiterhin davon ausgegangen wird, dass die geringe Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts der Kohlrabi-Proben auf ein Recycling von Dehydro-L-Ascorbinsäure über den Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel zurückzuführen ist, bietet sich hierüber eine weitere Erklärungsmöglichkeit des Masseverlusts bei gleichzeitiger Feuchteerhaltung. Der Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel spielt eine wichtige Rolle in der Entgiftung von H_2O_2 , welches über diesen Weg zu H_2O reduziert wird, das wiederum zum Ausgleich der Feuchteverluste beitragen kann [Noctor 1998]. Die Kompensation des durch Verdunstung auftretenden Feuchteverlusts durch Bildung von H_2O durch Atmungsvorgänge und Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel bietet somit eine mögliche Erklärung für die nahezu vollständige Erhaltung des Feuchtegehalts der offen gelagerten Proben bei gleichzeitigem Masseverlust.

Bei den verpackten Proben (MAP oder Frischhaltebeutel) wird aufgrund des sehr geringen Ausgangsgehalts an Sauerstoff (MAP) bzw. der schnell ansteigenden CO_2 -Gehalte in der Verpackung (Frischhaltebeutel) eine deutlich niedrigere Atmungsaktivität der Proben vermutet [Böttcher 1996], was in Kombination mit der durch die Verpackung verringerten Transpiration den nahezu nicht vorhandenen Masseverlust der Proben erklärt.

5.4 Einfluss der Lagerfaktoren auf den L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalt

Wie aus Abb. 4.15 (Kap. 4.4) ersichtlich, ist der Anteil der Dehydro-L-Ascorbinsäure am Gesamtascorbinsäuregehalt der frischen Kohlrabi sehr gering (ca. 8 %). Ähnlich niedrige Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalte in der Frischware sind für eine Vielzahl von Gemüsen bekannt. Lisiewska und Kmiecik berichten bei Brokkoli und Blumenkohl von einem geringen Anteil der Dehydro-L-Ascorbinsäure am Gesamtascorbinsäuregehalt des frisch geernteten Gemüses, ähnliche Beobachtungen machen Bushway et al. bei der Untersuchung verschiedener Gemüsesorten und Früchte (Kartoffel, Blumenkohl, Kohl, Brokkoli, Spinat, grüne Paprika, Tomate, Melone) [Bushway 1989, Lisiewska 1996]. Auch Howard et al. berichten bei verschiedenen Paprikasorten von einem geringen Gehalt an Dehydro-L-Ascorbinsäure in den frischen Paprika. Je nach Sorte schwankt der prozentuale Anteil der Dehydro-

L-Ascorbinsäure am Gesamtascorbinsäuregehalt bei den roten bzw. gelben Paprika zwischen 2 und 9 %. Bei acht der zehn untersuchten Sorten liegt der Anteil der Dehydro-L-Ascorbinsäure bei < 5 % [Howard 1994].

Im Verlauf des ersten Lagertags nehmen sowohl L-Ascorbinsäuregehalt als auch Gesamtascorbinsäuregehalt der gelagerten Kohlrabiprobe (Julienne und Raspel) deutlich ab. Im Anschluss bleiben die L-Ascorbinsäuregehalte nahezu identisch, während beim Gesamtascorbinsäuregehalt eine weitere Abnahme bis zum Lagertag 6 zu verzeichnen ist. Diese Ergebnisse stützen die bereits in Kap. 5.2.1 aufgestellte Theorie, dass die im Verlauf der Lagerung entstehende Dehydro-L-Ascorbinsäure mit Hilfe des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels wieder zu L-Ascorbinsäure reduziert wird. Um diese Theorie zu überprüfen, müssten zusätzliche Lagerversuche durchgeführt werden, in deren Verlauf neben L-Ascorbinsäuregehalt und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt weitere Parameter des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels wie zum Beispiel der Gehalt an Glutathion und Glutathion-Reduktase, gemessen werden.

Ähnliche Ergebnisse bezüglich der Veränderung der L-Ascorbinsäure- und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalte zeigt eine Studie zur Lagerung von Erdbeeren bei 5 °C. Innerhalb der ersten 24 h sinken sowohl L-Ascorbinsäure- als auch Gesamtascorbinsäuregehalt. Im Anschluss sinkt zwar der Gesamtascorbinsäuregehalt weiter ab, der L-Ascorbinsäuregehalt steigt jedoch wieder an bei gleichzeitig sinkendem Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt [Wright 1997]. Wird zerkleinerter Eisberg Salat (manuell mit scharfem Messer in Streifen geschnitten) 10 Tage lang in verschlossenen OPP-Beuteln (orientiertes Polypropylen) bei 8 °C gelagert, sinkt der Gesamtascorbinsäuregehalt nahezu kontinuierlich im Verlauf der Lagerung. Der Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt steigt dagegen bis zum Tag 6 an, im Verlauf der weiteren Lagerung sinkt er wieder ab [Barry-Ryan 1999].

5.5 Fazit

Einige der zu Beginn aufgestellten Thesen können anhand der vorliegenden Ergebnisse vollständig oder zumindest teilweise bestätigt werden. So lässt sich der L-Ascorbinsäuregehalt der gelagerten Kohlrabiprobe sowohl als Funktion der spezifischen Oberfläche als auch, zumindest bei Proben mit großer spezifischer Oberfläche, als Funktion der Lagertemperatur darstellen, sofern eine Konstanzhaltung der jeweils anderen Einflussfaktoren erfolgt. Die durchgeführte multivariate lineare Regression ermöglicht zudem die Darstellung des L-Ascorbinsäuregehalts als Funktion beider Lagerfaktoren und zeigt eindeutig, dass der Einfluss der spezifischen Oberfläche deutlich stärker ist als der Einfluss der Lagertemperatur im untersuchten Temperaturbereich. Um den Einfluss der Lagertemperatur weiter zu untersuchen, sollte daher ein größerer Temperaturbereich gewählt werden, um so zum Beispiel einen Vergleich der L-Ascorbinsäuregehalte bei Temperaturerhöhungen um 10 °C oder 20 °C zu ermöglichen.

Die aufgestellte These, dass die Art der Verpackung sich auf den L-Ascorbinsäuregehalt der gelagerten Gemüse auswirkt und die größten Verluste bei offener Lagerung auftreten, trifft zumindest für die untersuchten Proben mit großer spezifischer Oberfläche zu. Hier bewirkt eine Lagerung unter modifizierter Atmosphäre mit einem CO₂-Anteil von ca. 30 Vol.-% eine deutlich geringere Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts im Vergleich zur offenen Lagerung.

Eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts in Abhängigkeit von der Lagerzeit kann dagegen für Kohlrabi nur bedingt bestätigt werden. Da zudem die Möglichkeit besteht, dass die festgestellte Abnahme innerhalb der ersten 24 h nicht nur auf den Faktor Zeit, sondern zumindest teilweise, möglicherweise auch überwiegend auf unmittelbaren Wundstress nach der Zerkleinerung zurückzuführen ist, sind weitere Untersuchungen notwendig, um Aussagen zur Kinetik der L-Ascorbinsäure treffen zu können. Hierzu sollten zum einen Messungen innerhalb der ersten 24 h durchgeführt und zusätzlich zur L-Ascorbinsäure auch die Dehydro-L-Ascorbinsäure bestimmt werden, da ein Recycling der während der Lagerung entstehenden Dehydro-L-Ascorbinsäure über den Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel vermutet wird. Erste Untersuchungen zum L-Ascorbinsäure- und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe stützen diese Überlegung ebenso wie die Ergebnisse von Albrecht et al. zur Korrelation des Gehalts an wasserlöslichen Schwefelverbindungen und L-Ascorbinsäure in Brassicaceae [Albrecht 1991] und lassen die Vermutung zu, dass

zumindest bezüglich der Gesamtascorbinsäure eine Abhängigkeit von der Lagerzeit vorliegt. Um die Theorie des Recyclings der Dehydro-L-Ascorbinsäure mit Hilfe des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels zu überprüfen, müssten zusätzliche Lagerversuche durchgeführt werden, in deren Verlauf neben L-Ascorbinsäuregehalt und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt weitere Parameter des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels wie zum Beispiel der Gehalt an Glutathion und Glutathion-Reduktase, gemessen werden.

Bezüglich des Einflusses von Vorerntefaktoren auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware kann ein Effekt einer gesteigerten N-Ernährung nur bei gleichzeitiger Berücksichtigung der unterschiedlichen Masse der Kohlrabiknollen festgestellt werden. Bei Steigerung der Stickstoffgabe von 1 g auf 4 g sinkt der L-Ascorbinsäuregehalt pro Knolle signifikant. Bei zusätzlicher Schwefelgabe ist der L-Ascorbinsäuregehalt pro Knolle bei den Düngevarianten mit 2 g N jeweils am höchsten, die Unterschiede zu den Düngevarianten mit 1 g N und 4 g N sind jedoch meist nicht signifikant. Die Masse der Kohlrabiknollen variiert sowohl zwischen als auch innerhalb der jeweiligen Düngevarianten zum Teil recht stark. So liegt die Masse der kleinsten Kohlrabiknolle bei 56 g, die der größten bei 835 g. Im Vergleich hierzu liegt die Masse einer handelsüblichen Kohlrabiknolle mit einem Durchmesser von 10 - 12 cm bei ca. 500 g. Hier stellt sich die Frage, inwieweit Kohlrabiknollen mit außergewöhnlich geringer sowie hoher Masse bei der Auswertung berücksichtigt werden sollten, da diese aus Sicht des Verbrauchers nicht der typischen Kohlrabiknolle entsprechen.

Die Masse der offen gelagerten Kohlrabiprobe nimmt mit zunehmender Lagerzeit, Lagertemperatur und spezifischer Oberfläche der Proben ab. Eine Auswirkung der Lagerfaktoren auf den Feuchtegehalt der Proben kann dagegen nicht festgestellt werden. Dieser Masseverlust bei gleichzeitiger Feuchterhaltung von nahezu 100 % wird auf eine Kompensation des Feuchteverlusts durch Bildung von H₂O im Laufe von Atmung und Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel zurückgeführt. Der Masseverlust resultiert aus der Abgabe von CO₂ im Rahmen der Atmung. Bei den verpackten Proben (MAP oder Frischhaltebeutel) ist nahezu kein Masseverlust feststellbar, da aufgrund des sehr geringen Ausgangsgehalts an Sauerstoff (MAP) sowie der schnell ansteigenden CO₂-Gehalte in der Verpackung (Frischhaltebeutel) eine deutlich niedrigere Atmungsaktivität der Proben vorliegt und somit auch eine geringere Abgabe an CO₂ erfolgt.

Bezüglich der verwendeten Nachweismethoden hat sich die enzymatische Messung der L-Ascorbinsäure bewährt. Die Methode liefert valide, reproduzierbare Ergebnisse, auch im Vergleich zur Messung per HPLC, und ist zudem verhältnismäßig einfach durchzuführen und wenig fehleranfällig. Zur Bestimmung des Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalts ist die enzymatische Methode weniger gut geeignet, was jedoch vor allem an dem vorgeschalteten Reduktionsschritt durch Zugabe von 1,4 Dithiothreitol liegt. Dieser Reduktionsschritt erfolgt so oder so ähnlich bei allen Nachweismethoden, die den Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt indirekt anhand der Differenz von Gesamtascorbinsäure- und L-Ascorbinsäuregehalt berechnen [Washko 1992, Deutsch 2000], und wird häufig als problematisch bewertet. Des Weiteren sind aufgrund der erforderlichen Bestimmung des L-Ascorbinsäuregehalts jeder Probe vor und nach Reduktion der enthaltenen Dehydro-L-Ascorbinsäure der Zeitbedarf sowie der Bedarf an Reagenzien höher als bei direkten/ simultanen Nachweismethoden.

Dass der Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt der Probe anhand der Differenz von Gesamtascorbinsäure- und L-Ascorbinsäuregehalt berechnet wird, hat zudem zur Folge, dass Angaben zum Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt nur bei einem Verhältnis von L-Ascorbinsäure zu Dehydro-L-Ascorbinsäure von kleiner 5:1 aussagekräftig sind. Dies erschwert insbesondere Aussagen zum Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware, da hier der Anteil der L-Ascorbinsäure am Gesamtascorbinsäuregehalt meist sehr gering ist. Generell sinnvoll wäre daher eine direkte parallele Bestimmung von L-Ascorbinsäure und Dehydro-L-Ascorbinsäure per HPLC ohne vorangehenden Reduktionsschritt.

Um bei der Lagerung von Kohlrabi einen möglichst geringen Verlust an L-Ascorbinsäure zu gewährleisten, sollte das Gemüse aufgrund der vorliegenden Ergebnisse vor der Einlagerung so wenig wie möglich zerkleinert werden, um eine Vergrößerung der spezifischen Oberfläche zu vermeiden. Als geeignete Lagertemperaturen bieten sich Temperaturen von 1 – 6 °C an. Werden Kohlrabi als Knollen gelagert, sollte vor der Lagerung auf jeden Fall das Laub entfernt werden, da so eine geringere Atmungsaktivität erreicht wird. Um Masseverlusten bei bereits zerkleinerten Kohlrabi vorzubeugen, bietet es sich an, das Gemüse nicht offen, sondern verpackt im Kühlgerät zu lagern.

6 Zusammenfassung

Pflanzliche Lebensmittel dienen in der menschlichen Ernährung nicht nur als Energielieferanten, ihre ernährungsphysiologische Qualität wird vielmehr zu einem entscheidenden Teil durch ihren Gehalt an weiteren Nährstoffen, wie zum Beispiel Vitaminen, Mineralstoffen und Spurenelementen, bestimmt. Der Vitamin- und Mineralstoffgehalt von pflanzlichen Lebensmitteln wird durch eine Vielzahl von Vorernte- und Nacherntefaktoren wie Lagertemperatur, spezifische Oberfläche und Lageratmosphäre beeinflusst, der Verbraucher verlangt jedoch nach einer saisonunabhängigen Bereitstellung möglichst aller Obst- und Gemüsesorten in stets gleichbleibender Qualität. Somit ist die Wahl geeigneter Lagerbedingungen entscheidend für die Zufriedenheit der Verbraucher.

Aufgrund seiner geringen Stabilität wird insbesondere Vitamin C häufig als Parameter genutzt, um Lagerprozesse im Hinblick auf ihre Nährstofferhaltung zu untersuchen. Der Sammelbegriff Vitamin C umfasst hierbei die physiologisch wirksamen Formen L-Ascorbinsäure und Dehydro-L-Ascorbinsäure. Da in vielen Kulturpflanzen der Anteil der Dehydro-L-Ascorbinsäure am Vitamin C-Gehalt der Frischware weniger als 10 % beträgt, wird in Studien zum Einfluss von Lagerfaktoren auf den Vitamin C-Gehalt häufig nur der L-Ascorbinsäuregehalt untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Lagerfaktoren Lagerzeit, Lagertemperatur, spezifische Oberfläche und Lageratmosphäre auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi zu untersuchen, da insbesondere zum Einfluss der spezifischen Oberfläche, die zum Beispiel bei bereits vorgeschnittenen Gemüseprodukten deutlich vergrößert ist, bislang nur wenige Studien existieren. Des Weiteren werden Feuchtegehalt und Masse der Proben bestimmt. Im Hinblick auf den Einfluss von Vorerntefaktoren wird zusätzlich der Einfluss von Stickstoff- und Schwefelernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt der Frischware untersucht.

Zur Bestimmung des Einflusses von Lagerdauer, Lagertemperatur, spezifischer Oberfläche und Lageratmosphäre auf den L-Ascorbinsäuregehalt werden Kohlrabi-proben unterschiedlicher spezifischer Oberfläche (Würfel, Stäbchen, kleine Würfel, Julienne, Raspel) bei verschiedenen Lagertemperaturen (0,5 °C, 6 °C, 12 °C) über einen Zeitraum von 6 Tagen offen in einem haushaltsüblichen Kühlgerät eingelagert. Zur Untersuchung des Einflusses der Lageratmosphäre werden Proben sowohl offen als auch unter Schutzatmosphäre verpackt (MAP) eingelagert. Die Messung der Parameter L-Ascorbinsäuregehalt, Feuchte und Masse erfolgt unmittelbar vor der

Einlagerung sowie an den Lagertagen 1, 2, 4 und 6. Die L-Ascorbinsäuregehalte werden jeweils enzymatisch mit einem Farb-Test (L-Ascorbinsäure Farbttest, R-Biopharm AG, Deutschland), die Feuchtegehalte thermogravimetrisch mittels eines Infrarot-Feuchtemessgeräts (MA 45 Sartorius, Deutschland) bestimmt.

Der relative L-Ascorbinsäuregehalt (c/c_0) der gelagerten Proben am Lagertag 2 sinkt exponentiell mit steigender spezifischer Oberfläche bei allen drei untersuchten Lagertemperaturen und lässt sich bei Konstanzhaltung der übrigen Einflussfaktoren jeweils als Funktion der spezifischen Oberfläche darstellen ($R^2 > 0,96$). Eine deutliche Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit steigender Lagertemperatur wird dagegen nur bei Proben mit großer spezifischer Oberfläche (Raspel) beobachtet. Eine durchgeführte multivariate lineare Regression anhand der logarithmierten relativen L-Ascorbinsäuregehalte ($\ln c/c_0$) ermöglicht zudem die Darstellung des L-Ascorbinsäuregehalts als Funktion beider Lagerfaktoren ($R^2 = 0,88$) und zeigt eindeutig, dass der Einfluss der spezifischen Oberfläche deutlich stärker ist als der Einfluss der Lagertemperatur im untersuchten Temperaturbereich. Die Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit zunehmender spezifischer Oberfläche kann sowohl aufgrund eines gesteigerten oxidativen Abbaus als auch durch eine gesteigerte Bildung reaktiver Sauerstoffspezies in Folge der Zerkleinerung und dem damit verbundenen erhöhten Verbrauch an L-Ascorbinsäure als Antioxidans erfolgen. Um den Einfluss der Lagertemperatur genauer zu untersuchen, sollte in zukünftigen Versuchsreihen ein größerer Temperaturbereich gewählt werden, um zum Beispiel einen Vergleich der L-Ascorbinsäuregehalte bei Temperaturerhöhungen um 10 °C und 20 °C zu ermöglichen.

Eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts mit zunehmender Lagerzeit wird nur bei Proben mit großer spezifischer Oberfläche (Julienne, Raspel) im Verlauf der ersten 24 h beobachtet. Die Frage, ob es sich hierbei tatsächlich um eine kontinuierliche Abnahme mit zunehmender Lagerzeit handelt, oder ob die Abnahme vielmehr auf unmittelbaren Wundstress nach der Zerkleinerung zurückzuführen ist, kann nicht abschließend geklärt werden. Hierzu wären weitere Messungen des L-Ascorbinsäuregehalts innerhalb der ersten 24 h erforderlich. Als Grund für den nahezu gleichbleibenden L-Ascorbinsäuregehalt im weiteren Verlauf der Lagerung wird ein Recycling der Dehydro-L-Ascorbinsäure über den Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel vermutet. Um diesen Aspekt genauer zu untersuchen, müssten im Rahmen zusätzlicher Lagerversuche sowohl L-Ascorbinsäure- und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalte

als auch weitere Parameter des Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsels bestimmt werden.

Eine Auswirkung der Lageratmosphäre kann für Kohlrabi-Proben mit großer spezifischer Oberfläche (Julienne) nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den offen gelagerten Proben, deren L-Ascorbinsäuregehalt innerhalb 2-tägiger Lagerung bei 12 °C um 38 % abnimmt, bleibt der Gehalt der unter MAP verpackten Proben nahezu bei 100 %. Vermutet wird hier ein geringerer oxidativer Abbau der L-Ascorbinsäure aufgrund der niedrigen O₂-Gehalte in der Verpackung. Zudem bewirken erhöhter CO₂- und erniedrigter O₂-Gehalt eine geringere Atmungsaktivität der Proben.

Eine Abnahme der Masse in Abhängigkeit von Lagerdauer, Lagertemperatur und spezifischer Oberfläche bei gleichbleibendem Feuchtegehalt zeigt sich bei den offen gelagerten Proben. Hier wird möglicherweise im Verlauf der Lagerung verdunstetes Wasser durch Bildung von H₂O im Rahmen von Atmung und Ascorbat-Glutathion-Stoffwechsel kompensiert. Werden die Proben verpackt (MAP oder Frischhaltebeutel) gelagert, ist dagegen nahezu kein Masseverlust zu beobachten, was auf einen sehr geringen O₂-Ausgangsgehalt (MAP) bzw. schnell ansteigenden CO₂-Gehalt (Frischhaltebeutel) in der Verpackung, und zu einem geringeren Anteil auf die verringerte Transpiration zurückgeführt wird.

Ein Effekt einer gesteigerten N-Ernährung auf den L-Ascorbinsäuregehalt kann für Kohlrabi anhand der vorliegenden Ergebnisse in mg pro g Trockenmasse nicht bestätigt werden. Wird bei der Beurteilung der Ergebnisse jedoch die unterschiedliche Masse der Kohlrabiknollen berücksichtigt, zeigt sich zumindest bei den Düngewarianten ohne zusätzliche Schwefelgabe eine Abnahme des L-Ascorbinsäuregehalts pro Knolle mit ansteigendem N-Gehalt.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse sollte im Hinblick auf die Erhaltung des L-Ascorbinsäuregehalts bei der Lagerung von Kohlrabi eine Vergrößerung der spezifischen Oberfläche durch starke Zerkleinerung möglichst vermieden und eine Lagertemperatur zwischen 1 und 6 °C gewählt werden. Um den Masseverlust bereits zerkleinerter Kohlrabi möglichst gering zu halten, sollte das Gemüse auf jeden Fall verpackt gelagert werden.

7 Literaturverzeichnis

- [Adisa 1986] Adisa V A: The influence of molds and some storage factors on the ascorbic acid content of orange and pineapple fruits. *Food Chemistry* 22 (1986):139-146.
- [Agar 1997] Agar I T, Streif J, Bangerth F: Effect of high CO₂ and controlled atmosphere (CA) on the ascorbic and dehydroascorbic acid content of some berry fruits. *Postharvest Biology and Technology* 11 (1997):47-55.
- [Agar 1999] Agar I T, Massantini R, Hess-Pierce B, Kader A A: Postharvest CO₂ and ethylene production and quality maintenance of fresh-cut kiwifruit slices. *Journal of Food Science* 64 (1999):433-440.
- [Aguayo 2004] Aguayo E, Escalona V H, Artés F: Metabolic behavior and quality changes of whole and fresh processed melon. *Journal of Food Science* 69 (2004):SNQ148-SNQ155.
- [Ahvenainen 1996] Ahvenainen R: New approaches in improving the shelf life of minimally processed fruit and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 7 (1996):179-187.
- [Albrecht 1990] Albrecht J A, Schafer H W, Zottola E A: Relationship of total sulfur to initial and retained ascorbic acid in selected cruciferous and noncruciferous vegetables. *Journal of Food Science* 55 (1990):181-183.
- [Albrecht 1991] Albrecht J A, Schafer H W, Zottola E A: Sulfhydryl and ascorbic acid relationships in selected vegetables and fruits. *Journal of Food Science* 56 (1991):427-430.
- [Arrigoni 2002] Arrigoni O, De Tullio M C: Ascorbic acid: much more than just an antioxidant. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects* 1569 (2002):1-9.
- [Asada 1999] Asada K: The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50 (1999):601-639.
- [Augustin 1975a] Augustin J: Variations in the nutritional composition of fresh potatoes. *Journal of Food Science* 40 (1975a):1295-1299.
- [Augustin 1975b] Augustin J, McDoler E, McMaster G M, Painter C G, Sparks W C: Ascorbic acid content in Russet Burbank potatoes. *Journal of Food Science* 40 (1975b):415-416.
- [Backhaus 2006] Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R: *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 11. Auflage. Berlin Heidelberg, Springer:2006.
- [Barry-Ryan 1999] Barry-Ryan C, O'Beirne D: Ascorbic acid retention in shredded iceberg lettuce as affected by minimal processing. *Journal of Food Science* 64 (1999):498-500.

- [Barth 1992] Barth M M, Perry A K, Schmidt S J, Klein B P: Misting affects market quality and enzyme activity of broccoli during retail storage. *Journal of Food Science* 57 (1992):954-957.
- [Bartoli 2006] Bartoli C G, Yu J, Gomez F, Fernandez L, McIntosh L, Foyer C H: Inter-relationships between light and respiration in the control of ascorbic acid synthesis and accumulation in *Arabidopsis thaliana* leaves. *Journal of Experimental Botany* 57 (2006):1621-1631.
- [Bernhardt 2006] Bernhardt S, Stüker M, Schlich E: Der Einfluss verschiedener Lagerverfahren im Privathaushalt auf den Ascorbinsäuregehalt in Brokkoli und grüner Paprika. *Hauswirtschaft und Wissenschaft* 54 (2006):38-45.
- [Betancourt 1977] Betancourt L A, Stevens M A, Kader A A: Accumulation and loss of sugars and reduced ascorbic acid in attached and detached tomato fruits. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 102 (1977):721-723.
- [Bickel-Sandkötter 2003] Bickel-Sandkötter S: *Nutzpflanzen und ihre Inhaltsstoffe*. 2. Auflage. Wiebelsheim, Quelle & Meyer Verlag GmbH & Co.:2003.
- [Biesiada 2007] Biesiada A, Kołota E, Adamczewska-Sowińska K: The effect of maturity stage on nutritional value of leek, zucchini and kohlrabi. *Vegetable Crops Research Bulletin* 66 (2007):39-45.
- [Bognár 1995] Bognár A: Vitaminverluste bei der Lagerung und Zubereitung von Lebensmitteln. *Ernährung* 19 (1995):411-416.
- [Böttcher 1996] Böttcher H: *Frischhaltung und Lagerung von Gemüse*. Stuttgart, Ulmer:1996.
- [Burton 1982] Burton W G: *Post-harvest physiology of food crops*. London, Longman:1982.
- [Bushway 1989] Bushway R J, Helper P R, King J, Perkins B, Krishnan M: Comparison of ascorbic acid content of super-market versus roadside stand produce. *Journal of Food Quality* 12 (1989):99-105.
- [Chen 2003] Chen Z, Young T E, Ling J, Chang S-C, Gallie D R: Increasing vitamin C content of plants through enhanced ascorbate recycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (2003):3525–3530.
- [Conklin 1998] Conklin P L: Vitamin C: a new pathway for an old antioxidant. *Trends in Plant Science* 3 (1998):329-330.
- [Conklin 1999] Conklin P L, Norris S R, Wheeler G L, Williams E H, Smirnoff N, Last R L: Genetic evidence for the role of GDP-mannose in plant ascorbic acid (vitamin C) biosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96 (1999):4198-4203.

- [Conklin 2006] Conklin P L, Gatzek S, Wheeler G L, Dowdle J, Raymond M J, Rolinski S, Isupov M, Littlechild J A, Smirnoff N: Arabidopsis thaliana VTC4 encodes L-Galactose-1-P Phosphatase, a plant ascorbic acid biosynthetic enzyme. *Journal of Biological Chemistry* 281 (2006):15662-15670.
- [Daood 1996] Daood H G, Vinkler M, Markus F, Hebshi E A, Biacs P A: Antioxidant vitamin content of spice red pepper (paprika) as affected by technological and varietal factors. *Food Chemistry* 55 (1996):365-372.
- [Davey 2000] Davey M W, Montagu M V, Inzé D, Sanmartin M, Kanellis A, Smirnoff N, Benzie I J J, Strain J J, Favell D, Fletcher J: Plant L-ascorbic acid: chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80 (2000):825-860.
- [Davey 2004] Davey M W, Keulemans J: Determining the potential to breed for enhanced antioxidant status in Malus: Mean inter- and intravarietal fruit vitamin C and glutathione contents at harvest and their evolution during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (2004):8031-8038.
- [De Assis 2001] De Assis S A, Lima D C, De Faria Oliveira O M M: Activity of pectinmethylesterase, pectin content and vitamin C in acerola fruit at various stages of fruit development. *Food Chemistry* 74 (2001):133-137.
- [Del Aguila 2006] Del Aguila J S, Sasaki F F, Heiffig L S, Ortega E M M, Jacomino A P, Kluge R A: Fresh-cut radish using different cut types and storage temperatures. *Postharvest Biology and Technology* 40 (2006):149-154.
- [Deutsch 2000] Deutsch J C: Dehydroascorbic acid. *Journal of Chromatography A* 881 (2000):299-307.
- [DGE 2000] Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.: Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr. 1. Auflage. Frankfurt am Main, Umschau/Braus:2000.
- [DGE 2004] Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.: Ernährungsbericht 2004. Rheinbreitbach, MedienHaus Plump:2004.
- [Doenecke 2005] Doenecke D, Koolman J, Fuchs G, Gerok W: Karlsons Biochemie und Pathobiochemie. 15. überarbeitete und neugestaltete Auflage. Stuttgart, Thieme:2005.
- [Duller 2007] Duller C: Einführung in die Statistik mit EXCEL und SPSS: Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch. 2. Auflage. Heidelberg, Physica-Verlag:2007.
- [Elmadfa 2004] Elmadfa I, Leitzmann C: Ernährung des Menschen. 4. Auflage. Stuttgart, Eugen Ulmer GmbH & Co.:2004.
- [Escalona 2003] Escalona V H, Aguayo E, Artés F: Quality and physiological changes of fresh-cut kohlrabi. *HortScience* 38 (2003):1148-1152.

- [Escalona 2006] Escalona V H, Aguayo E, Artés F: Metabolic activity and quality changes of whole and fresh-cut kohlrabi (*Brassica oleracea* L. gongylodes group) stored under controlled atmospheres. *Postharvest Biology and Technology* 41 (2006):181-190.
- [Escalona 2007a] Escalona V H, Aguayo E, Artés F: Quality changes of fresh-cut kohlrabi sticks under modified atmosphere packaging. *Journal of Food Science* 72 (2007a):S303-S307.
- [Escalona 2007b] Escalona V H, Aguayo E, Artés F: Modified atmosphere packaging improved quality of kohlrabi stems. *LWT - Food Science and Technology* 40 (2007b):397-403.
- [Favell 1998] Favell D J: A comparison of the vitamin C content of fresh and frozen vegetables. *Food Chemistry* 62 (1998):59-64.
- [Foyer 1976] Foyer C H, Halliwell B: The presence of glutathione and glutathione reductase in chloroplasts: A proposed role in ascorbic acid metabolism. *Planta* 133 (1976):21-25.
- [Foyer 1991] Foyer C, Lelandais M, Galap C, Kunert K J: Effects of elevated cytosolic glutathione reductase activity on the cellular glutathione pool and photosynthesis in leaves under normal and stress conditions. *Plant Physiology* 97 (1991):863-872.
- [Foyer 1994] Foyer C H, Lelandais M, Kunert K J: Photooxidative stress in plants. *Physiologia Plantarum* 92 (1994):696-717.
- [Foyer 1995] Foyer C H, Souriau N, Perret S, Lelandais M, Kunert K J, Pruvost C, Jouanin L: Overexpression of glutathione reductase but not glutathione synthetase leads to increases in antioxidant capacity and resistance to photoinhibition in poplar trees. *Plant Physiology* 109 (1995):1047-1057.
- [Freyman 1991] Freyman S, Toivonen P M, Perrin P W, Lin W C, Hall J W: Effect of nitrogen fertilization on yield, storage losses and chemical composition of winter cabbage. *Canadian Journal of Plant Science* 71 (1991):943-946.
- [Gaßmann 1998] Gaßmann B: Vitamin C: Definition, Ernährungsphysiologie, Stoffwechsel, Versorgung und Versorgungsstand in der Bundesrepublik Deutschland. *Ernährungs-Umschau* 45 (1998):294-297.
- [Gerendás 2008] Gerendás J, Breuning S, Stahl T, Mersch-Sundermann V, Mühling K H: Isothiocyanate concentration in kohlrabi (*Brassica oleracea* L. var. gongylodes) plants as influenced by sulfur and nitrogen supply. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56 (2008):8334-8342.

- [Gil-Izquierdo 2001] Gil-Izquierdo A, Gil M I, Conesa M A, Ferreres F: The effect of storage temperatures on vitamin C and phenolics content of artichoke (*Cynara scolymus* L.) heads. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2 (2001):199-202.
- [Gil 1998] Gil M I, Ferreres F, Tomas-Barberan F A: Effect of modified atmosphere packaging on the flavonoids and vitamin C content of minimally processed swiss chard (*Beta vulgaris* Subspecies *cycla*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46 (1998):2007-2012.
- [Gil 1999] Gil M I, Ferreres F, Tomás-Barberán F A: Effect of postharvest storage and processing on the antioxidant constituents (flavonoids and vitamin C) of fresh-cut spinach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47 (1999):2213-2217.
- [Gil 2002] Gil M I, Tomás-Barberán F A, Hess-Pierce B, Kader A A: Antioxidant capacities, phenolic compounds, carotenoids, and vitamin C contents of nectarine, peach, and plum cultivars from California. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (2002):4976-4982.
- [Gonzalez Rodriguez 1993] Gonzalez Rodriguez M V, Lage Yusty M A, Paseiro Losada P: Changes in physico-chemical characteristics between fruit-set and harvest of kiwifruit grown in Galicia (northwestern Spain). *Journal of Food Composition and Analysis* 6 (1993):278-284.
- [Hahn 2006] Hahn A, Ströhle A, Wolters M, Hahn D, Lechler T: Ernährung: Physiologische Grundlagen, Prävention, Therapie. 1. Auflage. Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH:2006.
- [Harding 1942] Harding P L, Thomas E E: Relation of ascorbic acid concentration in juice of Florida grapefruit to variety, rootstock, and position of fruit on the tree. *Journal of Agricultural Research* 64 (1942):57-61.
- [Henninger 1981] Henninger G: Enzymatische Bestimmung von L-Ascorbinsäure in Lebensmitteln, Pharmazeutika und biologischen Flüssigkeiten. *alimenta* 20 (1981):12-14.
- [Howard 1994] Howard L R, Smith R T, Wagner A B, Villalon B, Burns E E: Provitamin A and ascorbic acid content of fresh pepper cultivars (*Capsicum annuum*) and processed jalapenos. *Journal of Food Science* 59 (1994):362-365.
- [Hussein 2000] Hussein A, Odumeru J A, Ayanbadejo T, Faulkner H, Mc Nab W B, Hager H, Szijarto L: Effects of processing and packaging on vitamin C and beta-carotene content of ready-to-use (RTU) vegetables. *Food Research International* 33 (2000):131-136.
- [Isherwood 1962] Isherwood F A, Mapson L W: Ascorbic acid metabolism in plants: Part II. Biosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology* 13 (1962):329-350.

- [Jimenez 1997] Jimenez A, Hernandez J A, Del Rio L A, Sevilla F: Evidence for the presence of the ascorbate-glutathione cycle in mitochondria and peroxisomes of pea leaves. *Plant Physiology* 114 (1997):275-284.
- [Jiménez 2002] Jiménez A, Gómez J M, Navarro E, Sevilla F: Changes in the anti-oxidative systems in mitochondria during ripening of pepper fruits. *Plant Physiology and Biochemistry* 40 (2002):515-520.
- [Kader 1977] Kader A A, Stevens M A, Albright-Holton M, Morris L L, Algazi M: Effect of fruit ripeness when picked on flavor and composition in fresh market tomatoes. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 102 (1977):724-731.
- [Kallio 2002] Kallio H, Yang B, Peippo P: Effects of different origins and harvesting time on vitamin C, tocopherols, and tocotrienols in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) berries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (2002):6136-6142.
- [Klein 1982] Klein B P, Perry A K: Ascorbic acid and vitamin A activity in selected vegetables from different geographical areas of the United States. *Journal of Food Science* 47 (1982):941-945.
- [Laing 2004] Laing W A, Bulley S, Wright M, Cooney J, Jensen D, Barraclough D, MacRae E: A highly specific L-galactose-1-phosphate phosphatase on the path to ascorbate biosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 (2004):16976-16981.
- [Laing 2007] Laing W A, Wright M A, Cooney J, Bulley S M: The missing step of the L-galactose pathway of ascorbate biosynthesis in plants, an L-galactose guanyltransferase, increases leaf ascorbate content. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (2007):9534–9539.
- [Lee 1982] Lee C Y, Massey L M, Buren J P: Effects of post-harvest handling and processing on vitamin contents of peas. *Journal of Food Science* 47 (1982):961-964.
- [Lee 2000] Lee S K, Kader A A: Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology* 20 (2000):207-220.
- [Lee 1995] Lee Y, Howard L R, Villalón B: Flavonoids and antioxidant activity of fresh pepper (*Capsicum annuum*) cultivars. *Journal of Food Science* 60 (1995):473-476.
- [Lisiewska 1996] Lisiewska Z, Kmiecik W: Effects of level of nitrogen fertilizer, processing conditions and period of storage of frozen broccoli and cauliflower on vitamin C retention. *Food Chemistry* 57 (1996):267-270.

- [Loewus 1963] Loewus F A: Tracer studies on ascorbic acid formation in plants. *Phytochemistry* 2 (1963):109-128.
- [Loewus 1999] Loewus F A: Biosynthesis and metabolism of ascorbic acid in plants and of analogs of ascorbic acid in fungi. *Phytochemistry* 52 (1999):193-210.
- [Loewus 1990] Loewus M W, Bedgar D L, Saito K, Loewus F A: Conversion of L-sorbosone to L-ascorbic acid by a NADP-dependent dehydrogenase in bean and spinach leaf. *Plant Physiology* 94 (1990):1492-1495.
- [Mithen 2001] Mithen R: Glucosinolates – biochemistry, genetics and biological activity. *Plant Growth Regulation* 34 (2001):91-103.
- [Miyake 1992] Miyake C, Asada K: Thylakoid-bound ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts and photoreduction of its primary oxidation product monodehydroascorbate radicals in thylakoids. *Plant and Cell Physiology* 33 (1992):541-553.
- [Miyake 1994] Miyake C, Asada K: Ferredoxin-dependent photoreduction of the monodehydroascorbate radical in spinach thylakoids. *Plant and Cell Physiology* 35 (1994):539-549.
- [Mondy 1986] Mondy N I, Leja M: Effect of mechanical injury on the ascorbic acid content of potatoes. *Journal of Food Science* 51 (1986):355-357.
- [Mozafar 1993] Mozafar A: Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants: A review. *Journal of Plant Nutrition* 16 (1993):2479 - 2506.
- [Müller 1987] Müller K, Hippe J: Influence of differences in nutrition on important quality characteristics of some agricultural crops. *Plant and Soil* 100 (1987):35-45.
- [Nagel 2002] Nagel H: Thermogravimetrische Materialfeuchtebestimmung: Grundlagen und praktische Anwendungen. Landsberg/Lech, Verlag Moderne Industrie:2002.
- [Nagy 1980] Nagy S: Vitamin C contents of citrus fruit and their products: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 28 (1980):8-18.
- [Nakano 1981] Nakano Y, Asada K: Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology* 22 (1981):867-880.
- [Neubauer 1992] Neubauer C, Yamamoto H Y: Mehler-peroxidase reaction mediates zeaxanthin formation and zeaxanthin-related fluorescence quenching in intact chloroplasts *Plant Physiology* 99 (1992):1354-1361.
- [Noctor 1998] Noctor G, Foyer C H: Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 49 (1998):249-279.

- [Noctor 2006] Noctor G: Metabolic signalling in defence and stress: the central roles of soluble redox couples. *Plant, Cell & Environment* 29 (2006):409-425.
- [Noichinda 2007] Noichinda S, Bodhipadma K, Mahamontri C, Narongruk T, Ketsa S: Light during storage prevents loss of ascorbic acid, and increases glucose and fructose levels in Chinese kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra*). *Postharvest Biology and Technology* 44 (2007):312-315.
- [Pallanca 1999] Pallanca J, Smirnoff N: Ascorbic acid metabolism in pea seedlings. A comparison of D-glucosone, L-sorbosone, and L-galactono-1,4-lactone as ascorbate precursors. *Plant Physiology* 120 (1999):453-462.
- [Pallanca 2000] Pallanca J E, Smirnoff N: The control of ascorbic acid synthesis and turnover in pea seedlings. *Journal of Experimental Botany* 51 (2000):669-674.
- [Paradis 1996] Paradis C, Castaigne F, Desrosiers T, Fortin J, Rodrigue N, Willemot C: Sensory, nutrient and chlorophyll changes in broccoli florets during controlled atmosphere storage. *Journal of Food Quality* 19 (1996):303-316.
- [Potters 2004] Potters G, Horemans N, Bellone S, Caubergs R J, Trost P, Guisez Y, Asard H: Dehydroascorbate influences the plant cell cycle through a glutathione-independent reduction mechanism. *Plant Physiology* 134 (2004):1479–1487.
- [R-Biopharm o.J.] R-Biopharm: L-Ascorbinsäure: Farb-Test zur Bestimmung von L-Ascorbinsäure in Lebensmitteln und anderen Probematerialien. (o.J.).
- [Rehner 1999] Rehner G, Daniel H: *Biochemie der Ernährung*. 1. Auflage. Heidelberg, Berlin, Spectrum Akademischer Verlag GmbH:1999.
- [Reyes 2007] Reyes L F, Villarreal J E, Cisneros-Zevallos L: The increase in antioxidant capacity after wounding depends on the type of fruit or vegetable tissue. *Food Chemistry* 101 (2007):1254-1262.
- [Richardson 2004] Richardson A C, Marsh K B, Bolding H L, Pickering A H, Bulley S M, Frearson N J, Ferguson A R, Thornber S E, Bolitho K M, MacRae E A: High growing temperatures reduce fruit carbohydrate and vitamin C in kiwifruit. *Plant, Cell & Environment* 27 (2004):423-435.
- [Sachs 2006] Sachs L, Hedderich J: *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. 12. Auflage. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag:2006.
- [Saito 1990] Saito K, Nick J A, Loewus F A: D-glucosone and L-sorbosone, putative intermediates of L-ascorbic acid biosynthesis in detached bean and spinach leaves. *Plant Physiology* 94 (1990):1496-1500.
- [Sánchez-Mata 2003] Sánchez-Mata M C, Cámara M, Díez-Marqués C: Extending shelf-life and nutritive value of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.), by controlled atmosphere storage: micronutrients. *Food Chemistry* 80 (2003):317-322.

- [Sano 1995] Sano S, Miyake C, Mikami B, Asada K: Molecular characterization of monodehydroascorbate radical reductase from cucumber highly expressed in *Escherichia coli*. *Journal of Biological Chemistry* 270 (1995):21354-21361.
- [Scharrer 1957] Scharrer K, Werner W: Über die Abhängigkeit des Ascorbinsäure-Gehaltes der Pflanze von ihrer Ernährung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 77 (1957):97-110.
- [Serrano 2005] Serrano M, Guillen F, Martinez-Romero D, Castillo S, Valero D: Chemical constituents and antioxidant activity of sweet cherry at different ripening stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (2005):2741-2745.
- [Smirnoff 1996a] Smirnoff N: Botanical briefing: The function and metabolism of ascorbic acid in plants. *Annals of Botany* 78 (1996a):661-669.
- [Smirnoff 1996b] Smirnoff N, Pallanca J E: Ascorbate metabolism in relation to oxidative stress. *Biochemical Society Transactions* 24 (1996b):472-478.
- [Smirnoff 2001] Smirnoff N, Litwack G, Tadhg B: L-Ascorbic acid biosynthesis. *Vitamins & Hormones Volume* 61 (2001):241-266.
- [Sørensen 1994] Sørensen J N, Johansen A S, Poulsen N: Influence of growth conditions on the value of crisphead lettuce. *Plant Foods for Human Nutrition* 46 (1994):1-11.
- [Sørensen 1995] Sørensen J N, Johansen A S, Kaack K: Marketable and nutritional quality of leeks as affected by water and nitrogen supply and plant age at harvest. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 68 (1995):367-373.
- [Souci 2008] Souci S W, Fachmann W, Kraut H: Die Zusammensetzung der Lebensmittel: Nährwert-Tabellen. 7., revidierte und ergänzte Auflage. Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH:2008.
- [Stabu 2009a] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Fachserie 3, Reihe 3.2.1, Wachstum und Ernte, Gemüse 2008. Wiesbaden 2009a.
- [Stabu 2009b] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Fachserie 3 Reihe 3.1.3, Landwirtschaftliche Bodennutzung, Gemüseanbauflächen 2008. Wiesbaden 2009b.
- [Toivonen 1994] Toivonen P M A, Zebarth B J, Bowen P A: Effect of nitrogen fertilization on head size, vitamin C content and storage life of broccoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*). *Canadian Journal of Plant Science* 74 (1994):607-610.
- [Toledo 2003] Toledo M E A, Ueda Y, Imahori Y, Ayaki M: L-ascorbic acid metabolism in spinach (*Spinacia oleracea* L.) during postharvest storage in light and dark. *Postharvest Biology and Technology* 28 (2003):47-57.
- [Tudela 2002] Tudela J A, Espín J C, Gil M I: Vitamin C retention in fresh-cut potatoes. *Postharvest Biology and Technology* 26 (2002):75-84.

- [Valpuesta 2004] Valpuesta V, Botella M A: Biosynthesis of L-ascorbic acid in plants: new pathways for an old antioxidant. *Trends in Plant Science* 9 (2004):573-577.
- [Van Wyk 2005] Van Wyk B-E: *Handbuch der Nutzpflanzen - Ein illustrierter Leitfaden*. Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH:2005.
- [Vanderslice 1990] Vanderslice J T, Higgs D J, Hayes J M, Block G: Ascorbic acid and dehydroascorbic acid content of foods-as-eaten. *Journal of Food Composition and Analysis* 3 (1990):105-118.
- [Veltman 1999] Veltman R H, Sanders M G, Persijn S T, Pempelenbos H W, Oosterhaven J: Decreased ascorbic acid levels and brown core development in pears (*Pyrus communis* L. cv. Conference). *Physiologia Plantarum* 107 (1999):39-45.
- [Verelst 2004] Verelst W, Kapila J, Engler J D A, Stone J M, Caubergs R, Asard H: Tissue-specific expression and developmental regulation of cytochrome b561 genes in *Arabidopsis thaliana* and *Raphanus sativus*. *Physiologia Plantarum* 120 (2004):312-318.
- [Viña 2006] Viña S Z, Chaves A R: Antioxidant responses in minimally processed celery during refrigerated storage. *Food Chemistry* 94 (2006):68-74.
- [Vogtmann 1987] Vogtmann H, Kaepfel N, Fragstein P V: Nitrat- und Vitamin C-Gehalt bei verschiedenen Sorten von Kopfsalat und unterschiedlicher Düngung. *Ernährungs-Umschau* 34 (1987):12-16.
- [Washko 1992] Washko P W, Welch R W, Dhariwal K R, Wang Y, Levine M: Ascorbic acid and dehydroascorbic acid analyses in biological samples. *Analytical Biochemistry* 204 (1992):1-14.
- [Watzl 2001] Watzl B: Glucosinolate. *Ernährungs-Umschau* 48 (2001):330-333.
- [Weisgerber 2005] Weisgerber C: Farb-Test zur Bestimmung von Dehydroascorbinsäure und L-Ascorbinsäure in Lebensmitteln und anderen Probenmaterialien. Persönliche Mitteilung per Fax von Dr. Christoph Weisgerber, Produktmanager Allergene und Enzymatik, R-Biopharm AG vom 19.12.2005.
- [Wheeler 1998] Wheeler G L, Jones M A, Smirnoff N: The biosynthetic pathway of vitamin C in higher plants. *Nature* 393 (1998):365-369.
- [Wills 1984] Wills R B H, Wimalasiri P, Greenfield H: Dehydroascorbic acid levels in fresh fruit and vegetables in relation to total vitamin C activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 32 (1984):836-838.
- [Winston 1948] Winston J R, Miller E V: Vitamin C content and juice quality of exposed and shaded citrus fruits. *Journal of Food Science* 13 (1948):456-460.
- [Wonneberger 2004] Wonneberger C, Keller F, Bahnmüller H, Böttcher H, Beyer B, Meyer J: *Gemüsebau*. Stuttgart, Eugen Ulmer GmbH & Co.:2004.

- [Wright 1997] Wright K P, Kader A A: Effect of slicing and controlled-atmosphere storage on the ascorbate content and quality of strawberries and persimmons. *Postharvest Biology and Technology* 10 (1997):39-48.
- [Zacharias 1992] Zacharias R, Dürr H: *Lebensmittelverarbeitung im Haushalt*. 5. überarbeitete Auflage. Stuttgart, Ulmer:1992.

**Phänomenologie und Kinetik der L-Ascorbinsäure
bei der Lagerung von Gemüse
am Beispiel Kohlrabi**

Anhang

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	A-4
1 Validierung der enzymatischen Methode.....	A-7
2 Externer Standard	A-9
2.1 Vorgehensweise	A-9
2.2 Ergebnisse	A-10
3 Interner Standard.....	A-11
3.1 Vorgehensweise	A-11
3.2 Ergebnisse	A-12
4 Ergebnisse – Versuchsreihe A bis H	A-13
4.1 Versuchsreihe A	A-13
4.2 Versuchsreihe B	A-16
4.3 Versuchsreihe C	A-19
4.4 Versuchsreihe D	A-22
4.5 Versuchsreihe E	A-25
4.6 Versuchsreihe F	A-28
4.7 Versuchsreihe G	A-31
4.8 Versuchsreihe H.....	A-32
4.9 Relative L-Ascorbinsäuregehalte (c/c_0) – VR A bis E	A-36
4.10 Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt und relative Gesamtascorbinsäure- und L-Ascorbinsäuregehalte (c/c_0) –VR G.....	A-41
5 Lagertemperaturen und spezifische Oberfläche	A-43
6 Statistische Auswertung	A-46
6.1 Einfluss der Lagertemperatur auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt	A-46
6.2 Einfluss der spezifischen Oberfläche auf den L-Ascorbinsäuregehalt	A-47
6.3 Einfluss unterschiedlicher Stickstoff- und Schwefeldüngung auf den L-Ascorbinsäuregehalt.....	A-49

Tabellenverzeichnis

Tab. A-1:	Vergleichende Messung des L-Ascorbinsäuregehalts von Kohlrabiprüben per HPLC und enzymatisch.	A-7
Tab. A-2:	Vergleichende Messung des L-Ascorbinsäuregehalts von Brokkoliprüben per HPLC und enzymatisch.	A-8
Tab. A-3:	Externer Standard - Pipettierschema	A-9
Tab. A-4:	Externer Standard bei Messung des L-Ascorbinsäuregehalts.	A-10
Tab. A-5:	Externer Standard bei Messung des L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalts.	A-10
Tab. A-6:	Interner Standard - Pipettierschema.	A-11
Tab. A-7:	Interner Standard bei Messung des L-Ascorbinsäuregehalts.	A-12
Tab. A-8:	Interner Standard bei Messung des L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalts.	A-12
Tab. A-9:	VR A – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)	A-13
Tab. A-10:	VR A – Relative Masse (m/m_0)	A-14
Tab. A-11:	VR A – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)	A-15
Tab. A-12:	VR B – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)	A-16
Tab. A-13:	VR B – Relative Masse (m/m_0)	A-17
Tab. A-14:	VR B – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)	A-18
Tab. A-15:	VR C – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)	A-19
Tab. A-16:	VR C – Relative Masse (m/m_0)	A-20
Tab. A-17:	VR C – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)	A-21
Tab. A-18:	VR D – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)	A-22
Tab. A-19:	VR D – Relative Masse (m/m_0)	A-23
Tab. A-20:	VR D – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)	A-24
Tab. A-21:	VR E – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)	A-25
Tab. A-22:	VR E – Relative Masse (m/m_0)	A-26
Tab. A-23:	VR E – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)	A-27
Tab. A-24:	VR F – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)	A-28
Tab. A-25:	VR F – Relative Masse (m/m_0)	A-29
Tab. A-26:	VR F – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)	A-30
Tab. A-27:	VR G – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)	A-31
Tab. A-28:	VR H – L-Ascorbinsäuregehalte (c_{AA}) und Masse je Kohlrabi- knolle (m_{Knolle})	A-32
Tab. A-29:	VR H – Bestimmung der Trockenmasse	A-34
Tab. A-30:	Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 0,5 °C	A-36

Tab. A-31: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 6 °C	A-37
Tab. A-32: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 12 °C	A-38
Tab. A-33: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung.....	A-39
Tab. A-34: Gesamtascorbinsäure- (c_{AA+DHA}), L-Ascorbinsäure- (c_{AA}) und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt (c_{DHA}) im Verlauf der Lagerung bei 6 °C	A-41
Tab. A-35: Relativer Gesamtascorbinsäure-, L-Ascorbinsäure- und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 6 °C.....	A-42
Tab. A-36: Spezifische Oberfläche der Stichproben.....	A-43
Tab. A-37: Temperaturprotokoll des Kühlgeräts.....	A-45
Tab. A-38: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der Lagertemperatur auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe unterschiedlicher spezifischer Oberfläche.. ..	A-46
Tab. A-39: Post-Hoc-Tests zum Effekt der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 0,5 °C, 6 °C und 12 °C.....	A-47
Tab. A-40: Post-Hoc-Tests zum Effekt der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe, ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Lagertemperaturen.	A-48
Tab. A-41: Post-Hoc-Tests zum Effekt der Düngervariante auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi.	A-49

1 Validierung der enzymatischen Methode

Die Messung der L-Ascorbinsäure erfolgt in der vorliegenden Arbeit enzymatisch mit einem Farb-Test zur Bestimmung der L-Ascorbinsäure in Lebensmitteln (L-Ascorbinsäure Farbttest, R-Biopharm AG, Deutschland). Zur Validierung dieser Methode dienen vergleichende HPLC-Messungen eines zertifizierten externen Labors.

Tab. A-1: Vergleichende Messung des L-Ascorbinsäuregehalts von Kohlrabiprüben per HPLC und enzymatisch.

Probe-Nr.	L-Ascorbinsäure [mg/100g]			
	Enzymatisch		HPLC	
	x_i	$\bar{x} (\pm s)$	x_i	\bar{x}
214	38,1	37,7 ($\pm 0,5$)	35,1	36,6
	37,1		38,1	
	37,8			
211	37,8	38,2 ($\pm 0,4$)	35,8	37,4
	38,5		39,0	
	38,3			
200	36,8	38,6 ($\pm 1,9$)	34,6	37,4
	40,6		40,2	
	38,3			
207	41,2	39,3 ($\pm 3,4$)	37,0	39,4
	42,7		41,9	
	35,2			
	38,0			
217	42,9	44,1 ($\pm 1,1$)	42,9	43,4
	44,3		43,9	
	45,0			
216	41,9	42,4 ($\pm 0,6$)	41,8	42,4
	42,2		43,0	
	43,0			
220	43,2	44,2 ($\pm 1,3$)	42,4	43,2
	45,6		44,0	
	43,7			
204	44,5	44,5 ($\pm 0,4$)	44,1	46,0
	44,1		47,9	
	44,8			
Frischware	43,2	45,1 ($\pm 2,2$)	45,3	43,9
	47,4		42,5	
	44,7			
209	43,7	45,3 ($\pm 1,4$)	46,0	45,6
	45,8		45,2	
	46,3			

Tab. A-2: Vergleichende Messung des L-Ascorbinsäuregehalts von Brokkoliprobe per HPLC und enzymatisch

Probe-Nr.	L-Ascorbinsäure [mg/100g]			
	Enzymatisch		HPLC	
	x_i	$\bar{x} (\pm s)$	x_i	\bar{x}
219	75,2	74,6 ($\pm 3,1$)	73,5	77,1
	71,2		80,7	
	77,4			
227	77,0	77,6 ($\pm 0,5$)	77,3	78,6
	77,7		80,0	
	78,1			
230	78,8	80,5 ($\pm 1,5$)	81,5	79,6
	81,0		77,6	
	81,6			
233	83,1	81,1 ($\pm 1,8$)	83,0	84,5
	80,1		86,1	
	80,0			
215	82,2	81,9 ($\pm 2,8$)	90,7	89,8
	84,5		88,9	
	78,9			
201	84,0	82,0 ($\pm 2,7$)	74,4	79,2
	79,0		84,1	
	82,9			
202	86,0	86,4 ($\pm 0,4$)	87,4	87,5
	86,7		87,6	
	86,4			

2 Externer Standard

2.1 Vorgehensweise

Als externer Standard wird die L-Ascorbinsäurekonzentration zweier Arbeitsstandards (200 mg/l und 50 mg/l) enzymatisch bestimmt. Die Arbeitsstandards werden wie in Kapitel 3.4 beschrieben hergestellt und an Stelle der Probelösung zur Messung eingesetzt. Das Probenvolumen beträgt jeweils 0,10 ml (Tab. A-3).

Tab. A-3: Externer Standard - Pipettierschema

In Küvetten pipettieren	Probeleerwert	Probe
Lösung 1* (37 °C)	1,00 ml	1,00 ml
Arbeitsstandard	0,10 ml	0,10 ml
Wasser (entionisiert)	1,50 ml	1,50 ml
AAO-Spatel	1	–
Mischen, 6 min inkubieren bei 37 °C, Inhalt der Leerwertküvetten im Abstand von 2 min jeweils mit dem AAO-Spatel rühren. Extinktion von Probeleerwert und Probe messen (E1).		
PMS-Lösung	0,10 ml	0,10 ml
Mischen, 15 min inkubieren bei 37 °C und anschließend die Extinktionen von Probeleerwert und Probe unmittelbar nacheinander messen (E2).		

* enthält MTT in Natriumphosphat/Citrat-Puffer

Die L-Ascorbinsäurekonzentration beider Arbeitsstandards wird anhand der gemessenen Extinktionsdifferenzen und unter Verwendung der Gleichung Gl. 3-3 (siehe Kap. 3.3.1) berechnet.

2.2 Ergebnisse

Externer Standard bei Messung des L-Ascorbinsäuregehalts nach Kap. 3.3.1 (Versuchsreihe A - F), gemessen am 01.08.2007.

Tab. A-4: Externer Standard bei Messung des L-Ascorbinsäuregehalts.

Messung	Arbeitsstandard 1 (200 mg/l)		Arbeitsstandard 2 (50 mg/l)	
	PL Probe	Probe	PL Probe	Probe
E1	0,141	0,090	0,113	0,090
E2	0,146	0,766	0,120	0,255
E2 - E1	0,005	0,676	0,007	0,165
ΔE	0,671		0,158	
c [mg/l]	188,8		44,5	

Relative Abweichung:

Arbeitsstandard 1 (200 mg/l): 5,6 %

Arbeitsstandard 2 (50 mg/l): 11,1 %

Externer Standard bei Messung des L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalts nach Kap. 3.3.2 (Versuchsreihe G), gemessen am 31.07.2008.

Tab. A-5: Externer Standard bei Messung des L-Ascorbinsäure- und Gesamtascorbinsäuregehalts.

Messung	Arbeitsstandard 1 (200 mg/l)		Arbeitsstandard 2 (50 mg/l)	
	PL Probe	Probe	PL Probe	Probe
E1	0,231	0,181	0,205	0,180
E2	0,232	0,832	0,215	0,332
E2 - E1	0,001	0,651	0,010	0,152
ΔE	0,650		0,142	
c [mg/l]	184,3		40,3	

Relative Abweichung:

Arbeitsstandard 1 (200 mg/l): 7,9 %

Arbeitsstandard 2 (50 mg/l): 19,5 %

3 Interner Standard

3.1 Vorgehensweise

Zur weiteren Überprüfung auf korrekte und störungsfreie Durchführung wird der Arbeitsstandard 1 (200 mg/l) als interner Standard eingesetzt.

Tab. A-6: Interner Standard - Pipettierschema

In Küvetten pipettieren	PL Probe	Probe	PL Standard	Standard	PL Probe +Standard	Probe +Standard
Lösung 1* (37 °C)	1,00 ml	1,00 ml	1,00 ml	1,00 ml	1,00 ml	1,00 ml
Probelösung	0,10 ml	0,10 ml	–	–	0,05 ml	0,05 ml
Arbeitsstandard	–	–	0,10 ml	0,10 ml	0,05 ml	0,05 ml
Wasser (entionisiert)	1,50 ml	1,50 ml	1,50 ml	1,50 ml	1,50 ml	1,50 ml
AAO-Spatel	1	–	1	–	1	–
Mischen, 6 min inkubieren bei 37 °C, Inhalt der Leerwertküvetten im Abstand von 2 min jeweils mit dem AAO-Spatel rühren. Extinktion von Probeleerwert und Probe messen (E1).						
PMS-Lösung	0,10 ml	0,10 ml	0,10 ml	0,10 ml	0,10 ml	0,10 ml
Mischen, 15 min inkubieren bei 37 °C und anschließend die Extinktionen von Probeleerwert und Probe unmittelbar nacheinander messen (E2).						

* enthält MTT in Natriumphosphat/Citrat-Puffer

Die Wiederfindung des Standards wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Wiederfindung [\%]} = \frac{2 \times \Delta E_{\text{Probe+Standard}} - \Delta E_{\text{Probe}}}{\Delta E_{\text{Standard}}}$$

[R-Biopharm o.J.]

3.2 Ergebnisse

Interner Standard bei Messung des L-Ascorbinsäuregehalts nach Kap. 3.3.1 (Versuchsreihe A - F), gemessen am 08.08.2007.

Tab. A-7: Interner Standard bei Messung des L-Ascorbinsäuregehalts

Messung	PL Probe	Probe	PL Standard	Standard	PL Probe +Standard	Probe +Standard
E1	0,125	0,090	0,142	0,092	0,136	0,093
E2	0,130	0,424	0,147	0,753	0,137	0,584
E2 - E1	0,005	0,334	0,005	0,661	0,001	0,491
ΔE	0,329		0,656		0,490	
c [mg/l]	92,6		184,6		137,9	

Wiederfindung = 99,2 %

Relative Abweichung

Arbeitsstandard 1 (200 mg/l): 7,7 %

Interner Standard bei Messung des L-Ascorbinsäure- und Gesamtsäuregehalts nach Kap. 3.3.2 (Versuchsreihe G), gemessen am 30.07.2008.

Tab. A-8: Interner Standard bei Messung des L-Ascorbinsäure- und Gesamtsäuregehalts.

Messung	PL Probe	Probe	PL Standard	Standard	PL Probe +Standard	Probe +Standard
E1	0,209	0,183	0,228	0,184	0,220	0,181
E2	0,213	0,408	0,229	0,842	0,219	0,623
E2 - E1	0,004	0,225	0,001	0,658	-0,001	0,442
ΔE	0,221		0,657		0,443	
c [mg/l]	62,6		186,2		125,6	

Wiederfindung = 101,2 %

Relative Abweichung

Arbeitsstandard 1 (200 mg/l): 6,9 %

4 Ergebnisse – Versuchsreihe A bis H

4.1 Versuchsreihe A

In VR A werden Kohlrabiprobe der Lagerformen Würfel, Stäbchen und kleine Würfel bei einer Lagertemperatur von 6 °C offen im Kühlgerät eingelagert.

Tab. A-9: VR A – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)

Lagerform	Woche	Lagertag				
		0	1	2	4	6
		L-Ascorbinsäuregehalt [mg/100 g]				
Würfel	1*	42,04	51,91	40,11	46,31	42,36
		48,26	46,77	38,46	48,79	43,56
		41,93	48,46	39,99	44,83	44,63
	2	38,97	46,99	47,49	54,28	42,50
		44,60	44,78	45,78	53,41	43,69
		40,66	44,91	47,43	53,14	45,93
	3	39,52	44,82	39,45	40,39	45,16
		40,36	44,30	39,45	42,16	42,76
		39,24	45,79	39,84	40,96	45,83
Stäbchen	1*	42,04	44,59	46,65	45,12	42,83
		48,26	43,18	45,06	45,47	44,09
		41,93	47,22	47,46	46,13	45,31
	2	38,97	44,70	42,94	41,96	42,78
		44,60	43,64	47,59	41,30	42,78
		40,66	45,12	43,76	42,52	42,82
	3	39,52	38,48	39,85	41,24	45,26
		40,36	38,90	38,21	43,14	43,07
		39,24	39,73	38,62	43,14	46,03
kleine Würfel	1*	42,04	40,45	43,71	44,21	43,38
		48,26	40,06	43,17	43,77	42,48
		41,93	41,46	47,65	40,33	42,86
	2	38,97	39,02	40,97	44,42	42,62
		44,60	41,53	40,40	43,58	43,55
		40,66	39,02	39,61	44,15	40,24
	3	39,52	38,58	39,36	37,55	38,26
		40,36	37,75	40,32	36,06	38,55
		39,24	37,06	41,28	/	36,70

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-10: VR A – Relative Masse (m/m_0)

Lagerform	Woche	Masse		Lagertag			
				1	2	4	6
Würfel	1*	m_0	[g]	250	253	259	274
		m	[g]	247	248	249	260
		m/m_0		0,99	0,98	0,96	0,95
	2	m_0	[g]	279	265	270	278
		m	[g]	276	260	261	260
		m/m_0		0,99	0,98	0,97	0,94
	3	m_0	[g]	285	283	284	294
		m	[g]	282	279	276	278
		m/m_0		0,99	0,98	0,97	0,95
Stäbchen	1*	m_0	[g]	235	230	234	234
		m	[g]	231	224	222	217
		m/m_0		0,98	0,97	0,95	0,93
	2	m_0	[g]	234	229	232	230
		m	[g]	230	223	219	209
		m/m_0		0,98	0,97	0,94	0,91
	3	m_0	[g]	235	233	235	232
		m	[g]	231	226	222	213
		m/m_0		0,98	0,97	0,95	0,92
kleine Würfel	1*	m_0	[g]	230	230	230	230
		m	[g]	225	223	217	211
		m/m_0		0,98	0,97	0,94	0,91
	2	m_0	[g]	236	239	236	234
		m	[g]	232	232	223	212
		m/m_0		0,98	0,97	0,94	0,91
	3	m_0	[g]	235	235	235	243
		m	[g]	231	229	224	225
		m/m_0		0,98	0,98	0,95	0,93

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-11: VR A – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)

Lagerform	Woche	Feuchte	Lagertag			
			1	2	4	6
Würfel	1*	M_0 [%]	90,1			
		M [%]	89,6	89,7	90,2	90,0
		M/M_0	0,99	1,00	1,00	1,00
	2	M_0 [%]	92,3			
		M [%]	91,4	92,0	91,3	92,0
		M/M_0	0,99	1,00	0,99	1,00
	3	M_0 [%]	91,8			
		M [%]	92,0	91,8	91,6	91,9
		M/M_0	1,00	1,00	1,00	1,00
Stäbchen	1*	M_0 [%]	90,1			
		M [%]	89,6	89,7	89,6	89,2
		M/M_0	1,00	1,00	0,99	0,99
	2	M_0 [%]	92,3			
		M [%]	92,0	91,6	91,6	91,4
		M/M_0	1,00	0,99	0,99	0,99
	3	M_0 [%]	91,8			
		M [%]	91,7	91,4	91,8	91,4
		M/M_0	1,00	1,00	1,00	1,00
kleine Würfel	1*	M_0 [%]	90,1			
		M [%]	89,8	89,6	/	89,4
		M/M_0	1,00	0,99	/	0,99
	2	M_0 [%]	92,3			
		M [%]	91,6	91,4	91,2	90,9
		M/M_0	0,99	0,99	0,99	0,98
	3	M_0 [%]	91,8			
		M [%]	91,7	91,5	/	91,7
		M/M_0	1,00	1,00	/	1,00

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

4.2 Versuchsreihe B

In VR B werden Kohlrabi-Proben der Lagerformen Julienne und Raspel bei einer Lagertemperatur von 6 °C offen im Kühlgerät eingelagert.

Tab. A-12: VR B – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)

Lagerform	Woche	Lagertag			
		0	2	4	6
		L-Ascorbinsäuregehalt [mg/100 g]			
Julienne	1*	37,10	21,64	21,12	20,66
		36,84	23,87	23,21	21,74
		36,22	22,53	22,35	22,67
	2	40,40	25,19	24,20	21,36
		40,71	26,28	24,60	22,15
		39,75	26,37	/	23,08
	3	55,30	35,61	32,88	32,94
		48,54	34,33	32,93	32,98
		50,66	34,82	33,52	32,68
Raspel	1*	37,10	14,09	11,95	14,09
		36,84	14,76	11,68	12,94
		36,22	14,68	12,09	12,32
	2	40,40	19,23	17,00	17,42
		40,71	16,72	15,91	16,30
		39,75	17,83	17,00	16,94
	3	55,30	19,45	19,51	16,19
		48,54	19,50	16,72	16,40
		50,66	17,67	16,56	15,37

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-13: VR B – Relative Masse (m/m_0)

Lagerform	Woche	Masse	Lagertag		
			2	4	6
Julienne	1*	m_0 [g]	251	250	250
		m [g]	231	225	221
		m/m_0	0,92	0,90	0,88
	2	m_0 [g]	250	250	251
		m [g]	239	234	222
		m/m_0	0,96	0,93	0,89
	3	m_0 [g]	251	250	251
		m [g]	239	231	223
		m/m_0	0,95	0,92	0,89
Raspel	1*	m_0 [g]	250	250	250
		m [g]	240	228	222
		m/m_0	0,96	0,91	0,89
	2	m_0 [g]	250	250	250
		m [g]	240	232	227
		m/m_0	0,96	0,93	0,91
	3	m_0 [g]	250	250	250
		m [g]	238	235	222
		m/m_0	0,95	0,94	0,89

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-14: VR B – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)

Lagerform	Woche	Feuchte	Lagertag		
			2	4	6
Julienne	1*	M_0 [%]		92,1	
		M [%]	91,4	92,1	91,8
		M/M_0	0,99	1,00	1,00
	2	M_0 [%]		91,4	
		M [%]	90,9	90,6	91,2
		M/M_0	0,99	0,99	1,00
	3	M_0 [%]		91,2	
		M [%]	91,1	91,6	91,1
		M/M_0	1,00	1,00	1,00
Raspel	1*	M_0 [%]		92,1	
		M [%]	91,6	92,0	90,4
		M/M_0	0,99	1,00	0,98
	2	M_0 [%]		91,4	
		M [%]	91,6	91,2	90,4
		M/M_0	1,00	1,00	0,99
	3	M_0 [%]		91,2	
		M [%]	91,5	91,3	89,9
		M/M_0	1,00	1,00	0,99

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

4.3 Versuchsreihe C

In VR C werden Kohlrabiprobe der Lagerformen Würfel, Stäbchen und kleine Würfel bei einer Lagertemperatur von 12 °C offen im Kühlgerät eingelagert.

Tab. A-15: VR C – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)

Lagerform	Woche	Lagertag			
		0	2	4	6
		L-Ascorbinsäuregehalt [mg/100 g]			
Würfel	1	43,55	46,14	43,57	45,39
		44,70	44,39	42,65	46,41
		45,12	43,05	42,74	43,56
	2	43,62	44,22	45,99	46,09
		44,98	38,82	47,70	42,22
		44,42	43,68	42,53	41,88
	3*	43,76	43,62	43,23	55,79
		41,06	46,81	38,51	56,78
		40,36	48,83	42,02	55,03
Stäbchen	1	43,55	43,04	43,11	43,12
		44,70	40,20	42,80	41,44
		45,12	45,87	42,71	41,99
	2	43,62	46,94	44,91	42,88
		44,98	43,07	44,00	41,62
		44,42	42,67	43,35	44,20
	3*	43,76	42,54	39,93	39,68
		41,06	40,13	36,93	43,35
		40,36	37,68	39,93	40,06
kleine Würfel	1	43,55	43,60	45,19	42,78
		44,70	41,82	49,36	41,14
		45,12	42,36	50,24	40,02
	2	43,62	40,03	42,19	41,41
		44,98	40,43	41,93	40,50
		44,42	39,23	41,12	41,04
	3*	43,76	39,75	40,62	39,79
		41,06	41,22	37,01	40,92
		40,36	36,54	40,33	41,89

* Ergebnisse aus Versuchswoche 3 (Wechsel der Frischware) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-16: VR C – Relative Masse (m/m_0)

Lagerform	Woche	Masse		Lagertag		
				2	4	6
Würfel	1	m_0	[g]	284	276	280
		m	[g]	272	259	253
		m/m_0		0,96	0,94	0,90
	2	m_0	[g]	287	287	294
		m	[g]	275	269	267
		m/m_0		0,96	0,94	0,91
	3*	m_0	[g]	284	285	280
		m	[g]	272	264	253
		m/m_0		0,96	0,93	0,90
Stäbchen	1	m_0	[g]	279	282	282
		m	[g]	269	265	260
		m/m_0		0,96	0,94	0,92
	2	m_0	[g]	283	283	284
		m	[g]	272	263	256
		m/m_0		0,96	0,93	0,90
	3*	m_0	[g]	281	281	281
		m	[g]	271	261	256
		m/m_0		0,96	0,93	0,91
kleine Würfel	1	m_0	[g]	281	280	280
		m	[g]	268	252	251
		m/m_0		0,96	0,90	0,90
	2	m_0	[g]	281	280	281
		m	[g]	267	258	248
		m/m_0		0,95	0,92	0,88
	3*	m_0	[g]	281	280	280
		m	[g]	268	257	250
		m/m_0		0,96	0,92	0,89

* Ergebnisse aus Versuchswoche 3 (Wechsel der Frischware) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-17: VR C – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)

Lagerform	Woche	Feuchte	Lagertag		
			2	4	6
Würfel	1	M_0 [%]	91,4		
		M [%]	91,5	91,9	92,1
		M/M_0	1,00	1,01	1,01
	2	M_0 [%]	91,0		
		M [%]	92,5	90,7	89,2
		M/M_0	1,02	1,00	0,98
	3*	M_0 [%]	90,7		
		M [%]	92,1	91,3	91,0
		M/M_0	1,02	1,01	1,00
Stäbchen	1	M_0 [%]	91,4		
		M [%]	92,0	91,8	91,6
		M/M_0	1,01	1,00	1,00
	2	M_0 [%]	91,0		
		M [%]	90,6	90,6	90,2
		M/M_0	1,00	0,99	0,99
	3*	M_0 [%]	90,7		
		M [%]	91,2	91,5	91,7
		M/M_0	1,01	1,01	1,01
kleine Würfel	1	M_0 [%]	91,4		
		M [%]	91,6	92,2	91,3
		M/M_0	1,00	1,01	1,00
	2	M_0 [%]	91,0		
		M [%]	90,7	90,8	90,8
		M/M_0	1,00	1,00	1,00
	3*	M_0 [%]	90,7		
		M [%]	91,4	91,4	91,2
		M/M_0	1,01	1,01	1,00

* Ergebnisse aus Versuchswoche 3 (Wechsel der Frischware) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

4.4 Versuchsreihe D

In VR D werden Kohlrabiprobe der Lagerformen Julienne und Raspel bei einer Lagertemperatur von 12 °C offen im Kühlgerät eingelagert.

Tab. A-18: VR D – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)

Lagerform	Woche	Lagertag			
		0	2	4	6
		L-Ascorbinsäuregehalt [mg/100 g]			
Julienne	1	44,76	27,70	18,96	n. a.
		44,49	28,43	21,98	n. a.
		41,88	26,74	19,93	n. a.
	2	42,92	25,16	9,48 ⁺	n. a.
		43,71	27,52	9,71 ⁺	n. a.
		42,96	26,61	7,87 ⁺	n. a.
	3*	63,30	50,54	n. a.	n. a.
		63,05	47,04	35,33	33,34
		61,29	46,07	35,28	30,76
Raspel	1	44,76	13,46	4,06 ⁺⁺	n. a.
		44,49	13,51	5,44 ⁺⁺	n. a.
		41,88	13,24	3,71 ⁺⁺	n. a.
	2	42,92	14,77	n. a.	n. a.
		43,71	15,54	n. a.	n. a.
		42,96	14,40	n. a.	n. a.
	3*	63,30	20,44	11,13	n. a.
		63,05	18,93	10,91	n. a.
		61,29	18,65	13,43	n. a.

* Ergebnisse aus Versuchswoche 3 (zu hoher AA-Gehalt der Frischware) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

⁺ Konzentration der L-Ascorbinsäure in der Probe $c_{AA} < 0,03$ g/l

⁺⁺ Konzentration der L-Ascorbinsäure in der Probe $c_{AA} < 0,02$ g/l

n. a. nicht analysierbar: Probe zeigt Anzeichen des Verderbs, kein klares Filtrat möglich, $E > 1,000$

Tab. A-19: VR D – Relative Masse (m/m_0)

Lagerform	Woche	Masse	Lagertag		
			2	4	6
Julienne	1	m_0 [g]	280	280	280
		m [g]	261	235	213
		m/m_0	0,93	0,84	0,76
	2	m_0 [g]	280	280	281
		m [g]	261	231	216
		m/m_0	0,93	0,82	0,77
	3*	m_0 [g]	280	279	280
		m [g]	255	230	215
		m/m_0	0,91	0,82	0,77
Raspel	1	m_0 [g]	280	280	280
		m [g]	262	237	215
		m/m_0	0,94	0,85	0,77
	2	m_0 [g]	281	280	281
		m [g]	262	233	216
		m/m_0	0,93	0,83	0,77
	3*	m_0 [g]	280	280	/
		m [g]	257	236	/
		m/m_0	0,92	0,84	/

* Ergebnisse aus Versuchswoche 3 (zu hoher AA-Gehalt der Frischware) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-20: VR D – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)

Lagerform	Woche	Feuchte	Lagertag		
			2	4	6
Julienne	1	M_0 [%]	91,3		
		M [%]	90,91	90,72	93,35
		M/M_0	1,00	0,99	1,02
	2	M_0 [%]	92,1		
		M [%]	91,57	93,35	Verderb
		M/M_0	0,99	1,01	Verderb
	3*	M_0 [%]	90,8		
		M [%]	88,32	83,47	89,20
		M/M_0	0,97	0,92	0,98
Raspel	1	M_0 [%]	91,3		
		M [%]	91,15	92,69	Verderb
		M/M_0	1,00	1,01	Verderb
	2	M_0 [%]	92,1		
		M [%]	/	93,51	Verderb
		M/M_0	/	1,01	Verderb
	3*	M_0 [%]	90,8		
		M [%]	90,68	90,16	Verderb
		M/M_0	1,00	0,99	Verderb

* Ergebnisse aus Versuchswoche 3 (zu hoher AA-Gehalt der Frischware) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

4.5 Versuchsreihe E

In VR E werden Kohlrabiprobe der Lagerformen Stäbchen, Julienne und Raspel bei einer Lagertemperatur von 0,5 °C offen im Kühlgerät eingelagert.

Tab. A-21: VR E – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)

Lagerform	Woche	Lagertag			
		0	2	4	6
		L-Ascorbinsäuregehalt [mg/100 g]			
Stäbchen	1*	55,21	50,75	47,49	49,58
		60,72	54,87	49,45	48,31
		55,47	53,50	49,61	49,24
	2	55,40	43,94	46,32	45,67
		55,75	43,98	45,90	45,44
		52,85	43,21	45,12	43,77
	3	46,67	43,96	44,23	46,22
		46,52	44,23	44,36	45,11
		48,56	42,68	43,55	45,17
Julienne	1*	55,21	37,84	39,23	38,89
		60,72	38,96	39,25	39,29
		55,47	36,71	39,37	40,03
	2	55,40	36,08	36,93	38,40
		55,75	35,56	37,53	36,97
		52,85	35,13	36,85	37,17
	3	46,67	31,91	33,29	32,76
		46,52	33,15	34,53	32,14
		48,56	33,01	32,40	33,02
Raspel	1*	55,21	25,94	25,44	23,94
		60,72	24,55	24,83	23,77
		55,47	24,03	24,42	24,01
	2	55,40	23,78	23,27	24,12
		55,75	21,87	23,75	23,05
		52,85	23,87	24,06	24,53
	3	46,67	21,63	21,43	19,29
		46,52	22,33	21,43	20,30
		48,56	21,36	21,09	20,72

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-22: VR E – Relative Masse (m/m_0)

Lagerform	Woche	Masse		Lagertag		
				2	4	6
Stäbchen	1*	m_0	[g]	281	279	280
		m	[g]	274	269	268
		m/m_0		0,98	0,96	0,96
	2	m_0	[g]	279	282	283
		m	[g]	273	273	270
		m/m_0		0,98	0,97	0,95
	3	m_0	[g]	277	279	281
		m	[g]	272	272	269
		m/m_0		0,98	0,97	0,96
Julienne	1*	m_0	[g]	280	280	280
		m	[g]	276	272	268
		m/m_0		0,99	0,97	0,96
	2	m_0	[g]	280	280	280
		m	[g]	276	273	270
		m/m_0		0,99	0,98	0,96
	3	m_0	[g]	280	280	280
		m	[g]	276	273	271
		m/m_0		0,99	0,98	0,97
Raspel	1*	m_0	[g]	280	280	280
		m	[g]	276	273	267
		m/m_0		0,99	0,97	0,95
	2	m_0	[g]	280	280	280
		m	[g]	276	273	270
		m/m_0		0,99	0,97	0,96
	3	m_0	[g]	280	280	280
		m	[g]	277	274	271
		m/m_0		0,99	0,98	0,97

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-23: VR E – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)

Lagerform	Woche	Feuchte	Lagertag		
			2	4	6
Stäbchen	1*	M_0 [%]	91,7		
		M [%]	91,9	91,8	91,6
		M/M_0	1,00	1,00	1,00
	2	M_0 [%]	91,2		
		M [%]	91,5	91,2	91,2
		M/M_0	1,00	1,00	1,00
	3	M_0 [%]	92,9		
		M [%]	92,8	92,9	92,8
		M/M_0	1,00	1,00	1,00
Julienne	1*	M_0 [%]	91,7		
		M [%]	91,3	91,6	91,2
		M/M_0	1,00	1,00	0,99
	2	M_0 [%]	91,2		
		M [%]	90,8	90,8	90,2
		M/M_0	1,00	1,00	0,99
	3	M_0 [%]	92,9		
		M [%]	92,0	92,0	92,1
		M/M_0	0,99	0,99	0,99
Raspel	1*	M_0 [%]	91,7		
		M [%]	91,8	91,7	91,0
		M/M_0	1,00	1,00	0,99
	2	M_0 [%]	91,2		
		M [%]	91,4	91,5	91,5
		M/M_0	1,00	1,00	1,00
	3	M_0 [%]	92,9		
		M [%]	92,7	92,8	92,3
		M/M_0	1,00	1,00	0,99

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

4.6 Versuchsreihe F

In VR F werden Kohlrabiprobe der Lagerform Stäbchen unterschiedlich verpackt (offen, Frischhaltebeutel, MAP) bei einer Lagertemperatur von 12 °C im Kühlgerät eingelagert.

Tab. A-24: VR F – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)

Verpackung	Woche	Lagertag			
		0	2	4	6
		L-Ascorbinsäuregehalt [mg/100 g]			
offen	1*	36,30	39,33	37,15	24,62
		34,48	35,88	36,13	27,10
		38,08	33,35	35,60	26,97
	2	49,10	48,61	49,12	53,99
		42,88	48,21	50,02	50,42
		45,73	49,74	46,43	51,85
	3	48,68	56,62	54,33	46,18
		48,54	52,37	54,58	47,01
		47,09	57,82	54,45	46,48
Frischhalte- beutel	1*	36,30	29,22	33,31	32,74
		34,48	34,82	31,21	36,92
		38,08	35,79	36,25	31,75
	2	49,10	45,79	47,26	43,11
		42,88	46,39	48,51	44,50
		45,73	46,62	48,51	44,26
	3	48,68	52,12	44,47	46,56
		48,54	51,84	46,33	46,29
		47,09	52,54	42,55	43,75
MAP	1*	36,30	34,96	34,23	38,02
		34,48	34,68	36,61	36,75
		38,08	37,18	33,53	35,77
	2	49,10	49,27	50,58	47,96
		42,88	48,12	44,78	48,71
		45,73	51,91	47,29	49,49
	3	48,68	54,27	51,28	52,43
		48,54	54,00	54,55	50,88
		47,09	47,77	52,40	51,73

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-25: VR F – Relative Masse (m/m_0)

Verpackung	Woche	Masse	Lagertag		
			2	4	6
offen	1*	m_0 [g]	270	270	270
		m [g]	256	245	237
		m/m_0	0,95	0,91	0,88
	2	m_0 [g]	270	273	273
		m [g]	257	249	232
		m/m_0	0,95	0,91	0,85
	3	m_0 [g]	271	271	271
		m [g]	256	247	233
		m/m_0	0,94	0,91	0,86
Frischhalte- beutel	1*	m_0 [g]	270	271	270
		m [g]	270	270	268
		m/m_0	1,00	0,99	0,99
	2	m_0 [g]	271	270	270
		m [g]	270	269	269
		m/m_0	1,00	0,99	1,00
	3	m_0 [g]	273	274	272
		m [g]	273	273	269
		m/m_0	1,00	0,99	0,99
MAP	1*	m_0 [g]	269	273	274
		m [g]	269	273	274
		m/m_0	1,00	1,00	1,00
	2	m_0 [g]	273	270	270
		m [g]	272	269	269
		m/m_0	1,00	1,00	0,99
	3	m_0 [g]	275	270	271
		m [g]	273	269	270
		m/m_0	1,00	1,00	1,00

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

Tab. A-26: VR F – Relativer Feuchtegehalt (M/M_0)

Lagerform	Woche	Feuchte	Lagertag		
			2	4	6
offen	1*	M_0 [%]		92,7	
		M [%]	92,4	92,5	91,1
		M/M_0	1,00	1,00	0,98
	2	M_0 [%]		91,6	
		M [%]	91,8	91,3	90,8
		M/M_0	1,00	1,00	0,99
	3	M_0 [%]		90,9	
		M [%]	90,2	91,1	89,2
		M/M_0	0,99	1,00	0,98
Frischhalte- beutel	1*	M_0 [%]		92,7	
		M [%]	92,6	93,0	93,2
		M/M_0	1,00	1,00	1,01
	2	M_0 [%]		91,6	
		M [%]	91,6	91,7	92,2
		M/M_0	1,00	1,00	1,01
	3	M_0 [%]		90,9	
		M [%]	91,3	92,0	91,9
		M/M_0	1,00	1,01	1,01
MAP	1*	M_0 [%]		92,7	
		M [%]	92,8	92,8	93,2
		M/M_0	1,00	1,00	1,01
	2	M_0 [%]		91,6	
		M [%]	92,4	92,3	92,2
		M/M_0	1,01	1,01	1,01
	3	M_0 [%]		90,9	
		M [%]	90,8	92,0	91,7
		M/M_0	1,00	1,01	1,01

* Ergebnisse aus Versuchswoche 1 (Vorversuche) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

4.7 Versuchsreihe G

In VR G werden Kohlrabiprüfen der Lagerformen Julienne und Raspel bei einer Lagertemperatur von 6 °C offen im Kühlgerät eingelagert. Zusätzlich zum L-Ascorbinsäuregehalt wird in dieser Versuchsreihe auch der Gesamtascorbinsäuregehalt der Proben bestimmt.

Tab. A-27: VR G – L-Ascorbinsäuregehalte (absolut)

Lagerform	Woche	Lagertag				
		0	1	2	4	6
L-Ascorbinsäuregehalt [mg/100 g]						
Julienne	1	31,67	23,72	22,28	22,55	22,65
		29,20	23,06	21,40	21,27	20,34
		30,11	21,68	20,72	21,17	21,01
	2*	46,40	35,94	35,63	36,58	35,04
		42,18	33,08	35,25	37,18	33,29
		39,13	32,00	33,01	32,97	34,29
	3	50,41	35,37	33,86	34,72	33,05
		49,40	33,34	31,96	32,90	29,54
		48,24	32,49	33,86	33,42	29,85
Raspel	1	31,67	13,16	12,35	10,35	9,76
		29,20	11,63	10,82	10,14	9,56
		30,11	11,37	9,73	9,16	9,28
	2*	46,40	16,11	17,51	16,96	17,02
		42,18	15,81	15,08	15,38	15,43
		39,13	14,74	14,67	14,89	14,94
	3	50,41	22,42	23,65	22,89	23,13
		49,40	22,63	23,90	23,42	23,08
		48,24	23,16	25,06	22,38	19,71
Gesamtascorbinsäuregehalt [mg/100 g]						
Julienne	1	35,21	30,42	28,06	25,10	24,75
		35,35	31,93	29,46	26,41	25,65
		35,42	31,98	28,58	27,66	26,35
	2*	50,19	43,19	46,18	37,13	33,48
		48,66	45,00	43,49	38,12	34,15
		47,52	45,60	45,93	36,78	34,28
	3	48,58	39,34	36,46	33,77	30,21
		51,33	41,35	38,19	35,90	32,81
		50,19	45,35	38,76	35,90	31,64
Raspel	1	35,21	22,17	20,49	14,43	14,17
		35,35	22,28	19,80	15,81	14,21
		35,42	22,60	20,63	15,41	14,72
	2*	50,19	29,99	28,33	25,42	25,50
		48,66	31,61	28,91	24,61	24,70
		47,52	31,28	28,49	22,95	23,03
	3	48,58	35,85	31,40	26,86	23,39
		51,33	35,63	32,30	26,96	24,61
		50,19	37,02	33,32	28,18	24,66

* Ergebnisse aus Versuchswoche 2 (Kohlrabiknollen außergewöhnlich klein) gehen nicht in die weitere Auswertung mit ein.

4.8 Versuchsreihe H

In VR H wird der L-Ascorbinsäuregehalt frischer Kohlrabiknollen nach Einsatz unterschiedlicher Stickstoff- und Schwefeldüngung untersucht.

Tab. A-28: VR H – L-Ascorbinsäuregehalte (c_{AA}) und Masse je Kohlrabiknolle (m_{Knolle})

Düngevariante		Gefäß-Nr.	m_{Knolle} [g]	c_{AA}		
				[mg/100 g]	[mg/g TM]	[mg/Knolle] ⁺
1	1 g N / 0 g S	333	301	62,9	7,4	189,6
		334	287	52,2	7,1	149,8
		335	260	61,1	6,0	158,9
		336	367	46,8	5,6	171,6
		337	283	50,2	6,0	142,2
		338	148	74,7	7,5	110,5
		\bar{x}	275	58,0	6,6	153,8
		s	72	10,3	0,8	27,0
		2	1 g N / 0,2 g S	339	218	50,2
340	200			69,0	7,3	137,9
341	519			34,8	4,5	180,5
342	367			47,2	4,9	173,5
343	272			57,9	5,7	157,3
344	280			53,3	5,1	149,4
\bar{x}	310			52,1	5,4	151,4
s	119			11,4	1,0	25,7
3	1 g N / 0,6 g S			345	224	64,1
		346	292	42,8	4,1	125,1
		347	298	47,7	4,1	142,2
		348	395	46,5	5,0	183,5
		349	437	40,2	4,4	175,6
		350	237	56,1	5,0	133,0
		\bar{x}	314	49,6	4,9	150,6
		s	85	9,0	0,9	23,6
		4	2 g N / 0 g S	351	durchgefault	
352	343			20,3	2,9	69,7
353	359			55,4	6,3	198,9
354	250			49,6	6,1	124,3
355	354			35,1	4,7	124,2
356	281			32,1	4,4	90,0
\bar{x}	318			38,5	4,9	121,4
s	49			14,1	1,4	49,2
5	2 g N / 0,2 g S			357	285	61,7
		358	574	34,5	3,6	198,2
		359	835	35,0	4,4	292,5
		360	350	50,7	5,5	177,4
		361	669	34,4	4,4	230,2
		362	283	44,5	4,8	125,9
		\bar{x}	499	43,5	4,8	200,0
		s	229	11,1	1,0	56,7

Tab. A-28: VR H – L-Ascorbinsäuregehalte (c_{AA}) und Masse je Kohlrabiknolle (m_{Knolle}) (Fortsetzung)

Düngevariante		Gefäß-Nr.	m_{Knolle} [g]	c_{AA}		
				[mg/100 g]	[mg/g TM]	[mg/Knolle] ⁺
6	2 g N / 0,6 g S	363	613	41,2	14,9*	/
		364	573	38,7	4,6	221,6
		365	650	39,8	4,8	258,8
		366	532	49,0	5,4	260,5
		367	518	29,2	3,2	151,4
		368	349	38,5	3,9	134,2
		\bar{x}	539	39,4	4,4	205,3
		s	106	6,3	0,8	59,5
7	4 g N / 0 g S	369		verloren		
		370	108	66,3	6,9	71,7
		371	137	64,0	6,2	87,6
		372	185	54,2	5,7	100,2
		373	56	39,3	4,7	22,1
		374	80	50,3	5,3	40,1
		\bar{x}	113	54,8	5,8	64,3
		s	50	10,9	0,9	32,6
8	4 g N / 0,2 g S	375	253	45,8	6,8	115,9
		376	283	56,4	6,8	159,6
		377	84	46,5	4,7	39,2
		378	284	37,0	5,0	105,2
		379		durchgefaut		
		380	446	36,4	4,8	162,4
		\bar{x}	270	44,4	5,6	116,5
		s	129	8,2	1,1	50,2
9	4 g N / 0,6 g S	381	338	38,9	5,3	131,3
		382	486	39,0	5,8	189,4
		383	230	33,6	4,3	77,4
		384	467	32,7	4,1	152,7
		385	380	39,0	5,3	148,4
		386	364	34,0	4,4	123,9
		\bar{x}	378	36,2	4,8	137,2
		s	93	3,1	0,7	37,1

* Bestimmung der Trockenmasse vermutlich fehlerhaft, daher zu hoher Wert. Probe wird von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

⁺ Errechnet anhand der L-Ascorbinsäuregehalte in mg pro g Trockenmasse und der Trockenmassegehalte der jeweiligen Knollen.

Von jeder geernteten Kohlrabiknolle wird eine Hälfte zerkleinert und von den Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenernährung zur Bestimmung der Trockenmasse genutzt.

Tab. A-29: VR H – Bestimmung der Trockenmasse

Düngevariante		Gefäß-Nr.	Restknolle		
			m_{frisch} [g]	m_{trocken} [g]	TM [%]
1	1 g N / 0 g S	333	170,4	14,4	8,5
		334	103,6	7,6	7,3
		335	109,0	11,0	10,1
		336	104,5	8,8	8,4
		337	100,0	8,4	8,4
		338	41,7	4,2	10,0
2	1 g N / 0,2 g S	339	93,6	10,1	10,8
		340	84,6	8,0	9,4
		341	108,4	8,4	7,7
		342	100,4	9,6	9,6
		343	100,1	10,1	10,1
		344	100,0	10,4	10,4
3	1 g N / 0,6 g S	345	105,0	10,4	9,9
		346	113,9	11,8	10,3
		347	101,5	11,7	11,5
		348	103,5	9,6	9,3
		349	101,5	9,3	9,2
		350	100,2	11,3	11,3
4	2 g N / 0 g S	351	durchgefaut		
		352	102,4	7,3	7,1
		353	100,3	8,8	8,8
		354	101,4	8,3	8,2
		355	100,8	7,6	7,5
		356	100,3	7,3	7,3
5	2 g N / 0,2 g S	357	159,2	15,4	9,7
		358	106,7	10,2	9,5
		359	118,6	9,4	7,9
		360	103,0	9,6	9,3
		361	100,7	8,0	7,9
		362	100,5	9,4	9,3
6	2 g N / 0,6 g S	363	104,8	2,9*	2,8*
		364	108,4	9,1	8,4
		365	103,5	8,7	8,4
		366	100,2	9,2	9,1
		367	100,1	9,1	9,1
		368	100,2	9,8	9,8

* Bestimmung der Trockenmasse vermutlich fehlerhaft, Wert ungewöhnlich niedrig. Probe wird von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Tab. A-29: VR H – Bestimmung der Trockenmasse (Fortsetzung)

Düngevariante		Gefäß-Nr.	Restknolle		
			m_{frisch} [g]	m_{trocken} [g]	TM [%]
7	4 g N / 0 g S	369		verloren	
		370	31,2	3,0	9,5
		371	39,4	4,1	10,3
		372	66,3	6,3	9,5
		373	19,9	1,7	8,4
		374	28,8	2,7	9,4
8	4 g N / 0,2 g S	375	124,1	8,4	6,8
		376	100,2	8,4	8,3
		377	31,7	3,1	9,9
		378	101,0	7,5	7,4
		379		durchgefaut	
		380	100,2	7,6	7,5
9	4 g N / 0,6 g S	381	102,4	7,6	7,4
		382	101,7	6,8	6,7
		383	92,3	7,3	7,9
		384	100,9	8,1	8,0
		385	103,5	7,7	7,4
		386	100,8	7,9	7,8

4.9 Relative L-Ascorbinsäuregehalte (c/c_0) – VR A bis E

Tab. A-30: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 0,5 °C

Lagerform	Lagertag			
	0	2	4	6
	c/c_0			
Stäbchen	1,00	0,80	0,85	0,84
	1,00	0,80	0,84	0,83
	1,00	0,79	0,83	0,80
	1,00	0,93	0,94	0,98
	1,00	0,94	0,94	0,95
	1,00	0,90	0,92	0,96
	\bar{x}	1,00	0,86	0,88
s	/	0,07	0,05	0,08
Julienne	1,00	0,66	0,68	0,70
	1,00	0,65	0,69	0,68
	1,00	0,64	0,67	0,68
	1,00	0,68	0,70	0,69
	1,00	0,70	0,73	0,68
	1,00	0,70	0,69	0,70
	\bar{x}	1,00	0,67	0,69
s	/	0,02	0,02	0,01
Raspel	1,00	0,44	0,43	0,44
	1,00	0,40	0,43	0,42
	1,00	0,44	0,44	0,45
	1,00	0,46	0,45	0,41
	1,00	0,47	0,45	0,43
	1,00	0,45	0,45	0,44
	\bar{x}	1,00	0,44	0,44
s	/	0,02	0,01	0,01

Tab. A-31: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 6 °C

Lagerform	Lagertag			
	0	2	4	6
	c/c_0			
Würfel	1,00	1,15	1,31	1,03
	1,00	1,11	1,29	1,05
	1,00	1,15	1,28	1,11
	1,00	0,99	1,02	1,14
	1,00	0,99	1,06	1,08
	1,00	1,00	1,03	1,15
	\bar{x} s	1,00 /	1,06 0,08	1,17 0,14
Stäbchen	1,00	1,04	1,01	1,03
	1,00	1,15	1,00	1,03
	1,00	1,06	1,03	1,03
	1,00	1,00	1,04	1,14
	1,00	0,96	1,09	1,08
	1,00	0,97	1,09	1,16
	\bar{x} s	1,00 /	1,03 0,07	1,04 0,04
kleine Würfel	1,00	0,99	1,07	1,03
	1,00	0,98	1,05	1,05
	1,00	0,96	1,07	0,97
	1,00	0,99	0,95	0,96
	1,00	1,02	0,91	0,97
	1,00	1,04	/	0,92
	\bar{x} s	1,00 /	0,99 0,03	1,01 0,08
Julienne	1,00	0,63	0,60	0,53
	1,00	0,65	0,61	0,55
	1,00	0,65	/	0,57
	1,00	0,69	0,64	0,64
	1,00	0,67	0,64	0,64
	1,00	0,68	0,65	0,63
	\bar{x} s	1,00 /	0,66 0,02	0,63 0,02
Raspel	1,00	0,48	0,42	0,43
	1,00	0,41	0,40	0,40
	1,00	0,44	0,42	0,42
	1,00	0,38	0,38	0,31
	1,00	0,38	0,32	0,32
	1,00	0,34	0,32	0,30
	\bar{x} s	1,00 /	0,41 0,05	0,38 0,05

Tab. A-32: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 12 °C

Lagerform	Lagertag			
	0	2	4	6
	c/c_0			
Würfel	1,00	1,04	0,98	1,02
	1,00	1,00	0,96	1,04
	1,00	0,97	0,96	0,98
	1,00	1,00	1,04	1,04
	1,00	0,88	1,08	0,95
	1,00	0,99	0,96	0,94
	\bar{x} s	1,00 /	0,98 0,05	1,00 0,05
Stäbchen	1,00	0,97	0,97	0,97
	1,00	0,90	0,96	0,93
	1,00	1,03	0,96	0,94
	1,00	1,06	1,01	0,97
	1,00	0,97	0,99	0,94
	1,00	0,96	0,98	1,00
	\bar{x} s	1,00 /	0,98 0,05	0,98 0,02
kleine Würfel	1,00	0,98	1,02	0,96
	1,00	0,94	1,11	0,93
	1,00	0,95	1,13	0,90
	1,00	0,90	0,95	0,93
	1,00	0,91	0,95	0,91
	1,00	0,88	0,93	0,93
	\bar{x} s	1,00 /	0,93 0,04	1,01 0,09
Julienne	1,00	0,63	0,43	n. a.
	1,00	0,65	0,50	n. a.
	1,00	0,61	0,46	n. a.
	1,00	0,58	0,22 ⁺	n. a.
	1,00	0,64	0,22 ⁺	n. a.
	1,00	0,62	0,18 ⁺	n. a.
	\bar{x} s	1,00 /	0,62 0,02	0,46 0,04
Raspel	1,00	0,31	0,09 ⁺⁺	n. a.
	1,00	0,31	0,12 ⁺⁺	n. a.
	1,00	0,30	0,08 ⁺⁺	n. a.
	1,00	0,34	n. a.	n. a.
	1,00	0,36	n. a.	n. a.
	1,00	0,33	n. a.	n. a.
	\bar{x} s	1,00 /	0,33 0,02	0,10 0,02

⁺ Konzentration der L-Ascorbinsäure in der Probe $c_{AA} < 0,03$ g/l (Werte nicht in Mittelwertberechnung mit einbezogen)

⁺⁺ Konzentration der L-Ascorbinsäure in der Probe $c_{AA} < 0,02$ g/l (Werte in Mittelwertberechnung mit einbezogen, um eine Tendenz am Tag 4 zeigen zu können)

n. a. nicht analysierbar: Probe zeigt Anzeichen des Verderbs, kein klares Filtrat möglich, $E > 1,000$

Tab. A-33: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung

Lagerform	Lagertag				
	0	2	4	6	
	c/c_0				
Würfel	1,00	1,15	1,31	1,03	
	1,00	1,11	1,29	1,05	
	1,00	1,15	1,28	1,11	
	1,00	0,99	1,02	1,14	
	1,00	0,99	1,06	1,08	
	1,00	1,00	1,03	1,15	
	1,00	1,04	0,98	1,02	
	1,00	1,00	0,96	1,04	
	1,00	0,97	0,96	0,98	
	1,00	1,00	1,04	1,04	
	1,00	0,88	1,08	0,95	
	1,00	0,99	0,96	0,94	
	\bar{x}	1,00	1,02	1,08	1,04
	s	/	0,08	0,13	0,07
Stäbchen	1,00	0,80	0,85	0,84	
	1,00	0,80	0,84	0,83	
	1,00	0,79	0,83	0,80	
	1,00	0,93	0,94	0,98	
	1,00	0,94	0,94	0,95	
	1,00	0,90	0,92	0,96	
	1,00	1,04	1,01	1,03	
	1,00	1,15	1,00	1,03	
	1,00	1,06	1,03	1,03	
	1,00	1,00	1,04	1,14	
	1,00	0,96	1,09	1,08	
	1,00	0,97	1,09	1,16	
	1,00	0,97	0,97	0,97	
	1,00	0,90	0,96	0,93	
	1,00	1,03	0,96	0,94	
	1,00	1,06	1,01	0,97	
	1,00	0,97	0,99	0,94	
	1,00	0,96	0,98	1,00	
	\bar{x}	1,00	0,96	0,97	0,98
s	/	0,09	0,08	0,10	
kleine Würfel	1,00	0,99	1,07	1,03	
	1,00	0,98	1,05	1,05	
	1,00	0,96	1,07	0,97	
	1,00	0,99	0,95	0,96	
	1,00	1,02	0,91	0,97	
	1,00	1,04	/	0,92	
	1,00	0,98	1,02	0,96	
	1,00	0,94	1,11	0,93	
	1,00	0,95	1,13	0,90	
	1,00	0,90	0,95	0,93	
	1,00	0,91	0,95	0,91	
	1,00	0,88	0,93	0,93	
	\bar{x}	1,00	0,96	1,01	0,96
s	/	0,05	0,08	0,05	
$a \leq 0,57 \text{ m}^2/\text{kg}$					
\bar{x}	1,00	0,98	1,01	0,99	
s	/	0,08	0,11	0,08	

**Tab. A-33: Relativer L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung
(Fortsetzung)**

Lageform	Lagertag				
	0	2	4	6	
	c/c_0				
Julienne	1,00	0,66	0,68	0,70	
	1,00	0,65	0,69	0,68	
	1,00	0,64	0,67	0,68	
	1,00	0,68	0,70	0,69	
	1,00	0,70	0,73	0,68	
	1,00	0,70	0,69	0,70	
	1,00	0,63	0,60	0,53	
	1,00	0,65	0,61	0,55	
	1,00	0,65	/	0,57	
	1,00	0,69	0,64	0,64	
	1,00	0,67	0,64	0,64	
	1,00	0,68	0,65	0,63	
	1,00	0,63	0,43	n. a.	
	1,00	0,65	0,50	n. a.	
	1,00	0,61	0,46	n. a.	
	1,00	0,58	0,22 ⁺	n. a.	
	1,00	0,64	0,22 ⁺	n. a.	
	1,00	0,62	0,18 ⁺	n. a.	
	\bar{x}	1,00	0,65	0,62	/
	s	/	0,03	0,09	/
Raspel	1,00	0,44	0,43	0,44	
	1,00	0,40	0,43	0,42	
	1,00	0,44	0,44	0,45	
	1,00	0,46	0,45	0,41	
	1,00	0,47	0,45	0,43	
	1,00	0,45	0,45	0,44	
	1,00	0,48	0,42	0,43	
	1,00	0,41	0,40	0,40	
	1,00	0,44	0,42	0,42	
	1,00	0,38	0,38	0,31	
	1,00	0,38	0,32	0,32	
	1,00	0,34	0,32	0,30	
	1,00	0,31	0,09 ⁺⁺	n. a.	
	1,00	0,31	0,12 ⁺⁺	n. a.	
	1,00	0,30	0,08 ⁺⁺	n. a.	
	1,00	0,34	n. a.	n. a.	
	1,00	0,36	n. a.	n. a.	
	1,00	0,33	n. a.	n. a.	
	\bar{x}	1,00	0,39	0,35	/
	s	/	0,06	0,13	/

⁺ Konzentration der L-Ascorbinsäure in der Probe $c_{AA} < 0,03$ g/l (Werte nicht in Mittelwertberechnung mit einbezogen)

⁺⁺ Konzentration der L-Ascorbinsäure in der Probe $c_{AA} < 0,02$ g/l (Werte in Mittelwertberechnung mit einbezogen, um eine Tendenz am Tag 4 zeigen zu können)

n. a. nicht analysierbar: Probe zeigt Anzeichen des Verderbs, kein klares Filtrat möglich, $E > 1,000$

4.10 Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt und relative Gesamtascorbinsäure- und L-Ascorbinsäuregehalte (c/c_0) –VR G

Tab. A-34: Gesamtascorbinsäure- (c_{AA+DHA}), L-Ascorbinsäure- (c_{AA}) und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt (c_{DHA}) im Verlauf der Lagerung bei 6 °C

Lageform		Lagertag				
		0	1	2	4	6
Julienne	c_{AA} [mg/100 g]	31,67	23,72	22,28	22,55	22,65
		29,20	23,06	21,40	21,27	20,34
		30,11	21,68	20,72	21,17	21,01
		50,41	35,37	33,86	34,72	33,05
		49,40	33,34	31,96	32,90	29,54
		48,24	32,49	33,86	33,42	29,85
	\bar{x}	45,96	33,70	33,93	34,63	32,51
	s	4,42	1,59	1,37	1,87	2,29
	c_{AA+DHA} [mg/100 g]	35,21	30,42	28,06	25,10	24,75
		35,35	31,93	29,46	26,41	25,65
		35,42	31,98	28,58	27,66	26,35
		48,58	39,34	36,46	33,77	30,21
		51,33	41,35	38,19	35,90	32,81
		50,19	45,35	38,76	35,90	31,64
	\bar{x}	49,41	43,30	41,50	36,27	32,76
s	1,39	2,53	4,23	1,48	1,58	
c_{DHA} [mg/100 g]	3,41	9,49	7,49	1,62	0,25	
Raspel	c_{AA} [mg/100 g]	31,67	13,16	12,35	10,35	9,76
		29,20	11,63	10,82	10,14	9,56
		30,11	11,37	9,73	9,16	9,28
		50,41	22,42	23,65	22,89	23,13
		49,40	22,63	23,90	23,42	23,08
		48,24	23,16	25,06	22,38	19,71
	\bar{x}	45,96	19,15	19,98	19,32	18,89
	s	4,42	3,97	4,75	3,99	3,67
	c_{AA+DHA} [mg/100 g]	35,21	22,17	20,49	14,43	14,17
		35,35	22,28	19,80	15,81	14,21
		35,42	22,60	20,63	15,41	14,72
		48,58	35,85	31,40	26,86	23,39
		51,33	35,63	32,30	26,96	24,61
		50,19	37,02	33,32	28,18	24,66
	\bar{x}	49,41	33,56	30,46	25,83	24,31
s	1,39	2,94	2,16	1,89	0,92	
c_{DHA} [mg/100 g]	3,41	14,25	10,36	6,44	5,37	

Tab. A-35: Relativer Gesamtascorbinsäure-, L-Ascorbinsäure- und Dehydro-L-Ascorbinsäuregehalt im Verlauf der Lagerung bei 6 °C

Lageform		Lagertag				
		0	1	2	4	6
Julienne	c_{AA}/c_0^*	0,95	0,74	0,73	0,75	0,72
		0,86	0,68	0,72	0,76	0,68
		0,80	0,66	0,68	0,68	0,70
		1,01	0,71	0,68	0,69	0,66
		0,99	0,67	0,64	0,66	0,59
		0,96	0,65	0,68	0,67	0,60
	\bar{x}	0,93	0,68	0,69	0,70	0,66
	S	0,08	0,03	0,03	0,04	0,05
	c_{AA+DHA}/c_0^*	1,00	0,89	0,95	0,76	0,69
		1,00	0,92	0,89	0,78	0,70
		1,00	0,93	0,94	0,75	0,70
		1,00	0,79	0,73	0,68	0,60
		1,00	0,83	0,76	0,72	0,66
		1,00	0,91	0,77	0,72	0,63
	\bar{x}	1,00	0,88	0,84	0,73	0,66
S	/	0,06	0,10	0,04	0,04	
c_{DHA}/c_0^*	0,07	0,19	0,15	0,03	0,00	
Raspel	c_{AA}/c_0^*	0,95	0,33	0,36	0,35	0,35
		0,86	0,32	0,31	0,32	0,32
		0,80	0,30	0,30	0,31	0,31
		1,01	0,45	0,47	0,46	0,46
		0,99	0,45	0,48	0,47	0,46
		0,96	0,46	0,50	0,45	0,39
	\bar{x}	0,93	0,39	0,40	0,39	0,38
	S	0,08	0,08	0,09	0,08	0,07
	c_{AA+DHA}/c_0^*	1,00	0,61	0,58	0,52	0,52
		1,00	0,65	0,59	0,50	0,51
		1,00	0,64	0,58	0,47	0,47
		1,00	0,72	0,63	0,54	0,47
		1,00	0,71	0,65	0,54	0,49
		1,00	0,74	0,67	0,56	0,49
	\bar{x}	1,00	0,68	0,62	0,52	0,49
S	/	0,05	0,04	0,03	0,02	
c_{DHA}/c_0^*	0,07	0,29	0,21	0,13	0,11	

* c_0 ist jeweils der Gesamtascorbinsäuregehalt der Frischware am Tag 0

5 Lagertemperaturen und spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche der untersuchten Lagerformen Würfel, Stäbchen, kleine Würfel, Julienne und Raspel wird in jeder Versuchsreihe durch Vermessen und Wiegen entsprechender Stichprobe ermittelt. Tab. A-36 fasst die ermittelten Oberflächen der jeweiligen Stichproben zusammen.

Tab. A-36: Spezifische Oberfläche der Stichproben

Lagerform	Spezifische Oberfläche a [m^2/kg]		
	0,5 °C	6 °C	12 °C
Würfel	/	0,15	0,14
	/	0,14	0,14
	/	0,14	0,14
	/	0,14	0,14
	/	0,13	0,14
	\bar{x} ($\pm s$)	/	0,14 ($\pm 0,01$)
$\bar{\bar{x}}$ ($\pm s$)	0,14 ($\pm 0,01$)		
Stäbchen	0,39	0,35	0,39
	0,40	0,37	0,43
	0,37	0,40	0,37
	0,39	0,34	0,39
	0,39	0,37	0,42
	\bar{x} ($\pm s$)	0,39 ($\pm 0,01$)	0,37 ($\pm 0,03$)
$\bar{\bar{x}}$ ($\pm s$)	0,38 ($\pm 0,02$)		
kleine Würfel	/	0,59	0,52
	/	0,59	0,57
	/	0,57	0,52
	/	0,57	0,61
	/	0,58	0,57
	\bar{x} ($\pm s$)	/	0,58 ($\pm 0,01$)
$\bar{\bar{x}}$ ($\pm s$)	0,57 ($\pm 0,03$)		

Tab. A-36: Spezifische Oberfläche der Stichproben (Fortsetzung)

Lagerform	Spezifische Oberfläche a [m ² /kg]		
	0,5 °C	6 °C	12 °C
Julienne	1,38	1,63	1,44
	1,53	1,59	1,53
	1,65	1,77	1,48
	1,58	1,41	1,68
	1,56	1,53	1,57
	1,62	1,48	1,41
	1,37	1,37	1,51
	1,68	1,36	1,34
	1,69	1,46	1,45
	1,33	1,43	1,81
	/	/	1,50
	/	/	1,48
	/	/	1,40
	/	/	1,48
	/	/	1,50
	/	/	1,47
	/	/	1,09
	/	/	1,38
	/	/	1,48
	/	/	1,44
\bar{x} ($\pm s$)	1,54 ($\pm 0,13$)	1,50 ($\pm 0,13$)	1,47 ($\pm 0,14$)
\bar{x} ($\pm s$)	1,50 ($\pm 0,13$)		
Raspel	3,02	2,90	2,67
	3,13	3,12	2,43
	3,01	2,92	1,98
	3,45	2,79	2,34
	2,81	2,61	2,67
	3,58	4,36	4,04
	4,03	3,82	2,96
	4,13	4,04	2,66
	4,04	3,29	3,76
	4,60	3,49	2,81
	/	/	2,40
	/	/	2,46
	/	/	2,82
	/	/	2,53
	/	/	2,40
	/	/	3,69
	/	/	2,71
	/	/	3,24
	/	/	4,05
	/	/	3,23
\bar{x} ($\pm s$)	3,58 ($\pm 0,60$)	3,33 ($\pm 0,58$)	2,89 ($\pm 0,59$)
\bar{x} ($\pm s$)	3,17 ($\pm 0,65$)		

Die Lagertemperatur wird täglich zur gleichen Uhrzeit protokolliert. Tab. A-37 gibt einen Überblick über die gemessenen Temperaturen in den Versuchswochen der jeweiligen Versuchsreihen (A bis E), die zur Untersuchung des Einflusses der Lagertemperatur auf den L-Ascorbinsäuregehalt herangezogen werden (siehe Kap. 4.2.2).

Tab. A-37: Temperaturprotokoll des Kühlgeräts

Zieltemperatur	Lagertemperatur T [°C]	
	Stäbchen	Julienne / Raspel
0,5 °C	0,8	0,8
	0,6	0,5
	0,3	0,8
	0,1	0,5
	0,1	0,6
	0,2	0,5
	0,3	0,6
	0,2	0,6
	0,5	0,7
	0,4	0,8
	0,8	0,9
	0,6	0,6
	\bar{x} ($\pm s$)	0,4 ($\pm 0,3$)
$\bar{\bar{x}}$ ($\pm s$)	0,5 ($\pm 0,2$)	
6 °C	6	5
	7	5
	6	5
	6	5
	6	5
	7	5
	6	6
	6	5
	6	5
	6	5
	6	5
	/	5
	\bar{x} ($\pm s$)	6,2 ($\pm 0,4$)
$\bar{\bar{x}}$ ($\pm s$)	5,6 ($\pm 0,7$)	
12 °C	13	12
	12	12
	12	12
	12	13
	13	12
	/	13
	12	9
	12	11
	12	12
	12	13
	12	12
	13	12
	\bar{x} ($\pm s$)	12,3 ($\pm 0,5$)
$\bar{\bar{x}}$ ($\pm s$)	12,1 ($\pm 0,8$)	

6 Statistische Auswertung

6.1 Einfluss der Lagertemperatur auf den relativen L-Ascorbinsäuregehalt

Tab. A-38: Post-Hoc-Tests zur Verdeutlichung des Effekts der Lagertemperatur auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprüfungen unterschiedlicher spezifischer Oberfläche. Als abhängige Variable wird der relative L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der Proben am Lagertag 2 gewählt.

Lagerform	T [°C]		AA (c/c_0) Mittelwerts-Unterschied zwischen den Lager- temperaturen (I) und (J)	Standard- fehler	Tukey HSD	Bonferroni
	(I)	(J)				
Stäbchen	0,4	6,2	-0,12 ¹⁾	0,04	0,001**	0,001**
		12,3	-0,12 ¹⁾	0,04	0,014*	0,016*
	6,2	12,3	0,05	0,04	0,426	0,657
Julienne	0,7	5,1	0,01	0,01	0,727	1,000
		11,9	0,05 ¹⁾	0,01	0,007**	0,008**
	5,1	11,9	0,04 ¹⁾	0,01	0,033*	0,039*
Raspel	0,7	5,1	0,04	0,02	0,188	0,254
		11,9	0,12 ¹⁾	0,02	0,000***	0,000***
	5,1	11,9	0,08 ¹⁾	0,02	0,003**	0,003**

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha=0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

6.2 Einfluss der spezifischen Oberfläche auf den L-Ascorbinsäuregehalt

Tab. A-39: Post-Hoc-Tests zum Effekt der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe gelagert bei 0,5 °C, 6 °C und 12 °C. Als abhängige Variable wird der relative L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der Proben am Lagertag 2 gewählt.

T [°C]	a [m ² /kg]		AA (c/c_0) Mittelwerts-Unterschied zwischen den spez. Oberflächen (I) und (J)	Standard- fehler	Games- Howell	Tukey HSD	Bonferroni
	(I)	(J)					
0,5	0,39	1,54	0,19 ¹⁾	0,03	0,001**	/	/
		3,58	0,42 ¹⁾	0,03	0,000***	/	/
	1,54	3,58	0,23 ¹⁾	0,01	0,000***	/	/
6	0,37	0,58	0,04	0,03	/	0,545	1,000
		1,50	0,37 ¹⁾	0,03	/	0,000***	0,000***
		3,33	0,62 ¹⁾	0,03	/	0,000***	0,000***
	0,58	1,50	0,33 ¹⁾	0,03	/	0,000***	0,000***
		3,33	0,59 ¹⁾	0,03	/	0,000***	0,000***
	1,50	3,33	0,26 ¹⁾	0,03	/	0,000***	0,000***
12	0,14	0,40	-0,01	0,02	/	0,999	1,000
		0,56	0,05	0,02	/	0,283	0,534
		1,47	0,36 ¹⁾	0,02	/	0,000***	0,000***
		2,89	0,65 ¹⁾	0,02	/	0,000***	0,000***
	0,40	0,56	0,05	0,02	/	0,192	0,328
		1,47	0,36 ¹⁾	0,02	/	0,000***	0,000***
		2,89	0,66 ¹⁾	0,02	/	0,000***	0,000***
	0,56	1,47	0,31 ¹⁾	0,02	/	0,000***	0,000***
		2,89	0,60 ¹⁾	0,02	/	0,000***	0,000***
	1,47	2,89	0,30 ¹⁾	0,02	/	0,000***	0,000***

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha=0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Tab. A-40: Post-Hoc-Tests zum Effekt der spezifischen Oberfläche a auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabiprobe, ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Lagertemperaturen. Als abhängige Variable wird der relative L-Ascorbinsäuregehalt c/c_0 der Proben am Lagertag 2 gewählt.

a [m ² /kg]		AA (c/c_0) Mittelwerts-Unterschied zwischen den spez. Oberflächen (I) und (J)	Standard- fehler	Games- Howell
(I)	(J)			
0,14	0,38	0,06	0,03	0,302
	0,57	0,06	0,03	0,202
	1,50	0,37 ¹⁾	0,02	0,000***
	3,17	0,63 ¹⁾	0,03	0,000***
0,38	0,57	-0,01	0,03	1,000
	1,50	0,31 ¹⁾	0,02	0,000***
	3,17	0,57 ¹⁾	0,03	0,000***
0,57	1,50	0,31 ¹⁾	0,02	0,000***
	3,17	0,57 ¹⁾	0,02	0,000***
1,50	3,17	0,26 ¹⁾	0,02	0,000***

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha=0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

6.3 Einfluss unterschiedlicher Stickstoff- und Schwefeldüngung auf den L-Ascorbinsäuregehalt

Tab. A-41: Post-Hoc-Tests zum Effekt der Düngevariante auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi. Als abhängige Variable wird der L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} in mg/Knolle, errechnet anhand der L-Ascorbinsäuregehalte in mg pro g TM und der Trockenmassegehalte der jeweiligen Knollen, gewählt.

Düngevarianten		c_{AA} [mg/Knolle] Mittelwerts-Unterschied zwischen den Dünge- varianten (I) und (J)	Standard- fehler	Tukey HSD	Bonferroni
(I)	(J)				
1	2	2,41	24,02	1,000	1,000
	3	3,22	24,02	1,000	1,000
	4	32,34	25,20	0,931	1,000
	5	-46,20	24,02	0,602	1,000
	6	-59,42	24,02	0,274	0,630
	7	89,43 ¹⁾	25,20	0,024*	0,035*
	8	37,32	25,20	0,858	1,000
	9	16,59	24,02	0,999	1,000
	2	3	0,81	24,02	1,000
4		29,94	25,20	0,955	1,000
5		-48,61	24,02	0,537	1,000
6		-61,83	24,02	0,228	0,492
7		87,03 ¹⁾	25,20	0,031*	0,046*
8		34,91	25,20	0,897	1,000
9		14,19	24,02	1,000	1,000
3	4	29,13	25,20	0,961	1,000
	5	-49,42	24,02	0,515	1,000
	6	-62,64	24,02	0,214	0,453
	7	86,22 ¹⁾	25,20	0,034*	0,050
	8	34,10	25,20	0,908	1,000
	9	13,38	24,02	1,000	1,000
4	5	-78,54	25,20	0,072	0,118
	6	-91,77 ¹⁾	25,20	0,019*	0,027*
	7	57,09	26,32	0,443	1,000
	8	4,98	26,32	1,000	1,000
	9	-15,75	25,20	0,999	1,000

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha=0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Tab. A-41: Post-Hoc-Tests zum Effekt der Düngevariante auf den L-Ascorbinsäuregehalt von Kohlrabi. Als abhängige Variable wird der L-Ascorbinsäuregehalt c_{AA} in mg/Knolle, errechnet anhand der L-Ascorbinsäuregehalte in mg pro g TM und der Trockenmassegehalte der jeweiligen Knollen, gewählt (Fortsetzung).

Düngevariant e		c_{AA} [mg/Knolle] Mittelwerts-Unterschied zwischen den Dünge- varianten (I) und (J)	Standard- fehler	Tukey HSD	Bonferroni
(I)	(J)				
5	6	-13,22	24,02	1,000	1,000
	7	135,64 ¹⁾	25,20	0,000***	0,000***
	8	83,52 ¹⁾	25,20	0,045*	0,068
	9	62,79	24,02	0,212	0,446
6	7	148,86 ¹⁾	25,20	0,000***	0,000***
	8	96,74 ¹⁾	25,20	0,011*	0,015*
	9	76,02	24,02	0,064	0,104
7	8	-52,12	26,32	0,565	1,000
	9	-72,84	25,20	0,120	0,218
8	9	-20,73	25,20	0,995	1,000

¹⁾ Die Differenz der Mittelwerte ist auf dem Niveau 0,05 signifikant ($\alpha=0,05$).

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Schlich für die Überlassung des Themas und die kontinuierliche Betreuung während der Erstellung der Arbeit, sowie Herrn Prof. Dr. Karl H. Mühling für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenernährung, insbesondere Frau Anneliese Weber, für die gute Zusammenarbeit bei der Messung des L-Ascorbinsäuregehalts der Kohlrabiknollen unterschiedlicher Düngevarianten.

Den Master- und Bachelorstudentinnen Wenke Rädisch, Svenja Tiede, Katrin Lubasch, Carola Biesemann, Natascha Braach, Carola Diekmann, Julia Prinzhorn, Daniela Murst und Alexandra Krewinkel für die Durchführung diverser Lagerversuche.

Herrn Georg Koch von Gartenbau Koch GbR für die zuverlässige Belieferung mit frischem Kohlrabi.

Der Firma Liebherr für die Bereitstellung des verwendeten Lagerkühlschranks.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Professur für Prozesstechnik für die konstruktiven Gespräche, insbesondere zur Erstellung verständlicher Grafiken, sowie die aufbauenden Gespräche an der Kaffeemaschine.

