

**Wirkungen erhöhter CO₂-
und/oder Ozonkonzentrationen
auf den Ertrag und die Qualität
landwirtschaftlicher
Nutzpflanzen**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Naturwissenschaftlichen Fakultät

(Fachrichtung Biologie)

der Justus-Liebig-Universität Giessen

vorgelegt von

Petra Högy

D 26

Dekan: Prof. Dr. Jürgen Janek

I. Berichtstatter: Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Jäger

II. Berichtstatter: Prof. Dr. Andreas Fangmeier

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Juli 2002

Giessen, im Mai 2002

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Sommerweizen - Forderungen des Mühlen- und Backgewerbes.....	2
1.2	Sommergerste - Anforderungen der Malz- und Brauereitechnik	3
1.3	Kartoffeln - Wünsche der verarbeitenden Nahrungsmittelindustrie.....	4
1.4	Klimarelevante Spurengase – nur ein Problem der Zukunft?	6
1.4.1	Wirkung von erhöhtem CO ₂ auf landwirtschaftliche Nutzpflanzen.....	7
1.4.2	Wirkung von Ozon auf landwirtschaftliche Nutzpflanzen	11
2	MATERIAL UND METHODEN	17
2.1	Die Expositionssysteme.....	17
2.1.1	Open-top Chambers	19
2.1.2	Freiland-CO ₂ -Anreicherungssystem	20
2.2	Pflanzenkultur	20
2.2.1	Allgemeine Kulturbedingungen	20
2.2.2	Substrat.....	26
2.2.3	Stickstoffversorgung	26
2.2.4	Bewässerung	27
2.2.4.1	Volumetrischer Bodenwassergehalt mit der TDR-Methode.....	28
2.2.4.2	Bestimmung des Bodenwasserpotentials über Tensiometer	29
2.2.4.3	Bestimmung des Bodenwassers über ein Equilibrium-Tensiometer	29
2.2.5	Pflanzenschutzmaßnahmen.....	29
2.3	Bestandesentwicklung.....	30
2.3.1	Phänologische Entwicklung.....	30
2.3.2	Lichtinterzeption und Blattflächenindex	31
2.3.3	Sichtbarer Ozonschaden	32
2.3.4	Chlorophyllgehalt.....	32
2.3.4.1	Nicht-destruktive Bestimmung mit dem SPAD-Meter	32
2.3.4.2	Chlorophyllbestimmung im Aceton-Extrakt	33
2.4	Ernte, Ertrag und Ertragsparameter	34
2.5	Allgemeine Ertragsqualität.....	34
2.5.1	Größensortierung bei Getreide und Kartoffeln	35
2.5.2	Keimfähigkeitsprüfung bei Getreide	35
2.6	Optische Ertragsqualität	35
2.7	Physikalische Ertragsqualität.....	36
2.7.1	Glasige Knollen.....	36
2.7.2	Unterwassergewicht und Spezifisches Gewicht	36
2.7.3	Trockensubstanz.....	36

2.8	Chemische Ertragsqualität	36
2.8.1	Kohlenhydrate	37
2.8.1.1	Enzymatische Bestimmung von Kohlenhydraten	37
2.8.1.2	Ionenchromatographische Bestimmung von Kohlenhydraten	43
2.8.2	Proteinkonzentration über Kjeldahl-Stickstoff	45
2.8.3	Aminosäuren	46
2.8.3.1	Freie Aminosäuren	49
2.8.3.2	Aminosäurezusammensetzung in Peptiden	50
2.8.4	Anionen und organische Säuren	52
2.8.4.1	Ionenchromatographische Bestimmung von Anionen	52
2.8.4.2	Ionenchromatographische Bestimmung von Organischen Säuren	54
2.8.4.3	Photometrische Bestimmung von Organischen Säuren	55
2.8.5	Glycoalkaloide	58
2.8.6	Mineralstoffe	59
2.9	EDV und Statistik	60
3	ERGEBNISSE	61
3.1	Klimabedingungen	61
3.2	Spurengaskonzentrationen	67
3.3	Sommerweizen	72
3.3.1	Oberirdische Biomasse, Ertrag, Harvest-Index und Ertragsparameter	72
3.3.1.1	Oberirdische Biomasse	72
3.3.1.2	Ertrag	73
3.3.1.3	Harvest-Index	74
3.3.1.4	Ertragsparameter	75
3.3.2	Allgemeine Ertragsqualität	79
3.3.2.1	Anteil der Korngrößen am Gesamtkorn	79
3.3.2.2	Keimfähigkeit	80
3.3.3	Chemische Ertragsqualität	81
3.3.3.1	Kohlenhydrateinlagerung während der Kornfüllung	81
3.3.3.2	Stärke	95
3.3.3.3	Lösliche Kohlenhydrate	95
3.3.3.4	Reduzierende Zucker	97
3.3.3.5	Saccharose	97
3.3.3.6	Fructane	98
3.3.3.7	Mineralstoffe	99
3.3.3.8	Protein	101
3.3.3.9	Aminosäuren	102
3.4	Sommergerste	109
3.4.1	Oberirdische Biomasse, Ertrag, Harvest-Index und Ertragsparameter	109
3.4.1.1	Oberirdische Biomasse	109
3.4.1.2	Ertrag	110
3.4.1.3	Harvest-Index	111
3.4.1.4	Ertragsparameter	112
3.4.2	Allgemeine Ertragsqualität	115
3.4.2.1	Anteil der Korngrößen am Gesamtkorn	115
3.4.2.2	Keimfähigkeit	116

3.4.3	Chemische Ertragsqualität	117
3.4.3.1	Stärke.....	117
3.4.3.2	Lösliche Kohlenhydrate.....	118
3.4.3.3	Reduzierende Zucker	119
3.4.3.4	Saccharose.....	120
3.4.3.5	Fructane.....	120
3.4.3.6	Protein	121
3.4.3.7	Aminosäuren	121
3.5	Kartoffeln	129
3.5.1	Wasserverbrauch des Kartoffelbestandes.....	129
3.5.2	Bestandesentwicklung.....	130
3.5.2.1	Phänologische Entwicklung	130
3.5.2.2	Bestandeshöhe	131
3.5.2.3	Blattentwicklung.....	134
3.5.2.4	Lichtinterzeption	140
3.5.2.5	Blattflächenindex	142
3.5.2.6	Sichtbare Ozonschäden an den Blättern.....	144
3.5.2.7	Chlorophyllgehalt	146
3.5.3	Oberirdische Biomasse	150
3.5.4	Allgemeine Ertragsqualität	151
3.5.4.1	Frischertrag der Knollen.....	151
3.5.4.2	Trockenertrag der Knollen	152
3.5.4.3	Knollenzahlen und Größensortierung	153
3.5.5	Optische Ertragsqualität.....	154
3.5.6	Physikalische Ertragsqualität.....	155
3.5.7	Chemische Ertragsqualität	156
3.5.7.1	Stärke und lösliche Kohlenhydrate	156
3.5.7.2	Organische Säuren.....	157
3.5.7.3	Glycoalkaloide	159
3.5.7.4	Anionen.....	160
3.5.7.5	Mineralstoffe.....	161
3.5.7.6	Protein	165
3.5.7.7	Aminosäuren	166
4	DISKUSSION	171
4.1	Allgemeine Versuchsbedingungen	171
4.2	Sommerweizen und Sommergerste.....	173
4.2.1	Oberirdische Biomasse, Ertrag und Ertragsparameter.....	173
4.2.2	Allgemeine Ertragsqualität	178
4.2.3	Chemische Ertragsqualität	180
4.2.3.1	Kohlenhydrate.....	180
4.2.3.2	Mineralstoffe.....	182
4.2.3.3	Protein	185
4.2.3.4	Aminosäuren	188
4.3	Kartoffeln	190
4.3.1	Wasserverbrauch des Kartoffelbestandes.....	191
4.3.2	Bestandesentwicklung.....	191

4.3.2.1	Phänologische Entwicklung.....	191
4.3.3	Bestandeshöhe.....	193
4.3.4	Blattentwicklung.....	193
4.3.5	Lichtinterzeption und Blattflächenindex.....	194
4.3.6	Sichtbare Ozonschäden an den Blättern.....	196
4.3.7	Chlorophyllgehalt.....	196
4.3.8	Oberirdische Biomasse.....	197
4.3.9	Allgemeine Ertragsqualität.....	198
4.3.10	Optische Ertragsqualität.....	200
4.3.11	Physikalische Ertragsqualität.....	201
4.3.12	Chemische Ertragsqualität.....	201
4.3.12.1	Stärke und wasserlösliche Kohlenhydrate.....	202
4.3.12.2	Organische Säuren.....	204
4.3.12.3	Glykoalkaloide.....	205
4.3.12.4	Anionen.....	206
4.3.12.5	Mineralstoffe.....	207
4.3.12.6	Protein.....	208
4.3.12.7	Aminosäuren.....	209
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	213
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	217

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 1: Schematische Darstellung des Gefäßes zur nicht-destruktiven Beobachtung der Knolleninduktion 1999.....	31
Abbildung 2: Prinzip der Aminosäurebestimmung mit FMOC.....	48
Abbildung 3: Prinzip der Ascorbat- und Dehydroascorbatbestimmung (Okamura 1980).....	56
Abbildung 4: Tägliche Strahlungssummen in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.	63
Abbildung 5: Mittlere relative Feuchte in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.	64
Abbildung 6: Mittlere Tagestemperatur in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.	65
Abbildung 7: Tägliche Maxima der Temperatur in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.	66
Abbildung 8: Tagesverlauf der CO ₂ -Konzentrationen in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.	68
Abbildung 9: CO ₂ -Konzentrationen (Tagesmittelwerte über 24-Stunden) über den Expositionszeitraum in den OTC während der Versuchsjahre 1994 bis 1997.	69
Abbildung 10: CO ₂ -Konzentrationen (OTC: Tagesmittelwerte über 24 Stunden, FACE: Tagesmittelwerte jeweils 2 Stunden nach Sonnenaufgang bis 2 Stunden vor Sonnenaufgang) über den Expositionszeitraum in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1998 und 1999.	70
Abbildung 11: Ozonkonzentrationen über den Expositionszeitraum in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1998 und 1999. a und b: mittlerer Tagesgang über die Wuchperiode, c-f: Tagesmittelwerte (8-Stunden-Mittelwerte von 9–17 Uhr).	71
Abbildung 12: Konzentration löslicher Kohlenhydrate, reduzierender Zucker, Saccharose, Fructane und Stärke [% TG] im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1994 bei unterschiedlicher CO ₂ -Behandlung und 270 kg N ha ⁻¹ (Mittelwert).....	83
Abbildung 13: Bestandeshöhe (cm) der Kartoffelpflanzen zur Ernte 1998 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	132
Abbildung 14: Bestandeshöhe (cm) der Kartoffelpflanzen zur Ernte 1999 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	133
Abbildung 15: Anzahl der grünen Blätter (bezogen auf m ²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	136

Abbildung 16: Anzahl der grünen Blätter (bezogen auf m ²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	137
Abbildung 17: Anzahl der seneszenten Blätter (bezogen auf m ²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	138
Abbildung 18: Anzahl der seneszenten Blätter (bezogen auf m ²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	139
Abbildung 19: Lichtinterzeption (%) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	141
Abbildung 20: Blattflächenindex (m ² pro m ²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	143
Abbildung 21: Sichtbare Ozonschäden an den Blättern der Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	145
Abbildung 22: SPAD-Werte der jüngsten, voll entwickelten Blätter im oberen Bestandesteil von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	148
Abbildung 23: SPAD-Werte der jüngsten, voll entwickelten Blätter im oberen Bestandesteil von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO ₂ - und O ₃ -Behandlung.	149

DANKSAGUNGEN

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Professor Hans-Jürgen Jäger für die Überlassung des Themas, die Bereitstellung des Arbeitsplatzes und die uneingeschränkte Nutzung aller Institutseinrichtungen bedanken.

Herzlich danken möchte ich auch Herrn Professor Andreas Fangmeier für die hervorragende Betreuung während meiner Promotionszeit. Er unterstützte mich stets tatkräftig bei der Umsetzung von Ideen, gab mir viele wertvolle Ratschläge und stand jederzeit für Diskussionen zur Verfügung.

Für die gute Kooperation während der Getreideversuche im Rahmen des ESPACE-Projektes danke ich Dipl.-Biol. Birte Vermehren und Dr. Uwe Grüters. Vielen Dank auch an Dr. Michael Schütz, Dipl.-Biol. Claudia Blum und Dr. Angelica Casanova für die gelungene Zusammenarbeit bei der Durchführung des CHIP-Projektes. Ein besonderer Dank geht an die „Fangmeier-Bande“ für eine stets kreative und aufbauende Arbeitsatmosphäre.

Ein herzliches Dankeschön gilt den technischen Angestellten des Instituts für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Giessen, deren Unterstützung mir stets gewiss war und die mir jederzeit mit praktischem Rat und praktischer Hilfe zur Seite standen. Besonders Alexandra Amend, Angelika Bölke, Sabine Martis, Gerhard Mayer und Wolfgang Stein sorgten für stetige Hilfestellung bei der Bewältigung von technischen Problemen. Danke auch an Jochen Senkbeil und Jürgen Franz für die hilfreiche Unterstützung bei den Pflanzenanzuchten sowie an diejenigen, die das Manuskript dieser Arbeit durchsahen und sich Zeit für konstruktive Diskussionen nahmen.

Einen besonderen Dank richte ich an meine Eltern, Geschwister und Freunde, die mich jederzeit mit viel Verständnis, mit moralischer und häufig auch tatkräftiger Hilfe unterstützt haben.

Allen gilt mein herzlicher Dank.

Diese Dissertation wurde aus Mitteln der Europäischen Union finanziert.

„Nicht die stärksten Arten werden überleben, auch nicht die intelligentesten, sondern diejenigen, die am besten auf Veränderungen reagieren“

Charles Darwin (1809-1882)

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AA	Umgebungs-Feld-Plots
Abb.	Abbildung
A/D	Analog/Digital
A.demin.	demineralisiertes Wasser
Al	Aluminium
Ala	Alanin
ANOVA	Varianzanalyse
A.reinst	Reinstwasser
Arg	Arginin
AsA	Ascorbat
Asn	Asparagin
Asp	Asparaginsäure
B	Bor
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
ca.	circa
Chl	Chlorophyll
C/N	Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis
CO ₂	Kohlendioxid
Cm	Zentimeter
Cu	Kupfer
Cys	Cystein
DAS	Tag nach Aussaat (day after emergence)
E	Extinktion
F	Faktor
FACE	Freiland-CO ₂ -Anreicherungssystem
Fe	Eisen
FG	Frischgewicht
FMOc	Fluorenylmethyloxycarbonyl-Chlorid
g	Gramm
Gln	Glutamin
Glu	Glutaminsäure

Gly	Glycin
h	Stunde
ha	Hektar
His	Histidin
HPLC	Hochdruckflüssigkeitschromatographie
IC	Ionenchromatographie
Ile	Isoleucin
J	Joule
JD	Tag im julianischen Kalender (<i>julian day</i> , JD)
K	Kalium
kg	Kilogramm
km	Kilometer
l	Liter
LAI	Blattflächenindex (<i>leaf area index</i> , LAI)
Leu	Leucin
Lys	Lysin
m	Meter
M	molar
Met	Methionin
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
Mg	Magnesium
mg	Milligramm
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mM	Millimolar
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
μl	Mikroliter
μm	Mikrometer
N	Stickstoff
Na	Natrium
n.a.	nicht analysiert
NADH	reduzierte Form des Nicotinamid-adenin-dinucleotid

NADPH	reduzierte Form des Nicotinamid-adenin-dinucleotidphosphat
nl	Nanoliter
nm	Nanometer
n.s.	nicht signifikant
NUE	Stickstoffnutzungseffizienz (<i>nitrogen use efficiency</i> , NUE)
O	Sauerstoff
O ₃	Ozon
OTC	open-top Kammer (open-top chamber)
P	Phosphor
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung
PC	Personal Computer
Phe	Phenylalanin
pmol	Picomol
ppm	parts per million
Pro	Prolin
RubisCO	Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase/Oxygenase
RuBP	Ribulose-1,5-bisphosphat
S	Schwefel
sec	Sekunde
Ser	Serin
SG	Spezifisches Gewicht
SPAD	nichtdestruktiver Chlorophyllwert
TDR	Time-Domain Reflectometry
TG	Trockengewicht
Thr	Threonin
Tyr	Tyrosin
TKW	Tausendkorngewicht
UPM	Umdrehung pro Minute
UWW	Unterwassergewicht
Val	Valin
VPD	Dampfdruckdefizit
v/v	Volumen/Volumen
WS	Wachstumsstadium
Zn	Zink

1 EINLEITUNG

Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre durch anthropogen verursachte Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen sind Hauptursache für den Anstieg der mittleren globalen Oberflächentemperatur um $0,6 \pm 0,2$ °C und damit für den Klimawechsel im 20. Jahrhundert. Bei weiterer Zunahme der Treibhausgasemissionen wird bis zum Jahr 2100 je nach Szenario weltweit ein Anstieg der durchschnittlichen Oberflächentemperatur um 1,4 °C bis 5,8 °C gegenüber 1990 sowie eine Erhöhung der durchschnittlichen Meeresspiegelhöhe um 0,09 bis 0,88 Meter prognostiziert. Die Hochrechnungen der Klimamodelle lassen jedoch vermuten, dass die Erwärmung global und regional unterschiedlich ist und von einer Erhöhung oder Verminderung der Niederschlagsmenge begleitet wird, so dass eine Verschiebung der Vegetationszonen wahrscheinlich wird. Zusätzlich muss mit Veränderungen der klimatischen Schwankungen sowie der Häufigkeit und Intensität extremer Klimaphänomene gerechnet werden (IPCC 2001). Diese allgemeinen Charakteristika des Klimawandels haben das Potential, umfangreiche und möglicherweise irreversible Veränderungen in natürlichen und vom Menschen geschaffenen Systemen der Erde mit Auswirkungen sowohl auf kontinentaler als auch auf globaler Ebene zu bewirken und bilden den Hintergrund bei der Beurteilung der Folgen des Konzentrationsanstiegs der beiden klimarelevanten Spurengase Kohlendioxid und Ozon für die Produktion landwirtschaftlicher Nutzpflanzen.

Aus ernährungswissenschaftlicher Sicht ist derzeit Weizen weltweit die wichtigste landwirtschaftlich genutzte Art, Gerste nimmt die vierte Stelle und die Kartoffel Platz fünf in der Liste der Bedeutsamkeit ein (FAO 2002). Neben den agronomischen Eigenschaften wie Krankheitsresistenzen und Ertrag werden zusätzlich vielfältige Anforderungen an die Qualität dieser Nutzpflanzen gestellt. Der Begriff Qualität kann in Abhängigkeit von den jeweiligen wertbestimmenden Kriterien allerdings nur verwertungsspezifisch definiert werden. Um Aussagen über Qualitätsanforderungen zu treffen, ist es daher notwendig, die Nutzung der Pflanzenart und damit die Anforderungen der Verwerter möglichst genau zu kennen. Im Fall der untersuchten Arten gehören dazu die Forderungen des Mühlen- und Backgewerbes an den Sommerweizen, die der Malzhersteller an die Sommergerste und die Wünsche der verarbeitenden Industrie zur Erzeugung höherwertiger Nahrungsmittel an die Kartoffel.

1.1 Sommerweizen - Forderungen des Mühlen- und Backgewerbes

In Deutschland kommt Weizen hauptsächlich in Form von Brot und Brötchen in den Nahrungsmittelverzehr. Durch deren Konsum können 50 % des täglichen Kohlenhydratbedarfes und ein Drittel des Proteinbedarfes gedeckt werden. Neben der Proteinmenge ist für den Endkonsumenten die Biologische Wertigkeit, insbesondere die Menge der einzelnen essentiellen Aminosäuren, von besonderem Interesse. Darüber hinaus leisten Getreideerzeugnisse einen wesentlichen Beitrag zur Versorgung mit Mineralstoffen und Spurenelementen.

Für die Verwertung von Weizen zur Herstellung von Backwaren mit den gewohnten Formen und Eigenschaften sind die Mahlfähigkeit und die Backfähigkeit zentrale Qualitätsaspekte. Die verarbeitende Industrie stellt daher besondere Anforderungen an Merkmale wie Stärke-, Mineralstoff- und Proteingehalt sowie Proteinqualität.

Die Mahlfähigkeit wird von der Ausbildung, der Form, der Größe, dem Aschegehalt und der Härte des Kornes beeinflusst. Bevorzugt wird ein gesundes, glattes und gut gefülltes Korn mit einem geringen Anteil an Randschichten und einer guten Trennbarkeit der Schale vom stärke- und proteinhaltigen Endosperm. Mit zunehmender Korngröße nimmt der Anteil der mineralstoffhaltigen Samenschale und Aleuronschicht ab, was zur Folge hat, dass diese Körner einen höheren Endospermanteil besitzen und mit höheren Mehlausbeuten sowie niedrigeren Aschegehalten korrelieren. Die Kornhärte charakterisiert die Bindung von Stärkekörnern und Protein im Endosperm. Sie beeinflusst den Energieaufwand bei der Vermahlung und die Trennbarkeit der Schale vom Endosperm und steht in direktem Zusammenhang mit der Wasseraufnahme.

Die Qualitätskriterien der Backfähigkeit werden einerseits von der Rentabilitätsanforderung des Bäckers geprägt, möglichst viel Brot und Gebäck aus dem Mehl herzustellen. Zum anderen werden sie definiert durch Anforderungen, die bei der Teigbereitung, beim Backvorgang und an das fertige Gebäck gestellt werden.

Eine zentrale Position in der Beurteilung der Backfähigkeit von Weizen nimmt der Proteingehalt ein. Für Weizen mit einer guten Backqualität wird ein Sollwert von 11,5 bis 13,0 % des Trockengewichts angestrebt, Aufmischweizen erfordert einen Proteingehalt von 14 %. Von besonderer Bedeutung ist jedoch die Menge und die Qualität der Reserveproteine Prolamin und Glutelin nach Osborne (1924) – zu letzteren zählen auch die Kleberproteine – sowie die Qualität der Stärke im Mehlkörper. Sie bestimmen das physikalisch-chemische Verhalten bei der Teigbildung und beeinflussen Viskosität, Quellvermögen, Elastizität und Gashaltevermögen des Teiges, da die niedermolekularen Untereinheiten des Glutelins mit den Gliadinuntereinheiten des Prolamins den Kleber unter Ausbildung von intermolekularen Disulfidbindungen, Wasser-

stoffbrücken und hydrophoben Bindungen bilden. Die granulären Kleberproteine quellen abhängig von der Zusammensetzung des Proteins mit Wasser zu einer plastisch-elastischen Masse, in die die Stärkekörner eingebettet werden. Obwohl die Kleberqualität überwiegend genetisch bedingt ist, kann sie durch Umweltbedingungen wie beispielsweise die Düngung manipuliert werden. So beeinflusst eine höhere Stickstoffversorgung den Proteingehalt, erhöht den Anteil der für die Backqualität verantwortlichen Aminosäuren und wirkt sich positiv auf die Menge und Güte des Klebers aus.

Durch die technologische Entwicklung ergeben sich in der industriellen Verarbeitung zusätzlich neue Qualitätsanforderungen an die Maschinentauglichkeit der Teige. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die bei der Teigherstellung vom Mehl aufgenommene und gebundene Wassermenge. Sie zeigt eine Abhängigkeit von der Menge und der Güte des Klebers sowie von der Stärke. Ungebundenes Wasser, welches nicht für die Hydratisierung der Mehlteilchen verwendet wird, führt zu feuchten, schmierigen Teigoberflächen, die sich bei der maschinellen Teigbereitung negativ auswirken (Reiner et al. 1992, Belitz et al. 2001).

1.2 Sommergerste - Anforderungen der Malz- und Brauereitechnik

Sommergerste wird hauptsächlich in Form von Braugerste für die Bierherstellung angebaut und sollte daher malz- und brauereitechnologisch geeignete Eigenschaften aufweisen.

Zweck der Malzherstellung ist die Aktivierung von Enzymgruppen und deren Einwirkung auf die Zellwände sowie die Stärke und die Proteine im Endosperm. Qualitätsansprüche an die Braugerstensorten sind daher eine gute Kornausbildung, ein hoher Vollgerstenanteil (mindestens 90 % Siebsortierungsanteil über 2,5 mm), eine hohe Spelzenfeinheit, ein geringer Feuchtigkeitsgehalt, eine geringe Keimruhe verbunden mit hoher Keimfähigkeit und ein Proteingehalt unter 11,5 % (Kunze 1984, Reiner & Dörre 1985). Diese Parameter sind nicht nur wegen der hohen Malz- und Extraktausbeute, sondern auch hinsichtlich des Geschmacks und der Haltbarkeit des Endprodukts wichtig. Aus diesem Grund werden für die Herstellung von Bier große, volle und rundliche Körner bevorzugt. Diese Gerstenkörner sind extraktreicher und proteinärmer als flache, lange Körner, da mit zunehmender Korngröße der Spelzenanteil abnimmt (Brau-technische Analysenmethoden 1984). Zur Beurteilung der Qualität von Gerste kann auch das Tausendkorngewicht herangezogen werden, das in enger Beziehung zur Extraktausbeute steht. Mit zunehmendem Tausendkorngewicht steigt der prozentuale Vollgerstenanteil und damit der Extraktgehalt der Gerste.

Technologisch spielt der Proteingehalt und die mit ihm erfassten Enzyme der Braugerste eine wesentliche Rolle für die Bierherstellung. Die Zunahme des Proteingehaltes ist jedoch mit der Verminderung des Extraktgehaltes verbunden, da sich proteinreiche Gersten schwieriger und nur mit höherem Mälzungsaufwand verarbeiten lassen. Darüber hinaus ist für eine gute, einwandfreie Braugerste eine rasche und gleichmäßige Wasseraufnahme, ein zügig einsetzender Keimprozess und eine Keimfähigkeit von mindestens 95 % erwünscht (Reiner & Dörre 1985).

1.3 Kartoffeln - Wünsche der verarbeitenden Nahrungsmittelindustrie

Die Kartoffelknolle entsteht als vegetatives Speicherorgan durch parenchymatisches Dickenwachstum an blattlosen Endtrieben (Stolone) der Kartoffelstaude. Als Grundnahrungsmittel spielt die Kartoffel wegen ihrer etwa 200 verschiedenen Inhaltsstoffe und den vielseitigen Verwertungsmöglichkeiten eine beachtliche Rolle. Unter Betrachtung der Ernährungsqualität ist sie eine wichtige Quelle für biologisch wertvolles Protein, essentielle Aminosäuren, Vitamine, Mineralstoffe und Kohlenhydrate.

Von besonderem Interesse bei der Kartoffel ist die Beurteilung der Ertragsqualität, da dem Gesamtertrag der Anteil des verwertbaren Ertrags gegenübersteht. Je nach Form, Masse und Größe erfolgt die Zuordnung der Knollen in unterschiedliche Fraktionen, die entsprechend dem Verwendungszweck die Höhe des Marktwarenteils bestimmen. Zusätzlich wird die innere und äußere Qualität sowie der Speisewert der Knollen beurteilt. Die innere Qualität gibt Aufschluss über den Nährwert und damit über die inhaltliche Zusammensetzung der Knolle. Bei der äußeren Qualität spielt die Schalenbeschaffenheit, die Augenlage sowie der Anteil fauler, rissiger, schorfiger, zwiewüchsiger, angegrünter und deformierter Knollen eine wesentliche Rolle. Für die Beurteilung des Speisewertes ist die Konsistenz, die Feuchtigkeit, die Körnigkeit, die Mehligkeit, die Fleischfarbe und der Geschmack der Knollen ausschlaggebend.

Die in der vorliegenden Untersuchung verwendete Kartoffelsorte Bintje wird fast ausschließlich zu Frittierprodukten weiterverarbeitet. Deshalb sind bei der Beurteilung der Kartoffelknollenqualität spezielle, die Produktionsprozesse berücksichtigende Qualitätskriterien maßgebend. So müssen neben den guten Verarbeitungseigenschaften zu höherwertigen Nahrungsmitteln auch die Anforderungen der Mechanisierung bei den Produktionsprozessen berücksichtigt werden. Zur Herstellung von Pommes frites werden lediglich Knollen mit einer Mindestgröße von 55 mm weiterverarbeitet. Darüber hinaus müssen bei der Klärung der Qualitätsfrage auch die Veränderungen durch die industriellen Prozesse berücksichtigt werden. Generell führt die Verarbeitung der Kartoffel zu höherwertigen Lebensmitteln wie Pommes frites zu erhöhten Fett-

gehalten, Vitaminverlusten durch Verarbeitungs- und Lagerungsprozesse, Konzentrierung von Inhaltsstoffen durch Trocknung und Verlusten von Mineralstoffen durch Schälen.

Ein maßgebendes Qualitätskriterium für die industrielle Verarbeitung in Form von Pommes frites ist der Anteil der Trockensubstanz über dem Schwellenwert von 22 %. Sie bestimmt die Höhe der Produktausbeute und ist entscheidend für die Textur der Produkte. Den Hauptanteil an der Trockensubstanz nimmt mit 63 % bis 82 % die Stärke ein. Die Stärkekonzentration korreliert mit dem Vorkommen von Protein und beeinflusst die Qualitätseigenschaften wie Mehligkeit, Textur, Konsistenz, Zerkochungsgrad und Ölaufnahme. Hohe Proteinkonzentrationen wirken sich positiv auf den Geschmack und die Lagerfähigkeit der Knollen aus.

Bis zu 10 % der Trockensubstanz besteht aus Zuckern, die sich hauptsächlich aus Glucose, Fructose und Saccharose zusammensetzen. Besonders reduzierende Zucker dürfen als Knolleninhaltsstoffe bezüglich der Qualitätsbeurteilung zur Herstellung von Pommes frites nicht vernachlässigt werden. Diese reagieren bei Frittierprozessen mit Aminosäuren in Gegenwart von Wasser und hohen Temperaturen in der sogenannten Maillard-Reaktion zu dunkelbraunen, bitter schmeckenden Substanzen. 4 % bis 5 % der Trockensubstanz sind Mineralstoffe, wobei Kartoffelknollen viel Kalium, Phosphor und Magnesium, aber wenig Natrium und Calcium enthalten. Der Mineralstoffgehalt ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Beurteilung der Qualität in bezug auf die Rohbreiverfärbung, die Kochdunklung und das Vorkommen von Blaufleckigkeit, welche besonders mit dem Kaliumgehalt korreliert. Auch die in den Knollen vorkommenden organischen Säuren reagieren enzymatisch mit Sauerstoff und führen zur Rohbreiverfärbung und zur Kochdunklung. Darüber hinaus zeichnen sich die Knollen von Kartoffeln durch einen hohen Gehalt an Vitamin C aus.

Aus ernährungsphysiologischer Sicht beinhaltet die Kartoffel als nachteilige Stoffe Nitrat und Glycoalkaloide. Nitrat gewährleistet die Stickstoffversorgung und ist daher ein unentbehrlicher Nährstoff. Allgemein handelt es sich bei der Kartoffel um ein nitratarmes Ertragsprodukt. Lediglich unter erhöhter Nitratversorgung während des Wachstums durch Düngung entsteht ein „Luxuskonsum“ und führt zur Anreicherung von Nitrat in den Knollen. Auch die in den Kartoffelknollen gemessenen Konzentrationen an Glycoalkaloiden erreichen selten den für die Gesundheit schädlichen Grenzwert von 20 mg pro 100 g Frischgewicht. Erhöhte Glycoalkaloidkonzentrationen wirken sich negativ auf den Geschmack der Kartoffelknollen aus (Putz 1989, Woolfe 1996).

Obwohl Back-, Brau- und Verarbeitungsversuche oftmals wegen des hohen Kosten- und Materialaufwandes nicht in gewünschtem Umfang durchgeführt werden können, ist es mit Hilfe

von geeigneten Methoden möglich, eine Reihe von Qualitätskriterien relativ sicher zu bestimmen, die eine gute Schätzung der Ertrags- und Verarbeitungsqualität zulassen.

1.4 Klimarelevante Spurengase – nur ein Problem der Zukunft?

Aktuelle Modelle prognostizieren für das 21. Jahrhundert durch Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre eine weitere Erwärmung des globalen Klimas (*Global Climate Change*), eine der Hauptursachen ist im Konzentrationsanstieg von atmosphärischem Kohlendioxid (CO₂) zu suchen. Als direkte Folgen werden grundlegende Veränderungen für das Wachstum, die Bestandesentwicklung und den Ertrag der für die menschliche Ernährung wichtigen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen wie Weizen, Gerste und Kartoffeln erwartet. Mögliche Effekte interagierender Spurengase auf die Ertragsqualität, besonders in bezug auf die industrielle Verwertung, sind derzeit trotz der Aktualität und der Wichtigkeit dieser Thematik nur vereinzelt für Getreidearten (Manderscheid et al. 1995, Blumenthal et al. 1996, Fangmeier et al. 1997, 1999) und für Kartoffeln (Fangmeier et al. im Druck, Vorne et al. im Druck) untersucht, so dass an dieser Stelle weiterhin Forschungsbedarf besteht.

Die globale atmosphärische Kohlendioxidkonzentration stieg in den letzten 200 Jahren durch anthropogene Aktivitäten wie die Verbrennung fossiler Energieträger, aber auch durch die Rodung von Regenwäldern und die Humuszerstörung kontinuierlich von etwa 280 µl l⁻¹ CO₂ um mehr als ein Viertel auf gegenwärtig etwa 380 µl l⁻¹ CO₂ an (Houghton et al. 1996, Keeling & Whorf 2001). Damit ist derzeit auf der Erde die höchste CO₂-Konzentration innerhalb der letzten 420.000 Jahre erreicht (Petit et al. 1999). Prognosen gehen - je nach Emissionstrend - von einem Anstieg der atmosphärischen Konzentrationen auf Werte zwischen 520 µl l⁻¹ CO₂ und 950 µl l⁻¹ CO₂ bis zum Jahr 2100 aus (Schimel et al. 1995, Houghton et al. 1996, Prentice et al. 2001).

Neben dem Anstieg an Kohlendioxid ergaben sich auch deutliche Konzentrationsanstiege bei anderen luftgetragenen Spurengasen (Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Methan, Distickstoffoxid, Ozon). Besonders das troposphärische Ozon ist ein Luftschadstoff, der in den letzten Jahren in den Mittelpunkt des Interesses gerückt ist. In Mitteleuropa konnte in den vergangenen hundert Jahren mindestens eine Verdoppelung der Ozonkonzentration festgestellt werden (Feister & Warmbt 1987, Volz & Kley 1988, Hough & Derwent 1990, Anfossi et al. 1991). Die Daten verschiedener Messstationen aus industriefernen, nicht direkt von KFZ-Emissionen betroffenen Regionen der Hochlagen europäischer Gebirge ergeben für Ozon einen fünffachen Anstieg der Konzentration (Marenco et al. 1994).

Ozon ist ein sehr reaktives, phytotoxisches Spurengas (Krupa & Manning 1988, Ashmore & Bell 1991, Grünhage et al. 1992, 1999), welches aus drei Sauerstoffatomen besteht. Troposphärisches Ozon gehört zu den Photooxidanzien, das heißt zu einer Gruppe von Spurengasen, die in der erdbodennahen Luftschicht durch photochemische Reaktionen unter Einwirkung kurzweiliger Strahlung mit natürlich vorhandenen sowie anthropogenen Vorläufersubstanzen wie Stickstoffoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen entstehen und zum sogenannten „Sommersmog“ beitragen (Crutzen et al. 1999). Die Quelle für natürliches Ozon ist die Stratosphäre (Luftschicht über 12 km). Durch Intrusionen gelangt es bei bestimmten Wetterlagen durch die Tropopause (Trennschicht zwischen Stratosphäre und Troposphäre in ca. 12 km Höhe) in die unteren Luftschichten (Ebel et al. 1993). Produktions- und Verbrennungsprozesse führen besonders in den industrialisierten und dichtbesiedelten Regionen zu den wichtigen anthropogenen Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung, für die in Mitteleuropa der Straßenverkehr die wichtigste Emittentengruppe darstellt. Natürliche Stickoxide entstehen in der erdbodennahen Luftschicht durch biologische Prozesse im Boden, aus Vulkanen und durch Blitze. Nadelwälder und natürliche Gärprozesse setzen Kohlenwasserstoffe frei. In Ballungsgebieten wird Ozon in Bodennähe abends und nachts durch Stickstoffmonoxid abgebaut, wodurch es zu einem ausgeprägten Tagesgang der Ozonkonzentration kommt. Ländliche Gebiete weisen jedoch niedrige Stickstoffmonoxidkonzentrationen auf, so dass der tagsüber entstandene Ozonpegel auch nachts weitgehend erhalten bleibt. Je nach Region liegen die natürlichen Ozonkonzentrationen in Europa zwischen 20 und 60 nl l^{-1} , Spitzenwerte liegen im Konzentrationsbereich von 200 bis 250 nl l^{-1} .

Klimarelevante Spurengase wie Kohlendioxid und eine Reihe anderer durch anthropogene Aktivitäten in die Troposphäre freigesetzte Gase sind dafür verantwortlich, dass das Leben auf der Erde überhaupt möglich ist. Sie besitzen die Eigenschaft, die von der Erdoberfläche abgestrahlte Infrarotstrahlung zu absorbieren und so zu einer Erwärmung der Erdoberfläche beizutragen (Karl et al. 1998). Die Spurengase sind Ursache für den sogenannten natürlichen Treibhauseffekt mit einer mittleren globalen Oberflächentemperatur von 15 °C, die ohne diesen Prozess bei -18 °C liegen würde (Graedel & Crutzen 1994).

1.4.1 WIRKUNG VON ERHÖHTEM CO₂ AUF LANDWIRTSCHAFTLICHE NUTZPFLANZEN

Neben der Wirkung als klimarelevantes Spurengas ist CO₂ das Bindeglied zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre. Pflanzen assimilieren als Primärproduzenten atmosphärischen

Kohlenstoff in Form von CO₂ über die Photosynthese und stellen damit die Quelle der gesamten organischen Biomasse in terrestrischen Ökosystemen dar (Larcher 2001).

Erhöhte CO₂-Konzentrationen führen zu physiologischen und biochemischen Veränderungen im pflanzlichen Metabolismus, die sich auf die Bestandesentwicklung, den Ertrag und die Qualität der Ernteprodukte auswirken können (Hocking & Meyer 1991 a, Conroy 1992, Thompson & Woodward 1994). Unter optimalen Wachstumsbedingungen führt eine Verdoppelung der gegenwärtigen CO₂-Konzentrationen bei C₃-Pflanzen in natürlichen und landwirtschaftlich genutzten Ökosystemen durch die vermehrte Kohlenstoffakquisition zu einem durchschnittlichen Anstieg der Biomasseproduktion um 37 % (Poorter 1993). Getreidearten reagieren abhängig von den Anzuchtbedingungen mit einer Ertragsförderung von 20 bis 40 % (Kimball 1983, Havelka 1984, Cure & Acock 1986, Allen 1990, Rogers & Dahlman 1993, Kimball et al. 1993, Mitchell et al. 1993, Weigel et al. 1994, Fangmeier et al. 1996 b, Fangmeier & Jäger 2001), bei Kartoffeln ergibt sich eine Zunahme des Ertrags um 17 % bis 51 % (Cure & Acock 1986, Craigon et al. im Druck). Daher kann ein Kohlendioxidanstieg, zumindest aus wirtschaftlicher Sicht der Ertragsproduktion, zunächst positiv bewertet werden.

Primäre Ursache der pflanzlichen Reaktion auf erhöhtes CO₂ ist der Anstieg der Nettophotosyntheserate (Cure & Acock 1986, Sage et al. 1989, Stitt 1991, Körner & Arnone 1992, Long et al. 1993, Poorter 1993), da für die meisten C₃-Pflanzen, zu denen auch zahlreiche landwirtschaftlich genutzte Kulturpflanzen gehören, die gegenwärtige CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ein limitierender Faktor für die Photosynthese ist (Weigel et al. 1992, Larcher 2001). Allerdings konnte kein linearer Zusammenhang zwischen erhöhten Kohlendioxidkonzentrationen und der Photosyntheseleistung festgestellt werden. Pflanzen, die über einen längeren Zeitraum erhöhtem CO₂ ausgesetzt waren, zeigten eine Akklimation der Photosynthese an die erhöhten Konzentrationen (Allen 1990, Bazzaz 1990, Oechel et al. 1991, Stitt 1991, Oechel et al. 2000), wobei die verbleibende Assimilationsrate jedoch über der Rate bei aktuellem CO₂ lag (Cure & Acock 1986, Sage et al. 1989). Als möglicher Mechanismus wird eine „Feedback-Reaktion“ der Genexpression durch die Kohlenhydratakkumulation in den Blättern unter erhöhtem CO₂ diskutiert (Azcon-Bieto 1983, Stitt 1991, Sheen 1994, Webber et al. 1994). Allerdings sind die Mechanismen, die über die Allokation der Assimilate entscheiden, bislang nur ansatzweise verstanden.

Generell ist die Höhe der CO₂-Antwort abhängig von einer Vielzahl von Faktoren, zu denen unter anderem die Nährstoffversorgung und die Interaktionen mit luftgetragenen Spurengasen zählen. Eine zentrale Stellung der limitierenden Faktoren für den CO₂-Düngeeffekt nimmt die Stickstoffversorgung ein (Conroy 1992, Rozema 1993). Unter limitierender Stickstoffversor-

gung zeigen die meisten C₃-Pflanzen eine geringere Reaktion auf erhöhtes CO₂ als bei ausreichender Versorgung mit Stickstoff (Sage 1994). Die Ursache für die Hemmung des CO₂-Effekts bei vermindertem Stickstoffangebot ist in der Reduktion der physiologischen Senken, verbunden mit einem Rückstau an Kohlenhydraten zu sehen (Allen 1990, Arp 1991, Fichtner et al. 1994). Pflanzen mit uneingeschränktem Stickstoffangebot sind dagegen in der Lage, neue Senken für den zusätzlichen Kohlenhydratgewinn unter erhöhtem CO₂ anzulegen und reagieren mit einem Ertragsanstieg. Ergänzend stellten Fangmeier et al. (1997, 1999) fest, dass die vom Bestand aufgenommenen Stickstoffmengen bei gleichzeitigem Anstieg der Biomasse durch CO₂ unbeeinflusst bleiben und allein von der Aufwandsmenge des Stickstoffs abhängen. Hieraus können sich bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen Rückwirkungen auf den Stickstoffbedarf und folglich auf die Düngung ergeben.

Erhöhte CO₂-Konzentrationen führen im grünen Gewebe von C₃-Pflanzen mit Ausnahme von Phosphor zu einer Verringerung der Mineralstoffkonzentrationen, was zumindest teilweise in einem Verdünnungseffekt durch die vermehrte Akkumulation von nichtstrukturellen Kohlenhydraten begründet ist (Sild et al. 1991, Poorter et al. 1997, Fangmeier et al. 1997). Hinsichtlich des Stickstoffhaushaltes resultiert hieraus eine Erhöhung des C/N-Verhältnisses. Gleichzeitig steigt im Fall von Stickstoff unter erhöhtem CO₂ die Effizienz der Stickstoffausnutzung (*nitrogen use efficiency*, NUE), so dass mit der gleichen Stickstoffmenge mehr Biomasse aufgebaut werden kann (Conroy 1992, Fangmeier et al. 1997, Cotrufo et al. 1998, Fangmeier et al. 1999). Hintergrund der effizienteren Stickstoffnutzung unter erhöhtem CO₂ ist die Verschiebung des in der Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase/Oxygenase (RubisCO) gebundenen Stickstoffs hin zu den Enzymen, die an der Regeneration der Ribulose-1,5-Bisphosphat (RuBP), der Elektronentransportkette der Photosynthese sowie am Zuckertransport in der Chloroplastenmembran beteiligt sind (Sage et al. 1989, Sage 1994, Webber et al. 1994, Stitt & Krapp 1999, Fangmeier & Jäger 2001). Zusätzlich kommt es unter erhöhtem CO₂ zu einer Reduktion der Photorespirationsrate, so dass die Stickstoffallokation zu diesem Enzymsystem ebenfalls herunterreguliert wird (Bertoni & Becker 1996, Fangmeier & Jäger 2001). Da der in das Ertragsgut eingelagerte Stickstoff bei C₃-Pflanzen überwiegend aus den photosyntheseaktiven Geweben stammt, wird das C/N-Verhältnis bei gleichzeitig steigendem Ertrag unter erhöhtem CO₂ ebenfalls größer (Conroy 1992, Cotrufo et al. 1998, Fangmeier et al. 1999). Die Folgen für die Produktqualität durch Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre, wie diese in globalen Kreislaufmodellen prognostiziert werden (Schimel et al. 1995) sind derzeit, wie bereits angesprochen, nur bedingt abzuschätzen.

Nach dem aktuellen Stand der Literatur liegen derzeit die meisten Ergebnisse über die Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Ertragsqualität von Getreidearten vor. Da Getreidepflanzen in der Lage sind, intermediäre Langzeitkohlenhydratspeicher in den Internodien anzulegen und diese unter erhöhtem CO₂ zu vergrößern (Dubois et al. 1990, Winzeler et al. 1990), stehen während der Kornfüllungsphase vermehrt Kohlenhydrate zur Verfügung, die zum Zeitpunkt der Erntereife in den Körnern als industriell verwertbare Kohlenhydrate wie Stärke, Fructane, Saccharose und Einfachzucker eingelagert sind. Die aus der effizienteren Stickstoffnutzung und der Erhöhung des C/N-Verhältnisses unter erhöhtem CO₂ verbundene Abnahme der Proteinkonzentration kann im Falle des Sommerweizens als Verschlechterung der Backeigenschaften, in Falle der Sommergerste als Verbesserung der Braueigenschaften interpretiert werden. Die Stickstoff- und Proteinkonzentration im Korn als wichtige Qualitätskriterien stehen somit in direktem Zusammenhang mit dem Stickstoffmetabolismus und der Stickstoffaufnahme der vegetativen Biomasse und zeigen eine direkte Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung und dem CO₂-Angebot. Allerdings weisen auch mit Stickstoff supraoptimal versorgte Getreidebestände unter erhöhtem CO₂ eine verminderte Proteinkonzentration in den Körnern auf (Fangmeier et al. 1999). Entgegen den ersten Vermutungen können höhere Stickstoffgaben die CO₂-bedingte Abnahme der Kornproteinkonzentration nur teilweise kompensieren und im Falle des Sommerweizens zu einer Qualitätszunahme führen.

Die Ursachen der Qualitätsreaktionen sind vermutlich in der veränderten Kornproteinzusammensetzung zu suchen, die für die Beurteilung der Qualität eine wichtige Rolle spielt. Überträgt man das bekannte, von der Stickstoffdüngung abhängige Reaktionsmuster der Proteinfractionen auf die veränderte Verfügbarkeit von Stickstoff unter erhöhtem CO₂, so kann von einer Förderung der Proteine im Embryo und in der Aleuronschicht (Globulin und Albumin) und einer Reduktion der Reserveproteine (Prolamin und Glutelin) ausgegangen werden. Die von Fangmeier et al. (1999) festgestellte Abnahme des Glutengehaltes im Korn unter erhöhtem CO₂ unterstützt diese Hypothese. In diesem Zusammenhang kann aufgrund des unterschiedlichen Anteils der essentiellen Aminosäuren an den einzelnen Proteinfractionen auch die Aminosäurezusammensetzung der Körner zur Beurteilung der CO₂-bedingten Qualitätsveränderungen herangezogen werden.

Für die Wirkung erhöhter atmosphärischer Spurengase auf die Ertragsqualität von Kartoffeln gibt es derzeit ebenfalls nur wenige Informationen. Überträgt man allerdings CO₂-bedingte Effekte wie ansteigenden Knollenertrag und größer werdendes C/N-Verhältnis auf bekannte stickstoffabhängige Reaktionsmuster der verschiedenen Qualitätsparameter, so kann in bezug auf den Trockensubstanzgehalt durch die vermehrte Einlagerung von Stärke von einem positiven

Qualitätseffekt ausgegangen werden. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass sich die Reduktion der Proteinkonzentration qualitätsverbessernd auf die Ascorbatkonzentration, die Rohbreiverfärbung, die Kochdunklung und den Geschmack auswirken wird. Auch die unter erhöhten CO₂-Konzentrationen vermutlich ansteigende Phosphorkonzentration nimmt eine Schlüsselstellung in der Ausbildung der Qualität ein, da sie einen positiven Effekt auf den Geschmack, die Größensortierung, die Schalenfestigkeit, die Lagerfähigkeit, den Proteingehalt, den Stärkegehalt und die Stärkequalität haben kann. Darüber hinaus besitzt Phosphor auch einen positiven Einfluss auf die Ascorbatbildung.

Im Gegensatz dazu ist, durch die unter erhöhten CO₂-Konzentrationen häufig in Geweben von C₃-Pflanzen beobachtete Reduktion der Mineralstoffkonzentrationen, bei Kartoffelpflanzen eine verminderte Transportgeschwindigkeit der Assimilate aus den Blättern in die Knollen zu erwarten, was sich negativ auf die Knollenform, den Gehalt der Knollen an Kalium, Calcium und Magnesium und die Qualität auswirken kann. Die zu erwartende reduzierte Versorgung der Knollen mit Kalium fördert die Bildung von reduzierenden Zuckern, erhöht das Auftreten der Rohbreiverfärbung, der Kochdunklung und der Blaufleckigkeit und vermindert die Lagerfähigkeit der Knollen. Gleichzeitig wird jedoch auch der Trockensubstanzgehalt gesteigert, was unter Qualitätsaspekten positiv zu bewerten ist. Welche möglichen Folgen auf die Ertrags- und Verarbeitungsqualität sich jedoch in einer zukünftigen CO₂-Welt durchsetzen werden, ist derzeit noch unklar.

Da erhöhtes CO₂ die Wassernutzungseffizienz über die Reduktion der stomatären Leitfähigkeit verbessert (Cure & Acock 1986, Morison 1987, Lawlor & Mitchell 1991, Kimball et al. 1993, Tyree & Alexander 1993, Sage 1994), können Interaktionen mit anderen atmosphärischen Spurengasen wie Ozon angenommen werden (Allen 1990, Van de Geijn et al. 1993).

1.4.2 WIRKUNG VON OZON AUF LANDWIRTSCHAFTLICHE NUTZPFLANZEN

Ozon wird als phytotoxisch wirkendes Spurengas von den Blättern fast ausschließlich über die Stomata aufgenommen (Tingey & Taylor 1982, Allen 1990, Ashmore & Bell 1991, Winner 1994), ein anderer Teil wird auf den externen pflanzlichen Oberflächen sowie an der Bodenoberfläche deponiert (Grünhage & Jäger 2001). Der Aufnahmeweg über die Kutikula gilt als vernachlässigbar (Kerstiens et al. 1989). Die Ozonaufnahme basiert auf der Diffusion des Gases entlang eines Konzentrationsgradienten zwischen der Atmosphäre und dem Blattinneren.

Ozon greift im Pflanzeninneren aufgrund seiner stark oxidativen Wirkung biologische Verbindungen mit „SH“- und „En“-Gruppen (-C=C-) über Radikalkettenreaktionen an. Als charakte-

ristische Grundreaktionen mit biochemischer Relevanz gilt die Ozonspaltung olefinischer Bindungen und die Reaktion mit Thiolen. Somit sind die Biomembranen die charakteristischen Reaktionsorte (Heath 1980, Runeckles & Chevone 1992). Die Ozonisierung von Alkenen liefert Additionsprodukte (Ozonide), die zu Ketonen und dem „Criegee-Zwitterion“ zerfallen. Diese liegen in zwei mesomeren Formen vor und ermöglichen die Addition von Carbonsäuren, Alkohol und Wasser, wobei Peroxide gebildet werden. Die Reaktion von Ozon mit einer Reihe biologischer Moleküle (Cystein, Methionin, Glutathion, Ascorbat, NADPH und NADH) führt zur Bildung von Singulett-Sauerstoff. Dieser ist in der Lage, die Lipidperoxidation zu initiieren und Membranschäden zu verursachen. Ozon bewirkt somit sowohl eine direkte als auch eine indirekte, radikalvermittelte Schädigung von Biomolekülen, die den zellulären Redoxstatus und die metabolischen Funktionen verändert. Folgen sind auf physiologischer Ebene der programmierte Zelltod, auf makroskopischer Ebene sichtbare Blattschädigungen, auf Organebene eine verfrühte Seneszenz und auf Individuenebene eine verringerte Produktivität und Ertragseinbußen von über 20 % (Heck 1982, Ashmore 1988, Van der Eerden et al. 1988, Fuhrer et al. 1989, Pleijel et al. 1991, Runeckles & Chevone 1992, De Temmerman et al. 1992, Sellden & Pleijel 1993, Krupa et al. 1995, Mulholland et al. 1997, Fuhrer et al. 1997, Barnes & Wellburn 1998, Musselmann & Massmann 1999). Auch bei Kartoffelpflanzen induzierten erhöhte Ozonkonzentrationen Schädigungen der Zellmembranen, des Photosyntheseapparates und des Kohlenhydratstoffwechsels. Hieraus resultierten nicht nur Wachstums- und Ertragseinbußen (Goudriaan & De Ruiter 1983, Allen 1990, Krupa & Kickert 1993) sondern auch reduzierte Glucosekonzentrationen in den Knollen (Köllner et al. 2000). Neben der ökologischen Relevanz der Schäden durch Luftschadstoffe ist daher auch die ökonomische Bedeutung für die Landwirtschaft, die einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor darstellt, nicht zu unterschätzen.

Die derzeit aktuellen Grenz- und Richtwerte zum Schutz der Vegetation basieren auf dem AOT40-Konzept (*accumulated exposure over the threshold of 40 ppb*) (Fuhrer et al. 1997), das auf Ergebnissen von open-top Kammer-Experimenten beruht. Da dieses critical-level-Konzept auf Konzentrationen als Maß für die Dosis beruht, das die Bedeutung hoher Schadstoffkonzentrationen aufgrund der im Freiland abweichenden Ozonflüsse überschätzt, werden derzeit zur Ableitung von Grenz- und Richtwerten flussorientierte kritische Eintragsraten (*critical loads*) diskutiert (Grünhage & Jäger 1994).

Im Freiland ist der Ozonfluss aus der Umgebungsluft über die Stomata in die Pflanze eine Funktion der pro Grundflächen- und Zeiteinheit zwischen bodennaher Atmosphäre und Pflanzenbestand ausgetauschten Stoffmenge (Grünhage et al. 2000), der eine Abhängigkeit von den Austauschigenschaften der Atmosphäre zeigt (Grünhage & Jäger 1994). Für die Wirkung von

Ozon im pflanzlichen Metabolismus spielt dabei die absorbierte Dosis (*pollutant absorbed dose*) (Butler & Tibitts 1979, Fowler & Cape 1982, Grünhage & Jäger 2001), die Löslichkeit des Spurengases im Wasser der Zellwände sowie deren Metabolisierung beziehungsweise Entgiftung über extra- und intrazelluläre antioxidative Reparatur- und Kompensationsreaktionen auf dem Weg zum Schädigungsort (Detoxifikationskapazität) eine Rolle (Tingey & Anderson 1991, Lichtenthaler 1996). So weisen Pflanzen mit einem hohen extrazellulären Ascorbatgehalt eine geringere Empfindlichkeit gegen Ozon auf (Tanaka et al. 1985, Luwe et al. 1993). Auch intrazellulär verfügen die Pflanzen über Antioxidantien (Ascorbat, α -Tocopherol, Glutathion) sowie antioxidativ wirkende Enzyme (Superoxiddismutase, verschiedene Peroxidasen, Glutathionreduktase, Katalase), die ozoninduzierte Radikale eliminieren können (Guri 1983, Mehlhorn 1990, Tanaka et al. 1988, Bowler et al. 1991, Madamanchi et al. 1992, Foyer et al. 1994). Von den genannten Enzymen ist gegenwärtig die cytoplasmatische Superoxiddismutase von zentralem Interesse (Pitcher & Zilinskas 1996).

Die Beziehung zwischen Wirkung und absorbierter Dosis kann somit durch eine sigmoidale Funktion beschrieben werden, wobei die Höhe der spezifischen Detoxifikationskapazität den Schwellenwert bestimmt, unter dem keine Wirkung zu erwarten ist. Da jedoch in der Regel relativ hohe Ozonkonzentrationen mit Bedingungen zusammenfallen, die die Aufnahme in die Vegetation limitieren, so dass diese nicht toxisch wirksam werden (Grünhage & Jäger 1994), besitzen die „effektiven Dosen“, das heißt die bis zum Wirkort gelangenden Schadstoffmengen, eine größere Wirkungsrelevanz (Grünhage et al. 1999).

In Kombination mit erhöhten CO₂-Konzentrationen kann jedoch aufgrund der reduzierten Flüsse von Ozon in die Pflanze neben der Kompensation der negativen Ozoneffekte gleichzeitig eine Abschwächung der positiven, wachstumsstimulierenden CO₂-Effekte durch Ozon vermutet werden (Allen 1990, Grünhage et al. 1992, Weigel et al. 1992, Rogers & Dahlman 1993). Neben den stomatären Effekten bewirkt erhöhtes CO₂ durch die verbesserte Produktivität und die vermehrt zur Verfügung stehenden Kohlenstoff- und Energiereserven einen höheren Redox-Status des antioxidativen Systems und somit eine Erleichterung der Reparaturprozesse (Polle & Pell 1999, Fangmeier & Jäger 2001). Damit bieten erhöhte CO₂-Konzentrationen bei verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen einen wirksamen Schutz gegen das phytotoxisch wirkende Ozon (Mulchi et al. 1992, Barnes & Pfirrmann 1992, Heagle et al. 1993, Rao et al. 1995, Hertstein et al. 1996, McKee et al. 1997, Fiscus et al. 1997, Mulholland et al. 1997, 1998, Donnelly et al. 1999, Hudak et al. 1999).

Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, weitgehend ungeklärte Fragen zur Auswirkung von klimarelevanten atmosphärischen Spurengasen am Beispiel ansteigender Kohlendioxid- und Ozonkonzentrationen auf landwirtschaftliche Nutzpflanzen zu beantworten. Im Vordergrund standen hierbei die Folgen für den Ertrag und die Ertragsqualität in bezug auf die industrielle Verarbeitung. Um eine realistische Bewertung über die Auswirkungen für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion treffen zu können, wurden Weizen, Gerste und Kartoffeln in open-top Kammern (OTC) und einem Freiland-CO₂-Anreicherungssystem (FACE) am Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Giessen in Langzeitversuchen exponiert. Als weiteres Kriterium für die Reaktionen der Pflanzen auf luftgetragene Schadgase wurde der direkte Zusammenhang mit der Stickstoffversorgung der Pflanzen untersucht, deren Einfluss auf den Ertrag und die Ertragsqualität entscheidend ist.

Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Arbeit zur Klärung folgender Fragen beitragen:

- Wie stark wird die oberirdische Biomasse durch erhöhtes CO₂ gefördert? Gibt es Interaktionen zwischen erhöhtem CO₂ und Ozon? Welcher Zusammenhang besteht mit der Stickstoffaufnahme?
- Welche Folgen haben erhöhte CO₂- und/oder Ozonkonzentrationen unter Berücksichtigung der Stickstoffversorgung in naher Zukunft auf die Ertragsproduktion landwirtschaftlicher Nutzpflanzen? Welche Ertragskomponenten sind für die Ertragsreaktionen verantwortlich? Gibt es bei der Produktion landwirtschaftlicher Nutzpflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen mögliche Rückwirkungen auf den Nährstoffbedarf und somit auf die Düngung?
- Wie wirken sich erhöhte CO₂- und/oder Ozonkonzentrationen auf die Ertragsqualität aus? Kommt es zu Qualitätsveränderungen oder zu einer Akkumulation von toxischen Substanzen in den Ertragsprodukten? Welchen Einfluss hat die Stickstoffversorgung der Pflanzen? Welche Folgen hat die unter erhöhten CO₂-Konzentrationen veränderte chemische Zusammensetzung des pflanzlichen Gewebes (C/N-Verhältnis, Nährstoffgehalt) auf die Qualität der Ernteprodukte, besonders in bezug auf deren industriellen Verwertungsmöglichkeiten?
- Wie reagieren landwirtschaftliche Kulturpflanzen bezüglich der Bestandesentwicklung auf erhöhte CO₂- und/oder Ozonkonzentrationen unter freilandnahen Bedingungen in Langzeitversuchen? Welche Rolle spielt die Stickstoffversorgung der Pflanzen?

- Welche Folgen haben erhöhte CO₂- und/oder Ozonkonzentrationen bei unterschiedlichem Stickstoffangebot auf die Wasserbilanz von Pflanzenbeständen? Wird die bei Einzelpflanzen beobachtete Wassernutzungseffizienz durch eine vermehrte Blattflächenbildung bzw. durch eine vergrößerte Transpirationsfläche kompensiert, wenn Pflanzen unter erhöhtem CO₂ angezogen werden?

2 MATERIAL UND METHODEN

Die Daten der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen der beiden europaweiten Verbundprogramme EUROPEAN STRESS PHYSIOLOGY AND CLIMATE EXPERIMENT – PROJECT 1: WHEAT (ESPACE-WHEAT) und CHANGING CLIMATE AND POTENTIAL IMPACT ON POTATO YIELD AND QUALITY (CHIP) am Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Giessen erfasst.

2.1 Die Expositionssysteme

OTC und FACE-Systeme ermöglichen die Erhöhung aktueller CO₂- und Ozonkonzentrationen. Es können mit ihnen Spurengaskonzentrationen erreicht werden, die in verschiedenen Modellen für die nächsten Jahrzehnte prognostiziert werden.

Sommerweizen (*Triticum aestivum* L. cv. Minaret) und Sommergerste (*Hordeum vulgare* L. cv. Alexis) wurden 1994 bis 1996 während der gesamten Vegetationsdauer in open-top Kammern (*open-top chambers*, OTC) mit drei verschiedenen CO₂-Konzentrationen (380, 550 und 680 µl l⁻¹ CO₂) sowie 1997 mit zwei CO₂-Konzentrationen (380 und 680 µl l⁻¹ CO₂) in Kombination mit unterschiedlicher Stickstoffversorgung (N) exponiert. 1998 und 1999 erfolgte die Exposition von Kartoffeln (*Solanum tuberosum* L. cv. Bintje) in OTC mit drei CO₂-Levels (380, 550 und 680 µl l⁻¹ CO₂) und mit zwei Ozon-Behandlungen (Umgebungsoson und 60 nl l⁻¹ Ozon) sowie in kammerlosen Umgebungsluft-Feld-Plots (AA) am OTC-Standort. Zusätzlich wurden Kartoffelpflanzen in einem Freiland-CO₂-Anreicherungssystem (FACE) mit zwei CO₂-Stufen (Umgebungs-CO₂ und 550 µl l⁻¹ CO₂) exponiert. Alle Behandlungsvarianten wurden in einem vollfaktoriellen Versuchsdesign mit zwei (1994 bis 1996, 1998, 1999) oder drei (1997) Wiederholungen durchgeführt. Die beiden Expositionsstandorte waren in Giessen (OTC) und 6 km südlich des Giessener Stadtzentrums am Ortsrand von Linden-Leihgestern (FACE).

Die Kombination der verschiedenen Behandlungsvarianten in den Versuchsjahren 1994 bis 1999 ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Unterschiedliche Behandlungsvarianten in den Versuchsjahren 1994 bis 1999.						
	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Behandlung	Weizen (OTC)				Kartoffel (OTC)	
CO ₂ [µl l ⁻¹]	380	380	380	380	380	380
	550	550	550	-	550	550
	680	680	680	680	680	680
	-	-	-	-	AA	AA
Ozon [nl l ⁻¹]	Umgebung	Umgebung	Umgebung	Umgebung	Umgebung	Umgebung
	-	-	-	-	60	60
N [kg ha ⁻¹]	150	150	150	150	200	200
	270	300	300	300	-	-
	Gerste (OTC)				Kartoffel (FACE)	
CO ₂ [µl l ⁻¹]	-	380	380	380	AA	AA
	-	550	550	-	550	550
	-	680	680	680	-	-
Ozon [nl l ⁻¹]	-	Umgebung	Umgebung	Umgebung	Umgebung	Umgebung
N [kg ha ⁻¹]	-	80	80	80	200	200
	-	140	140	140	-	-

Für die unterschiedlichen Expositionsbehandlungen werden im weiteren Text folgende Bezeichnungen verwendet:

OTC380NF: OTC mit 380 µl l⁻¹ CO₂ und Umgebungs-Ozon (ungefiltert, NF)

OTC550NF: OTC mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und Umgebungs-Ozon (ungefiltert, NF)

OTC680NF: OTC mit 680 µl l⁻¹ CO₂ und Umgebungs-Ozon (ungefiltert, NF)

OTC380O3: OTC mit 380 µl l⁻¹ CO₂ und 60 nl l⁻¹ Ozon (ungefiltert, NF)

OTC550O3: OTC mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und 60 nl l⁻¹ Ozon (ungefiltert, NF)

OTC680O3: OTC mit 680 µl l⁻¹ CO₂ und 60 nl l⁻¹ Ozon (ungefiltert, NF)

AA-OTC: AA auf der OTC-Fläche mit Umgebungs-Ozon

AA-FACE: AA auf der FACE-Fläche mit Umgebungs-Ozon

FACE550: FACE mit 550 µl l⁻¹ CO₂ mit Umgebungs-Ozon

Während der gesamten Vegetationsperiode erfolgte innerhalb und außerhalb der OTC die Erfassung der Luftqualitätsdaten für CO₂ als 24-Stunden-Mittelwert. Die Mittelwerte der CO₂-Konzentrationen für die FACE-Behandlungen bezogen sich dagegen nur auf den Zeitraum von zwei Stunden (h) nach Sonnenaufgang bis zwei Stunden vor Sonnenuntergang. Die Berechnung der Ozonkonzentrationen erfolgte als 8-Stunden-Mittelwert (9-17 Uhr MEZ). Darüber hinaus wurden verschiedene physikalische Klimadaten wie Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung über dem Bestand, Regenmenge, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR), Dampf-

druckdefizit (VPD), Taupunkt, Windgeschwindigkeit und Luftaustauschrate während der Vegetationsperiode aufgezeichnet.

2.1.1 OPEN-TOP CHAMBERS

Die Exposition erfolgte in OTC ähnlich dem von Heagle et al. (1973) beschriebenen „Raleigh“-Typ mit einem Durchmesser von 3,15 m, einer Höhe von 2,40 m und einem Dach, um Regen auszuschließen. Als CO₂-Quelle diente flüssiges CO₂ (Linde, Deutschland) aus einem industriellen Syntheseprozess mit einer gleichbleibenden Isotopenzusammensetzung während des gesamten Experimentalzeitraums. Ozon wurde aus reinem Sauerstoff mit einem Ozongenerator (Modell 500, Fischer) produziert. Um in den OTC Ozonwerte proportional zu den Umgebungskonzentrationen einzustellen, wurde ein Massenflusskontroller über die Ozonkonzentration der Umgebung mit einem Personal Computer mit analog-digitaler I/O-Karte gesteuert. In allen OTC herrschte ein Luftaustausch von 120 Luftwechseln pro Stunde, die in die Kammern gelangende Luft wurde über Staubfilter gereinigt. Die Spurengasverteilung in den OTC wurde manuell durch Nadelventile, die mit mechanischen Flussmessern verbunden waren, kontrolliert. In jeder Behandlungsvariante wurden die in den Kammern erreichten CO₂- und Ozonkonzentrationen während eines Zeitraums von 6 Minuten (min) pro Stunde über URAS 10 P-Instrumente (Hartmann & Braun, Deutschland) und über Monitor Labs (Modell 8810) erfasst. Die zu analysierenden Proben wurden in der Mitte jeder OTC etwa 5 cm über Bestandeshöhe entnommen. Alle Leitungen und Ventile, die mit den Luftproben Kontakt hatten, waren aus Teflon oder mit Teflon beschichtet. Über Vakuumpumpen wurden die Leitungen kontinuierlich mit Luft gespült, Filter verhinderten die Verschmutzung der Leitungen mit Staub. Der detaillierte Aufbau der OTC ist in Fangmeier et al. (1992) beschrieben.

Im Winter 1998/99 erfolgte die Verlegung der OTC an einen neuen Standort (ca. 150 m vom alten Standort entfernt) und der modifizierte Aufbau. Die Kammern wurden auf einem in den Boden eingesenkten Betonring mit einem Durchmesser von 3 m und einer Tiefe von 50 cm befestigt. Ein 30 cm dickes Schotterbett in den Ringen sollte Staunässe verhindern. Die Ringe wurden mit Holzbrettern in zwei gleichgroße Hälften unterteilt. Eine der Hälften wurde mit einer wasserpermeablen aber wurzelundurchlässigen Fleecematte ausgelegt und vollständig mit Substrat gefüllt als Versuchsfläche genutzt.

2.1.2 FREILAND-CO₂-ANREICHERUNGSSYSTEM

Das Freiland-CO₂-Anreicherungssystem (FACE) ist ein aus 24 Untereinheiten bestehendes Ringsystem („Plumex-Ring“) mit einem Innendurchmesser von 8 m, das die Exposition mit CO₂ in einem kammerlosen System ermöglicht. In FACE-Systemen herrschen annähernd Freilandbedingungen, so dass die in OTC auftretenden Kammereffekte verhindert werden (Henrey & Kimball 1994, Pinter et al. 2000).

CO₂ wurde über ventilgesteuerte Röhren der Untereinheiten freigesetzt, mit dem Wind über die Expositionsfläche verteilt und von gegenüberliegenden Röhren angesaugt, um erneut ins System eingespeist zu werden, wodurch der CO₂-Verbrauch des Systems vermindert wurde. Die CO₂-Dosierung erfolgte über zentral gesteuerte Ventile durch das gezielte Öffnen und Schließen der Röhren in Abhängigkeit von der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der in der Mitte der Expositionsfläche in 60 cm Höhe entnommenen CO₂-Konzentrationen. Details werden von S. Schmidt (in Vorbereitung) beschrieben.

2.2 Pflanzenkultur

2.2.1 ALLGEMEINE KULTURBEDINGUNGEN

Alle Pflanzen wurden direkt in dem jeweiligen Expositionssystem in den Versuchsgefäßen oder auf den Versuchsfeldern angezogen. Als Pflanzgefäße für Sommerweizen und Sommergerste dienten 1994 bis 1996 Röhren mit einer Höhe von 40 cm, einem Innendurchmesser von 10,3 cm und einem Gesamtvolumen von 3300 cm³. Zum Schutz vor Überhitzung waren die Pflanzgefäße mit weißer Farbe lackiert. Nach dem Befüllen der Pflanzgefäße mit Substrat wurden diese in die OTC transportiert, wo die Aussaat mit 5 Körnern pro Gefäß stattfand. Etwa eine Woche nach dem Auflaufen wurden die Pflanzen auf zwei vergleichbar große Pflanzen pro Topf reduziert. Die Gefäße wurden in „Bündel“ arrangiert, um einen geschlossenen Bestand mit einer Pflanzdichte von annähernd 140 Pflanzen pro m² (1994 und 1995) und 120 Pflanzen pro m² (1996) zu erhalten. Zusätzliche Töpfe mit Pflanzen wurden in den Jahren 1995 und 1996 um den Bestand angeordnet, um von der Seite einfallendes Licht zu reduzieren. Insgesamt war die Pflanzdichte relativ gering, so dass trotz der zusätzlichen Randgefäße von der Seite einfallendes Licht vorhanden war. 1997 erfolgte die Anzucht von Getreide mit 250 Pflanzen pro m² (1997) in Plastikcontainern mit einem Volumen von 90 Liter, einer Tiefe von 40 cm und einer Oberfläche von 0,3 m². Um ein mögliches Aufheizen der Container zu verhindern, wurden diese mit weißer Isoliertapete ummantelt. Als Schutz der Pflanzenbestände gegen seitlich einfallende

Strahlung wurden Beschattungsmatten mit Bambusstäben um die Töpfe befestigt, die mit zunehmender Bestandeshöhe nach oben gezogen wurden.

Saatknollen (28-35 mm, Niederlande) von Kartoffeln wurden 1998 und 1999 bei 4-5 °C gelagert und anschließend für zwei Wochen im Gewächshaus bei 12 °C vorgekeimt. 1999 erfolgte die Vorkeimung von Kartoffelstücken anstelle ganzer Kartoffelknollen. Nach einer Woche Vorkeimzeit wurden die Augen bis auf einen dominierenden Trieb pro Knolle oder Knollenstück mit einem in Hypochlorid (10 %) desinfizierten Messer reduziert. Entsprechend der landwirtschaftlichen Praxis wurden 1998 am OTC- und am FACE-Standort sechs vorgekeimte Knollen pro Plastikcontainer gepflanzt und nach dem Auflaufen auf fünf Pflanzen pro Topf reduziert, um eine Pflanzdichte von 20 Pflanzen pro m² einzustellen. Im Versuchsjahr 1999 erfolgte die Anzucht am OTC-Standort in Kleinbeständen in Reihen (30 cm Abstand innerhalb der Reihen, 25 cm Abstand zwischen den Reihen) auf einer Fläche von 3,5 m² mit einer Pflanzdichte von 13,3 Pflanzen pro m². Am FACE-Standort wurden 1999 fünf vorgekeimte Knollen pro Plastikcontainer gepflanzt und nach dem Auflaufen auf vier Pflanzen pro Topf reduziert, um ebenfalls eine Pflanzdichte von 13,3 Pflanzen pro m² einzustellen. Zusätzliche Pflanzen, die nicht in die Datenerfassung gingen, wurden in beiden Versuchsjahren in Töpfen angezogen und bei Bedarf zu Beginn des Experimentes in den Bestand eingesetzt. Die Pflanztiefe der Knollen betrug in beiden Versuchsjahren 10 cm. Eventuell austreibende basale Seitentriebe wurden in beiden Vegetationsperioden manuell entfernt, um Ein-Stamm-Pflanzen zu erhalten. Die Kartoffelpflanzen mussten zum Schutz vor einem möglichen Umfallen mit Hilfe von Bambusstäben stabilisiert werden. Die Daten für die Kultur der Pflanzen sind Tabelle 2 (A-D) zu entnehmen.

Tabelle 2-A: Zeittafel der experimentellen Handlungen während der Exposition von Getreide mit unterschiedlichen CO₂- und Stickstoffbehandlungen 1994 bis 1997.

WS: Wachstumsstadium nach Tottman & Broad (1987).

Datum (JD)	Tag nach Aussaat	Handlung
1994		
28.04.94 (118)	0	Aussaat von 5 Körnern pro Topf 1.Düngung: 20/20 kg N ha ⁻¹ (WS 00)
02.05.94 (122)	4	Beginn der CO ₂ -Exposition
07.05.94 (127)	9	Auflaufen der Körner
16.05.94 (136)	18	Reduktion der Pflanzen auf Bestandesdichte
30.05.94 (150)	32	2.Düngung: 125/65 kg N ha ⁻¹ (WS 24)
13.06.94 (164)	46	3.Düngung: 50/26 kg N ha ⁻¹ (WS 34)
23.06.94 (174)	56	4.Düngung: 75/39 kg N ha ⁻¹ (WS 57)
26.06.94 (177)	60	Einsatz von Pirimor gegen Blattläuse
04.08.94 (216)	98	Ernte (WS 93)
1995		
27.04.95 (117)	0	Aussaat von 5 Körnern pro Topf
02.05.95 (122)	5	Beginn der CO ₂ -Exposition 1.Düngung Weizen und Gerste: 20/20 kg N ha ⁻¹ (WS 07)
04.05.95 (124)	7	Auflaufen der Körner
11.05.95 (131)	14	Reduktion der Pflanzen auf Bestandesdichte
02.06.95 (153)	36	2.Düngung Weizen: 140/70 kg N ha ⁻¹ , (WS 24) 2.Düngung Gerste: 80/40 kg N ha ⁻¹ , (WS 24)
12.06.95 (163)	46	3.Düngung Weizen: 60/25 kg N ha ⁻¹ (WS 34) 3.Düngung Gerste: 40/20 kg N ha ⁻¹ (WS 34)
30.06.95 (181)	64	4.Düngung Weizen: 80/35 kg N ha ⁻¹ (WS 65)
11.07.95 (192)	75	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge
18.07.95 (199)	82	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge
09.08.95 (221)	104	Ernte bei Stadium 93 (Erntereife)
1996		
25.04.96 (116)	0	Aussaat von 5 Körnern pro Topf
29.04.96 (120)	4	Beginn der CO ₂ -Exposition Auflaufen der Körner
06.05.96 (127)	11	Reduktion der Pflanzen auf Bestandesdichte
07.05.96 (128)	12	1.Düngung Weizen und Gerste: 20/20 kg N ha ⁻¹ (WS 12)
30.05.96 (151)	35	2.Düngung Weizen: 140/70 kg N ha ⁻¹ (WS 24) 2.Düngung Gerste: 80/40 kg N ha ⁻¹ (WS 24)
11.06.96 (163)	47	3.Düngung Weizen: 60/25 kg N ha ⁻¹ (WS 49) 3.Düngung Gerste: 40/20 kg N ha ⁻¹ (WS 49)
17.06.96 (170)	53	4.Düngung Weizen: 80/35 kg N ha ⁻¹ (WS 55)
28.06.96 (180)	64	Einsatz von Corbell, Spruzid und Neudosan gegen Schädlinge
05.07.96 (187)	71	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge
05.08.96 (218)	102	Ernte bei Stadium 93 (Erntereife)
1997		
03.05.97 (123)	0	Aussaat von 146 Körnern pro Topf
07.05.97 (127)	4	Beginn der CO ₂ -Exposition Auflaufen der Körner
14.05.97 (134)	11	Reduktion der Pflanzen auf Bestandesdichte
20.05.97 (140)	17	1.Düngung Weizen und Gerste: 20/20 kg N ha ⁻¹ (WS 13)
28.05.97 (148)	25	2.Düngung Weizen: 140/70 kg N ha ⁻¹ (WS 22) 2.Düngung Gerste: 80/40 kg N ha ⁻¹ (WS 22)
30.05.97 (150)	27	Einsatz von Corbell gegen Schädlinge
12.06.97 (163)	40	3.Düngung Weizen: 60/25 kg N ha ⁻¹ (WS 34) 3.Düngung Gerste: 40/20 kg N ha ⁻¹ (WS 34)
20.06.97 (171)	48	4.Düngung Weizen: 80/35 kg N ha ⁻¹ (WS 55)
03.07.97 (184)	61	Einsatz von Corbell gegen Schädlinge
28.07.97 (209)	86	Einsatz von Corbell gegen Schädlinge
18./19.08.97 (230/231)	107/108	Ernte Gerste bei Stadium 93 (Erntereife)
20./21.08.97 (232/233)	109/110	Ernte Weizen bei Stadium 93 (Erntereife)

**Tabelle 2-B: Zeittafel der zusätzlichen Ernten während der Kornfüllung von Sommerweizen bei unterschiedlichen CO₂- und Stickstoffbehandlungen 1994 bis 1996.
WS: Wachstumsstadium nach Tottman & Broad (1987).**

Datum (JD)	Tag nach Aussaat	Handlung
1994		
20.06.94 (171)	53	Ernte 1: Gesamtähre
27.06.94 (178)	60	Ernte 2: Gesamtähre (WS 65; halbe Anthese)
05.07.94 (186)	68	Ernte 3: Körner
11.07.94 (192)	74	Ernte 4: Körner (WS 75; mittlere Milchreife)
14.07.94 (195)	77	Ernte 5: Körner
20.07.94 (201)	83	Ernte 6: Körner
29.07.94 (210)	92	Ernte 7: Körner (WS 93; Erntereife)
1995		
29.06.95 (181)	64	WS 65; halbe Anthese
13.07.95 (194)	77	Ernte 1: Körner (WS 77; späte Milchreife)
17.07.95 (198)	81	Ernte 2: Körner (WS 83, frühe Teigreife)
20.07.95 (201)	84	Ernte 3: Körner (WS 83; frühe Teigreife)
24.07.95 (205)	88	Ernte 4: Körner (WS 87; späte Teigreife)
27.07.95 (208)	91	Ernte 5: Körner (WS 92, Karyopse hart)
01.08.95 (213)	97	Ernte 6: Körner (WS 92; Karyopse hart)
09.08.95 (221)	104	Ernte 7: Körner (WS 93; Erntereife)
1996		
18.06.96 (170)	54	WS 65; halbe Anthese
28.06.96 (180)	64	Ernte 1: Körner (WS 75; mittlere Milchreife)
03.07.96 (185)	69	Ernte 2: Körner (WS 77; späte Milchreife)
08.07.96 (190)	74	Ernte 3: Körner (WS 83; frühe Teigreife)
12.07.96 (194)	78	Ernte 4: Körner (WS 83; frühe Teigreife)
19.07.96 (201)	85	Ernte 5: Körner (WS 85; weiche Teigreife)
26.07.96 (208)	92	Ernte 6: Körner (WS 87; späte Teigreife)
30.07.96 (212)	96	Ernte 7: Körner
02.08.96 (215)	99	Ernte 8: Körner (WS 92; Karyopse hart)

Tabelle 2-C: Zeittafel der experimentellen Handlungen während der Exposition von Kartoffeln mit unterschiedlichen CO₂- und O₃-Konzentrationen 1998.

Datum	Tag nach Auflaufen	Handlung
15.April 1998	-28	Töpfe mit Substrat gefüllt, Transport in OTC
20.April 1998	-23	Start der Knollenvorkeimung
28.April 1998	-15	Augenreduktion der Knollen
30.April 1998	-13	Töpfe mit Substrat gefüllt, Transport in FACE
04.Mai 1998	-9	Pflanzen der Saatkollen (OTC, AA)
05.Mai 1998	-8	Pflanzen der Saatkollen (FACE)
13.Mai 1998	1	Auflaufen der Knollen
13.Mai 1998	1	Beginn der CO ₂ - und O ₃ -Exposition (OTC)
18.Mai 1998	6	Reduktion der Saatkollen auf Bestandesdichte
21.Mai 1998	9	Beginn der CO ₂ -Exposition (FACE)
29.Mai 1998	17	1.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (OTC)
04.Juni 1998	23	1.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (AA)
05.Juni 1998	24	1.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (FACE)
10.Juni 1998	29	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (OTC)
12.Juni 1998	31	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (OTC)
18.Juni 1998	37	Einsatz von Maneb gegen Phythophtora (alle)
29.Juni 1998	48	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (OTC)
30.Juni 1998	49	Einsatz von Dithane Ultra gegen Phythophtora (alle)
01.Juli 1998	50	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (FACE)
01.Juli 1998	50	2.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (OTC)
06.Juli 1998	55	2.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (AA)
07.Juli 1998	56	2.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (FACE)
07.Juli 1998	56	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (alle)
13.Juli 1998	62	3.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (OTC)
13.Juli 1998	62	Einsatz von Anthracol gegen Phythophtora (OTC, AA)
14.Juli 1998	63	Einsatz von Anthracol gegen Phythophtora (FACE)
16.Juli 1998	65	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (alle)
17.Juli 1998	66	3.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (AA, FACE)
22.Juli 1998	71	Einsatz von Dithane Ultra gegen Phythophtora (alle)
23.Juli 1998	72	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (alle)
27.Juli 1998	76	3.Düngung: 50 kg N ha ⁻¹ (FACE)
28.Juli 1998	77	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (FACE)
29.Juli 1998	78	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (OTC)
03.August 1998	83	Einsatz von Acrobat gegen Phythophtora (alle)
13.August 1998	93	Einsatz von Maneb gegen Phythophtora (alle)
24.August 1998	104	Einsatz von Ridomil gegen Phythophtora (OTC)
27.August 1998	107	Einsatz von Ridomil gegen Phythophtora (AA, FACE)
31.August 1998	111	Ernte der oberirdischen Biomasse (OTC)
07.September 1998	118	Ernte der Knollen (OTC)
07.September 1998	118	Ernte der oberirdischen Biomasse (AA, FACE)
14.September 1998	124	Ernte der Knollen (AA, FACE)

Tabelle 2-D: Zeittafel der experimentellen Handlungen während der Exposition von Kartoffeln mit unterschiedlichen CO₂- und O₃-Konzentrationen 1999.

Datum	Tag nach Auflaufen	Handlung
April 1999		Transport von Substrat in OTC und AA
19.April 1999	-38	Start der Knollenvorkeimung
28.April 1999	-29	Töpfe mit Substrat gefüllt, Transport in FACE
29./30.April 1999	-26	Augenreduktion der Knollen
10.Mai 1999	-17	Pflanzen der Saatknollen (OTC, FACE)
11.Mai 1999	-16	Pflanzen der Saatknollen (AA)
20.Mai 1999	-7	1.Düngung: 75 kg N ha ⁻¹ (OTC, AA) und 105 kg N ha ⁻¹ (FACE, Induktionstöpfe)
25.Mai 1999	1	Auflaufen der Knollen (FACE)
25.Mai 1999	1	Beginn der CO ₂ -Exposition (FACE)
27.Mai 1999	1	Auflaufen der Knollen (OTC)
27.Mai 1999	1	Beginn der CO ₂ -Exposition (OTC)
28.Mai 1999	1	Auflaufen der Knollen (AA)
28.Mai 1999	2	Beginn der O ₃ -Exposition (OTC)
31.Mai 1999	6	Reduktion der Saatknollen auf Bestandesdichte (FACE)
01.Juni 1999	5	Reduktion der Saatknollen auf Bestandesdichte (OTC, AA)
08.Juni 1999	12	2.Düngung: 40 kg N ha ⁻¹ (OTC, AA) und 52,5 kg N ha ⁻¹ (FACE, Induktionstöpfe)
01.Juli 1999	35	Einsatz von Neudosan gegen Schädlinge (alle)
13.Juli 1999	47	Einsatz von Acrobat Super gegen Phythophtora (alle)
13.Juli 1999	47	Einsatz von Pirimor gegen Schädlinge (alle)
24.Juli 1999	58	Einsatz von Pirimor gegen Schädlinge (alle)
26.Juli 1999	60	Einsatz von Acrobat Super gegen Phythophtora (alle)
06.August 1999	71	Einsatz von Maneb gegen Phythophtora (alle)
17.August 1999	82	Einsatz von Acrobat Super gegen Phythophtora (alle)
19.August 1999	86	Ernte der oberirdischen Biomasse (FACE)
27.August 1999	92	Einsatz von Anthracol gegen Phythophtora (OTC, AA)
27.August 1999	94	Ernte der Knollen (FACE)
30.August 1999	94	Ernte der oberirdischen Biomasse (AA)
07.September 1999	102	Ernte der Knollen (AA)
08.September 1999	104	Ernte der oberirdischen Biomasse (OTC)
15.September 1999	111	Ernte der Knollen (OTC)

2.2.2 SUBSTRAT

Als Ausgangssubstrat diente lehmiger Sand von verschiedenen landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Nähe von Giessen. Zur Verwendung in Pflanzgefäßen wurde das Ausgangssubstrat mit Sand im Verhältnis 50/50 (v/v) gemischt, um Probleme mit eventuell auftretender Bodenverdichtung zu vermeiden. Um die Düngeanforderungen für eine optimale Nährstoffversorgung der Pflanzen zu gewährleisten, wurden 1994 bis 1996 Unterproben des fertig gemischten Substrates bei -20 °C zur Analyse eingefroren und vom C.D.E.R.E. (Chambre d'Agriculture, Pau, Frankreich) analysiert. 1997 wurde das Substrat der gleichen Herkunft der Versuchsjahre 1995/96 verwendet. Die Bodenanalysen der Jahre 1998 und 1999 erfolgten in luftgetrockneten Bodenproben an der Hessischen Landwirtschaftlichen Versuchsanstalt in Kassel. Die Ergebnisse der Substratanalyse sind Tabelle 3 zu entnehmen. Das verwendete Substrat war mit Ausnahme von Zink in den Versuchsjahren 1994 bis 1998 ausreichend mit Nährstoffen versorgt, lediglich der Anteil an Humus musste durch das Mischen mit Sand als gering eingestuft werden.

Tabelle 3 : Physikalische und chemische Eigenschaften des verwendeten Substrates in den Versuchsjahren 1994 bis 1999. (n.a.: nicht analysiert)

Parameter	1994	1995-1997	1998	1999
PH	6,0	7,3	6,4	5,9
P ₂ O ₅ [mg 100 g ⁻¹]	23,2	32,0	8	17,5
K ₂ O [mg 100 g ⁻¹]	15,4	23,3	7,5	23,5
Mg [mg 100 g ⁻¹]	13,2	15,7	7	15,5
Ca [mg 100 g ⁻¹]	13,7	23,0	n.a.	n.a.
Humus [%]	1,0	1,1	0,6	1,7
Freier N [mg 100 g ⁻¹]	n.a.	n.a.	1,2	2,1
Gesamt N [%]	n.a.	n.a.	0,05	0,13
C [%]	n.a.	n.a.	-	1,00
Cu [mg kg ⁻¹]	3,10	3,00	3,0	5,9
Zn [mg kg ⁻¹]	2,00	2,70	3,20	8,26
Fe [mg kg ⁻¹]	n.a.	n.a.	354	875
Mn [mg kg ⁻¹]	64,40	55,20	167,0	425,5
Sand [%]	52,3	65,2	65,0	9,5
Schluff [%]	37,2	23,9	26,5	68,7
Ton [%]	9,4	9,7	8,55	21,3

2.2.3 STICKSTOFFVERSORGUNG

Die Getreidearten wurden in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 im gesplitteten Düngedesign mit einem Flüssigdünger (Wuxal Super, Aglukon, Düsseldorf, Deutschland) mit 8 % N, 8 % P, 6 % K, 0,01 % B, 0,007 % Cu, 0,016 % Mn, 0,001 % Mo und 0,005 % Zn versorgt. Alle Weizenpflanzen bekamen die Nährstoffe mit einem Level von 150 kg N ha⁻¹, die Gerstepflanzen wurden generell mit 80 kg N ha⁻¹ versorgt. Diese Grundnährstoffversorgung entsprach der gän-

gigen landwirtschaftlichen Praxis (Reiner et al. 1992). Zusätzlicher Stickstoff wurde in den Stickstoffvarianten für Weizen (120 kg N ha^{-1} im Jahr 1994, 150 kg N ha^{-1} in den Jahren 1996 bis 1997) und für Gerste (70 kg N ha^{-1}) in Form von einer NH_4NO_3 -Lösung zugegeben. Die Gesamtmenge des applizierten Stickstoffs in dieser Variante orientierte sich an den zu erwartenden Wachstums- und Ertragssteigerungen unter erhöhtem CO_2 . Die Düngetermine und die Mengen der Düngung sind Tabelle 2 A-D zu entnehmen.

Bei den Kartoffelpflanzen wurde in den Jahren 1998 und 1999 zusätzlicher organisch-mineralischer NPK-Dünger (MANNASpezial, Ammerbuch, Deutschland) mit 7 % N, 6 % P und 10 % K gesplittet appliziert, um eine Gesamtstickstoffversorgung von 200 kg N ha^{-1} zu gewährleisten.

2.2.4 BEWÄSSERUNG

Die Pflanzen wurden in den Versuchsjahren 1994 bis 1999 während der gesamten Vegetationsperiode ausreichend mit Wasser versorgt. In den Jahren 1994 und 1996 erfolgte die Bewässerung über ein Tröpfchenbewässerungssystem (DGT Volmatic, Sankt Augustin, Deutschland). Ab 1997 wurden die Bestände manuell und möglichst ohne Benetzung der Pflanzen bewässert. Um bei der Verwendung von Pflanzgefäßen das Auftreten von Staunässe zu verhindern, war der Boden mit Löchern versehen. Untersetzer verhinderten ein mögliches Abfließen von Nährstoffen aus dem System, das in den Untersetzern aufgefangene Wasser wurde von oben auf die Versuchsgefäße gegeben.

Um 1998 und 1999 während der gesamten Saison eine gleichmäßige Wasserversorgung bis zu 75 % der Feldkapazität zu gewährleisten, wurde täglich der volumetrische Wassergehalt im Boden über die Time-Domain Reflectometry (TDR)-Methode (Topp et al. 1980) mit einem TDR-Sensor (TRIME-FM-2, PG2 IMKO, Ettlingen, Deutschland) kontrolliert. Zusätzlich wurde 1998 die Bodenwasserspannung über Saugkerzen-Tensiometer in den Töpfen und 1999 über ein Equilibriumtensiometer in den Versuchsflächen erfasst. Die morgens gemessenen TDR-Werte dienten unter Berücksichtigung des aktuell herrschenden Klimas als Grundlage der täglichen Gießmengkalkulation. Aus dem Wasserbedarf der Kartoffelpflanzen konnte für jede Behandlung der gesamte Wasserverbrauch pro m^2 vom Auflaufen bis zur Endernte berechnet werden.

2.2.4.1 VOLUMETRISCHER BODENWASSERGEHALT MIT DER TDR-METHODE

Die TDR-Methode ist eine schnelle, nicht-destruktive Methode zur Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehaltes. Das Verhältnis zwischen dem Wasservolumen der Probe und deren Gesamtvolumen ergibt die volumetrische Feuchte der Probe. Formal gilt:

$$\Theta_{vol} = \frac{V_w}{V_{ges}} \cdot 100$$

Θ_{vol} = volumetrische Feuchte der Probe in Prozent

V_w = Volumen des in der Probe enthaltenen Wassers

V_{ges} = Volumen der gesamten Probe (inklusive Wasser und Luft)

Das Messprinzip beruht auf der Geschwindigkeitsmessung einer elektromagnetischen Welle im zu messenden Material nach folgender Formel:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

c_0 = Lichtgeschwindigkeit (bei elektromagnetischen Wellen im Vakuum realisiert)

ϵ_r = relative Dielektrizitätszahl

μ_r = magnetische Permeabilität (in nichtmagnetischem Material 1)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der elektromagnetischen Wellen hängt nur von der relativen Dielektrizitätszahl ab. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle bekannt, kann die Dielektrizitätszahl ermittelt werden. Bei der verwendeten TDR-Methode läuft eine elektromagnetische Welle entlang der Stäbe, wird reflektiert und läuft zurück, so dass die gemessene Geschwindigkeit von der Laufzeit abhängig ist. Hierfür gilt:

$$c = \frac{2 \cdot l}{t}$$

l = Länge der Sondenstäbe

Im Boden funktioniert dieses Prinzip sehr gut, da wegen des großen Unterschiedes zwischen den Dielektrizitätszahlen von Wasser ($\epsilon_r = 81$) und von Boden ($\epsilon_r < 5$) und der Erhöhung der Dielektrizitätszahl mit steigendem Bodenwassergehalt von der Dielektrizitätszahl auf den Wassergehalt geschlossen werden kann. Im Boden wird die Dielektrizitätskonstante maßgeblich vom Wassergehalt des Bodens bestimmt (Topp et al. 1980), andere Faktoren wie Dichte, Temperatur und Salzgehalt des Bodens haben keine signifikanten Effekte auf die Messung.

Im Versuchsjahr 1998 wurde der volumetrische Bodenwassergehalt der zu bestimmenden Bodenprobe einmal pro Tag (9.00 Uhr) an einer Stelle im Pflanzgefäß, 1999 an fünf verschiedenen Stellen auf der Versuchsfläche bestimmt und der jeweilige Mittelwert gebildet.

2.2.4.2 BESTIMMUNG DES BODENWASSERPOTENTIALS ÜBER TENSIOMETER

1998 wurde das Bodenwasserpotential über Tensiometer in einer Tiefe von 10 cm bestimmt. In jeder Behandlungsvariante wurde ein Topf mit einem Tensiometer bestückt, an dem täglich morgens (9.00 Uhr) das Bodenwasserpotential (Saugspannung) gemessen wurde. Ausgelaufene Tensiometer wurden mit demineralisiertem Wasser (A.demin.) neu befüllt.

Die verwendeten Tensiometer bestanden aus einer 6,5 cm langen porösen, mit demineralisiertem Wasser gefüllten Keramikzelle und einem Tensiometerrohr. Das obere Ende des Tensiometerrohres wurde durch ein Septum luftdicht abgeschlossen. Lag im Boden eine höhere Saugspannung als im Tensiometer vor, trat Wasser aus dem Tensiometer in den Boden aus, wodurch ein Unterdruck im Tensiometer entstand. Herrschte im Boden ein geringeres Potential, kam es zu einem Fluss von Wasser aus dem Boden in das Tensiometer. Die daraus resultierenden Druckunterschiede konnten nach Durchstechen des Septums mit einem Manometer gemessen werden.

2.2.4.3 BESTIMMUNG DES BODENWASSERS ÜBER EIN EQUILIBRIUM-TENSIOMETER

1999 wurde zusätzlich täglich der Wassergehalt mit einem Equilibrium-Tensiometer (UP, Kolkwitz, Deutschland) in 30 cm Bodentiefe gemessen. Das Equilibrium-Tensiometer bestand aus einer Bodenfeuchtesonde, welche in einen porösen Equilibrierkörper eingelassen war. Das Material des porösen Equilibrierkörpers besaß eine bekannte Beziehung zwischen dem Wassergehalt und dem Matrixpotential. Nach Eingraben der Sonde in den Boden erfolgte eine Angleichung des Matrixpotentials des Equilibrierkörpers an das des Bodens. Über eine spezifische Kalibrierkurve konnte das Matrixpotential des Bodens bestimmt werden.

2.2.5 PFLANZENSCHUTZMAßNAHMEN

Pflanzenschutzbehandlungen wurden 1994 bis 1997 in allen Beständen entsprechend der landwirtschaftlichen Praxis bei Getreide mit Pirimor (Spiess-Urania, Hamburg, Deutschland) und Neudosan (Neudorff, Emmerthal, Deutschland) gegen Blattläuse, mit Corbel (BASF, Ludwigshafen, Deutschland) gegen Mehltau und mit Spruzid (Neudorff, Emmerthal, Deutschland) gegen Getreidehähnchen (*Oulema melanopus*) durchgeführt. In den Kartoffelbeständen wurde in

den Jahren 1998 und 1999 mit Neudosan (Neudorff, Emmerthal, Deutschland) gegen Spinnmilben und Blattläuse sowie vorbeugend mit Maneb (Schacht, Braunschweig, Deutschland), Dithane Ultra (Spiess-Urania, Hamburg, Deutschland), Anthracol (Bayer, Leverkusen, Deutschland), Acrobat (BASF, Ludwigshafen, Deutschland) und mit Ridomil (Novartis, Basel, Schweiz) gegen Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans*) gespritzt. Unkräuter wurden manuell entfernt.

2.3 Bestandesentwicklung

1998 und 1999 wurden nicht-destruktiv biologische Messungen zur oberirdischen Bestandesentwicklung der Kartoffelpflanzen durchgeführt. In wöchentlichen Intervallen wurde die phänologische Entwicklung der Pflanzen, die Bestandeshöhe, die Anzahl der grünen und der seneszenten Blätter, die Lichtinterzeption bzw. der Blattflächenindex (*leaf area index*, LAI), der sichtbare Ozonschaden und der Chlorophyllgehalt der Blätter bestimmt.

2.3.1 PHÄNOLOGISCHE ENTWICKLUNG

1999 wurde über die gesamte Entwicklungsperiode der Zeitpunkt wichtiger phänologischer Wachstumsstadien der Kartoffelpflanzen (Auflaufen, Erscheinen der ersten Infloreszenz, Knolleninduktion, maximale Blattfläche, Beginn der Seneszenz und Physiologische Reife) nach dem Boniturschlüssel von Hack et al. (1993) an 15 Pflanzen pro Behandlung bestimmt. Bis zum Stadium des Auflaufens erfolgte die Bonitur der Pflanzen täglich, die weiteren Entwicklungsstadien wurden in wöchentlichen Abständen erfasst. Die Stadien Blüte, Entwicklung und Reife der Früchte und Samen konnten in keinem der Versuchsjahre beobachtet werden, da die Pflanzen ihre Blüten verloren. Die Knolleninduktion wurde nicht-destruktiv in zusätzlichen mit Sand gefüllten Töpfen beobachtet (Abbildung 1). Vorsichtiges Entfernen des Sandes in der Nähe der Stolonen und Knollen ermöglichte die Bestimmung des Zeitpunktes der Knolleninduktion.

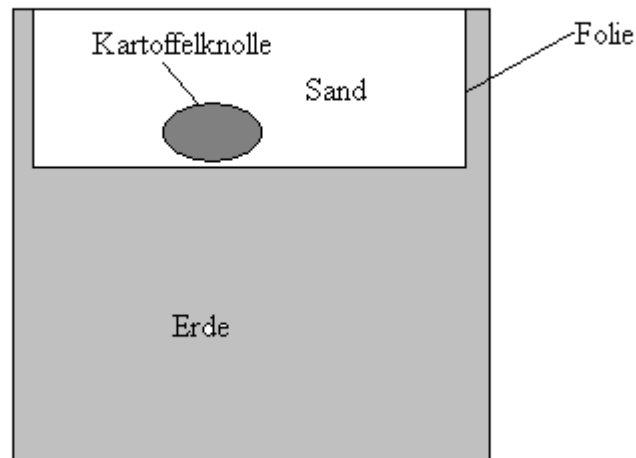


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Gefäßes zur nicht-destruktiven Beobachtung der Knolleninduktion 1999.

2.3.2 LICHTINTERZEPTION UND BLATTFLÄCHENINDEX

Zur Bestimmung der Lichtinterzeption wurde 1998 wöchentlich für jeden Topf dreimal die Strahlung über und im Bestand mit einem PAR-Sensor (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) gemessen und aus dem Verhältnis die Interzeption in Prozent berechnet. Die Lichtinterzeption ist ein Maß dafür, wie viel Prozent der auf einen Pflanzenbestand einfallenden photosynthetisch aktiven Strahlung von den Pflanzen absorbiert wird. Mit zunehmendem Bestandeswachstum stieg die Lichtinterzeption an und sank mit beginnender Seneszenz durch die Reduktion der Blattfläche ab.

1999 wurde bei indirekter Sonneneinstrahlung der Blattflächenindex (LAI) nicht-destruktiv an fünf verschiedenen Stellen des Bestandes mit einem Leaf Area Index-Meter (LAI 2000, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) bestimmt. Das Gerät bestand aus einer Kontrolleinheit zur Messung, Aufzeichnung und Wiedergabe der Daten und aus dem optischen Sensor mit einer aus fünf konzentrischen Kreisen bestehenden Linse, die mit unterschiedlichen Winkeln die Menge des vertikal bis horizontal einfallenden diffusen Lichts erfasste. Die Abdeckung der Linse mit einer Sicht-Schablone (270°) verhinderte die Beeinflussung der Messwerte durch die messende Person. Die Blätter des Bestandes wurden vom optischen Sensor als schwarze Körper gesehen, da in einem Bereich gemessen wurde, indem die Blätter wenig reflektierten und transmittieren. Für jede Messung wurde einmal der Wert oberhalb und dreimal der Wert am Boden des Bestandes ermittelt und vom Gerät die Abschwächung des diffusen Lichtes durch den Bestand berechnet. Die in der Kontrolleinheit gespeicherten Daten wurden mittels der

2000-90 LAI-2000 DOS Software (LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA) zur weiteren Bearbeitung auf einen PC übertragen.

2.3.3 SICHTBARER OZONSCHADEN

Der sichtbare Ozonschaden der Pflanzen wurde nach den Schadensstufen „keine Schädigung“, „sehr geringe Schädigung“ (erste Symptome sichtbar), „geringe Schädigung“ (1-5 % der Blätter geschädigt), „mäßige Schädigung“ (5-25 % der Blätter geschädigt), „schwere Schädigung“ (mehr als 25 % der Blätter geschädigt) und „totaler Schaden“ (90-100 % der Blätter geschädigt) quantifiziert.

2.3.4 CHLOROPHYLLGEHALT

Die Bestimmung des Chlorophyllgehaltes erfolgte an jungen, voll entwickelten Blättern im oberen Bestandesteil nicht-destruktiv mit einem transportablen Chlorophyllmessgerät (Minolta SPAD-Meter 502, Osaka, Japan) und destruktiv nach Acetonextraktion im Photometer.

2.3.4.1 NICHT-DESTRUKTIVE BESTIMMUNG MIT DEM SPAD-METER

Der relative Chlorophyllgehalt der Blätter von 15 Pflanzen pro Behandlung erfolgte nicht-destruktiv im wöchentlichen Abstand am jüngsten, voll entwickelten Blatt im oberen Bestandesteil mit einem transportablen Chlorophyll-Messgerät (SPAD-Meter 502, Minolta Co. Ltd., Osaka, Japan). Die Kalibrierung des Gerätes erfolgte bei geschlossenem Messkopf. Pro Kartoffelblatt wurden die drei Endfiedern mit drei Wiederholungen gemessen und der Mittelwert berechnet.

Das SPAD-Meter ist ein miniaturisiertes Photometer. Das Prinzip beruht auf der Messung der Differenz der optischen Dichten bei zwei verschiedenen Wellenlängen. Die Konzentration an Chlorophyll a wird mit Hilfe von Rotlicht und Infrarotlicht bestimmt, da die Absorption durch Chlorophyll bei Rotlicht hoch und bei Infrarotlicht gering ist. Das vom SPAD-Meter durch Dioden emittierte Licht strahlt durch das Blatt hindurch auf einen gegenüberliegenden Photodetektor. Die Stärke der ankommenden Reststrahlung wird gemessen, in elektrische Signale umgewandelt und unter Berücksichtigung der Kalibrierung als SPAD-Wert angegeben. Der gemessene SPAD-Wert ist ein relativer Wert, der abhängig von der Blattdicke ist. Die SPAD-Werte zeigten eine Korrelation mit dem destruktiv nach Acetonextraktion im Photometer bestimmten Chlorophyllgehalt ($R^2 = 0,805$).

2.3.4.2 *CHLOROPHYLLBESTIMMUNG IM ACETON-EXTRAKT*

Die spektralphotometrische Bestimmung erlaubte die Ermittlung der Gehalte von Chlorophyll a und b (Lichtenthaler & Wellburn 1983) und von Carotinoiden. Chlorophylle zeigen ein Extinktionsmaxima im blauen und im roten Spektralbereich, wobei Chlorophyll a ein Extinktionsmaximum bei 410-430 nm und um 660 nm sowie Chlorophyll b um 450 nm und um 640 nm aufweist. Die Carotinoide besitzen ein Absorptionsmaximum im Bereich zwischen 400 und 550 nm. Nach Extraktion der Pigmente in einem Aceton-Wassergemisch konnte aus den verschiedenen Extinktionskoeffizienten die Pigmentkonzentration berechnet werden.

Lösungen

Aceton 80 % (v/v).

Probenaufarbeitung

250 mg frisches Blattmaterial, an dem zuvor die SPAD-Werte bestimmt wurden, wurde in 10 ml eiskaltem Aceton mit dem Ultra-Turrax (Janke & Kunkel T25, Staufen, Deutschland) homogenisiert und auf Eis gelagert. Die Lösung wurde durch eine Fritte (Schott G4, maximale Porenweite 10 - 16 µm, Mainz, Deutschland) mittels Vakuum in einen Messkolben gefiltert. Die Extinktion der Probe wurde bei 663, 646 und 470 nm im Spektralphotometer (Beckman DU 640, Fullerton, Californien, U.S.A.) gegen Aceton bestimmt.

Berechnung des Chlorophyllgehaltes

Aus den gemessenen Extinktionen wurde nach den folgenden Gleichungen die Pigmentkonzentrationen berechnet (Lichtenthaler 1987):

$$\text{Chl a } [\mu\text{g ml}^{-1}] = 12,21 \cdot E_{663} - 2,81 \cdot E_{646}$$

$$\text{Chl b } [\mu\text{g ml}^{-1}] = 20,13 \cdot E_{646} - 5,03 \cdot E_{663}$$

$$\text{Carotinoide } [\mu\text{g ml}^{-1}] = \frac{1000 \cdot E_{470} - 3,27 \cdot \text{Chl a} - 104 \cdot \text{Chl b}}{229}$$

$$\text{Pigmentgehalt } [\mu\text{g g}^{-1} \text{ FG}] = \frac{(\text{Acetonmenge [ml]} \cdot \text{Pigmentgehalt } [\mu\text{g ml}^{-1}])}{\text{Einwaage [g]}}$$

2.4 Ernte, Ertrag und Ertragsparameter

Die Ernte der Getreidepflanzen erfolgte zum Zeitpunkt der Reife zum Wachstumsstadium 93 nach Tottman & Broad (1987). Lediglich 1994 bis 1996 fanden zusätzliche Ernten während der Phase der Kornfüllung statt (Tabelle 2-B), um Informationen über diesen Prozess zu bekommen. Geerntet wurden 1994 vier Pflanzen pro Behandlung, 1995 bis 1996 acht Pflanzen pro Behandlung und 1997 20 Pflanzen pro Behandlung. Ab 1995 wurden die Körner zusätzlich nach Haupt- und Nebenähren getrennt. Die vegetative Biomasse der Getreidepflanzen wurde bei 60 °C, die Ähren bei 35 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und das Trockengewicht bestimmt. Zusätzlich wurde die Zahl der Ähren, der Kornertrag, die Kornzahl und der Harvest-Index als Verhältnis des Kornertrags zur oberirdischen Biomasse erfasst. Zur Bestimmung des Tausendkorngewichts (TKW) wurden 1000 Körner von Hand oder mittels einer Zählmaschine abgezählt und gewogen.

Die Kartoffelpflanzen wurden in den Versuchsjahren 1998 und 1999 zum Zeitpunkt der physiologischen Reife (Bodendeckung um 50 % reduziert) geerntet. Zu diesem Zeitpunkt war das Kraut der Kartoffelpflanzen natürlich abgestorben, die Knollen lösten sich von den Stolonen, die Schale war fest und die Knollen wiesen eine feste Schnittfläche auf. Die Ernte der Knollen zur physiologischen Reife wurde gewählt, da die Knollen zu diesem Zeitpunkt eine optimale Speisequalität und Lagerfähigkeit besaßen und den höchsten Gehalt an erzielbarer Trockensubstanz sowie einen niedrigen Gehalt an reduzierenden Zuckern aufwiesen. 1998 wurden vier oder fünf Töpfe pro Behandlungswiederholung zur Endernte geerntet. 1999 wurden, um Randeffekte zu vermeiden, 20 Pflanzen aus einem zentralen Bereich der Versuchsfläche entnommen. Die oberirdische Biomasse wurde geerntet, in Blätter und Stängel unterteilt, im Trockenschrank bei 60 °C bis zum Erreichen einer Gewichtskonstanz getrocknet und das Trockengewicht bestimmt. Eine Woche nach der Ernte der oberirdischen Biomasse wurden die Knollen geerntet, mit entmineralisiertem Wasser gereinigt und im Dunkeln bei 6-8 °C für maximal drei Wochen gelagert.

2.5 Allgemeine Ertragsqualität

Um Aussagen über die allgemeine Ertragsqualität von Weizen, Gerste und Kartoffeln zu treffen, wurde das Tausendkorngewicht (TKW) und die Keimfähigkeit der Getreidekörner sowie die Größenverteilung der Getreidekörner und der Kartoffelknollen untersucht.

2.5.1 GRÖßENSORTIERUNG BEI GETREIDE UND KARTOFFELN

Die von den Spelzen getrennten Getreidekörner wurden mittels eines Sortierapparates (Sortimat) mit übereinanderliegenden Sieben entsprechend ihrem Querdurchmesser in Fraktionen kleiner 2,5 mm, 2,5 mm bis 2,8 mm, 2,8 mm bis 3,0 mm, 3,0 mm bis 3,3 mm und größer 3,3 mm getrennt, gewogen und der jeweilige Anteil am Gesamtkorn berechnet.

Die Knollen von Kartoffeln wurden in drei unterschiedliche Größenfraktionen kleiner 35 mm (nicht zum Verbrauch geeignet), 35-50 mm (geeignet zum Direktkonsum) und größer 50 mm (geeignet für die industrielle Verarbeitung) unterteilt. Zur Sortierung wurden Siebe mit einem quadratischen Querschnitt mit 35 mm Seitenmaß zur Absortierung der Untergrößen und mit 50 mm Seitenmaß zur Absortierung der mittleren Größen verwendet. Für jede Größenklasse wurde die Anzahl der Knollen, das Knollenfrischgewicht und das Knollentrockengewicht bestimmt.

2.5.2 KEIMFÄHIGKEITSPRÜFUNG BEI GETREIDE

Die Keimfähigkeit bezeichnet die Anzahl der Körner, die nach 7 Tagen gekeimt waren (Internationale Vereinigung für Saatgutprüfung 1985, modifiziert). Hierzu wurden 50 Getreidekörner mit drei Wiederholungen in einer Petrischale (Durchmesser 90 mm) auf zwei Lagen Filterpapier gleichmäßig verteilt und mit 10 ml entmineralisiertem Wasser angefeuchtet. Um die Verdunstung zu beschränken, erfolgte die Keimfähigkeitsprüfung in geschlossenen Petrischalen, die im Keimraum exponiert wurden. Nach zwei Tagen bei 20 °C und vollem Licht unter Quecksilberlampen wurde die Auszählung der gekeimten Körner gestartet. Gekeimte Körner wurden während den Zwischenzählungen aus dem Versuch entfernt, um zu vermindern, dass die Keimlinge einander in der Entwicklung beeinträchtigen. Als gekeimt galt ein Korn, dessen Keimwurzel und Sprossspitze sichtbar war. Als nicht gekeimt wurden Körner ohne diese Anzeichen sowie Körner mit Pilzbefall oder mit deformierten Keimlingen beurteilt.

$$\text{Keimfähigkeit [\%]} = \frac{\text{Anzahl der gekeimten Körner} \cdot 100}{\text{Gesamtzahl der Körner}}$$

2.6 Optische Ertragsqualität

Die Erfassung der optischen Qualitätsparameter erfolgte in den Versuchsjahren 1998 und 1999 für die Knollen der Kartoffeln. Hierzu wurde nach der Ernte der Kartoffelknollen visuell der Anteil an deformierten und grünen Knollen sowie das prozentuale Vorkommen von Kartoffelschorf für den industriellen Ertrag bestimmt.

2.7 Physikalische Ertragsqualität

In den Versuchsjahren 1998 und 1999 wurde in den Kartoffelknollen größer 50 mm die Glasigkeit, das Unterwassergewicht (UWW), das Spezifische Gewicht (SG) und die Trockensubstanz als physikalische Qualitätsparameter erfasst.

2.7.1 GLASIGE KNOLLEN

In einer Salzlösung mit einer Dichte von $1,060 \text{ mg ml}^{-1}$ wurde der Anteil der glasigen Knollen bestimmt. Das Vorkommen von glasigen Knollen basiert auf außergewöhnlichen Bedingungen während der Wachstumsphase, so dass diese Knollen nicht für die chemischen Qualitätsanalysen verwendet wurden.

2.7.2 UNTERWASSERGEWICHT UND SPEZIFISCHES GEWICHT

5000 g Kartoffeln wurden gewogen und in ein randvoll gefülltes Gefäß mit Wasser gegeben. Das überlaufende Wasser wurde aufgefangen, ausgewogen und aus dem Verhältnis des Frischgewichts der Knollen zum Gewicht des verdrängten Wassers das Unterwassergewicht (UWW) berechnet. Kleinere Probenmengen wurden auf 5000 g Frischgewicht hochgerechnet.

$$UWW = \frac{5000 \cdot SG - 5000}{SG}$$

Das Spezifische Gewicht der Knollen wurde nach folgender Formel berechnet:

$$SG = \frac{5000}{5000 - \text{Unterwassergewicht}}$$

2.7.3 TROCKENSUBSTANZ

Gewaschene, ungeschälte Kartoffeln wurden frisch eingewogen, in kleine Stücke geschnitten, bei $110 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und das Trockengewicht bestimmt. Aus dem Verhältnis von Frischgewicht zu Trockengewicht konnte der Anteil der Trockensubstanz berechnet werden.

2.8 Chemische Ertragsqualität

Um mögliche Effekte von erhöhtem CO_2 in Kombination mit der Stickstoffversorgung oder erhöhten CO_2 - und O_3 -Konzentrationen auf die chemischen Qualitätseigenschaften landwirt-

schaftlicher Nutzpflanzen festzustellen, wurden verschiedene Inhaltsstoffe in den Getreidekörnern und in den Kartoffelknollen analysiert.

Um eine Kontamination der Körner für die Qualitätsanalysen zu vermeiden, erfolgte die Trennung der Körner von den Spelzen ohne direkten Hautkontakt durch den Einsatz von Handschuhen oder mit Hilfe einer Dreschmaschine. Die Analysen der Getreidekörner erfolgten in getrocknetem, gemahlenem Probenmaterial.

Für die chemischen Qualitätsanalysen der Kartoffeln wurden Unterproben von ungeschälten Knollen der Größensortierung größer 50 mm innerhalb von 2 min im Küchenmixer zerkleinert, in flüssigem Stickstoff eingefroren, gefriergetrocknet und gemahlen.

Alle Proben wurden bei -20 °C in luftdichten Kunststoffgefäßen gelagert und für die chemischen Qualitätsanalysen eingesetzt.

Erfasst wurden als Inhaltsstoffe in den Körnern und Knollen der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen die Kohlenhydratkonzentration (lösliche Kohlenhydrate und Stärke), die Mineralstoff- und die Proteinkonzentration. In den Getreidekörnern wurde zusätzlich der Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein, in den Kartoffelknollen die Konzentration der Organischen Säuren, der Glycoalkaloide, der Anionen und der freien Aminosäuren analysiert.

2.8.1 KOHLENHYDRATE

2.8.1.1 ENZYMATISCHE BESTIMMUNG VON KOHLENHYDRATEN

Die Methode beschreibt ein enzymatisches Verfahren zur Bestimmung von niedermolekularen Metaboliten, Disacchariden, Fructanen und Stärke. Bei der photometrischen Bestimmung zugrundeliegenden Reaktion besteht eine lineare Proportionalität zwischen der Extinktion und der Kohlenhydratkonzentration.

Allgemeine Probenaufarbeitung

20 bis 50 mg getrocknetes, fein gemalenes Pflanzenmaterial wurde dreimal mit 3,33 ml Ethanol (70 %) für 15 min in einem 80 °C heißen Ultraschallbad homogenisiert. Die Proben wurden bei 3000 UPM für 10 min bei Raumtemperatur abzentrifugiert (Heraeus Christ, Omnifuge, Osterode, Deutschland), der Überstand quantitativ in 10 ml Kolben überführt und mit Ethanol bis zur Marke aufgefüllt. Im Überstand wurde in einem enzymatischen Verfahren der Gehalt an Saccharose, reduzierenden Zuckern, Fructanen und der Gesamtgehalt löslicher Kohlenhydrate bestimmt. Aus dem ethanolunlöslichen Rückstand wurde der Stärkegehalt analysiert.

Bestimmung von Saccharose und reduzierenden Zuckern

Das Verfahren zur Bestimmung von Saccharose und reduzierenden Zuckern nach Extraktion in einem Ethanol-Wassergemisch beruht auf einer Methode von Lever (1977). Die im ethanollöslichen Überstand enthaltene Saccharose wurde durch Inkubation mit Invertase zu D-Glucose und Fructose hydrolysiert (Avigad 1990). Diese reagierte mit heißer alkalischer Hydroxybenzoesäurehydrazidlösung über eine Redoxreaktion zu einem gelben Hydroxybenzoesäurehydrazon, dessen Extinktion im Spektralphotometer bestimmt wurde. Die im Überstand bereits enthaltenen reduzierenden Zucker wurden für jede Probe durch eine Reaktion ohne Invertase bestimmt. Aus der Differenz der gemessenen Glucosekonzentrationen mit und ohne enzymatische Inversion wurde der Gehalt an Saccharose spezifisch über eine Eichreihe mit D-Glucose bestimmt.

Lösungen

Ethanol 70 % (v/v); Invertaselösung (10 mg Invertase mit A.demin. auf 100 ml auffüllen); Lösung A (20 g NaOH, 14,704 g tri-Na-Citrat-Dihydrat und 1,47 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ getrennt in A.demin. lösen und auf 1000 ml auffüllen); Lösung P (5 g Hydroxybenzoesäurehydrazid mit Lösung A auf 1000 ml auffüllen); Glucose (0,1 mg ml^{-1} Glucose in A.demin.).

Messansatz

Die Probe- oder Standardlösung wurde je nach Bestimmungsansatz (Saccharose oder reduzierende Zucker) mit oder ohne Invertase und A.demin. versetzt, geschüttelt und 2 h bei 30 °C im Wasserbad inkubiert. Anschließend wurde die Probe mit 5 ml Lösung P versetzt und durchmischt. Die fertigen Ansätze wurden bei 100 °C für 4 min im Wasserbad inkubiert, auf Raumtemperatur abgekühlt und die Absorption im Photometer (Beckman Instruments, DU 64, Fullerton, Californien, U.S.A.) bei 415 nm bestimmt.

Messansatz					
Reagenz [ml]	mit Invertase		ohne Invertase		Bemerkungen
	Probe	Eichreihe	Probe	Eichreihe	
Probelösung	0,2	-	0,4	-	
Eichlösung	-	0,9	-	0,9	
Invertase	0,1	0,1	-	-	
A.demin.	0,7	-	0,6	0,1	mischen, 2 h bei 30 °C
Lösung P	5,0	5,0	5,0	5,0	mischen
Inkubation im Wasserbad (4 min 100 °C), Photometer (415 nm)					

Kalibrierung

Der Gehalt an Saccharose bzw. reduzierenden Zuckern wurde über eine Eichgerade mit Glucose (0 – 90 $\mu\text{g ml}^{-1}$ in A.demin.) bestimmt.

Berechnung des Gehaltes von Saccharose und reduzierenden Zuckern

$$\text{Reduzierende Zucker } [\mu\text{g g}^{-1} \text{ TG}] = \frac{\text{Wert aus Eichgerade } [\mu\text{g Glucose ml}^{-1}] \cdot \text{Verdünnungsfaktor}}{\text{Einwaage [g]}}$$

$$\text{Saccharose } [\mu\text{g g}^{-1} \text{ TG}] = [\text{Wert mit Invertase}] - [\text{Wert ohne Invertase}] \cdot F$$

$$F = \frac{\text{MG Saccharose}}{(\text{MG Glucose} + \text{MG Fructose})} = \frac{342}{(180 + 180)} = 0,95$$

Bestimmung von Fructanen

Die Bestimmung der in den Proben enthaltenen Fructane erfolgte aus dem ethanollöslichen Überstand. Die säurelabilen Fructane wurden durch Kochen mit 0,2 M Salzsäure (HCl) zu reduzierenden Zuckern hydrolysiert und über eine Redoxreaktion als Hydroxybenzoesäurehydrazon photometrisch bestimmt. Die in der Probe bereits vorliegenden reduzierenden Zucker wurden für jede Probe durch eine Reaktion ohne HCl erfasst. Aus der Differenz der gemessenen Konzentration mit und ohne saure Hydrolyse und Subtraktion der Saccharosekonzentration wurde der Fructangehalt über eine Eichreihe mit D-Fructose bestimmt (Pontis 1990).

Lösungen

Ethanol 70 % (v/v); HCl 0,2 M; Lösung A (20 g NaOH, 14,704 g tri-Na-Citrat-Dihydrat und 1,47 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ getrennt in A.demin. lösen und mit A.demin. auf 1000 ml auffüllen); Lösung P (5 g Hydroxybenzoesäurehydrazid mit Lösung A auf 1000 ml auffüllen); Fructose (0,1 mg ml^{-1} Fructose in A.demin. bzw. 0,2 M HCl).

Messansatz

Um den in den Proben vorliegenden Fructangehalt zu bestimmen wurden die Probe- und die Standardlösungen je nach Bestimmungsansatz mit 0,2 M HCl bzw. A.demin. versetzt, geschüttelt und 2 h bei 100 °C im Wasserbad inkubiert. Nach Zugabe von 5 ml Lösung P wurden die Proben durchgemischt, 4 min bei 100 °C im Wasserbad inkubiert, auf Raumtemperatur abgekühlt und die Absorption bei 415 nm im Spektralphotometer bestimmt.

Messansatz					
Reagenz [ml]	mit HCl		mit A.demin.		Bemerkungen
	Probe	Eichreihe	Probe	Eichreihe	
Probelösung	0,4	-	0,4	-	
Eichlösung	-	1,0	-	1,0	
0,2 M HCl	0,6	-	-	-	
A.demin.	-	-	0,6	-	mischen, 2 h bei 30 °C
Lösung P	5,0	5,0	5,0	5,0	mischen
Inkubation im Wasserbad (4 min 100 °C), Photometer (415 nm)					

Kalibrierung

Der Gehalt an Fructanen bzw. an reduzierenden Zuckern wurde über eine Eichgerade mit Fructose (0,0 – 90 µg ml⁻¹ in 0,2 M HCl bzw. A.demin.) bestimmt.

Berechnung des Fructangehaltes

$$\text{Fructose } [\mu\text{g g}^{-1} \text{ TG}] = \frac{\text{Wert aus Eichgerade } [\mu\text{g Fructose ml}^{-1}] \cdot \text{Verdünnungsfaktor}}{\text{Einwaage [g]}}$$

$$\text{Fructan } [\mu\text{g g}^{-1} \text{ TG}] = [\text{Wert mit 0,2 M HCl}] - [\text{Wert ohne 0,2 M HCl}] - [\text{Wert Saccharose}] \cdot F$$

$$F = \frac{\text{Mittleres MG Fructan}}{\text{MG Fructose}} = \frac{162,126}{180} = 0,9007$$

Der Faktor 0,9007 ist ein Korrekturfaktor, berechnet aus dem mittleren Molekulargewicht für Fructane und dem Molekulargewicht für Fructose.

Bestimmung des Gesamtgehaltes löslicher Kohlenhydrate

In konzentrierter Schwefelsäure gelöstes Anthron reagierte mit Kohlenhydraten zu einem Farbkomplex (Loewus 1952), dessen Extinktion im Spektralphotometer bestimmt wurde. Der Gesamtgehalt der in der Probe enthaltenen Kohlenhydrate wurde über eine Eichreihe mit D-Glucose berechnet.

Lösungen

Ethanol 70 % (v/v); H₂SO₄ konz. (98 %); Anthron in Ethylacetat 2 % (w/v); Glucose (0,1 mg ml⁻¹ A.demin.).

Messansatz

Der in den Proben enthaltene Gesamtgehalt an Kohlenhydraten wurde aus dem ethanollöslichen Überstand bestimmt. Die Probe- und Standardlösungen wurden mit Anthronlösung versetzt und 15 min bei 100 °C im Wasserbad inkubiert. Nach Abkühlen der Proben auf Raumtemperatur wurde die Extinktion des entstandenen Farbkomplexes im Spektralphotometer bei 620 nm bestimmt.

Messansatz			
Reagenz [ml]	Probe	Eichreihe	Bemerkungen
Probelösung	0,1	-	
Eichlösung	-	1,0	
A.demin.	0,9	-	
Anthron	0,25	0,25	mischen
H ₂ SO ₄ konz.	2,0	2,0	beim Mischen zugeben
Inkubation im Wasserbad (15 min, 100 °C), Photometer (620 nm)			

Kalibrierung

Der Gesamtgehalt an löslichen Kohlenhydraten wurde über eine Eichgerade mit Glucose (0,0 – 90 µg ml⁻¹ in A.demin.) bestimmt.

Berechnung des Gehaltes löslicher Kohlenhydrate

$$\text{Glucose } [\mu\text{g g}^{-1} \text{ TG}] = \frac{\text{Wert aus Eichgerade} [\mu\text{g Glucose ml}^{-1}] \cdot \text{Verdünnungsfaktor}}{\text{Einwaage [g]}}$$

Bestimmung von Stärke

In der Probe enthaltene Stärke wurde mit Dimethylsulfoxid (DMSO) vollständig gelöst (Leach & Schoch 1962, Kurtzman et al. 1973, French 1984) und durch Amyloglucosidase spezifisch zu D-Glucose hydrolysiert. Die entstandene D-Glucose reagierte über ein Glucoseoxidase-Peroxidasesystem (GOD-POD-System) mit 4-Aminoantipyrin und p-Hydroxybenzoesäure zu einem roten Chinonfarbstoff (Blankeney & Matheson 1984, Sugimura & Hirano 1977, Sturgeon 1990) und wurde spezifisch über eine Eichreihe mit D-Glucose im Photometer (Beckman Instruments, DU 640, Fullerton, Californien, U.S.A.) bestimmt.

Lösungen

Dimethylsulfoxid (DMSO) getrocknet; Natriumacetat-Puffer 0,2 M, pH 4,8 (11,4 ml Essigsäure (100 %) und 16,4 g Natriumacetat mit A.demin. auf je 1000 ml auffüllen, 480 ml Natriumace-

atlösung mit 320 ml Essigsäurelösung mischen); Natriumacetat-Puffer 0,1 M (50 ml 0,2 M Natriumacetatpuffer mit 50 ml A.demin. mischen); Amyloglucosidase von *Aspergillus niger* (40 mg Amyloglucosidase in 25 ml 0,2 M Natriumacetat-Puffer lösen); Glucoseoxidase-Peroxidase-Lösung (12,4 g $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$; 6,2 g $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 2 g Benzoesäure, 0,1 g 4-Aminoantipyrin, 1,5 g p-Hydroxybenzoesäure, 20 mg Glucoseoxidase und 0,5 ml Peroxidase in 1000 ml A.demin. lösen); Glucoselösung (0,1 mg ml^{-1} 0,1 M Na-Acetatpuffer).

Probenaufbereitung

Der Stärkegehalt der Probe wurde aus dem ethanolunlöslichen Rückstand der Pflanzenprobe analysiert. Das getrocknete Pellet wurde mit 2 ml DMSO für 15 min in einem 80 °C heißen Ultraschallbad homogenisiert, mit 1,3 ml 0,1 M Natriumacetat-Puffer vermischt, bei 3000 UPM für 10 min bei Raumtemperatur abzentrifugiert (Heraeus Christ Omnifuge, Osterode, Deutschland) und der Überstand quantitativ in 10 ml Kolben überführt. Die Extraktion wurde zweimal mit 3,3 ml 0,1 M Natriumacetat-Puffer wiederholt. 2 ml des dekantierten Überstandes bzw. 0,1 M Natriumacetat-Puffer (Lehrwert) wurden mit 1 ml Amyloglucosidaselösung über Nacht bei 37 °C inkubiert.

1 ml der Probe-, Lehrwert- und Standardlösung wurde mit 5 ml GOD-POD-Lösung versetzt, geschüttelt, für 15 min bei 40 °C im Wasserbad inkubiert und die Extinktion bei 510 nm im Photometer bestimmt.

Messansatz				
Reagenz [ml]	Probe	Kontrolle	Eichreihe	Bemerkungen
Probelösung	1,0	-	-	
Natriumacetatpuffer	-	1,0	-	
Eichlösung	-	-	1,0	
GOD-POD	5,0	5,0	5,0	mischen
Inkubation im Wasserbad (15 min, 40 °C), Photometer (510 nm)				

Kalibrierung

Der Gesamtgehalt an Stärke wurde über eine Eichgerade mit Glucose (0,0 – 100 $\mu\text{g ml}^{-1}$ in Natriumacetatpuffer) bestimmt.

Berechnung des Stärkegehaltes

$$\text{Glucose } [\mu\text{g g}^{-1} \text{ TG}] = \frac{\text{Wert aus Eichgerade } [\mu\text{g Glucose ml}^{-1}] \cdot \text{Verdünnungsfaktor}}{\text{Einwaage [g]}}$$

2.8.1.2 IONENCHROMATOGRAPHISCHE BESTIMMUNG VON KOHLENHYDRATEN

Die Methode beschreibt ein modifiziertes ionenchromatographisches Verfahren zur Bestimmung von Glucose, Fructose und Saccharose in Kartoffeln (DIONEX OPERATOR MANUAL 1993). Das Prinzip der Ionenchromatographie beruht darauf, dass Kohlenhydrate in einer basischen Lösung ($\text{pH} \geq 12$) als negativ geladene Ionen vorliegen. Diese wurden durch substanzspezifische Adsorption an einer stationären Phase und anschließender Desorption in die mobile Phase getrennt und am Detektor durch das Anlegen eines positiven Potentials oxidiert. Der entstandene Ladungsfluss, der proportional zur Kohlenhydratkonzentration war, wurde als Messsignal aufgezeichnet.

Die Bestimmung von reduzierenden Zuckern und Saccharose erfolgte über ein Ionenchromatographie-System (Dionex DX 500, Sunnyvale, Californien, U.S.A.) mit quartärer Pumpe und einem Injektionsventil mit einer 30 μl Probenschleife. Die Probenaufgabe erfolgte automatisch über einen Autosampler. Die Art und die Konzentration der Komponenten wurde mit einem amperometrischen Detektor gemessen. Die quantitative Peakflächenauswertung und Kalibrierung erfolgte auf einem angeschlossenen Rechner über die Peaknet Software.

Lösungen

Methanol 80 % (v/v); 200 mM NaOH; Natriumazid-Lösung 1 % (1 g NaN_3 mit A.reinst auf 100 ml auffüllen); Kohlenhydrat-Stammlösung (100 mg der zu bestimmenden Kohlenhydrate und 5 ml 1 % Natriumazid-Lösung mit A.reinst auf 100 ml auffüllen; 10 mg Arabinose mit 10 ml Kohlenhydrat-Stammlösung auffüllen).

Probenaufbereitung

10 mg gefriergetrocknetes, fein gemahlene Pflanzenmaterial wurde durch Inkubation mit 0,9 ml Methanol (80 %), 0,1 ml Arabinoselösung als interner Standard und 20 mg Polyvinylpyrrolidon zur Festphasenextraktion der Phenole für 10 min in einem 60 °C heißen Ultraschallbad extrahiert. Durch anschließendes Zentrifugieren bei 13000 UPM für 5 min bei Raumtemperatur (Heraeus Sepatech Biofuge A, Osterode, Deutschland) wurde das Extrakt von den unlöslichen Probenbestandteilen getrennt und der Überstand quantitativ in 5 ml Kolben überführt. Die Extraktion und die Zentrifugation wurden zweimal mit 1 ml Methanol wiederholt. Der jeweils abgenommene Überstand wurde vereinigt und mit Methanol bis zur Marke aufgefüllt. 5 ml der 1:5 verdünnten Probelösung wurde in das Probengefäß des Autosamplers gegeben.

ben, 30 µl in den Eluentenfluss injiziert und der Gehalt an Glucose, Fructose und Saccharose bestimmt.

Allgemeine Trennbedingungen

Als stationäre Phase wurde eine analytische Säule für Mono- und Disaccharide (Dionex CarboPac™ PA10, 250 x 4 mm, Sunnyvale, Californien, U.S.A.) und eine Vorsäulenkartusche (Dionex CarboPac™ PA10, 50 x 4 mm, Sunnyvale, Californien, U.S.A.) verwendet. Die Trennung der Kohlenhydrate erfolgte nach folgendem Gradienten mit 200 mM NaOH (Eluent A) und A.reinst (Eluent B) als mobile Phase bei einem Fluss von 1 ml min⁻¹.

Eluentengradient für die Bestimmung von Kohlenhydraten			
Zeit [min]	Eluent A [%]	Eluent B [%]	Fluss [ml min ⁻¹]
0	5	95	1,0
14.9	5	95	1,0
15	14	86	1,0
29.2	14	86	1,0
29.3	23	77	1,0
34.6	23	77	1,0
34.7	31	69	1,0
36.8	31	69	1,0
36.9	100	0	1,0
49.9	100	0	1,0
50	5	95	1,0
54.90	5	95	1,0
Säulentemperatur: Raumtemperatur		Equilibrierungszeit: 0 min	Endzeit: 55 min

Kalibrierung

Mit Hilfe eines geeichten externen Standards mit Glucose, Fructose und Saccharose (1-5 mg l⁻¹) erfolgte die Lokalisierung bzw. die Identifizierung der einzelnen Substanzen im Chromatogramm und die Erstellung der Referenz-Chromatogramme für die quantitative Berechnung der Konzentrationen in der Analysenprobe. Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde Arabinose als interner Standard in genau bekannter Menge zugegeben, so dass über die Fläche des internen Standards Verluste bei der Probenaufarbeitung korrigiert werden konnten.

Berechnung des Kohlenhydratgehaltes

$$\text{Kohlenhydrat [pmol g}^{-1} \text{ TG]} = \frac{F_{KH}}{F_{IS}} \cdot EF \cdot VF \cdot M_{IS} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{V_{Ext}}{V_{PS}}$$

F_{KH} = Fläche des zu bestimmenden Kohlenhydrates

F_{IS} = Fläche des internen Standards

EF = Eichfaktor des zu bestimmenden Kohlenhydrates

VF = Verdünnungsfaktor

M_{IS} = Menge an internem Standard [pmol]

a = Einwaage [g]

V_{Ext} = Volumen des Ausgangsextraktes [ml]

V_{PS} = Volumen der Probenschleife [μ l]

2.8.2 PROTEINKONZENTRATION ÜBER KJELDAHL-STICKSTOFF

Der Stickstoffgehalt wurde 1994 gemeinsam mit dem Kohlenstoffgehalt in einem Element-Analysator (CHN Rapid, Heraeus, Hanau, Deutschland) am Institut für Bodenkunde der Justus-Liebig-Universität Giessen bestimmt. Ab 1995 wurde organischer Stickstoff nach einer modifizierten Kjeldahl-Methode ermittelt. Die getrocknete und gemahlene Probe wurde mit heißer konzentrierter Schwefelsäure unter Zusatz eines Katalysatorgemisches aufgeschlossen, wobei der Stickstoff des Proteins zu Ammoniumsulfat abgebaut wurde. Die aufgeschlossene klare Probe wurde in einer Destillationsapparatur mit Natronlauge versetzt, bis die Lösung alkalisch reagierte. Durch pH-Wert-Änderung wurde das Ammoniumsulfat in flüchtiges Ammoniak überführt, welches mittels Wasserdampf in eine borsäurehaltige Vorlage überdestilliert wurde. Der hierbei übergegangene Gesamtgehalt an Ammoniak wurde in einer Vorlage mit einer Salzsäure-Maßlösung titrimetrisch bestimmt und der Proteingehalt der Probe berechnet.

Lösungen

Schwefelsäure 98 % (N-frei); Katalysatorgemisch (Missourikatalysator-Tabletten mit 95,4 % K_2SO_4 , 2,8 % TiO_2 und 1,8 % $CuSO_4$); Natriumhydroxidlösung 32 % (N-frei); Borsäurevorlage (2 % Borsäure und 15 ml Mischindikator 5 (Merck 6130) mit A.demin. auf 2000 ml auffüllen); 0,05 N Salzsäure (Titrisol-Maßlösung); Natriumcarbonat (600 g Na_2CO_3 mit 2800 ml A.demin. und 93 mg Bromthymolblau mischen).

Probenaufarbeitung

200 mg gefriergetrocknete, gemahlene Probe wurde mit 20 ml Schwefelsäure, zwei Glasperlen und einer Missouri-Katalysator-Tablette in den Aufschlusskolben der Kjeldahl-Apparatur gegeben. Der Aufschluss erfolgte bei einer Temperatur von 350-400 °C im Büchi-Aufschlussgerät (Büchi, Digestor 430, Flävil, Schweiz) bis die Flüssigkeit im Rohr klar wurde. Beim Aufschlussprozess entstehende Schwefel- und Stickoxide wurden mit einer Absauganlage (Büchi, Scrubber 412, Flävil, Schweiz), welche Natriumcarbonat als Absorbens enthielt, absorbiert.

Nach Beendigung des Aufschlusses und Abkühlen der Proben auf Raumtemperatur wurde der Aufschlusskolben an die Kjeldahl-Destillationsapparatur (Büchi, Destillation Unit 321, Flävil, Schweiz) angehängt, mit A.demin. verdünnt und mit Natriumhydroxidlösung hydrolysiert. Durch eine Wasserdampfdestillation wurde das aus den Ammoniumverbindungen freigewordene Ammoniak in eine Borsäurevorlage überdestilliert. Die Rücktitration der Vorlage erfolgte mit 0,05 N Salzsäure-Maßlösung.

Berechnung des Proteingehaltes

$$\% N = \frac{\text{Verbrauch an Säure [ml HCl]} \cdot \text{Normalität der Säure} \cdot 1400}{\text{Einwaage [mg]}}$$

Durch Multiplikation mit einem Faktor 5,7 (Reiner et al. 1992), der den durchschnittlichen Anteil an Stickstoff im Protein der Getreidekörner angibt, wurde aus dem Stickstoffgehalt der Rohproteingehalt der Getreidekörner berechnet. Zur Berechnung der Proteinkonzentration in den Kartoffelknollen wurde der Faktor 6,25 eingesetzt (van Gelder 1981).

2.8.3 AMINOSÄUREN

Die Trennung der Aminosäuren erfolgte nach Vorsäulen-Derivatisierung mit 9-Fluorenylmethyloxycarbonyl-Chlorid (FMOC) (Einarsson 1983) entsprechend ihrer Polarität über eine nichtpolare stationäre und eine polare mobile Phase mit einem Reversed Phase Chromatographie-System (Johnson & Stevenson 1978, Heftman 1983).

Das verwendete Reversed Phase HPLC-System (Varian Vista 5560, Darmstadt, Deutschland) bestand aus einer ternären Pumpe, einem Controller für das Gradientenprogramm und einem Rheodyne Injektionsventil mit einer 10 µl Probenschleife. Die Probenaufgabe erfolgte automatisch über einen Autosampler (Varian Model 9095, Darmstadt, Deutschland). Die Konzentration der fluoreszierenden Verbindungen wurde mit einem Fluoreszenz HPLC Monitor (Shimadzu RF-535, Kyoto, Japan) mit einer 12 µl-Flusszelle unter Verwendung einer Xenon-

lampe gemessen. Die quantitative Auswertung erfolgte über einen A/D-Wandler (Perkin Elmer Nelson Systems Interface Serie 900, Norwalk, Connecticut, U.S.A.), die Integration der Peakflächen und die Kalibrierung auf einem angeschlossenen Rechner unter Verwendung einer PC Integrator Software (Perkin Elmer Nelson Systems Model 2100, Norwalk, Connecticut, U.S.A.).

Vorsäulen-Derivatisierung mit 9-Fluorenylmethyloxycarbonyl-Chlorid

FMOC, ein Ester der Chlorameisensäure, reagierte bei einem pH-Wert größer 3 innerhalb von 45 Sekunden (sec) mit primären und sekundären Aminen zu einer Urethanverbindung (Abbildung 2). FMOC-Aminosäure-Derivate besaßen bei pH 4,2 ein Stabilitätsmaximum, so dass die verwendeten Natriumacetat- und Natriumcitratpuffer geeignete Puffer für die mobile Phase waren. Die Fluoreszenz-Spektren von FMOC bzw. der FMOC-Derivate zeigten ein Anregungsmaximum bei 260 nm und ein Emissionsmaximum bei 310 nm. Da FMOC selbst sowie seine Hydrolyseprodukte nahezu identische Fluoreszenzspektren hatten, wurde überschüssiges FMOC bzw. dessen Hydrolyseprodukte vor der chromatographischen Auftrennung durch eine Flüssig-Flüssig-Extraktion aus dem Reaktionsgemisch entfernt. Ein bei der Derivatisierungsreaktion gebildetes Hydrolyseprodukt konnte durch die Flüssig-Flüssig-Extraktion nicht quantitativ entfernt werden und tauchte im Chromatogramm im Bereich der Aminosäurederivate auf. Durch geringe pH-Veränderung in der mobilen Phase konnte die Position des Hydrolyseproduktes verschoben werden, so dass ein Interferieren mit den Aminosäure-Peaks verhindert wurde.

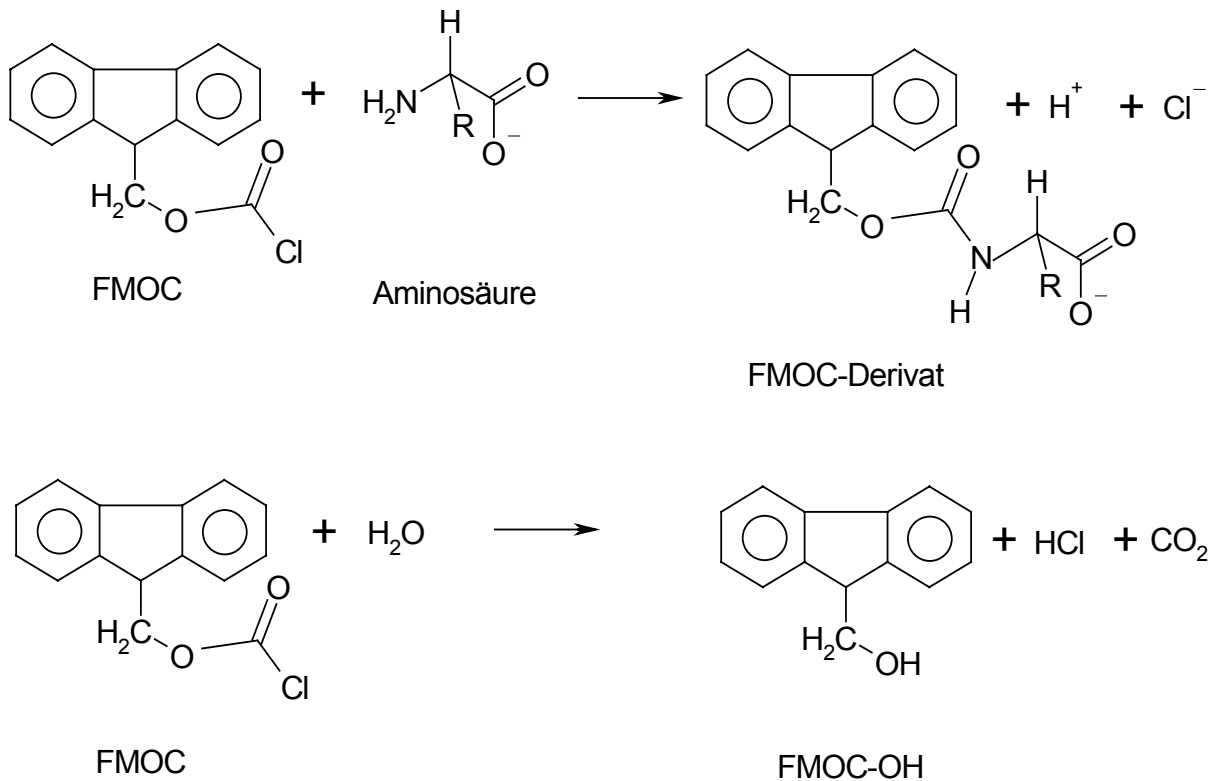


Abbildung 2: Prinzip der Aminosäurebestimmung mit FMOC.

Lösungen

Sulfosalicylsäure 4 % (40 g Sulfosalicylsäure mit A.reinst auf 1000 ml auffüllen); Sulfosalicylsäure 4 % mit 0,0284 mM β -Thienylalanin (24,3 mg β -Thienylalanin mit 4 % Sulfosalicylsäure auf 500 ml auffüllen, 1:10 mit 4 % Sulfosalicylsäure verdünnen); 6 N HCl mit 1 mM β -Thienylalanin (42,8 mg β -Thienylalanin mit A.reinst auf 100 ml auffüllen, 1:1,5 mit 32 % HCl verdünnen); 6 N NaOH (240 g NaOH mit A.reinst auf 1000 ml auffüllen); 0,1 M Boratpuffer, pH 8,5 (3,09 g Borsäure mit A.reinst auf 500 ml auffüllen und mit 2 N NaOH auf pH 8,5 einstellen); 2,5 mM Aminosäure-Standard-Gemisch (AA-S-18-Standard, Sigma); 0,02 mM Aminosäure-Standard-Gemisch (0,4 ml 2,5 mM Aminosäure-Standard-Gemisch mit 0,1 M Boratpuffer auf 50 ml auffüllen); 1 mM Glutamin (36,55 mg Glutamin mit A.reinst auf 250 ml auffüllen); 0,02 mM Glutamin (0,2 ml 1 mM Glutamin mit 0,1 M Boratpuffer auf 10 ml auffüllen); 1 mM Asparagin (37,55 mg Asparagin mit A.reinst auf 250 ml auffüllen); 0,02 mM Asparagin (0,2 ml 1 mM Asparagin mit 0,1 M Boratpuffer auf 10 ml auffüllen); 0,25 mM β -Thienyl-Alanin (21,4 mg β -Thienyl-Alanin mit 500 ml A.reinst auffüllen); 0,02 mM β -Thienyl-Alanin (1 ml 0,25 mM β -Thienyl-Alanin mit 11,5 ml 0,1 M Boratpuffer auffüllen); 9-Fluorenylmethyl-chloroformiat (FMOC-Cl) 4 mM (25,9 mg FMOC-Cl mit 25 ml Aceton auffüllen); Pentan-Ethylacetat (80:20 v/v, 80 ml Pentan und 20 ml Ethylacetat mischen); 30 %

Acetonitril (v/v) (70 ml A.reinst mit 30 ml Acetonitril mischen); Puffer A: 0,1 M Natriumacetat pH 4,19 (11,44 ml Eisessig mit A.reinst auf 2000 ml auffüllen, mit 2 N NaOH auf pH 4,19 einstellen); Eluent A: Puffer A mit Tetrahydrofuran 95:5 w/w (1900 ml Eluent A mit 113,6 ml Tetrahydrofuran mischen); Eluent B: 0,015 M Natriumcitrat mit 0,01 M Tetramethylammoniumchlorid, pH 3,85 (8,823 g Natriumcitrat und 2,192 g Tetramethylammoniumchlorid mit A.reinst auf 2000 ml auffüllen, mit 85 % Phosphorsäure auf pH 3,85 einstellen); Eluent C: Eluent B (pH 4,5) mit Methanol 90:10 v/v (900 ml Eluent B mit 85 % Phosphorsäure auf pH 4,5 einstellen und mit 100 ml Methanol mischen).

2.8.3.1 FREIE AMINOSÄUREN

Probenaufbereitung

Zur Durchführung einer exakten und reproduzierbaren Aminosäurebestimmung wurden die Proben zügig auf Eis bearbeitet, da Stoffwechselaktivitäten in der Probe die Ergebnisse ebenso verfälschten wie Kontaminationen, die von den Reagenzien, von den Gefäßen oder von den Händen herrührten. In der Probe enthaltene Lipide stellten bei der Reversed Phase HPLC-Methode kein Problem dar, da sie sich vollständig in Acetonitril lösten.

0,4 g eingefrorene Frischprobe oder 0,1 g gefriergetrocknete Probe wurde in 8,8 ml 4 % Sulfo-salicylsäure, die als internen Standard 0,0284 mM β -Thienylalanin enthielt, 40 sec mit dem Ultra-Turrax (Janke & Kunkel T25, Staufen, Deutschland) homogenisiert und zur vollständigen Protein- und Peptidfällung ca. 1 h auf Eis gestellt. Die Probe wurde mit 1,2 ml 2 N NaOH neutralisiert, so dass die zu derivatisierende Probe nicht saurer als pH 3 war und bei 16000 UPM, 4 °C für 20 min zentrifugiert (Beckman J2-21, Rotor JA-20, Palo Alto, Californien, U.S.A.). Der Überstand wurde über eine 0,45 μ m Cellulose-Acetat-Membran (Schleicher & Schuell Typ OE 67, Dassel, Deutschland) gefiltert, 1:10 mit 0,1 M Boratpuffer (pH 8,5) verdünnt und direkt zur Analyse eingesetzt oder bei -20 °C eingefroren.

Allgemeine Bedingungen zur Trennung freier Aminosäuren

Als stationäre Phase wurde eine Trennsäule (Merck, LiChroCART Superspher 60 RP-8 e, 250-4 mm, Darmstadt, Deutschland) und eine Vorsäule (Merck, LiChrospher 100 RP-18 end-capped 4-4 mm, Darmstadt, Deutschland) mit 4 μ m Partikelgröße verwendet. Die Trennung der freien Aminosäuren erfolgte nach folgendem Gradienten mit Eluent A und Acetonitril.

Eluentengradient für die Trennung der freien Aminosäuren			
Zeit [min]	Eluent A [%]	Acetonitril [%]	Fluss [ml min ⁻¹]
0	85	15	1,2
1	82	18	1,2
3	82	18	1,2
11	77	23	1,2
14	60	40	1,2
19	60	40	1,2
20	55	45	1,2
30	45	55	1,2
33	0	100	1,2
35	0	100	1,2
38	85	15	1,2

Säulentemperatur: 45 °C Equilibrierungszeit: 0 min Endzeit: 40 min

2.8.3.2 AMINOSÄUREZUSAMMENSETZUNG IN PEPTIDEN

Probenaufarbeitung

0,15 g getrocknete, fein gemahlene Probe wurde in verschraubbare Hydrolysegefäße eingewogen und mit 2,5 ml 6 N HCl, die als internen Standard 1 mM β -Thienylalanin enthielt, versetzt. Nach dreifacher Evakuierung und Stickstoffbegasung im Hydrolyseofen wurden die Röhrchen verschraubt und unter Ausschluss von Luftsauerstoff für 18 h bei 110 °C sauer hydrolysiert. Anschließend erfolgte die Neutralisation der Hydrolysate mit 2,5 ml 6 N NaOH, so dass die zu derivatisierenden Proben einen pH-Wert größer 3 hatten. Die Proben wurden bei 16000 UPM 30 min bei 4 °C abzentrifugiert (Beckman J2-21, Rotor JA-20, Palo Alto, Californien, U.S.A.). Der Überstand wurde über eine 0,45 μ m Cellulose-Acetat-Membran (Schleicher & Schuell Typ OE 67, Dassel, Deutschland) gefiltert, 1:10 mit 0,1 M Boratpuffer (pH 8,5) verdünnt und direkt zur Analyse eingesetzt oder bei -20 °C eingefroren. Die saure Hydrolyse führte zur Zerstörung der schwefelhaltigen Aminosäuren Cystin, Cystein und Methionin.

Allgemeine Bedingungen zur Trennung von Aminosäuren nach Proteinhydrolyse

Als stationäre Phase wurde eine Trennsäule (Varian AminoTAG ODS-80-TM, 150-4,6 mm, Darmstadt, Deutschland) und eine Vorsäule (Perkin Elmer RP-8 15-3 mm, Norwalk, Connecticut, U.S.A.) mit 7 μ m Partikelgröße verwendet. Die Trennung der Aminosäuren nach der Proteinhydrolyse erfolgte nach folgendem Gradienten mit den Eluenten B und C sowie Acetonitril.

Gradient zur Aminosäuretrennung nach Proteinhydrolyse

Zeit [min]	Eluent B [%]	Eluent C [%]	Acetonitril [%]	Fluss [ml min ⁻¹]
0	75	0	25	1,4
13	61	0	39	1,4
14,5	60	0	40	1,4
15	31	30	39	1,4
16	0	62	38	1,4
19,5	0	62	38	1,4
27	0	30	70	1,4
29	0	25	75	1,4
31	0	25	75	1,4
33	75	0	25	1,4

Säulentemperatur: 32 °C Equilibrierungszeit: 0 min Endzeit: 40 min

Messansatz

Zur Derivatisierung wurden 30 µl Probe- bzw. Standardlösung mit 30 µl 4 mM acetonischer FMOC-Cl-Lösung versetzt und vier mal gemischt. Nach einer Reaktionszeit von 4 min bei Raumtemperatur erfolgte die Flüssig-Flüssig-Extraktion. Hierzu wurden 90 µl Pentan-Ethylacetat (80:20 v/v) zugegeben und sechs mal gemischt. Die Derivatisierung, die Flüssig-Flüssig-Extraktion und die Injektion von 10 µl derivatisierter Probe erfolgten automatisch über die Automixing-Routine des Autosamplers.

Kalibrierung

Mit Hilfe eines geeichten externen Standards mit authentischen, hochreinen Aminosäuren erfolgte die Lokalisierung bzw. die Identifizierung der einzelnen Aminosäuren im Chromatogramm und die Erstellung der Referenz-Chromatogramme für die quantitative Berechnung der Aminosäure-Konzentration in der Analyseprobe. Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde β-Thienylalanin als interner Standard in bekannter Menge dem Aminosäuregemisch zugegeben, so dass über die Fläche des internen Standards Verluste bei der Probenaufarbeitung korrigiert werden konnten.

Berechnung des Aminosäuregehaltes

$$\text{Aminosäure [pmol g}^{-1}\text{]} = \frac{F_{AS}}{F_{IS}} \cdot EF \cdot VF \cdot M_{IS} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{V_{Ext}}{V_{PS}}$$

F_{AS} = Fläche der zu bestimmenden Aminosäure

F_{IS} = Fläche des internen Standards

EF = Eichfaktor der zu bestimmenden Aminosäure

VF = Verdünnungsfaktor

M_{IS} = Menge an internem Standard [pmol]

a = Einwaage [g]

V_{Ext} = Volumen des Ausgangsextraktes [ml]

V_{PS} = Volumen der Probenschleife [μ l]

2.8.4 ANIONEN UND ORGANISCHE SÄUREN

Anionen und organische Säuren wurden über die Ionenaustauschchromatographie durch Kombination einer Ionenaustauschersäule mit Leitfähigkeitsdetektion in der Ein-Säulen-Technik bestimmt. Die Trennung der ionischen Komponenten in der mobilen Phase erfolgte durch deren unterschiedliche Affinität zu den geladenen funktionellen Gruppen der stationären Phase.

Das verwendete Chromatographiesystem (Metrohm, Modell 690, Herisau, Schweiz) bestand aus einer isokratischen Pumpe und einem Injektionsventil mit einer 100 μ l Probenschleife. Die Probenaufgabe erfolgte automatisch über einen Autosampler. Die Art und die Konzentration der ionischen Komponenten wurde mit einem Leitfähigkeitsdetektor gemessen. Die quantitative Auswertung erfolgte über einen A/D-Wandler (Perkin Elmer Nelson Systems, Interface Serie 900, Norwalk, Connecticut, U.S.A.), die Peakflächenauswertung und die Kalibrierung über einen angeschlossenen Rechner unter Verwendung einer PC Integrator Software (Perkin Elmer Nelson Systems, Model 2100, Norwalk, Connecticut, U.S.A.).

2.8.4.1 IONENCHROMATOGRAPHISCHE BESTIMMUNG VON ANIONEN

Lösungen

2 mM Phthalsäure-Eluent (3,323 g Phthalsäure, 2 ml 30 % NaOH und 10 ml Aceton mit A.reinst auf 1000 ml auffüllen, mit 2 M NaOH auf pH 4,5 einstellen und 1:10 mit 100 ml Aceton und A.reinst verdünnen); NaOH 30 % (320 g NaOH mit A.reinst auf 1000 ml auffüllen); Standard-Mix mit 5 ppm Chlorid, 10 ppm Nitrat und 10 ppm Sulfat (82,45 mg NaCl,

137,1 mg NaNO₃ und 147,91 mg Na₂SO₄ mit 100 ml A.reinst auffüllen, 1:100 mit A.reinst verdünnen).

Probenaufarbeitung

200 mg gefriergetrocknete, fein gemahlene Kartoffelprobe wurde auf Eis in 5 ml A.reinst 30 sec mit dem Ultra-Turrax (Janke & Kunkel, T25, Staufen, Deutschland) homogenisiert und 15 min im Ultraschallbad inkubiert (Metrohm Application Bulletin Nr. 189/1d; modifiziert). Die Proben wurden bei 16000 UPM für 20 min bei einer Temperatur von 4 °C zentrifugiert (Beckman J2-21, Rotor JA-20, Palo Alto, Californien, U.S.A.). 1 ml Überstand wurde mit 9 ml A.reinst verdünnt, über einen 0,45 µm Cellulose-Acetat-Membranfilter (Schleicher & Schuell, OE 67 Minisart. NML SM 16555, Dassel, Deutschland) gereinigt und sofort analysiert oder bei -20 °C eingefroren.

Allgemeine Trennbedingungen

Als stationäre Phase wurde eine IC Ausschlussäule (Hamilton, PRP-X100, 125 x 4 mm, Reno, U.S.A.) und eine IC-Vorsäulenkartusche (Metrohm, PRP-X100, Herisau, Schweiz) verwendet. Die isokratische Trennung der Anionen erfolgte mit 2 mM Phthalsäure-Eluent als mobile Phase bei einem Fluss von 2 ml min⁻¹.

Kalibrierung

Über geeichte externe Standards mit authentischen, hochreinen Anionen (1-5 ppm Chlorid, 2-10 ppm Nitrat und Sulfat in A.reinst) erfolgte die Lokalisierung bzw. Identifizierung der einzelnen Substanzen in den Chromatogrammen und die Erstellung der Referenz-Chromatogramme für die quantitative Berechnung der Konzentrationen in den Proben.

Berechnung der Anionenkonzentration

Bei der verwendeten Mehrpunkteichung wurde zunächst mit Hilfe einer linearen Regressionsgleichung die stoffspezifische Kalibrierfunktion aufgenommen und anschließend die gesuchte Probenkonzentration errechnet:

$$S_{St} = S_O + m \cdot c_{St}$$

$$c_P = \frac{S_P - S_O}{m}$$

S_O = Achsenabschnitt der Kalibriergeraden

m = Steigung der Kalibriergeraden

c_P = Probenkonzentration

c_{St} = Konzentration der Standardlösung

S_P = Signal der Probe

S_{St} = Signal des Standards

2.8.4.2 IONENCHROMATOGRAPHISCHE BESTIMMUNG VON ORGANISCHEN SÄUREN

Lösungen

0,5 mM Schwefelsäure (2,79 ml H₂SO₄ 96 % mit A.reinst auf 1000 ml auffüllen, 1:100 mit A.reinst verdünnen); Standard-Mix mit 10 ppm Malat und Citrat (100 mg Malat und 109,36 mg Citrat-Monohydrat mit 100 ml 0,5 mM H₂SO₄ auffüllen, 1:100 mit 0,5 mM H₂SO₄ verdünnen).

Probenaufarbeitung

100 mg gefriergetrocknete, fein gemahlene Kartoffelprobe wurde auf Eis in 10 ml 0,5 mM H₂SO₄ mit dem Ultra-Turrax (Janke & Kunkel, T25, Staufen, Deutschland) homogenisiert. Die Proben wurden bei 16000 UPM für 20 min und einer Temperatur von 4 °C abzentrifugiert (Beckman J2-21, Rotor JA-20, Palo Alto, Californien, U.S.A.). Der Überstand wurde 1:500 mit 0,5 mM H₂SO₄ verdünnt, über einen 0,45 µm Cellulose-Acetat-Membranfilter (Schleicher & Schuell, OE 67 Minisart. NML SM 16555, Dassel, Deutschland) gereinigt und sofort analysiert oder bei -20 °C eingefroren.

Allgemeine Trennbedingungen

Als stationäre Phase wurde eine Ionenausschlusssäule (Hamilton, PRP-X300, 250 x 4,1 mm, Reno, USA) und eine IC-Vorsäulenkartusche (Metrohm, PRP-X300, Herisau, Schweiz) verwendet. Die isokratische Trennung der organischen Säuren erfolgte modifiziert mit 0,5 mM Schwefelsäure als mobile Phase bei einem Fluss von 1 ml min⁻¹ (Metrohm Application Bulletin Nr. 170d).

Kalibrierung

Über geeichte externe Standards mit authentischen, hochreinen organischen Säuren (2-10 ppm Malat, Citrat und Oxalat in 0,5 mM H₂SO₄) erfolgte die Lokalisierung bzw. Identifizierung der einzelnen Substanzen in den Chromatogrammen und die Erstellung der Referenz-Chromatogramme für die quantitative Berechnung der Konzentrationen in den Analyseproben.

Berechnung der Konzentration organischer Säuren

Die Berechnung der Konzentrationen von organischen Säuren erfolgte analog der Berechnung der Anionenkonzentration.

2.8.4.3 PHOTOMETRISCHE BESTIMMUNG VON ORGANISCHEN SÄUREN

Ascorbat (AsA) wurde photometrisch als Summe von Ascorbat (Σ AsA) und Dehydroascorbat (DAsA) über ein modifiziertes, von Okamura (1980) entwickeltes Verfahren bestimmt.

Ascorbat reagierte in saurer Lösung Eisen³⁺-Ionen zu Eisen²⁺-Ionen. Diese bildeten mit α,α' -Bipyridyl einen roten Chelatkomplex, dessen Extinktion photometrisch bestimmt wurde.

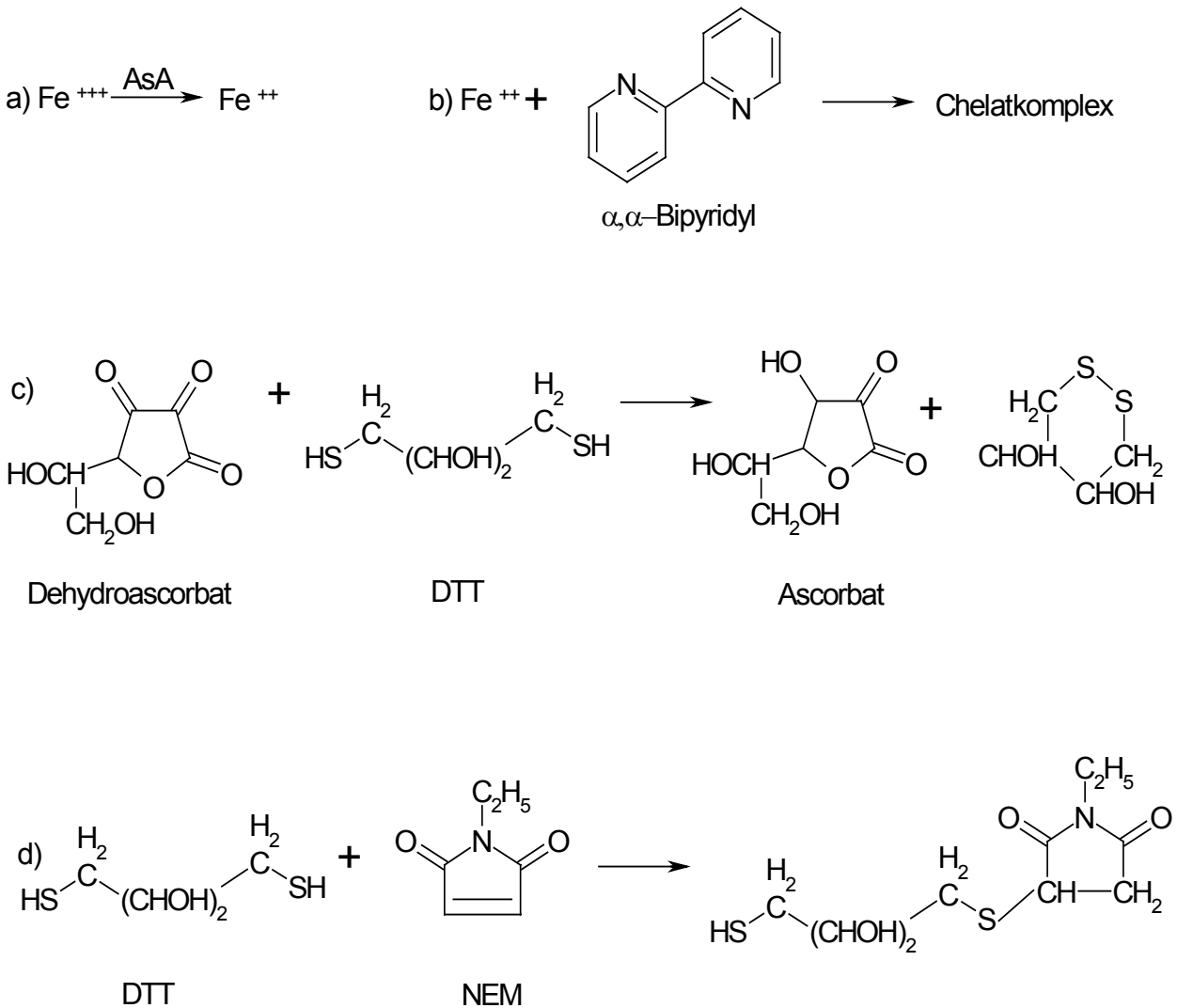


Abbildung 3: Prinzip der Ascorbat- und Dehydroascorbatbestimmung (Okamura 1980).

(AsA: Ascorbat reduziert, DAsA: Dehydroascorbat (Ascorbat oxidiert), DTT: Dithiothreit, NEM: N-Ethylmaleimid).

Um neben dem Anteil an reduziertem Ascorbat auch den Gehalt an oxidiertem Ascorbat (Dehydroascorbat) mitzuerfassen, wird Dehydroascorbat mit Dithiothreit zu Ascorbat reduziert und als solches bestimmt. Da überschüssiges DTT Fe^{3+} ebenso wie Ascorbat zu Fe^{2+} reduzieren würde, werden seine reduzierenden Eigenschaften durch Derivatisierung mit N-Ethylmaleimid neutralisiert (Abbildung 3).

Lösungen

Phosphatpuffer A (150 mM Na-K-Phosphatpuffer, pH 7,5 (RAUEN 1964)); Phosphatpuffer B (1,667 ml 6 N NaOH mit Phosphatpuffer A auf 100 ml auffüllen); Trichloressigsäure (TCA) 10 %, (w/v); Dithiothreit (DTT) 10 mM (38,56 mg DTT mit A.demin. auf 25 ml auffüllen); N-Ethylmaleimid 0,5 % (50 mg NEM mit A.demin. auf 10 ml auffüllen); DTT+NEM (DTT

und NEM Lösungen 50:50 (v/v) mischen); Farbreagenz (1 g α, α' -Bipyridyl mit 70 % Ethanol auf 50 ml auffüllen, mit 50 ml TCA (10 %) und 50 ml H_3PO_4 (42,5 %) mischen); 3 % $FeCl_3$ (5 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ mit A.demin. auf 100 ml auffüllen); Ascorbat ($0,1 \text{ mg ml}^{-1}$ Ascorbat in Phosphatpuffer A).

Probenaufarbeitung

Zur Herstellung des Rohenzymextraktes wurde 1 g Frischmaterial auf Eis in dickwandige Zentrifugengläser eingewogen und mit 6 ml eiskaltem 150 mM Natrium-Kalium-Phosphatpuffer versetzt. Anschließend wurden die Proben 40 sec mit einem Ultra-Turrax (Janke & Kunkel, T25, Staufen, Deutschland) homogenisiert. Das Homogenat wurde 20 min bei 16000 UPM in einer Kühlzentrifuge (Beckman, J2-21, Rotor JA-20, Palo Alto, Californien, U.S.A.) bei einer Temperatur von 4 °C abzentrifugiert. Der dekantierte Überstand wurde auf Eis aufbewahrt und diente als Ausgangsextrakt zur Analyse.

Zur Ausfällung der löslichen Proteine wurden 0,8 ml Rohenzymextrakt mit 0,4 ml TCA (10 %) versetzt, geschüttelt und 5 min auf Eis gekühlt. Die ausgefallenen Proteine wurden in einer Mikrozentrifuge (Heraeus Sepatech, Biofuge A, Osterode, Deutschland) 5 min bei 13000 UPM abzentrifugiert. Der Überstand diente als Probelösung zur Ascorbat- und Gesamt-Ascorbatbestimmung. Für die Lehrwerte wurde Phosphatpuffer A entsprechend der Aufarbeitung mit Rohenzymextrakt mit TCA versetzt.

Messansatz

0,2 ml des Lehrwert-, Proben- oder Standardextraktes wurden zu 0,2 ml Phosphatpuffer B pipettiert und je nach Bestimmungsansatz mit 0,2 ml DTT+NEM oder 0,1 ml DTT versetzt und geschüttelt. Zur Gewährleistung der quantitativen Reduktion von DAsA zu AsA wurden die Proben 15 min bei Raumtemperatur inkubiert. Die Proben zur Σ AsA-Bestimmung wurden anschließend mit 0,1 ml NEM versetzt und durchmischt. Nach 30 sec Reaktionszeit, die zur Derivatisierung des überschüssigen DTT erforderlich war, wurde unter Schütteln auf dem Whirl-Mix die $FeCl_3$ -Lösung zugegeben. Die fertigen Ansätze wurden im Wasserbad bei einer Temperatur von 37 °C für 60 min inkubiert und die Extinktion im Photometer (Beckman Instruments, DU 640, Fullerton, Californien, U.S.A.) bei 525 nm gegen die Lehrwerte bestimmt.

Messansatz				
Reagenz [μl]	Lehrwert	AsA	ΣAsA	Bemerkungen
Probe	-	200	200	
Puffer A	200	-	-	
Puffer B	200	200	200	mischen (Whirl-Mix)
DTT/NEM	200	200	-	
DTT	-	-	100	mischen, 15 min bei RT
NEM	-	-	100	mischen, 30 sec bei RT
Farbreagenz	1000	1000	1000	
FeCl_3	200	200	200	beim Mischen zugeben
Inkubation im Wasserbad (60 min bei 37 °C), Photometer (525 nm)				

Kalibrierung

Der Gehalt an AsA und ΣAsA wurde über eine Eichgerade mit Ascorbat (0,0 – 0,1 mg ml⁻¹; Assay wie Probe AsA) bestimmt.

Berechnung der organischen Säuren

$$\text{mg } \Sigma\text{AsA g}^{-1} \text{ FG} = \frac{\text{mg } \Sigma\text{AsA ml}^{-1} \cdot \text{Verdünnung} \cdot \text{Ausgangsextrakt [ml]}}{\text{Einwaage [g]}}$$

$$\text{mg AsA g}^{-1} \text{ FG} = \frac{\text{mg AsA ml}^{-1} \cdot \text{Verdünnung} \cdot \text{Ausgangsextrakt [ml]}}{\text{Einwaage [g]}}$$

2.8.5 GLYCOALKALOIDE

Der Glycoalkaloid-Gehalt der Knollen wurde im chemischen Labor für Lebensmitteluntersuchungen am Agricultural Research Centre (Finnland) nach einer Methode von Saito et al. (1990) bestimmt. Das verwendete HPLC-System (Perkin Elmer, Serie 200, Norwalk, Connecticut, U.S.A.) war mit einer 25 μl Probenschleife ausgestattet. Die Konzentration der Glycoalkaloide wurde mit einem UV-Detektor bei einer Wellenlänge von 202 nm bestimmt. Die Steuerung und quantitative Auswertung erfolgte über eine Turbochrom Workstation (Perkin Elmer, Version 6.1, Norwalk, Connecticut, U.S.A.).

Lösungen

20 mM Natriumdihydrogenphosphat mit Acetonitril (20:75 v/v); Standardsubstanzen (α -Solanin und α -Chaconin); Acetonitril; 70 % Methanol.

Probenaufarbeitung

5 g gefriergetrocknete Probe wurde in 70 % Methanol für 50 min mit einem Magnetrührer und weiteren 10 min in einem Ultraschallbad homogenisiert und auf 50 ml verdünnt. Zur Reinigung der Proben wurden 2,5 ml Extrakt mit 4 ml A.reinst verdünnt und eine Flüssigphasenextraktion (Waters, Sep-Pac-Säule C18, Massachusetts, U.S.A.) durchgeführt. Das Eluat wurde getrocknet, der Rückstand in 1 ml Methanol gelöst und zur Analyse eingesetzt.

Allgemeine Trennbedingungen

Als stationäre Phase wurde eine analytische Trennsäule (Hewlett Packard, LiChrospher 100, 250-4 mm, Palo Alto, Californien, U.S.A.) und eine Vorsäule (Merck, LiChrospher 100 NH₂, 4-4 mm, Darmstadt, Deutschland) mit 5 µm Partikelgröße verwendet. Die Trennung der Glycoalkaloide erfolgte bei 30 °C Säulentemperatur mit einem 20 mM Natriumdihydrogenphosphat/Acetonitril-Eluenten als mobile Phase bei einem Fluss von 1 ml min⁻¹.

Kalibrierung

Über geeichte externe Standards mit authentischen, hochreinen Glycoalkaloiden erfolgte die Lokalisierung bzw. Identifizierung der einzelnen Substanzen in dem Chromatogramm und die Erstellung der Referenz-Chromatogramme für die quantitative Peakflächenberechnung der Konzentration in der Probe.

2.8.6 MINERALSTOFFE

Der Mineralstoffgehalt der Proben (P, K, S, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe und Na) wurde mit einem ICP-Atom-Emissions-Spektrometer (Jobin Yvon, JY 70, Longjumeau, Frankreich) am Julius-von-Sachs-Institut der Universität Würzburg analysiert. 100 mg gefriergetrocknete, fein gemahlene Probe wurde in 1 ml HNO₃ für 10 h bei 165 °C digestiert. Die gelösten Proben wurden verdünnt und vor der ICP-AES-Messung gefiltert. Über geeichte externe Standards mit authentischen, hochreinen Mineralstoffen erfolgte die quantitative Berechnung der Konzentrationen in der Analyseprobe.

2.9 EDV und Statistik

Die Textverarbeitung erfolgte mit dem Programm Word 2000 für Windows (Microsoft Corporation, Redmond, USA), die Erfassung der Daten mit Excel 2000 für Windows (Microsoft Corporation, Redmond, USA). Die statistische Analyse der experimentellen Daten wurde mit dem Programm SPSSPC+ 10.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, USA) und die Erstellung der Grafiken mit PlotIt 3.2 für Windows (Scientific Programming Enterprises, Haslett, USA) durchgeführt. Für die gleich behandelten Gefäßwiederholungen wurden die Kammermittelwerte berechnet, die als Wiederholung zur Analyse der Behandlungseffekte dienten. Die multiple Varianzanalyse (ANOVA) wurde angewendet, um den Einfluss von atmosphärischen Spurengasen, der Stickstoffversorgung, des Expositionssystems und des Standortes auf die Reaktionen der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zu untersuchen., wobei der CO₂-Level, die Ozonkonzentration, die Stickstoffversorgung, das Expositionssystem und der Standort als unabhängige Variablen behandelt wurden. Aufgrund von Problemen mit Schädlingen entfiel im Versuchsjahr 1998 die Kammerwiederholung, so dass in den OTC keine statistische Auswertung durchgeführt werden konnte.

3 ERGEBNISSE

3.1 Klimabedingungen

Die klimatischen Bedingungen (tägliche Strahlungssumme, mittlere relative Feuchte um 9.00 Uhr morgens, mittlere Tagestemperatur und tägliche Maxima der Temperatur) in den unterschiedlichen Behandlungsvarianten während der Versuchsjahre 1994 bis 1999 sind in Tabelle 4 und in Abbildung 4 bis Abbildung 7 dargestellt.

Die Auswertung der klimatischen Bedingungen ergab in den Versuchsjahren 1994 bis 1999 beachtliche klimatische Unterschiede. Während der Exposition der beiden Getreidearten waren in den Versuchsjahren 1994 und 1995 die durchschnittlichen Werte für die tägliche Strahlungssumme, die mittlere relative Feuchte und die mittlere Tagestemperatur in den OTC im Vergleich zu den Versuchsjahren 1996 und 1997 höher. Der für die Getreidearten wichtige Zeitraum der Kornfüllung (1994 ab JD 178 und 1995 ab JD 181) war sehr heiß und trocken, innerhalb der OTC wirkten in beiden Versuchsjahren maximale Temperaturen von über 40 °C auf die Pflanzen. Im Gegensatz dazu wurde die Entwicklungsphase der Kornfüllung 1996 (ab JD 170) und 1997 (ab JD 178) durch kühle und feuchte klimatische Bedingungen geprägt. Die in diesem Zeitraum erreichten täglichen Maxima der Temperatur lagen 1996 und 1997 in den OTC unterhalb von 35 °C und überschritten 1997 lediglich gegen Ende der Vegetationsperiode diese Grenze. Allerdings war die mittlere Tagestemperatur vor der Kornfüllungsphase 1996 und 1997 im Vergleich zu den Vorjahren höher, so dass die Anthese der Pflanzen in beiden Versuchsjahren vergleichsweise früher stattfand.

Die klimatischen Bedingungen der Versuchsjahre 1998 und 1999 für die Kartoffelexposition waren beim Vergleich der jeweiligen Standorte ähnlich. Geringfügige Unterschiede ergaben sich bezüglich der mittleren Tagestemperatur, die 1999 geringfügig erhöht war. Trotz der höheren Mittelwerte für die täglichen Temperaturmaxima über den Expositionszeitraum 1999 wurden Temperaturen von 35 °C vergleichsweise selten in den verschiedenen Behandlungen überschritten. Während die tägliche Strahlungssumme 1999 im Vergleich zu 1998 an allen Standorten leicht erhöht war, wurden in diesem Versuchsjahr vergleichsweise niedrigere Werte für die mittlere relative Feuchte gemessen.

Ein Vergleich der klimatischen Bedingungen innerhalb und außerhalb der OTC in den Versuchsjahren 1998 und 1999 ergab, dass die mittleren Tagestemperaturen in den OTC im Vergleich zu den Temperaturen der kammerlosen Behandlung um fast 2 °C erhöht waren. Die durchschnittlichen Stundenmittel zeigten bis zu 5 °C höhere Temperaturen in den Kammern. In

bezug auf die mittlere relative Feuchte konnten keine Unterschiede zwischen der Behandlung in den OTC und der Behandlung in der kammerlosen Variante gemacht werden. Die tägliche Strahlungssumme wurde in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung durch die Folie und die Rahmenkonstruktion jedoch drastisch um annähernd 40 % reduziert. Zwischen der AA-OTC- und der AA-FACE-Behandlung gab es für die tägliche Strahlungssumme in den Versuchsjahren 1998 und 1999 keine nennenswerten Unterschiede, die mittlere Tagestemperatur war dagegen am OTC-Standort durchschnittlich um 1,4 °C höher als am 6 km von Giessen entfernten, in der Talau des Lückebacks gelegenen FACE-Standort.

Tabelle 4: Mittelwerte der klimatischen Bedingungen über den Expositionszeitraum 1994 bis 1999.

Jahr	Tägliche Strahlungssumme [MJ m ⁻²]	Relative Feuchte [%]	Mittlere Tagestemperatur [°C]	Tägliches Temperaturmaximum [°C]
OTC				
1994	16,88±6,14	73,09±0,61	23,28±0,54	32,11±0,42
1995	13,72±5,47	73,63±8,70	20,91±5,63	28,97±6,96
1996	10,89±4,86	66,94±8,43	18,31±4,28	26,30±6,22
1997	10,55±4,20	65,36±17,64	19,62±6,02	28,08±5,19
1998	9,567±4,441	67,28±8,99	19,28±3,70	25,26±5,72
1999	10,16±3,38	64,50±7,63	19,84±3,20	28,12±4,73
AA				
1998	15,61±6,81	67,97±9,19	17,13±3,54	21,98±5,19
1999	18,34±5,33	64,72±8,67	18,07±3,12	23,85±4,09
FACE				
1998	16,43±6,90	76,58±8,14	15,69±3,13	21,02±4,89
1999	19,18±5,43	73,84±7,80	16,65±3,15	22,37±4,12

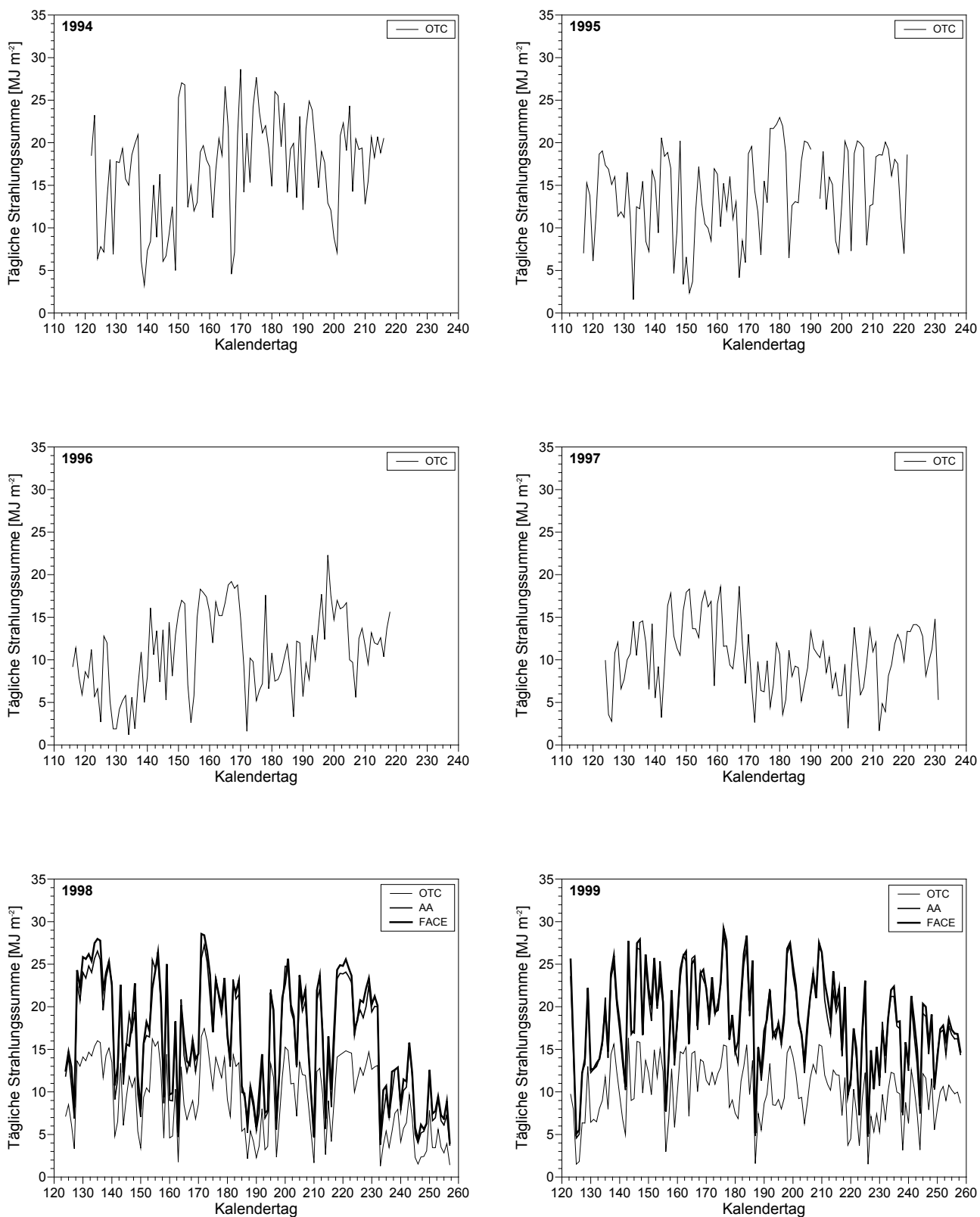


Abbildung 4: Tägliche Strahlungssummen in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.

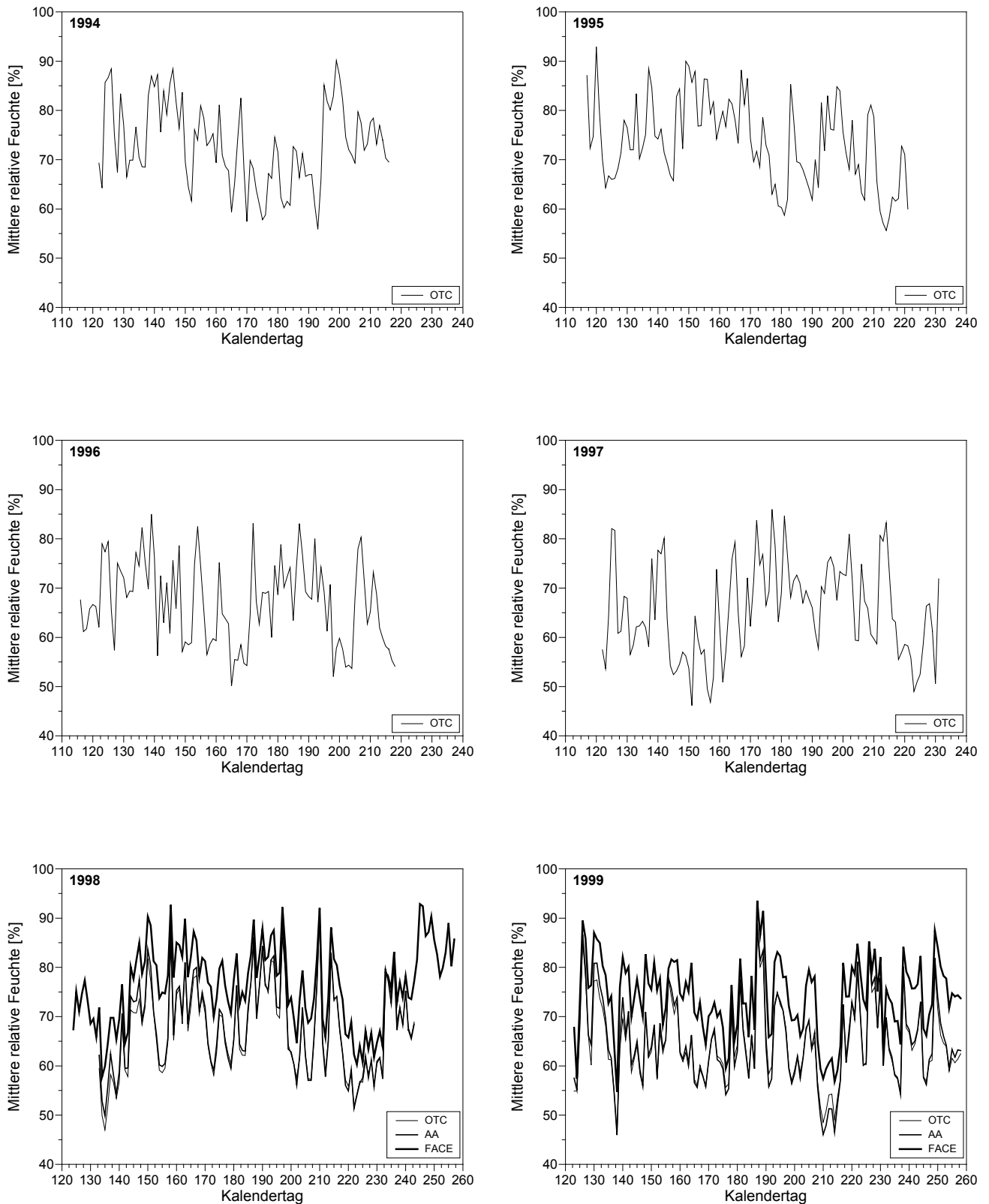


Abbildung 5: Mittlere relative Feuchte in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.

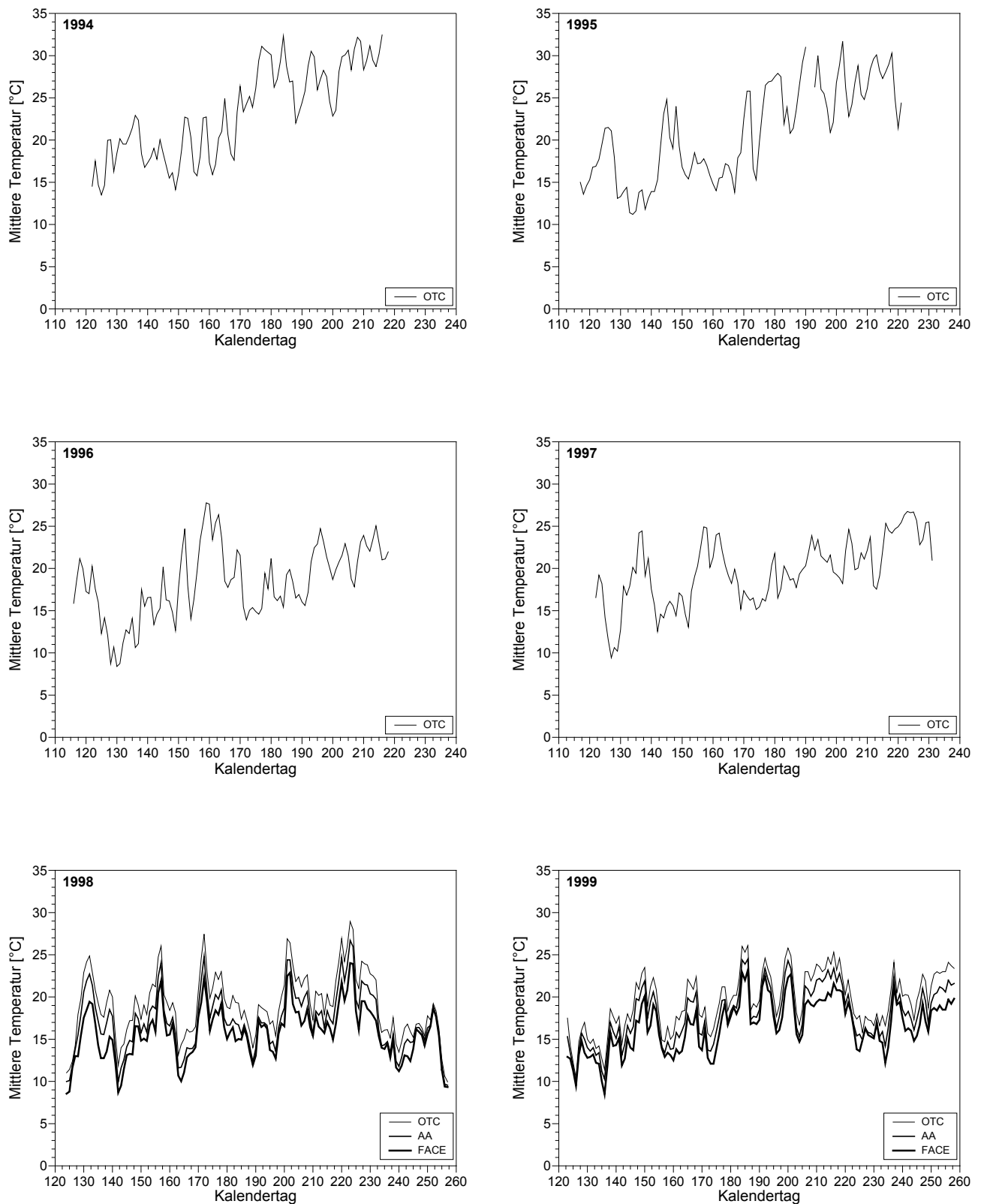


Abbildung 6: Mittlere Tagestemperatur in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.

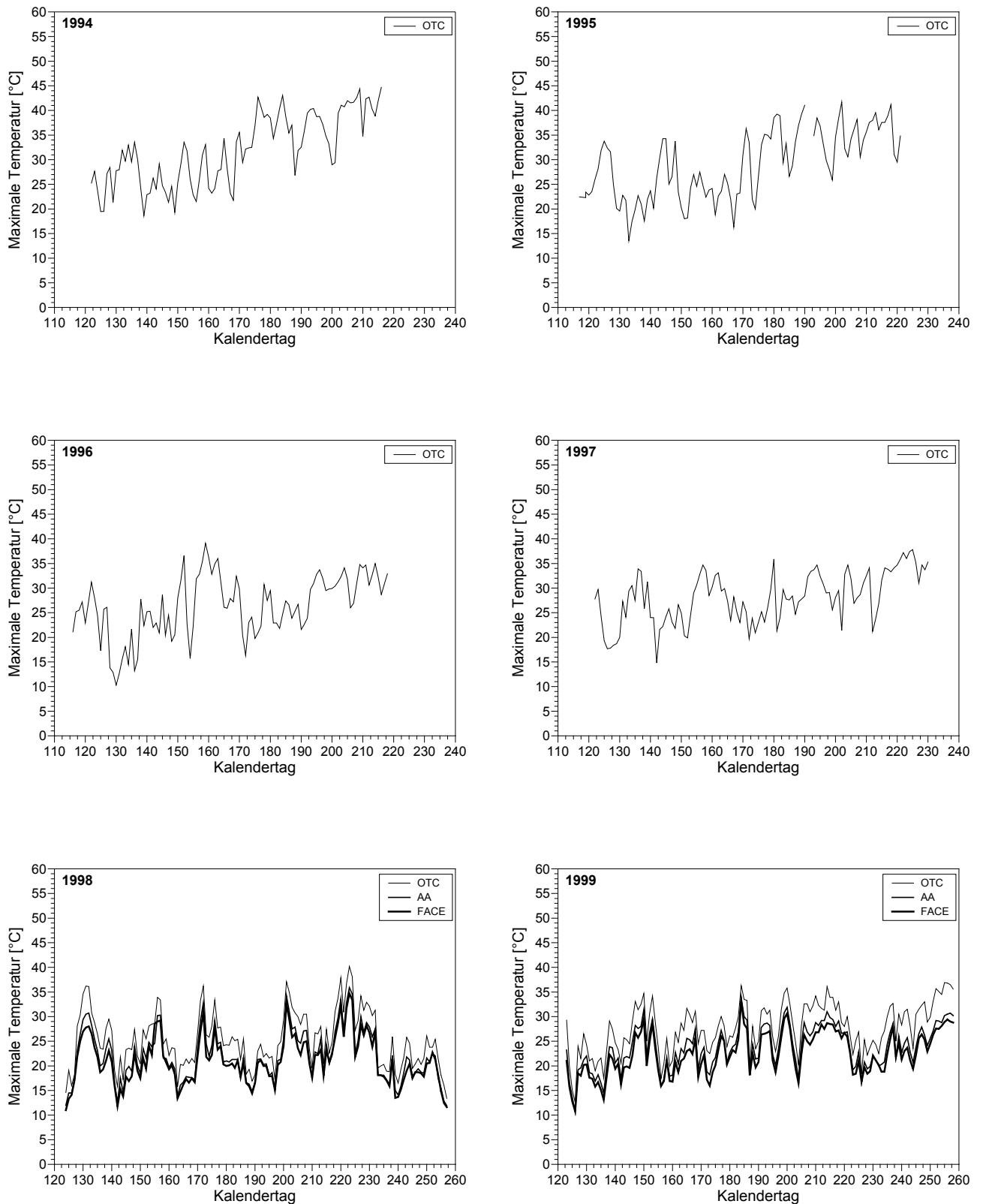


Abbildung 7: Tägliche Maxima der Temperatur in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.

3.2 Spurengaskonzentrationen

Die in den Behandlungen erreichten CO₂-Konzentrationen und Ozonkonzentrationen von Beginn bis zum Ende der Vegetationsperiode sind in Abbildung 8 bis Abbildung 11 dargestellt. Die saisonalen Stundenmittelwerte der CO₂- und Ozonkonzentrationen enthält Tabelle 5.

Die CO₂-Konzentrationen in den OTC (24-Stunden-Mittelwerte) erreichten in allen Versuchsjahren den Rahmen der angestrebten Werte von 380 µl l⁻¹ CO₂, 550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂. Lediglich im FACE-System (Mittelwerte von 2 Stunden nach Sonnenaufgang bis 2 Stunden vor Sonnenuntergang) waren die Konzentrationen in der Behandlung mit 550 µl l⁻¹ CO₂ mit einer Abweichung von 120,4 µl l⁻¹ CO₂ (1998) und 58,6 µl l⁻¹ CO₂ (1999) weit unter den angestrebten Werten und zeigten große Variationen.

Die Exposition mit Ozon (8-Stunden-Mittelwerte von 9-17 Uhr) erfolgte mit Umgebungskonzentrationen und mit einem angestrebten saisonalen Mittelwert von 60 nl l⁻¹. Insgesamt waren die saisonalen Mittelwerte der Ozonbehandlung 1998 im Vergleich zu 1999 niedriger. Die durchschnittlich erreichten Ozonkonzentrationen waren in der OTCO₃-Behandlung im Vergleich zur OTCNF-Behandlung 1998 um das 2,55-fache und 1999 um das 2,66-fache erhöht. Die Ozonkonzentrationen der Außenluft in Linden-Leihgestern (Standort der FACE-Experimente) lagen 1999 im Mittel 1,68-fach höher als auf dem OTC-Gelände (AA-OTC-Behandlung).

Tabelle 5: Mittelwerte der Spurengaskonzentrationen in den verschiedenen Behandlungen über den Expositionszeitraum in den Versuchsjahren 1994 bis 1999.

Behandlung	1994	1995	1996	1997	1998	1999
CO ₂ -Konzentrationen (OTC: 24-Stunden-Mittelwerte, FACE: Mittelwerte von 2 Stunden nach Sonnenaufgang bis 2 Stunden vor Sonnenuntergang) [µl l ⁻¹]						
OTC380NF	352,3±16,1	401,2±9,1	378,8±2,8	362,5±4,9	372,7±6,7	383,1±4,0
OTC550NF	515,3±1,5	541,9±7,3	521,2±5,8	-	539,8±18,3	545,5±10,7
OTC680NF	636,0±13,6	640,9±16,7	676,3±2,5	650,0±20,3	687,6±20,5	721,4±18,1
AA-OTC	-	-	-	-	366,6±12,2	378,2±11,9
AA-FACE	-	-	-	-	400,9±39,6	373,7±8,9
FACE550	-	-	-	-	429,6±30,4	491,4±28,8
Ozon-Konzentrationen (8-Stunden-Mittelwerte von 9-17 Uhr) [nl l ⁻¹]						
OTCNF	-	-	-	-	23,1±0,4	23,8±1,0
OTCO ₃	-	-	-	-	58,9±3,8	63,1±2,1
AA-OTC	-	-	-	-	24,9±11,2	26,8±9,8
AA-FACE	-	-	-	-	-	45,0±12,2

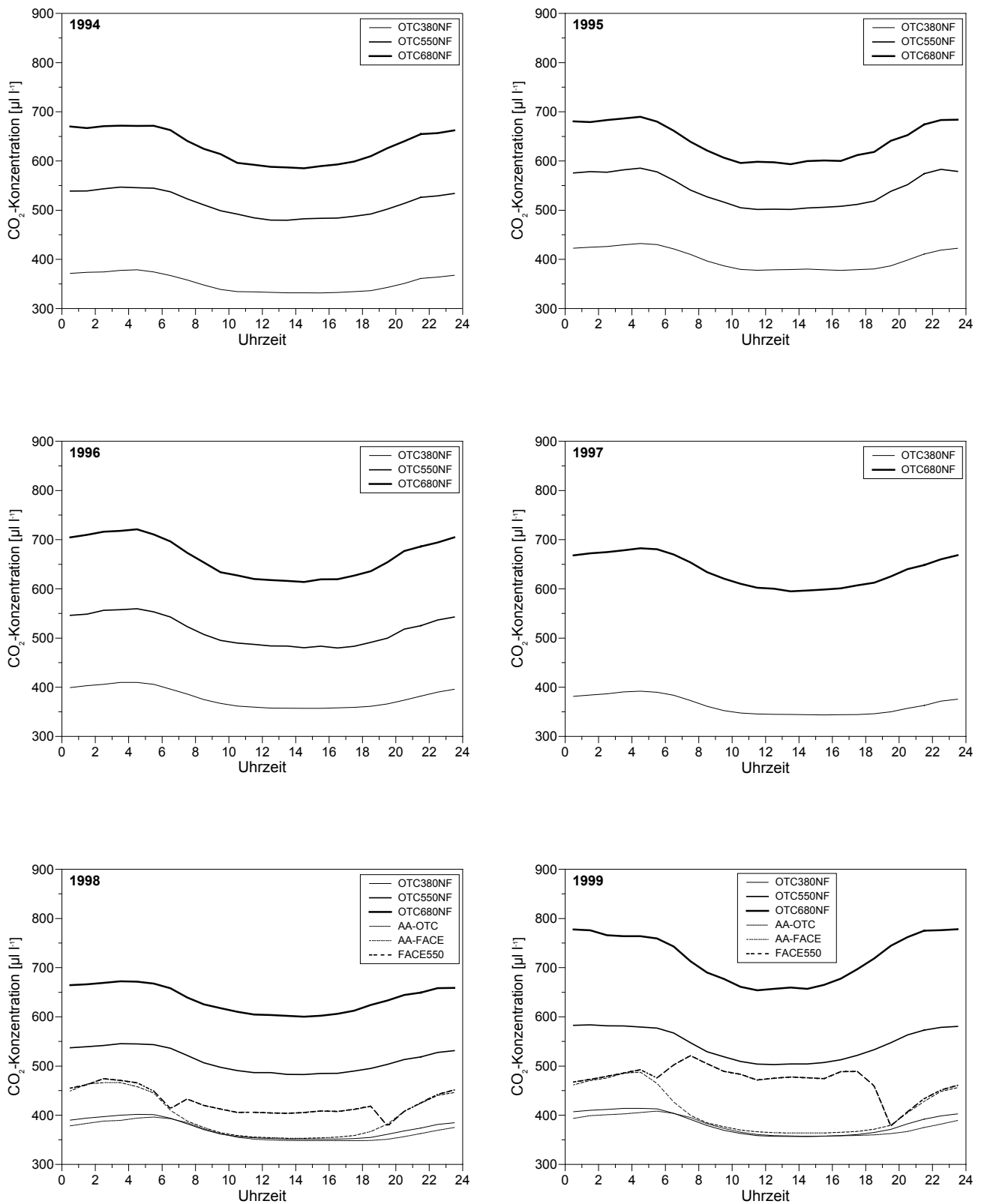


Abbildung 8: Tagesverlauf der CO₂-Konzentrationen in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1994 bis 1999.

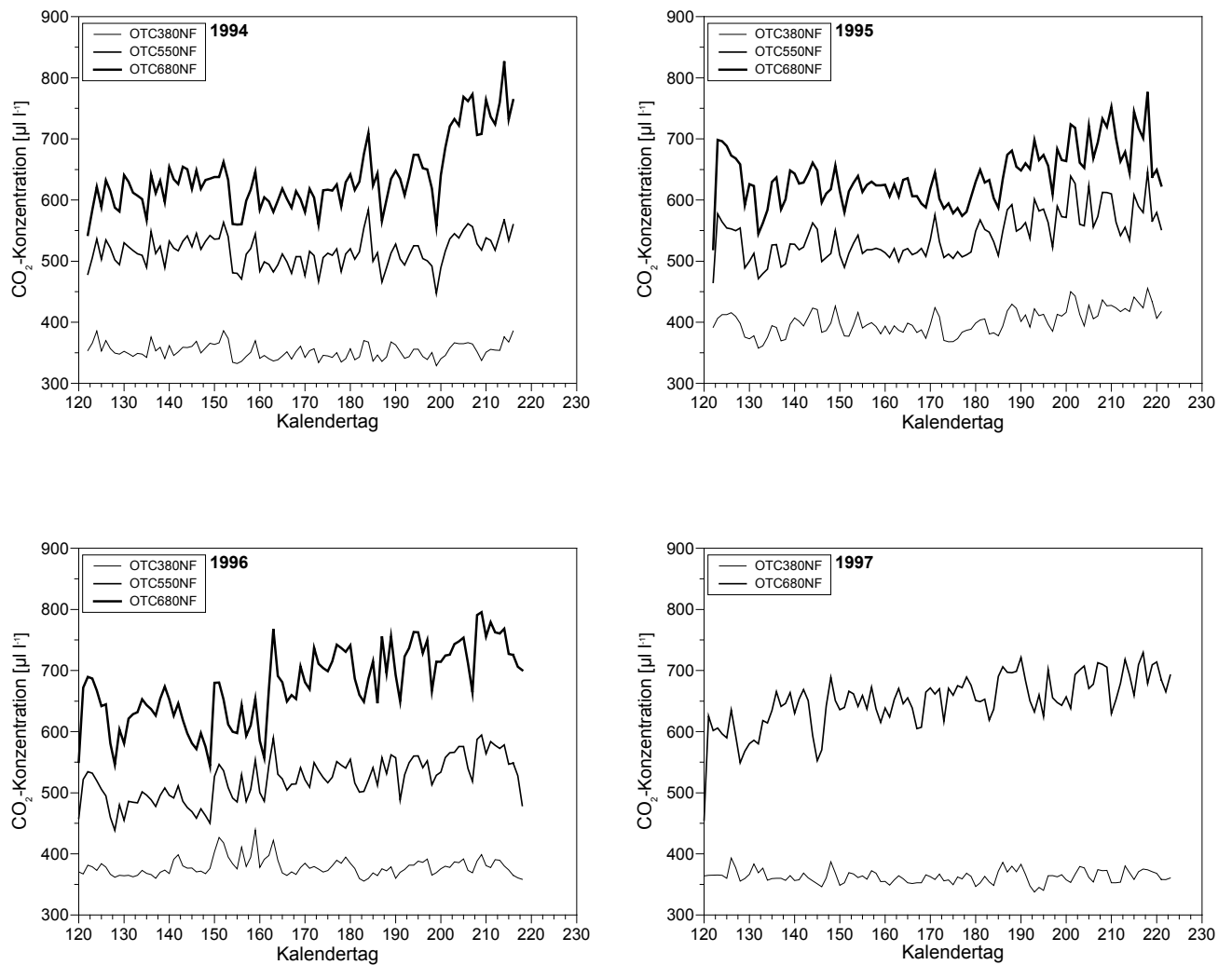


Abbildung 9: CO₂-Konzentrationen (Tagesmittelwerte über 24-Stunden) über den Expositionszeitraum in den OTC während der Versuchsjahre 1994 bis 1997.

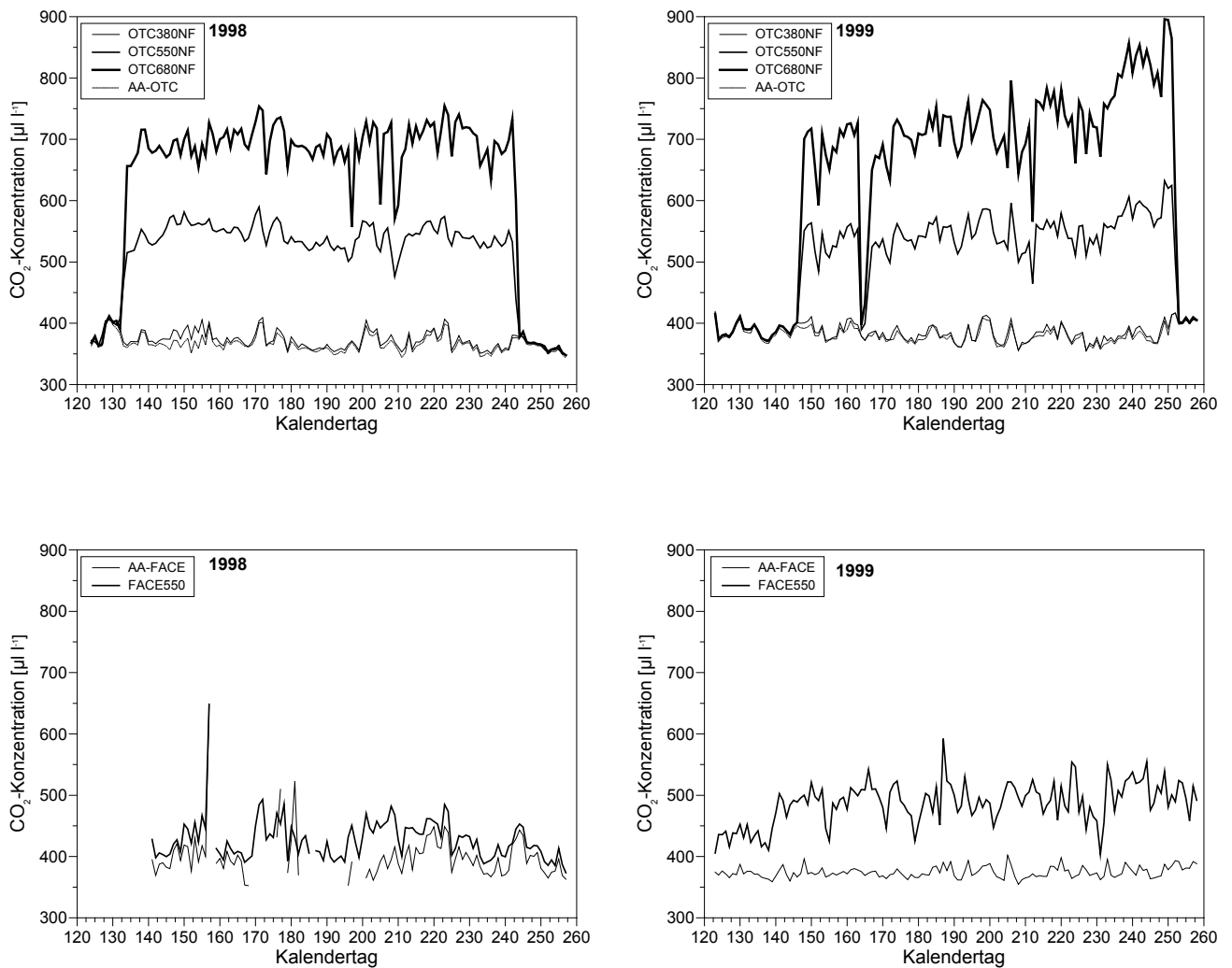


Abbildung 10: CO₂-Konzentrationen (OTC: Tagesmittelwerte über 24 Stunden, FACE: Tagesmittelwerte jeweils 2 Stunden nach Sonnenaufgang bis 2 Stunden vor Sonnenaufgang) über den Expositionszeitraum in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1998 und 1999.

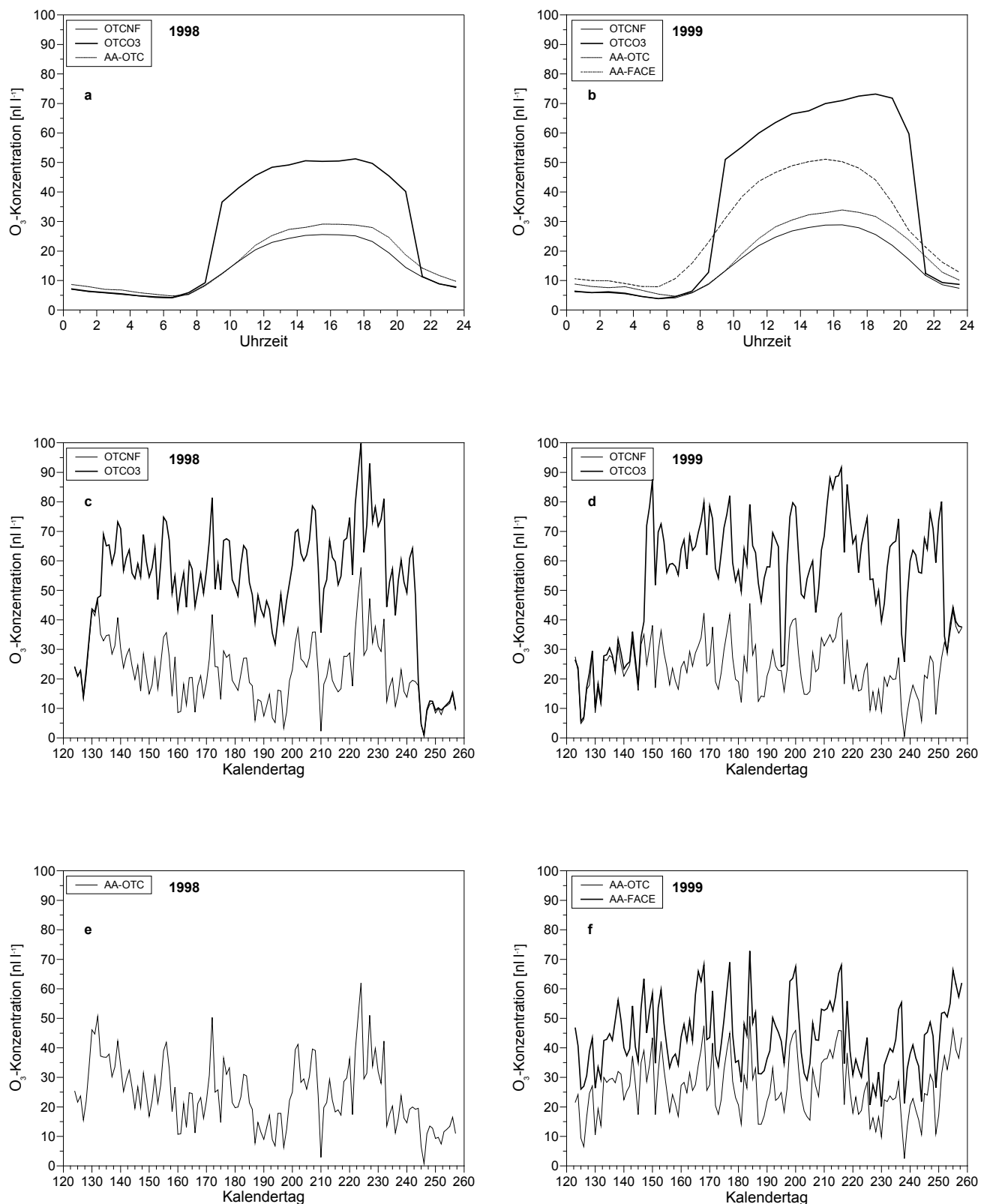


Abbildung 11: Ozonkonzentrationen über den Expositionszeitraum in den verschiedenen Behandlungsvarianten OTC, AA und FACE während der Versuchsjahre 1998 und 1999. a und b: mittlerer Tagesgang über die Wuchsperiode, c-f: Tagesmittelwerte (8-Stunden-Mittelwerte von 9–17 Uhr).

3.3 Sommerweizen

3.3.1 OBERIRDISCHE BIOMASSE, ERTRAG, HARVEST-INDEX UND ERTRAGSPARAMETER

Untersucht wurde der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung auf die oberirdische Biomasse, den Ertrag, den Harvest-Index sowie die verschiedenen Ertragsparameter. Zur Klärung der Frage, ob der Kornertrag zur Erntereife in gleichem Umfang wie die Gesamtbiomasse auf CO₂ und Stickstoff reagierte, wurde aus dem Verhältnis des Ertrags zur Gesamtbiomasse der Harvest-Index von Sommerweizen bestimmt.

3.3.1.1 OBERIRDISCHE BIOMASSE

Der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung auf die oberirdische Biomasse von Sommerweizen wurde in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 untersucht. Die Behandlungsmittelwerte, die Standardabweichung und die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse sind in Tabelle 6 angegeben.

Erhöhtes CO₂ bewirkte in allen vier Versuchsjahren in beiden Stickstoffbehandlungen eine signifikante Förderung der oberirdischen Biomasse in der Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂ um durchschnittlich 20,1 % und 35,5 % (150 kg N ha⁻¹) sowie 17,4 % und 42,0 % (270 bzw. 300 kg N ha⁻¹) im Vergleich zur Kontrolle (380 µl l⁻¹ CO₂). Höhere Stickstoffgaben (270 bzw. 300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) führten in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 in allen CO₂-Behandlungen ebenfalls zu einem signifikanten Anstieg der oberirdischen Biomasse um durchschnittlich 9,3 % (OTC380NF), 10,5 % (OTC550NF) und 13,4 % (OTC680NF). Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die oberirdische Biomasse konnten in keinem der Versuchsjahre beobachtet werden, lediglich im Versuchsjahr 1995 zeigten die Werte eine tendenzielle Interaktion von CO₂ und Stickstoff.

Tabelle 6: Oberirdische Biomasse von Sommerweizen (Trockengewicht [g] bezogen auf m²) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
1994	270	975,8±78,3	1262±102	1378±113	0,002	0,003	n.s.
	150	827,8±48,7	1015±42	1118±49			
1995	300	884,0±45,5	962,9±9,0	1250±63	0,000	0,003	(0,097)
	150	792,8±11,3	907,2±15,6	1044±62			
1996	300	1023±41	1210±40	1366±24	0,002	0,022	n.s.
	150	919,0±132,9	1134±64	1197±17			
1997	300	1067±42	-	1620±125	0,000	n.s.	n.s.
	150	1052±38	-	1526±98			

3.3.1.2 ERTRAG

Der Gesamtertrag von Sommerweizen wurde in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 ebenfalls in beiden Stickstoffbehandlungen signifikant durch erhöhte CO₂-Konzentrationen um durchschnittlich 18,3 % und 32,5 % (150 kg N ha⁻¹) sowie um 14,4 % und 38,2 % (270 bzw. 300 kg N ha⁻¹) in der OTC550NF- und OTC680NF-Behandlung im Vergleich zur Kontrolle (OTC380NF) gefördert (Tabelle 7). Aus der höheren Stickstoffversorgung mit 270 bzw. 300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹ resultierte in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 in allen CO₂-Behandlungen ein signifikanter Anstieg des Gesamtertrags um durchschnittlich 12,2 % (OTC380NF), 12,8 % (OTC550NF) und 16,7 % (OTC680NF). Eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf den Gesamtertrag von Sommerweizen wurde nur im Versuchsjahr 1995 beobachtet. In der OTC680NF-Behandlung bewirkte erhöhtes CO₂ bei einer Stickstoffversorgung mit 150 kg N ha⁻¹ eine Steigerung des Gesamtertrages um 31,7 % und bei einer Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ um 41,4 %.

Die positive Ertragsantwort von Sommerweizen auf CO₂ und Stickstoff basierte in erster Linie auf der Reaktion der Nebenähren. Lediglich im Versuchsjahr 1995 konnte ein signifikanter CO₂-Effekt auf den Ertrag der Hauptähren festgestellt werden. In den Versuchsjahren 1995 bis 1997 reagierten die Nebenähren von Sommerweizen in beiden Stickstoffbehandlungen mit einer signifikanten Ertragszunahme auf erhöhte CO₂-Konzentrationen. Resultierend aus einer höheren Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) ergaben sich in den Versuchsjahren 1995 und 1996 in allen CO₂-Behandlungen ebenfalls positive Ertragsantworten der Nebenähren. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf den Ertrag der Nebenähren konnten nicht festgestellt werden.

Tabelle 7: Ertrag von Sommerweizen (Trockengewicht [g] bezogen auf m²) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Gesamtähren							
1994	270	474,8±43,6	606,1±16,9	625,0±46,8	0,001	0,001	n.s.
	150	384,5±28,6	474,3±9,1	507,3±7,0			
1995	300	418,0±30,5	419,2±20,6	592,9±14,1	0,000	0,006	0,040
	150	373,0±4,0	416,4±7,5	493,6±28,6			
1996	300	566,8±29,7	653,3±23,9	724,9±12,7	0,008	0,013	n.s.
	150	495,6±88,1	595,0±12,6	613,1±14,3			
1997	300	549,9±26,3	-	832,7±75,2	0,000	n.s.	n.s.
	150	556,0±32,9	-	789,9±66,4			
Hauptähren							
1995	300	233,7±24,8	200,7±7,4	247,7±6,0	0,049	n.s.	n.s.
	150	234,9±9,5	230,8±10,8	239,6±3,7			
1996	300	264,2±10,3	267,7±6,3	274,0±8,9	n.s.	n.s.	n.s.
	150	248,7±45,6	249,3±7,6	260,9±5,6			
1997	300	462,6±17,0	-	489,2±18,2	n.s.	n.s.	n.s.
	150	487,2±12,4	-	491,6±30,5			
Nebenähren							
1995	300	184,3±5,6	218,5±28,0	345,2±8,0	0,000	0,002	n.s.
	150	138,0±5,5	185,6±18,3	254,0±32,3			
1996	300	302,6±19,4	385,6±30,2	450,9±3,8	0,001	0,004	n.s.
	150	246,9±42,5	345,7±20,2	352,3±8,7			
1997	300	87,27±43,24	-	343,5±61,2	0,000	n.s.	n.s.
	150	68,85±35,10	-	298,3±39,3			

3.3.1.3 HARVEST-INDEX

Der Harvest-Index ermöglicht Aussagen über die unterschiedliche Förderung des Kornertrags im Vergleich zur oberirdischen Biomasse durch CO₂ und Stickstoff. Das Verhältnis von Kornertrag zu oberirdischer Biomasse wurde lediglich im Versuchsjahr 1995 signifikant durch erhöhte CO₂-Konzentrationen beeinflusst, in den anderen Versuchsjahren reagierten die oberirdische Biomasse und der Ertrag in gleichem Maße auf erhöhtes CO₂ (Tabelle 8). Während der Harvest-Index 1995 in beiden Stickstoffbehandlungen durch erhöhtes CO₂ in der OTC550NF-Behandlung abnahm, wurde in der OTC680NF-Behandlung ein Anstieg beobachtet. Eine höhere Stickstoffversorgung führte nur 1996 zu einem tendenziellen Anstieg des Harvest-Index, in den anderen Versuchsjahren konnte keine Beeinflussung des Harvest-Index durch Stickstoff festgestellt werden. Eine Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf den Harvest-Index ergab sich in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 nicht.

Tabelle 8: Harvest-Index von Sommerweizen zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
1994	270	0,485±0,008	0,481±0,025	0,454±0,003	n.s.	n.s.	n.s.
	150	0,465±0,008	0,468±0,028	0,454±0,013			
1995	300	0,476±0,007	0,449±0,015	0,483±0,006	0,041	n.s.	n.s.
	150	0,472±0,004	0,468±0,012	0,474±0,003			
1996	300	0,554±0,006	0,540±0,002	0,531±0,019	n.s.	(0,091)	n.s.
	150	0,536±0,021	0,526±0,020	0,512±0,005			
1997	300	0,515±0,005	-	0,512±0,006	n.s.	n.s.	n.s.
	150	0,529±0,012	-	0,518±0,013			

3.3.1.4 ERTRAGSPARAMETER

Veränderungen bei den Ertragsparametern wie Ährenzahl, Anzahl der Körner pro Ähre, Kornzahl und Tausendkorngewicht (TKW) geben Aufschluss über die Ursachen der Ertragsreaktion auf CO₂ und Stickstoff, da sich Effekte auf den Kornertrag durch Multiplikation der einzelnen Komponenten erklären lassen.

Anzahl der Ähren

In den Versuchsjahren 1996 und 1997 bildete Sommerweizen in beiden Stickstoffbehandlungen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen signifikant mehr Ähren aus (Tabelle 9). Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) führte ebenfalls zu einer positiven Förderung der Ährenzahl, dieser Effekt war jedoch nur 1996 signifikant. In diesem Versuchsjahr ergab sich darüber hinaus eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Anzahl der Ähren, düngungsbedingte Unterschiede in der Ährenzahl wurden mit höheren CO₂-Konzentrationen größer.

Tabelle 9: Anzahl der Ähren bei Sommerweizen (bezogen auf m²) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1996 und 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
1996	300	413,0±9,9	448,0±0,0	497,0±29,7	0,008	0,005	0,038
	150	378,0±19,8	441,0±9,9	406,0±19,8			
1997	300	361,9±25,7	-	553,1±51,8	0,000	(0,063)	n.s.
	150	330,1±27,1	-	502,5±17,7			

Anzahl der Körner

Der Anstieg des Ertrags durch erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen resultierte in erster Linie aus der vermehrten Ausbildung von Körnern (Tabelle 10). Erhöhtes CO₂ führte bezogen auf die Gesamtähren in allen Stickstoffbehandlungen zu einer signifikanten Steigerung der Kornzahlen in den Versuchsjahren 1994 bis 1997. Die Trennung der Ähren in Haupt- und Nebenähren bestätigte in den Versuchsjahren 1995 bis 1997 die Zunahme der Kornzahl durch erhöhtes CO₂. Während jedoch die Anzahl der Körner in den Nebenähren in allen Versuchsjahren signifikant durch erhöhtes CO₂ gesteigert wurde, war dieser positive Effekt in den Hauptähren nur in den Jahren 1995 und 1997 signifikant.

Eine höhere Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹ bewirkte in allen CO₂-Behandlungen bei den Gesamt-, Haupt- und Nebenähren eine Zunahme der Kornzahlen. Allerdings war dieser Effekt bezogen auf die Körner der Gesamt- und Nebenähren im Versuchsjahr 1997 nicht signifikant, bei den Hauptähren konnte nur im Versuchsjahr 1996 eine tendenzielle Abhängigkeit festgestellt werden. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Kornzahl ergab sich nur 1995 für die Gesamt- und Nebenähren, im Versuchsjahr 1996 hingegen wurde nur eine tendenzielle Interaktion auf die Kornzahl der Nebenähren beobachtet.

Tabelle 10: Anzahl der gebildeten Körner bei Sommerweizen (bezogen auf m²) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
Gesamtähren							
1994	270	13614±730	19759±477	18845±3068	0,006	0,005	n.s.
	150	11626±830	14298±1072	15638±60			
1995	300	14236±594	18043±594	21941±1305	0,000	0,001	0,050
	150	12718±204	15706±730	17233±452			
1996	300	16359±604	19796±158	21392±257	0,000	0,001	n.s.
	150	14182±1188	17787±1277	17598±139			
1997	300	13165±900	-	22310±878	0,000	n.s.	n.s.
	150	13101±438	-	21291±1489			
Hauptähren							
1995	300	7096±285	8229±6	8768±260	0,005	n.s.	n.s.
	150	7333±260	8155±767	8606±303			
1996	300	6979±267	7315±287	7392±238	n.s.	(0,084)	n.s.
	150	6671±663	6769±188	7028±79			
1997	300	10824±216	-	11896±21	0,003	n.s.	n.s.
	150	11101±532	-	12309±755			
Nebenähren							
1995	300	7140±309	9813±588	13173±1046	0,000	0,000	0,018
	150	5386±56	7551±37	8628±148			
1996	300	9380±337	12481±445	14000±20	0,000	0,000	(0,096)
	150	7511±525	11018±1089	10570±218			
1997	300	2342±1115	-	10414±871	0,000	n.s.	n.s.
	150	2000±757	-	8982±875			

Kornzahl pro Ähre

Weiterhin basieren die beobachteten Ertragssteigerungen auf der Förderung der Kornzahl pro Ähre durch CO₂ (Tabelle 11). Während 1997 für die Gesamtähren lediglich ein tendenzieller CO₂-Effekt festgestellt werden konnte, stieg die Kornzahl pro Haupt- und Nebenähre in beiden Stickstoffbehandlungen signifikant durch erhöhte CO₂-Konzentrationen an. Signifikante Effekte von Stickstoff auf die Anzahl der Körner pro Gesamt-, Haupt- und Nebenähre sowie Interaktionen von CO₂ und Stickstoff wurden nicht festgestellt.

Tabelle 11: Kornzahl pro Ähre bei Sommerweizen zur Erntereife in den Versuchsjahren 1996 und 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Gesamtähren							
1996	300	40,12±2,40	44,34±0,31	43,33±2,81	n.s.	n.s.	n.s.
	150	38,23±5,53	40,55±1,76	43,45±1,86			
1997	300	36,63±1,59	-	40,48±2,24	(0,088)	n.s.	n.s.
	150	39,93±3,58	-	42,33±3,27			
Hauptähren							
1997	300	43,29±0,87	-	47,59±0,08	0,003	n.s.	n.s.
	150	44,41±2,13	-	49,24±3,02			
Nebenähren							
1997	300	19,57±6,57	-	34,71±3,19	0,002	n.s.	n.s.
	150	25,35±5,97	-	35,47±3,31			

Tausendkorngewicht

Das Tausendkorngewicht (TKW) der Gesamt-, Haupt und Nebenähren blieb in den meisten Versuchsjahren durch CO₂ und Stickstoff unbeeinflusst. Lediglich im Versuchsjahr 1997 sank das Tausendkorngewicht der Gesamt- und Hauptähren unabhängig von der Stickstoffbehandlung unter erhöhtem CO₂ signifikant ab, 1995 konnte bei den Hauptähren eine tendenzielle Reduktion des Tausendkorngewichts durch erhöhtes CO₂ beobachtet werden (Tabelle 12). Ein signifikanter Effekt der Stickstoffversorgung auf das Tausendkorngewicht wurde weder bei den Gesamtähren noch bei den Haupt- und Nebenähren festgestellt. In keinem der Versuchsjahre ergaben sich signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf das Tausendkorngewicht.

Tabelle 12: Tausendkorngewicht (g) von Sommerweizen zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
Gesamtähren							
1994	270	34,86±1,32	30,72±0,11	33,50±2,86	n.s.	n.s.	n.s.
	150	33,26±0,08	33,40±3,22	32,58±0,59			
1995	300	27,88±3,94	23,84±1,47	27,49±0,77	n.s.	n.s.	n.s.
	150	28,40±0,38	26,00±1,09	27,18±0,16			
1996	300	34,81±2,97	33,01±0,94	33,90±0,18	n.s.	n.s.	n.s.
	150	34,80±3,46	33,56±1,78	34,82±1,13			
1997	300	41,81±0,84	-	37,19±1,93	0,000	n.s.	n.s.
	150	42,55±0,97	-	37,18±0,71			
Hauptähren							
1995	300	30,59±4,52	25,26±1,60	29,07±0,27	(0,091)	n.s.	n.s.
	150	31,07±0,60	28,47±0,20	28,04±1,53			
1996	300	37,86±2,79	36,65±0,68	37,04±0,04	n.s.	n.s.	n.s.
	150	37,04±3,20	36,79±2,19	37,09±0,40			
1997	300	42,83±0,79	-	41,06±1,55	0,001	n.s.	n.s.
	150	43,95±1,03	-	40,00±0,53			
Nebenähren							
1995	300	26,17±4,19	22,73±3,99	26,46±0,96	n.s.	n.s.	n.s.
	150	24,74±0,06	23,29±2,17	26,51±1,42			
1996	300	32,53±3,06	30,90±1,30	32,24±0,24	n.s.	n.s.	n.s.
	150	32,78±3,41	31,54±1,34	33,30±1,53			
1997	300	36,71±1,98	-	32,66±2,79	n.s.	n.s.	n.s.
	150	34,07±4,87	-	33,21±1,29			

3.3.2 ALLGEMEINE ERTRAGSQUALITÄT

3.3.2.1 ANTEIL DER KORNGRÖßEN AM GESAMTKORN

1997 wurden die Körner nach Haupt- und Nebenähren getrennt und der jeweilige Anteil von fünf verschiedenen Größenfraktionen am Gesamtkorn bestimmt (Tabelle 13). Abgesehen vom tendenziellen Effekt in der Kornfraktion 2,8 bis 3,0 mm der Hauptähren ergab sich unabhängig von der Stickstoffversorgung in allen anderen Fraktionen bei den Haupt- und Nebenähren eine signifikante Verschiebung der Korngröße hin zu kleineren Körnern durch erhöhte CO₂-Konzentrationen. Signifikante Stickstoffeffekte konnten nur in den Nebenähren für den Anteil der Korngröße 2,8 bis 3,0 mm festgestellt werden. In dieser Fraktion wurde ebenfalls eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf den Anteil am Gesamtkorn beobachtet. Eine tendenzielle Interaktion von CO₂ und Stickstoff war in den Hauptähren auf den Anteil der Kornfraktion größer 3,3 mm festzustellen.

Tabelle 13: Größensortierung der Körner von Sommerweizen (% bezogen auf Gesamtkorn) zur Erntereife 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Organ	Sortierung	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	PCO2	PN	PCO2xN
Haupt- ähren	< 2,5 mm	300	6,116±1,565	-	11,36±1,48	0,000	n.s.	n.s.
		150	5,876±0,866	-	12,44±0,49			
	2,5-2,8 mm	300	15,50±1,58	-	20,72±3,32	0,014	n.s.	n.s.
		150	14,44±2,55	-	19,59±3,54			
	2,8-3,0 mm	300	36,68±3,36	-	36,96±1,18	(0,088)	n.s.	n.s.
		150	33,61±3,73	-	40,36±3,61			
	3,0-3,3 mm	300	31,22±3,70	-	23,77±3,40	0,009	n.s.	n.s.
		150	32,87±2,14	-	23,57±6,46			
	> 3,3 mm	300	10,49±2,50	-	7,196±1,527	0,002	n.s.	(0,063)
		150	13,21±3,60	-	4,036±0,892			
Neben- ähren	< 2,5 mm	300	11,04±4,24	-	19,16±3,27	0,018	n.s.	n.s.
		150	11,73±4,75	-	15,89±0,39			
	2,5-2,8 mm	300	14,46±4,17	-	31,59±6,32	0,010	n.s.	n.s.
		150	19,32±5,99	-	25,81±7,24			
	2,8-3,0 mm	300	31,68±4,26	-	30,18±1,39	0,005	0,041	0,002
		150	27,90±2,85	-	41,99±2,13			
	3,0-3,3 mm	300	26,17±2,99	-	15,13±5,90	0,001	n.s.	n.s.
		150	29,91±5,57	-	14,13±4,21			
	> 3,3 mm	300	16,65±6,39	-	3,944±2,049	0,001	n.s.	n.s.
		150	11,14±2,89	-	2,183±0,874			

3.3.2.2 KEIMFÄHIGKEIT

Der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung auf die Keimfähigkeit von Sommerweizen wurde 1997 untersucht (Tabelle 14). Erhöhtes CO₂ bewirkte in beiden Stickstoffbehandlungen keine signifikante Veränderung der Keimfähigkeit. Höhere Stickstoffgaben (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) führten ebenfalls in keiner CO₂-Behandlung zu einer signifikanten Veränderung des Keimverhaltens. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Keimung konnten ebenfalls nicht beobachtet werden.

Tabelle 14: Keimfähigkeit (%) von Sommerweizen (Mischprobe aus Körnern der Haupt- und Nebenähren) zur Erntereife 1995 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
0	300	0,000±0,000	0,000±0,000	0,000±0,000	-	-	-
	150	0,000±0,000	0,000±0,000	0,000±0,000			
1	300	94,00±3,77	86,33±5,18	91,67±1,41	n.s.	n.s.	n.s.
	150	87,33±10,37	89,33±0,94	92,00±2,83			
2	300	98,67±0,000	96,00±2,83	98,00±1,89	n.s.	n.s.	n.s.
	150	96,00±2,83	98,00±0,94	97,67±0,47			
3	300	98,67±0,000	96,00±2,83	98,00±1,89	n.s.	n.s.	n.s.
	150	96,00±2,83	98,00±0,94	97,67±0,47			
4	300	100,0±0,0	98,67±1,89	98,67±0,94	n.s.	n.s.	n.s.
	150	98,67±1,89	99,33±0,94	99,33±0,00			
5	300	100,0±0,0	99,67±0,47	99,33±0,00	n.s.	n.s.	n.s.
	150	99,67±0,47	99,67±0,47	99,67±0,47			
6	300	100,0±0,0	99,67±0,47	99,33±0,00	n.s.	n.s.	n.s.
	150	99,33±0,94	99,67±0,47	99,67±0,47			
7	300	100,0±0,0	99,67±0,47	99,33±0,00	n.s.	n.s.	n.s.
	150	99,33±0,94	99,67±0,47	99,67±0,47			

3.3.3 CHEMISCHE ERTRAGSQUALITÄT

3.3.3.1 KOHLENHYDRATEINLAGERUNG WÄHREND DER KORNFÜLLUNG

In den Versuchsjahren 1994 bis 1996 wurden zusätzliche Ernten nach der Anthese durchgeführt, um die Einflüsse von erhöhtem CO₂ auf den Prozess der Kornfüllung bei Sommerweizen zu beobachten. Bei der Interpretation der Daten für das Versuchsjahr 1994 ist allerdings zu beachten, dass es sich bei dem analysierten Gewebe der ersten beiden Ernten (53 und 60 Tage nach Aussaat) um die Ähre einschließlich der bis zu diesem Zeitpunkt ausgebildeten Körner handelt. Aufgrund der fehlenden Kammerwiederholung im Versuchsdesign konnte keine statistische Auswertung durchgeführt werden.

Die Einlagerung der löslichen Kohlenhydrate in die Ähre bzw. in die Körner zu den verschiedenen Ernteterminen während der Vegetationsperiode 1994 wird in Abbildung 12 dargestellt. Insgesamt konnten keine deutlichen Konzentrationsunterschiede durch erhöhte CO₂-Konzentrationen bei den untersuchten Kohlenhydraten während der Kornfüllung beobachtet werden. Tendenziell war jedoch unter erhöhtem CO₂ zu Beginn der Kornfüllung eine höhere Konzentration an löslichen Kohlenhydraten, reduzierenden Zuckern und Fructanen im analysierten Gewebe zu beobachten. Ab Tag 60 (reduzierende Zucker), Tag 68 (Fructane) und Tag 77 (lösliche Kohlenhydrate) nach Aussaat konnte bis zum Ende der Vegetationsperiode kein eindeutiger Unterschied in der Konzentration der untersuchten Kohlenhydrate durch die CO₂-Behandlung festgestellt werden. Für die Saccharose wurden sowohl zu Beginn der Kornfüllung

lungsphase bis zu Tag 68 nach Aussaat und ab Tag 77 nach Aussaat bis zum Ende der Vegetationsperiode in der OTC680NF-Behandlung tendenziell höhere Konzentrationen durch CO₂ beobachtet. Auch die Stärkeeinlagerung in die Körner der Weizenpflanzen wurde tendenziell durch erhöhte CO₂-Konzentrationen beeinflusst. Ab Tag 60 bis Tag 74 nach Aussaat war die Konzentration an Stärke im Korn im Vergleich zur Kontrollbehandlung durch CO₂ erhöht, danach konnte kein einheitlicher Effekt beobachtet werden. Während die Stärkekonzentration im Korn 77 und 92 Tage nach Aussaat durch CO₂ erhöht war, wurde 77 und 83 Tage nach Aussaat kein Konzentrationsunterschied durch erhöhte CO₂-Konzentrationen festgestellt.

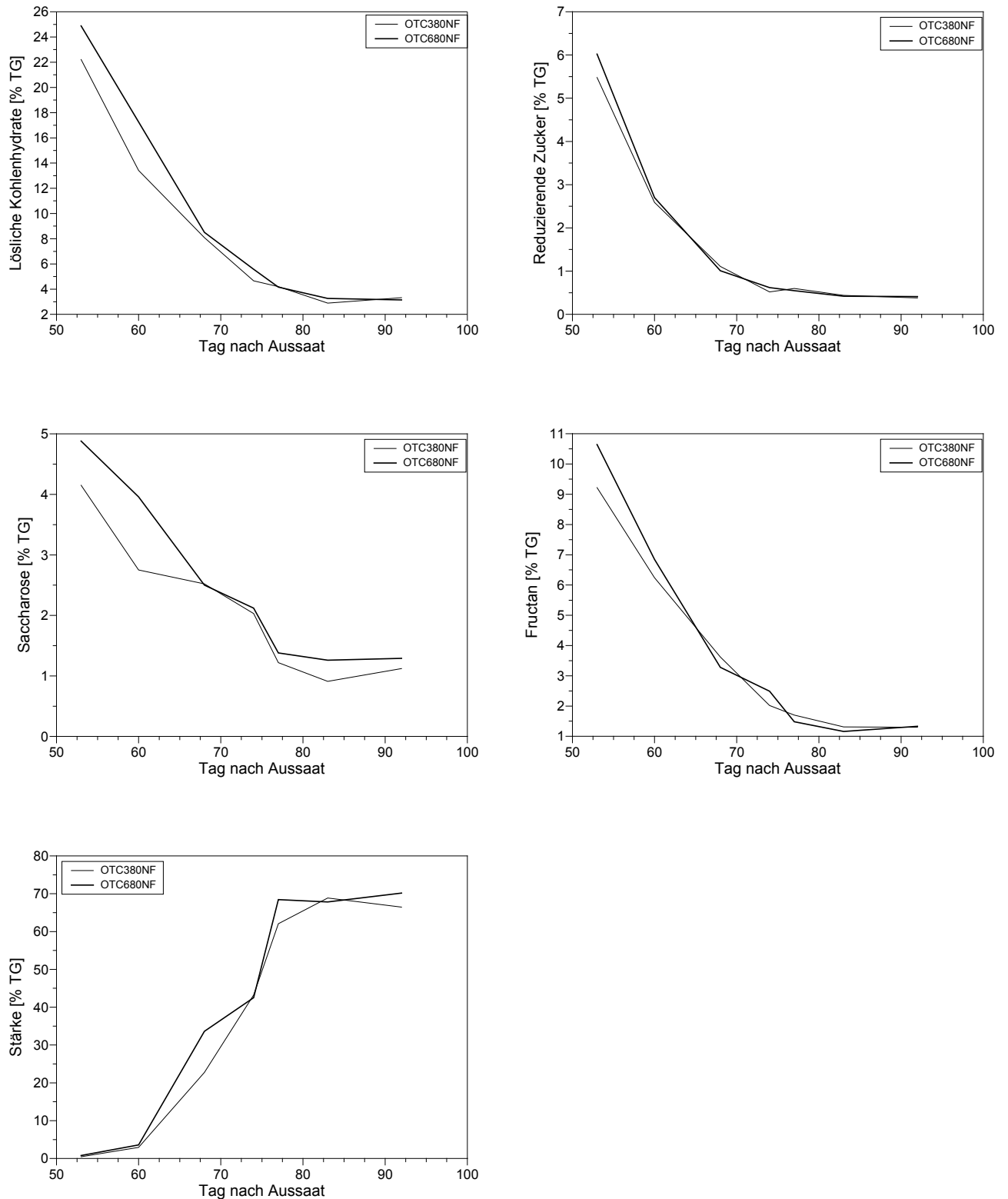


Abbildung 12: Konzentration löslicher Kohlenhydrate, reduzierender Zucker, Saccharose, Fructane und Stärke [% TG] im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1994 bei unterschiedlicher CO₂-Behandlung und 270 kg N ha⁻¹ (Mittelwert).

In den Versuchsjahren 1995 und 1996 ergaben sich nur vereinzelte signifikante Effekte erhöhter CO₂- und Stickstoffkonzentrationen sowie Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate, reduzierender Zucker, Saccharose, Fructane und Stärke in den Körnern während der Kornfüllung.

Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten 1995 am Tag 84 nach Aussaat in den Körnern der Nebenähren unabhängig von der Stickstoffbehandlung eine signifikante Reduktion der Konzentration löslicher Kohlenhydrate. Am Tag 104 nach Aussaat konnte dieser CO₂-Effekt nur in der Stickstoffversorgung mit 150 kg N ha⁻¹ festgestellt werden (Tabelle 15-A). Dagegen war bei einer Stickstoffdüngung von 300 kg N ha⁻¹ die Konzentration der löslichen Kohlenhydrate zu diesem Zeitpunkt in der OTC550NF-Behandlung im Vergleich zur Kontrolle erhöht, wohingegen die CO₂-Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ ebenfalls zu einer Konzentrationsabnahme der löslichen Kohlenhydrate führte. Ein signifikanter Stickstoffeffekt auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate konnte nur am Tag 104 nach Aussaat in den Körnern der Nebenähren festgestellt werden. In der OTC380NF- und OTC680NF-Behandlung führte eine höhere Stickstoffdüngung mit 300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹ zu einer Konzentrationsabnahme löslicher Kohlenhydrate, in der OTC550NF-Behandlung stieg die Konzentration dagegen an. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate konnten 1995 nur am Tag 91 nach Aussaat in den Körnern der Hauptähren und am Tag 104 nach Aussaat in den Körnern der Nebenähren festgestellt werden.

Im Versuchsjahr 1996 ergab sich durch erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Körnern der Hauptähren während der Kornfüllung abgesehen von einigen tendenziellen Effekten mit unterschiedlichem Reaktionsmuster lediglich am Tag 78 nach Aussaat eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff (Tabelle 15-B).

Tabelle 15-A: Konzentration löslicher Kohlenhydrate (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1995 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	PCO ₂	PN	PCO ₂ xN
1995								
Haupt- ähren	77	300	2,260±0,280	2,830±0,770	3,000±0,410	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,990±0,690	3,830±1,490	2,630±0,100			
	81	300	3,610±0,020	3,880±0,680	3,480±0,070	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,200±0,170	3,600±0,360	3,360±0,280			
	84	300	3,100±0,610	2,360±0,340	2,380±0,610	n.s.	(0,055)	n.s.
		150	3,130±0,180	3,460±0,750	3,390±0,390			
	88	300	3,710±0,160	4,260±0,460	3,760±0,270	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,520±0,570	3,790±0,400	3,690±0,020			
	91	300	3,410±0,640	2,100±0,100	1,980±0,190	n.s.	n.s.	0,026
		150	2,360±0,400	3,050±0,430	2,760±0,470			
	97	300	3,390±0,560	3,010±0,090	2,890±0,370	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,440±0,430	3,050±0,510	2,770±0,620			
	104	300	3,450±0,250	3,980±0,470	3,010±0,180	n.s.	n.s.	(0,066)
		150	3,300±0,150	3,330±0,000	3,530±0,370			
Neben- ähren	77	300	4,780±0,330	3,800±0,130	3,920±0,470	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,990±0,250	4,040±0,330	3,850±0,200			
	81	300	3,760±0,030	3,980±0,390	3,310±0,490	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,880±0,770	3,930±0,860	3,420±0,240			
	84	300	3,270±0,280	3,270±0,570	2,760±0,210	0,041	n.s.	n.s.
		150	3,790±0,060	3,030±0,010	2,670±0,490			
	88	300	3,100±0,920	3,760±1,520	3,600±0,430	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,810±0,370	3,430±0,490	2,990±0,290			
	91	300	2,950±0,150	3,490±0,460	2,810±0,540	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,890±0,540	2,810±0,760	3,680±1,640			
	97	300	2,960±0,070	3,270±0,710	2,780±0,070	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,840±0,070	2,620±0,530	2,520±0,080			
	104	300	3,250±0,000	3,400±0,040	2,950±0,000	0,007	0,025	(0,066)
		150	3,780±0,190	3,360±0,260	3,150±0,050			

Tabelle 15-B: Konzentration löslicher Kohlenhydrate (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
1996								
Haupt- ähren	64	300	27,29±0,79	26,49±0,55	21,69±2,42	n.s.	(0,064)	n.s.
		150	23,81±3,15	20,22±4,50	19,68±4,13			
	69	300	27,06±10,01	18,93±3,78	22,99±13,15	n.s.	n.s.	n.s.
		150	18,65±3,89	23,30±4,41	21,68±16,26			
	74	300	6,272±1,534	7,430±0,65	5,699±0,097	n.s.	n.s.	n.s.
		150	7,546±3,006	7,093±1,043	7,053±0,833			
	78	300	5,166±0,229	5,579±0,408	6,780±0,126	n.s.	n.s.	0,033
		150	6,265±0,203	5,439±1,217	4,790±0,717			
	85	300	4,060±0,045	4,584±0,008	4,049±0,222	n.s.	n.s.	n.s.
		150	4,809±1,327	4,790±0,189	4,797±0,435			
	92	300	3,393±0,065	3,210±0,258	3,506±0,175	(0,075)	n.s.	(0,060)
		150	3,107±0,052	3,721±0,228	3,754±0,176			
	96	300	3,491±0,274	3,381±0,023	3,766±0,220	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,144±0,665	3,461±0,190	3,678±0,170			
99	300	3,358±0,080	3,459±0,145	3,559±0,104	n.s.	(0,069)	n.s.	
	150	3,654±0,283	3,716±0,308	3,739±0,082				
Neben- ähren	69	300	37,16±0,77	35,03±9,45	38,25±6,34	n.s.	n.s.	n.s.
		150	30,06±0,00	39,48±0,28	35,81±12,42			
	74	300	15,35±10,42	15,16±2,69	12,56±3,54	n.s.	n.s.	n.s.
		150	15,91±11,37	13,55±3,75	13,66±6,07			
	78	300	13,72±8,00	10,05±3,51	12,00±2,79	n.s.	n.s.	n.s.
		150	9,872±1,476	9,469±1,244	10,46±4,56			
	85	300	4,561±1,024	6,557±2,266	4,971±0,135	n.s.	n.s.	n.s.
		150	4,389±0,404	5,033±0,894	5,247±1,132			
	92	300	3,748±0,097	3,851±0,063	3,644±0,016	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,500±0,689	3,813±0,292	3,921±0,586			
	96	300	3,425±0,101	3,348±0,252	3,407±0,168	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,093±0,585	3,524±0,061	3,544±0,126			
	99	300	3,240±0,266	3,566±0,067	3,478±0,613	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,532±0,717	3,501±0,091	3,305±0,113			

Auf die Konzentration der reduzierenden Zucker in den Körnern der Haupt- und Nebenähren konnten während der Kornfüllung 1995 und 1996 neben einigen tendenziellen Effekten mit unterschiedlichem Reaktionsmuster nur vereinzelte signifikante Effekte erhöhter CO₂- und Stickstoffkonzentrationen sowie Interaktionen von CO₂ und Stickstoff beobachtet werden (Tabelle 16 A-B). 1995 ergaben sich am Tag 84 nach Aussaat für die Körner der Hauptähren und am Tag 88 nach Aussaat für die Körner der Nebenähren signifikante CO₂-Effekte und eine Interaktion von CO₂ und Stickstoff. Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten eine Konzentrationsabnahme der reduzierenden Zucker in der Stickstoffbehandlung mit 150 kg N ha⁻¹, wohingegen in den Körnern der Hauptähren bei 300 kg N ha⁻¹ ein Konzentrationsanstieg der reduzierenden Zucker durch erhöhtes CO₂ beobachtet werden konnte. In den Körnern der Nebenähren war bei 300 kg N ha⁻¹ in der OTC550NF-Behandlung ebenfalls ein Konzentrationsanstieg fest-

zustellen, in der OTC680NF-Behandlung nahm dagegen die Konzentration der reduzierenden Zucker ab. Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bewirkte 1995 am Tag 91 nach Aussaat in der OTC550NF-Behandlung einen signifikanten Anstieg der Konzentration von reduzierenden Zuckern bzw. in der OTC680NF-Behandlung keinen Konzentrationsunterschied in den Körnern der Hauptähren. In den Körnern der Nebenähren konnte dieser Effekt am Tag 88 nach Aussaat beobachtet werden. 1996 wurde als einzige signifikante Reaktion am Tag 85 nach Aussaat eine Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration reduzierender Zucker in den Körnern der Hauptähren festgestellt.

Tabelle 16-A: Konzentration reduzierender Zucker (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1995 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
1995								
Haupt- ähren	77	300	0,500±0,060	0,630±0,060	0,620±0,050	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,670±0,200	0,760±0,090	0,560±0,040			
	81	300	0,360±0,050	0,390±0,040	0,330±0,010	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,320±0,000	0,340±0,010	0,380±0,040			
	84	300	0,570±0,010	0,770±0,030	0,650±0,060	0,046	n.s.	0,021
		150	0,710±0,000	0,660±0,070	0,570±0,060			
	88	300	0,420±0,070	0,420±0,040	0,350±0,030	n.s.	(0,061)	n.s.
		150	0,370±0,000	0,330±0,020	0,340±0,010			
	91	300	0,620±0,010	0,730±0,030	0,530±0,030	(0,061)	0,017	(0,057)
		150	0,560±0,080	0,530±0,000	0,530±0,060			
	97	300	0,630±0,110	0,670±0,090	0,610±0,120	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,670±0,050	0,670±0,090	0,600±0,000			
	104	300	0,360±0,050	0,350±0,050	0,330±0,000	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,330±0,030	0,380±0,000	0,330±0,040			
Neben- ähren	77	300	0,590±0,020	0,590±0,080	0,610±0,120	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,067±0,190	0,570±0,110	0,600±0,150			
	81	300	0,520±0,030	0,440±0,030	0,450±0,050	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,480±0,060	0,460±0,030	0,470±0,020			
	84	300	0,610±0,000	0,640±0,090	0,520±0,040	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,580±0,020	0,630±0,090	0,620±0,130			
	88	300	0,570±0,000	0,750±0,060	0,510±0,020	0,027	0,006	0,006
		150	0,540±0,050	0,490±0,020	0,510±0,050			
	91	300	0,590±0,110	0,740±0,160	0,400±0,120	(0,058)	n.s.	n.s.
		150	0,590±0,150	0,700±0,210	0,420±0,050			
	97	300	0,980±0,350	0,760±0,180	0,680±0,070	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,940±0,130	0,850±0,160	0,860±0,030			
	104	300	0,500±0,030	0,480±0,030	0,410±0,000	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,520±0,050	0,450±0,040	0,500±0,030			

Tabelle 16-B: Konzentration reduzierender Zucker (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
1996								
Haupt- ähren	64	300	3,507±0,153	3,430±0,191	2,745±0,162	n.s.	n.s.	n.s.
		150	3,976±1,745	2,585±0,473	2,668±0,891			
	69	300	4,463±3,237	1,864±0,032	2,258±1,218	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,916±0,806	2,264±0,045	1,994±1,508			
	74	300	0,584±0,008	0,714±0,207	0,634±0,084	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,550±0,263	0,581±0,044	0,585±0,014			
	78	300	0,686±0,008	0,606±0,023	0,826±0,091	(0,081)	n.s.	(0,083)
		150	0,734±0,010	0,580±0,015	0,607±0,142			
	85	300	0,377±0,061	0,548±0,128	0,377±0,020	n.s.	n.s.	0,049
		150	0,578±0,088	0,433±0,041	0,502±0,040			
	92	300	0,447±0,108	0,270±0,028	0,370±0,115	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,420±0,258	0,218±0,028	0,395±0,101			
	96	300	0,334±0,237	0,394±0,006	0,435±0,092	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,418±0,055	0,431±0,035	0,459±0,054			
99	300	0,322±0,127	0,501±0,153	0,482±0,101	n.s.	n.s.	n.s.	
	150	0,487±0,068	0,306±0,187	0,529±0,031				
Neben- ähren	69	300	4,128±0,037	3,753±1,019	4,265±2,627	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,806±0,000	4,720±0,440	4,306±1,786			
	74	300	1,375±0,878	1,616±0,274	1,491±0,478	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,521±0,460	1,349±0,323	1,562±0,715			
	78	300	1,446±0,534	0,924±0,441	1,268±0,122	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,222±0,140	0,877±0,175	1,134±0,589			
	85	300	0,531±0,056	0,764±0,433	0,572±0,184	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,535±0,221	0,391±0,036	0,568±0,053			
	92	300	0,320±0,101	0,399±0,141	0,400±0,112	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,505±0,012	0,381±0,253	0,390±0,086			
	96	300	0,287±0,149	0,409±0,017	0,458±0,025	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,420±0,031	0,415±0,002	0,465±0,044			
	99	300	0,415±0,214	0,442±0,044	0,358±0,142	n.s.	n.s.	(0,070)
		150	0,492±0,173	0,499±0,058	0,515±0,007			

Im Versuchsjahr 1995 konnte für die Saccharosekonzentration in den Körnern der Haupt- und Nebenähren zu keinem der Erntetermine ein signifikanter CO₂- und Stickstoffeffekt oder eine Interaktion von CO₂ und Stickstoff festgestellt werden (Tabelle 17-A). 1996 führte erhöhtes CO₂ in den Körnern der Hauptähren am Tag 64 und am Tag 92 nach Aussaat unabhängig von der Stickstoffbehandlung zu einer signifikanten Abnahme der Saccharosekonzentrationen (Tabelle 17-B). Dieser Effekt wurde 1995 zumindest tendenziell am Tag 104 nach Aussaat in den Nebenähren bestätigt. Eine signifikante Reduktion der Saccharosekonzentration in den Körnern durch eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) konnte in allen CO₂-Behandlungen für die Hauptähren am Tag 50 nach Aussaat und für die Nebenähren am Tag 96 nach Aussaat beobachtet werden. Dagegen ergab sich 1995 am Tag 88 und 1996 am Tag 64 nach Aussaat in den Körnern der Hauptähren in allen CO₂-Stufen ein ten-

denzieller Anstieg der Saccharosekonzentration durch eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹). Eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Saccharosekonzentration konnte am Tag 99 nach Aussaat in den Körnern der Nebenähren festgestellt werden.

Tabelle 17-A: Saccharosekonzentration (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1995 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
1995								
Haupt- ähren	77	300	1,260±0,170	1,370±0,280	1,270±0,070	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,570±0,380	1,120±0,150	1,390±0,110			
	81	300	1,110±0,190	1,470±0,270	1,120±0,100	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,010±0,050	1,120±0,020	1,190±0,020			
	84	300	1,400±0,130	1,420±0,250	1,290±0,150	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,670±0,480	1,320±0,070	1,290±0,040			
	88	300	1,730±0,140	1,930±0,280	1,670±0,030	n.s.	(0,090)	n.s.
		150	1,620±0,170	1,580±0,110	1,580±0,080			
	91	300	1,500±0,230	1,660±0,230	1,450±0,030	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,430±0,070	1,250±0,160	1,460±0,050			
	97	300	1,540±0,100	1,390±0,040	1,290±0,120	n.s.	n.s.	(0,056)
		150	1,190±0,080	1,200±0,230	1,530±0,170			
	104	300	1,660±0,170	1,750±0,480	1,390±0,000	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,380±0,090	1,560±0,140	1,450±0,060			
Neben- ähren	77	300	1,150±0,330	1,150±0,130	1,000±0,040	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,080±0,090	1,150±0,050	1,130±0,080			
	81	300	1,470±0,110	1,420±0,080	1,300±0,080	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,350±0,100	1,350±0,190	1,320±0,040			
	84	300	1,500±0,130	1,550±0,160	1,290±0,080	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,440±0,250	1,400±0,030	1,380±0,020			
	88	300	1,670±0,250	1,670±0,270	1,360±0,000	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,550±0,020	1,560±0,190	1,350±0,010			
	91	300	1,820±0,530	1,780±0,130	1,510±0,280	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,750±0,300	1,800±0,340	1,380±0,080			
	97	300	1,970±0,050	2,240±0,540	1,440±0,200	(0,072)	n.s.	n.s.
		150	2,090±0,140	1,860±0,080	1,570±0,430			
	104	300	1,910±0,090	1,720±0,040	1,550±0,070	(0,053)	n.s.	n.s.
		150	1,680±0,030	1,660±0,160	1,640±0,090			

Tabelle 17-B: Saccharosekonzentration (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)			
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}	
1996									
Haupt- ähren	64	300	13,51±1,39	12,57±1,456	8,548±0,766	0,034	(0,066)	n.s.	
		150	11,13±2,15	9,282±2,860	6,869±2,023				
	69	300	7,005±2,594	5,504±0,850	6,755±4,496	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	4,835±2,697	6,388±0,319	5,862±5,416				
	74	300	2,030±0,522	2,452±0,170	1,863±0,029	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	2,273±1,002	2,372±0,241	1,715±0,086				
	78	300	1,494±0,336	1,364±0,226	1,863±0,110	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	1,358±0,403	1,326±0,329	1,347±0,061				
	85	300	1,461±0,061	1,576±0,150	1,445±0,002	n.s.	0,050	n.s.	
		150	1,751±0,238	1,631±0,067	1,613±0,035				
	92	300	1,506±0,087	1,178±0,012	1,236±0,037	0,035	n.s.	n.s.	
		150	1,436±0,285	1,151±0,023	1,330±0,052				
	96	300	1,328±0,325	1,333±0,010	1,182±0,078	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	1,313±0,107	1,327±0,014	1,454±0,128				
	99	300	1,265±0,057	1,373±0,128	1,343±0,010	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	1,328±0,149	1,248±0,114	1,324±0,107				
	Neben- ähren	69	300	10,95±0,90	10,49±3,24	9,048±1,037	n.s.	n.s.	n.s.
			150	10,93±0,00	10,40±1,58	8,535±0,753			
74		300	3,656±2,632	5,005±1,312	3,483±1,926	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	3,415±2,179	3,678±0,674	4,452±2,096				
78		300	3,481±1,678	2,166±0,726	2,976±1,006	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	2,389±0,066	1,720±0,668	2,624±0,970				
85		300	1,746±0,033	2,071±0,656	1,811±0,079	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	1,777±0,208	1,555±0,138	1,856±0,096				
92		300	1,245±0,043	1,266±0,068	1,419±0,071	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	1,476±0,097	1,273±0,188	1,463±0,010				
96		300	1,222±0,105	1,259±0,035	1,217±0,071	n.s.	0,038	n.s.	
		150	1,250±0,043	1,356±0,036	1,369±0,040				
99	300	1,170±0,055	1,323±0,003	1,147±0,099	n.s.	n.s.	0,004		
	150	1,306±0,030	1,086±0,009	1,281±0,053					

Auf die Fructankonzentration in den Körnern der Haupt- und Nebenähren konnte während der Kornfüllungsphase in den Versuchsjahren 1995 und 1996 neben einigen tendenziellen Effekten mit unterschiedlichem Reaktionsmuster auf erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen nur 1996 ein signifikanter CO₂-Effekt am Tag 74 nach Aussaat beobachtet werden (Tabelle 18 A-B). Unabhängig von der Stickstoffbehandlung führten erhöhte CO₂-Konzentrationen am Tag 74 nach Aussaat zu einem Anstieg der Fructankonzentration in den Körnern der Hauptähren. Signifikante Stickstoffeffekte sowie Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration von Fructan in den Körnern der Haupt- und Nebenähren während der Kornfüllung ergaben sich an keinem der Erntetermine.

Tabelle 18-A: Fructankonzentration (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1995 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
1995								
Haupt- ähren	77	300	0,560±0,050	0,960±0,050	1,510±0,650	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,950±0,320	1,510±0,630	0,750±0,320			
	81	300	1,540±0,030	1,700±0,230	1,550±0,160	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,470±0,100	1,630±0,180	1,530±0,070			
	84	300	1,150±0,070	1,570±0,210	1,130±0,710	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,030±0,240	1,340±0,100	1,250±0,200			
	88	300	2,040±0,660	1,890±0,570	1,430±0,140	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,480±0,240	1,480±0,100	1,420±0,100			
	91	300	1,600±0,060	2,040±0,300	1,730±0,000	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,730±0,040	1,600±0,430	1,740±0,350			
	97	300	1,710±0,220	2,390±0,440	2,980±1,230	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,810±0,430	2,700±0,780	1,760±0,190			
	104	300	1,320±0,380	1,060±0,510	1,080±0,110	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,120±0,150	1,050±0,040	1,410±0,180			
Neben- ähren	77	300	1,760±0,020	1,890±0,310	2,090±0,180	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,150±0,120	1,850±0,320	2,170±0,370			
	81	300	1,600±0,410	1,080±0,030	0,950±0,120	(0,076)	n.s.	n.s.
		150	1,410±0,280	1,060±0,420	1,050±0,050			
	84	300	1,410±0,270	1,380±0,050	1,790±0,530	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,640±0,050	1,460±0,060	1,680±0,750			
	88	300	1,790±0,630	1,240±0,350	2,160±0,930	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,750±0,020	2,070±1,040	1,940±0,910			
	91	300	0,650±0,780	1,080±0,560	0,810±0,170	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,680±0,780	1,160±1,230	1,080±0,270			
	97	300	0,890±0,300	0,370±0,200	0,460±0,050	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,110±0,800	0,390±0,090	0,640±0,620			
	104	300	1,280±0,060	1,470±0,620	0,910±0,330	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,730±0,710	2,220±1,290	0,870±0,170			

Tabelle 18-B: Fructankonzentration (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
1996								
Haupt- ähren	64	300	10,65±0,14	11,92±3,09	10,30±2,94	n.s.	n.s.	n.s.
		150	11,06±1,85	10,53±4,81	10,88±0,923			
	69	300	13,87±4,91	10,76±2,76	11,91±4,81	n.s.	n.s.	n.s.
		150	11,48±2,67	13,26±2,99	12,52±6,41			
	74	300	1,473±0,584	1,568±0,024	2,574±0,068	0,004	(0,051)	n.s.
		150	1,844±0,128	1,919±0,014	3,382±0,658			
	78	300	2,870±0,141	2,960±0,294	2,693±1,356	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,085±0,400	4,734±2,789	2,701±0,095			
	85	300	2,430±1,584	2,693±0,316	1,470±0,100	(0,068)	n.s.	n.s.
		150	2,044±0,089	3,179±0,818	1,211±0,472			
	92	300	1,332±0,074	2,023±0,622	1,621±0,005	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,856±0,920	1,930±0,248	1,530±0,251			
	96	300	1,963±0,405	1,605±0,199	1,403±0,224	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,608±0,305	1,548±0,313	2,059±0,147			
	99	300	0,969±0,250	1,455±0,645	1,108±0,179	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,091±0,307	1,343±0,144	1,083±0,149			
Neben- ähren	69	300	18,46±6,74	16,46±0,81	21,22±3,03	n.s.	n.s.	(0,097)
		150	8,389±0,000	26,95±1,22	20,10±7,60			
	74	300	5,070±1,589	4,913±1,548	5,516±0,273	n.s.	n.s.	n.s.
		150	4,082±0,932	4,721±0,470	4,401±3,340			
	78	300	6,923±6,220	4,163±1,459	4,977±1,522	n.s.	n.s.	n.s.
		150	5,909±1,473	5,242±0,554	3,986±2,121			
	85	300	2,256±0,251	3,574±1,542	2,297±0,434	n.s.	n.s.	n.s.
		150	2,074±0,044	2,721±0,182	2,269±1,243			
	92	300	1,726±0,080	2,019±0,207	1,560±0,028	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,568±0,126	1,696±0,076	1,690±0,501			
	96	300	1,358±0,339	1,252±0,317	1,817±1,415	n.s.	n.s.	n.s.
		150	1,485±0,698	2,828±2,313	1,992±1,213			
	99	300	1,038±0,165	1,068±0,139	1,794±0,849	n.s.	n.s.	n.s.
		150	0,901±0,068	1,423±0,162	1,105±0,080			

Die Stärkekonzentration in den Körnern der Haupt- und Nebenähren wurde 1995 und 1996 durch erhöhte CO₂-Konzentrationen beeinflusst, dieser Effekt war jedoch nicht durchgängig für alle Erntetermine während der Kornfüllung zu beobachten (Tabelle 19 A-B). Im Versuchsjahr 1995 ergaben sich für die Körner der Hauptähren am Tag 81, am Tag 88 und am Tag 104 nach Aussaat und für die Körner der Nebenähren zusätzlich am Tag 91 und am Tag 97 nach Aussaat signifikante CO₂-Effekte auf die Konzentration der Stärke. 1996 konnte am Tag 64 nach Aussaat ebenfalls ein signifikanter CO₂-Effekt auf die Stärkekonzentration der Körner in den Hauptähren festgestellt werden. Erhöhte CO₂-Konzentrationen führten unabhängig von der Stickstoffbehandlung zu einem signifikanten Anstieg der Stärkekonzentration in den Körnern der Haupt- und Nebenähren. Ausnahme war 1995 in der OTC550NF-Behandlung die Reduktion der Stärkekonzentration in den Körnern der Nebenähren am Tag 91 und am Tag 97 nach

Aussaat in der Stickstoffbehandlung mit 300 kg N ha⁻¹ und 1996 in den Körnern der Hauptähren am Tag 85 nach Aussaat in der Behandlung mit 150 kg N ha⁻¹. Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bewirkte 1995 in allen CO₂-Behandlungen eine signifikante Reduktion der Stärkekonzentration in den Körnern am Tag 81, am Tag 88 und am Tag 104 nach Aussaat in den Hauptähren, am Tag 91 nach Aussaat in den Nebenähren und 1996 am Tag 99 nach Aussaat in Haupt- und Nebenähren. Am Tag 97 nach Aussaat im Versuchsjahr 1995 konnte dieser Effekt nur für die OTC550NF- und OTC680NF-Behandlung festgestellt werden, in der OTC380NF-Behandlung stieg die Stärkekonzentration in den Körnern der Nebenähren dagegen durch die höhere Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ an. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Stärkekonzentrationen ergaben sich nur im Versuchsjahr 1995 am Tag 97 nach Aussaat in den Nebenähren.

Tabelle 19-A: Stärkekonzentration (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1995 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
1995								
Haupt- ähren	77	300	64,23±2,82	63,13±4,76	67,89±3,01	n.s.	n.s.	n.s.
		150	65,41±8,33	70,35±3,20	69,38±1,05			
	81	300	56,28±1,70	57,27±1,96	61,66±0,24	0,001	0,001	n.s.
		150	59,36±0,25	62,13±1,10	65,46±0,47			
	84	300	65,39±6,82	68,07±1,70	71,88±3,50	n.s.	n.s.	n.s.
		150	64,71±8,43	72,43±4,72	72,92±0,69			
	88	300	51,42±2,56	51,51±4,01	60,23±2,92	0,015	0,002	n.s.
		150	59,62±0,62	61,07±0,00	63,61±0,48			
	91	300	65,05±3,03	70,82±2,49	70,46±2,95	n.s.	n.s.	n.s.
		150	70,89±6,28	71,06±3,46	74,68±1,46			
	97	300	61,69±5,89	64,39±0,44	68,67±0,67	n.s.	(0,074)	n.s.
		150	67,05±1,87	71,21±2,70	71,59±7,16			
104	300	53,35±3,90	56,97±2,59	61,46±2,51	0,012	0,023	n.s.	
	150	58,06±1,71	61,24±0,05	64,66±0,86				
Neben- ähren	77	300	55,28±8,94	62,30±1,14	61,58±2,91	n.s.	n.s.	n.s.
		150	58,40±3,47	64,08±0,71	67,14±3,80			
	81	300	53,96±5,64	58,76±1,77	67,23±0,53	0,011	n.s.	n.s.
		150	61,16±0,98	61,45±2,48	65,94±2,65			
	84	300	54,70±7,48	55,78±1,18	60,61±4,16	n.s.	(0,093)	n.s.
		150	56,42±6,61	63,75±0,55	67,02±3,45			
	88	300	55,47±2,67	59,52±2,88	64,26±2,89	0,021	n.s.	n.s.
		150	56,29±3,00	61,34±6,16	67,40±2,18			
	91	300	58,03±3,32	56,81±1,73	63,98±2,98	0,017	0,011	n.s.
		150	59,91±1,59	66,20±3,01	68,96±2,46			
	97	300	62,26±3,20	57,97±1,02	67,57±0,62	0,003	0,014	0,012
		150	61,34±2,21	67,55±1,19	69,27±0,13			
104	300	55,54±3,41	62,31±0,63	64,61±5,08	0,027	n.s.	n.s.	
	150	59,55±1,02	63,81±1,85	68,67±5,51				

Tabelle 19-B: Stärkekonzentration (% bezogen auf Trockengewicht) im Korn während der Kornfüllung von Sommerweizen 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung). Tag: Tag nach Aussaat

Organ	Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)			
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}	
1996									
Haupt- ähren	64	300	16,64±1,42	19,08±1,58	28,55±5,55	0,050	n.s.	n.s.	
		150	22,29±7,11	25,33±4,04	32,75±7,46				
		69	300	28,50±9,97	41,80±4,05	39,37±11,58	n.s.	n.s.	n.s.
		150	40,82±6,29	39,18±2,78	42,63±17,10				
		74	300	52,90±2,48	50,73±3,80	58,17±0,68	n.s.	n.s.	n.s.
		150	53,39±7,28	58,91±4,88	55,38±1,66				
		78	300	55,90±2,36	59,28±2,99	55,86±10,36	n.s.	n.s.	n.s.
		150	58,49±3,85	64,04±0,99	53,83±15,33				
		85	300	64,58±0,40	62,55±1,07	66,66±12,77	n.s.	n.s.	n.s.
		150	63,91±1,50	68,33±2,31	67,83±0,42				
		92	300	62,58±0,86	65,92±2,32	66,05±0,06	(0,075)	n.s.	n.s.
		150	62,30±3,19	67,75±5,03	68,56±0,39				
		96	300	64,56±6,03	59,97±9,36	65,50±5,30	n.s.	n.s.	n.s.
		150	54,49±7,52	59,13±5,04	54,81±14,03				
	99	300	52,13±3,60	58,25±7,02	64,97±0,25	n.s.	0,020	n.s.	
	150	67,39±1,58	63,42±4,87	68,24±5,14					
Neben- ähren	69	300	22,58±1,02	21,78±6,64	22,70±10,49	n.s.	n.s.	n.s.	
		150	32,75±0,00	19,19±5,14	22,57±13,91				
		74	300	39,24±2,29	37,52±0,58	39,76±6,44	n.s.	n.s.	n.s.
		150	41,17±8,48	47,12±3,85	44,70±7,90				
		78	300	48,00±6,34	52,76±4,09	55,18±3,97	n.s.	(0,091)	n.s.
		150	55,75±1,49	57,76±2,82	58,71±6,99				
		85	300	58,20±3,56	62,00±5,10	69,59±1,79	0,023	n.s.	n.s.
		150	62,88±0,46	62,43±2,72	66,55±0,17				
		92	300	58,87±7,64	57,74±15,41	65,05±1,60	n.s.	n.s.	n.s.
		150	48,27±14,90	45,23±6,30	68,56±2,60				
		96	300	60,42±8,65	71,82±7,45	64,50±9,82	n.s.	(0,097)	n.s.
		150	54,17±15,01	55,79±0,90	55,87±6,40				
		99	300	62,82±4,19	64,11±5,63	61,95±0,28	n.s.	0,032	n.s.
		150	66,49±2,08	70,15±1,84	68,66±3,57				

3.3.3.2 STÄRKE

Ein signifikanter Anstieg der Stärkekonzentration durch erhöhtes CO₂ wurde unabhängig von der Stickstoffbehandlung 1995 in den Haupt- und Nebenähren und 1997 in den Nebenähren festgestellt (Tabelle 20). In den Körnern der Gesamtähren von Sommerweizen war die Stärkekonzentration dagegen zum Zeitpunkt der Erntereife 1994 unabhängig von der Stickstoffversorgung tendenziell unter erhöhten CO₂-Konzentrationen niedriger. 1995 bis 1997 bewirkte eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) in allen CO₂-Behandlungen mit Ausnahme der Nebenähren im Versuchsjahr 1995 eine signifikant niedrigere Stärkekonzentration in den Körnern. Eine tendenzielle Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Stärkekonzentration konnte nur 1994 für die Körner der Gesamtähren festgestellt werden.

Tabelle 20: Stärkekonzentration in den Körnern von Sommerweizen (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Gesamtähren							
1994	270	68,54±1,72	66,31±0,36	68,43±1,68	(0,090)	n.s.	(0,055)
	150	71,49±3,27	69,58±3,18	63,43±0,54			
Hauptähren							
1995	300	53,35±3,90	56,97±2,59	61,46±2,51	0,012	0,023	n.s.
	150	58,06±1,71	61,24±0,05	64,66±0,86			
1996	300	52,13±3,60	58,25±7,02	64,97±0,25	n.s.	0,02	n.s.
	150	67,39±1,58	63,42±4,87	68,24±5,14			
1997	300	55,54±1,66	-	55,86±0,93	n.s.	0,007	n.s.
	150	59,00±3,78	-	61,19±0,04			
Nebenähren							
1995	300	55,54±3,41	62,31±0,63	64,61±5,08	0,027	n.s.	n.s.
	150	59,55±1,02	63,81±1,85	68,67±5,51			
1996	300	62,82±4,19	64,11±5,63	61,95±0,28	n.s.	0,032	n.s.
	150	66,49±2,08	70,15±1,84	68,66±3,57			
1997	300	54,39±4,05	-	61,54±2,29	0,001	0,041	n.s.
	150	58,15±1,69	-	64,73±0,02			

3.3.3.3 LÖSLICHE KOHLENHYDRATE

Die Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Körnern von Sommerweizen wurde 1994 in den Gesamtähren und 1995 und 1996 in den Haupt- und Nebenähren untersucht (Tabelle 21). Nur 1994 und 1995 konnten signifikante CO₂- und Stickstoffeffekte auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Gesamt- und Nebenähren festgestellt werden. Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten 1994 in den Körnern der Gesamtähren unabhängig von der Stickstoffversorgung einen signifikanten Konzentrationsanstieg der löslichen Kohlenhydrate. 1995

nahm in der Stickstoffbehandlung mit 150 kg N ha⁻¹ die Konzentration der löslichen Kohlenhydrate in den Körnern durch erhöhtes CO₂ ab, in der Stickstoffvariante mit 300 kg N ha⁻¹ bewirkte die Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ einen Anstieg der löslichen Kohlenhydratkonzentration, aus der Behandlung mit 680 µl l⁻¹ CO₂ resultierte dagegen eine Konzentrationsabnahme löslicher Kohlenhydrate.

Eine höhere Stickstoffversorgung (270 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) verursachte 1994 in den Körnern der Gesamtähren in allen CO₂-Behandlungen eine Konzentrationsabnahme löslicher Kohlenhydrate. Dieser Effekt wurde auch 1996 zumindest tendenziell für die Körner der Hauptähren bei einer Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ beobachtet. In den Nebenhähren konnte 1995 ebenfalls ein signifikanter Stickstoffeffekt auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Körnern gefunden werden. Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bewirkte in der OTC380NF- und in der OTC680NF-Behandlung in den Körnern eine Konzentrationsabnahme löslicher Kohlenhydrate, in der OTC550NF-Behandlung dagegen einen Konzentrationsanstieg löslicher Kohlenhydrate. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Körnern der Gesamt-, Haupt- und Nebenhähren von Sommerweizen konnten nicht festgestellt werden.

Tabelle 21: Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Körnern von Sommerweizen (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Gesamtähren							
1994	270	3,090±0,110	3,340±0,130	3,140±0,080	0,039	0,027	n.s.
	150	3,200±0,030	3,400±0,120	3,450±0,080			
Hauptähren							
1995	300	3,450±0,250	3,980±0,470	3,010±0,180	n.s.	n.s.	(0,066)
	150	3,300±0,150	3,330±0,000	3,530±0,370			
1996	300	3,358±0,080	3,459±0,145	3,559±0,104	n.s.	(0,069)	n.s.
	150	3,654±0,283	3,716±0,308	3,739±0,082			
Nebenhähren							
1995	300	3,250±0,000	3,400±0,040	2,950±0,000	0,007	0,025	(0,066)
	150	3,780±0,190	3,360±0,260	3,150±0,050			
1996	300	3,240±0,266	3,566±0,067	3,478±0,613	n.s.	n.s.	n.s.
	150	3,532±0,717	3,501±0,091	3,305±0,113			

3.3.3.4 REDUZIERENDE ZUCKER

Die Konzentration der reduzierenden Zucker in den Körnern der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren zeigte in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 keine signifikante Reaktion auf erhöhtes CO₂ (Tabelle 22). Ein signifikanter Stickstoffeffekt und eine Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration reduzierender Zucker konnte nur 1994 für die Körner der Gesamtähren beobachtet werden. Eine höhere Stickstoffversorgung (270 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) ergab in der OTC380NF- und OTC680NF-Behandlung einen Anstieg, in der OTC550NF-Behandlung dagegen eine Reduktion der Konzentration reduzierender Zucker in den Körnern.

Tabelle 22: Konzentration reduzierender Zucker in den Körnern von Sommerweizen (% bezogen auf Trockengewicht) zur Ernte in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
Gesamtähren							
1994	270	0,410±0,085	0,389±0,017	0,461±0,006	n.s.	0,044	0,027
	150	0,315±0,006	0,457±0,017	0,268±0,083			
Hauptähren							
1995	300	0,360±0,050	0,350±0,050	0,330±0,000	n.s.	n.s.	n.s.
	150	0,330±0,030	0,380±0,000	0,330±0,040			
1996	300	0,322±0,127	0,501±0,153	0,482±0,101	n.s.	n.s.	n.s.
	150	0,487±0,068	0,306±0,187	0,529±0,031			
Nebenähren							
1995	300	0,500±0,030	0,480±0,030	0,410±0,030	n.s.	n.s.	n.s.
	150	0,520±0,050	0,450±0,040	0,500±0,030			
1996	300	0,415±0,214	0,442±0,044	0,358±0,142	n.s.	n.s.	(0,070)
	150	0,492±0,173	0,099±0,058	0,515±0,007			

3.3.3.5 SACCHAROSE

Die Konzentration an Saccharose in den Körnern der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren von Sommerweizen wurde in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 durch erhöhtes CO₂ lediglich tendenziell beeinflusst (Tabelle 23). Während die Saccharosekonzentration 1994 in den Körnern der Gesamtähren in der Stickstoffvariante mit 270 kg N ha⁻¹ durch erhöhtes CO₂ anstieg, war dieser Effekt in der Stickstoffbehandlung mit 150 kg N ha⁻¹ nur in der OTC550NF-Behandlung zu beobachten. In den Körnern der Nebenähren konnte dagegen unabhängig von der Stickstoffversorgung der Pflanzen eine tendenzielle Reduktion der Saccharosekonzentration in den Körnern beobachtet werden. In keinem der Versuchsjahre ergaben sich signifikante Stickstoffeffekte auf die Saccharosekonzentration in den Körnern der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren. Eine

signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration an Saccharose in den Körnern konnte lediglich 1996 für die Nebenähren festgestellt werden.

Tabelle 23: Saccharosekonzentration in den Körnern von Sommerweizen (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Gesamtähren							
1994	270	1,125±0,369	1,668±0,076	1,382±0,154	(0,072)	n.s.	n.s.
	150	1,283±0,099	1,449±0,102	1,253±0,006			
Hauptähren							
1995	300	1,660±0,170	1,750±0,480	1,390±0,000	n.s.	n.s.	n.s.
	150	1,380±0,090	1,560±0,140	1,450±0,060			
1996	300	1,265±0,057	1,373±0,128	1,343±0,010	n.s.	n.s.	n.s.
	150	1,328±0,149	1,248±0,114	1,324±0,107			
Nebenähren							
1995	300	1,910±0,090	1,720±0,040	1,550±0,070	(0,053)	n.s.	n.s.
	150	1,680±0,030	1,660±0,160	1,640±0,090			
1996	300	1,170±0,055	1,323±0,003	1,147±0,099	n.s.	n.s.	0,004
	150	1,306±0,030	1,086±0,009	1,281±0,053			

3.3.3.6 FRUCTANE

Tabelle 24 enthält die Werte für die Fructankonzentration der Körner von Gesamt-, Haupt- und Nebenähren zum Zeitpunkt der Erntereife der Versuchsjahre 1994 bis 1996. In keinem der Versuchsjahre ergaben sich signifikante CO₂-Effekte auf die Fructankonzentration in den Körnern. Eine höhere Stickstoffversorgung (270 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bewirkte 1994 in allen CO₂-Behandlungen signifikant höhere Fructankonzentrationen in den Körnern der Gesamtähren. In keinem der Versuchsjahre konnte eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration an Fructanen der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren festgestellt werden.

Tabelle 24: Fructankonzentration in den Körnern von Sommerweizen (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Gesamtähren							
1994	270	1,658±0,160	1,080±0,115	1,469±0,167	n.s.	0,014	n.s.
	150	0,928±0,231	0,757±0,198	1,043±0,462			
Hauptähren							
1995	300	1,320±0,380	1,060±0,510	1,080±0,110	n.s.	n.s.	n.s.
	150	1,120±0,150	1,050±0,040	1,410±0,180			
1996	300	0,969±0,250	1,455±0,645	1,108±0,179	n.s.	n.s.	n.s.
	150	1,091±0,307	1,343±0,144	1,083±0,149			
Nebenähren							
1995	300	1,280±0,060	1,470±0,620	0,910±0,330	n.s.	n.s.	n.s.
	150	1,730±0,710	2,220±1,290	0,870±0,170			
1996	300	1,038±0,165	1,068±0,139	1,794±0,849	n.s.	n.s.	n.s.
	150	0,901±0,068	1,423±0,162	1,105±0,080			

3.3.3.7 MINERALSTOFFE

Die Konzentrationen verschiedener Mineralstoffe in den Körnern der Gesamtähren wurden zum Zeitpunkt der Erntereife 1994 durch die verschiedenen CO₂- und Stickstoff-Behandlungen sehr ähnlich beeinflusst. Tabelle 25 enthält die Behandlungsmittelwerte für die Mineralstoffkonzentrationen und die Ergebnisse der statistischen Auswertung.

Mit Ausnahme von Mangan (Mn), Aluminium (Al) und Natrium (Na) wurden 1994 alle anderen gemessenen Mineralstoffkonzentrationen in den Körnern von Sommerweizen durch erhöhtes CO₂ signifikant, die Kaliumkonzentration (K) tendenziell beeinflusst. Die Konzentrationen der Mineralstoffe Stickstoff (N), Schwefel (S), Zink (Zn), Phosphor (P), Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Calcium (Ca) und Kalium (K) sanken in den Körnern unter erhöhten CO₂-Konzentrationen unabhängig von der Stickstoffversorgung ab. Während sich bei einem Stickstofflevel von 300 kg N ha⁻¹ für Kohlenstoff (C) ebenfalls eine CO₂-bedingte Konzentrationsabnahme in den Körnern ergab, wurde in der OTC550NF-Behandlung ein Konzentrationsanstieg und in der OTC680NF-Behandlung keine Konzentrationsänderung in den Körnern festgestellt. Signifikante Stickstoffeffekte auf die Mineralstoffkonzentration konnten im Versuchsjahr 1994 bei allen CO₂-Behandlungen für die Konzentrationen an Stickstoff (N), Schwefel (S), Phosphor (P), Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Calcium (Ca) und Kohlenstoff (C) in den Körnern der Gesamtähren festgestellt werden, die Konzentrationen an Zink (Zn), Mangan (Mn), Aluminium (Al), Kalium (K) und Natrium (Na) blieben unbeeinflusst. Eine höhere Stickstoffversorgung (270 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) führte in allen CO₂-Behandlungen zu einem signifikanten Anstieg der Konzentration an Stickstoff (N), Schwefel (S), Eisen (Fe), Calci-

um (Ca) und Kohlenstoff (C) in den Körnern, die Konzentrationen an Phosphor (P) und Magnesium (Mg) wurden dagegen signifikant reduziert. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentrationen der Mineralstoffe konnten nur für Stickstoff (N), Calcium (Ca) und Kohlenstoff (C) beobachtet werden, für Aluminium (Al) ergab sich eine tendenzielle Interaktion. Düngungsbedingte Unterschiede bezüglich der Konzentration von Stickstoff (N), Calcium (Ca) und Kohlenstoff (C) wurden bei der Exposition mit höheren CO₂-Konzentrationen kleiner.

Das C/N-Verhältnis gibt Aufschluss über eine Verschiebung des Kohlenstoff- bzw. des Stickstoffanteils in den Körnern. Im Versuchsjahr 1994 wurde das C/N-Verhältnis der Körner der Gesamtähren von Sommerweizen signifikant durch erhöhte CO₂-Konzentrationen in allen Stickstoffbehandlungen größer, was auf eine vermehrte Einlagerung an Kohlenstoff im Vergleich zu Stickstoff zurückzuführen ist. Eine höhere Stickstoffversorgung der Pflanzen (270 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bewirkte bei allen CO₂-Stufen ein signifikant kleineres C/N-Verhältnis. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf das C/N-Verhältnis in den Körnern ergaben sich nicht.

Tabelle 25: Mineralstoffkonzentration [N und C in %, S, B, Zn, P, Mn, Fe, Mg, Ca, Al, Na und K in ppm bezogen auf Trockengewicht] und C/N-Verhältnis in den Körnern von Sommerweizen zur Ernternte 1994 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Mineralstoff	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
N	270	2,554±0,000	2,147±0,000	1,889±0,01	0,000	0,000	0,001
	150	1,903±0,022	1,734±0,033	1,564±0,000			
S	270	1449±16	1266±26	1154±10	0,000	0,001	n.s.
	150	1240±10	1143±70	1072±47			
Zn	270	34,13±3,08	26,39±2,43	28,09±0,23	0,007	n.s.	n.s.
	150	34,41±1,48	29,93±1,60	30,10±0,25			
P	270	3729±6	3219±213	3689±39	0,002	0,000	n.s.
	150	4266±5	3851±98	3996±38			
Mn	270	26,37±0,99	24,97±3,14	24,64±1,13	n.s.	n.s.	n.s.
	150	27,48±3,92	24,29±0,29	25,40±0,75			
Fe	270	37,15±0,09	26,68±3,19	24,23±0,11	0,001	0,004	n.s.
	150	28,47±2,93	23,24±0,92	21,33±1,49			
Mg	270	1242±8	1078±88	1178±11	0,005	0,001	n.s.
	150	1394±30	1243±19	1340±32			
Ca	270	580,6±0,4	467,6±24,0	406,9±7,8	0,000	0,000	0,001
	150	438,3±14,9	426,5±0,1	382,2±10,4			
Al	270	2,492±0,893	0,892±0,168	1,287±0,156	n.s.	n.s.	(0,065)
	150	0,032±0,000	1,821±1,164	2,840±0,000			
K	270	5609±54	5178±337	5415±211	(0,071)	n.s.	n.s.
	150	5709±6	5424±147	5607±5			
C	270	40,86±0,00	40,81±0,00	40,54±0,00	0,008	0,001	0,012
	150	40,48±0,01	40,50±0,04	40,48±0,06			
Na	270	14,92±1,29	14,07±2,16	13,61±0,90	n.s.	n.s.	n.s.
	150	15,19±0,19	14,27±2,07	13,67±0,29			
C/N	270	16,00±0,00	19,01±0,00	21,46±0,11	0,000	0,000	n.s.
	150	21,28±0,25	23,36±0,41	25,88±0,04			

3.3.3.8 PROTEIN

Zum Zeitpunkt der Erntereife war die Proteinkonzentration in den Körnern der Gesamtähren von Sommerweizen 1994 sowie in den Körnern der Haupt- und Nebensähen 1995 unabhängig von der Stickstoffbehandlung signifikant bzw. 1996 in den Körnern der Haupttähren tendenziell durch CO₂ reduziert (Tabelle 26). Ausnahme in dem einheitlichen Reaktionsmuster auf erhöhtes CO₂ war 1995 in der OTC550NF-Behandlung der Anstieg der Proteinkonzentration in den Körnern der Nebensähen. Eine höhere Stickstoffversorgung (270 bzw. 300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bedingte in allen CO₂-Behandlungen überwiegend signifikant höhere Proteinkonzentrationen in den Körnern der Gesamt-, Haupt- und Nebensähen. Lediglich 1996 war der Stickstoffeffekt auf die Proteinkonzentration in den Körnern der Haupttähren nicht bzw. in den Körnern der Nebensähen nur tendenziell zu beobachten. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Proteinkonzentration ergaben sich 1994 für die Körner der Gesamtähren und 1997 für die Körner der Haupttähren.

Tabelle 26: Proteinkonzentration in den Körnern von Sommerweizen (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Gesamtähren							
1994	270	14,86±0,43	12,12±0,16	10,77±0,06	0,000	0,000	0,001
	150	10,84±0,12	9,884±0,185	8,915±0,000			
1995	300	15,94±1,79	15,85±0,33	11,50±0,62	0,002	0,012	n.s.
	150	14,53±0,44	12,39±0,09	10,97±0,84			
Hauptähren							
1995	300	15,29±2,08	14,62±0,03	10,96±0,00	0,003	0,027	n.s.
	150	14,17±0,80	11,53±0,76	10,34±0,14			
1996	300	12,97±1,97	10,77±0,56	10,23±1,81	(0,067)	n.s.	n.s.
	150	12,26±1,85	9,149±0,282	9,063±1,854			
1997	300	14,70±0,29	-	13,13±0,85	0,000	0,001	0,031
	150	13,87±0,48	-	10,67±0,36			
Nebenähren							
1995	300	16,59±1,50	17,07±0,63	12,04±1,23	0,004	0,018	n.s.
	150	14,89±0,07	13,26±0,57	11,60±1,54			
1996	300	12,45±1,25	10,35±0,28	9,861±1,290	0,009	(0,069)	n.s.
	150	11,77±0,28	8,664±0,403	8,664±1,290			
1997	300	16,23±1,27	-	13,30±0,64	0,000	0,004	n.s.
	150	14,75±0,95	-	10,74±0,20			

3.3.3.9 AMINOSÄUREN

Die Konzentrationen der Aminosäuren Alanin (Ala), Arginin (Arg), Asparagin (Asn), Asparaginsäure (Asp), Glutaminsäure (Glu), Glycin (Gly), Histidin (D-His), Isoleucin (Ile), Leucin (Leu), Phenylalanin (Phe), Prolin (Pro), Serin (Ser), Threonin (Thr) und Valin (Val) wurden nur gering durch erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen beeinflusst. In Tabelle 27 A-B werden die Behandlungsmittelwerte für die verschiedenen Aminosäurekonzentrationen in den Körnern der Haupt- und Nebenähren zum Zeitpunkt der Erntereife und die Ergebnisse der statistischen Auswertung für das Versuchsjahr 1996 gezeigt.

In den Körnern der Hauptähren konnte 1996 kein signifikanter CO₂-Effekt auf die Aminosäurekonzentrationen festgestellt werden. Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) führte nur bei Isoleucin (Ile) zu einer tendenziellen Konzentrationsabnahme in den Körnern der Hauptähren. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Aminosäurekonzentrationen in den Körnern der Hauptähren wurden nicht beobachtet.

In den Körnern der Nebenähren ergaben sich mit Ausnahme von Valin (Val) signifikante CO₂-Effekte auf die Konzentrationen von Alanin (Ala), Arginin (Arg), Asparagin (Asn), Asparaginsäure (Asp), Glutaminsäure (Glu), Glycin (Gly), Isoleucin (Ile), Leucin (Leu), Phenylalanin (Phe), Prolin (Pro), Serin (Ser) und Threonin (Thr) sowie tendenzielle CO₂-Effekte auf die

Konzentration von Histidin (D-His). Unabhängig von der Stickstoffversorgung wurden die Konzentrationen von Alanin (Ala), Asparagin (Asn), Glutaminsäure (Glu), Glycin (Gly), Isoleucin (Ile), Leucin (Leu), Phenylalanin (Phe), Prolin (Pro), Serin (Ser) und Threonin (Thr) durch erhöhtes CO₂ in den Körnern der Nebenähren reduziert. Für Arginin (Arg), Asparaginsäure (Asp) und Histidin (D-His) konnte in der OTC550NF-Behandlung ebenfalls unabhängig von der Stickstoffversorgung eine Konzentrationsabnahme in den Körnern der Nebenähren durch erhöhtes CO₂ festgestellt werden. Die Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ zeigte dagegen bei diesen Aminosäuren eine Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung. Während in der OTC680NF-Behandlung die Konzentrationen von Arginin (Arg), Asparaginsäure (Asp) und Histidin (D-His) bei einer Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ abnahmen, stiegen sie bei einer Stickstoffversorgung mit 150 kg N ha⁻¹ an. Durchschnittlich sanken die Konzentrationen aller Aminosäuren in den Nebenähren in der Stickstoffbehandlung mit 300 kg N ha⁻¹ in der OTC550NF-Behandlung um 28,5 % und in der OTC680NF-Behandlung um 40,9 % im Vergleich zur Kontrolle (OTC380NF) ab. Signifikante Stickstoffeffekte wurden nur in den Körnern der Nebenähren für die Konzentration an Alanin (Ala), Glutaminsäure (Glu), Glycin (Gly), Leucin (Leu), Prolin (Pro) und Threonin (Thr) festgestellt. Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) steigerte in den Nebenähren die Konzentration dieser Aminosäuren um 29,8 bis 58,8 % in der Behandlung mit 380 µl l⁻¹ CO₂ und um 7,1 bis 55,4 % bei 550 µl l⁻¹ CO₂. In der CO₂-Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ wurde in den Körnern der Nebenähren dagegen eine Abnahme der Aminosäurekonzentrationen um 0,4 bis 14,6 % nach zusätzlicher Stickstoffgabe beobachtet. Für Phenylalanin (Phe) konnte dagegen in allen drei CO₂-Behandlungen zumindest eine tendenzielle Konzentrationszunahme durch eine höhere Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ beobachtet werden. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff ergaben sich für die Konzentration von Alanin (Ala), Arginin (Arg), Asparaginsäure (Asp), Glutaminsäure (Glu), Glycin (Gly), Prolin (Pro), Serin (Ser) und Threonin (Thr) in den Körnern der Nebenähren, für die Konzentrationen an Asparagin (Asn) und D-Histidin (D-His) konnten in den Körnern der Nebenähren lediglich tendenzielle Interaktionen von CO₂ und Stickstoff festgestellt werden.

Tabelle 27-A: Aminosäurekonzentration [μmol bezogen auf g Trockengewicht] in den Körnern der Hauptähren von Sommerweizen zur Erntereife 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert \pm Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Hauptähren							
Ala	300	48,11 \pm 8,37	41,48 \pm 11,50	42,76 \pm 0,07	n.s.	n.s.	n.s.
	150	45,26 \pm 3,31	43,36 \pm 2,04	37,70 \pm 5,86			
Arg	300	34,51 \pm 9,34	31,31 \pm 9,97	33,47 \pm 0,94	n.s.	n.s.	n.s.
	150	31,37 \pm 6,09	33,39 \pm 4,03	28,81 \pm 4,70			
Asn	300	6,189 \pm 2,008	6,957 \pm 3,551	7,105 \pm 2,487	n.s.	n.s.	n.s.
	150	9,187 \pm 0,503	9,425 \pm 0,983	6,399 \pm 1,207			
Asp	300	50,85 \pm 11,54	45,03 \pm 14,10	47,66 \pm 1,93	n.s.	n.s.	n.s.
	150	46,65 \pm 7,47	48,66 \pm 4,98	42,35 \pm 7,66			
Glu	300	256,4 \pm 42,7	218,0 \pm 78,4	225,9 \pm 26,0	n.s.	n.s.	n.s.
	150	228,8 \pm 50,5	210,7 \pm 25,2	178,7 \pm 43,4			
Gly	300	58,17 \pm 24,09	56,17 \pm 14,43	57,60 \pm 1,03	n.s.	n.s.	n.s.
	150	62,35 \pm 3,90	56,51 \pm 2,54	48,57 \pm 7,16			
D-His	300	21,33 \pm 0,15	21,83 \pm 3,89	24,34 \pm 1,13	n.s.	n.s.	n.s.
	150	19,82 \pm 5,63	23,02 \pm 8,80	20,08 \pm 2,77			
Ile	300	27,09 \pm 7,33	23,78 \pm 2,62	23,00 \pm 2,48	n.s.	(0,083)	n.s.
	150	21,38 \pm 11,71	14,96 \pm 9,47	10,77 \pm 6,11			
Leu	300	66,90 \pm 17,22	59,56 \pm 13,24	58,13 \pm 4,14	n.s.	n.s.	n.s.
	150	62,03 \pm 13,37	58,07 \pm 0,57	48,18 \pm 7,91			
Phe	300	29,28 \pm 9,13	27,56 \pm 1,53	25,68 \pm 3,14	n.s.	n.s.	n.s.
	150	29,38 \pm 7,80	23,74 \pm 2,62	20,70 \pm 1,60			
Pro	300	109,1 \pm 7,2	150,2 \pm 18,3	138,2 \pm 0,7	n.s.	n.s.	n.s.
	150	129,7 \pm 85,6	114,9 \pm 22,7	154,7 \pm 13,1			
Ser	300	59,69 \pm 12,63	51,48 \pm 17,27	53,07 \pm 3,60	n.s.	n.s.	n.s.
	150	53,17 \pm 8,81	54,28 \pm 6,86	44,41 \pm 9,44			
Thr	300	28,66 \pm 5,07	24,43 \pm 7,22	25,49 \pm 0,54	n.s.	n.s.	n.s.
	150	26,58 \pm 1,98	25,83 \pm 1,92	22,18 \pm 3,43			
Val	300	32,05 \pm 1,64	32,18 \pm 6,51	31,49 \pm 0,33	n.s.	n.s.	n.s.
	150	40,81 \pm 2,31	32,10 \pm 1,82	26,75 \pm 3,91			

Tabelle 27-B: Aminosäurekonzentration [µmol bezogen auf g Trockengewicht] in den Körnern der Nebenähren von Sommerweizen zur Erntereife 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Nebenähren							
Ala	300	56,79±2,44	37,83±2,83	33,38±1,89	0,000	0,038	0,003
	150	43,01±3,01	35,31±1,73	39,09±1,48			
Arg	300	42,26±2,37	27,59±3,68	22,58±2,42	0,010	n.s.	0,019
	150	30,04±4,11	24,12±1,07	30,33±5,52			
Asn	300	9,510±1,180	7,558±0,230	6,005±0,636	0,027	n.s.	(0,067)
	150	7,577±0,000	6,873±0,026	7,092±0,333			
Asp	300	62,08±1,35	40,23±3,81	34,53±2,41	0,003	n.s.	0,006
	150	45,19±3,38	36,47±0,71	45,79±7,34			
Glu	300	297,4±24,2	191,1±22,4	151,2±2,5	0,001	0,009	0,029
	150	203,9±10,9	147,6±6,7	159,0±20,1			
Gly	300	76,38±2,63	51,52±4,71	44,09±4,57	0,000	0,003	0,008
	150	57,15±1,54	45,08±0,46	45,39±0,12			
D-His	300	33,21±8,90	21,39±2,27	17,21±1,71	(0,086)	n.s.	(0,077)
	150	19,97±0,72	19,13±4,09	20,61±1,27			
Ile	300	32,56±5,82	22,26±2,37	17,60±6,14	0,034	n.s.	n.s.
	150	25,43±2,04	12,63±7,72	17,06±5,68			
Leu	300	78,49±6,86	55,22±3,59	48,03±8,14	0,004	0,047	n.s.
	150	61,18±3,36	46,57±2,36	48,52±8,03			
Phe	300	31,27±0,68	25,42±1,84	23,39±3,81	0,013	(0,058)	n.s.
	150	29,54±3,38	19,07±3,05	17,91±5,24			
Pro	300	194,1±14,4	172,8±12,0	111,6±1,7	0,001	0,000	0,002
	150	122,2±1,2	111,2±11,0	112,0±1,2			
Ser	300	70,00±1,22	45,48±3,87	37,94±5,64	0,006	n.s.	0,029
	150	50,52±1,52	39,38±2,05	47,62±11,50			
Thr	300	32,44±0,26	21,84±1,86	18,56±2,16	0,000	0,015	0,004
	150	24,43±0,44	19,65±0,36	20,95±1,45			
Val	300	33,45±11,43	30,00±4,64	26,89±3,88	n.s.	n.s.	n.s.
	150	34,95±1,97	27,48±0,46	26,68±0,62			

Im Versuchsjahr 1996 ergaben sich in den Körnern der Hauptähren keine signifikanten CO₂-Effekte auf den Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein (Tabelle 28 A-B). Lediglich der Anteil an Leucin (Leu) am Gesamtprotein wurde durch erhöhte CO₂-Konzentrationen tendenziell beeinflusst. Während in der OTC680NF-Behandlung der Anteil an Leucin (Leu) am Gesamtprotein unabhängig von der Stickstoffversorgung durch erhöhtes CO₂ abnahm, konnte in der OTC550NF-Behandlung bei einer Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ ebenfalls eine Reduktion, bei einem Stickstofflevel von 150 kg N ha⁻¹ dagegen eine Zunahme des Leucinanteils (Leu) am Gesamtprotein festgestellt werden. Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bewirkte in den Körnern der Hauptähren eine tendenzielle Zunahme des Isoleucinanteils (Ile) am Gesamtprotein. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf den Anteil der verschiedenen Aminosäuren am Gesamtprotein konnten 1996 in den Körnern der Hauptähren nicht festgestellt werden.

Ein signifikanter CO₂-Effekt wurde im Versuchsjahr 1996 in den Körnern der Nebenähren nur für den Anteil an Asparaginsäure (Asp) am Gesamtprotein festgestellt. Bei einer Stickstoffversorgung mit 150 kg N ha⁻¹ bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen eine Zunahme, bei einem Stickstofflevel von 300 kg N ha⁻¹ dagegen eine Abnahme des Asparaginsäureanteils (Asp) am Gesamtprotein. Tendenzuell wurde in den Körnern der Nebenähren unabhängig von der Stickstoffversorgung der Anteil an Prolin (Pro) am Gesamtprotein durch CO₂ erhöht. Darüber hinaus nahm in der Stickstoffbehandlung mit 300 kg N ha⁻¹ in den Körnern der Nebenähren auch bei den essentiellen Aminosäuren Leucin (Leu), Phenylalanin (Phe) und Valin (Val) der prozentuale Anteil am Kornprotein in der OTC680NF-Behandlung zu, dieser Effekt war jedoch unterhalb der statistisch signifikanten Grenze. Alle durch CO₂ induzierten Zunahmen von Leucin (Leu), Phenylalanin (Phe), Prolin (Pro) und Valin (Val) wurden fast ausschließlich über die Abnahme der Glutaminsäure (Glu) kompensiert, deren Anteil am Gesamtprotein unter erhöhtem CO₂ unabhängig von der Stickstoffversorgung tendenziell reduziert wurde.

Signifikante Stickstoffeffekte konnten 1996 bezogen auf das Gesamtprotein in den Körnern der Nebenähren für den Anteil an Alanin (Ala), Asparaginsäure (Asp) und Threonin (Thr) festgestellt werden. Eine höhere Stickstoffversorgung (300 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 150 kg N ha⁻¹) bewirkte eine Anteilsreduktion dieser Aminosäuren am Gesamtprotein um durchschnittlich 4,1 % bei 380 µl l⁻¹ CO₂, 14,0 % bei 550 µl l⁻¹ CO₂ und 10,7 % bei 680 µl l⁻¹ CO₂. Der Anteil an Serin (Ser) am Gesamtprotein wurde durch den höheren Stickstofflevel ebenfalls in allen CO₂-Konzentrationen tendenziell reduziert, der Prolinanteil (Pro) am Gesamtprotein stieg dagegen tendenziell an. Die tendenzielle Reaktion des Argininanteils (Arg) am Gesamtprotein auf eine

höhere Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ zeigte eine Abhängigkeit von der CO₂-Behandlung. Der Anteil an Arginin (Arg) am Gesamtprotein nahm durch die höhere Stickstoffversorgung mit 300 kg N ha⁻¹ in der OTC380NF-Behandlung zu und wurde in der CO₂-Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂ reduziert. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff ergab sich 1996 nur bezüglich des Anteils von Phenylalanin (Phe) am Gesamtprotein, für den Anteil an Asparaginsäure (Asp) war diesbezüglich in den Körnern der Nebenähren nur ein Trend zu beobachten.

Tabelle 28-A: Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein [% Gesamtprotein] in den Körnern der Hauptähren von Sommerweizen zur Erntereife 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Hauptähren							
Ala	300	4,080±0,397	3,666±0,063	3,764±0,196	n.s.	n.s.	n.s.
	150	4,027±0,746	4,055±0,186	3,846±0,007			
Arg	300	5,646±0,010	5,380±0,324	5,765±0,451	n.s.	n.s.	n.s.
	150	5,371±0,345	6,083±0,171	5,744±0,055			
Asn	300	0,832±0,473	0,883±0,236	0,936±0,371	n.s.	n.s.	n.s.
	150	1,215±0,247	1,316±0,258	0,994±0,335			
Asp	300	6,395±0,277	5,915±0,324	6,274±0,570	n.s.	n.s.	n.s.
	150	6,130±0,604	6,780±0,065	6,442±0,178			
Glu	300	35,94±3,77	31,45±3,28	32,73±2,12	n.s.	n.s.	n.s.
	150	32,96±1,22	32,42±0,88	29,90±2,72			
Gly	300	4,020±0,618	4,193±0,016	4,270±0,139	n.s.	n.s.	n.s.
	150	4,681±0,916	4,452±0,213	4,178±0,027			
D-His	300	3,230±0,891	3,405±0,288	3,728±0,015	n.s.	n.s.	n.s.
	150	2,987±0,086	3,692±1,088	3,574±0,058			
Ile	300	3,338±0,006	3,165±0,483	2,973±0,172	n.s.	(0,094)	n.s.
	150	2,629±0,823	2,125±1,499	1,709±1,181			
Leu	300	8,253±0,100	7,802±0,308	7,516±0,157	(0,052)	n.s.	n.s.
	150	7,971±0,338	8,003±0,665	7,228±0,076			
Phe	300	4,517±0,202	4,650±0,960	4,179±0,301	n.s.	n.s.	n.s.
	150	4,726±0,043	4,147±0,839	3,940±0,304			
Pro	300	11,15±4,83	17,51±2,47	15,72±0,87	n.s.	n.s.	n.s.
	150	13,77±6,07	13,79±1,46	20,51±1,42			
Ser	300	5,941±0,352	5,324±0,417	5,502±0,096	n.s.	n.s.	n.s.
	150	5,513±0,512	5,965±0,201	5,321±0,318			
Thr	300	3,248±0,306	2,879±0,104	2,997±0,088	n.s.	n.s.	n.s.
	150	3,161±0,582	3,225±0,059	3,025±0,003			
Val	300	3,410±0,892	3,778±0,227	3,646±0,146	n.s.	n.s.	n.s.
	150	4,856±1,510	3,946±0,143	3,593±0,028			

Tabelle 28-B: Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein [% Gesamtprotein] in den Körnern der Nebenähren von Sommerweizen zur Erntereife 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Nebenähren							
Ala	300	3,783±0,030	3,546±0,079	3,967±0,219	n.s.	0,050	n.s.
	150	4,007±0,231	4,216±0,126	4,341±0,0,641			
Arg	300	5,518±0,589	5,049±0,409	5,233±0,023	n.s.	(0,068)	n.s.
	150	5,470±0,681	5,637±0,357	6,507±0,472			
Asn	300	0,943±0,164	1,052±0,023	1,055±0,06	n.s.	n.s.	n.s.
	150	1,056±0,000	1,218±0,019	1,169±0,183			
Asp	300	6,187±0,449	5,632±0,237	6,126±0,256	0,037	0,005	(0,077)
	150	6,289±0,392	6,507±0,003	7,516±0,380			
Glu	300	32,68±1,00	29,55±1,91	29,50±1,63	(0,057)	n.s.	n.s.
	150	31,37±1,29	29,12±1,87	28,90±0,48			
Gly	300	4,286±0,070	4,066±0,158	4,402±0,035	n.s.	n.s.	n.s.
	150	4,487±0,065	4,535±0,040	4,238±0,456			
D-His	300	3,831±0,838	3,509±0,556	3,593±0,754	n.s.	n.s.	n.s.
	150	3,243±0,157	3,972±0,776	3,965±0,193			
Ile	300	3,183±0,409	3,071±0,166	3,030±0,735	n.s.	n.s.	n.s.
	150	3,492±0,324	2,209±1,317	2,733±0,620			
Leu	300	7,690±0,281	7,625±0,094	8,353±0,490	n.s.	n.s.	n.s.
	150	8,400±0,565	8,197±0,572	7,848±0,438			
Phe	300	3,859±0,112	4,436±0,553	5,125±0,265	n.s.	n.s.	0,034
	150	5,110±0,648	4,230±0,756	3,622±0,672			
Pro	300	16,69±0,39	21,01±2,56	17,20±2,17	(0,070)	(0,054)	n.s.
	150	14,72±0,04	17,15±1,36	16,05±1,94			
Ser	300	5,500±0,184	5,028±0,163	5,292±0,198	n.s.	(0,067)	n.s.
	150	5,553±0,098	5,547±0,183	6,143±0,818			
Thr	300	2,893±0,170	2,737±0,089	2,939±0,015	n.s.	0,005	n.s.
	150	3,044±0,017	3,137±0,002	3,093±0,127			
Val	300	2,959±1,151	3,692±0,379	4,183±0,139	n.s.	n.s.	n.s.
	150	4,287±0,294	4,320±0,154	3,886±0,339			

3.4 Sommergerste

3.4.1 OBERIRDISCHE BIOMASSE, ERTRAG, HARVEST-INDEX UND ERTRAGSPARAMETER

3.4.1.1 OBERIRDISCHE BIOMASSE

In den Versuchsjahren 1995 bis 1997 wurde der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung auf die oberirdische Biomasse von Sommergerste untersucht (Tabelle 29). Eine erhöhte Konzentration von 680 µl l⁻¹ CO₂ bewirkte im Vergleich zur Kontrolle nur im Versuchsjahr 1997 eine signifikante Förderung der oberirdischen Biomasse um 30,3 % in der Stickstoffbehandlung mit 80 kg N ha⁻¹ und um 44,6 % in der Stickstoffbehandlung mit 140 kg N ha⁻¹. In den Versuchsjahren 1995 und 1996 konnte zumindest ein tendenzieller CO₂-Effekt auf die oberirdische Biomasse festgestellt werden. In beiden Jahren konnte in der Stickstoffvariante mit 140 kg N ha⁻¹ ein Anstieg der oberirdischen Biomasse in allen CO₂-Behandlungen beobachtet werden. Dagegen kam es bei einer Stickstoffversorgung mit 80 kg N ha⁻¹ in der OTC550NF-Behandlung zu einer Reduktion der oberirdischen Biomasse, in der OTC680NF-Behandlung stieg die oberirdische Biomasse durch erhöhtes CO₂ an. Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) führte in den Versuchsjahren 1995 und 1997 in allen CO₂-Behandlungen zu einem signifikanten Anstieg der oberirdischen Biomasse um durchschnittlich 6,1 % (OTC380NF), 22,1 % (OTC550NF) und 22,6 % (OTC680NF). Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die oberirdische Biomasse konnten lediglich 1997 beobachtet werden.

Tabelle 29: Oberirdische Biomasse von Sommergerste (Trockengewicht [g] bezogen auf m²) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1995 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
1995	140	1055±179	1206±89	1429±197	(0,092)	0,046	n.s.
	80	996,3±29,7	988,0±154,2	1122±73			
1996	140	554,6±203,0	616,0±18,4	737,4±101,0	(0,096)	n.s.	n.s.
	80	483,2±165,4	471,8±27,0	700,0±9,2			
1997	140	666,7±62,99	-	963,9±18,8	0,000	0,001	0,022
	80	627,4±15,8	-	817,6±33,1			

3.4.1.2 ERTRAG

In den Versuchsjahren 1996 und 1997 wurde der Gesamtertrag von Sommergerste signifikant durch erhöhte CO₂-Konzentrationen beeinflusst (Tabelle 30). In beiden Versuchsjahren stieg der Ertrag durch erhöhtes CO₂ in der OTC680NF-Behandlung bei einer Stickstoffversorgung mit 80 und 140 kg N ha⁻¹ um durchschnittlich 26,0 % und 38,3 % im Vergleich zur Kontrolle an. 1996 wurde dagegen in der OTC550NF-Behandlung bei einer Stickstoffversorgung mit 80 kg N ha⁻¹ eine Ertragsabnahme um 25,1 % und in der Stickstoffvariante mit 140 kg N ha⁻¹ eine Ertragszunahme um 12,1 % durch erhöhtes CO₂ festgestellt. Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) führte in den Versuchsjahren 1995 und 1996 in allen CO₂-Behandlungen zu einem tendenziellen Anstieg des Gesamtertrags, 1997 konnte ein signifikanter stickstoffbedingter Ertragsanstieg um 4,6 % in der OTC380NF-Behandlung und um 20,7 % in der OTC680NF-Behandlung festgestellt werden. Bezogen auf den Gesamtertrag von Sommergerste ergab sich nur im Versuchsjahr 1995 eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff. In keinem der Versuchsjahre konnten signifikante Effekte durch erhöhte CO₂-Konzentrationen sowie Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf den Ertrag der Hauptähren festgestellt werden. Nur im Versuchsjahr 1995 resultierte aus der höheren Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) in allen CO₂-Behandlungen eine tendenzielle Ertragsförderung der Hauptähren. Hauptverantwortlich für die überwiegend positive Antwort des Gesamtertrags von Sommergerste auf CO₂ und Stickstoff war der Effekt auf die Nebenähren. In den Versuchsjahren 1996 und 1997 reagierte der Ertrag der Nebenähren von Sommergerste mit einer vergleichbaren Ertragsantwort auf erhöhte CO₂-Konzentrationen wie die Hauptähren. 1996 konnte in der OTC550NF-Behandlung bei einer Stickstoffbehandlung mit 80 kg N ha⁻¹ eine Ertragsreduktion der Nebenähren um 19,4 % durch erhöhtes CO₂ festgestellt werden, in der Stickstoffvariante mit 140 kg N ha⁻¹ stieg der Ertrag dagegen um 41,9 % an. Erhöhte CO₂-Konzentrationen von 680 µl l⁻¹ CO₂ bewirkten dagegen in den Versuchsjahren 1996 und 1997 in beiden Stickstoffvarianten einen Ertragsanstieg um durchschnittlich 84,9 % bei 80 kg N ha⁻¹ und um 101,0 % bei 140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zur Kontrolle. Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) bewirkte in diesen beiden Versuchsjahren in allen CO₂-Behandlungen eine positive Ertragsantwort der Nebenähren. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf den Ertrag der Nebenähren konnten nur 1997 festgestellt werden.

Tabelle 30: Ertrag von Sommergerste (Trockengewicht [g] bezogen auf m²) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
Gesamtähren							
1995	140	381,6±60,5	392,6±16,3	408,7±48,5	n.s.	(0,080)	n.s.
	80	354,8±11,1	336,7±63,3	379,4±27,1			
1996	140	353,5±62,7	396,2±5,9	454,6±18,1	0,024	(0,052)	n.s.
	80	341,3±70,9	255,7±45,0	422,3±17,5			
1997	140	355,0±6,9	-	525,7±6,9	0,000	0,002	0,013
	80	339,5±5,2	-	435,5±22,1			
Hauptähren							
1995	140	193,1±2,4	198,3±3,4	198,8±3,1	n.s.	(0,078)	n.s.
	80	186,8±17,6	183,4±13,0	184,7±6,8			
1996	140	165,3±17,9	129,1±1,2	158,3±23,9	n.s.	n.s.	n.s.
	80	171,4±6,8	116,5±3,8	138,1±52,3			
1997	140	237,1±5,7	-	235,8±8,5	n.s.	n.s.	n.s.
	140	237,3±4,1	-	221,9±12,2			
Nebenähren							
1995	140	188,5±58,2	194,3±12,9	253,1±42,7	n.s.	n.s.	n.s.
	80	168,0±28,7	153,3±50,3	194,7±20,3			
1996	140	188,2±44,8	267,1±4,7	293,6±38,1	0,029	0,060	n.s.
	80	169,9±64,1	137,0±51,9	273,4±19,5			
1997	140	117,9±33,8	-	290,0±12,0	0,000	0,004	0,032
	140	102,2±3,0	-	213,5±18,8			

3.4.1.3 HARVEST-INDEX

In den Versuchsjahren 1996 und 1997 ergaben sich keine signifikanten Hinweise auf eine unterschiedliche Förderung des Kornertrags im Vergleich zur Förderung der oberirdischen Biomasse durch erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen (Tabelle 31). Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf den Harvest-Index konnten nicht festgestellt werden.

Tabelle 31: Harvest-Index von Sommergerste zur Erntereife in den Versuchsjahren 1996 und 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
1996	140	0,637±0,250	0,643±0,060	0,616±0,232	n.s.	n.s.	n.s.
	80	0,706±0,199	0,542±0,135	0,603±0,028			
1997	140	0,532±0,012	-	0,546±0,005	n.s.	n.s.	n.s.
	80	0,541±0,006	-	0,533±0,015			

3.4.1.4 ERTRAGSPARAMETER

Anzahl der Ähren

Sommergerste bildete in den Versuchsjahren 1995 und 1997 unabhängig von der Stickstoffversorgung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen signifikant mehr Ähren aus, dieser CO₂-Effekt war für das Versuchsjahr 1996 zumindest als Trend vorhanden (Tabelle 32). Die Ährenzahl wurde in den Jahren 1995 und 1997 auch durch eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) signifikant gefördert. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Anzahl der Ähren ergab sich in keinem der Versuchsjahre.

Tabelle 32: Anzahl gebildeter Ähren bei Sommergerste (bezogen auf m²) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1995 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
1995	140	360,0±57,0	445,0±63,6	505,0±7,1	0,012	0,034	n.s.
	80	335,0±35,4	365,0±7,1	430,0±0,0			
1996	140	385,0±82,5	501,7±16,5	501,7±82,5	(0,085)	n.s.	n.s.
	80	350,0±33,0	373,3±33,0	490,0±99,0			
1997	140	338,1±31,0	-	500,3±23,4	0,000	0,010	n.s.
	80	307,6±12,2	-	429,3±32,6			

Anzahl der Körner

Die bei Sommergerste beobachtete Ertragssteigerung war in starkem Maße auf die durch CO₂ gesteigerte Anzahl der Körner zurückzuführen (Tabelle 33). Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten in den Versuchsjahren 1996 und 1997 einen signifikanten Effekt auf die Kornzahlen der Gesamtähren. 1996 konnte unter erhöhten CO₂-Konzentrationen von 550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂ in beiden Stickstoffbehandlungen eine signifikante Abnahme der Kornzahlen in den Hauptähren beobachtet werden. Im Versuchsjahr 1997 war dagegen in der OTC680NF-Behandlung im Vergleich zur OTC380NF-Behandlung ein signifikanter Anstieg der in den Hauptähren gebildeten Kornzahl durch erhöhtes CO₂ festzustellen.

In der Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ wurde die Zahl der in den Nebenähren gebildeten Körner 1995 tendenziell, sowie 1996 und 1997 signifikant, im Vergleich zur Kontrolle mit 380 µl l⁻¹ CO₂ gefördert. Im Gegensatz dazu sank 1995 und 1996 die Kornzahl der Nebenähren in der OTC550NF-Behandlung durch erhöhtes CO₂ bei einer Stickstoffversorgung mit 80 kg N ha⁻¹ im Vergleich zur OTC380NF-Behandlung ab, während sie in der Stickstoffvariante mit 140 kg N ha⁻¹ anstieg. Die gebildete Anzahl der Körner in den Ähren der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren zeigte in allen CO₂-Behandlungen eine positive Abhängigkeit von der

Stickstoffversorgung. Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha^{-1} im Vergleich zu 80 kg N ha^{-1}) ergab bei den Gesamt-, Haupt- und Nebenähren eine Zunahme der Kornzahlen. Dieser positive Effekt war jedoch nur 1995 für die Nebenähren und 1997 für die Gesamt- und Nebenähren signifikant. 1996 konnte für die Anzahl der Körner in den Nebenähren eine tendenzielle Abhängigkeit von der Stickstoffbehandlung festgestellt werden. Eine signifikante Interaktion von CO_2 und Stickstoff auf die Anzahl der Körner in den Gesamt- und Nebenähren wurde nur 1997 beobachtet.

Tabelle 33: Anzahl der gebildeten Körner bei Sommergerste (bezogen auf m^2) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO_2 - und N-Behandlung (Mittelwert \pm Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P_{CO_2}	P_{N}	$P_{\text{CO}_2 \times \text{N}}$
Gesamtähren							
1996	140	6475 \pm 1072	7817 \pm 198	8458 \pm 874	0,034	n.s.	n.s.
	80	6148 \pm 874	5343 \pm 792	8260 \pm 1188			
1997	140	6557 \pm 744	-	10230 \pm 88	0,000	0,006	0,028
	80	6318 \pm 149	-	8780 \pm 166			
Hauptähren							
1995	140	4210 \pm 42	4357 \pm 141	4305 \pm 73	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4135 \pm 370	4268 \pm 125	4028 \pm 49			
1996	140	2882 \pm 49	2240 \pm 33	2543 \pm 363	0,002	n.s.	n.s.
	80	2812 \pm 82	2042 \pm 16	2765 \pm 82			
1997	140	4027 \pm 79	-	4213 \pm 133	0,012	n.s.	n.s.
	80	4021 \pm 39	-	4191 \pm 104			
Nebenähren							
1995	140	4750 \pm 1174	5640 \pm 1032	6992 \pm 653	(0,056)	0,038	n.s.
	80	4557 \pm 254	4080 \pm 585	5337 \pm 222			
1996	140	3593 \pm 1023	5577 \pm 231	5822 \pm 1105	0,042	(0,079)	n.s.
	80	3337 \pm 792	3220 \pm 891	5238 \pm 907			
1997	140	2530 \pm 696	-	6016 \pm 91	0,000	0,005	0,024
	80	2298 \pm 131	-	4589 \pm 224			

Kornzahl pro Ähre

Der CO_2 -Effekt auf die Kornzahl pro Ähre war in den beiden Versuchsjahren sehr heterogen (Tabelle 34). Während die Anzahl der Körner pro Gesamt- und Hauptähre 1996 unabhängig von der Stickstoffversorgung durch erhöhte CO_2 -Konzentrationen abnahm, konnte im Versuchsjahr 1997 eine signifikante Zunahme der Kornzahl pro Haupt- und Nebenähre beobachtet werden. Signifikante Effekte von Stickstoff sowie Interaktionen von CO_2 und Stickstoff auf die Anzahl der Körner pro Gesamt-, Haupt- und Nebenähre wurden 1996 und 1997 nicht festgestellt.

Tabelle 34: Kornzahl pro Ähre bei Sommergerste zur Erntereife in den Versuchsjahren 1996 und 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Gesamtähren							
1996	140	17,06±1,20	15,62±1,01	17,00±0,95	0,013	n.s.	n.s.
	80	17,66±0,56	14,28±0,51	17,28±0,63			
1997	140	19,37±0,54	-	20,48±1,07	n.s.	n.s.	n.s.
	80	20,55±0,60	-	20,51±1,17			
Hauptähren							
1996	140	20,58±0,35	16,00±0,24	18,17±2,59	0,002	n.s.	n.s.
	80	20,08±0,59	14,58±0,12	19,75±0,59			
1997	140	23,36±0,46	-	24,44±0,77	0,012	n.s.	n.s.
	80	23,32±0,23	-	24,31±0,60			
Nebenähren							
1996	140	14,70±0,94	15,47±1,45	16,30±0,35	n.s.	n.s.	n.s.
	80	16,22±0,67	13,74±1,04	15,68±1,15			
1997	140	15,12±1,55	-	18,40±1,10	0,019	n.s.	n.s.
	80	17,04±0,89	-	17,97±1,32			

Tausendkorngewicht

Signifikante CO₂-Effekte auf das Tausendkorngewicht (TKG) konnten lediglich im Versuchsjahr 1997 für die Gesamt- und Hauptähren festgestellt werden (Tabelle 35). In beiden Ährenfraktionen wurde unabhängig von der Stickstoffversorgung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen eine signifikante Abnahme des Tausendkorngewichts verzeichnet. Der beobachtete tendenzielle CO₂-Effekt auf das Tausendkorngewicht der Körner der Nebenähren im Versuchsjahr 1996 war dagegen uneinheitlich. Während das Tausendkorngewicht in beiden Stickstoffbehandlungen in der Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ im Vergleich zur Behandlung mit 360 µl l⁻¹ CO₂ abnahm, war in der Behandlung mit 680 µl l⁻¹ CO₂ eine Zunahme des Tausendkorngewichts zu beobachten. In keinem der Versuchsjahre konnten signifikante Stickstoffeffekte sowie Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf das Tausendkorngewicht der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren festgestellt werden.

Tabelle 35: Tausendkorngewicht (g) von Sommergerste zur Erntereife in den Versuchsjahren 1995 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
Gesamtähren							
1996	140	54,33±1,53	50,94±0,62	53,72±3,10	n.s.	n.s.	n.s.
	80	55,70±3,24	47,39±1,01	52,44±8,93			
1997	140	54,22±1,19	-	51,39±0,35	0,003	n.s.	n.s.
	80	53,73±0,52	-	49,61±2,57			
Hauptähren							
1995	140	45,87±1,02	45,53±0,71	46,19±1,50	n.s.	n.s.	n.s.
	80	45,16±0,21	42,95±1,79	45,85±1,13			
1996	140	57,24±5,13	57,72±1,26	62,23±0,51	n.s.	n.s.	n.s.
	80	61,04±0,75	56,89±2,46	55,88±8,59			
1997	140	58,88±1,04	-	55,95±1,04	0,005	n.s.	n.s.
	80	59,03±1,05	-	52,99±3,59			
Nebenähren							
1995	140	39,37±2,52	34,82±4,09	36,07±2,74	n.s.	n.s.	n.s.
	80	36,75±4,25	37,07±7,01	36,43±2,30			
1996	140	50,12±2,58	48,32±1,16	50,35±2,46	(0,077)	n.s.	n.s.
	80	51,28±5,75	40,94±4,18	53,41±5,00			
1997	140	46,48±0,82	-	48,19±1,35	n.s.	n.s.	n.s.
	80	44,55±2,75	-	46,49±2,18			

3.4.2 ALLGEMEINE ERTRAGSQUALITÄT

3.4.2.1 ANTEIL DER KORNGRÖßEN AM GESAMTKORN

Bei den Körnern der Hauptähren bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen in beiden Stickstoff-behandlungen eine Verschiebung der Korngröße hin zu kleineren Körnern (Tabelle 36). Während in den Hauptähren unabhängig von der Stickstoffversorgung der Anteil der Körner mit einer Größe bis 3,0 mm signifikant durch erhöhtes CO₂ zunahm, wurde der Anteil der Körner in der Größensortierung über 3,0 mm reduziert. Auch in den Nebenähren konnte eine Reduktion der Korngrößen durch die Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ im Vergleich zur Kontrollbehandlung mit 380 µl l⁻¹ CO₂ beobachtet werden. Allerdings war dieser Effekt nur bezogen auf die Zunahme der Korngrößen in der Sortierung 2,8 bis 3,0 mm und auf die Abnahme der Körner größer 3,0 mm signifikant. Eine signifikante Zunahme der Korngröße durch erhöhte Stickstoffgaben (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) ergab sich nur bei den Körnern der Nebenähren in der Sortierung größer 3,3 mm. In dieser Fraktion wurde ebenfalls eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff beobachtet.

Tabelle 36: Größensortierung der Körner von Sommergerste (% bezogen auf Gesamtkorn) zur Erntereife 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Organ	Sortierung	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)			
			OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}	
Haupt- ähren	< 2,5 mm	140	0,374±0,174	-	1,370±0,149	0,000	n.s.	n.s.	
		80	0,350±0,015	-	1,429±0,420				
	2,5-2,8 mm	140	1,800±0,764	-	7,781±4,801	0,008	n.s.	n.s.	
		80	2,003±0,681	-	9,764±4,608				
	2,8-3,0 mm	140	25,78±4,37	-	54,51±3,84	0,000	n.s.	n.s.	
		80	29,87±9,62	-	61,01±4,51				
	3,0-3,3 mm	140	61,63±2,66	-	33,54±5,49	0,000	n.s.	n.s.	
		80	59,40±7,65	-	26,14±7,66				
	> 3,3 mm	140	10,42±3,02	-	2,792±1,549	0,000	n.s.	n.s.	
		80	8,382±2,793	-	1,660±0,288				
	Neben- ähren	< 2,5 mm	140	2,808±1,120	-	5,466±0,287	n.s.	n.s.	n.s.
			80	5,093±2,337	-	4,744±1,902			
2,5-2,8 mm		140	13,40±5,88	-	16,50±2,49	n.s.	n.s.	n.s.	
		80	19,73±6,12	-	19,20±9,55				
2,8-3,0 mm		140	39,62±3,41	-	49,82±1,38	0,000	n.s.	n.s.	
		80	42,03±2,16	-	52,57±3,90				
3,0-3,3 mm		140	38,12±8,82	-	26,77±1,63	0,046	n.s.	n.s.	
		80	30,60±8,58	-	22,22±7,45				
> 3,3 mm		140	6,043±0,488	-	1,448±0,857	0,000	0,001	0,001	
		80	2,549±0,632	-	1,263±0,314				

3.4.2.2 KEIMFÄHIGKEIT

Im Versuchsjahr 1995 wurde der Einfluss von CO₂ in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung auf die Keimfähigkeit von Sommergerste untersucht (Tabelle 37). Signifikante Effekte erhöhter CO₂-Konzentrationen konnten bei keiner der beiden Stickstoffbehandlungen auf die Keimung der Körner von Sommergerste festgestellt werden. Das Keimverhalten wurde auch in keiner der CO₂-Behandlungen durch eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) beeinflusst. Bezüglich der Keimfähigkeit konnte keine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff beobachtet werden.

Tabelle 37: Keimfähigkeit (%) von Sommergerste (Mischprobe aus Körnern der Haupt- und Nebenähren) zur Erntereife 1995 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Tag	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
0	140	0,000±0,000	0,000±0,000	0,000±0,000	-	-	-
	80	0,000±0,000	0,000±0,000	0,000±0,000			
1	140	16,50±7,78	12,00±12,73	30,00±5,66	n.s.	n.s.	n.s.
	80	20,50±4,95	17,00±11,31	25,50±24,75			
2	140	83,00±7,07	58,50±23,33	80,50±0,71	n.s.	n.s.	n.s.
	80	77,00±11,31	75,00±2,83	72,50±19,09			
3	140	95,00±2,83	69,50±23,23	98,00±0,00	n.s.	n.s.	n.s.
	80	97,50±0,71	96,50±2,12	87,50±14,85			
4	140	99,50±0,71	72,50±31,82	98,00±0,00	n.s.	n.s.	n.s.
	80	100,0±0,0	98,50±0,71	93,50±9,19			
5	140	100,0±0,0	74,00±33,94	99,00±1,41	n.s.	n.s.	n.s.
	80	100,0±0,0	99,50±0,71	95,50±6,36			
6	140	100,0±0,0	99,00±1,41	99,00±1,41	n.s.	n.s.	n.s.
	80	100,0±0,0	99,50±0,71	96,00±5,66			
7	140	100,0±0,0	99,00±1,41	99,00±1,41	n.s.	n.s.	n.s.
	80	100,0±0,0	99,50±0,71	98,00±2,83			
8	140	100,0±0,0	99,00±1,41	99,00±1,41	n.s.	n.s.	n.s.
	80	100,0±0,0	99,50±0,71	97,00±4,24			

3.4.3 CHEMISCHE ERTRAGSQUALITÄT

3.4.3.1 STÄRKE

In den Versuchsjahren 1995 bis 1997 wurde zum Zeitpunkt der Erntereife kein signifikanter Effekt auf die Stärkekonzentration in den Körnern der Haupt- und Nebenähren von Sommergerste beobachtet (Tabelle 38). Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) ergab nur im Versuchsjahr 1995 in allen CO₂-Behandlungen eine tendenzielle Reduktion der Stärkekonzentration in den Körnern der Nebenähren. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff konnten für die Stärkekonzentration der Körner von Haupt- und Nebenähren in keinem der Versuchsjahre festgestellt werden.

Tabelle 38: Stärkekonzentration in den Körnern von Sommergerste (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1995 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Hauptähren							
1995	140	53,96±7,53	53,53±6,24	57,79±5,86	n.s.	n.s.	n.s.
	80	57,39±2,83	52,01±5,01	63,92±5,25			
1996	140	52,43±0,31	55,20±2,29	54,74±5,75	n.s.	n.s.	n.s.
	80	57,70±5,28	49,27±5,31	55,66±10,69			
1997	140	51,42±5,32	-	58,84±5,15	n.s.	n.s.	n.s.
	80	56,46±6,04	-	54,36±11,70			
Nebenähren							
1995	140	57,46±1,51	48,61±8,06	50,83±4,30	n.s.	(0,081)	n.s.
	80	61,64±3,02	56,04±0,43	56,23±6,09			
1996	140	54,63±0,03	58,30±3,91	57,77±0,85	n.s.	n.s.	n.s.
	80	56,95±1,99	57,22±0,55	59,06±0,93			
1997	140	60,07±3,95	-	63,23±4,57	n.s.	n.s.	n.s.
	80	60,87±1,42	-	62,58±2,66			

3.4.3.2 LÖSLICHE KOHLENHYDRATE

Die Konzentration der löslichen Kohlenhydrate wurde 1995 und 1996 in den Körnern der Haupt- und Nebenähren von Sommergerste untersucht (Tabelle 39). Signifikante CO₂- und Stickstoffeffekte auf die löslichen Kohlenhydrate konnten nur im Versuchsjahr 1996 für die Körner der Nebenähren festgestellt werden. Während erhöhte CO₂-Konzentrationen (550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂ im Vergleich zu 380 µl l⁻¹ CO₂) in der Stickstoffbehandlung mit 140 kg N ha⁻¹ zu einem Anstieg der Konzentration löslicher Kohlenhydrate führten, war in der Stickstoffvariante mit 80 kg N ha⁻¹ eine Konzentrationsabnahme durch erhöhtes CO₂ zu verzeichnen. Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) bewirkte 1996 bei den Körnern der Nebenähren in allen CO₂-Behandlungen eine signifikante Zunahme der Konzentration löslicher Kohlenhydrate. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Körnern der Haupt- und Nebenähren von Sommergerste ergaben sich nicht.

Tabelle 39: Konzentration löslicher Kohlenhydrate in den Körnern von Sommergerste (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1995 und 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Hauptähren							
1995	140	3,450±0,170	3,210±0,100	3,490±0,040	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,480±0,330	3,420±1,230	3,180±0,040			
1996	140	3,887±0,112	3,711±0,080	3,852±0,066	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,687±0,106	4,039±1,149	4,031±0,440			
Nebenähren							
1995	140	3,450±0,050	3,450±0,770	3,600±0,140	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,030±0,020	3,550±0,100	3,440±0,840			
1996	140	3,384±0,183	3,393±0,169	4,045±0,073	0,045	0,011	n.s.
	80	3,324±0,206	2,919±0,097	3,252±0,388			

3.4.3.3 REDUZIERENDE ZUCKER

Signifikante CO₂-Effekte sowie eine Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration der reduzierenden Zucker in den Körnern der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren konnten in keinem der beiden Versuchsjahre festgestellt werden (Tabelle 40). Lediglich im Versuchsjahr 1995 führte eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) in allen CO₂-Behandlungen zu einer signifikanten Konzentrationsabnahme der reduzierenden Zucker in den Körnern der Hauptähren.

Tabelle 40: Konzentration reduzierender Zucker in den Körnern von Sommergerste (% bezogen auf Trockengewicht) zur Endernte in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂xN}
Hauptähren							
1995	140	0,500±0,020	0,550±0,050	0,550±0,020	n.s.	0,013	n.s.
	80	0,690±0,120	0,580±0,050	0,740±0,080			
1996	140	0,692±0,035	0,638±0,042	0,664±0,057	n.s.	n.s.	n.s.
	80	0,411±0,238	0,647±0,040	0,473±0,306			
Nebenähren							
1995	140	0,530±0,020	0,550±0,000	0,590±0,030	n.s.	n.s.	n.s.
	80	0,560±0,020	0,530±0,090	0,580±0,040			
1996	140	0,668±0,059	0,656±0,024	0,695±0,142	n.s.	n.s.	n.s.
	80	0,415±0,239	0,677±0,086	0,489±0,326			

3.4.3.4 SACCHAROSE

In den Versuchsjahren 1995 und 1996 konnten in den Körnern der Haupt- und Nebenähren von Sommergerste keine signifikanten CO₂- und Stickstoffeffekte auf die Saccharosekonzentration festgestellt werden (Tabelle 41). Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Konzentration an Saccharose in den Körnern wurden ebenfalls nicht beobachtet.

Tabelle 41: Saccharosekonzentration in den Körnern von Sommergerste (% bezogen auf Trockengewicht) zur Ernte in den Versuchsjahren 1994 bis 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Hauptähren							
1995	140	1,720±0,080	1,610±0,050	1,430±0,100	n.s.	n.s.	n.s.
	80	1,700±0,240	1,820±0,230	1,530±0,030			
1996	140	1,553±0,153	1,441±0,002	1,266±0,044	n.s.	n.s.	n.s.
	80	1,341±0,370	1,365±0,049	1,173±0,081			
Nebenähren							
1995	140	1,630±0,020	1,710±0,080	1,620±0,120	n.s.	n.s.	n.s.
	80	1,540±0,190	1,690±0,160	1,720±0,080			
1996	140	1,352±0,029	1,421±0,058	1,372±0,175	n.s.	n.s.	n.s.
	80	1,228±0,027	1,203±0,129	1,218±0,336			

3.4.3.5 FRUCTANE

In den Körnern der Haupt- und Nebenähren von Sommergerste konnte zum Zeitpunkt der Erntereife in den Versuchsjahren 1995 und 1996 kein signifikanter CO₂- und Stickstoffeffekt auf die Fructankonzentration beobachtet werden (Tabelle 42). Lediglich im Versuchsjahr 1996 ergab sich eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Fructankonzentration in den Hauptähren.

Tabelle 42: Fructankonzentration in den Körnern von Sommergerste (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1995 und 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Hauptähren							
1995	140	1,200±0,190	0,950±0,010	1,270±0,160	n.s.	n.s.	n.s.
	80	1,260±0,530	0,970±0,480	1,520±0,640			
1996	140	1,937±0,438	1,677±0,184	1,224±0,452	n.s.	n.s.	0,06
	80	1,579±0,146	0,931±0,464	1,875±0,064			
Nebenähren							
1995	140	0,930±0,120	1,260±0,810	1,170±0,380	n.s.	n.s.	n.s.
	80	1,270±0,970	1,060±0,000	1,250±0,160			
1996	140	1,041±0,892	1,585±0,386	1,275±0,044	n.s.	n.s.	n.s.
	80	0,894±0,287	1,147±0,020	1,846±1,030			

3.4.3.6 PROTEIN

Erhöhte CO₂-Konzentrationen (550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂ im Vergleich zu 380 µl l⁻¹ CO₂) bewirkten in den Versuchsjahren 1996 und 1997 unabhängig von der Stickstoffbehandlung eine signifikante Reduktion der Proteinkonzentration in den Körnern der Haupt- und Nebenähren von Sommergerste (Tabelle 43). Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) führte 1997 in allen CO₂-Behandlungen in den Körnern der Nebenähren zu einem signifikanten Anstieg der Proteinkonzentration. Dieser Trend konnte 1996 ebenfalls für die Proteinkonzentration in den Körnern der Nebenähren bestätigt werden. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen steht der tendenzielle Stickstoffeffekt auf die Proteinkonzentration in den Körnern der Hauptähren im Versuchsjahr 1996. Während in der OTC680NF-Behandlung die Proteinkonzentration in den Körnern der Hauptähren durch eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) ebenfalls anstieg, wurde die Proteinkonzentration in der OTC380NF- und OTC550NF-Behandlung durch höhere Stickstoffgaben reduziert. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und Stickstoff auf die Proteinkonzentration konnte nur 1997 für die Körner der Nebenähren beobachtet werden.

Tabelle 43: Proteinkonzentration in den Körnern von Sommergerste (% bezogen auf Trockengewicht) zur Erntereife in den Versuchsjahren 1996 und 1997 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Jahr	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Hauptähren							
1996	140	10,55±0,56	9,55±0,85	10,46±0,69	0,031	(0,079)	n.s.
	80	12,34±0,28	10,17±0,28	10,35±0,85			
1997	140	10,96±0,68	-	8,151±0,296	0,000	n.s.	n.s.
	80	10,15±0,63	-	8,037±0,099			
Nebenähren							
1996	140	12,97±1,41	11,26±0,12	9,662±1,814	0,036	(0,088)	n.s.
	80	10,86±1,01	10,35±0,28	8,949±0,564			
1997	140	10,79±0,36	-	7,809±0,171	0,000	0,016	0,021
	80	9,557±0,560	-	7,771±0,230			

3.4.3.7 AMINOSÄUREN

Im Versuchsjahr 1996 gab es nur vereinzelte Effekte erhöhter CO₂- und Stickstoffkonzentrationen auf die Aminosäurekonzentrationen der Körner der Haupt- und Nebenähren (Tabelle 44 A-B).

In den Körnern der Hauptähren von Sommergerste konnten 1996 keine signifikanten CO₂-Effekte auf die untersuchten Aminosäurekonzentrationen festgestellt werden. Unabhängig von der Stickstoffversorgung sanken unter erhöhtem CO₂ (550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂ im

Vergleich zu $380 \mu\text{l l}^{-1} \text{CO}_2$) die Konzentrationen an Leucin (Leu) und Phenylalanin (Phe) in den Hauptähren tendenziell ab. Auch für Histidin (D-His) konnte überwiegend eine tendenzielle Konzentrationsabnahme durch erhöhte CO_2 -Konzentrationen festgestellt werden, allerdings stieg die Histidinkonzentration (D-His) bei einer Stickstoffversorgung mit 80 kg N ha^{-1} in der OTC680NF-Behandlung im Vergleich zur OTC380NF-Behandlung durch erhöhtes CO_2 an. Die Valinkonzentration (Val) in den Körnern der Hauptähren sank ebenfalls tendenziell unter erhöhtem CO_2 ab, in der Exposition mit $680 \mu\text{l l}^{-1} \text{CO}_2$ wurde jedoch in der Stickstoffvariante mit 140 kg N ha^{-1} ein Konzentrationsanstieg von Valin (Val) durch erhöhtes CO_2 verzeichnet.

Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha^{-1} im Vergleich zu 80 kg N ha^{-1}) führte unabhängig von der CO_2 -Behandlung nur bei Prolin (Pro) zu einer signifikanten Konzentrationszunahme in den Körnern der Hauptähren. Ein signifikanter Stickstoffeffekt konnte auch auf die Konzentration der Glutaminsäure (Glu) beobachtet werden, allerdings war in der OTC380NF- und OTC680NF-Behandlung ein Konzentrationsanstieg durch höhere Stickstoffgaben (140 kg N ha^{-1} im Vergleich zu 80 kg N ha^{-1}) zu verzeichnen. Dagegen sank in der OTC550NF-Behandlung die Konzentration an Glutaminsäure (Glu) ab. Tendenzuell konnte dieses Reaktionsmuster auch für die Konzentrationen an Asparaginsäure (Asp), Serin (Ser) und Valin (Val) beobachtet werden. Signifikante Interaktionen von CO_2 und Stickstoff auf die Aminosäurekonzentrationen wurden 1996 in den Körnern der Hauptähren nicht festgestellt.

Unter erhöhtem CO_2 waren in den Körnern der Nebenähren unabhängig von der Stickstoffversorgung die Konzentrationen an Alanin (Ala), Arginin (Arg), Asparaginsäure (Asp), Glycin (Gly), Leucin (Leu) und Threonin (Thr) signifikant niedriger, die Isoleucinkonzentration (Ile) sank ebenfalls tendenziell durch erhöhte CO_2 -Konzentrationen ab. Für Glutaminsäure (Glu) und Serin (Ser) konnte in der OTC680NF-Behandlung ebenfalls unabhängig von der Stickstoffversorgung eine Konzentrationsabnahme in den Körnern der Nebenähren beobachtet werden, die Exposition mit $550 \mu\text{l l}^{-1} \text{CO}_2$ zeigte dagegen bei diesen Aminosäuren eine Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung. Während in der OTC550NF-Behandlung die Konzentrationen an Glutaminsäure (Glu) und Serin (Ser) bei einer Stickstoffversorgung mit 140 kg N ha^{-1} ebenfalls abnahmen, stiegen sie bei einer Stickstoffversorgung mit 80 kg N ha^{-1} an. Durchschnittlich wurden die Konzentrationen aller Aminosäuren in den Nebenähren abhängig von der Stickstoffversorgung in der OTC550NF-Behandlung um 15,8 % (140 kg N ha^{-1}) sowie in der OTC680NF-Behandlung um 7,3 % (80 kg N ha^{-1}) und um 22,4 % (140 kg N ha^{-1}) im Vergleich zur Kontrolle (OTC380NF) reduziert. In der OTC550NF-Behandlung war bei einer Stickstoffversorgung mit 80 kg N ha^{-1} eine durchschnittliche Zunahme der Aminosäurekonzentrationen um 1,2 % im Vergleich zur Kontrolle zu beobachten.

Ein signifikanter Stickstoffeffekt konnte 1996 für die Konzentrationen von Glycin (Gly), Isoleucin (Ile) und Threonin (Thr) in den Körnern der Nebenähren festgestellt werden. Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha^{-1} im Vergleich zu 80 kg N ha^{-1}) bewirkte unabhängig von der CO_2 -Behandlung einen signifikanten Konzentrationsanstieg von Isoleucin (Ile) und Threonin (Thr). Darüber hinaus konnte der positive Effekt einer höheren Stickstoffversorgung auf die Konzentration von Aminosäuren in den Körnern der Nebenähren unabhängig von der CO_2 -Behandlung auch durch den tendenziellen Anstieg der Konzentrationen von Glutaminsäure (Glu), D-Histidin (D-His) und Leucin (Leu) bestätigt werden. Auch die Glycinkonzentration (Gly) stieg in der höheren Stickstoffversorgung (140 kg N ha^{-1} im Vergleich zu 80 kg N ha^{-1}) in der OTC380NF- und OTC550NF-Behandlung an, allerdings war in der OTC680NF-Behandlung eine Konzentrationsabnahme von Glycin (Gly) zu beobachten. Dieses CO_2 -abhängige Reaktionsmuster der Aminosäurekonzentrationen auf eine erhöhte Stickstoffversorgung ergab sich tendenziell auch für Alanin (Ala) und Arginin (Arg). Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha^{-1} im Vergleich zu 80 kg N ha^{-1}) bewirkte in der Exposition mit $380 \mu\text{l l}^{-1} \text{ CO}_2$, $550 \mu\text{l l}^{-1} \text{ CO}_2$ und $680 \mu\text{l l}^{-1} \text{ CO}_2$ einen durchschnittlichen Anstieg aller Aminosäurekonzentrationen um 25,5 %, 3,9 % und 4,8 %. Eine signifikante Interaktion von CO_2 und Stickstoff wurde 1996 nur für Konzentrationen von Alanin (Ala), Glycin (Gly) und Threonin (Thr) in den Körnern der Nebenähren festgestellt, tendenzielle Interaktionen konnten für die Konzentrationen von Arginin (Arg), Asparaginsäure (Asp), Glutaminsäure (Glu) und Serin (Ser) beobachtet werden.

Tabelle 44-A: Aminosäurekonzentration [μmol bezogen auf g Trockengewicht] in den Körnern der Hauptähren von Sommergerste zur Endernte 1996 bei unterschiedlicher CO_2 - und N-Behandlung (Mittelwert \pm Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P_{CO_2}	P_{N}	$P_{\text{CO}_2 \times \text{N}}$
Hauptähren							
Ala	140	58,75 \pm 3,11	44,38 \pm 1,86	55,73 \pm 10,51	n.s.	n.s.	n.s.
	80	48,10 \pm 6,88	46,74 \pm 0,76	46,73 \pm 5,45			
Arg	140	38,67 \pm 4,82	29,11 \pm 1,18	35,93 \pm 7,48	n.s.	n.s.	n.s.
	80	30,92 \pm 3,08	29,84 \pm 1,23	29,58 \pm 4,10			
Asn	140	8,500 \pm 1,172	7,423 \pm 3,464	9,297 \pm 3,702	n.s.	n.s.	n.s.
	80	8,274 \pm 1,507	9,019 \pm 1,367	8,694 \pm 1,021			
Asp	140	64,94 \pm 6,80	47,80 \pm 1,59	59,87 \pm 12,67	n.s.	(0,094)	n.s.
	80	51,42 \pm 5,92	48,58 \pm 0,93	48,61 \pm 6,77			
Glu	140	232,4 \pm 21,2	166,6 \pm 18,2	208,4 \pm 26,5	n.s.	0,047	n.s.
	80	167,3 \pm 33,6	171,9 \pm 9,4	162,9 \pm 29,5			
Gly	140	64,28 \pm 2,63	48,95 \pm 1,66	59,78 \pm 9,40	n.s.	n.s.	n.s.
	80	53,00 \pm 7,73	52,01 \pm 0,90	51,26 \pm 4,62			
D-His	140	30,34 \pm 0,57	23,00 \pm 2,38	25,61 \pm 1,87	(0,051)	n.s.	n.s.
	80	25,22 \pm 6,05	19,74 \pm 4,56	31,60 \pm 2,68			
Ile	140	30,62 \pm 0,88	25,92 \pm 4,87	23,68 \pm 4,00	n.s.	n.s.	n.s.
	80	24,87 \pm 4,33	24,29 \pm 0,39	10,86 \pm 15,35			
Leu	140	73,10 \pm 2,76	55,36 \pm 0,67	62,28 \pm 7,00	(0,073)	n.s.	n.s.
	80	60,84 \pm 8,40	57,96 \pm 2,13	53,45 \pm 7,06			
Phe	140	34,41 \pm 1,30	24,75 \pm 1,22	28,52 \pm 1,17	(0,073)	n.s.	n.s.
	80	30,68 \pm 6,74	28,45 \pm 1,97	26,86 \pm 1,86			
Pro	140	170,9 \pm 17,9	140,7 \pm 37,9	161,9 \pm 4,7	n.s.	0,043	n.s.
	80	126,2 \pm 0,2	111,8 \pm 7,4	155,1 \pm 12,3			
Ser	140	59,23 \pm 3,88	43,32 \pm 2,32	54,81 \pm 6,49	n.s.	(0,056)	n.s.
	80	45,10 \pm 6,59	45,51 \pm 2,24	45,96 \pm 6,62			
Thr	140	35,54 \pm 2,29	26,80 \pm 1,45	34,00 \pm 6,44	n.s.	n.s.	n.s.
	80	28,06 \pm 4,66	28,82 \pm 0,29	27,19 \pm 4,81			
Val	140	47,14 \pm 1,48	35,19 \pm 0,46	51,77 \pm 8,54	(0,097)	(0,052)	n.s.
	80	39,67 \pm 6,09	37,64 \pm 0,42	37,25 \pm 4,30			

Tabelle 44-B: Aminosäurekonzentration [µmol bezogen auf g Trockengewicht] in den Körnern der Nebenähren von Sommergerste zur Endernte 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Nebenähren							
Ala	140	57,17±0,36	46,73±1,05	43,92±0,42	0,015	(0,067)	0,042
	80	46,69±0,18	46,65±5,10	44,41±3,66			
Arg	140	37,07±1,76	29,37±0,47	26,30±1,45	0,013	(0,082)	(0,067)
	80	29,55±1,60	28,20±2,54	27,33±3,53			
Asn	140	9,842±0,394	6,677±0,272	7,518±1,495	n.s.	n.s.	n.s.
	80	5,899±3,117	7,688±0,557	6,894±4,308			
Asp	140	62,67±2,43	48,47±1,82	46,20±0,93	0,027	n.s.	(0,068)
	80	50,06±2,34	49,11±6,36	47,63±5,43			
Glu	140	211,5±17,5	158,2±2,77	140,5±16,2	0,025	(0,055)	(0,093)
	80	153,0±14,7	153,5±27,7	136,2±7,0			
Gly	140	62,43±0,13	51,91±1,25	48,99±0,02	0,009	0,045	0,043
	80	52,06±0,60	51,21±5,18	49,18±2,92			
D-His	140	24,88±3,39	21,85±3,67	20,41±1,54	n.s.	(0,051)	n.s.
	80	19,17±2,13	21,12±0,13	17,14±0,15			
Ile	140	26,20±3,67	23,21±0,94	21,98±1,18	(0,096)	0,043	n.s.
	80	22,36±1,84	21,10±1,19	19,94±0,61			
Leu	140	64,67±5,53	55,62±0,35	49,51±4,46	0,034	(0,073)	n.s.
	80	53,48±4,59	52,60±4,62	48,94±0,33			
Phe	140	28,93±2,80	28,64±3,96	20,99±4,69	n.s.	n.s.	n.s.
	80	25,72±1,13	21,45±1,99	23,44±4,07			
Pro	140	151,1±43,2	131,9±34,4	129,1±18,9	n.s.	n.s.	n.s.
	80	118,0±34,2	124,8±13,6	93,03±0,96			
Ser	140	53,46±1,36	41,24±0,55	38,78±1,74	0,032	n.s.	(0,082)
	80	41,37±2,32	42,05±7,55	38,07±3,02			
Thr	140	33,40±0,01	26,63±0,05	24,92±0,57	0,006	0,031	0,047
	80	26,87±0,58	26,36±3,54	24,30±0,90			
Val	140	34,68±10,03	37,63±0,20	33,11±2,20	n.s.	n.s.	n.s.
	80	35,84±1,48	36,70±3,77	32,89±0,93			

Im Versuchsjahr 1996 ergab sich in den Körnern der Hauptähren lediglich für den Anteil an Leucin (Leu) am Gesamtprotein ein signifikanter CO₂-Effekt (Tabelle 45-A). Der Leucinanteil (Leu) am Gesamtprotein wurde in der Stickstoffbehandlung mit 80 kg N ha⁻¹ in der OTC550NF- und OTC680NF-Behandlung durch erhöhte CO₂-Konzentrationen im Vergleich zur Kontrolle reduziert. In der hohen Stickstoffversorgung mit 140 kg N ha⁻¹ konnte dieser Effekt in der Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ ebenfalls beobachtet werden, allerdings war in der Behandlung mit 550 µl l⁻¹ CO₂ in den Körnern der Hauptähren ein Anstieg des Leucinanteils (Leu) am Gesamtprotein zu verzeichnen.

Eine höhere Stickstoffversorgung (140 kg N ha⁻¹ im Vergleich zu 80 kg N ha⁻¹) ergab keine signifikanten Effekte auf den Anteil der einzelnen Aminosäuren am Gesamtprotein, lediglich für Leucin (Leu) und Phenylalanin (Phe) konnte in allen CO₂-Behandlungen eine tendenzielle Abnahme des Anteils von Leucin (Leu) und Phenylalanin (Phe) am Gesamtprotein beobachtet werden. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf den Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein wurden 1996 in den Körnern der Hauptähren nicht festgestellt, eine tendenzielle Interaktion von CO₂ und Stickstoff konnte für den Anteil von Serin (Ser) am Gesamtprotein beobachtet werden.

In den Körnern der Nebenähren wurden im Versuchsjahr 1996 keine signifikanten CO₂- und Stickstoffeffekte auf den Anteil der untersuchten Aminosäuren am Gesamtprotein festgestellt (Tabelle 45-B). Signifikante Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Aminosäureanteile am Gesamtprotein konnten ebenfalls nicht beobachtet werden.

Tabelle 45-A: Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein [% Gesamtprotein] in den Körnern der Hauptähren von Sommergerste zur Ernte 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO₂}	P _N	P _{CO₂×N}
Hauptähren							
Ala	140	4,350±0,094	4,358±0,216	4,492±0,432	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,569±0,094	4,616±0,098	4,496±0,144			
Arg	140	5,584±0,282	5,590±0,284	5,656±0,655	n.s.	n.s.	n.s.
	80	5,758±0,134	5,769±0,453	5,557±0,054			
Asn	140	0,930±0,059	1,060±0,407	1,100±0,342	n.s.	n.s.	n.s.
	80	1,163±0,070	1,317±0,151	1,241±0,039			
Asp	140	7,171±0,218	7,016±0,407	7,202±0,860	n.s.	n.s.	n.s.
	80	7,310±0,056	7,166±0,132	6,977±0,065			
Glu	140	28,38±0,48	26,93±0,49	27,82±0,95	n.s.	n.s.	n.s.
	80	26,14±2,07	28,01±0,48	25,76±0,85			
Gly	140	4,013±0,135	4,052±0,233	4,066±0,262	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,241±0,099	4,328±0,087	4,164±0,244			
D-His	140	3,919±0,218	3,924±0,049	3,640±0,603	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,272±1,526	3,382±0,658	5,310±0,339			
Ile	140	3,349±0,346	3,787±1,049	2,814±0,214	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,472±0,180	3,534±0,189	1,389±1,964			
Leu	140	7,970±0,293	8,011±0,634	7,413±0,142	0,020	(0,080)	n.s.
	80	8,507±0,132	8,419±0,006	7,560±0,125			
Phe	140	4,728±0,173	4,525±0,634	4,292±0,225	n.s.	(0,054)	n.s.
	80	5,378±0,529	5,218±0,556	4,811±0,382			
Pro	140	16,32±0,496	17,66±3,19	17,03±2,08	n.s.	n.s.	n.s.
	80	15,62±1,89	14,25±0,40	19,33±1,34			
Ser	140	5,173±0,047	5,016±0,189	5,229±0,131	n.s.	n.s.	(0,095)
	80	5,052±0,120	5,298±0,062	5,207±0,023			
Thr	140	3,517±0,035	3,516±0,131	3,663±0,355	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,558±0,155	3,804±0,105	3,482±0,100			
Val	140	4,596±0,198	4,552±0,357	5,580±1,431	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,954±0,154	4,891±0,130	4,716±0,157			

Tabelle 45-B: Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein [% Gesamtprotein] in den Körnern der Nebenähren von Sommergerste zur Endernte 1996 bei unterschiedlicher CO₂- und N-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Aminosäure	N	Behandlung			Statistische Auswertung (ANOVA)		
		OTC380NF	OTC550NF	OTC680NF	P _{CO2}	P _N	P _{CO2xN}
Nebenähren							
Ala	140	4,726±0,340	4,663±0,099	4,800±0,411	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,876±0,458	4,848±0,031	5,153±0,209			
Arg	140	6,000±0,678	5,731±0,158	5,632±0,737	n.s.	n.s.	n.s.
	80	6,048±0,869	5,736±0,147	6,194±0,541			
Asn	140	1,297±0,000	0,989±0,083	1,227±0,335	n.s.	n.s.	n.s.
	80	0,892±0,400	1,187±0,052	1,173±0,693			
Asp	140	7,748±0,809	7,222±0,044	7,548±0,724	n.s.	n.s.	n.s.
	80	7,825±1,069	7,615±0,105	8,250±0,597			
Glu	140	28,79±0,48	26,08±1,59	25,23±1,01	n.s.	n.s.	n.s.
	80	26,27±0,17	26,23±1,72	26,11±0,24			
Gly	140	4,346±0,277	4,362±0,085	4,509±0,344	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,581±0,465	4,485±0,066	4,809±0,084			
D-His	140	3,566±0,252	3,786±0,473	3,874±0,002	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,470±0,073	3,850±0,469	3,471±0,115			
Ile	140	3,210±0,235	3,415±0,287	3,529±0,079	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,425±0,027	3,240±0,192	3,415±0,247			
Leu	140	7,850±0,156	8,175±0,304	7,934±0,112	n.s.	n.s.	n.s.
	80	8,192±0,036	8,060±0,225	8,375±0,296			
Phe	140	4,420±0,138	5,316±0,963	4,217±0,628	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,969±0,230	4,183±0,868	5,071±1,088			
Pro	140	15,99±3,55	16,91±3,69	18,12±1,28	n.s.	n.s.	n.s.
	80	15,71±3,18	16,76±0,11	13,97±0,44			
Ser	140	5,209±0,210	4,855±0,147	4,990±0,156	n.s.	n.s.	n.s.
	80	5,083±0,174	5,134±0,332	5,212±0,195			
Thr	140	3,690±0,244	3,554±0,162	3,637±0,193	n.s.	n.s.	n.s.
	80	3,747±0,257	3,656±0,068	3,773±0,018			
Val	140	3,807±1,338	4,941±0,242	4,747±0,045	n.s.	n.s.	n.s.
	80	4,913±0,241	5,019±0,065	5,032±0,353			

3.5 Kartoffeln

3.5.1 WASSERVERBRAUCH DES KARTOFFELBESTANDES

Untersucht wurde der Effekt erhöhter CO₂- und Ozonkonzentrationen auf die benötigte Bewässerungsmenge der Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode. In Tabelle 46 sind die Behandlungsmittelwerte für den Wasserverbrauch des Kartoffelbestandes und die Ergebnisse der statistischen Auswertung dargestellt.

Der Wasserverbrauch der Kartoffelpflanzen blieb in beiden Versuchsjahren durch die unterschiedlichen CO₂- und Ozonbehandlungen unbeeinflusst. Dennoch ergab sich 1998 der Trend eines geringeren Wasserverbrauchs unter erhöhtem CO₂. In keinem der beiden Versuchsjahre zeigte sich eine signifikante Interaktion von CO₂ und O₃ auf den Wasserverbrauch der Pflanzen. Ein signifikanter Kammereffekt auf den Wasserverbrauch des Bestandes konnte 1998 und 1999 ebenfalls nicht festgestellt werden. Dagegen ergab sich in beiden Versuchsjahren ein signifikanter Standorteffekt (OTC im Vergleich zu FACE). Allerdings war der Wasserverbrauch der Pflanzen im Versuchsjahr 1998 am OTC-Standort im Vergleich zum FACE-Standort höher, 1999 wurde am FACE-Standort ein höherer Wasserverbrauch im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung beobachtet.

Tabelle 46: Wasserverbrauch des Kartoffelbestandes (l m⁻²) während der Vegetationsperiode 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).		
Behandlung	1998	1999
OTC380NF	427,7	481,6±24,0
OTC550NF	404,2	483,7±7,0
OTC680NF	372,1	463,9±39,1
OTC380O3	429,4	457,5±30,0
OTC550O3	393,5	461,8±0,0
OTC680O3	375,5	519,8±38,1
AA-OTC	478,5±15,5	496,2±9,0
AA-FACE	422,5±7,2	572,0±22,1
FACE550	447,9±9,4	578,4±16,6
Statistische Auswertung (ANOVA)		
OTC _{CO2}	-	n.s.
OTC _{O3}	-	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.
Standort	0,019	0,034
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.

3.5.2 BESTANDESENTWICKLUNG

3.5.2.1 PHÄNOLOGISCHE ENTWICKLUNG

Die Entwicklung von Kartoffelpflanzen wurde im Versuchsjahr 1999 in wöchentlichen Abständen über phänologische Wachstumsstadien wie Auflaufen, Knolleninduktion, Erscheinen der ersten Infloreszenz, Erreichen der maximalen Blattfläche, Beginn der Seneszenz und Physiologische Reife verfolgt. Insgesamt ergaben sich bei der Bestandesentwicklung nur wenige signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Behandlungen. Tabelle 47 enthält die Behandlungsmittelwerte für die Anzahl der Tage, die im Versuchsjahr 1999 zum Erreichen der phänologischen Wachstumsstadien in bezug auf das Auflaufen benötigt wurden, sowie die Ergebnisse der statistischen Auswertung.

1999 konnte in der OTC- und in der FACE-Behandlung kein signifikanter CO₂-Effekt auf den Verlauf der Bestandesentwicklung von Kartoffelpflanzen festgestellt werden. Erhöhte Ozonkonzentrationen wirkten sich dagegen in den OTC signifikant auf den Zeitpunkt der Knolleninduktion und den Beginn der Seneszenz aus. Während die Knolleninduktion in der OTC380O3-Behandlung im Vergleich zur OTC380NF-Behandlung durch erhöhte Ozonkonzentrationen verzögert wurde, fand die Knolleninduktion in der OTC550O3- und der OTC680O3-Behandlung unter erhöhtem Ozon im Vergleich zur Kontrolle früher statt. Der Seneszenzbeginn wurde in allen CO₂-Behandlungen durch erhöhte Ozonkonzentrationen signifikant beschleunigt. Eine tendenzielle Interaktion von CO₂ und O₃ auf den Zeitpunkt wichtiger phänologischer Wachstumsstadien trat lediglich im Zusammenhang mit der Knolleninduktion auf. In den OTC wurden durch einen signifikanten Kammereffekt die phänologischen Wachstumsstadien wie Beginn der Seneszenz und Zeitpunkt der physiologischen Reife im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung später erreicht.

Signifikante Effekte durch den Expositions-Standort (OTC im Vergleich zu FACE) auf die Entwicklung der Pflanzen wurden 1999 mit Ausnahme der Knolleninduktion beobachtet. Im Vergleich zum OTC-Standort war die Entwicklung am FACE-Standort bezüglich des Auflaufens, des Erscheinens der ersten Infloreszenz und des Beginns der Physiologischen Reife beschleunigt. Im Gegensatz dazu wurde die maximale Blattfläche am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort später erreicht und der Seneszenzbeginn verzögert.

Tabelle 47: Zeitpunkt wichtiger phänologischer Wachstumsstadien (Anzahl der benötigten Tage bezogen auf den Zeitpunkt des Auflaufens) von Kartoffelpflanzen nach Hack et al. (1993) bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung 1999 (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	Auflaufen (Kalendertag)	Erscheinen der 1. Infloreszenz	Knollen- induktion	Maximale Blattfläche	Beginn der Seneszenz	Physiologische Reife
OTC380NF	147,0±1,4	13,00±1,41	17,35±0,14	35,00±1,41	86,50±2,12	111,0±1,4
OTC550NF	147,5±0,7	12,50±0,71	17,55±0,99	34,50±0,71	86,00±4,24	110,5±0,7
OTC680NF	147,0±0,0	13,00±0,00	17,68±0,60	35,00±0,00	80,00±5,66	111,0±0,0
OTC380O3	146,0±0,0	14,00±0,00	17,78±0,67	36,00±0,00	77,00±0,00	112,0±0,0
OTC550O3	146,0±0,0	14,00±0,00	15,63±0,88	36,00±0,00	77,00±0,00	112,0±0,0
OTC680O3	147,5±0,7	12,50±0,71	16,05±0,14	34,50±0,71	75,50±0,71	110,5±0,7
AA-OTC	147,5±0,7	18,50±0,71	17,42±0,47	34,50±0,71	69,50±0,71	102,5±0,7
AA-FACE	145,0±0,0	15,00±0,00	17,50±0,14	37,00±0,00	72,00±0,00	94,00±0,00
FACE550	145,0±0,0	15,00±0,00	17,40±0,14	37,00±0,00	72,00±0,00	94,00±0,00
Statistische Auswertung (ANOVA)						
OTC _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{O3}	n.s.	n.s.	0,034	n.s.	0,005	n.s.
OTC _{CO2xO3}	n.s.	n.s.	(0,088)	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,009	0,017
Standort	0,038	0,020	n.s.	0,038	0,038	0,003
FACE _{CO2}	-	-	n.s.	-	-	-

3.5.2.2 BESTANDESHÖHE

Erhöhte CO₂-Konzentrationen führten 1999 in den OTC im Vergleich zur Kontrollbehandlung von Tag 198 bis zu Tag 224 zu einer tendenziellen Reduktion der Bestandeshöhe der Kartoffelpflanzen, ab Tag 231 bis zum Ende der Vegetationsperiode war dieser Effekt signifikant (Abbildung 14 und Tabelle 49). Auch in der FACE-Behandlung konnte im Versuchsjahr 1999 zumindest tendenziell von Tag 211 bis zu Tag 224 ein reduzierender CO₂-Effekt auf die Bestandeshöhe der Kartoffelpflanzen festgestellt werden. 1998 wurde im FACE vereinzelt eine tendenzielle Reduktion der Bestandeshöhe von Kartoffelpflanzen durch erhöhtes CO₂ beobachtet (Abbildung 13 und Tabelle 48). Signifikante Ozonwirkungen oder Interaktionen von CO₂ und O₃ auf die Bestandeshöhe ergaben sich in keinem der beiden Versuchsjahre.

In beiden Versuchsjahren konnte ein überwiegend signifikanter, zumindest aber tendenzieller Kammereffekt auf die Bestandeshöhe festgestellt werden, da die Kartoffelpflanzen in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung größer waren. Auch der Standort wirkte sich 1998 vereinzelt und 1999 fast durchgängig signifikant auf die Bestandeshöhe aus. Während die Kartoffelpflanzen 1998 in der OTC-AA-Behandlung im Vergleich zur FACE-AA-Behandlung eine geringere Bestandeshöhe aufwiesen, waren die Pflanzen im Versuchsjahr 1999 am OTC-Standort im Vergleich zum FACE-Standort höher.

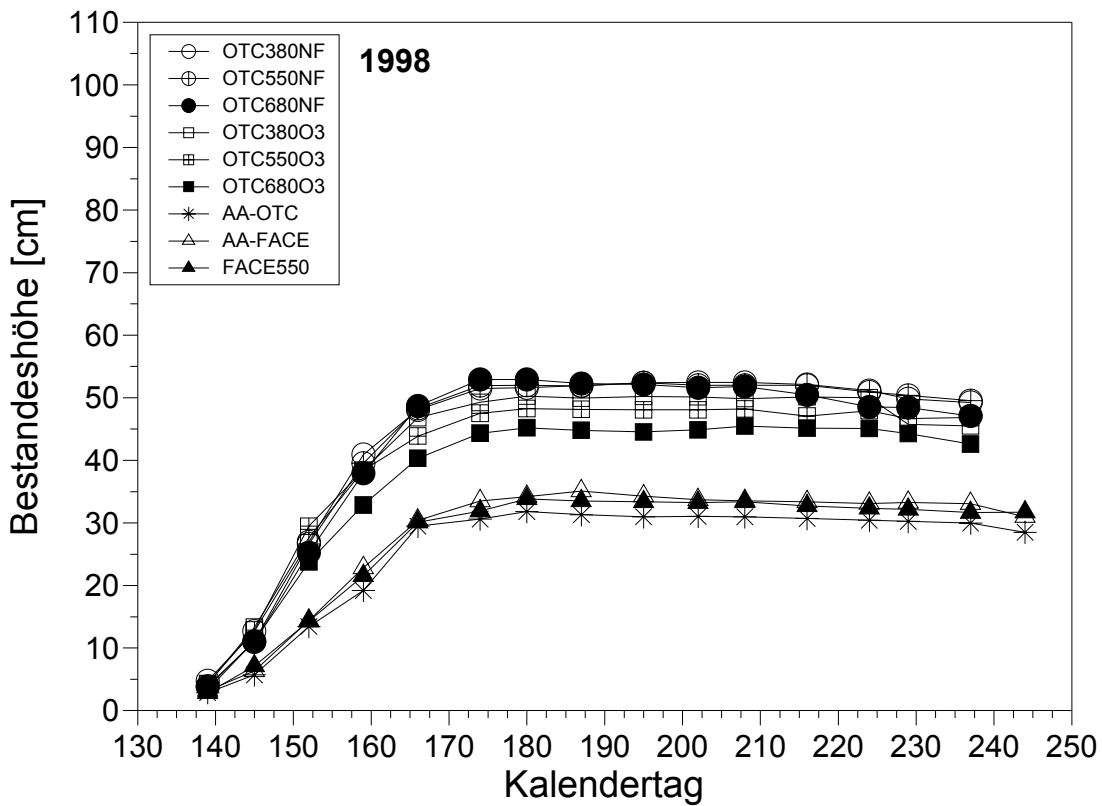


Abbildung 13: Bestandeshöhe (cm) der Kartoffelpflanzen zur Ernte 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 48: Statistische Auswertung (ANOVA) für die Bestandeshöhe der Kartoffelpflanzen zur Ernte 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
139	-	-	-	(0,077)	n.s.	n.s.
145	-	-	-	0,039	n.s.	n.s.
152	-	-	-	0,049	n.s.	n.s.
159	-	-	-	0,030	0,030	n.s.
166	-	-	-	(0,055)	n.s.	n.s.
174	-	-	-	0,007	0,002	(0,067)
180	-	-	-	(0,056)	n.s.	n.s.
187	-	-	-	0,048	(0,052)	n.s.
195	-	-	-	0,029	0,046	n.s.
202	-	-	-	0,022	0,027	n.s.
208	-	-	-	0,032	(0,058)	n.s.
216	-	-	-	0,033	(0,053)	n.s.
224	-	-	-	0,034	(0,053)	n.s.
229	-	-	-	0,032	0,035	n.s.
237	-	-	-	0,043	(0,059)	(0,059)
244	-	-	-	-	(0,064)	n.s.

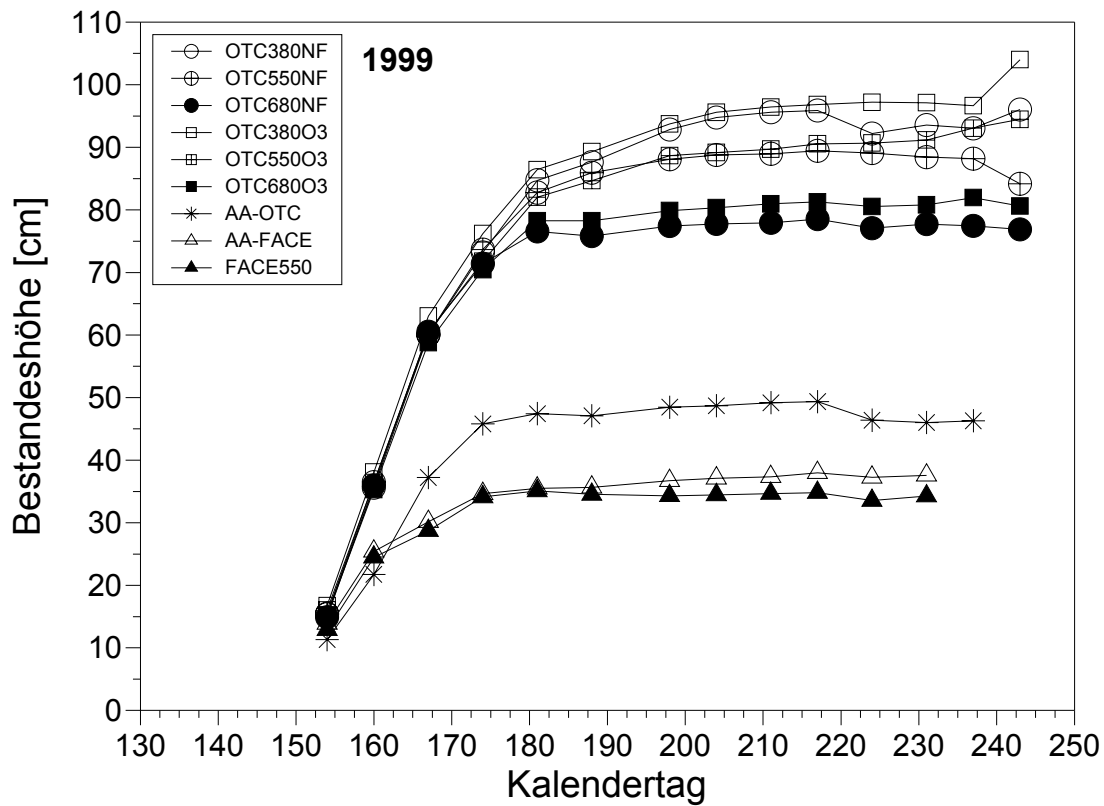


Abbildung 14: Bestandeshöhe (cm) der Kartoffelpflanzen zur Ernte 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 49: Statistische Auswertung (ANOVA) für die Bestandeshöhe der Kartoffelpflanzen zur Ernte 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
154	n.s.	n.s.	n.s.	(0,090)	0,025	n.s.
160	n.s.	n.s.	n.s.	0,027	(0,059)	n.s.
167	n.s.	n.s.	n.s.	0,038	0,042	n.s.
174	n.s.	n.s.	n.s.	0,037	0,015	n.s.
181	n.s.	n.s.	n.s.	0,027	0,000	n.s.
188	n.s.	n.s.	n.s.	0,022	0,003	n.s.
198	(0,084)	n.s.	n.s.	0,006	0,002	n.s.
204	(0,064)	n.s.	n.s.	0,003	0,001	n.s.
211	(0,065)	n.s.	n.s.	0,002	0,001	(0,092)
217	(0,060)	n.s.	n.s.	0,002	0,002	(0,058)
224	(0,053)	n.s.	n.s.	0,004	0,019	(0,076)
231	0,039	n.s.	n.s.	0,002	0,041	n.s.
237	0,032	n.s.	n.s.	0,002	-	-
243	0,016	n.s.	n.s.	-	-	-

3.5.2.3 *BLATTENTWICKLUNG*

Untersucht wurde die Blattentwicklung während der gesamten Vegetationsperiode 1998 und 1999 über die Anzahl der grünen und der seneszenten Blätter (Abbildung 15 bis Abbildung 18 und Tabelle 50 bis Tabelle 53). Für das Versuchsjahr 1998 war eine statistische Auswertung der CO₂- und Ozoneffekte sowie der Interaktion von CO₂ und Ozon auf die Anzahl der grünen und der seneszenten Blätter nicht möglich. Insgesamt wurden die beiden Parameter in beiden Versuchsjahren nur in sehr geringem Umfang signifikant durch die unterschiedlichen Behandlungsvarianten beeinflusst.

1999 bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen in den OTC keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der grünen Blätter. Tendenziell wurde in diesem Versuchsjahr am Tag 193 die Anzahl der seneszenten Blätter in den OTC durch erhöhtes CO₂ reduziert, am Tag 249 war dieser Effekt signifikant. In der FACE-Behandlung konnte unter erhöhten CO₂-Konzentrationen 1998 am Tag 173 ein tendenzieller, am Tag 225 ein signifikanter Anstieg der Anzahl grüner Blätter beobachtet werden. Im Gegensatz dazu war die Anzahl der grünen Blätter im Versuchsjahr 1999 am Tag 166 und 199 durch erhöhtes CO₂ in der FACE-Behandlung signifikant reduziert. Die Anzahl der seneszenten Blätter blieb 1998 und 1999 über den Vegetationszeitraum in der FACE-Behandlung von erhöhten CO₂-Konzentrationen unbeeinflusst. Zum Ende der Vegetationsperiode 1999 führten erhöhte Ozonkonzentrationen in den OTC am Tag 243 zu einer tendenziellen Reduktion der Anzahl der grünen Blätter, die am Tag 249 signifikant war. Parallel dazu stieg am Tag 243 die Anzahl der seneszenten Blätter durch erhöhtes Ozon tendenziell an, am Tag 249 war dieser Effekt signifikant. Signifikante Interaktionen von CO₂ und Ozon auf die Anzahl der grünen Blätter und seneszenten Blätter konnten in keinem der beiden Versuchsjahre festgestellt werden.

Ein signifikanter Kammereffekt bewirkte 1998 in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung eine höhere Anzahl grüner Blätter an den Tagen 152, 187, 224 und 237, am Tag 195 war dieser Effekt zumindest tendenziell zu beobachten. Im Versuchsjahr 1999 konnte am Tag 185 und Tag 189 ebenfalls in den OTC im Vergleich zu der kammerlosen Behandlung eine signifikant größere Anzahl grüner Blätter beobachtet werden, an den Tagen 199, 217, 223 und 231 war dieser Effekt tendenziell vorhanden. Die Anzahl der seneszenten Blätter war 1998 in den Kammern im Vergleich zur kammerlosen AA-OTC-Behandlung am Tag 216 tendenziell, am Tag 224 und 237 signifikant erhöht. 1999 konnten keine signifikanten Kammereffekte auf die Anzahl der seneszenten Blätter festgestellt werden.

Der Standort bewirkte 1998 nur am Tag 159 und 166 in der AA-OTC-Behandlung im Vergleich zur AA-FACE-Behandlung eine signifikant höhere Anzahl der grünen Blätter. 1999 war dagegen die Anzahl der grünen Blätter zu Beginn der Vegetationsperiode in der AA-FACE-Behandlung im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung signifikant am Tag 147, 160, 166 und tendenziell am Tag 154 höher. Zum Ende der Vegetationsperiode kehrte sich dieser Standorteffekt um, da die Anzahl der grünen Blätter in der AA-FACE-Behandlung im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung am Tag 217 tendenziell, am Tag 231 und 236 signifikant reduziert war. Auf die Anzahl der seneszenten Blätter wirkte sich der Standort (OTC im Vergleich zu FACE) im Versuchsjahr 1998 nicht signifikant aus. 1999 war die Anzahl der seneszenten Blätter in der AA-FACE-Behandlung im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung am Tag 193, 222 und 235 signifikant höher, am Tag 229 war dieser Effekt zumindest tendenziell vorhanden.

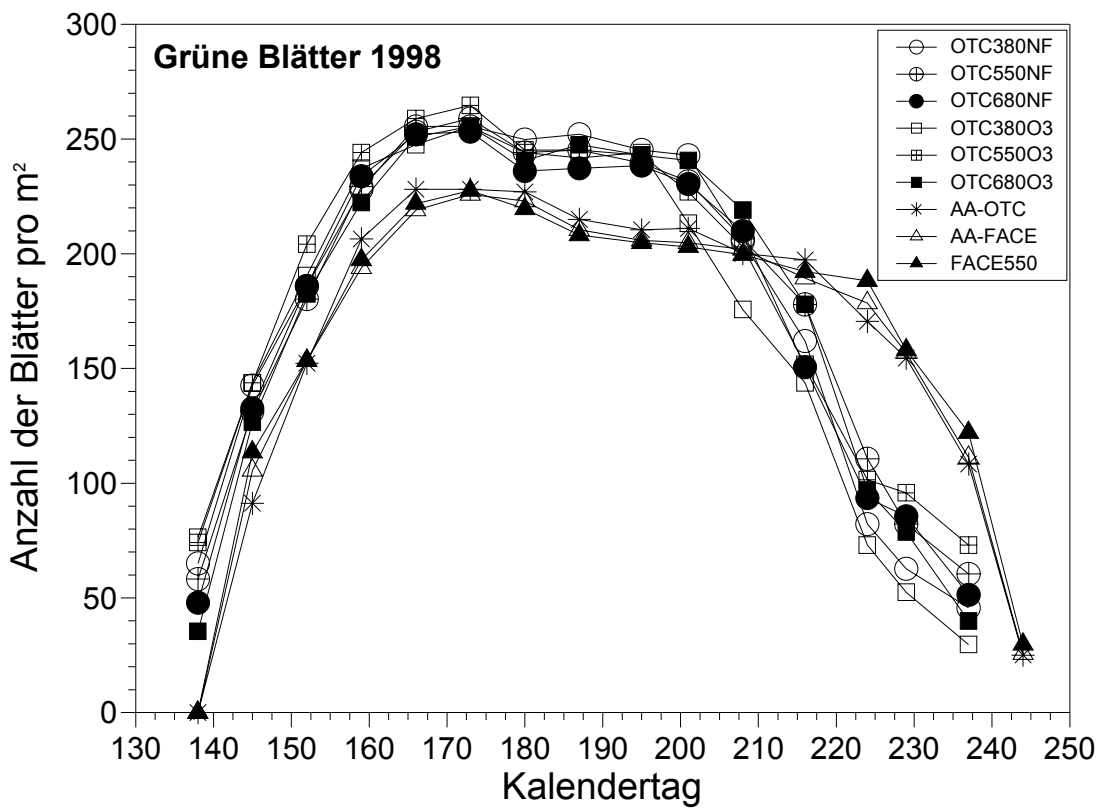


Abbildung 15: Anzahl der grünen Blätter (bezogen auf m²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 50: Statistische Auswertung (ANOVA) für die Anzahl der grünen Blätter von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
138	-	-	-	-	n.s.	n.s.
145	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
152	-	-	-	0,019	n.s.	n.s.
159	-	-	-	n.s.	0,032	n.s.
166	-	-	-	n.s.	0,015	n.s.
173	-	-	-	n.s.	n.s.	(0,095)
180	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
187	-	-	-	0,017	n.s.	n.s.
195	-	-	-	(0,090)	n.s.	n.s.
201	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
208	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
216	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
224	-	-	-	0,036	n.s.	0,042
229	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
237	-	-	-	0,040	n.s.	n.s.
244	-	-	-	-	n.s.	n.s.

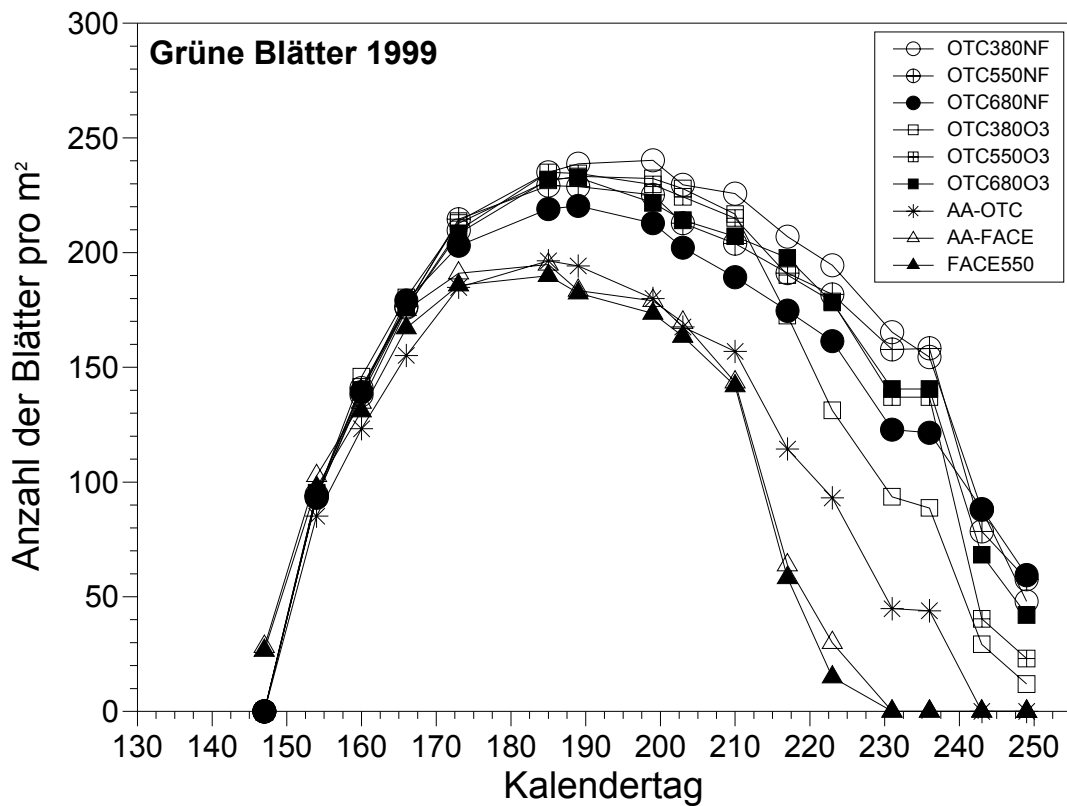


Abbildung 16: Anzahl der grünen Blätter (bezogen auf m²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 51: Statistische Auswertung (ANOVA) für die Anzahl der grünen Blätter von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
147	-	-	-	-	0,003	n.s.
154	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,077)	n.s.
160	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,026	n.s.
166	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,031	0,013
173	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
185	n.s.	n.s.	n.s.	0,019	n.s.	n.s.
189	n.s.	n.s.	n.s.	0,036	n.s.	n.s.
199	n.s.	n.s.	n.s.	(0,070)	n.s.	0,019
203	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
210	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
217	n.s.	n.s.	n.s.	(0,071)	(0,074)	n.s.
223	n.s.	n.s.	n.s.	(0,089)	n.s.	n.s.
231	n.s.	n.s.	n.s.	(0,066)	0,005	-
236	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,003	-
243	n.s.	(0,071)	n.s.	n.s.	-	-
249	n.s.	0,016	n.s.	n.s.	-	-

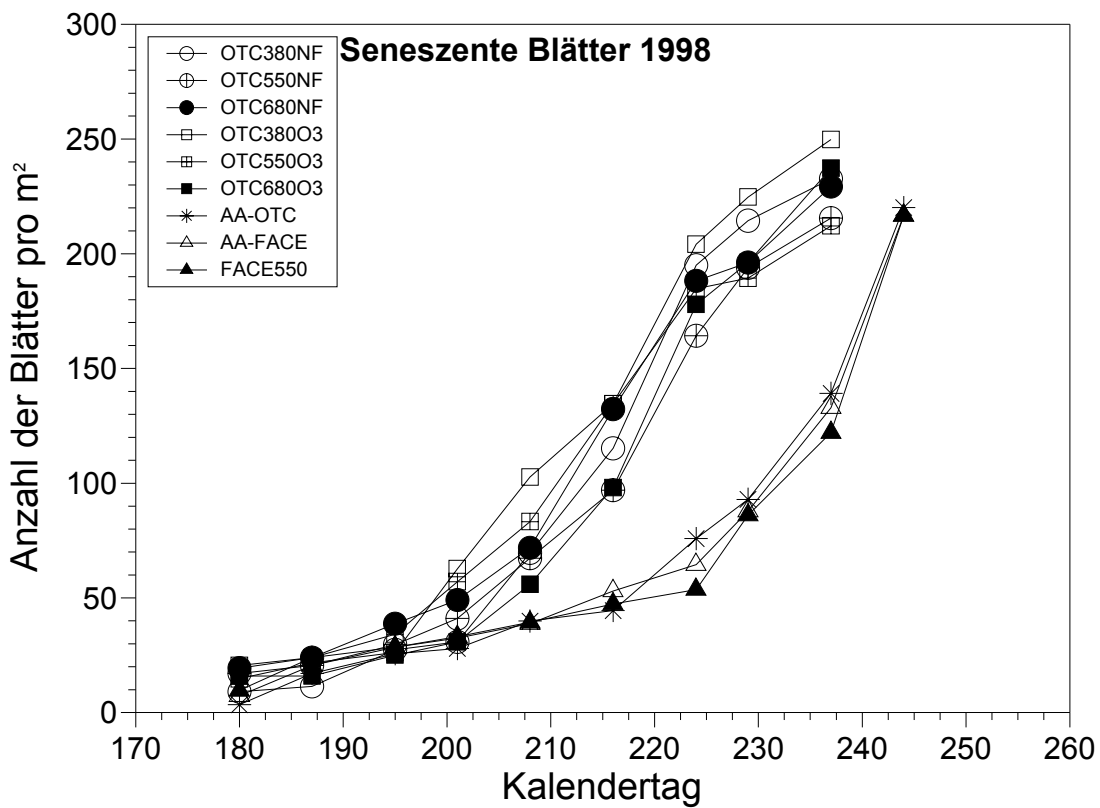


Abbildung 17: Anzahl der seneszenten Blätter (bezogen auf m²) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 52: Statistische Auswertung (ANOVA) für die Anzahl der seneszenten Blätter von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
180	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
187	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
195	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
201	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
208	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
216	-	-	-	(0,053)	n.s.	n.s.
224	-	-	-	0,037	n.s.	n.s.
229	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
237	-	-	-	0,027	n.s.	n.s.
244	-	-	-	-	n.s.	n.s.

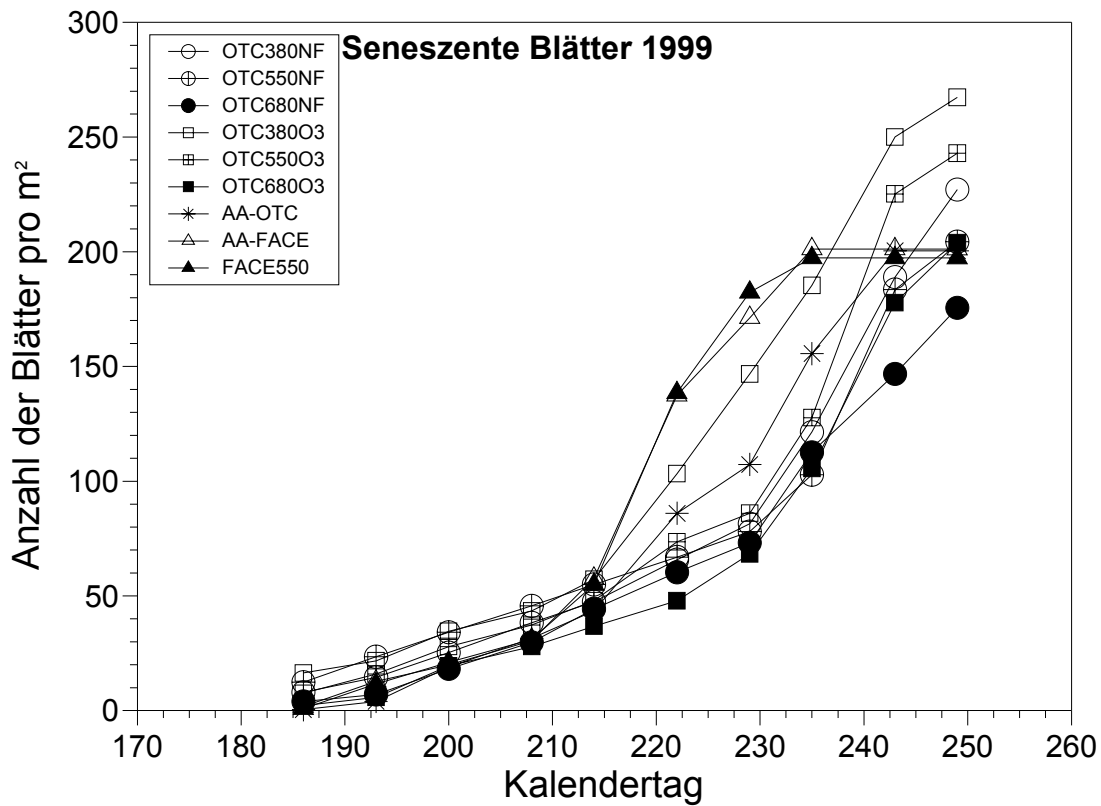


Abbildung 18: Anzahl der seneszenten Blätter (bezogen auf m^2) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO_2 - und O_3 -Behandlung.

Tabelle 53: Statistische Auswertung (ANOVA) für die Anzahl der seneszenten Blätter von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO_2 - und O_3 -Behandlung.

Kalendertag	OTC CO_2	OTC O_3	OTC $\text{CO}_2 \times \text{O}_3$	OTC Kammer	Standort	FACE CO_2
186	n.s.	n.s.	n.s.	-	n.s.	n.s.
193	(0,095)	n.s.	n.s.	n.s.	0,007	n.s.
200	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
208	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
214	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
222	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,035	n.s.
229	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,069)	n.s.
235	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,007	n.s.
243	n.s.	(0,073)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
249	0,031	0,033	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

3.5.2.4 LICHTINTERZEPTION

Um weitere Aussagen über die Bestandesentwicklung treffen zu können, wurde im Versuchsjahr 1998 die Lichtinterzeption des Kartoffelbestandes bestimmt (Abbildung 19). Eine statistische Auswertung der CO₂- und Ozoneffekte sowie der Interaktion von CO₂ und Ozon auf die Lichtinterzeption der Kartoffelpflanzen konnte 1998 in den OTC wegen der fehlenden Kammerwiederholung durch Schädlingsbefall nicht durchgeführt werden (Tabelle 54). In der FACE-Behandlung war am Tag 175 und Tag 211 unter erhöhten CO₂-Konzentrationen eine tendenziell höhere Lichtinterzeption festzustellen, dieser Effekt war am Tag 183 signifikant. Im Gegensatz dazu wurde am Tag 189 die Lichtinterzeption in der FACE-Behandlung durch erhöhtes CO₂ signifikant reduziert.

Im Versuchsjahr 1998 ergaben sich signifikante Kammereffekte auf die Lichtinterzeption am Tag 183, 211, 218, 224 und 231. Innerhalb der OTC wiesen die Pflanzen an diesen Tagen im Vergleich zur kammerlosen Behandlung eine signifikant niedrigere Lichtinterzeption auf.

Auch der Expositionsstandort wirkte sich im Versuchsjahr 1998 signifikant auf die Lichtinterzeption der Kartoffelbestände aus. Während die Lichtinterzeption am Tag 162 am AA-FACE-Standort im Vergleich zum AA-OTC-Standort tendenziell reduziert war, zeigten die Bestände am Tag 202, Tag 211 und Tag 224 am FACE-Standort eine signifikant höhere Lichtinterzeption, am Tag 218 war dieser Effekt zumindest tendenziell vorhanden.

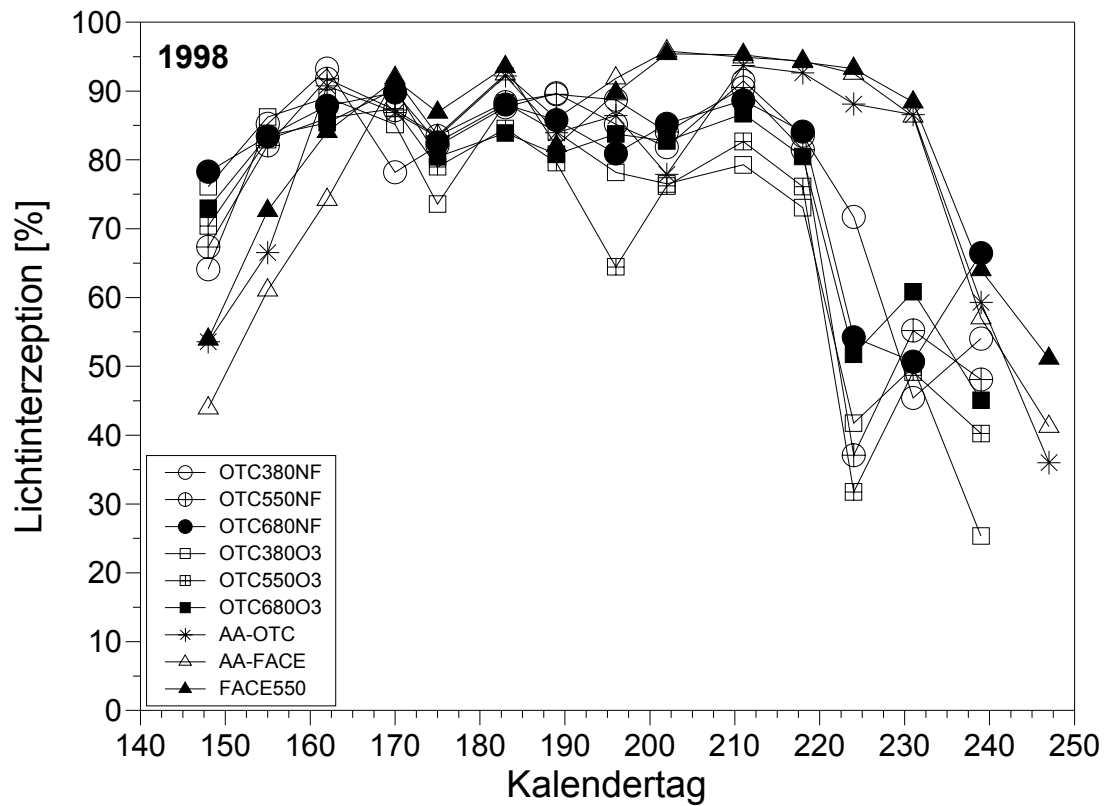


Abbildung 19: Lichtinterzeption (%) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 54: Statistische Auswertung (ANOVA) für die Lichtinterzeption der Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
148	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
155	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
162	-	-	-	n.s.	(0,080)	n.s.
170	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
175	-	-	-	n.s.	n.s.	(0,094)
183	-	-	-	0,038	n.s.	0,015
189	-	-	-	n.s.	n.s.	0,033
196	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
202	-	-	-	n.s.	0,014	n.s.
211	-	-	-	0,047	0,007	(0,072)
218	-	-	-	0,005	(0,096)	n.s.
224	-	-	-	0,026	0,008	n.s.
231	-	-	-	0,049	n.s.	n.s.
239	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
247	-	-	-	-	n.s.	n.s.

3.5.2.5 *BLATTFLÄCHENINDEX*

Im Versuchsjahr 1999 wurde der Effekt von erhöhten CO₂- und Ozonkonzentrationen auf den Blattflächenindex bestimmt (Abbildung 20). In den OTC ergab sich durch CO₂ nur am Tag 196 ein signifikanter CO₂-Effekt (Tabelle 55). Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten in der Behandlung mit Umgebungsozon einen Anstieg des Blattflächenindex, in Kombination mit einer Konzentration von 60 nl l⁻¹ Ozon kam es dagegen zu einer Abnahme des Blattflächenindex. In der FACE-Behandlung war der Blattflächenindex des Kartoffelbestandes am Tag 168 durch erhöhtes CO₂ im Vergleich zur Kontrollbehandlung signifikant größer, am Tag 196 ergab sich eine signifikante Abnahme des Blattflächenindex durch erhöhtes CO₂. Ein signifikanter Ozon-effekt auf den Blattflächenindex konnte in den OTC nur am Tag 196 beobachtet werden. Abhängig von der CO₂-Behandlung führte erhöhtes Ozon in der OTC380O3- und OTC680O3-Behandlung zu einem Anstieg des Blattflächenindex, in der OTC550O3-Behandlung nahm der Blattflächenindex des Kartoffelbestandes durch die erhöhte Ozonexposition ab.

Der Expositionsstandort (OTC im Vergleich zu FACE) beeinflusste 1999 den Blattflächenindex zu verschiedenen Beobachtungsterminen. Während am Tag 159 der Blattflächenindex am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort tendenziell höher war, ergab sich am Tag 192, Tag 196 und Tag 224 am FACE-Standort ein signifikant niedrigerer Blattflächenindex, am Tag 210 und Tag 217 war dieser Effekt tendenziell zu beobachten.

Innerhalb der Kammern war der Blattflächenindex des Kartoffelbestandes im Vergleich zu der kammerlosen Behandlung während der gesamten Versuchsperiode größer. Die statistische Auswertung ergab jedoch nur für Tag 217 einen tendenziellen Kammereffekt, dieser war am Tag 231 und 241 signifikant.

Eine signifikante Interaktion von CO₂ und Ozon auf den Blattflächenindex des Kartoffelbestandes ergab sich nur am Tag 196, am Tag 250 konnte lediglich eine tendenzielle Interaktion von CO₂ und Ozon auf den Blattflächenindex des Kartoffelbestandes nachgewiesen werden.

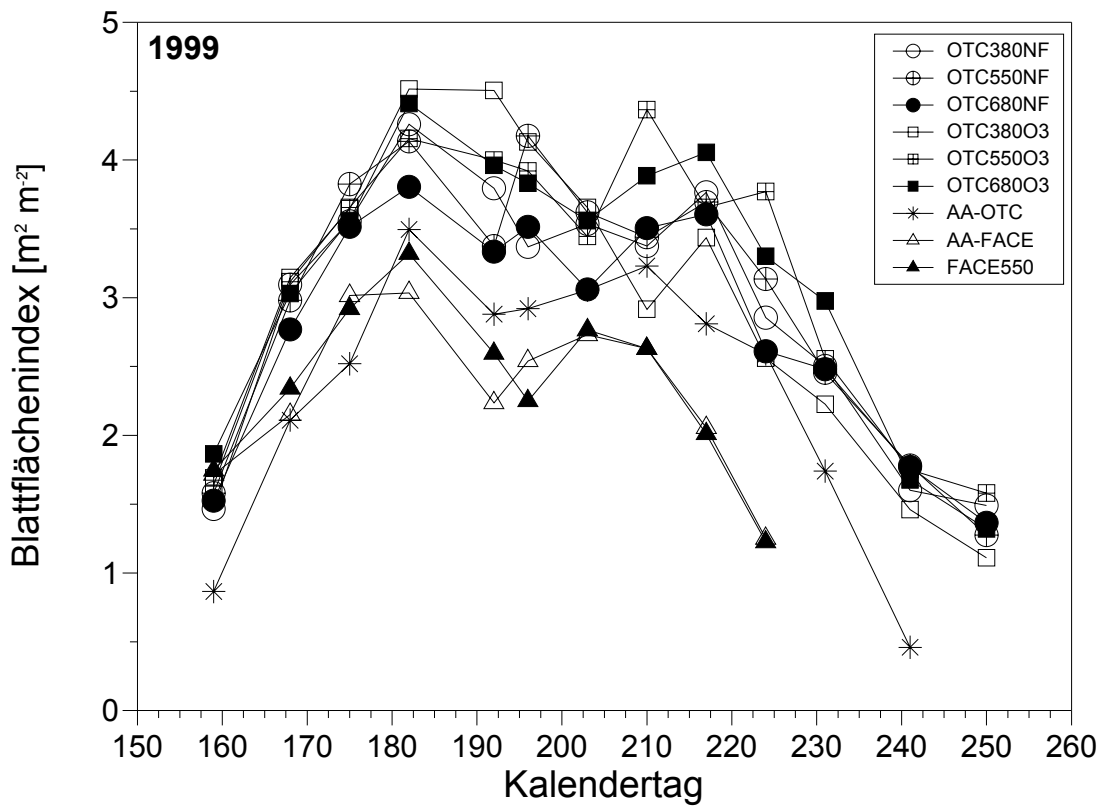


Abbildung 20: Blattflächenindex (m^2 pro m^2) von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO_2 - und O_3 -Behandlung.

Tabelle 55: Statistische Auswertung (ANOVA) für den Blattflächenindex von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO_2 - und O_3 -Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
159	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,072)	-
168	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,027
175	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
182	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
192	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,009	n.s.
196	0,036	0,026	0,012	n.s.	0,017	0,028
203	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
210	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,056)	n.s.
217	n.s.	n.s.	n.s.	(0,090)	(0,080)	n.s.
224	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,033	n.s.
231	n.s.	n.s.	n.s.	0,030	-	-
241	n.s.	n.s.	n.s.	0,009	-	-
250	n.s.	n.s.	(0,066)	-	-	-

3.5.2.6 SICHTBARE OZONSCHÄDEN AN DEN BLÄTTERN

An den Blättern der Kartoffelpflanzen konnten 1999 signifikante Ozonschäden bonitiert werden. Während in den OTC die Pflanzen in den Behandlungen ohne Ozon keine Schäden zeigten, wurden an den Pflanzen mit Ozonbehandlung ab Tag 200 die ersten Schäden beobachtet (Abbildung 21 und Tabelle 56). Auch die Pflanzen der AA- und der FACE-Behandlung zeigten ab Tag 222 ebenfalls sichtbare Ozonschäden, diese waren jedoch mit einer Größenordnung von kleiner ein Prozent geschädigter Blattfläche vergleichsweise gering. Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten 1999 in der OTC- und in der FACE-Behandlung keinen signifikanten Effekt auf die sichtbaren Ozonschäden an den Blättern der Kartoffelpflanzen. Signifikante Interaktionen von CO₂ und O₃ auf die sichtbaren Ozonschäden an den Blättern konnten ebenfalls nicht festgestellt werden, jedoch schien erhöhtes CO₂ die durch Ozon induzierten Schäden der Blätter mit Zunahme der CO₂-Konzentrationen zu minimieren.

Ein signifikanter Standorteffekt (OTC im Vergleich zu FACE) auf die sichtbaren Ozonschäden konnte 1999 nur am Tag 214 beobachtet werden. An diesem Termin traten bereits am FACE-Standort die ersten sichtbaren Ozonschäden auf, am OTC-Standort waren diese erst am Tag 222 festzustellen. Ein signifikanter Kammereffekt auf die sichtbaren Ozonschäden ergab sich nur von Tag 222 bis Tag 235. Während innerhalb der OTC keine sichtbaren Schäden durch Ozon nachgewiesen werden konnten, waren in der kammerlosen Behandlung signifikant mehr Ozonschäden an den Blättern zu beobachten.

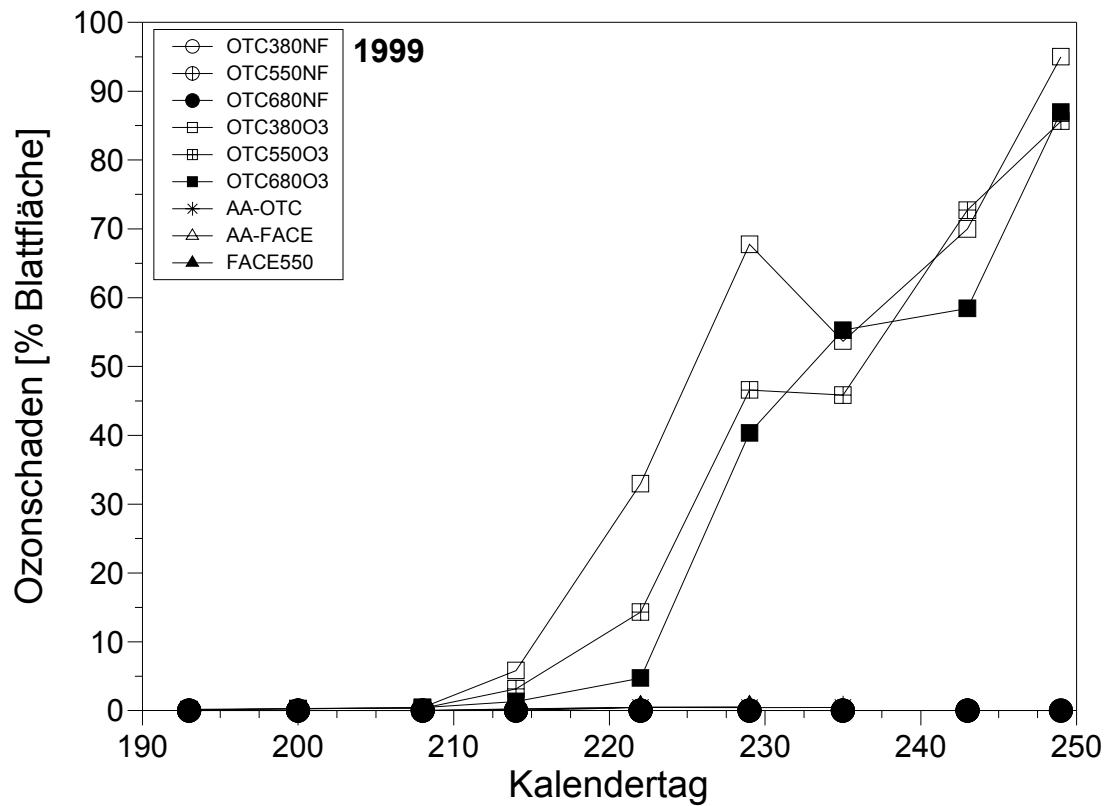


Abbildung 21: Sichtbare Ozonschäden an den Blättern der Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 56: Statistische Auswertung (ANOVA) der sichtbaren Ozonschäden an den Blättern der Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
193	n.s.	0,008	n.s.	-	-	-
200	n.s.	0,011	n.s.	-	-	-
208	n.s.	0,000	n.s.	-	-	-
214	n.s.	0,043	n.s.	-	0,038	n.s.
222	n.s.	0,041	n.s.	0,000	n.s.	n.s.
229	n.s.	0,000	n.s.	0,005	n.s.	-
235	n.s.	0,000	n.s.	0,008	-	-
243	n.s.	0,000	n.s.	-	-	-
249	n.s.	0,000	n.s.	-	-	-

3.5.2.7 CHLOROPHYLLGEHALT

1998 und 1999 wurde der Einfluss erhöhter CO₂- und Ozonkonzentrationen auf den Chlorophyllgehalt des jüngsten, voll entwickelten Blattes im oberen Bestandesteil über die Bestimmung des SPAD-Wertes untersucht (Abbildung 22 und Abbildung 23). Eine statistische Auswertung der CO₂- und Ozoneffekte sowie der Interaktion von CO₂ und Ozon auf den Chlorophyllgehalt der Blätter war 1998 in den OTC durch den Ausfall der Kammerwiederholung nicht möglich (Tabelle 57 und Tabelle 58). Insgesamt wurde der Chlorophyllgehalt in beiden Versuchsjahren nur in geringem Umfang durch die unterschiedlichen Behandlungsvarianten beeinflusst.

Im Versuchsjahr 1999 konnte in der OTC- und in der FACE-Behandlung während der gesamten Vegetationsperiode kein signifikanter Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf den Chlorophyllgehalt der Blätter festgestellt werden. Dagegen bewirkten 1998 erhöhte CO₂-Konzentrationen am Tag 145 in der FACE-Behandlung einen signifikanten Anstieg des Chlorophyllgehaltes, am Tag 195 war der Chlorophyllgehalt in den Blättern dagegen durch erhöhtes CO₂ signifikant reduziert. Erhöhte Ozonkonzentrationen führten 1999 am Tag 161 in den OTC unabhängig von der CO₂-Behandlung zu signifikant höheren Chlorophyllgehalten in den Blättern, am Tag 243 wurde eine tendenzielle Reduktion des Chlorophyllgehaltes durch Ozon festgestellt. Eine Interaktion von CO₂ und Ozon auf den Chlorophyllgehalt ergab sich im Versuchsjahr 1999 nur tendenziell am Tag 229.

Die Exposition der Pflanzen in den OTC bewirkte 1998 im Vergleich zur kammerlosen Behandlung am Tag 152 eine signifikante Abnahme des Chlorophyllgehaltes in den Blättern, die ebenfalls tendenziell am Tag 224 beobachtet werden konnte. An den Tagen 187, 195 und 201 wiesen die Pflanzen in den Kammern im Vergleich zur kammerlosen Behandlung signifikant höhere Chlorophyllgehalte auf. Auch 1999 konnte am Tag 161 in den OTC ein höherer Chlorophyllgehalt in den Blättern nachgewiesen werden, am Tag 235 war dieser Kammereffekt zumindest tendenziell nachzuweisen. Uneinheitliche Effekte ergaben sich 1998 bezüglich des Standorteffekts auf den Blattchlorophyllgehalt. Während am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort am Tag 166 eine tendenzielle und am Tag 195, 216 und 237 eine signifikante Reduktion des Chlorophyllgehaltes in den Blättern beobachtet wurde, besaßen die Blätter an den Tagen 201, 209 und 260 in der AA-FACE-Behandlung im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung tendenziell einen höheren Chlorophyllgehalt. Auch im Versuchsjahr 1999 wiesen die Blätter am FACE-Standort am Tag 161, 174 und 180 einen signifikant höheren Chlorophyllgehalt in den Blättern auf, am Tag 167 war dieser Effekt zumindest tendenziell vorhanden.

Am Tag 208 war der Chlorophyllgehalt der Blätter dagegen am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort tendenziell niedriger.

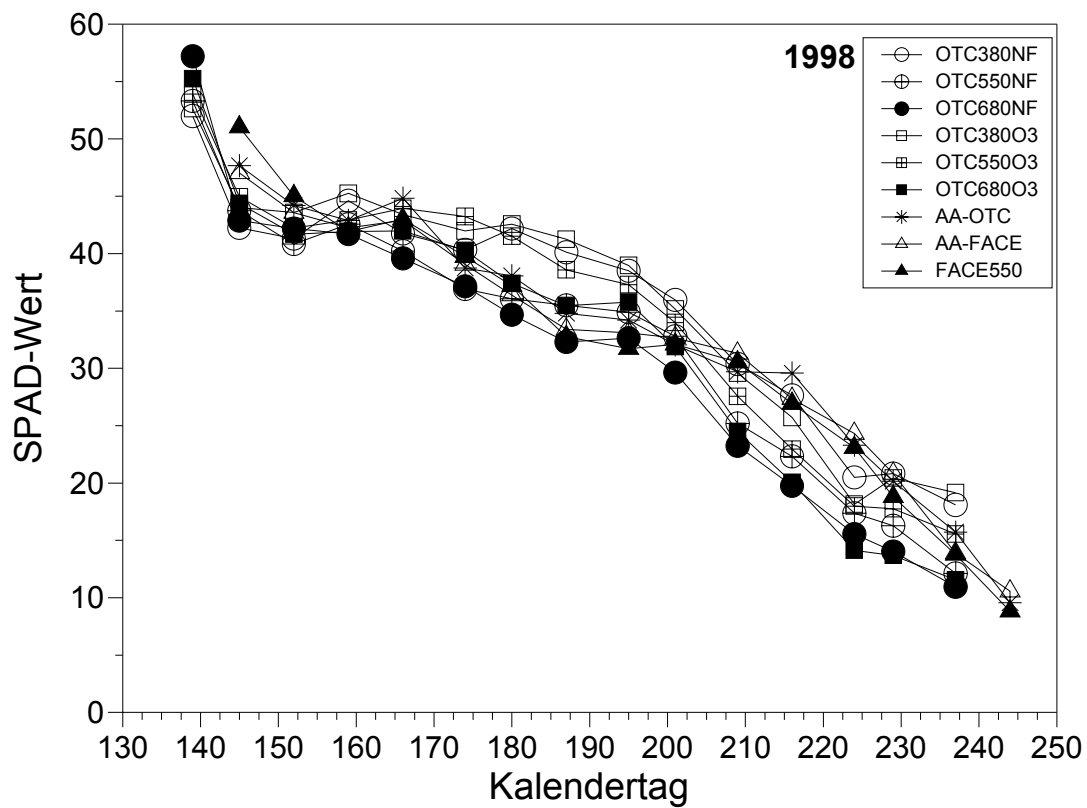


Abbildung 22: SPAD-Werte der jüngsten, voll entwickelten Blätter im oberen Bestandesteil von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 57: Statistische Auswertung (ANOVA) der SPAD-Werte der jüngsten, voll entwickelten Blätter im oberen Bestandesteil von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1998 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
139	-	-	-	-	-	-
145	-	-	-	n.s.	n.s.	0,012
152	-	-	-	0,004	n.s.	n.s.
159	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
166	-	-	-	n.s.	(0,098)	n.s.
174	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
180	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
187	-	-	-	0,003	n.s.	n.s.
195	-	-	-	0,013	0,023	0,016
201	-	-	-	0,000	(0,063)	n.s.
209	-	-	-	n.s.	(0,056)	n.s.
216	-	-	-	n.s.	0,044	n.s.
224	-	-	-	(0,091)	(0,060)	n.s.
229	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
237	-	-	-	n.s.	0,035	n.s.
244	-	-	-	-	n.s.	n.s.

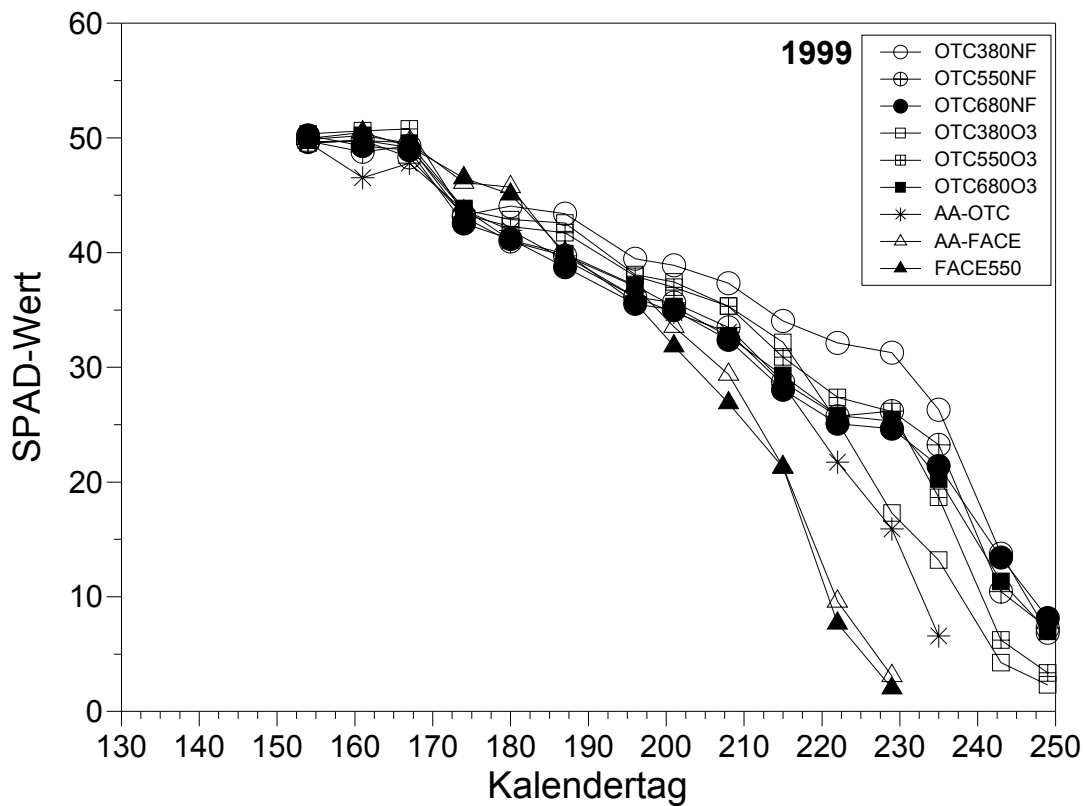


Abbildung 23: SPAD-Werte der jüngsten, voll entwickelten Blätter im oberen Bestandteil von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Tabelle 58: Statistische Auswertung (ANOVA) der SPAD-Werte der jüngsten, voll entwickelten Blätter im oberen Bestandteil von Kartoffelpflanzen während der gesamten Vegetationsperiode 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung.

Kalendertag	OTC _{CO2}	OTC _{O3}	OTC _{CO2xO3}	OTC _{Kammer}	Standort	FACE _{CO2}
154	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
161	n.s.	0,037	n.s.	0,014	0,010	n.s.
167	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,094)	n.s.
174	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,046	n.s.
180	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,027	n.s.
187	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
196	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
201	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
208	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,067)	n.s.
215	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
222	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
229	n.s.	n.s.	(0,096)	n.s.	n.s.	n.s.
235	n.s.	n.s.	n.s.	(0,067)	-	-
243	n.s.	(0,093)	n.s.	-	-	-
249	n.s.	n.s.	n.s.	-	-	-

3.5.3 OBERIRDISCHE BIOMASSE

In den Versuchsjahren 1998 und 1999 wurde der Einfluss erhöhter CO₂- und Ozonkonzentrationen auf die oberirdische Gesamt-, Blatt- und Stängelbiomasse der Kartoffelpflanzen untersucht (Tabelle 59).

In keinem der beiden Versuchsjahre konnte in den OTC ein signifikanter CO₂- und Ozoneffekt sowie eine Interaktion von CO₂ und Ozon auf die untersuchten Parameter beobachtet werden. Lediglich in den OTC und in der FACE-Behandlung bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen im Versuchsjahr 1999 eine tendenzielle Abnahme der Stängelbiomasse.

Ein signifikanter Kammereffekt konnte 1999 auf die oberirdische Gesamt- und Stängelbiomasse beobachtet werden. Innerhalb der OTC war die Gesamtbiomasse und die Stängelbiomasse im Vergleich zur kammerlosen Behandlung größer. Die Blattbiomasse wurde im Versuchsjahr 1999 in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung tendenziell erhöht.

Der Expositionsstandort (OTC im Vergleich zu FACE) zeigte nur 1999 einen tendenziellen Einfluss auf die Stängelbiomasse. Am FACE-Standort war im Vergleich zum OTC-Standort eine geringere Stängelbiomasse festzustellen.

Tabelle 59: Oberirdische Biomasse (Trockengewicht bezogen auf m²) von Kartoffelpflanzen zur Ernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998			1999		
	Gesamt [g TG m ⁻²]	Blatt [g TG m ⁻²]	Stängel [g TG m ⁻²]	Gesamt [g TG m ⁻²]	Blatt [g TG m ⁻²]	Stängel [g TG m ⁻²]
OTC380NF	139,1	106,0	33,11	226,1±11,7	152,1±10,3	73,94±1,39
OTC550NF	132,9	101,8	31,09	257,5±99,8	182,6±91,6	74,88±8,20
OTC680NF	122,4	92,26	30,12	193,2±34,9	129,7±32,7	63,53±2,17
OTC380O3	136,5	107,3	29,20	253,6±26,8	172,1±13,5	81,44±13,32
OTC550O3	127,9	98,52	29,38	233,2±9,8	161,4±9,8	71,83±0,07
OTC680O3	109,3	87,32	21,93	185,5±73,7	119,4±67,4	66,11±6,33
AA-OTC	113,6±18,0	94,11±15,36	19,50±2,69	158,4±6,5	117,5±13,0	40,91±6,52
AA-FACE	123,8±13,5	106,4±12,5	17,38±0,94	149,2±12,6	125,6±13,6	23,58±0,96
FACE550	117,3±4,0	100,2±3,4	17,09±0,62	135,9±7,0	115,1±6,8	20,84±0,12
Statistische Auswertung (ANOVA)						
OTC _{CO2}	-	-	-	n.s.	n.s.	(0,097)
OTC _{O3}	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	n.s.	0,019	(0,098)	0,020
Standort	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,065)
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,057)

3.5.4 ALLGEMEINE ERTRAGSQUALITÄT

3.5.4.1 FRISCHERTRAG DER KNOLLEN

Der Gesamtknollenertrag der Versuchsjahre 1998 und 1999 wurde in Knollen der Größenklasse kleiner 35 mm, größer 35 mm (kommerzieller Ertrag) und größer 50 mm (industrieller Ertrag) unterteilt. In Tabelle 60 sind die Behandlungsmittelwerte für den Knollenertrag bezogen auf das Frischgewicht der jeweiligen Größensortierungen und die Ergebnisse der statistischen Analyse angegeben.

Der höchste Frischertrag der Gesamtknollen wurde 1998 in der OTC550NF-Behandlung und 1999 in der OTC680O3-Behandlung festgestellt. Signifikante Effekte erhöhter CO₂-Konzentrationen in den OTC und in der FACE-Behandlung ergaben sich jedoch in keinem der beiden Versuchsjahre auf den Frischertrag der Gesamtknollen sowie der jeweiligen Größensortierungen. Auch zeigte erhöhtes Ozon in den OTC in beiden Versuchsjahren keinen signifikanten Effekt auf die untersuchten Parameter. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und O₃ auf den Frischertrag der Knollensortierungen konnte ebenfalls nicht beobachtet werden.

Der Knollenfrischertrag wurde nur 1999 durch den Expositionsstandort (OTC im Vergleich zu FACE) signifikant beeinflusst. Am FACE-Standort konnte im Vergleich zum OTC-Standort ein höherer Gesamtertrag und ein gesteigerter kommerzieller Ertrag festgestellt werden. Der Frischertrag der Knollensortierung kleiner 35 mm war dagegen am FACE-Standort signifikant niedriger. 1998 wurden signifikante Kammereffekte nur auf den industriellen Ertrag beobachtet, innerhalb der OTC war dieser im Vergleich zur kammerlosen Behandlung reduziert.

Tabelle 60: Knollenertrag (Frischgewicht bezogen auf m²) in den Größensortierungen der Kartoffelknollen zur Erndernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998				1999			
	Gesamt [g FG m ⁻²]	Größensortierung			Gesamt [g FG m ⁻²]	Größensortierung		
		< 35 mm [g FG m ⁻²]	> 35 mm [g FG m ⁻²]	> 50 mm [g FG m ⁻²]		< 35 mm [g FG m ⁻²]	> 35 mm [g FG m ⁻²]	> 50 mm [g FG m ⁻²]
OTC380NF	4159	870,4	3289	260,2	7174±1042	806,7±37,9	6367±1004	3723±813
OTC550NF	4741	609,6	4132	1306	8026±1577	726,2±63,4	7300±1640	4517±1437
OTC680NF	4565	620,3	3944	1242	7735±1028	891,8±211,8	6843±817	4170±432
OTC380O3	3999	844,3	3155	639,9	6041±694	810,1±340,1	5231±354	2416±18
OTC550O3	4590	808,1	3782	1410	7238±140	688,4±204,8	6550±65	3748±1121
OTC680O3	4557	767,7	3789	1144	8344±357	880,8±3,4	7464±361	4612±371
AA-OTC	4552±123	519,7±275,1	4032±152	982,5±18,2	6293±82	853,4±1,9	5440±84	1988±237
AA-FACE	4550±208	449,9±219,4	4100±427	1195±205	7364±136	744,7±31,7	6619±168	2685±469
FACE550	4677±6	583,7±232,5	4093±227	478,1±304,5	7862±216	798,2±42,7	7063±173	2725±713
Statistische Auswertung (ANOVA)								
OTC _{CO2}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{O3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	n.s.	0,02	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Standort	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,011	0,04	0,012	n.s.
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

3.5.4.2 TROCKENERTRAG DER KNOLLEN

Der Knollenertrag bezogen auf das Trockengewicht erfuhr zum Zeitpunkt der Erndernte überwiegend im Versuchsjahr 1999 eine Beeinflussung durch die verschiedenen Behandlungen. Die Behandlungsmittelwerte für den Gesamtertrag, den Ertrag der jeweiligen Größensortierungen und die Ergebnisse der statistischen Analyse sind in Tabelle 61 angegeben.

Erhöhte CO₂-Konzentrationen zeigten 1999 in den OTC einen tendenziellen Effekt auf den Trockenertrag der Gesamtknollen und der Knollensortierung größer 35 mm. Bei Exposition mit Konzentrationen von 550 µl l⁻¹ CO₂ stieg der Trockenertrag der Gesamtknollen in den OTC um 12,6 % und bei Konzentrationen von 680 µl l⁻¹ CO₂ um 12,3 % im Vergleich zur Kontrollbehandlung mit 380 µl l⁻¹ CO₂ an. Der Trockenertrag in der Knollensortierung größer 35 mm nahm bei Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ um 15,4 % und bei Behandlung mit 680 µl l⁻¹ CO₂ um 12,0 % im Vergleich zur Kontrolle (380 µl l⁻¹ CO₂) zu. In der FACE550-Behandlung führte erhöhtes CO₂ im Vergleich zur AA-FACE-Behandlung ebenfalls zu einem signifikanten Anstieg des Trockenertrags der Gesamtknollen um 8,8 % und der Knollensortierung größer 35 mm um 8,7 %. Dagegen wurde 1998 der industrielle Knollenertrag in der FACE-Exposition durch erhöhtes CO₂ (550 µl l⁻¹ CO₂ im Vergleich zu 380 µl l⁻¹ CO₂) tendenziell reduziert. Signifikante Ozonwirkungen sowie Interaktionen von CO₂ und Ozon auf den Trockenertrag der Gesamtknollen

und der jeweiligen Größensortierungen konnten in den OTC in keinem der Versuchsjahre beobachtet werden.

Ein signifikanter Standorteffekt (OTC im Vergleich zu FACE) auf den Trockenertrag der Knollen konnte nur 1999 festgestellt werden. Im Vergleich zum OTC-Standort war der Trockenertrag der Gesamtknollen und der Sortierung größer 35 mm am FACE-Standort signifikant höher. Ein signifikanter Kammereffekt wurde nur 1998 auf den industriellen Knollenertrag festgestellt. Innerhalb der OTC wiesen die Knollen der Sortierung größer 50 mm im Vergleich zur kammerlosen Behandlung einen signifikant niedrigeren Trockenertrag auf. 1999 konnte ein tendenzieller Kammereffekt auf den industriellen Ertrag festgestellt werden, allerdings war der Trockenertrag in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung höher.

Tabelle 61: Knollenertrag (Trockengewicht bezogen auf m²) in den Größensortierungen der Kartoffelknollen zur Endernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998				1999			
	Gesamt [g TG m ⁻²]	Größensortierung			Gesamt [g TG m ⁻²]	Größensortierung		
		< 35 mm [g TG m ⁻²]	> 35 mm [g TG m ⁻²]	> 50 mm [g TG m ⁻²]		< 35 mm [g TG m ⁻²]	> 35 mm [g TG m ⁻²]	> 50 mm [g TG m ⁻²]
OTC380NF	1046	154,3	891,8	130,2	1740±232	195,8±6,8	1544±225	902,7±186,3
OTC550NF	1186	152,7	1034	327,4	1960±359	177,6±17,9	1782±377	1102±337
OTC680NF	1145	124,7	1020	308,9	1954±221	225,1±49,1	1729±172	1054±88
OTC380O3	913,6	193,3	720,3	137,9	1393±201	187,6±83,8	1205±117	556,2±20,6
OTC550O3	1160	279,3	880,5	366,5	1733±29	164,7±48,6	1568±19	897,6±270,7
OTC680O3	1139	124,7	1014	285,2	2001±97	211,2±0,4	1790±97	1106±95
AA-OTC	1167±44	174,7±145,7	992,7±101,8	254,0±2,7	1485±1	201,5±2,9	1284±4	469,6±61,8
AA-FACE	1187±76	136,2±9,5	1051±86	312,3±57,4	1766±30	189,4±8,2	1576±38	639,4±112,3
FACE550	1241±6	137,5±84,8	1103±91	142,9±58,0	1921±18	208,3±6,2	1713±12	662,5±184,6
Statistische Auswertung (ANOVA)								
OTC _{CO2}	-	-	-	-	(0,088)	n.s.	(0,079)	n.s.
OTC _{O3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	n.s.	0,017	n.s.	n.s.	n.s.	(0,089)
Standort	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,006	n.s.	0,009	n.s.
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	(0,099)	0,024	n.s.	0,040	n.s.

3.5.4.3 KNOLLENZAHLEN UND GRÖßENSORTIERUNG

Die Anzahl der Knollen wurde in beiden Untersuchungsjahren 1998 und 1999 nur geringfügig durch die unterschiedlichen Behandlungen beeinflusst. Tabelle 62 enthält die Behandlungsmittelwerte für die Anzahl der Knollen in der jeweiligen Größensortierung und die Ergebnisse der statistischen Auswertung.

In beiden Versuchsjahren ergaben sich weder in den OTC noch in der FACE-Behandlung signifikante CO₂- und Ozoneffekte. Erhöhte Ozonkonzentrationen (60 nl l⁻¹ Ozon im Vergleich zu Umgebungsozon) führten lediglich im Versuchsjahr 1999 in den OTC zu einer tendenziellen

Abnahme der Knollenzahl in der Sortierung größer 50 mm. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und O₃ auf die Anzahl der Knollen in den jeweiligen Größensortierungen konnte in keinem der beiden Versuchsjahre festgestellt werden.

Ein signifikanter Standorteffekt (OTC im Vergleich zu FACE) auf die Anzahl der Knollen in den jeweiligen Größensortierungen konnte 1998 und 1999 ebenfalls nicht beobachtet werden. Dagegen bewirkte ein Kammereffekt im Versuchsjahr 1999 in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung eine signifikant höhere Knollenzahl in der Größensortierung größer 50 mm.

Tabelle 62: Knollenzahl (bezogen auf m²) in den Größensortierungen der Kartoffelknollen zur Ernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998				1999			
	Größensortierung				Größensortierung			
	Gesamt [Anzahl m ⁻²]	< 35 mm [Anzahl m ⁻²]	> 35 mm [Anzahl m ⁻²]	> 50 mm [Anzahl m ⁻²]	Gesamt [Anzahl m ⁻²]	< 35 mm [Anzahl m ⁻²]	> 35 mm [Anzahl m ⁻²]	> 50 mm [Anzahl m ⁻²]
OTC380NF	119,8	69,29	50,47	2,566	161,4±18,3	87,18±11,39	74,23±6,93	28,71±3,96
OTC550NF	107,8	49,62	58,17	11,12	156,2±25,7	79,13±12,87	77,03±12,9	31,51±9,90
OTC680NF	104,4	47,90	56,46	10,27	170,2±33,7	96,29±29,22	73,88±4,46	30,11±0,99
OTC380O3	129,2	77,84	51,33	5,99	145,3±25,3	82,63±20,80	62,68±4,46	17,16±0,50
OTC550O3	146,0	94,67	51,33	11,41	139,7±27,2	71,43±20,80	68,28±6,44	24,86±5,45
OTC680O3	115,2	61,59	53,61	9,12	172,3±1,0	96,64±0,99	75,63±1,98	30,46±0,50
AA-OTC	93,53±19,36	36,50±19,36	57,03±0,00	7,98±0,00	152,7±4,0	79,83±8,91	72,83±4,95	15,76±1,49
AA-FACE	87,25±5,65	32,51±13,71	54,75±8,07	9,12±1,61	159,1±0,8	76,99±7,26	82,12±6,45	21,67±3,23
FACE550	94,67±8,07	35,36±9,68	59,31±1,61	3,99±2,42	166,0±8,8	74,14±4,84	91,82±4,03	23,38±5,65
Statistische Auswertung (ANOVA)								
OTC _{CO2}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{O3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	(0,081)
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	0,049
Standort	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

3.5.5 OPTISCHE ERTRAGSQUALITÄT

Als optische Qualitätsparameter wurde der Anteil der schorfigen, der deformierten und der grünen Knollen am industriellen Ertrag bestimmt. Tabelle 63 enthält die Behandlungsmittelwerte und die Ergebnisse der statistischen Auswertung.

Die untersuchten Parameter wurden nur in sehr geringem Umfang durch die verschiedenen Behandlungen beeinflusst. In den OTC konnten in beiden Versuchsjahren keine signifikanten CO₂- und Ozonwirkungen auf die untersuchten optischen Parameter beobachtet werden. Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten lediglich 1999 in der FACE-Behandlung einen signifikanten Anstieg des Anteils der deformierten Knollen. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und O₃ auf

den Anteil schorfiger, deformierter und grüner Knollen am industriellen Knollenertrag ergab sich in keinem der beiden Versuchsjahre.

In den OTC war der Anteil der schorfigen Knollen im Versuchsjahr 1998 im Vergleich zur kammerlosen Behandlung tendenziell niedriger, im Versuchsjahr 1999 dagegen signifikant erhöht. Ein geringerer Anteil an deformierten Knollen in den OTC im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung deutete 1998 ebenfalls auf einen tendenziellen Kammereffekt hin. Ein signifikanter Standorteffekt (OTC im Vergleich zu FACE) auf die untersuchten optischen Parameter ergab sich in keinem der beiden Versuchsjahre.

Tabelle 63: Optische Qualität der Kartoffelknollen (>50 mm) zur Ernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998			1999		
	Schorfige Knollen [%]	Deformierte Knollen [%]	Grüne Knollen [%]	Schorfige Knollen [%]	Deformierte Knollen [%]	Grüne Knollen [%]
OTC380NF	6,213	0,000	0,000	99,75±0,01	3,378±4,778	5,753±8,136
OTC550NF	25,59	2,684	0,000	99,83±0,18	6,995±5,038	9,932±0,223
OTC680NF	27,07	0,509	0,000	98,79±1,34	12,25±14,76	9,553±2,157
OTC380O3	13,75	0,768	2,628	99,90±0,14	8,620±12,191	12,37±6,20
OTC550O3	30,52	0,774	0,000	99,85±0,22	9,108±12,881	8,159±8,258
OTC680O3	24,88	0,000	0,000	99,37±0,04	2,515±1,248	5,944±4,977
AA-OTC	21,38±1,02	1,011±0,075	0,000±0,000	99,21±0,08	0,000±0,000	0,000±0,000
AA-FACE	24,65±5,16	0,700±0,990	1,252±1,771	97,27±3,86	0,000±0,000	0,000±0,000
FACE550	10,11±6,43	0,338±0,478	0,000±0,000	100,0±0,0	10,61±1,12	0,000±0,000
Statistische Auswertung (ANOVA)						
OTC _{CO2}	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{O3}	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	(0,052)	(0,058)	-	0,010	n.s.	n.s.
Standort	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	-
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,005	-

3.5.6 PHYSIKALISCHE ERTRAGSQUALITÄT

Als physikalische Qualitätsparameter wurden die Trockensubstanz, das Spezifische Gewicht, das Unterwassergewicht und die Glasigkeit der Knollen untersucht. Alle ausgewählten physikalischen Parameter wurden durch die Behandlungsvarianten nur in sehr geringem Umfang beeinflusst. Tabelle 64 enthält die Behandlungsmittelwerte für die Trockensubstanz, das Spezifische Gewicht, das Unterwassergewicht und die Glasigkeit der Knollen zur Ernte sowie die Ergebnisse der statistischen Analyse der beiden Versuchsjahre 1998 und 1999.

In den OTC zeigten erhöhte CO₂-Konzentrationen nur auf die Trockensubstanz im Versuchsjahr 1999 einen signifikanten Effekt. Unter erhöhtem CO₂ stieg die Trockensubstanz der Knollen im Vergleich zur Kontrolle (OTC380NF) bei Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und

680 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 in beiden Ozonbehandlungen an. In der FACE-Behandlung hatten erhöhte CO_2 -Konzentrationen keinen signifikanten Effekt auf die untersuchten physikalischen Parameter. Signifikante Effekte erhöhter Ozonkonzentrationen in den OTC wurden ebenfalls nur im Versuchsjahr 1999 auf die Trockensubstanz der Knollen festgestellt. Unter erhöhtem Ozon (60 nl l^{-1} Ozon im Vergleich zu Umgebungsozon) wurde die Trockensubstanz der Knollen in allen CO_2 -Behandlungen reduziert. In keinem der beiden Versuchsjahre konnte eine signifikante Interaktion von CO_2 und Ozon, ein Kammereffekt oder ein Standorteffekt auf die physikalischen Parameter Trockensubstanz, Spezifisches Gewicht, Unterwassergewicht oder Glasigkeit beobachtet werden.

Tabelle 64: Physikalische Qualität in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Endernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO_2 - und O_3 -Behandlung (Mittelwert \pm Standardabweichung).

Behandlung	1998				1999			
	Trocken- substanz [%]	Spezifisches Gewicht	Unterwas- sergewicht	Glasigkeit [%]	Trocken- substanz [%]	Spezifisches Gewicht	Unterwas- sergewicht	Glasigkeit [%]
OTC380NF	25,13	1,172	730,2	0,000	24,28 \pm 0,29	1,112 \pm 0,006	503,2 \pm 24,7	0,000 \pm 0,000
OTC550NF	25,13	1,120	533,6	0,000	24,45 \pm 0,33	1,109 \pm 0,043	488,3 \pm 175,5	0,000 \pm 0,000
OTC680NF	25,11	1,108	488,6	0,000	25,30 \pm 0,51	1,105 \pm 0,010	474,4 \pm 39,9	0,000 \pm 0,000
OTC380O3	21,63	1,116	517,1	0,000	23,01 \pm 0,68	1,111 \pm 0,020	498,0 \pm 79,4	0,000 \pm 0,000
OTC550O3	25,39	1,112	502,6	0,000	23,94 \pm 0,06	1,105 \pm 0,022	474,2 \pm 91,5	0,000 \pm 0,000
OTC680O3	24,72	1,086	394,2	0,000	23,97 \pm 0,14	1,109 \pm 0,016	490,9 \pm 66,9	0,000 \pm 0,000
AA-OTC	25,86 \pm 0,28	1,135 \pm 0,032	586,6 \pm 118,8	0,000 \pm 0,000	23,61 \pm 0,29	1,102 \pm 0,006	462,4 \pm 22,9	0,000 \pm 0,000
AA-FACE	25,97 \pm 0,49	1,132 \pm 0,009	583,6 \pm 34,8	0,000 \pm 0,000	23,81 \pm 0,03	1,105 \pm 0,008	476,4 \pm 32,2	0,000 \pm 0,000
FACE550	26,15 \pm 0,50	1,131 \pm 0,031	577,6 \pm 121,7	0,000 \pm 0,000	24,26 \pm 0,43	1,114 \pm 0,006	511,7 \pm 24,8	0,000 \pm 0,000
Statistische Auswertung (ANOVA)								
OTC $_{\text{CO}_2}$	-	-	-	-	0,034	n.s.	n.s.	-
OTC $_{\text{O}_3}$	-	-	-	-	0,004	n.s.	n.s.	-
OTC $_{\text{CO}_2 \times \text{O}_3}$	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	-
OTC $_{\text{Kammer}}$	n.s.	n.s.	n.s.	-	n.s.	n.s.	n.s.	-
Standort	n.s.	n.s.	n.s.	-	n.s.	n.s.	n.s.	-
FACE $_{\text{CO}_2}$	n.s.	n.s.	n.s.	-	n.s.	n.s.	n.s.	-

3.5.7 CHEMISCHE ERTRAGSQUALITÄT

3.5.7.1 STÄRKE UND LÖSLICHE KOHLENHYDRATE

Erhöhte CO_2 -Konzentrationen zeigten in den OTC in beiden Versuchsjahren keinen signifikanten Effekt auf die Stärkekonzentration und die Konzentrationen der wasserlöslichen Kohlenhydrate (Tabelle 65). In der FACE-Exposition bewirkten erhöhte CO_2 -Konzentrationen (FACE550 im Vergleich zu AA-FACE) nur 1998 eine signifikante Reduktion der Glucose- und Fructosekonzentration in den untersuchten Knollen. Erhöhte Ozonkonzentrationen (60 nl l^{-1} Ozon im Vergleich zu Umgebungsozon) reduzierten 1999 in den OTC in allen CO_2 -Behandlungen signifikant die Konzentrationen an Glucose und Fructose in den Knollen. Ein

Effekt erhöhter Ozonkonzentrationen auf die Stärke- und Saccharosekonzentration in den Knollen konnte nicht festgestellt werden. In beiden Versuchsjahren ergab sich keine Interaktion von CO₂ und O₃ auf die Konzentration von Stärke, Glucose, Fructose oder Saccharose in den Knollen.

Die Konzentration an Glucose wurde durch den Expositions-Standort (OTC im Vergleich zu FACE) in beiden Versuchsjahren und die Konzentration an Fructose 1998 signifikant beeinflusst. Bei allen beobachteten Standorteffekten waren die Konzentrationen von Glucose und Fructose in den Knollen am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort höher. Ein signifikanter Standorteffekt auf die Konzentrationen an Stärke und Saccharose in den Knollen ergab sich in keinem der beiden Versuchsjahre. Signifikante Kammereffekte auf die Konzentrationen der wasserlöslichen Kohlenhydrate in den Knollen ergaben sich lediglich im Versuchsjahr 1999. Die Glucose-, Fructose- und Saccharosekonzentrationen in den Knollen waren in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung signifikant reduziert. Für die Stärkekonzentration in den Knollen konnte 1998 und 1999 kein signifikanter Kammereffekt beobachtet werden.

Tabelle 65: Stärkekonzentration und Konzentration wasserlöslicher Kohlenhydrate (bezogen auf Trockengewicht) in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Ernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998				1999			
	Stärke [% TG]	Glucose [% TG]	Fructose [% TG]	Saccharose [% TG]	Stärke [% TG]	Glucose [% TG]	Fructose [% TG]	Saccharose [% TG]
OTC380NF	73,58	0,372	0,390	0,998	72,78±3,26	0,333±0,013	0,321±0,009	0,800±0,004
OTC550NF	74,54	0,469	0,479	0,979	78,40±5,17	0,430±0,042	0,392±0,015	0,933±0,104
OTC680NF	69,05	0,437	0,469	0,970	75,70±0,21	0,425±0,088	0,344±0,090	0,692±0,025
OTC380O3	65,55	0,628	0,737	1,055	69,34±3,00	0,225±0,074	0,278±0,016	0,839±0,385
OTC550O3	76,30	0,496	0,509	1,167	76,94±4,31	0,201±0,042	0,244±0,053	0,938±0,128
OTC680O3	75,51	0,474	0,488	1,120	72,10±4,04	0,285±0,016	0,298±0,001	0,868±0,119
AA-OTC	73,21±2,48	0,285±0,022	0,322±0,017	1,117±0,104	74,81±7,89	0,755±0,016	0,655±0,005	0,912±0,020
AA-FACE	72,88±7,61	0,419±0,009	0,451±0,016	1,069±0,055	75,08±1,88	0,926±0,045	0,714±0,037	0,875±0,205
FACE550	73,94±5,95	0,318±0,003	0,371±0,009	1,036±0,086	72,65±0,72	0,955±0,017	0,681±0,003	0,669±0,057
Statistische Auswertung (ANOVA)								
OTC _{CO2}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{O3}	-	-	-	-	n.s.	0,002	0,02	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,001	0,000	0,016
Standort	n.s.	0,016	0,016	n.s.	n.s.	0,037	n.s.	n.s.
FACE _{CO2}	n.s.	0,005	0,026	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

3.5.7.2 ORGANISCHE SÄUREN

Die Ergebnisse der Analysen für die Konzentrationen der organischen Säuren wie Ascorbat, Dehydroascorbat, Citrat und Malat in den Knollen ergaben nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Behandlungen. Tabelle 66 enthält die Behandlungsmittelwerte für die Konzentra-

tionen der organischen Säuren in den Knollen zum Zeitpunkt der Endernte und die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Versuchsjahre 1998 und 1999.

Mit Ausnahme von Ascorbat wurde 1999 kein signifikanter CO₂-Effekt auf die Konzentrationen organischer Säuren in den Knollen festgestellt. Abhängig von der CO₂-Behandlung war die Konzentration an Ascorbat um 48 % bei 550 µl l⁻¹ CO₂ und um 58 % bei 680 µl l⁻¹ CO₂ reduziert. In der FACE-Exposition konnte in beiden Versuchsjahren kein signifikanter CO₂-Effekt auf die Konzentrationen der organischen Säuren festgestellt werden. Lediglich die Malatkonzentration in den Knollen wurde im Versuchsjahr 1998 tendenziell durch erhöhtes CO₂ (FACE550 im Vergleich zu AA-FACE) reduziert. Ein signifikanter Ozoneffekt auf die Konzentrationen der organischen Säuren in den Knollen konnte in den OTC in keinem der beiden Versuchsjahre nachgewiesen werden. Erhöhte Ozonkonzentrationen (60 nl l⁻¹ Ozon im Vergleich zu Umgebungsozon) führten in den OTC lediglich im Versuchsjahr 1999 zu einem tendenziellen Konzentrationsanstieg von Dehydroascorbat in den Knollen. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und O₃ oder ein Kammereffekt auf die Konzentrationen der organischen Säuren in den Knollen ergab sich in keinem der beiden Versuchsjahre.

Die Knollen wiesen im Versuchsjahr 1998 am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort eine signifikant niedrigere Ascorbatkonzentration in den Knollen auf, 1999 wurden dagegen tendenziell höhere Konzentrationen an Ascorbat in den Knollen am FACE-Standort festgestellt. Die Konzentration an Dehydroascorbat in den Knollen war 1999 in der AA-FACE-Behandlung im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung ebenfalls signifikant erhöht. Ein signifikanter Standorteffekt auf die Konzentrationen von Citrat und Malat konnte in keinem der beiden Versuchsjahre beobachtet werden.

Tabelle 66: Konzentration organischer Säuren (bezogen auf Trockengewicht) in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Endernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998				1999			
	Ascorbat	Dehydro- ascorbat	Citrat	Malat	Ascorbat	Dehydro- ascorbat	Citrat	Malat
	[mg kg TG ⁻¹]	[mg kg TG ⁻¹]	[% TG]	[% TG]	[mg kg TG ⁻¹]	[mg kg TG ⁻¹]	[% TG]	[% TG]
OTC380NF	225,7	345,8	2,411	0,203	387,3±88,6	216,0±42,5	2,844±0,146	0,260±0,025
OTC550NF	206,2	308,8	2,217	0,254	201,3±15,2	157,7±12,6	2,650±0,089	0,257±0,006
OTC680NF	242,3	349,9	2,098	0,235	164,0±60,1	159,1±3,8	2,361±0,274	0,244±0,019
OTC380O3	356,9	430,5	2,580	0,342	304,8±149,3	340,1±159,1	2,721±0,365	0,272±0,006
OTC550O3	300,2	477,5	2,220	0,250	242,7±19,5	270,0±10,2	2,896±0,170	0,264±0,009
OTC680O3	258,3	392,0	2,170	0,273	170,1±14,4	226,5±67,6	2,646±0,233	0,264±0,045
AA-OTC	254,1±12,8	357,0±13,1	2,211±0,025	0,150±0,022	186,7±33,4	191,1±13,4	2,369±0,218	0,283±0,023
AA-FACE	195,7±13,6	305,6±79,6	2,134±0,134	0,191±0,014	281,8±28,3	352,0±7,2	2,118±0,067	0,268±0,050
FACE550	199,3±3,5	338,1±50,6	2,005±0,020	0,150±0,009	283,1±39,1	348,7±21,0	2,274±0,042	0,267±0,006
Statistische Auswertung (ANOVA)								
OTC _{CO2}	-	-	-	-	0,039	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{O3}	-	-	-	-	n.s.	(0,053)	n.s.	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Standort	0,047	n.s.	n.s.	n.s.	(0,092)	0,004	n.s.	n.s.
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	(0,075)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

3.5.7.3 GLYCOALKALOIDE

Die Konzentrationen der Glycoalkaloide Solanin und Chaconin in den Knollen wurden zum Zeitpunkt der Endernte nur in sehr geringem Umfang durch die verschiedenen Behandlungen beeinflusst. In Tabelle 67 sind die Behandlungsmittelwerte für die Glycoalkaloidkonzentrationen in den analysierten Knollen und die Ergebnisse der statistischen Auswertung angegeben.

In den OTC und in der FACE-Behandlung wurde in keinem der beiden Versuchsjahre unter erhöhten CO₂-Konzentrationen ein signifikanter Effekt auf die Glycoalkaloidkonzentrationen festgestellt. Im Versuchsjahr 1999 waren in den OTC die Konzentrationen an Chaconin und Solanin in den Knollen in beiden Ozonbehandlungen unter erhöhtem CO₂ tendenziell reduziert. Ausnahme war der Anstieg der Solaninkonzentration in der OTC680O3-Behandlung. Eine Reduktion der Glycoalkaloidkonzentrationen durch erhöhtes CO₂ wurde auch 1998 beobachtet, konnte jedoch statistisch nicht belegt werden. Erhöhtes Ozon bewirkte lediglich 1999 in den OTC in allen CO₂-Behandlungen einen tendenziellen Anstieg der Solaninkonzentrationen in den Knollen. In keinem der beiden Versuchsjahre wurde eine signifikante Interaktion von CO₂ und Ozon auf die Konzentrationen an Chaconin und Solanin in den Knollen beobachtet.

Innerhalb der OTC wiesen die Knollen 1998 im Vergleich zur kammerlosen Behandlung eine signifikant höhere Chaconinkonzentration auf. Der gleiche Effekt konnte tendenziell auch für

die Konzentration an Solanin in den Knollen festgestellt werden. Ein signifikanter Standorteffekt (OTC im Vergleich zu FACE) konnte in keinem der beiden Versuchsjahre auf die Konzentrationen der Glycoalkaloide in den Knollen beobachtet werden.

Tabelle 67: Konzentration von Glycoalkaloiden (bezogen auf Trockengewicht) in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Endernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998		1999	
	Chaconin [mg kg TG ⁻¹]	Solanin [mg kg TG ⁻¹]	Chaconin [mg kg TG ⁻¹]	Solanin [mg kg TG ⁻¹]
OTC380NF	290,7	125,8	193,8±30,4	73,57±1,18
OTC550NF	251,6	104,8	162,7±2,4	60,71±0,71
OTC680NF	244,6	115,0	146,2±15,1	66,88±11,55
OTC380O3	285,6	108,3	183,5±17,8	75,85±6,49
OTC550O3	270,0	110,9	160,0±5,6	64,87±1,36
OTC680O3	239,2	103,3	178,4±2,2	83,43±9,30
AA-OTC	210,3±2,2	88,83±2,58	223,1±34,2	115,9±22,4
AA-FACE	196,9±37,4	75,27±21,78	203,9±7,8	86,88±19,11
FACE550	188,1±1,5	67,90±4,93	212,9±22,0	89,40±11,45
Statistische Auswertung (ANOVA)				
OTC _{CO2}	-	-	(0,085)	(0,065)
OTC _{O3}	-	-	n.s.	(0,093)
OTC _{CO2xO3}	-	-	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	0,022	(0,054)	n.s.	n.s.
Standort	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

3.5.7.4 ANIONEN

Tabelle 68 enthält die Behandlungsmittelwerte für die Anionenkonzentrationen in den Knollen der Kartoffeln zum Zeitpunkt der Endernte und die Ergebnisse der statistischen Auswertung.

In den OTC konnten unter erhöhten CO₂- und Ozonkonzentrationen keine signifikanten Effekte auf die Konzentrationen der Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat in den Knollen festgestellt werden. Lediglich im Versuchsjahr 1999 führte erhöhtes CO₂ in beiden Ozonbehandlungen tendenziell zu niedrigeren Nitratkonzentrationen in den Knollen, erhöhte Ozonkonzentrationen bewirkten dagegen in allen CO₂-Behandlungen einen tendenziellen Anstieg der Nitratkonzentrationen in den Knollen. In der FACE-Exposition war lediglich 1998 unter erhöhtem CO₂ (FACE550 im Vergleich zu AA-FACE) eine signifikante Abnahme der Chloridkonzentration in den Knollen zu beobachten, die Sulfatkonzentration in den Knollen stieg durch erhöhtes CO₂ im Vergleich zur Kontrollbehandlung mit 380 µl l⁻¹ CO₂ signifikant an. Eine signifikante Interaktion von CO₂ und O₃ oder signifikante Kammereffekte auf die Konzentration der einzelnen Anionen traten in keinem der beiden Versuchsjahre auf.

Auch der Standort (AA-OTC im Vergleich zu AA-FACE) bewirkte in beiden Versuchsjahren keinen signifikanten Effekt auf die Anionenkonzentrationen in den Knollen. Tendenzielle Standorteffekte ergaben sich jedoch 1998 durch die niedrigere Chloridkonzentration in den Knollen am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort, 1999 war die Konzentration von Chlorid in der FACE-Behandlung dagegen tendenziell höher. Im Versuchsjahr 1998 konnte in der AA-FACE-Behandlung im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung ein tendenzieller Anstieg der Sulfatkonzentration in den Knollen festgestellt werden.

Tabelle 68: Konzentration von Anionen (bezogen auf Trockengewicht) in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Endernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998			1999		
	Chlorid [µg g TG ⁻¹]	Nitrat [µg g TG ⁻¹]	Sulfat [µg g TG ⁻¹]	Chlorid [µg g TG ⁻¹]	Nitrat [µg g TG ⁻¹]	Sulfat [µg g TG ⁻¹]
OTC380NF	3461	76,66	2558	3300±124	144,7±24,2	2357±115
OTC550NF	3093	126,7	2443	3275±443	108,2±51,6	2620±192
OTC680NF	3198	137,8	2532	2975±464	91,29±1,62	2481±219
OTC380O3	3634	155,2	2466	3304±47	178,6±1,3	2703±107
OTC550O3	3877	100,1	2587	2992±42	144,7±19,1	2685±247
OTC680O3	3720	92,58	2450	3213±198	116,4±21,5	2570±155
AA-OTC	3433±137	161,2±29,3	2831±160	3824±281	89,96±12,11	2702±245
AA-FACE	3366±10	99,48±0,23	2845±36	4486±45	58,83±13,27	2657±206
FACE550	3213±30	114,9±31,4	3263±31	4615±222	58,60±5,19	2561±68
Statistische Auswertung (ANOVA)						
OTC _{CO2}	-	-	-	n.s.	(0,053)	n.s.
OTC _{O3}	-	-	-	n.s.	(0,079)	n.s.
OTC _{CO2xO3}	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
OTC _{Kammer}	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Standort	(0,062)	n.s.	(0,063)	(0,081)	n.s.	n.s.
FACE _{CO2}	0,021	n.s.	0,006	n.s.	n.s.	n.s.

3.5.7.5 MINERALSTOFFE

Die Mineralstoffkonzentrationen in den Knollen der Kartoffeln zur Endernte wurden durch die verschiedenen CO₂- und O₃-Behandlungen sehr unterschiedlich beeinflusst. In Tabelle 69 sind die Behandlungsmittelwerte für die Mineralstoffkonzentrationen und die Ergebnisse der statistischen Auswertung gezeigt.

Erhöhte CO₂-Konzentrationen führten 1999 in den OTC nur bezüglich der Konzentrationen an Stickstoff (N) und Phosphor (P) in den Knollen zu signifikanten Veränderungen. Unter erhöhtem CO₂ war die Konzentration an Stickstoff (N) unabhängig von der Ozonbehandlung in den Knollen in der Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂ im Vergleich zur Behandlung mit 380 µl l⁻¹ CO₂ reduziert. Die Phosphorkonzentration (P) stieg unabhängig von der Ozonbehandlung in den Knollen bei Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ an, in der Behandlung mit

680 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 kam es dagegen im Vergleich zur Kontrolle mit 380 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 zu einer Abnahme der Phosphorkonzentration (P) in den Knollen.

Auch 1998 wurde in den OTC eine Reduktion der Stickstoffkonzentration (N) in den Knollen durch erhöhtes CO_2 beobachtet, dieser Effekt konnte jedoch statistisch nicht belegt werden.

Die Konzentration an Zink (Zn) wurde 1999 in den OTC zumindest tendenziell durch erhöhtes CO_2 beeinflusst. Unter erhöhtem CO_2 (550 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 und 680 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2) nahm die Konzentration an Zink (Zn) in den Knollen in beiden Ozonbehandlungen im Vergleich zur Kontrollbehandlung mit 380 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 ab.

In der FACE-Exposition konnte 1998 in der Behandlung mit 550 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 im Vergleich zur AA-FACE-Behandlung eine signifikante Zunahme der Zinkkonzentration (Zn) beobachtet werden. Darüber hinaus ergab sich in diesem Versuchsjahr eine tendenzielle Zunahme der Konzentration von Schwefel (S) sowie 1999 von Calcium (Ca) in den Knollen durch erhöhtes CO_2 .

Im Versuchsjahr 1999 konnte in den OTC in allen CO_2 -Behandlungen unter erhöhten Ozonkonzentrationen ein signifikanter Anstieg der Konzentrationen an Stickstoff (N), Schwefel (S) und Zink (Zn) sowie ein tendenzieller Anstieg der Konzentrationen an Phosphor (P) und Cadmium (Cd) in den Knollen festgestellt werden. Die Mangankonzentration (Mn) stieg ebenfalls durch erhöhtes Ozon (60 nl l^{-1} im Vergleich zu Umgebungsozon) in der Behandlung mit 380 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 und 680 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 an, nahm aber in der Exposition mit 550 $\mu\text{l l}^{-1}$ CO_2 ab. Der Effekt erhöhter Ozonkonzentrationen war 1998 nur vereinzelt für die verschiedenen Mineralstoffe zu beobachten, die Ergebnisse konnten jedoch statistisch nicht abgesichert werden. Eine Interaktion von CO_2 und O_3 auf die Konzentration der Mineralstoffe konnte nur 1999 tendenziell für die Eisenkonzentration (Fe) in den Knollen festgestellt werden.

Signifikante Kammereffekte wurden nur im Versuchsjahr 1998 für die Konzentrationen an Bor (B) und Zink (Zn) in den Knollen festgestellt. Während die Konzentration an Bor (B) in den Knollen 1998 in den OTC im Vergleich AA-OTC-Behandlung reduziert war, konnte in den Kammern eine höhere Zinkkonzentration (Zn) in den Knollen gemessen werden. 1999 wurde für die Konzentration an Bor (B), Zink (Zn) und Schwefel (S) in den OTC im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung eine tendenzielle Abnahme in den Knollen festgestellt, für die Magnesiumkonzentration (Mg) in den Knollen ergab sich dagegen in den OTC eine tendenzielle Erhöhung. Auch für die Stickstoffkonzentration (N) in der Knolle konnten 1998 tendenziell höhere Konzentrationen in den OTC im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung beobachtet werden.

Die Konzentration der Mineralstoffe Stickstoff (N), Zink (Zn), Phosphor (P) und Kalium (K) wurde 1999 durch den Expositionsstandort (OTC im Vergleich zu FACE) signifikant beeinflusst, die Mangankonzentration (Mn) tendenziell. In allen Fällen waren die Mineralstoffkonzentrationen am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort niedriger. Signifikante Standorteffekte auf die Mineralstoffkonzentrationen in den Knollen konnten im Versuchsjahr 1998 nur auf die Zinkkonzentration (Zn) in den Knollen festgestellt werden. Im Gegensatz zu 1999 war jedoch die Konzentration an Zink (Zn) am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort signifikant höher.

Tabelle 69: Mineralstoffkonzentration [N in %, S, B, Zn, P, Mn, Fe, Mg, Ca, Al, Na und K in ppm, bezogen auf Trockengewicht] in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Ernte bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Mineralstoff	Behandlung									Statistische Auswertung (ANOVA)					
	OTC 380NF	OTC 550NF	OTC 680NF	OTC 380O3	OTC 550O3	OTC 680O3	AA- OTC	AA- FACE	FACE 550	CO ₂	OTC O ₃	CO ₂ xO ₃	Kam- mer	Stand- ort	FACE CO ₂
1998															
N	0,885	0,743	0,846	1,044	0,855	0,844	0,752±0,017	0,750±0,069	0,745±0,051	-	-	-	(0,099)	n.s.	n.s.
S	1150	1134	1190	1309	1142	1177	1277±25	1262±16	1320±11	-	-	-	n.s.	n.s.	(0,052)
B	4,124	3,656	3,868	4,852	4,067	4,337	4,439±0,018	4,936±0,568	4,622±0,344	-	-	-	0,045	n.s.	n.s.
Zn	17,14	8,842	8,707	11,96	9,971	10,00	10,37±0,18	11,39±0,10	12,63±0,39	-	-	-	0,020	0,019	0,050
P	1878	2065	2127	1945	1900	2152	2085±92	2099±14	2173±48	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Mn	4,561	4,350	4,353	5,436	4,621	4,841	4,421±0,097	4,379±0,358	4,473±0,180	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Fe	23,34	19,70	25,35	33,42	25,53	27,63	20,46±1,63	19,77±1,59	20,26±1,98	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Mg	817,6	826,9	798,8	950,8	842,7	856,0	777,7±13,5	780,7±32,5	793,2±2,5	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Ca	246,9	227,5	250,0	234,8	236,6	223,9	294,9±26,3	335,3±5,5	314,1±40,1	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Al	15,78	13,47	25,03	25,40	22,96	24,59	17,02±0,75	14,82±0,79	15,10±2,12	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
K	18720	18403	18308	21138	18930	19273	18803±523	18820±250	18775±49	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
1999															
N	1,000±0,028	0,945±0,050	0,880±0,000	1,210±0,028	1,085±0,149	1,020±0,000	0,980±0,000	0,735±0,050	0,685±0,120	0,043	0,005	n.s.	n.s.	0,020	n.s.
S	1323±18	1340±30	1253±25	1473±22	1452±122	1380±9	1398±23	1355±58	1260±25	n.s.	0,006	n.s.	(0,068)	n.s.	n.s.
B	4,628±0,277	4,416±0,419	4,491±0,474	5,010±0,457	4,362±0,474	4,740±0,451	5,277±0,008	4,643±0,742	4,765±1,274	n.s.	n.s.	n.s.	(0,080)	n.s.	n.s.
Zn	12,57±0,28	11,90±0,69	10,97±0,57	14,33±0,98	13,00±0,26	13,13±1,06	13,86±0,40	12,03±0,26	10,91±0,63	(0,075)	0,006	n.s.	(0,064)	0,032	n.s.
P	2109±62	2139±107	2019±23	2181±1	2253±55	2083±81	2273±105	1394±32	1335±47	0,050	(0,067)	n.s.	n.s.	0,008	n.s.
Cd	0,099±0,097	0,012±0,017	0,111±0,009	0,186±0,130	0,214±0,192	0,288±0,212	0,000±0,000	0,000±0,000	0,000±0,000	n.s.	(0,092)	n.s.	n.s.	-	-
Mn	5,869±0,309	6,080±0,723	5,328±0,373	6,377±0,281	6,046±0,496	7,233±1,308	5,933±0,310	5,269±0,060	5,037±0,419	n.s.	(0,091)	n.s.	n.s.	(0,097)	n.s.
Fe	44,99±19,21	51,04±23,97	34,62±3,61	39,09±4,79	34,02±6,57	65,76±7,62	39,12±0,98	43,15±3,30	45,53±3,07	n.s.	n.s.	(0,097)	n.s.	n.s.	n.s.
Mg	956,8±25,0	929,3±0,2	898,6±95,2	1065±126	1011±106	967,4±56,0	893,9±1,2	855,7±33,5	811,0±24,1	n.s.	n.s.	n.s.	(0,071)	n.s.	n.s.
Ca	335,0±24,6	314,4±63,3	282,1±6,8	320,5±61,7	274,6±1,4	327,7±42,7	332,3±5,9	315,1±20,8	362,1±7,7	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	(0,096)
Al	52,40±35,47	63,42±41,90	39,48±1,15	40,58±9,79	31,97±11,29	88,58±11,80	57,02±11,43	50,65±7,79	57,99±9,47	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
K	20560±212	19600±481	19180±863	20550±891	20600±1443	19820±636	21015±431	19260±283	18680±679	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,041	n.s.

3.5.7.6 *PROTEIN*

Im Versuchsjahr 1999 wurde die Proteinkonzentration in den Knollen nur in den OTC durch erhöhte CO₂-Konzentrationen signifikant beeinflusst (Tabelle 70). In beiden Ozonbehandlungen führte erhöhtes CO₂ im Vergleich zur Kontrolle mit 380 µl l⁻¹ CO₂ in den Knollen zu einer Abnahme der Proteinkonzentration um 6 % in der Behandlung mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und um 12 % in der Behandlung mit 680 µl l⁻¹ CO₂. Eine Reduktion der Proteinkonzentration in den Knollen durch erhöhtes CO₂ wurde auch 1998 in den OTC festgestellt, dieser Effekt konnte jedoch statistisch nicht belegt werden. In der FACE-Behandlung zeigten erhöhte CO₂-Konzentrationen in keinem der beiden Versuchsjahre einen signifikanten Effekt auf die Proteinkonzentration.

Signifikante Ozoneffekte auf die Proteinkonzentration konnten in den OTC ebenfalls nur im Versuchsjahr 1999 festgestellt werden. In allen CO₂-Behandlungen ergaben sich unter erhöhten Ozonkonzentrationen (60 nl l⁻¹ Ozon im Vergleich zu Umgebungsozon) signifikante Zunahmen der Proteinkonzentrationen in den Knollen. In keinem der beiden Versuchsjahre konnten signifikante Interaktionen von CO₂ und Ozon oder ein Kammereffekt auf den untersuchten Parameter beobachtet werden.

Die Proteinkonzentration in den Knollen wurde 1999 durch den Expositionsstandort (OTC im Vergleich zu FACE) signifikant beeinflusst. Die Knollen wiesen am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort geringere Proteinkonzentrationen auf.

Tabelle 70: Proteinkonzentration (% bezogen auf Trockengewicht) in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Ernte 1998 und 1999 bei unterschiedlicher CO₂- und O₃-Behandlung (Mittelwert±Standardabweichung).

Behandlung	1998	1999
OTC380NF	5,532	6,250±0,177
OTC550NF	4,643	5,906±0,309
OTC680NF	5,288	5,500±0,000
OTC380O3	6,523	7,563±0,177
OTC550O3	5,342	6,781±0,928
OTC680O3	5,275	6,375±0,000
AA-OTC	4,699±0,107	6,125±0,000
AA-FACE	4,685±0,432	4,594±0,309
FACE550	4,655±0,319	4,281±0,751
Statistische Auswertung (ANOVA)		
OTC _{CO2}	-	0,043
OTC _{O3}	-	0,005
OTC _{CO2xO3}	-	n.s.
OTC _{Kammer}	(0,099)	n.s.
Standort	n.s.	0,020
FACE _{CO2}	n.s.	n.s.

3.5.7.7 AMINOSÄUREN

Die Aminosäurekonzentrationen in den Knollen wurde sehr unterschiedlich durch die verschiedenen Behandlungen beeinflusst. In Tabelle 71 und Tabelle 72 werden die Behandlungsmittelwerte für die Konzentrationen der Aminosäuren in den Knollen zum Zeitpunkt der Ernte und die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die Versuchsjahre 1998 und 1999 gezeigt.

In den Versuchsjahren 1998 und 1999 konnte mit Ausnahme von Leucin (Leu) in den OTC kein signifikanter CO₂-Effekt auf die Aminosäurekonzentrationen festgestellt werden. Unter erhöhtem CO₂ sank im Versuchsjahr 1999 die Leucinkonzentration (Leu) in der Behandlung mit Umgebungsozon bei 550 µl l⁻¹ CO₂ um 44 % und bei 680 µl l⁻¹ CO₂ um 37 % im Vergleich zur Kontrollbehandlung (380 µl l⁻¹ CO₂) ab. Eine Abnahme der Leucinkonzentration (Leu) in den Knollen durch erhöhtes CO₂ konnte auch in der Behandlung mit 60 nl l⁻¹ Ozon beobachtet werden, Ausnahme war die Zunahme der Leucinkonzentration (Leu) in der OTC550O3-Behandlung. Tendenziell konnte dieser CO₂-Effekt in den OTC 1999 auch für die Konzentrationen an Methionin (Met), Phenylalanin (Phe) und Histidin (His) festgestellt werden. Der gleiche Trend wurde 1998 beobachtet, jedoch konnten diese Messungen statistisch nicht belegt werden. In der FACE-Exposition führten erhöhte CO₂-Konzentrationen (FACE550 im Vergleich zu AA-FACE) nur im Versuchsjahr 1998 zu einem signifikanten Anstieg der Glutaminsäurekonzentrationen (Glu) in den Knollen um 6 %. Erhöhte Ozonkonzentrationen (60 nl l⁻¹ Ozon im Vergleich zu Umgebungsozon) bewirkten 1999 in den OTC in allen CO₂-Behandlungen einen signifikanten Anstieg der Konzentrationen an Asparagin (Asn), Glutamin (Gln), Asparaginsäure (Asp), Serin (Ser), Threonin (Thr), Glycin (Gly), Arginin (Arg), Alanin (Ala) und Methionin (Met) in den Knollen, die Prolinkonzentration (Pro) in den Knollen stieg tendenziell an. Auch im Versuchsjahr 1998 wurde dieser Trend beobachtet, konnte jedoch nicht statistisch belegt werden. Eine Interaktion von CO₂ und O₃ wurde nur 1999 auf die Konzentration von Asparaginsäure (Asp) in den Knollen beobachtet.

Ein signifikanter Kammereffekt wurde 1998 nur bezüglich der di-Tyrosin-Konzentration (di-Tyr) in den Knollen festgestellt. Die Konzentration an di-Tyrosin (di-Tyr) in den Knollen war in den OTC im Vergleich zur AA-OTC-Behandlung signifikant höher, für Prolin (Pro) und Histidin (His) konnte dieser Effekt zumindest tendenziell beobachtet werden. Im Versuchsjahr 1999 wurde durch den Kammereffekt in den OTC nur die Glycinkonzentration (Gly) in den Knollen signifikant reduziert.

Der Standort (OTC im Vergleich zu FACE) zeigte 1999 nur einen signifikanten Effekt auf die Konzentration an Glutamin (Gln). Darüber hinaus waren 1999 auch die Konzentrationen an

Serin (Ser) und Arginin (Arg) in den Knollen tendenziell beeinflusst. Bei allen beobachteten Standorteffekten konnte eine Reduktion der Aminosäurekonzentrationen in den Knollen am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort festgestellt werden. 1998 wurde kein signifikanter Standorteffekt auf die Aminosäurekonzentrationen in den Knollen festgestellt.

Tabelle 71: Aminosäurekonzentration [$\mu\text{mol g TG}^{-1}$] in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Endernte 1998 bei unterschiedlicher Behandlung (Mittelwert \pm Standardabweichung).

Aminosäure	Behandlung									Statistische Auswertung (ANOVA)					
	OTC 380NF	OTC 550NF	OTC 680NF	OTC 380O3	OTC 550O3	OTC 680O3	AA OTC	AA FACE	FACE 550	CO ₂	OTC		Kammer	Standort	FACE CO ₂
											O ₃	CO ₂ xO ₃			
Asn	241,4	210,4	255,4	332,2	273,8	256,3	262,3 \pm 26,1	245,5 \pm 20,4	262,0 \pm 19,8	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Gln	65,79	56,15	65,60	122,3	65,48	72,36	56,32 \pm 5,55	72,99 \pm 30,63	59,62 \pm 14,85	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Asp	158,4	123,1	147,9	179,6	161,8	164,5	154,0 \pm 13,3	158,4 \pm 7,4	165,2 \pm 6,8	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Ser	42,99	27,24	35,01	47,67	39,51	36,87	36,04 \pm 1,09	37,87 \pm 5,56	37,78 \pm 4,60	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Glu	207,4	163,3	198,4	230,0	207,7	207,8	192,0 \pm 10,0	207,0 \pm 1,3	220,4 \pm 1,2	-	-	-	n.s.	n.s.	0,009
Thr	20,23	12,69	16,12	26,99	17,01	17,22	14,62 \pm 0,93	14,65 \pm 2,64	14,20 \pm 2,35	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Gly	6,147	4,310	4,868	8,671	5,284	5,436	4,400 \pm 0,458	5,370 \pm 1,286	4,493 \pm 0,145	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Arg	37,85	24,24	30,21	54,53	31,84	32,03	27,71 \pm 2,14	31,13 \pm 6,99	30,83 \pm 4,67	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Ala	28,04	18,12	26,33	31,12	26,91	25,82	27,17 \pm 1,59	24,92 \pm 4,54	25,85 \pm 4,06	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
m-Tyr	42,47	53,44	53,19	69,13	54,38	51,03	31,34 \pm 4,57	51,81 \pm 12,75	33,54 \pm 1,82	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Pro	14,11	9,601	11,59	20,48	14,55	10,08	10,16 \pm 0,46	13,01 \pm 3,42	10,15 \pm 1,03	-	-	-	(0,089)	n.s.	n.s.
Met	11,18	6,916	7,154	15,01	8,550	7,283	10,58 \pm 0,08	10,35 \pm 2,39	10,58 \pm 2,59	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Phe	23,34	13,19	17,59	27,94	16,19	9,342	14,77 \pm 1,16	18,01 \pm 3,27	15,90 \pm 1,05	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Ile	33,96	17,49	17,92	37,64	19,58	16,44	22,76 \pm 1,45	23,10 \pm 1,97	27,10 \pm 6,40	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
Leu	23,06	12,82	14,56	26,74	16,24	13,96	15,62 \pm 1,41	17,68 \pm 2,60	18,35 \pm 5,38	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
His	15,94	8,452	10,84	18,29	10,09	8,541	10,01 \pm 0,41	11,95 \pm 2,58	11,40 \pm 2,70	-	-	-	(0,054)	n.s.	n.s.
Lys	27,06	24,41	20,32	37,08	24,76	23,01	22,32 \pm 1,26	24,51 \pm 4,69	26,46 \pm 9,87	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.
di-Tyr	21,20	9,602	11,19	25,16	12,51	10,50	13,69 \pm 0,23	15,80 \pm 3,73	17,97 \pm 5,73	-	-	-	0,024	n.s.	n.s.
Cys	24,66	9,225	11,79	26,13	16,87	15,70	19,10 \pm 2,09	22,16 \pm 4,68	23,74 \pm 9,87	-	-	-	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 72: Aminosäurekonzentration [$\mu\text{mol g TG}^{-1}$] in den Kartoffelknollen (>50 mm) zur Endernte 1999 bei unterschiedlicher Behandlung (Mittelwert \pm Standardabweichung).

Aminosäure	Behandlung									Statistische Auswertung (ANOVA)					
	OTC 380NF	OTC 550NF	OTC 680NF	OTC 380O3	OTC 550O3	OTC 680O3	AA OTC	AA FACE	FACE 550	CO ₂	OTC		Kammer	Standort	FACE CO ₂
											O ₃	CO ₂ xO ₃			
Asn	219,0 \pm 7,1	202,2 \pm 19,7	218,7 \pm 5,2	271,6 \pm 73,9	305,7 \pm 37,4	268,5 \pm 26,9	230,1 \pm 8,7	232,5 \pm 2,7	194,3 \pm 25,2	n.s.	0,018	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Gln	101,1 \pm 3,5	98,82 \pm 12,27	84,55 \pm 6,06	181,9 \pm 27,1	165,0 \pm 38,9	139,9 \pm 2,9	99,47 \pm 1,50	68,52 \pm 0,25	62,26 \pm 8,61	n.s.	0,001	n.s.	n.s.	0,001	n.s.
Asp	140,3 \pm 2,6	126,2 \pm 17,2	139,9 \pm 10,5	148,7 \pm 0,1	168,3 \pm 6,3	149,3 \pm 4,7	144,6 \pm 1,7	131,2 \pm 8,3	132,1 \pm 15,3	n.s.	0,008	(0,060)	n.s.	n.s.	n.s.
Ser	35,32 \pm 1,33	32,62 \pm 6,75	33,90 \pm 3,94	41,73 \pm 5,00	43,23 \pm 0,93	37,90 \pm 0,26	41,36 \pm 2,73	29,65 \pm 3,32	30,19 \pm 1,90	n.s.	0,02	n.s.	n.s.	(0,061)	n.s.
Glu	141,9 \pm 21,7	132,3 \pm 17,1	139,0 \pm 3,2	143,4 \pm 2,7	154,4 \pm 9,7	144,4 \pm 14,9	154,9 \pm 17,6	174,4 \pm 1,8	181,1 \pm 20,5	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Thr	18,08 \pm 2,05	16,95 \pm 3,18	16,13 \pm 1,48	25,93 \pm 4,04	24,52 \pm 2,06	20,88 \pm 0,57	19,44 \pm 1,24	18,32 \pm 1,75	17,55 \pm 0,52	n.s.	0,003	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Gly	5,283 \pm 0,473	5,889 \pm 0,914	6,606 \pm 0,756	8,897 \pm 2,449	8,361 \pm 0,418	8,231 \pm 0,512	7,004 \pm 0,291	5,491 \pm 1,318	5,680 \pm 0,784	n.s.	0,009	n.s.	0,048	n.s.	n.s.
Arg	32,97 \pm 1,36	30,46 \pm 6,63	26,90 \pm 4,27	40,11 \pm 7,81	43,71 \pm 2,79	33,89 \pm 1,53	37,73 \pm 3,56	26,93 \pm 2,96	29,65 \pm 0,17	n.s.	0,016	n.s.	n.s.	(0,081)	n.s.
Ala	25,86 \pm 2,44	24,50 \pm 4,72	25,57 \pm 5,85	35,19 \pm 1,42	39,91 \pm 2,14	36,27 \pm 4,73	22,78 \pm 1,95	17,03 \pm 2,08	15,60 \pm 0,41	n.s.	0,002	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
m-Tyr	39,19 \pm 17,81	43,74 \pm 2,96	42,55 \pm 0,74	50,80 \pm 20,42	44,00 \pm 7,67	30,76 \pm 0,98	40,85 \pm 11,51	36,93 \pm 8,37	37,01 \pm 7,25	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Pro	13,63 \pm 0,76	12,86 \pm 1,95	17,88 \pm 3,49	20,85 \pm 2,76	16,13 \pm 5,83	19,30 \pm 0,93	15,31 \pm 1,37	14,67 \pm 2,13	13,85 \pm 1,27	n.s.	(0,071)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Met	13,04 \pm 1,04	11,84 \pm 2,98	9,254 \pm 0,986	13,30 \pm 1,61	16,13 \pm 0,39	12,38 \pm 0,28	11,83 \pm 2,43	8,849 \pm 1,327	9,447 \pm 2,023	(0,059)	0,026	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Phe	20,01 \pm 4,18	15,27 \pm 1,95	10,12 \pm 0,36	16,12 \pm 5,56	17,30 \pm 4,02	12,25 \pm 2,34	20,64 \pm 3,92	26,76 \pm 6,69	20,47 \pm 4,67	(0,074)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Ile	16,81 \pm 1,28	18,52 \pm 3,73	14,40 \pm 0,98	19,30 \pm 5,15	22,34 \pm 0,69	16,74 \pm 0,69	21,90 \pm 3,32	24,95 \pm 5,66	24,68 \pm 0,21	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Leu	19,20 \pm 2,06	15,67 \pm 2,11	13,55 \pm 1,05	17,46 \pm 0,83	17,92 \pm 0,21	14,50 \pm 1,00	17,53 \pm 0,57	18,95 \pm 3,75	19,15 \pm 1,32	0,013	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
His	10,70 \pm 0,74	10,23 \pm 1,88	8,433 \pm 0,832	10,40 \pm 2,23	11,08 \pm 0,45	7,975 \pm 0,771	11,36 \pm 1,64	12,38 \pm 1,90	11,82 \pm 0,52	(0,067)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Lys	20,92 \pm 4,06	22,18 \pm 10,78	18,81 \pm 5,44	20,37 \pm 0,52	21,75 \pm 0,01	19,05 \pm 2,33	18,75 \pm 2,92	23,29 \pm 5,08	28,10 \pm 5,55	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
di-Tyr	12,50 \pm 3,79	11,44 \pm 4,67	9,488 \pm 1,549	15,65 \pm 6,48	18,20 \pm 2,43	12,22 \pm 0,55	14,14 \pm 4,88	14,06 \pm 1,32	15,53 \pm 0,59	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Cys	21,92 \pm 12,83	16,32 \pm 1,64	16,59 \pm 1,69	19,49 \pm 1,01	25,29 \pm 0,78	18,44 \pm 0,74	21,05 \pm 1,25	25,48 \pm 2,23	22,30 \pm 1,05	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

4 DISKUSSION

Weizen, Gerste und Kartoffeln sind aus ernährungsphysiologischer Sicht primär eine bedeutende Quelle für hochverdauliche Kohlenhydrate, sie stellen aber ebenso eine wichtige Quelle für Proteine und Mineralstoffe dar. Um Effekte von erhöhten atmosphärischen Spurengaskonzentrationen auf das Bestandeswachstum, den Ertrag und die verwertungsspezifische Ertragsqualität dieser landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zu untersuchen, wurden 1994 bis 1997 Sommerweizen (*Triticum aestivum* L. cv. Minaret), 1995 bis 1997 Sommergerste (*Hordeum vulgare* L. cv. Alexis) sowie 1998 und 1999 Kartoffelpflanzen (*Solanum tuberosum* L. cv. Bintje) unter unterschiedlichen CO₂- und Ozonkonzentrationen exponiert. Die gleichzeitige Behandlung der Getreidepflanzen mit verschiedenen Stickstoffversorgungsstufen sollte zusätzliche Informationen über mögliche Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die oberirdische Biomasse, den Ertrag sowie die verschiedenen Ertrags- und Qualitätsparameter liefern.

4.1 Allgemeine Versuchsbedingungen

Verschiedene Rahmenbedingungen wie Kultur- und Expositionsbedingungen, Klima und Standort besitzen einen großen Einfluss auf die Arten und können mit Behandlungseffekten interagieren. Sie müssen daher bei der Interpretation der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden.

Die Getreideversuche wurden in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 in Gefäßversuchen mit einer geringen Oberfläche und einer niedrigen Bestandesdichte durchgeführt, so dass eine Beeinflussung der Pflanzenreaktionen durch diese Faktoren nicht auszuschließen ist. Häufig zeigen in CO₂-Versuchen Pflanzen, die in Gefäßen angezogen werden, keine oder nur eine geringe Biomassezunahme durch erhöhte CO₂-Konzentrationen. Die Ursachen sind zum einen in dem Zusammenhang zwischen der Größe des verfügbaren Wurzelraums und der Höhe der photosynthetischen Akklimatisierung an erhöhtes CO₂ begründet (Arp 1991). Zum anderen gehen McConnaughay et al. (1993) davon aus, dass eine limitierte Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen und Wasser in kleineren Gefäßen zu Veränderungen in der Phytohormonbildung, zur Erhöhung des Quellen/Senken-Verhältnisses und zur negativen Feedback-Regulation der Photosynthese über einen Assimilatstau in den Blättern führt. Auch bei ungenügender Stickstoffversorgung reagieren Pflanzen nicht oder nur gering auf erhöhte CO₂-Konzentrationen. Da die in den Getreideversuchen applizierten Stickstoffmengen von 270 kg N ha⁻¹ beziehungsweise 300 kg N ha⁻¹ (Weizen), 140 kg N ha⁻¹ (Gerste) und 250 kg N ha⁻¹ (Kartoffeln) den in der

Landwirtschaft üblichen Werten zur Erzielung eines maximalen Ertrags entsprachen (Reiner & Dörre 1985, Reiner et al. 1992, Putz 1989), kann in den Stickstoffvarianten mit 150 kg N ha⁻¹ (Weizen) und 80 kg N ha⁻¹ (Gerste) bereits von einer Limitation der Pflanzenreaktionen auf erhöhtes CO₂ ausgegangen werden.

Die in den OTC erreichten CO₂-Konzentrationen lagen in den Versuchsjahren 1994 bis 1999 im Rahmen der angestrebten Werte von 380 µl l⁻¹ CO₂, 550 µl l⁻¹ CO₂ und 680 µl l⁻¹ CO₂. Im FACE-System blieben dagegen die CO₂-Konzentrationen um 120,4 µl l⁻¹ CO₂ (1998) und 58,6 µl l⁻¹ CO₂ (1999) unter dem Sollwert von 550 µl l⁻¹ CO₂, so dass von verhältnismäßig geringeren CO₂-Effekten ausgegangen werden muss. Der für die Exposition mit erhöhtem Ozon in den OTC angestrebte saisonale Mittelwert von 60 nl l⁻¹ wurde 1998 und 1999 mit einer geringen Abweichung erreicht. Allerdings konnte 1999 auch am FACE-Standort eine saisonale Ozonkonzentration von 45 nl l⁻¹ gemessen werden, die im Vergleich zum OTC-Standort deutlich höher war und eine Größenordnung erreichte, in der bereits entscheidende Effekte auf die Pflanzen zu erwarten sind. Vergleichsweise hohe Ozonkonzentrationen am FACE-Standort in Linden wurden ebenfalls von Grünhage et al. (1992, 1996) beschrieben.

Bezüglich der klimatischen Rahmenbedingungen war der für Getreidearten wichtige Zeitraum der Kornfüllung im Versuchsjahr 1994 und 1995 sehr heiß und trocken, im Gegensatz dazu wurde diese Phase 1996 und 1997 durch kühle und feuchte Bedingungen geprägt. Erfahrungsgemäß führen mäßige Temperaturen verbunden mit einer guten Wasserversorgung gerade in der Kornfüllungsphase zu einer längeren Fülldauer und sorgen für eine effektivere Stärke- und Stickstoffeinlagerung, was sich meist in höheren Tausendkorngewichten und Vollkornanteilen in Weizen (Spiertz 1974, Blumenthal et al. 1991, Wardlaw & Moncur 1995) und in Gerste (Savin & Nicolas 1996) widerspiegelt. Allerdings herrschten 1996 und 1997 vor der Kornfüllung höhere mittlere Tagestemperaturen, so dass das Stadium der Anthese in diesen beiden Jahren vergleichsweise früher stattfand. Insgesamt erfolgten die festgestellten Unterschiede zwischen den Versuchsjahren 1994/95 und 1996/97 in einer Größenordnung, in der Klimaeffekte auf die untersuchten Parameter nicht auszuschließen sind. Im Vergleich dazu waren die klimatischen Bedingungen während der Kartoffelexposition in den Versuchsjahren 1998 und 1999 nahezu identisch, so dass aus dieser Sicht keine nennenswert unterschiedlichen Interaktionen mit den Behandlungseffekten zu erwarten waren.

Beim Vergleich der klimatischen Bedingungen zwischen den OTC- und den kammerlosen Behandlungen wurden die Ergebnisse von Drake et al. (1985) und Fangmeier et al. (1992) bestätigt, die Unterschiede hinsichtlich der Temperatur und der Strahlung aufzeigten. Durchschnitt-

lich erfolgte in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung eine Erhöhung der mittleren Tagestemperaturen von etwa 2 °C sowie eine Reduktion der täglichen Strahlungssumme um 40 % durch die Folien und die Rahmen der Kammern. Aus diesem Grund traten in den Versuchsjahren 1998 und 1999 neben den untersuchten CO₂-, Stickstoff- und Ozoneffekten vielfach zusätzliche Kammereffekte auf. In dem verwendeten FACE-System wurde aufgrund der fehlenden Kammereffekte eine höhere Annäherung an die freilandnahen Bedingungen erreicht (Hendrey & Kimball 1994, Mauney 1994, Miglietta et al. 1996, 1998, Pinter et al. 2000). Nachteile des FACE-Systems sind allerdings sowohl das Auftreten von großen zeitlichen und räumlichen Schwankungen bezüglich der angestrebten CO₂-Konzentrationen als auch die hohen Investitions- und Betriebskosten (Drake et al. 1985, Hendrey & Kimball 1994, Miglietta et al. 1997, Pinter et al. 2000).

Auch die Einflüsse der beiden Standorte (OTC und FACE) in den Versuchsjahren 1998 und 1999 dürfen bei der Interpretation der Ergebnisse nicht vernachlässigt werden. Der südlich von Giessen in einer Talauwe gelegene FACE-Standort wies im Vergleich zum OTC-Standort durchschnittlich um 1,4 °C niedrigere mittlere Tagestemperaturen auf, so dass verschiedene Parameter allein durch den Standort beeinflusst wurden.

Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor war das Auftreten von starkem Schädlingsbefall, der einen Ausfall einer Kammerwiederholung im Versuchsjahr 1998 bedingte, wodurch die statistische Aussagekraft der Ergebnisse für die Kartoffelpflanzen in den OTC geschwächt wurde.

4.2 Sommerweizen und Sommergerste

4.2.1 OBERIRDISCHE BIOMASSE, ERTRAG UND ERTRAGSPARAMETER

Sowohl die oberirdische Biomasse als auch der Kornertrag von Sommerweizen nahm 1994 bis 1996 in den Gefäßversuchen durch erhöhtes CO₂ und Stickstoff zu, 1997 konnte dagegen in den Kleinbeständen nur eine Förderung durch CO₂ festgestellt werden. Im Vergleich zu Sommerweizen reagierte die Sommergerste auf erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen nicht immer nach einem einheitlichen Reaktionsmuster. Während 1997 eindeutig ein Anstieg der oberirdischen Biomasse und des Ertrags durch erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen zu beobachten war, ergab sich in den Gefäßversuchen 1995 nur eine stickstoffbedingte Förderung der oberirdischen Biomasse und 1996 eine Ertragsförderung durch erhöhtes CO₂. Eine Ausnahme der durchgehend positiven CO₂-Antworten war die Reduktion der oberirdischen Biomasse und des Ertrags bei Sommergerste 1995 und 1996 in der Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ bei niedriger Stickstoffversorgung. In allen Versuchsjahren zeigte Weizen im Vergleich mit Gerste einen

größeren Zuwachs der oberirdischen Biomasse und des Ertrags durch erhöhtes CO₂. Allerdings konnte bei Gerste im Gegensatz zu Weizen der positive CO₂-Effekt in Beständen durch eine höhere Stickstoffversorgung weiter gesteigert werden, was bei den Produktionsbedingungen unter erhöhten Spurengaskonzentrationen besonders in bezug auf die Nährstoffversorgung berücksichtigt werden muss.

Das Splitting der Ertragsreaktionen nach Haupt- und Nebenähren deutete bei beiden Getreidearten eindeutig darauf hin, dass besonders die Nebenähren von der CO₂- und stickstoffbedingten Förderung profitierten. Lediglich 1995 nahm bei Sommerweizen auch der Ertrag der Hauptähren durch erhöhtes CO₂ zu, Sommergerste zeigte in diesem Versuchsjahr zumindest eine tendenzielle Stickstoffförderung des Hauptährenenertrags.

In allen Versuchsjahren konnte bei Weizen und Gerste die größte oberirdische Biomasse und der größte Kornertrag in der Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ in Kombination mit der hohen Stickstoffversorgung festgestellt werden. Bei annähernd verdoppelten CO₂-Konzentrationen betrug in der hohen Stickstoffversorgung die Förderung der oberirdischen Biomasse 42,0 % (Weizen) und 37,7 % (Gerste), der Ertrag stieg um 38,5 % (Weizen) und 27,9 % (Gerste). Die geringeren resultierenden CO₂-Antworten der oberirdischen Biomasse und des Ertrags in der niedrigen Stickstoffversorgung, die sich allerdings für Weizen erst in der Exposition mit annähernd verdoppelten CO₂-Konzentrationen ergaben, deuten auf die erwartete Stickstofflimitation hin. Verschiedene Studien zeigten ebenfalls, dass eine Erhöhung von CO₂ nur dann zu einer maximalen Förderung führen kann, wenn sich alle anderen Faktoren, darunter auch die Nährstoffversorgung, im Optimum befinden (McKee & Woodward 1994, Rogers et al. 1996). Trotz des offensichtlichen Zusammenspiels der CO₂-Exposition und der Stickstoffversorgung auf die oberirdische Biomasse und den Kornertrag wurde eine eindeutige Abhängigkeit nur 1995 für den Ertrag von Sommerweizen und 1997 für die oberirdische Biomasse und den Ertrag von Sommergerste beobachtet. Somit bestätigt die vorliegende Studie die Literaturlauswertung von Fangmeier & Jäger (2001), die aus einer Reihe von Experimenten unter freilandnahen Bedingungen bei Verdopplung der gegenwärtigen CO₂-Konzentrationen für Sommerweizen eine Förderung der oberirdischen Biomasse um 31 % und eine Ertragssteigerung um etwa 25 % berechneten. Cure & Acock (1986) fanden übereinstimmend einen CO₂-bedingten Zuwachs der oberirdischen Biomasse und des Ertrags bei Gerste in Höhe von 30 %. Generell ist ein Vergleich mit anderen Artikeln betreffend der Wirkung von erhöhtem CO₂ auf die oberirdische Biomasse und den Ertrag schwierig, da die Angaben über den Versorgungszustand der Pflanzen mit Nährstoffen häufig sehr variabel sind.

Obwohl die Pflanzenreaktionen von Weizen sehr homogen wirkten, ergaben sich in den einzelnen Versuchsjahren deutliche Unterschiede in der Stickstoffantwort der oberirdischen Biomasse und des Ertrags von Sommerweizen. 1994 führte die höhere Stickstoffapplikation im Vergleich zu den Versuchsjahren 1995 bis 1997 zu einem größeren Anstieg der oberirdischen Biomasse und des Ertrags. Die Ursachen hierfür sind vermutlich in den Unterschieden der in den Versuchsjahren 1994 und in den Versuchsjahren 1995 bis 1997 verwendeten Substrate begründet.

Dagegen ist die vergleichsweise starke CO₂-Reaktion der oberirdischen Biomasse und des Ertrags von Sommerweizen und Sommergerste im Versuchsjahr 1997 vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Pflanzen im Vergleich zu den Gefäßkulturen in den Vorjahren auf Kleinflächen mit 0,3 m² exponiert wurden. Da ausschließlich Pflanzen aus dem Zentrum des Bestandes in die Auswertung einbezogen wurden, war vermutlich eine Minimierung der Randeffekte für die stärkere Reaktion der Pflanzen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen verantwortlich. Darüber hinaus kann auch eine geringere Aufheizung der Pflanzgefäße aufgrund des größeren Bodenvolumens als Ursache für die gesteigerten relativen Biomasse- und Ertragsantworten unter erhöhtem CO₂ in Erwägung gezogen werden, wodurch für das Pflanzenwachstum optimalere Bodentemperaturen herrschten.

Da erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen die oberirdische Biomasse und den Gesamtertrag der Weizen- und der Gerstenpflanzen in annähernd gleichem Maße förderten, zeigte der Harvest-Index überwiegend keinen CO₂-, Dünge- oder Interaktionseffekt. Somit stimmt der Befund eines durch CO₂ unveränderten Harvest-Index mit den Studien von Gifford (1977), Sionit et al. (1981) und Percy & Björkman (1983) überein. Der lediglich 1995 für den Harvest-Index von Sommerweizen festgestellte CO₂-Effekt muss auf die verhältnismäßig geringe Ertragsantwort der Pflanzen in der Behandlung mit 550 µl l⁻¹ CO₂ zurückgeführt werden, hierfür liegt jedoch keine offensichtliche Erklärung vor.

Der Ertrag von Getreide ergibt sich aus verschiedenen Ertragsparametern wie der Anzahl der ährentragenden Halme, der Anzahl der Körner pro Fläche sowie aus dem Tausendkorngewicht (Hay & Walker 1989). Darüber hinaus können Veränderungen bei verschiedenen Ertragsparametern wie Ährenzahl und Anzahl der Körner pro Ähre Aufschluss über die Ursachen der Ertragsreaktion auf CO₂ und Stickstoff geben.

Sowohl CO₂ als auch Stickstoff führten bei beiden Getreidearten zu einer Ertragsförderung, die in erster Linie aus der vermehrten Anlage und Ausbildung von Ähren und Körnern resultierte, wohingegen das Tausendkorngewicht weitgehend unbeeinflusst blieb. Die Ergebnisse stehen in

Einklang mit anderen OTC-Studien von Fangmeier et al. (1994), Weigel et al. (1994) und Mulholland et al. (1997).

Erhöhtes CO₂ verursachte bei beiden Getreidearten sowohl eine größere Anzahl an Ähren und Körnern pro Fläche, maßgeblich durch die vermehrte Ausbildung von Nebentrieben, sowie bei Sommerweizen eine größere Anzahl an Körnern pro Ähre und bestätigt somit die Ergebnisse von Lawlor & Mitchell (1991), Gifford & Morison (1993), Mitchell et al. 1993, Batts et al. 1996, Rogers et al. (1996) und Manderscheid & Weigel (1997). Bei Sommergerste dagegen bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen 1997 in den Hauptähren nur eine geringe Zunahme der Kornzahlen, überwiegend konnten sogar negative Effekte festgestellt werden.

Zusätzlicher Stickstoff zeigte keinen Einfluss auf die Anzahl der Körner pro Ähre, jedoch korrelierte die Anzahl der Nebentriebe und dadurch die durch die Nebentriebe ausgebildeten Ähren- und Kornzahlen eng mit der Höhe der Stickstoffgabe. Eine eindeutige Abhängigkeit der CO₂-Antwort von der Stickstoffversorgung ergab sich jedoch für die gebildete Ährenzahl nur 1996 bei Weizen sowie für die Kornzahl der Gesamt- und Nebenähren 1995 bei Weizen und 1997 bei Gerste. In diesen Versuchsjahren wurden die düngungsbedingten Unterschiede in der Anzahl der gebildeten Ähren und Körner mit erhöhten CO₂-Konzentrationen größer. Wiederum konnten bei Weizen und Gerste die größten Ähren- und Kornzahlen in der Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ in Kombination mit der hohen Stickstoffversorgung festgestellt werden.

Hauptursache der positiven Antwort der oberirdischen Biomasse und des Ertrags auf erhöhte CO₂-Konzentrationen ist die Zunahme der Photosyntheseaktivität und die Abnahme der Photorespiration. Bedingt durch die physiologischen und biochemischen Veränderungen im pflanzlichen Metabolismus unter erhöhtem CO₂ resultiert eine bessere Versorgungsmöglichkeit der Pflanzen mit nicht-strukturellen Kohlenhydraten (*non-structural carbohydrates*, NSC), die für das Wachstum und die Speicherprozesse zur Verfügung stehen. Von der vermehrten Kohlenstoffaquisition profitieren bei Getreidearten auch die wachsenden Körner, Folge ist eine positive Ähren- und Kornförderung durch erhöhtes CO₂ (Hofstaetter et al. 1996). Die hierzu benötigten Assimilate stammen zum einen aus den unter erhöhtem CO₂ vor der Blüte hauptsächlich in Form von Fructanen vermehrt in den Vakuolen von Halmen, Blattstielen und Fahnenblattscheiden angelegten intermediären Kohlenhydratpools (Pollock & Chatterton 1988, Dubois et al. 1990, Wardlaw 1990, Davidson & Chevalier 1992, Schnyder 1993, Müller 1993, Smart et al. 1994, Takahashi et al. 1994, Pollock et al. 1996, Sild 1999), der größte Teil wird jedoch während der Periode der Kornfüllung durch die Fahnenblattphotosynthese (Sicher 1993) und die Ährenphotosynthese (Singh 1993) synthetisiert (Stoy 1973). Eine höhere Stickstoffver-

sorgung bewirkt bei Getreidearten in erster Linie die Vergrößerung der grünen Blattfläche, verbessert darüber hinaus aber auch durch die Verzögerung der Alterungsprozesse von photosynthetisch aktiven Pflanzenteilen die Bedingungen für die Produktion von Assimilaten sowie deren Translokation in die Körner und kann somit unter Berücksichtigung der Nutzung ebenfalls als wertbestimmendes Merkmal angesehen werden.

Getreidepflanzen besitzen verschiedene Regulationsmechanismen, um in die Determinierung der Anlage- und Reduktionsprozesse von Ähren und Körnern im Sinne der Ertragssteigerung unter erhöhten CO₂- und Stickstoffkonzentrationen einzugreifen. Dazu gehören bereits in der frühen Entwicklungsphase der Pflanzen die Anlage der Kornzahl pro Ähre während der Ährcheninitiierung und die Festlegung der ährentragenden Halmzahl durch Triebreduktion während der Bestockung (Hay & Walker 1989). In der Phase der Kornfüllung setzt die konkurrenzbedingte Ährchenreduktion und die Festlegung des Tausendkorngewichts ein (Hay & Walker 1989, Reiner & Dörre 1985, Reiner et al. 1992). Entsprechend den zur Verfügung stehenden Assimilatkapazitäten werden zuerst die Körner der Hauptähren gefüllt und erst bei zusätzlich vorhandenen Pools auch die Körner der Nebenähren, wobei Nebentriebe erster Ordnung den Nebentrieben zweiter und höherer Ordnung überlegen sind (Gifford et al. 1973, Hay & Walker 1989, Wheeler et al. 1996, Evans & Wardlaw 1996). Die Festlegung der Ertragskomponenten in den verschiedenen Entwicklungsstadien ermöglicht es den Getreidepflanzen, dynamisch auf das Ressourcenangebot während der unterschiedlichen Entwicklungsphasen zu reagieren und eine genügende Qualität der Diasporen hervorzubringen, wobei übereinstimmend mit der Studie von Hay & Walker (1989) für das Tausendkorngewicht die geringste Varianz festgestellt wird.

Getreidepflanzen sind somit in der Lage, an verschiedenen Regulationsstellen die Größe der Kohlenstoffsenken der Assimilatversorgung durch die Kohlenstoffquellen anzupassen. Durch die Möglichkeit der Remobilisierung von Langzeitkohlenhydraten aus den Halmen stehen diese den Körnern während der Kornfüllung zusätzlich zu den Assimilaten der aktuellen Photosynthese zur Verfügung, so dass auch bei steigender Senkengröße eine nahezu konstante Einlagerungsrate für die Biosynthese von Kohlenhydraten, Lipiden und Proteinen in den Körnern gewährleistet wird (Archbold 1942, Thorne 1966, Austin 1980, Schnyder 1993). Damit ist zu erklären, dass in den Versuchsjahren 1994 bis 1996 das Tausendkorngewicht bei Weizen und 1995 und 1996 bei Gerste in beiden Stickstoffbehandlungen trotz der größeren Senkenstärke unter erhöhten CO₂-Konzentrationen unbeeinflusst blieb und keine Limitierung der zur Kornfüllung notwendigen Poolgrößen auftrat. Auch Gifford (1977, 1979), Sionit et al. (1980, 1981), Weigel et al. (1994) und Mitchell et al. (1996) stellten unter erhöhtem CO₂ ein

unverändertes Tausendkorngewicht fest. Bestätigt wird diese Theorie durch die in den Jahren 1994 bis 1996 durchgeführten Versuche zur Einlagerung von löslichen Kohlenhydraten in das Korn während der Kornfüllungsphase.

Dagegen deutet die 1997 unter erhöhten CO₂-Konzentrationen bei Weizen und Gerste festgestellte Reduktion des Tausendkorngewichts in den Gesamt- und Hauptähren auf eine im Bestand existierende Konkurrenz der Pflanzen um die zur Kornfüllung notwendigen Poolgrößen hin. Auch in der Literatur finden sich vereinzelt Hinweise für eine Abnahme des Tausendkorngewichts unter erhöhten CO₂-Konzentrationen (Blumenthal et al. 1996, Weigel et al. 1994, Mulholland et al. 1997). Dagegen beobachteten Rudorff et al. (1996) einen Anstieg des Tausendkorngewichts unter erhöhtem CO₂.

Im Gegensatz zu Sommerweizen erschöpft sich bei der Braugerste die Bedeutung des Tausendkorngewichts nicht nur in seiner Rolle als Ertragskomponente. Wesentliche Merkmale der Brauqualität sind eng an das Tausendkorngewicht gekoppelt, da mit der besseren Kornausbildung der Extraktgehalt der Gerste zunimmt. Das unter Qualitätsaspekten für Braugerste angestrebte Tausendkorngewicht von 30 bis 42 Gramm wurde in allen Behandlungsvarianten erreicht, so dass erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen in den Körnern der Gesamt-, Haupt- und Nebenähren offensichtlich keine Qualitätsveränderungen bewirkten.

Aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in den einzelnen Versuchsjahren musste durch die Wechselwirkungen mit der Assimilatversorgung von einer Beeinflussung des Ertrags ausgegangen werden (Spiertz 1974). Trotz der beobachteten Unterschiede, die besonders in bezug auf die Temperatur in den verschiedenen Versuchsjahren während den zur Kornausbildung wichtigen Phasen wie Ährcheninitiiierung und Kornfüllung herrschten, zeigten sich keine augenscheinlichen Effekte auf die oberirdische Biomasse, den Ertrag und die einzelnen Ertragskomponenten.

4.2.2 ALLGEMEINE ERTRAGSQUALITÄT

Neben der Ertragsmenge ist auch die Ertragsqualität zu berücksichtigen, die im Fall der verwendeten Weizensorte neben den Aspekten der ernährungsphysiologischen Bewertung auch auf die verarbeitungstechnische Eignung zur Herstellung von Backprodukten und im Fall der Gerste auf die Verarbeitung in der Brauereitechnik zu bewerten ist.

Zur Beurteilung der allgemeinen Ertragsqualität wurde der Anteil der Korngrößen am Gesamtkorn sowie die Keimfähigkeit der Körner von Weizen und Gerste untersucht.

Allgemein bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen bei Weizen und Gerste in den Haupt- und Nebenähren übereinstimmend mit den Studien von Havelka et al. (1984) und Wheeler et al. (1996) in beiden Stickstoffbehandlungen eine Verschiebung der Korngrößen hin zu kleineren Körnern. Bedingt durch die größere Konkurrenz der Körner innerhalb der Ähre nahm der Anteil der Kornsortierung über 3,0 mm ab. Stickstoffeffekte oder Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Größensortierung konnten nur für die Nebenähren von Weizen bei einer Korngröße von 2,8 bis 3,0 mm und von Gerste bei einer Korngröße größer 3,0 mm beobachtet werden. Trotz der offensichtlichen Abnahme der Siebsortierung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen konnte das in diesem Zusammenhang häufig festgestellte Absinken des Tausendkorngewichtes bei den untersuchten Getreidearten überwiegend nicht beobachtet werden.

Für Mahlweizen wird unter Qualitätsgesichtspunkten eine Korngröße von größer 2,0 mm gefordert. Die durchgeführten Fraktionierungen auf fünf unterschiedliche Korngrößen erfolgten jedoch erst ab einer Siebgröße von 2,5 mm, so dass keine direkte Aussage über den Anteil der für Mahlweizen geforderten Korngröße möglich war. Geht man jedoch davon aus, dass auch der Anteil der Körner unter einer Größe von 2,0 mm entsprechend dem bekannten Reaktionsmuster auf erhöhtes CO₂ zunimmt, kann von einer Verschlechterung der Mahlqualität für Weizen ausgegangen werden.

Auch für die Gerste stellt die Sortierung eine wichtige mechanische Untersuchungsmöglichkeit dar. Besonders für die Sortierfraktion größer 2,5 mm, die als Vollgerstenanteil bezeichnet wird, ist im Fall der Braugerste ein Anteil von mindestens 90 % erwünscht (Reiner & Dörre 1985). Unter verarbeitungstechnischen Gesichtspunkten werden große Körner gefordert, da diese aufgrund des geringeren Schalenanteils proteinärmer und stärkereicher sind und durch den potenziell höheren fermentierbaren Kohlenhydratgehalt bei der Verarbeitung in der Mälzerei und Brennerei zu besseren Extraktausbeuten führen (Schildbach 1977, Sommer 1977, Kjøie & Doll 1979). Folglich muss im Zusammenhang mit der CO₂-bedingten Abnahme der Korngröße zumindest von einer verarbeitungstechnischen Verschlechterung der Braugerstenqualität ausgegangen werden. Aus diesem Grund sind durch die Veränderungen der Sortierung auch Folgen für den Marktwert der Gerste zu erwarten, so dass die Abnahme der Korngröße unter erhöhtem CO₂ auch aus wirtschaftlichen Gründen ein nicht zu vernachlässigendes wertbestimmendes Qualitätsmerkmal ist. In der vorliegenden Studie erfolgte die Größensortierung der Körner allerdings getrennt nach Haupt- und Nebenähren, so dass auch hier eine direkte Aussage über CO₂-Effekte auf den Vollgerstenanteil nicht möglich ist. Da jedoch in keiner der Behandlungen der Sortieranteil der kleinsten Körner auf mehr als 10 % anstieg, ist zu erwarten, dass der für

eine gute Braugerstenqualität geforderte Vollgersteanteil auch unter erhöhtem CO₂ erreicht wird.

Für die Verwertung der Sommergerste als Braugerste ist die Keimfähigkeit ein weiteres wichtiges Qualitätskriterium, an das die Malzindustrie hohe Qualitätsansprüche stellt. Erst durch die Keimung wird eine Reihe von wichtigen hydrolytischen Enzymen gebildet und der Abbau des Mehlkörpers in eine für Brauprozesse verwertbare Form ermöglicht. Gefordert wird daher ein Korn, das bereits kurze Zeit nach der Ernte eine Keimfähigkeit von annähernd 95 % erreicht, so dass es sich mit einer hohen Ausbeute leicht und schnell verarbeiten lässt. Obwohl erhöhtes CO₂ zu kleineren Körnern und zu einer Reduktion der Stickstoffkonzentration im Korn führte, wurde in allen CO₂- und Stickstoffbehandlungen der für Braugerste geforderte Sollwert erreicht, so dass diesbezüglich von einer Qualitätsveränderung nicht ausgegangen werden kann. Auch die Keimfähigkeit von Weizen blieb durch eine höhere CO₂-Exposition unverändert, wodurch die Ergebnisse von Sanhewé et al. (1996) bestätigt werden. Folglich besteht zwischen der Keimfähigkeit von Getreidekörnern und der Korngröße keine direkte Abhängigkeit.

4.2.3 CHEMISCHE ERTRAGSQUALITÄT

Neben den äußeren Kriterien, die auf die Kornausbildung und den Spelzenanteil ausgerichtet sind, spielen bei Getreidearten auch inhaltsstoffbezogene Qualitätseigenschaften eine Rolle. Die chemischen Analysen der untersuchten Körner ergaben jedoch nur vereinzelte signifikante Veränderungen in der qualitativen Kornzusammensetzung unter erhöhten CO₂- und Stickstoffkonzentrationen. Interaktionen zwischen CO₂ und Stickstoff auf die untersuchten Parameter wurden ebenfalls selten beobachtet, jedoch gab es einige Hinweise für CO₂-bedingte Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung von Getreidekörnern.

4.2.3.1 KOHLENHYDRATE

Die Untersuchungen der verschiedenen Kohlenstoffanteile wiesen während der Kornfüllung von Weizen durch einige tendenzielle, teilweise auch signifikante Effekte in den Körnern der Haupt- und Nebenähren auf eine Entwicklungsbeschleunigung der Pflanzen beziehungsweise auf eine vermehrte Allokation von Stärke, löslichen Kohlenhydraten und Saccharose unter erhöhtem CO₂ hin. Allerdings nahm der CO₂-induzierte Konzentrationsunterschied der löslichen Kohlenhydrate im Verlauf der Kornfüllung ab und die anfänglich beobachtete Förderung durch CO₂ verschwand. Hinweise auf eine Entwicklungsbeschleunigung der Pflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen ergaben sich auch in Studien von Nie et al. (1995).

Berücksichtigt man die klimatischen Rahmenbedingungen der Versuchsjahre 1995 und 1996, so war der Zeitraum der Kornfüllung von Weizen 1995 sehr heiß, im Gegensatz dazu wurde diese Phase 1996 durch kühle Bedingungen geprägt. Die hohen Temperaturen in den OTC verursachten 1995 ebenfalls physiologische Effekte und veränderten den normalen Metabolismus während der Kornfüllung. Die daraus resultierende Beschleunigung der Kornfüllungsdauer spiegelte sich auch bei der Einlagerung der löslichen Kohlenhydrate und der Stärke wieder. Zu vergleichbaren Ernteterminen waren die 1995 nach der Anthese in die Körner eingelagerten Konzentrationen an löslichen Kohlenhydraten, reduzierenden Zuckern, Saccharose und Fructanen im Vergleich zu 1996 geringer, die Konzentration an Stärke dagegen höher, was für eine durch die höheren Temperaturen beschleunigte Kornfüllung spricht. Eine Bestätigung für die physiologischen Veränderungen des Kornfüllungsprozesses durch die klimatischen Rahmenbedingungen ergab sich auch aus dem vergleichsweise höheren Tausendkorngewicht und Harvest-Index im Versuchsjahr 1996, die auf eine längere Kornfüllungsdauer verbunden mit einer effektiveren Stärkeeinlagerung in die Körner unter kühleren Temperaturen zurückzuführen sind.

Dagegen konnte zum Zeitpunkt der Erntereife unter erhöhten CO₂-Konzentrationen mit Ausnahme von vereinzelten Effekten keine eindeutige Wirkung bezüglich der Konzentrationen an reduzierenden Zuckern, Saccharose und löslichen Kohlenhydraten in den Körnern der beiden Getreidearten festgestellt werden. Auch Rogers et al. (1998) und Dijkstra et al. (1999) stellten unter verdoppeltem Umgebungs-CO₂ keine Veränderungen der Konzentrationen von löslichen Kohlenhydraten in den Körnern von Weizen fest.

Besonders in der Qualitätsbeurteilung der Gerste spielen die Konzentrationen der Zucker eine bedeutende Rolle, da sie abhängig von der Zusammensetzung durch die Reaktion mit Aminosäuren die Farbe des Bieres beeinflussen. Erhöhte CO₂-Konzentrationen zeigten überwiegend keine Wirkung auf die Zuckerkonzentrationen, so dass eine Qualitätsveränderung des Bieres diesbezüglich nicht zu erwarten ist.

Sommerweizen reagierte auf die Exposition mit erhöhtem CO₂ in beiden Stickstoffbehandlungen überwiegend mit einem Anstieg der Stärkekonzentrationen in den Körnern, wodurch der ernährungsphysiologische Wert des Backweizens abnahm. Eine höhere Stickstoffversorgung reduzierte dagegen die Stärkekonzentrationen im Korn, was aufgrund der bekannten Konkurrenz zwischen dem Kohlenstoff- und Stickstoffmetabolismus den Erwartungen entsprach. Hintergrund ist die verstärkte Synthese von Proteinen und Aminosäuren bei erhöhter Stickstoffversorgung, die zugunsten ansteigender Proteinkonzentrationen zu niedrigeren Stärkekonzentrationen führt. Neben der Stärkekonzentration ist bei Weizen unter Qualitätsgesichtspunkten aller-

dings auch die Verkleisterungsfähigkeit der Stärke von großer Bedeutung. Dieser Parameter konnte jedoch in der vorliegenden Studie nicht untersucht werden, so dass an dieser Stelle weiterhin Informationsbedarf besteht.

Da eine große Menge an vergärendem Substrat und somit eine hohe Extraktausbeute eine positive Eigenschaft der Brauereieignung ist, ist auch im Fall der Sommergerste ein Anstieg der Stärkekonzentration unter erhöhtem CO₂ erstrebenswert. Aufgrund der unveränderten Stärkekonzentration im Korn von Sommergerste kann jedoch von einer gleichbleibenden Brauqualität unter erhöhtem CO₂ ausgegangen werden.

4.2.3.2 MINERALSTOFFE

CO₂ ist in terrestrischen Ökosystemen die Hauptkohlenstoffquelle von höheren Pflanzen und muss daher als Nährstoff betrachtet werden, der für C₃-Pflanzen bei gegenwärtig vorherrschenden Konzentrationen in der Atmosphäre einen Mangelfaktor darstellt (Sinclair 1992). Folglich interagieren Veränderungen in der CO₂-Konzentration über eine komplexe Beeinflussung des Nährstoffmetabolismus im vegetativen Pflanzengewebe mit der Aufnahme und dem Bedarf anderer Nährstoffe (Natr 1992, Rastetter & Shaver 1992, Bergmann 1993, Roy & Garnier 1994). Diese Mineralstoffe werden während der Kornfüllung abhängig von der Nachfrage und der Senkengröße der Körner sowie von der Mobilität der einzelnen Elemente aus der vegetativen Biomasse in die Körner verlagert und spielen eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung der Qualität.

In den Weizenkörnern nahmen alle Mineralstoffkonzentrationen mit Ausnahme von Mangan, Aluminium und Natrium unter erhöhtem CO₂ ab, so dass unter ernährungsphysiologischen Aspekten von einer Qualitätsverschlechterung ausgegangen werden kann. Die Reduzierung der Mineralstoffe in Getreidekörnern ist zum einen auf den unter erhöhtem CO₂ veränderten Mineralstoffmetabolismus, zum anderen auf die vermehrte Einlagerung von Kohlenhydraten zurückzuführen und wurde für Getreidearten ebenfalls von Hocking & Meyer (1991 b), Manderscheid et al. (1995) und Fangmeier et al. (1996 b, 1997) beschrieben. Die im Korn unter erhöhtem CO₂ unbeeinflussten Konzentrationen von Natrium, Mangan und Aluminium deuten dagegen auf eine ausreichende Umverteilung dieser Mineralstoffe aus den vegetativen Pools und/oder eine fortlaufende Aufnahme aus dem Boden während der Kornfüllung hin. Allerdings handelt es sich bei Natrium, Mangan und Aluminium einschränkend um Mikronährstoffe, die nur in geringen Mengen im Stoffwechsel der Pflanzen zur Bedarfsdeckung benötigt werden. Da allerdings Mangan nicht im Phloem transportiert werden kann, wodurch seine Beweglichkeit in der Pflanze gering ist (Van Goor & Wiersma 1994) und die Aufnahme von Aluminium von den Pflanzen

aufgrund seiner toxischen Wirkung weitgehend vermieden wird, stellt diese Hypothese jedoch keinen ausreichenden Erklärungsansatz dar und bietet Raum für weitere Forschungsaktivitäten.

In der Literatur beziehen sich die meisten Studien über erhöhte CO₂-Konzentrationen und Mineralstoffe auf die Interaktionen von CO₂ und Stickstoff. Erhöhte CO₂-Konzentrationen führen zu einem Absinken der Photorespiration (Johnson et al. 1993, Bertoni & Becker 1996, Fangmeier & Jäger 1998) und verändern durch eine Balanceverschiebung den Anteil des in der RubisCO fixierten Stickstoffs zugunsten von Proteinen, die mit dem photosynthetischen Elektronentransport oder der Saccharosesynthese assoziiert sind (Sage et al. 1989, Conroy 1992, Woodrow 1994, Webber et al. 1994, Moore et al. 1999, Fangmeier & Jäger 1998, 2001). Aus diesen Modifikationen im Stickstoffmetabolismus ergibt sich unter erhöhtem CO₂ eine verbesserte Stickstoffnutzungseffizienz (Van Kraalingen 1990, Hocking & Meyer 1991 a), verbunden mit geringeren Stickstoffkonzentrationen im grünen Gewebe (Field et al. 1992, Conroy 1992, Webber et al. 1994, Manderscheid et al. 1995, Fangmeier et al. 1997, 1999, Cotrufo et al. 1998). Bei gleichzeitig verstärkter Kohlenhydrateinlagerung resultiert als einheitlicher Effekt der veränderten Nährstoffbalance unter erhöhtem CO₂ eine Erhöhung des C/N-Verhältnisses in photosynthetisch aktiven Pflanzenteilen von C₃-Pflanzen (Conroy 1992, Conroy & Hocking 1993, Cao & Tibbits 1997, Cotrufo et al. 1998).

Dies hat auch für die Stickstofftranslokation während der Kornfüllung Folgen, da nach der Anthese keine weitere Aufnahme dieses Nährstoffes in den Spross erfolgt (Schjoerring 1991), so dass die Umverteilung aus den vegetativen Organen während der Kornfüllung die einzige und wichtigste Quelle für den Stickstoff darstellt (Russell 1986, Van Kraalingen 1990, Peeters & Van Laere 1994, Palta & Fillery 1995, Fangmeier et al. 1999). Da diese Pools unter erhöhten CO₂-Konzentrationen nicht verändert werden, verschieben sich - bei steigenden Erträgen unter erhöhtem CO₂ - durch die gleichzeitig verstärkte Synthese und Remobilisierung von Kohlenhydraten während der Kornfüllung im Korn ebenfalls die Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse und bewirkten auch dort eine Verschiebung des C/N-Verhältnisses zugunsten des Kohlenstoffs (Conroy et al. 1994, Fangmeier et al. 1997).

Eine höhere Stickstoffversorgung konnte übereinstimmend mit der Studie von Fangmeier et al. (1999) diesen Effekt nur teilweise ausgleichen und führte zu einem relativen Absinken des C/N-Verhältnisses, Interaktionen zwischen der CO₂-Exposition und der Stickstoffversorgung konnten jedoch nicht festgestellt werden. Hintergrund der positiven Stickstoffreaktion war, dass der zusätzliche Stickstoff im vegetativen Gewebe durch die verstärkte Protein- und Aminosäuresynthese zu einer Vergrößerung der Aminosäurepools führte, wodurch den Körnern während der

Kornfüllungsphase durch die Stickstoffreallokation vermehrt Stickstoff in Form von Aminosäuren zur Verfügung stand (Fisher 1987). Gleichzeitig ermöglichte die Erhöhung der Stickstoffversorgung aber auch im Fall von Schwefel (S), Eisen (Fe), Calcium (Ca) und Kohlenstoff (C) die vermehrte Anlage vegetativer Poolgrößen sowie deren Allokation ins Korn während der Kornfüllung, die Umverteilung von Phosphor (P) und Magnesium (Mg) wurde dagegen reduziert. Auch hier konnten auf die Mineralstoffkonzentrationen nur vereinzelte Interaktionen von CO₂ und Stickstoff festgestellt werden, mit höheren CO₂-Konzentrationen wurden die dünungsbedingten Unterschiede der Konzentrationen von Calcium (Ca) und Kohlenstoff (C) geringer.

Die im Korn unter erhöhtem CO₂ reduzierte Phosphorkonzentration stand im Gegensatz zu den Erwartungen. Im Unterschied zu Stickstoff steigt durch das veränderte Gleichgewicht zwischen der photosynthetischen Kohlenstoffreduktion und der photosynthetischen Kohlenstoffoxidation (Photorespiration) unter erhöhten CO₂-Konzentrationen der Bedarf an Phosphor in grünen Pflanzengewebe (Bowes 1993, Sharkey 1985, Conroy 1992, Morin et al. 1992, Sage 1994). Folge ist keine, oder nur eine geringe Reduktion der Phosphorkonzentrationen im vegetativen Gewebe unter erhöhtem CO₂ (Overdieck 1993, Conroy 1992, Rogers et al. 1993, Fangmeier et al. 1999). Da die im grünen Gewebe eingelagerten Phosphor pools während der Kornfüllung komplett in die Körner verlagert werden und darüber hinaus, im Gegensatz zu Stickstoff, auch während der Kornfüllungsphase eine Aufnahme von Phosphor in den Spross erfolgen kann, widersprach die Reduktion der Phosphorkonzentrationen im Korn den Ergebnissen von Manderscheid et al. (1995), die einen Anstieg der Phosphorkonzentration in den Körnern unter erhöhtem CO₂ feststellten.

Betreffend der landwirtschaftlichen Praxis wird daher als praktische Konsequenz in einer zukünftigen CO₂-Welt eine Überarbeitung der notwendigen Düngeempfehlungen erforderlich sein (Conroy 1992). Parallel dazu müssen jedoch auch die Werte für die kritischen Stickstoffkonzentrationen in den Pflanzengewebe, die als Testverfahren zur Kontrolle des Düngemanagements eingesetzt werden, nach unten korrigiert werden (Hocking & Meyer 1991 a). Allerdings kommt die verbesserte Stickstoffnutzungseffizienz durch erhöhte CO₂-Konzentrationen den derzeitigen züchterischen Bemühungen entgegen, Genotypen zu finden, die den pflanzenverfügbaren Stickstoff effektiver nutzen, das heißt durch verbesserte Stickstoffaufnahme und – Verwertung höhere Kornerträge liefern.

4.2.3.3 *PROTEIN*

Neben dem Mineralstoffgehalt besitzt in Getreidekörnern auch die Konzentration an Proteinen unter Qualitätsaspekten eine große Bedeutung (Finney 1985, Pommeranz 1988). Eine direkte Folge erhöhter CO₂-Konzentrationen war die Abnahme der Proteinkonzentration im Getreidekorn, die jedoch für Gerste im Vergleich zu Weizen geringer ausfiel. Hintergrund des CO₂-Effekts ist die negative Korrelation zwischen Kornertrag und Rohproteingehalt (Feil & Bänziger 1993, Feil 1998, 1999). Generell wird während der Kornfüllung im Getreidekorn zuerst der Proteinanteil angelegt, erst danach findet der Stärkeaufbau statt (Sowers et al. 1994). Da während der Kornfüllung unter erhöhtem CO₂ vermehrt Kohlenhydrate zur Verfügung stehen, resultiert einerseits ein Ertragsanstieg durch die erhöhte Stärkespeicherung, andererseits kommt es zwangsläufig zu einer Abnahme der Proteinkonzentration im Korn (Schuster et al. 1998). Diese erfolgte in einer Größenordnung, in der bereits Veränderungen auf die Kornqualität zu erwarten sind. Aufgrund von häufig fehlenden Interaktionen zwischen CO₂ und Stickstoff auf die Proteinkonzentration kann davon ausgegangen werden, dass die Qualitätsverschlechterung der Backeigenschaften nur teilweise durch eine bessere Stickstoffversorgung kompensiert werden kann. Zusätzlicher Stickstoff wird in erster Linie in einen höheren Kohlenstoffgewinn in Form von Kornbiomasse und nicht in eine höhere Proteinkonzentration der Körner investiert. Im Gegensatz dazu vermuten Rogers et al. (1996) und Kimball et al. (2001), dass die CO₂-bedingte Proteinreduktion vollständig durch eine erhöhte Stickstoffversorgung der Pflanzen ausgeglichen werden kann.

Als Mindestanforderung für eine gute Backqualität wird im Fall von Weizen eine Rohproteinkonzentration von mindestens 11,5 % angestrebt, für die Qualitätseinstufung als Aufmischweizen ist ein Proteingehalt von 14 % erforderlich. Insgesamt war der Rohproteingehalt von Weizen bezüglich des Aufmischwertes in beiden Stickstoffbehandlungen unter erhöhtem CO₂ als ungenügend zu bewerten. Lediglich Mehl aus der Exposition mit 380 µl l⁻¹ CO₂ erreichte weitgehend in beiden Stickstoffbehandlungen die für die Einstufung als Aufmischweizen benötigte Proteinkonzentration. Vereinzelt wurde auch in der Behandlung mit 550 µl l⁻¹ CO₂ der erforderliche Sollwert von 14 % Rohproteingehalt erreicht, hier allerdings fast nur in Kombination mit der höheren Stickstoffversorgung. Auch die Anforderungen an die Backqualität waren trotz des niedrigeren Sollwerts von 11,5 % Rohproteinkonzentration häufig in der Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ auch in der Kombination mit einer höheren Stickstoffversorgung nicht zu realisieren. Die CO₂-Effekte auf die Proteinkonzentration als zentralen Qualitätsaspekt stehen in Einklang mit den Ergebnissen von Hocking & Meyer (1991 a), Conroy (1992 b), Conroy & Hocking (1993), Thompson & Woodward (1994), Manderscheid et al. (1995), Blumenthal et al.

(1996), Fangmeier et al. (1996 a, 1997, 1999), Hakala (1998) und Kimball et al. (2001). Da bei Weizen die Proteinkonzentration positiv mit den Teigeigenschaften korreliert, ist unter erhöhtem CO₂ eine deutliche Verschlechterung der Backqualität und der Qualität für die industrielle Verarbeitung zu erwarten (Hocking & Meyer 1991 a). Andere Experimente berichten dagegen bei Weizen von geringen oder keinen Qualitätsveränderungen durch erhöhte CO₂-Konzentrationen (Havelka et al. 1984, Williams et al. 1995, Tester et al. 1995, Reuveni & Bugbee 1997, Rogers et al. 1998, Dijkstra et al. 1999). Daher ist die Frage, ob erhöhte CO₂-Konzentrationen die Kornqualität in Zukunft verändern, weiterhin offen.

Im Gegensatz zu Weizen mindert bei Sommergerste ein hoher Proteingehalt die Brauqualität und ist ein häufiger Grund für die Zurückweisung von Braugerstenpartien (Schildbach 1969, Smith, 1991, Brandenburger 1992, Hollo 1992), da die Extraktleistung des Malzes durch den reduzierten Stärkegehalt verringert ist. Darüber hinaus kommt es häufig in Zusammenhang mit hohen Kornproteinkonzentrationen durch den geringeren Proteinlösungsgrad zu einer unerwünschten Kältetrübung, woraus eine unzureichende Bierqualität resultiert. Folge ist eine erschwerte Filtration, der Kühlaufwand muss gesteigert werden und es ergibt sich eine unerwünschte intensive Würzfarbe (Reiner & Dörre 1985). Aus diesem Grund ist sicherzustellen, dass der Proteingehalt von 11,5 % in den Körnern von Sommergerste nicht überschritten wird (Schildbach et al. 1997). Da dieser Sollwert für den Rohproteingehalt in beiden Stickstoffbehandlungen nur bei gegenwärtig herrschenden CO₂-Konzentrationen erreicht wurde, kann von einer Verbesserung der Brauqualität unter erhöhtem CO₂ ausgegangen werden. Trotzdem sollte eine Mindestproteinkonzentration gewährleistet sein, da von dieser einerseits der Enzymgehalt für die optimale Vermälzbarkeit der Gerste abhängt, andererseits die Qualität des Bieres hinsichtlich Schaumhaltigkeit, Geschmack und Stabilität des Bieres beeinflusst wird. Da mit einer höheren Stickstoffversorgung der Rohproteingehalt zunimmt, stehen Ertrag und Qualität der Braugerste, soweit es sich um Einflüsse der Stickstoffversorgung auf das Qualitätskriterium Protein handelt, in Konkurrenz zueinander.

Neben der Proteinmenge ist auch die Proteinqualität im Korn zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit zur Beurteilung der Qualität ist die Systematisierung der im Getreidekorn enthaltenen Proteine entsprechend ihrer Löslichkeit in wasserlösliche Albumine, salzlösliche Globuline, alkohollösliche Prolamine (Weizen) beziehungsweise Hordeine (Gerste) und Gliadine sowie säure- und laugenlösliche Gluteline (Osborne 1907, 1924, Sapirstein & Bushuk 1985). Eine Fraktionierung der Kornproteine wurde in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt, jedoch konnten über Veränderungen einzelner Qualitätsparameter Aussagen möglicher CO₂-Effekte auf die Proteinqualität abgeleitet werden.

Hauptursache für die Ausprägung der rheologischen Teigeigenschaften bei Weizen ist die Menge und die Qualität der Glutelinfraktion, zu der auch die Kleberproteine gehören (Wrigley & Bietz 1988, Shewry et al. 1989, MacRitchie et al. 1990, Weegels et al. 1996, Fido et al. 1997, Stone & Savin 1999). Unter erhöhtem CO₂ nimmt mit fallendem Proteingehalt die Dehnbarkeit des Klebers und damit auch die der Teige ab, woraus eine Beeinträchtigung der Gebäckentwicklung und somit eine Verschlechterung der Backqualität resultiert (Killermann et al. 1999). Allerdings sinkt die Qualität nicht proportional mit der Klebermenge, sondern ist im wesentlichen von Parametern der Klebergüte wie Quellbarkeit, Dehnbarkeit und Elastizität abhängig. Auch die Wasseraufnahme des Teiges, die maßgebend für die Teigausbeute und die Teigfestigkeit ist, zeigt eine Abhängigkeit vom Proteingehalt und von der Quellfähigkeit des Klebers.

In diesem Zusammenhang stellten Vandermeiren et al. (1992) und Fangmeier et al. (1999) in Weizen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen eine signifikante Abnahme des Trocken- und Feuchtglutenanteils fest. Während Vandermeiren et al. (1992) darüber hinaus keine weiteren CO₂-Effekte auf die physikalischen Qualitätsparameter wie Zeleny- und Hagberg-Wert beobachteten, ergaben sich bei Fangmeier et al. (1999) eine Abnahme des Zeleny- und Hagberg-Werts verbunden mit einer Qualitätsverschlechterung. Einschränkend ist für die Studie von Vandermeiren et al. (1992) zu erwähnen, dass die CO₂-bedingte Abnahme der Proteinkonzentration in den Körnern lediglich 4 % betrug und somit vergleichsweise geringer ausfiel als in der vorliegenden Studie. Dagegen gehen Shewry et al. (1994) davon aus, dass erhöhte CO₂-konzentrationen keine Veränderungen der Proteinzusammensetzung und somit des Glutelinteils bewirken.

Obwohl der Anteil an Kleberprotein genetisch fixiert ist, wird er in seiner Ausprägung von der Stickstoffdüngung beeinflusst (Reiner et al. 1992). Mit steigender Stickstoffdüngung nimmt der Gehalt der nach Osborne (1924) definierten Fraktion an Globulinen und Albuminen im Korn ab, wogegen Gluteline und Prolamine zunehmen (Michael & Blume 1960, Jahn-Deesbach & Weipert 1965, Shewry & Mifflin 1985, Gupta et al. 1992). Demzufolge verbesserte eine höhere Stickstoffversorgung die Backqualität von Sommerweizen, die CO₂-bedingten Qualitätsverluste konnten jedoch nur bedingt kompensiert werden.

Bei Gerste liegt die größte Aufmerksamkeit in der Malz- und Bierverarbeitung bei den alkohollöslichen Hordeinen, da diese eine Schlüsselfunktion für die technologischen Eigenschaften der Körner besitzen. Da die Qualität der Braugerste negativ mit der Menge und der Zusammensetzung des Hordeins korreliert (Kirkman et al. 1982), kann durch die Abnahme der Proteinkonzentration unter erhöhtem CO₂ von einer Qualitätsverbesserung der Brauqualität ausgegangen

werden. Zusätzlicher Stickstoff wirkt sich dagegen bei Gerste negativ auf die Proteinqualität aus, da er hauptsächlich einem Anstieg der Hordeinfraktion verursacht (Giese et al. 1983, Corke & Atsmon 1988).

4.2.3.4 AMINOSÄUREN

Der ernährungstechnische Wert der Proteine in Nahrungsmitteln ist von der Verteilung der Aminosäuren und deren biologischer Verfügbarkeit für den Konsumenten abhängig. Diesbezüglich ermöglichen Veränderungen der Aminosäurekonzentrationen und des Anteils der Aminosäuren am Gesamtprotein ebenfalls Aussagen über CO₂- und stickstoffbedingte Veränderungen bezüglich der Kornqualität. Eine entscheidende Rolle spielen hierbei die essentiellen Aminosäuren, deren Anteil in den einzelnen Proteinfractionen unterschiedlich hoch ist (Ewart 1967, 1969). Allerdings ist bei der Aussage über mögliche Qualitätsveränderungen einschränkend zu berücksichtigen, dass die Bioverfügbarkeit der Aminosäuren in vielen Fällen durch die Verarbeitungsprozesse verändert wird, so dass eine direkte Übertragung der Qualitätsbeurteilung nur bedingt möglich ist.

In Getreidearten kann als direkte Folge der veränderten Verfügbarkeit von Stickstoff unter erhöhtem CO₂ von einer Beeinflussung der einzelnen Proteinfractionen und der Biologischen Wertigkeit ausgegangen werden, da die Stickstoffkonzentration im Korn mit der Aminosäurezusammensetzung korreliert (Mosse et al. 1985, Triboni et al. 1990, Bulman et al. 1994). In Weizenkörnern sind die Kleberproteine durch hohe Konzentrationen an Glutaminsäure (Glu), Glutamin (Gln) und Prolin (Pro) charakterisiert, so dass unter erhöhten CO₂-Konzentrationen von einer Abnahme dieser Aminosäuren ausgegangen werden kann. Tatsächlich ergaben sich mit Ausnahme von Valin (Val) eindeutige CO₂- und Stickstoffeffekte auf die Konzentration der Aminosäuren im Weizenkorn, allerdings nur in den Nebenähren. Erreicht wurde in der hohen Stickstoffbehandlung eine massive Reduktion der im Kornprotein enthaltenen Aminosäurekonzentrationen in einer Größenordnung von durchschnittlich 28,5 % bei Exposition mit 550 µl l⁻¹ CO₂ und von 40,9 % bei Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ im Vergleich zur Kontrolle. Somit kann aus ernährungsphysiologischer Sicht von einer Verschlechterung der Biologischen Wertigkeit des Weizens und der Qualität unter erhöhten CO₂-Konzentrationen ausgegangen werden. Die Abnahme der Aminosäurekonzentrationen im Korn unter erhöhtem CO₂ wurde auch bei Manderscheid et al. (1995) beobachtet.

Eine höhere Stickstoffversorgung bewirkte erwartungsgemäß in den Behandlungen mit 380 µl l⁻¹ CO₂ und 550 µl l⁻¹ CO₂ einen eindeutigen Anstieg der Konzentrationen von Alanin (Ala), Glutaminsäure (Glu), Glycin (Gly), Leucin (Leu), Prolin (Pro) und Threonin (Thr), der

jedoch mit zunehmender CO₂-Konzentration kleiner wurde und sich in der Behandlung mit 680 µl l⁻¹ CO₂ sogar ins negative umkehrte. Interaktionen von CO₂ und Stickstoff auf die Aminosäurekonzentration konnten mehrfach nachgewiesen werden, eine detailliertere Interpretation war jedoch nicht möglich.

Eindeutige Effekte erhöhter CO₂- und Stickstoffkonzentrationen auf den prozentualen Anteil der Aminosäuren am Gesamtprotein von Weizen ergaben sich nur vereinzelt. Während jedoch in der Studie von Manderscheid et al. (1995) der Anteil der essentiellen Aminosäuren Lysin (Lys) und Arginin (Arg) zunahm, stiegen in der vorliegenden Studie bei Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ und erhöhter Stickstoffversorgung als nicht statistisch abgesicherter Trend die Anteile von Phenylalanin (Phe) und Valin (Val) am Gesamtprotein in den Nebenähren an. In beiden Studien wurde der Anstieg der essentiellen Aminosäuren überwiegend durch die Abnahme von Glutaminsäure (Glu) kompensiert.

Die unter erhöhtem CO₂ festgestellten Veränderungen, bezogen auf die Anteile der einzelnen Aminosäuren am hydrolysierten Kornprotein, lassen auf eine veränderte Zusammensetzung der einzelnen Proteinfractionen schließen. Der Trend der Abnahme des Glutaminsäureanteils (Glu) und des Anstiegs der essentiellen Aminosäuren unter erhöhten CO₂-Konzentrationen kann als relative Reduktion der glutaminsäurereichen Prolamine und Gluteline bei gleichzeitiger relativer Förderung der an essentiellen Aminosäuren reichen Albumine und Globuline interpretiert werden. Da, wie bereits angesprochen, besonders dem Glutelin eine wichtige Rolle bei der Qualitätsbeurteilung von Weizen zugeschrieben wird, kann auch an dieser Stelle von einer Verschlechterung der Backqualität durch erhöhtes CO₂ ausgegangen werden. Eine höhere Stickstoffversorgung bewirkte eine signifikante Reduktion des Anteils an Alanin (Ala), Asparaginsäure (Asp) und Threonin (Thr) am Gesamtprotein, tendenziell fiel auch der Anteil von Arginin (Arg) und Serin (Ser) am Gesamtprotein ab, während der Anteil an Prolin (Pro) anstieg. Die übrigen Aminosäuren zeigten kaum Veränderungen oder reagierten sehr unterschiedlich auf die CO₂- und Stickstoffbehandlungen. Es ist jedoch anzumerken, dass an dieser Stelle weiterhin Forschungsbedarf besteht, um Veränderungen der Aminosäurekonzentrationen sowie Effekte auf die Anteile der einzelnen Aminosäuren im Kornprotein unter erhöhten CO₂- und Stickstoffkonzentrationen zu erklären.

Bei Gerste spielt in der Malz- und Bierverarbeitung der Gehalt und die Zusammensetzung der Hordeine die Hauptrolle (Mifflin & Shewry 1979). Da diese reich an Glutaminsäure (Glu), Glutamin (Gln) und Prolin (Pro) und arm an basischen Aminosäuren wie Lysin (Lys) sind (Kirkman et al. 1982), lag der Verdacht nahe, dass über Veränderungen der Anteile dieser Ami-

nosäuren am Gesamtprotein ebenfalls Folgen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf diese qualitätsbestimmende Proteinfraction der Gerste abgeleitet werden können. Dies war jedoch in der vorliegenden Studie aufgrund der geringen Veränderungen der Aminosäureanteile am Gesamtprotein nicht der Fall. Auffallend war lediglich in den Nebenähren bei guter Stickstoffversorgung der Trend einer Zunahme des Prolin- (Pro) und Valinanteils (Val) um 2,1 % und 0,9 % bei gleichzeitiger Abnahme des Glutaminsäureanteils (Glu) um 3,6 % am Gesamtprotein unter erhöhtem CO₂.

Durch die im Malz enthaltenen Aminosäuren wird besonders die Farbe des Bieres beeinflusst, da ein hoher Gehalt an Aminosäuren in Kombination mit Zuckern bei hohen Temperaturen in der Bierproduktion über die Maillardreaktion zur Bildung von Melanoidinen führt. Die verschiedenen Aminosäuren vermitteln aber nicht nur eine unterschiedliche Färbung, sondern sind jeweils typisch für den Geruch und den Geschmack des Bieres. Beispielsweise verursacht Glycin (Gly) eine starke Färbung bei schwachem Aroma, Alanin (Ala) weniger Farbe bei ähnlichem Geschmack, Valin (Val) reagiert langsam unter Bildung bräunlicher, angenehm aromatischer Melanoidine. Leucin (Leu), ebenfalls langsam reagierend, färbt nur schwach, vermittelt aber ein brotartiges Röstaroma (Lüers 1950). Da erhöhte CO₂-Konzentrationen besonders in den Nebenähren zu einer Reduktion fast aller Aminosäurekonzentrationen führten, kann von einer Beeinflussung der Farbe, des Geruchs und des Geschmacks des Bieres ausgegangen werden. Eine Aussage, ob diese Veränderungen unter qualitativen Gesichtspunkten jedoch positiv oder negativ zu beurteilen sind, ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht möglich.

4.3 Kartoffeln

Kartoffelpflanzen bilden an unterirdischen Ausläufern als vegetatives Speichergewebe Knollen, das keine eigene photosynthetische Aktivität aufweist (Farrar & Williams 1991). Die Knollen bilden ab der Knolleninduktion die wichtigste Kohlenstoffsene (Stitt et al. 1991, Körner et al. 1995, Wolfe et al. 1998); die Versorgung erfolgt nach apoplastischer Phloembeladung und Transport des Kohlenstoffs in Form von Saccharose (Oparka et al. 1992, Riesmeier et al. 1994). Darüber hinaus sind die Knollen das Ernteprodukt, dessen weitere Nutzung und Verarbeitung im wesentlichen durch die Ertrags- und Qualitätsdefinition bestimmt wird. Im Fall der verwendeten Kartoffelsorte Bintje, eine der meist kultivierten und unter finanziellen Gesichtspunkten eine der wichtigsten europäischen Sorten, ist dies vor allem das Qualitätsspektrum für die Herstellung von Pommes frites und Chips.

4.3.1 WASSERVERBRAUCH DES KARTOFFELBESTANDES

Der Wasserverbrauch der Pflanzen zeigte mit Ausnahme eines sich in den beiden Versuchsjahren widersprechenden Standorteffekts keine eindeutige Antwort auf die Behandlungen. Lediglich im Versuchsjahr 1998 konnte der Trend abgeleitet werden, dass unter erhöhtem CO₂ der Wasserverbrauch der Pflanzen abnahm. Für die landwirtschaftliche Produktion bedeutet dies einen Vorteil, da auch trockenere Standorte effektiver genutzt werden können.

Eine mögliche Ursache für die deutlicheren Effekte 1998 ist die Exposition der Pflanzen in Pflanzgefäßen, die im Vergleich zu den Bestandesflächen eine bessere Kontrolle des Wasserverbrauchs ermöglichte. Auch in der Literatur wurde vielfach eine Steigerung der Wassernutzungseffizienz unter erhöhtem CO₂ beschrieben. Erhöhte CO₂-Konzentrationen führen durch Reduktion des stomatären Widerstands zu einem Absinken der Transpirationsrate (Kimball & Idso 1983, Acock & Allen 1985, Allen 1990, Tyree & Alexander 1993, Sage et al. 1994), woraus jedoch gleichzeitig ein Temperaturanstieg des Blattes verbunden mit einer beschleunigten Blattseneszenz resultiert. Da unter erhöhtem CO₂ die Reduktion der stomatären Leitfähigkeit insgesamt stärker ausfällt als die mögliche Zunahme des Blattflächenindex (LAI), nimmt die Bestandstranspiration und damit der Wasserverbrauch des Bestandes ab (Grant et al. 1995, Wilson et al. 1999). Jones (1984) und Schapendonk et al. (1995) stellten dagegen übereinstimmend mit den Ergebnissen dieser Studie von 1999 fest, dass die über die gesamte Wachstumsperiode transpirierte Wassermenge durch erhöhtes CO₂ unbeeinflusst bleibt. In diesem Fall wird die verbesserte Wassernutzungseffizienz durch einen ansteigenden Blattflächenindex kompensiert, dieser blieb jedoch in der vorliegenden Studie unverändert (siehe Lichtinterzeption und Blattflächenindex).

4.3.2 BESTANDESENTWICKLUNG

4.3.2.1 PHÄNOLOGISCHE ENTWICKLUNG

Veränderungen in der Phänologie von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen verursachen entscheidende Folgen für das landwirtschaftliche Management und beeinflussen die Produktivität (Rosenzweig & Parry 1994). Besonders die Länge der Vegetationsdauer (Acock et al. 1985), die Zeit bis zum Schließen des Bestandes und der Beginn der Seneszenz haben unter veränderten atmosphärischen Spurengaskonzentrationen einen bedeutenden Einfluss auf den Ertrag. Insgesamt zeigten erhöhte CO₂- und Ozonkonzentrationen keine eindeutigen Effekte auf wichtige Entwicklungsphasen der Kartoffelpflanzen wie Auflaufen, Erscheinen der ersten Infloreszenz, maximale Blattfläche und Zeitpunkt der Physiologischen Reife. Andere Studien berichten

dagegen von Veränderungen der phänologischen Entwicklung wie eine früher einsetzende Blüte, eine beschleunigte Reife und eine insgesamt verkürzte Vegetationsdauer durch die früher beginnende Seneszenz (Krupa & Kickert 1989, Manning et al. 1995, Miglietta et al. 1998, Lawson et al. 2001).

Veränderungen in der phänologischen Entwicklung sind auch in Hinblick auf die Wirkung von Ozon von großer Bedeutung. Ozon induziert bei Kartoffelpflanzen besonders während der reproduktiven Phase bedeutende Effekte mit häufig negativen Folgen auf den Ertrag (Black et al. 2000). Die reproduktive Entwicklung ist jedoch nicht direkt mit dem Knollenertrag verbunden. Die Knolleninitiierung beginnt bereits vor der Blüte und das Knollenwachstum endet mit der Ernte, ausschlaggebend für die Produktion ist die Länge dieser Phase. Allerdings ist derzeit noch unklar, ob der gesamte Zeitraum der Knollenentwicklung für Ozoneffekte sensitiv ist, oder nur die Periode zwischen maximaler Blattfläche und Ernte (De Temmerman et al. im Druck a).

In der vorliegenden Studie wurde der Zeitpunkt der Knolleninduktion und der Beginn der Seneszenz signifikant durch erhöhte Ozonkonzentrationen beschleunigt. Auch Pell et al. (1980), Foster et al. (1983) und Hacour et al. (im Druck) konnten unter erhöhter Ozonexposition eine beschleunigte Seneszenz feststellen. Da die Pflanzen in beiden Versuchsjahren ihre Blüten abwarfen, war es nicht möglich, die Entwicklungsstadien Beginn der Blüte, Fruchtentwicklung und Fruchtreife sowie Samenentwicklung zu verfolgen. Aus diesem Grund konnte die Beobachtung von Miglietta et al. (1998), dass die phänologische Entwicklung von Kartoffeln durch die früher einsetzende Blüte und Seneszenz der Blätter unter erhöhtem CO₂ beschleunigt wird, in dieser Studie nicht bestätigt werden.

Entgegen den Erwartungen begann die Seneszenz, trotz der höheren Temperaturen in den OTC im Vergleich zu der kammerlosen Behandlung, später. Die erwartete Entwicklungsverzögerung aufgrund der niedrigeren Temperaturen am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort ergab sich nur für die Maximale Blattfläche und den Beginn der Seneszenz. Das Auflaufen, das Erscheinen der ersten Infloreszenz und die Physiologische Reife deuteten dagegen auf eine unerwartete Entwicklungsbeschleunigung am FACE-Standort hin.

Häufig wird in der landwirtschaftlichen Praxis das Erscheinen der ersten Infloreszenz als Kriterium zum Festlegen des Zeitpunktes der Knolleninduktion verwendet. Dies erscheint jedoch aufgrund der unterschiedlichen Zeiträume, die zum Erreichen der beiden Entwicklungsstadien notwendig waren, nicht sinnvoll. Während die Knolleninduktion bezogen auf den Zeitpunkt des Auflaufens bereits nach 18 bis 21 Tagen begann, wurde das Erscheinen der ersten Infloreszenz erst 24 Tage nach dem Auflaufen festgestellt.

4.3.3 BESTANDESHÖHE

Während erhöhtes Ozon über die gesamte Vegetationsperiode keinen Einfluss auf die Bestandeshöhe der Kartoffelpflanzen zeigte, bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen zumindest tendenziell ab der Mitte der Vegetationsperiode eine Reduktion der Bestandeshöhe. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit der Studie von Hacour et al. (im Druck). Dagegen berichten andere Studien, dass die Bestandeshöhe von Kartoffelpflanzen durch erhöhte CO₂-Konzentrationen nicht beeinflusst wird (Miglietta et al. 1998, Lawson et al. 2001). Darüber hinaus konnte ein positiver Temperatureffekt auf die Bestandeshöhe abgeleitet werden, da die Pflanzen in den wärmeren OTC (Vergleich zur kammerlosen Behandlung) und am wärmeren OTC-Standort (Vergleich zum FACE-Standort) eine größere Bestandeshöhe aufwiesen. Allerdings ist im Fall des festgestellten Kammereffekts auch ein Strahlungseffekt nicht auszuschließen, da die tägliche Strahlungssumme in den OTC im Vergleich zur kammerlosen Behandlung durch die Folie und die Rahmenkonstruktion um annähernd 40 % reduziert war, so dass die Pflanzen in Anpassung an diese Strahlungsbedingungen längere Internodien ausbildeten (Larcher 2001).

4.3.4 BLATTENTWICKLUNG

Auf die Blattentwicklung, beobachtet anhand der Anzahl der grünen und der seneszenten Blätter, ergaben sich ebenfalls nur wenige eindeutige CO₂- und Ozoneffekte.

Lediglich die verringerte Anzahl seneszenten Blätter zum Ende der Vegetationsperiode deutete in den OTC auf eine Entwicklungsverzögerung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen hin. Im Gegensatz dazu wirkten sich erhöhte CO₂-Konzentrationen in der FACE-Behandlung gegen Ende der Vegetationsperiode vereinzelt negativ auf die Anzahl der grünen Blätter aus, was als Entwicklungsbeschleunigung verbunden mit einer früheren Seneszenz der Pflanzen interpretiert werden kann. Ursache für eine beschleunigte Seneszenz unter erhöhten CO₂-Konzentrationen ist zum einen der Temperaturanstieg der Blattfläche aufgrund der verminderten Transpiration sowie die frühere und stärkere Remobilisierung von Stickstoff aus den Blättern in Richtung der sich entwickelnden Knollen, da deren Senkengröße und Stickstoffbedarf zunimmt. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit Studien von Miglietta et al. (1998), Schapendonk et al. (2000) und Lawson et al. (2001) und bestätigt die in Zusammenhang mit dem Chlorophyllabbau beobachtete beschleunigte Seneszenz durch erhöhtes CO₂. Auch erhöhtes Ozon verursachte eine frühere Seneszenz durch Absinken der grünen und Anstieg der seneszenten Blattzahl zum Ende der Vegetationsperiode. Damit wurden die Forschungsergebnisse von Runeckles & Chevone (1992) und Hacour et al. (im Druck) sowie die eigenen Ergebnisse der phänologischen Entwicklung bestätigt. Da sowohl erhöhtes CO₂ als auch Ozon die Seneszenz offensichtlich veränderten,

musste bei Kombination beider Spurengase von einer Verstärkung beziehungsweise Abschwächung der Seneszenzprozesse ausgegangen werden. Diese Hypothese konnte jedoch nicht bestätigt werden, da sich die vermuteten Effekte nicht in der Reaktion der oberirdischen Biomasse und der Blattbiomasse widerspiegelten.

Während sich 1998 und 1999 vereinzelte Kammereffekte auf die Anzahl der grünen Blätter ergaben, traten diese für die Anzahl der seneszenten Blätter nur 1998 auf. Innerhalb der Kammern war durch den Temperaturanstieg sowie die geringere Globalstrahlung die Anzahl der grünen Blätter im Vergleich zur kammerlosen Behandlung in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode höher, gegen Ende der Vegetationsperiode konnte dagegen eine Zunahme der seneszenten Blätter festgestellt werden. Hintergrund ist vermutlich eine Wachstumsbeschleunigung sowie eine bessere Nährstoffverfügbarkeit aufgrund einer gesteigerten Nährstoffmineralisierung durch höhere Temperaturen in den OTC. Die höhere Anzahl der grünen Blätter in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode am FACE-Standort und deren schnellere Abnahme bei gleichzeitigem Anstieg der seneszenten Blattzahlen zum Ende der Vegetationsperiode deutet auf eine im Vergleich zum OTC-Standort beschleunigte Entwicklung der Pflanzen hin, die jedoch nicht eindeutig durch die klimatischen Standortunterschiede erklärt werden kann.

Obwohl der zeitliche Verlauf der Bildung grüner Blätter während der aktiven Wachstumsperiode direkt mit dem Blattflächenindex korrelieren sollte, ergab sich die maximale Anzahl der grünen Blätter in den OTC an Tag 42 und in der FACE-Behandlung an Tag 40. Dagegen wurde der maximale Blattflächenindex in den OTC an Tag 35 und in der FACE-Behandlung an Tag 37 etwas früher datiert. Nach Erreichen dieses Zeitpunktes nahm die Anzahl der grünen Blätter ab, die Anzahl der seneszenten Blätter stieg als Zeichen der beginnenden und fortschreitenden Seneszenz an.

4.3.5 LICHTINTERZEPTION UND BLATTFLÄCHENINDEX

Die chlorophyllhaltige Assimilationsfläche ist die Basis für die Transformation photosynthetisch aktiver Strahlung über die Photosyntheseprozesse in organisch gebundene Energie. Generell lag der Blattflächenindex (LAI) in dem für Nutzpflanzen beschriebenen Bereich von 3-6 (Hay & Walker 1989). Zu Beginn der Vegetationsperiode nahm die Lichtinterzeption und der Blattflächenindex in allen Behandlungen außerordentlich durch Vergrößerung der Assimilationsflächen zu, da in dieser Entwicklungsphase Blätter und Stängel sehr stark wuchsen. Der höchste Blattflächenindex wurde im Bestand etwa vier Wochen nach dem Auflaufen zum Zeitpunkt der Blüte erreicht. Danach sank der Blattflächenindex durch die beginnenden Seneszenzprozesse der Blätter kontinuierlich ab.

Erhöhte CO₂- und Ozonkonzentrationen zeigten 1998 und 1999 während der gesamten vegetativen Periode in den verschiedenen Expositionsbehandlungen keinen eindeutigen Einfluss auf die Lichtinterzeption und den Blattflächenindex als Maß für die Bestandesdichte der Kartoffelpflanzen. Ausnahme war 1999 in den OTC ein einmalig nachgewiesener CO₂- und Ozoneffekt auf den Blattflächenindex, der jedoch nicht überbewertet werden sollte. Während erhöhte CO₂-Konzentrationen bei Umgebungsozon einen Anstieg des Blattflächenindex bewirkten, kam es in Kombination mit erhöhten Ozonkonzentrationen zu einer Abnahme des Blattflächenindex. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit Studien von Jones et al. (1984), Acock & Allen (1985) und Donnelly et al. (2001 a, b), die unter erhöhtem CO₂ eine positive Förderung des oberirdischen Biomassewachstums verbunden mit der Ausbildung einer größeren Blattfläche feststellten. Miglietta et al. (1998), Schapendonk et al. (2000) und Lawson et al. (2001) berichten dagegen von einer unbeeinflussten Blattfläche unter erhöhtem CO₂. Der schädigende Effekt von Ozon, der sich durch ein reduziertes Wachstum und eine beschleunigte Seneszenz äußert, konnte ebenfalls in verschiedenen Untersuchungen gezeigt werden (Krupa et al. 1989, Runeckles & Chevone 1992, Musselman & Massman 1999, Hacour et al. im Druck). Verschiedene Studien berichten, dass Kartoffelpflanzen besonders gegen Ende der Vegetationsperiode eine erhöhte Empfindlichkeit auf Ozon zeigen (Craigon et al. im Druck, De Temmerman im Druck b, Vandermeiren et al. im Druck, Bindi et al. im Druck), während CO₂ mehr Veränderungen zu Beginn der Entwicklungsperiode verursacht (Craigon et al. im Druck). Eine ozoninduzierte vorzeitige Seneszenz durch eine frühere Abnahme der Lichtinterzeption und des Blattflächenindex wurde während der gesamten Vegetationsperiode in der vorliegenden Studie allerdings nicht festgestellt. Auch konnten im Gegensatz zu den Studien von Heck et al. (1982) und Miglietta et al. (1998) die Hinweise auf eine beschleunigte Seneszenz durch erhöhtes CO₂ nicht bestätigt werden. Darüber hinaus reduzierten im Gegensatz zu der Studie von Mulholland et al. (1997) erhöhte CO₂-Konzentrationen den schädigenden Ozoneffekt auf die Blattfläche nicht.

Auch die Standort- und Kammereffekte zeigten nur vereinzelte Effekte auf die Lichtinterzeption und den Blattflächenindex. Während die vergleichsweise höheren Temperaturen in den OTC und am OTC-Standort zu Beginn der Vegetationsperiode auf eine Entwicklungsbeschleunigung hindeuteten, resultierte zum Ende der Vegetationsperiode eine schnellere Abnahme der Lichtinterzeption und des Blattflächenindex durch die früher einsetzenden Seneszenzprozesse. Eine Reduktion der Blattfläche durch höhere Temperaturen wurde auch von Benoit et al. (1983) festgestellt. Da oftmals eine positive Korrelation zwischen der Blattfläche zum Zeitpunkt der Knollenanlage und dem Ertrag besteht, waren folglich Ertragsunterschiede, die allein auf diesem Parameter beruhen, nicht zu erwarten.

4.3.6 SICHTBARE OZONSCHÄDEN AN DEN BLÄTTERN

Kartoffelpflanzen reagierten nur 1999 sensitiv auf erhöhte Ozonkonzentrationen und wiesen in den OTC nach Erreichen der maximalen Blattfläche erste sichtbare Schäden an den Blättern auf. Am Ende der Vegetationsperiode zeigten mehr als 85 % der Blattoberfläche sichtbare Schäden durch erhöhtes Ozon. Eine Ozonsensitivität von Kartoffelpflanzen wurde bereits in Studien von Hooker et al. (1973), Mosley et al. (1978), Pell et al. (1980), Foster et al. (1983) und Pell & Pearson (1984) berichtet. Die ozoninduzierten Blattschäden konnten zumindest tendenziell durch die Anwesenheit von erhöhten CO₂-Konzentrationen reduziert werden. Ursache hierfür ist die reduzierte stomatäre Leitfähigkeit unter erhöhten CO₂-Konzentrationen, so dass weniger Ozon aufgenommen wird und die bessere Versorgung der Pflanzen mit Assimilaten für die Detoxifikations- und Reparaturprozesse. Die Verminderung der sichtbaren Ozonschäden durch erhöhte CO₂-Konzentrationen konnte auch in Studien von Acock & Allen (1985), Mulchi et al. (1992), Mulholland et al. (1997), McKee et al. (1999), Donnelly et al. (1999, 2001 a) und De Temmerman et al. (im Druck b) beobachtet werden. Allerdings ist die Reaktion stark vom Zeitpunkt in der Entwicklungsphase der Pflanzen sowie von der Höhe und der Dauer der Exposition mit atmosphärischen Spurengasen abhängig.

Auch an den Blättern von Pflanzen des FACE-Standorts löste eine saisonale Konzentration von 45 nl l⁻¹ Ozon etwa neun Wochen nach dem Auflaufen geringe sichtbare Schäden aus, die wiederum eine Woche später auch auf den Freilandflächen am OTC-Standort bei saisonalen Konzentrationen von 26,8 nl l⁻¹ Ozon festgestellt wurden. Trotz vergleichbarer Ozonkonzentrationen in den OTC bewirkten dort die im Vergleich zu der kammerlosen Behandlung höheren Temperaturen einen höheren stomatären Widerstand, so dass keine Ozonschäden an den Blättern beobachtet werden konnten.

4.3.7 CHLOROPHYLLGEHALT

Erhöhte CO₂- und Ozonkonzentrationen zeigten während der beiden Vegetationsperioden nur vereinzelte Effekte auf die SPAD-Werte, die ein Maß für die Chlorophyllkonzentration in den Kartoffelpflanzen darstellen. Lediglich 1998 konnte in der FACE-Behandlung zu Beginn der Wachstumsperiode ein höherer Chlorophyllgehalt durch CO₂ beobachtet werden, zum Ende der Vegetationsperiode wurde dieser Effekt umgekehrt. Erhöhte CO₂-Konzentrationen wirkten daher anfänglich wachstumsfördernd, zum Ende der Vegetationsperiode dagegen durch den früheren Abbau von Chlorophyllprotein seneszenzbeschleunigend. Eine beschleunigte Seneszenz unter erhöhtem CO₂, verbunden mit dem Abbau von Chlorophyll, von Stärke und von RNA-Komponenten in den Blättern, konnte auch in anderen Studien mit Kartoffelpflanzen berichtet

werden (Miglietta et al. 1998, Lawson et al. 2001). Auch erhöhte Ozonkonzentrationen führten am Ende der Vegetationsperiode tendenziell zu einer Abnahme des Chlorophyllgehaltes in den Kartoffelblättern. Der ozoninduzierte Abbau von Chlorophyll und die Beschleunigung der Blattseneszenz wurden bereits von Ojanperä et al. (1998), Pleijel et al. (1998) und Gelang et al. (2000) für Weizen berichtet. Der Effekt erhöhter CO₂- und Ozonkonzentrationen auf die Beschleunigung der Seneszenz steht in Einklang mit den Ergebnissen der Blattentwicklung. Ungeklärt sind allerdings die Hintergründe für den positiven Ozoneffekt auf den Chlorophyllgehalt in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode.

Eindeutige Kammer- und Standorteffekte auf den Chlorophyllgehalt der Blätter von Kartoffelpflanzen konnten nicht festgestellt werden. Überwiegend war jedoch der Chlorophyllgehalt in den Blättern am FACE-Standort im Vergleich zum OTC-Standort und in den OTC im Vergleich zu der kammerlosen Behandlung höher, die Effekte zeigten jedoch eine widersprüchliche Temperaturabhängigkeit.

4.3.8 OBERIRDISCHE BIOMASSE

Das Wachstum und die Trockenmasseproduktion von Kartoffelpflanzen reagierten nur in geringem Umfang auf veränderte CO₂- und Ozonkonzentrationen. Lediglich die Stängelbiomasse wurde durch erhöhte CO₂-Konzentrationen in der OTC- und in der FACE-Behandlung tendenziell reduziert. Auch der FACE-Standort wirkte sich im Vergleich zum OTC-Standort tendenziell negativ auf die Stängelbiomasse auf. Die Abnahme der Stängelbiomasse und die durch erhöhte CO₂-Konzentrationen unbeeinflusste oberirdische Biomasse entsprachen nicht den Erwartungen, da die meisten Studien eine Zunahme der oberirdischen Biomasse unter erhöhtem CO₂ feststellten (Collins 1976, Wheeler & Tibbitts 1989, Wheeler et al. 1991, Mackowiak et al. 1996, Wheeler & Tibbitts 1997). Dagegen bewirkten die klimatischen Bedingungen in den OTC im Vergleich zu der kammerlosen Behandlung eine Zunahme der oberirdischen Gesamtbiomasse über die eindeutige Förderung der Stängelbiomasse und die tendenzielle Förderung der Blattbiomasse. Ursache ist vermutlich das Temperaturoptimum von 25 °C für das Stängelwachstum, während die Optimaltemperatur für die Blattbildung geringer ist (Borah & Milthorpe 1962, Bodlaender 1963, Wheeler et al. 1986). Eine pflanzenschädigende und somit negative Wirkung von Ozon auf die oberirdische Biomasse konnte im Gegensatz zu den Untersuchungen von Runeckles & Chevone (1992) und Craigon et al. (im Druck) nicht beobachtet werden.

4.3.9 ALLGEMEINE ERTRAGSQUALITÄT

Kartoffelpflanzen haben neben den Wurzeln die Knollen als weitere Senken, auf deren Wachstum sich erhöhte CO₂- und Ozonkonzentrationen ebenfalls auswirken können. Die verhältnismäßig größere Förderung der Knollentrockenmasse im Vergleich zur oberirdischen photosynthetisch aktiven Biomasse zeigte, dass erhöhtes CO₂ bei Kartoffelpflanzen offensichtlich die Verteilung der Trockenmasse veränderte. Übereinstimmend beobachteten Sharma et al. (1998) in Zusammenhang mit einer geringeren oberirdischen Biomasse einen effektiveren Transport von Saccharose aus den Blättern in die Knollen, eine höhere Verfügbarkeit von Kohlenstoff für die sich entwickelnden Senken sowie einen daraus resultierenden Ertragsanstieg.

Als wirtschaftlich wichtiger Faktor des pro Fläche gebildeten Ertrags ist besonders die Anzahl der Knollen sowie deren Gewicht interessant. Da auch der Verwertungszweck die ökonomische Leistung des Kartoffelanbaus sehr stark mitbestimmt, muss neben der Ertragsmenge auch die Sortierung, das heißt der Anteil einer bestimmten Knollengröße innerhalb des Gesamtertrags, als weiteres Qualitätsmerkmal berücksichtigt werden. Im Falle der verwendeten Sorte Bintje ist daher für die industrielle Verwertung in Form von Pommes frites und Chips ein hoher Ertrag der Knollengrößen über 50 mm erwünscht. Da erhöhte CO₂- und Ozonkonzentrationen keinen Einfluss auf diesen Sortieranteil zeigten, kann davon ausgegangen werden, dass die Knollenqualität des industriellen Ertrags unter diesem speziellen Aspekt nicht verändert wurde.

Dagegen ergaben sich aufgrund der physiologischen Veränderungen durch erhöhtes CO₂ und Ozon vereinzelte Behandlungseffekte auf die allgemeinen Ertragskriterien. Während der Frischertrag der Knollen in allen Größensortierungen mit Ausnahme des Standorteffekts keine Behandlungseffekte zeigte, stieg in den OTC der Gesamttrockenertrag und der kommerzielle Trockenertrag durch eine erhöhte Trockensubstanzeinlagerung in der Behandlung mit 550 µl l⁻¹ CO₂ um 12,6 % und 15,4 % tendenziell an. Eine weitere Konzentrationserhöhung auf 680 µl l⁻¹ CO₂ bewirkte, übereinstimmend mit den Ergebnissen von Miglietta et al. (1998), keinen zusätzlichen Ertragsanstieg. Mackowiak & Wheeler (1996) berichten dagegen einen maximalen Knollenertrag bei 1000 µl l⁻¹ CO₂ sowie einen negativen Effekt durch einen weiteren CO₂-Anstieg. In der FACE-Behandlung stimulierten erhöhte CO₂-Konzentrationen den Gesamt- und den kommerziellen Ertrag eindeutig um 8,8 % und 8,7 % im Vergleich zur Kontrolle, so dass sich die durch den Chlorophyllabbau nachgewiesene CO₂-bedingte frühere Seneszenz der oberirdischen Biomasse offensichtlich nicht, wie von Schapendonk et al. (1995) beschrieben, negativ auf den Ertrag auswirkte. In der Literatur variieren die beschriebenen Effekte auf den Ertrag von Kartoffeln zwischen einem geringen negativen Effekt (Gouderiaan & De Ruiter

1983) und einem maximalen positiven Effekt von 49 % bei Verdopplung der CO₂-Konzentrationen auf 700 µl l⁻¹ CO₂ (Schapendonk et al. 2000). Positive CO₂-Effekte auf den Ertrag von Kartoffeln werden auch von Cao & Tibbitts (1991), Wheeler et al. (1991, 1994), Cao et al. (1994), Mackowiak & Wheeler (1996), Miglietta et al. (1998), Ludewig et al. (1998), Sicher et al. (1999), Lawson et al. (2001) und Donnelly et al. (2001 b) beschrieben. Da der Knollenertrag eine Abhängigkeit von der, im Gegensatz zu Getreidearten, direkten Assimilatableitung aus den photosynthetisch aktiven Gewebeteilen zeigt, der Blattflächenindex in dieser Studie jedoch unter erhöhtem CO₂ unbeeinflusst blieb, wurde der steigende Senkenbedarf vermutlich durch eine höhere Lichtnutzungseffizienz verbunden mit einer höheren Photosyntheserate ausgeglichen (Schapendonk et al. 1995).

Aufgrund des relativ geringen Ertragsanstiegs durch erhöhtes CO₂ wurde als Ursache eine Begrenzung des Blattflächenindex angenommen. Allerdings bestätigte die Reduktion der Pflanzdichte von 20 auf 13,3 Pflanzen pro m² diese Annahme nicht. Ein möglicher Grund für die im Vergleich zu den Getreidearten geringe Ertragsantwort auf erhöhte CO₂-Konzentrationen ist, dass die Knolleninduktion innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums bereits in der frühen Entwicklungsphase der Pflanzen stattfindet. Die zuerst angelegten Knollen erreichen aufgrund ihrer Attraktivität für Assimilate die höchsten Wachstumsraten und folglich das höchste Gewicht (Krijthe 1955, Van Schreven 1956, Maierhofer 1958), spät angelegte Knollen werden zum Teil wieder resorbiert. Kartoffelpflanzen besitzen im Gegensatz zu Getreidearten offensichtlich keine Möglichkeiten, das Ertragspotential im weiteren Entwicklungsverlauf an veränderte Umweltbedingungen im positiven Sinne anzupassen. Schapendonk et al. (2000) gehen dagegen davon aus, dass speziell frühe Sorten, zu denen Bintje gehört, aufgrund der unveränderten Lichtinterzeption und Blattentwicklung mit einer geringeren Ertragsantwort auf erhöhte CO₂-Konzentrationen reagieren.

Trotz der massiven Blattschäden konnte, entgegen den Studien von Foster et al. (1983), Pell et al. (1988), Clarke et al. (1990) und Craigon et al. (im Druck), jedoch übereinstimmend mit den Ergebnissen von Leone & Green (1974), Clarke et al. (1978), Pell et al. (1980) und Donnelly et al. (2001 c) kein eindeutiger Ozoneffekt auf den Knollenertrag festgestellt werden. Dennoch war der Trend zu verzeichnen, dass ozonbedingte Ernteverluste des Gesamt- und des kommerziellen Ertrags durch die Anwesenheit von erhöhtem CO₂ vermindert wurden. So traten ozonbedingte Ertragsreduktionen nur in Kombination mit 380 µl l⁻¹ CO₂ und 550 µl l⁻¹ CO₂ auf, in Gegenwart von annähernd verdoppelten CO₂-Konzentrationen verschwanden diese. In fast allen Größensortierungen konnte der höchste Ertrag in der OTC68003-Behandlung erzielt werden. Der Schutz von ozoninduzierten Ertragsverlusten durch erhöhtes CO₂ steht im Gegensatz zu

Studien von McKee et al. (1997), Mulholland et al. (1998) und Donnelly et al. (1999). Der Grund für die fehlende Korrelation zwischen den sichtbaren Schäden und der Ertragsreaktion liegt vermutlich darin, dass die Wirkung von Ozon vom Zeitpunkt und der Dauer der Exposition abhängt (Mulholland et al. 1998, Donnelly et al. 1999) und vereinzelte Ozonspitzenkonzentrationen, die in dieser Untersuchung nicht erreicht wurden, höhere Ertragsverluste erzielen als eine kontinuierlich erhöhte Ozonexposition (Köllner & Krause 2000). Darüber hinaus besitzen Kartoffelpflanzen ausreichende Quellen-Kapazitäten, um Blattschäden ohne Ernteverluste auszugleichen (Hare & Moore 1988).

Während sich 1998 der Trend ergab, dass die Ertragszunahme übereinstimmend mit der Studie von Donnelly et al. (2001 b) durch den Anstieg des durchschnittlichen Knollengewichts verursacht wurde, basierte 1999 der CO₂-bedingte Ertragszuwachs überwiegend auf einem geringen Anstieg der Knollenzahl pro Fläche. Die vergleichsweise höheren Temperaturen in den OTC wirkten sich ebenfalls positiv auf die Knollenzahl des industriellen Ertrags aus. Ein CO₂-bedingter Ertragszuwachs durch den Anstieg der Knollenzahl steht in Einklang mit den Studien von Miglietta et al. (1998) und Bindi et al. (im Druck) und schließt in der vorliegenden Studie eine häufig in CO₂-Versuchen beobachtete Senkenlimitierung aus. Auch Wheeler et al. (1991) stellten bei Kartoffelpflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen keine Senkenlimitierung fest.

4.3.10 OPTISCHE ERTRAGSQUALITÄT

Auf die optische Qualität, bestimmt als Anteil schorfiger, grüner und deformierter Knollen am industriellen Ertrag, konnten in den OTC in keinem der beiden Versuchsjahre Einflüsse von erhöhten CO₂- und Ozonkonzentrationen beobachtet werden, so dass diesbezüglich eine Veränderung der Knollenqualität ausgeschlossen werden kann. Lediglich 1999 stieg in der FACE-Behandlung der Anteil der deformierten Knollen unter erhöhtem CO₂ an und bewirkte dadurch eine Verschlechterung der Knollenqualität. In beiden Versuchsjahren konnten zumindest tendenzielle Kammereffekte auf den Anteil der schorfigen Knollen festgestellt werden, deren Reaktionsmuster jedoch widersprüchlich waren. Ein allgemein beachtenswertes Phänomen war der deutlich höhere Anteil an schorfigen Knollen im Versuchsjahr 1999. Da Kartoffelschorf durch einen Pilz verursacht wird und die Symptome in allen Behandlungen auftraten, kann eine Infektion über die Pflanzknollen nicht ausgeschlossen werden. Der 1998 für den Anteil an deformierten Knollen tendenziell beobachtete Kammereffekt wurde 1999 nicht bestätigt.

4.3.11 PHYSIKALISCHE ERTRAGSQUALITÄT

Eindeutige CO₂- und Ozoneffekte auf das spezifische Gewicht, das Unterwassergewicht und die Glasigkeit der zur industriellen Verarbeitung geeigneten Knollen konnten nicht nachgewiesen werden. In allen Behandlungen erreichten die Kartoffelknollen den für das Unterwassergewicht erforderlichen Grenzwert von 360, der als Maß für eine gute Knollenqualität gilt.

Während der Trockensubstanzgehalt übereinstimmend mit den Studien von Schapendonk et al. (1995), Sicher & Bunce (1999) und Vorne et al. (im Druck) unter erhöhten CO₂-Konzentrationen anstieg, wurde er durch erhöhte Ozonkonzentrationen negativ beeinflusst. Pell et al. (1988) und Vorne et al. (im Druck) beobachteten dagegen keine Veränderungen des Trockensubstanzgehaltes in der Kartoffelknolle durch Ozon. Da gerade für die industrielle Verwertung von Kartoffeln zur Erzeugung von höherwertigen Nahrungsmitteln wie Pommes frites und Chips ein hoher Trockensubstanzgehalt ein wichtiger wertbestimmender Qualitätsparameter ist, kann zumindest unter erhöhtem CO₂ von einer Verbesserung der Knollenqualität ausgegangen werden. Das Absinken des Trockensubstanzgehaltes durch erhöhte Ozonkonzentrationen wurde bereits von Speroni et al. (1981) berichtet und muss als Qualitätsverschlechterung interpretiert werden. Hintergrund der Qualitätsbeurteilung ist, dass ein hoher Trockensubstanzgehalt bei der industriellen Weiterverarbeitung durch den niedrigeren Wassergehalt die Produktausbeute steigert, die Textur sowie die Konsistenz verbessert und in Frittierprozessen die übermäßige Absorption von Öl verhindert, wodurch der Ölverbrauch verringert wird (Agle & Woodbury 1968, Storey & Davies 1992). Temperaturbedingte Kammer- und Standorteffekte auf das Spezifische Gewicht und damit auch auf die Trockensubstanz ergaben sich im Gegensatz zu den Untersuchungen von Haynes et al. (1988), Struik & Ewing (1995) und Jackson (1999) nicht.

4.3.12 CHEMISCHE ERTRAGSQUALITÄT

Die Kartoffel ist ein vegetatives Organ, daher müssen bei der Beurteilung der qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffe die in den Knollen permanent ablaufenden Umsetzungsprozesse berücksichtigt werden. Aus diesem Grund handelt es sich bei der Beurteilung der chemischen Qualität in Kartoffelknollen um eine Momentaufnahme zum jeweiligen Erntezeitpunkt. Da die chemische Zusammensetzung der Knollen zum Zeitpunkt der physiologischen Reife am stabilsten und somit am aussagekräftigsten ist, wurde in der vorliegenden Studie dieser Erntezeitpunkt gewählt.

Insgesamt lassen sich in Kartoffelknollen etwa 200 verschiedene Inhaltsstoffe nachweisen, von denen jedoch verwertungsspezifisch nur eine geringe Anzahl zur Qualitätsbestimmung herangezogen wird. Im Fall der verwendeten Kartoffelsorte Bintje richtete sich die Beurteilung der Qualität von Kartoffeln daher in erster Linie nach den speziellen Anforderungen der Industrie zur Verwertung der Knollen zur Herstellung von höherwertigen Nahrungsmitteln.

4.3.12.1 STÄRKE UND WASSERLÖSLICHE KOHLENHYDRATE

Ein grundsätzliches Qualitätsmerkmal der Kartoffelknollen ist die Stärkekonzentration, die zum einen mit 65 % bis 80 % des Trockengewichts der Hauptinhaltsstoff in der Kartoffelknolle ist und zum anderen negativ mit dem Geschmack korreliert. Darüber hinaus zeigen rheologische Produkteigenschaften wie Mehligkeit, Konsistenz und Zerkochungsgrad ebenfalls eine Abhängigkeit von der Stärkekonzentration. Obwohl die Stärkekonzentration in den Knollen in positiver Korrelation zur Vegetationsdauer steht, verursachten der Trend der unter erhöhten CO₂- und Ozonkonzentrationen früher einsetzenden Seneszenzprozesse übereinstimmend mit der Studie von Pell & Pearson (1984) keine Beeinflussung der Stärkekonzentration in den Knollen, so dass diesbezüglich keine Qualitätsveränderung in den Kartoffelknollen zu erwarten ist. Schapendonk et al. (1995), Sicher & Bunce (1999) und Vorne et al. (im Druck) berichten dagegen von einem Anstieg der Stärkekonzentration unter erhöhtem CO₂, erhöhte Ozonkonzentrationen bewirkten in der Studie von Vorne et al. (im Druck) eine Abnahme der Konzentration an Stärke in den Knollen und führten somit bezüglich des Geschmacks zu einer Qualitätsverbesserung.

Ein weiterer wichtiger Qualitätsfaktor für die industrielle Verarbeitung von Kartoffeln ist die Konzentration an reduzierenden Zuckern, da diese den Geschmack und die Farbe von Frittierprodukten beeinflusst (Marquez & Añon 1986, Wolfe 1987, Coffin et al. 1987, Rodriguez-Saona & Wrolstad 1997). Auch Saccharose dient in Frittierprozessen nach hitzeinduzierter Hydrolyse als Substrat für Verfärbungsreaktionen (Leszkowiat et al. 1990). In den OTC lagen die Werte der reduzierenden Zucker, mit Ausnahme der Behandlungen mit erhöhtem Ozon in Kombination mit 380 µl l⁻¹ CO₂ und 550 µl l⁻¹ CO₂ im Versuchsjahr 1998, unter der für die kommerzielle Herstellung von Pommes frites akzeptablen Konzentration von 0,25 % des Knollenfrischgewichts (entspricht etwa 1,0 % des Knollentrockengewichts) (Putz 1989), so dass in diesen Behandlungen eine übermäßige Verfärbung der Produkte in den Verarbeitungsprozessen ausgeschlossen werden kann. Offensichtlich wirkten 1998 in den OTC erhöhte CO₂-Konzentrationen der ozonbedingten Zunahme der reduzierenden Zucker entgegen. Dieses Phänomen wird auch von Vorne et al. (im Druck) berichtet.

Ursache der Verfärbungsreaktion in Frittierprozessen ist die bereits in bezug auf die Qualität von Gerste angesprochene nicht-enzymatische Bräunungsreaktion (Maillardreaktion). In einer ersten Reaktionsphase entstehen aus reduzierenden Zuckern sehr reaktive, polyfunktionelle Zwischengruppen, die in weiterer Folge mit Aminosäuren, Ascorbat und anderen organischen Substanzen in Gegenwart von Wasser unter hohen Temperaturen dunkelbraune, bittere Substanzen (Melanoidine) bilden (Hodge 1953, Marques & Añon 1986, Coffin et al. 1987, Roe et al. 1990, Roe & Faulks 1991). Folglich ist die CO₂-bedingte Abnahme der Konzentrationen von Glucose und Fructose in der FACE-Behandlung 1998 bei der Beurteilung der Knollenqualität positiv zu bewerten. Dagegen fanden Donnelly et al. (2001 c) unter erhöhtem CO₂ eine Zunahme der Glucosekonzentration in den Knollen, Vorne et al. (im Druck) berichten von unveränderten Konzentrationen an reduzierenden Zuckern. Während in beiden Versuchsjahren, übereinstimmend mit der Studie von Pell & Pearson (1984), in den OTC keine CO₂- und Ozoneffekte auf den Saccharosegehalt nachgewiesen werden konnten, nahm der Gehalt an Glucose und Fructose 1999 wie in den Studien von Pell et al. (1988) und Vorne et al. (im Druck) unter erhöhtem Ozon ebenfalls ab und bewirkte eine Verbesserung der Knollenqualität. Pell & Pearson (1984) sowie Donnelly et al. (2001 c) beobachteten dagegen unter erhöhtem Ozon eine Zunahme der Glucosekonzentration, die Konzentration an Fructose wurde ebenfalls wie in der vorliegenden Studie reduziert. Allerdings sollten Kartoffelknollen für die Herstellung von Pommes frites und Chips zumindest einen gewissen Gehalt an reduzierenden Zuckern aufweisen, da dieser für die Erzeugung der vom Verbraucher erwünschten goldbraunen Farbe notwendig ist.

Kühle Temperaturen um 10 bis 15 °C führen über einen längeren Zeitraum durch den Abbau von Stärke zu einer Anhäufung von Zuckern, wobei zunächst Saccharose, dann Glucose und Fructose entstehen. In der vorliegenden Studie konnte dieser temperaturabhängige Effekt ebenfalls durch den Kammer- und Standorteffekt nachgewiesen werden. Knollen, die während der Vegetationsperiode unter durchschnittlich 1,4 °C höheren Temperaturen am OTC-Standort wuchsen, wiesen im Vergleich zum FACE-Standort 1998 geringere Konzentrationen von Glucose und Fructose, 1999 nur geringere Glucosekonzentrationen in den Knollen auf. Bestätigt wird die Vermutung des Temperatureinflusses auf die Konzentration löslicher Kohlenhydrate durch die Feststellung, dass auch im Versuchsjahr 1999 die Knollen in der kammerlosen Behandlung im Vergleich zur OTC-Behandlung bei einer Temperaturdifferenz von fast 2 °C höhere wasserlösliche Kohlenhydratkonzentrationen besaßen. Insgesamt wurde 1999 der Schwellenwert für reduzierende Zucker zur Produktion von Pommes frites und Chips in der kammerlosen Behandlung und in der FACE-Behandlung überschritten.

4.3.12.2 ORGANISCHE SÄUREN

Weitere qualitätsbestimmende Inhaltsstoffe in Kartoffelknollen sind Organische Säuren, die ebenfalls an den Verfärbungsreaktionen der Knollen beteiligt sind (Silva et al. 1991). Darüber hinaus hat in der kartoffelverarbeitenden Industrie ein geringer Gehalt an Organischen Säuren in den Knollen eine große Bedeutung für das geschmackliche Empfinden (Wolfe 1987).

Die Kartoffelknolle enthält als Organische Säuren hauptsächlich Citrat und Malat, die eine wesentliche Rolle als Stabilisatoren gegenüber Kartoffelfleischverfärbungen spielen (Jadhav & Andrew 1977, Bushway et al. 1984, Kadam et al. 1991, Burton et al. 1992). Besonders Citrat kann in der Knolle enthaltenes Eisen binden, so dass dieses für die zur Kochdunklung notwendigen Verfärbungsreaktionen mit Chlorogensäure nicht mehr zur Verfügung steht (Wolfe 1987, Storey & Davies 1992). Darüber hinaus ist aus ernährungsphysiologischer Sicht auch der Gehalt an Ascorbat von Bedeutung (Salunkhe & Kadam 1991, Gershoff 1993), da pflanzliche Nahrungsmittel für die menschliche Ernährung die primäre Quelle darstellen (Wheeler et al. 1998).

Insgesamt konnten nur geringe Behandlungseffekte auf die Konzentrationen der Organischen Säuren wie Ascorbat, Dehydroascorbat, Malat und Citrat festgestellt werden. Die Exposition mit erhöhtem CO₂ bewirkte in den OTC nur 1999 eine Abnahme der Ascorbatkonzentration in den Knollen und verursachte dadurch aus ernährungsphysiologischer Sicht eine Qualitätsverschlechterung. Pflanzen in CO₂-reicher Umgebung zeigten demnach einen geringeren oxidativen Stress und benötigten offensichtlich weniger Schutz durch Antioxidantien. Am FACE-Standort konnte dieser CO₂-Effekt allerdings nicht festgestellt werden. Auch die Malatkonzentration in den Knollen wurde 1998 in der FACE-Behandlung tendenziell durch erhöhte CO₂-Konzentrationen reduziert, was unter verarbeitungstechnischen Qualitätsaspekten ebenfalls negativ zu beurteilen ist und die Ergebnisse von Vorne et al. (im Druck) bestätigt. Zusätzlich berichten Vorne et al. (im Druck) von einer Reduktion der Citratkonzentration unter erhöhtem CO₂, Donnelly et al. (2001 c) beobachteten dagegen ausschließlich eine CO₂-bedingte Reduktion der Citratkonzentration in der Knolle.

Erhöhte Ozonkonzentrationen bewirkten dagegen durch die Aktivierung des antioxidativen Systems einen tendenziellen Anstieg der Dehydroascorbatkonzentration in den Knollen. Vorne et al. (im Druck) berichten dagegen von einem Anstieg der Ascorbatkonzentration in den Knollen unter erhöhtem Ozon. Obwohl vereinzelt Standorteffekte auftraten, waren diese nicht immer eindeutig. Während 1998 die Ascorbatkonzentration in den Knollen am OTC-Standort im Vergleich zum FACE-Standort höher war, konnte 1999 für die Ascorbat- und Dehydroascorbatkonzentrationen der gegenteilige Effekt festgestellt werden.

4.3.12.3 GLYKOALKALOIDE

Unter den stickstoffhaltigen Verbindungen sind Glykoalkaloide besonders charakteristische Inhaltssubstanzen der Kartoffeln. Sie sind potenziell toxische Substanzen, die in erster Linie der Krankheits- und Schädlingsabwehr dienen (Allen & Kuć 1968, Sinden et al. 1973, Storey & Davies 1992). Etwa 95 % aller in Kartoffelknollen enthaltenen Glykoalkaloide liegen in Form von α -Solanin und α -Chaconin vor. Während geringe Konzentrationen an Glykoalkaloiden in den Knollen den Geschmack von Kartoffeln verbessern, bewirkt der Konsum von Kartoffeln mit einem hohen Gehalt an Glykoalkaloiden einen bitteren Geschmack (Sinden et al. 1976, 1984), kann Gastroenteritis verursachen und zum Tod führen (McMillan & Thompson 1979, Wolfe 1987, Allen & Scott 1991, Friedman & McDonald 1997). Daher sollte zum Verzehr der Schwellenwert von Konzentrationen über 150 mg kg^{-1} Knollenfrischgewicht nicht überschritten werden (Wood & Young 1974, Jadhav & Salunkhe 1975). Da Glykoalkaloide gegenüber Temperaturen bis $280 \text{ }^\circ\text{C}$ widerstandsfähig sind, hat das Frittieren in Verarbeitungsprozessen nur einen geringen Effekt auf den Glykoalkaloidgehalt (Zitnak & Johnston 1970, Bushway & Ponnampalam 1981). Im Gegenteil, gerade durch den Verarbeitungsprozess des Frittierens werden die Glykoalkaloidkonzentrationen durch Wasserentzug aufkonzentriert (Maga 1981). Lediglich das Schälen der Knollen bietet eine Möglichkeit, die Konzentration an Glykoalkaloiden zu reduzieren, da diese in der Schale höher ist als im Knolleninneren (Smith et al. 1996). Jedoch geben auch geschälte Knollen keine Garantie für geringe Glykoalkaloidkonzentrationen.

Die Sorte Bintje zählt generell zu den Kartoffelsorten mit einer geringen Glykoalkaloidkonzentration. So lag auch in der vorliegenden Studie die Konzentration an Glykoalkaloiden in den Knollen unter dem für die menschliche Ernährung kritischen Level von 150 mg kg^{-1} Frischgewicht. Da erhöhte CO_2 - und Ozonkonzentrationen in Einklang mit der Studie von Vorne et al. (im Druck) zu keiner eindeutigen Beeinflussung der Glykoalkaloidkonzentrationen in den Knollen führten, kann diesbezüglich von einer unveränderten Kartoffelqualität ausgegangen werden. Lediglich der Gehalt an Chaconin nahm 1999 in beiden Ozonbehandlungen tendenziell unter erhöhtem CO_2 ab, wodurch die eindeutigen Ergebnisse von Nitithamyong et al. (1999) und Donnelly et al. (2001 c) unterstützt werden. Der Solaningehalt zeigte diesen CO_2 -Effekt nur bei Umgebungsozon, erhöhte Ozonkonzentrationen bewirkten dagegen übereinstimmend mit Studien von Pell & Pearson (1984) und Donnelly et al. (2001 c) in den Knollen einen tendenziellen Anstieg der Solaninkonzentration. Speroni et al. (1981) berichten dagegen von einer Abnahme der Glykoalkaloidkonzentration unter erhöhtem Ozon. Der 1998 im Zusammenhang mit höheren Glykoalkaloidkonzentrationen festgestellte Kammereffekt war vermutlich auf die im Vergleich zur kammerlosen Behandlung höheren Temperaturen und die reduzierte tägliche Strah-

lungssumme in den OTC zurückzuführen, da auch Arutyunyan (1940), Dimenstein et al. (1997) und Papathanasiou et al. (1999) unter kühleren klimatischen Bedingungen vergleichsweise geringere Glycoalkaloidkonzentrationen in Kartoffelknollen beobachten konnten.

4.3.12.4 ANIONEN

Von den analysierten Anionen besitzt Nitrat eine zentrale Position bei der Beurteilung von toxischen Inhaltsstoffen in den Kartoffelknollen. Einerseits bildet Nitrat die Vorstufe des gesundheitsschädigenden Nitrits, welches an der Bildung von Nitrosaminen beteiligt ist. Daher kann eine zu hohe Aufnahme von Nitrat über die Schwächung des Immunsystems beim Menschen die Bildung von Tumoren begünstigen (Mondy & Munshi 1990), während eine höhere Aufnahme an Mineralstoffen und Ascorbat die Toxizität senkt (Ciešlik 1994). Eine der bekanntesten Wirkungen des Nitrits ist die Auslösung der Säuglingsblausucht (Methämoglobinämie), bei der Nitrit das Hämoglobin blockiert und zur Erstickungsgefahr führt. Andererseits ist Nitrat ein unentbehrlicher Nährstoff für die Pflanze, da er ihre Nährstoffversorgung gewährleistet (Putz 1989).

Generell sind Kartoffelknollen aus ernährungsphysiologischer Sicht als nitratarm einzustufen. Zu einer Anreicherung in den Knollen kommt es erst, wenn dem Boden mehr Nitrat zugeführt wird als die Pflanzen benötigen. Allerdings sagen Gehaltszahlen in Kartoffelknollen nichts über die tatsächliche Zufuhr von Nitrat durch den Verzehr aus, da durch die technologische Verarbeitung überwiegend Nitratverluste zu verzeichnen sind.

Eindeutige Behandlungseffekte auf die Konzentrationen der Anionen konnten nur vereinzelt festgestellt werden, so dass eine Beurteilung unter industriellen Qualitätsaspekten generell schwierig ist. Lediglich 1998 führten erhöhte CO₂-Konzentrationen in der FACE-Behandlung zu einer Abnahme der Chloridkonzentration und zu einer Zunahme der Sulfatkonzentration in den Knollen. 1999 nahm in den OTC die Nitratkonzentration in der Knolle durch erhöhtes CO₂ tendenziell ab, erhöhte Ozonkonzentrationen bewirkten dagegen einen tendenziellen Nitratanstieg. Ursache hierfür war vermutlich die Inaktivierung der Proteinsynthese unter erhöhtem Ozon, die zu einer Anreicherung von Nitrat in den Knollen führte. Die festgestellte Abnahme der Nitratkonzentration in den Knollen unter erhöhtem CO₂ ist aus qualitativer Sicht positiv zu beurteilen und unterstreicht die Studien von Donnelly et al. (2001 c) und Vorne et al. (im Druck). Die tendenziell im Zusammenhang mit dem Standort stehenden Effekte zeigten in beiden Versuchsjahren kein einheitliches Reaktionsmuster.

4.3.12.5 MINERALSTOFFE

Die Veränderungen auf die Mineralstoffkonzentrationen durch atmosphärische Spurengase sind in pflanzlichen Geweben sehr komplex, da die Mineralstoffaufnahme von verschiedenen Faktoren wie Transpiration, Wachstum und Wurzelsystem abhängig ist. So können beispielsweise Luftschadstoffe wie Ozon den Mineralstoffgehalt über die Transpirationsrate durch deren Wirkung auf den stomatären Widerstand beeinflussen.

In Kartoffelknollen wirkt sich die Mineralstoffkonzentration besonders auf die sogenannte Rohbreiverfärbung, die Kochdunklung und die Blaufleckigkeit aus und stellt damit ebenfalls einen wichtigen Qualitätsaspekt dar. Besonders der Kaliumgehalt korreliert über den Anteil der reduzierenden Zucker und den Tyrosingehalt negativ mit der Blaufleckigkeit in der Knolle. Dagegen führt ein hoher Stickstoff- und Phosphorgehalt zu einem Anstieg der Konzentrationen an reduzierenden Zuckern und Tyrosin und bewirkt somit in den Knollen eine Zunahme der Blaufleckigkeit (Westermann et al. 1994).

Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirkten 1999 in den OTC lediglich ein eindeutiges Absinken der Stickstoffkonzentration (N) in den Knollen, was unter Qualitätsaspekten negativ zu beurteilen ist. Die beobachtete Reduktion der Stickstoffkonzentration steht in Übereinstimmung mit Studien an zahlreichen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen und spiegelt die generelle Reaktion von C₃-Pflanzen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen wieder (Cotrufo et al. 1998, Fangmeier et al. 1999). Für Phosphor (P) ergab sich ebenfalls eine eindeutige CO₂-Antwort. Allerdings stieg die Konzentration bei 550 µl l⁻¹ CO₂ an während sie bei 680 µl l⁻¹ CO₂ abnahm, so dass keine generelle Aussage über mögliche Qualitätsveränderungen getroffen werden kann.

Darüber hinaus reagierte Zink (Zn) 1999 in den OTC unter erhöhten CO₂-Konzentrationen zumindest mit einer tendenziellen Konzentrationsabnahme in den Knollen, 1998 war dagegen ein Konzentrationsanstieg in der FACE-Behandlung festzustellen. Dieser konnte 1998 zumindest tendenziell auch für Schwefel (S) und 1999 für Calcium (Ca) beobachtet werden. Da Veränderungen dieser Knolleninhaltsstoffe jedoch keinen großen Einfluss auf die Verarbeitung zu höherwertigen Nahrungsmitteln besitzen, können sie bei der Qualitätsbeurteilung der Knollen vernachlässigt werden.

Erhöhtes Ozon führte in den OTC in allen CO₂-Behandlungen zu einem eindeutigen Konzentrationsanstieg von Stickstoff (N), Schwefel (S), Zink (Zn) sowie zu einem tendenziellen Effekt für Phosphor (P) und Cadmium (Cd). Die Mangankonzentration (Mn) zeigte dagegen kein einheitliches Reaktionsmuster auf erhöhtes Ozon. Durch den Anstieg der Stickstoff- (N) und Phos-

phorkonzentration (P) in den Knollen kann unter erhöhtem Ozon jedoch von einer Verbesserung der Knollenqualität ausgegangen werden.

Die Hauptursache für die durch atmosphärische Spurengase bewirkten Konzentrationsänderungen sind in Verdünnungs- beziehungsweise Konzentrationseffekten durch die veränderte Knollenbiomasse zu suchen. Vermutlich beeinträchtigen erhöhte Ozonkonzentrationen, übereinstimmend mit der Studie von Grantz & Farrar (1999) an Baumwolle, den Kohlenstoffgewinn und die Kohlenstofftranslokation in die Knollen, während die Allokation von Mineralstoffen nur wenig beeinflusst wird. Die Ergebnisse stehen in Einklang mit Studien an verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, in denen beispielsweise ein ozonbedingter Anstieg der Stickstoffkonzentration in Körnern von Getreidearten beobachtet wurde (Fuhrer et al. 1990, Anguissola 1994, Fangmeier et al. 1997).

Auffällige Unterschiede zwischen den beiden Expositionsstandorten waren die im Vergleich zum OTC-Standort niedrigeren Elementkonzentrationen von Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K) und Zink (Zn) am FACE-Standort. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass den Pflanzen am OTC-Standort auf den Bestandesflächen ein größeres Bodenvolumen zur Verfügung stand, während die Pflanzen am FACE-Standort in Gefäßen wuchsen. Ein eindeutiges Reaktionsmuster des Kammereffekts war mit Ausnahme der Konzentrationsabnahme von Bor nicht zu erkennen.

4.3.12.6 PROTEIN

Da die Proteinkonzentration der Knollen aus der Stickstoffkonzentration berechnet wurde, zeigte sie das gleiche Reaktionsmuster auf die verschiedenen Behandlungen. Generell steht der Proteingehalt in Kartoffelknollen in negativer Korrelation zum Stärkegehalt. Obwohl Kartoffelknollen insgesamt eine geringe Proteinkonzentration besitzen, ist die Biologische Wertigkeit des Proteins sehr günstig zu beurteilen. Auch korreliert der Proteingehalt positiv mit dem Geschmack, allerdings können zu hohe Proteinkonzentrationen beziehungsweise deren Vorstufen den Geschmack der Knollen negativ beeinträchtigen. Darüber hinaus verbessert eine hohe Proteinkonzentration in der Knolle den Zerkochungsgrad und die Textur.

Die Abnahme der Proteinkonzentration in den Kartoffelknollen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen kann folglich aus ernährungsphysiologischer Sicht in erster Linie negativ beurteilt werden. Darüber hinaus ist auch mit einer Geschmacksverschlechterung sowie mit einer negativen Wirkung auf den Zerkochungsgrad und die Textur unter erhöhtem CO₂ zu rechnen. Dagegen kann durch die ozoninduzierte Zunahme der Proteinkonzentration überwiegend von einer Qualitätsverbesserung ausgegangen werden. Allerdings sollten die Aussagen zur Beurtei-

lung der möglichen Folgen in bezug auf die Knollenqualität mit weiteren praxisorientierten Versuchen untermauert werden, so dass an dieser Stelle weiterhin Forschungsbedarf besteht.

4.3.12.7 AMINOSÄUREN

Verfärbungsreaktionen der Kartoffelknollen wie Rohbreiverfärbung, Blaufleckigkeit und Kochdunklung entstehen zum einen als Folge einer enzymatischen Reaktion mit phenolischen Verbindungen, zu denen auch die freie Aminosäure Tyrosin zählt. Allgemein sind Knollen der Sorte Bintje nicht sehr empfindlich für das Auftreten von Blaufleckigkeit, allerdings sollte der Trockensubstanzgehalt 20 % nicht überschreiten. Folglich vermindern alle Faktoren, die den Trockensubstanzgehalt reduzieren, auch die Empfindlichkeit für die enzymatischen Verfärbungsreaktionen. Da jedoch der Trockensubstanzgehalt der Knollen in der vorliegenden Studie über 20 % lag und unter erhöhtem CO₂ zusätzlich anstieg, kann selbst bei unbeeinflussten Tyrosinkonzentrationen von einer höheren Empfindlichkeit der Knollen gegenüber der Rohbreiverfärbung, der Blaufleckigkeit und der Kochdunklung ausgegangen werden.

In den OTC bewirkten erhöhte CO₂-Konzentrationen 1999 in den Kartoffelknollen ein eindeutiges Absenken der Leucinkonzentration (Leu), tendenziell nahmen auch die Konzentrationen an Methionin (Met), Phenylalanin (Phe) und Histidin (His) ab, so dass in industriellen Verarbeitungsprozessen weniger Aminosäuren für die nicht-enzymatische Bräunungsreaktion zur Verfügung stehen. Die Reduktion der freien Aminosäurekonzentrationen unter erhöhtem CO₂ steht in Übereinstimmung mit Studien an verschiedenen anderen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen und kann im Fall der Kartoffelknollen als Qualitätsverbesserung interpretiert werden. Erhöhte Ozonkonzentrationen verursachten dagegen einen Anstieg der Konzentrationen verschiedener Aminosäuren (Asn, Gln, Asp, Ser, Thr, Gly, Arg, Ala, Met, tendenziell auch Pro) in den Knollen und bewirkten folglich eine Verschlechterung der Knollenqualität. Auch in der FACE-Behandlung ergab sich 1998 unter erhöhtem CO₂ ein Anstieg der Glutaminsäurekonzentration (Glu). Ursache der Reaktionen auf atmosphärische Spurengase ist vermutlich ein CO₂-bedingter Verdünnungseffekt durch den Anstieg des Trockensubstanzgehaltes beziehungsweise ein ozonbedingter Konzentrationseffekt durch die Abnahme des Trockensubstanzgehaltes in den Knollen. Derzeit liegen keine Vergleichsstudien über den Einfluss erhöhter CO₂- und Ozonkonzentrationen auf die Konzentrationen von Aminosäuren in Kartoffelknollen vor. Wann immer signifikante Effekte des Standortes auftraten, waren die Konzentrationen der freien Aminosäuren am FACE-Standort niedriger. Dies kann hauptsächlich dadurch begründet werden, dass die Pflanzen am OTC-Standort in einem großen Bodenvolumen angezogen, die Pflanzen am

FACE-Standort dagegen in Plastikcontainern mit einem geringeren Volumen in einer Boden-Sandmischung wuchsen.

Der überwiegende Anteil der Produktion landwirtschaftlicher Nutzpflanzen dient direkt der menschlichen Ernährung, und zwar in erster Linie als Energiequelle. Daher ist die Steigerung und die Stabilisierung des Ertrags bei zumindest gleichbleibender verwertungsspezifischer Qualität ein vordringliches Zuchtziel. Erhöhte CO₂-Konzentrationen unterstützen zumindest bei optimalen Umweltbedingungen die gegenwärtigen Züchtungsziele auf eine höhere Ertragsleistung. Neben der Ertragsmenge spielt jedoch auch die Ertragsqualität eine entscheidende Rolle, die je nach Verwertungsziel spezifisch betrachtet werden muss. Obwohl erhöhte Spurengaskonzentrationen ein gewisses Potential zur Veränderung der verwertungsspezifischen Ertragsqualität besitzen, wird dieses bislang in den verschiedenen Klimamodellen und Züchtungsprogrammen nicht ausreichend berücksichtigt. Für die zukünftige Ernährungssicherung erscheint es jedoch zwingend notwendig, neben den derzeitigen züchterischen Interessen wie Düreresistenz, Krankheits- und Schädlingsresistenz vermehrt die verwertungsspezifischen Qualitätsaspekte zu berücksichtigen, um die Verwirklichung des möglichen Ertrags und dessen Qualität dauerhaft sicherzustellen.

Gerade in bezug auf die Interessen der Braugerstenzüchtung stehen die Folgen erhöhter CO₂-Konzentrationen im Gegensatz zu den derzeitigen Züchtungsinteressen mit dem Ziel nach großen Körnern. Eine Schlüsselstellung in der Beurteilung der verwertungsspezifischen Ertragsqualität von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen spielt der unter erhöhtem CO₂ absinkende Mineralstoff-, Protein- und Aminosäurespiegel, der je nach Verwendungszweck positiv oder negativ zu bewerten ist. Speziell bei Kartoffeln zählen darüber hinaus Veränderungen der Trockensubstanz und der Glucose- und Fructosekonzentrationen unter erhöhten Spurengaskonzentrationen als zu bewertender Aspekt in bezug auf die Knollenqualität bei der Herstellung von Pommes frites und Chips - ob jedoch die positiven oder negativen verwertungsspezifischen Qualitätsveränderungen überwiegen werden, ist derzeit unklar.

Bei der Interpretation der Folgen von erhöhten CO₂- und Ozonkonzentrationen auf den Ertrag und die verwertungsspezifische Qualität landwirtschaftlicher Nutzpflanzen sollte jedoch berücksichtigt werden, dass der prognostizierte Spurengasanstieg langsam über einen längeren Zeitraum erfolgen wird und nicht – wie im Experiment – schlagartig. Darüber hinaus wurden die Wirkungen von zukünftigen CO₂- und Ozonkonzentrationen mit konventionellen Sorten untersucht, so dass die Möglichkeit der allmählichen Akklimatisierung und der genetischen Adaptation unberücksichtigt bleibt. Optimistische Stimmen gehen sogar davon aus, dass es nur

eine Frage der Zeit ist, bis die Pflanzenproduktion und die Landwirtschaft in der Lage sind, sich mit gezielten Veränderungen in den Kulturpflanzen schrittweise an die Perspektiven des 21. Jahrhunderts anzupassen. Die Realisierung der zu verändernden Züchtungsziele sowie die unmittelbaren Auswirkungen erhöhter CO₂- und Ozonkonzentrationen auf die landwirtschaftliche Produktion und das Spektrum der eingesetzten Arten und Sorten wird daher in Zukunft in Zusammenhang mit der Ernährungs- und Qualitätssicherung eine wichtige Rolle spielen.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Der anthropogen verursachte Konzentrationsanstieg von treibhauswirksamen Spurengasen wie CO₂ und Ozon ist zum einen Mitverursacher des globalen Klimawandels (*Global Climate Change*), zum anderen hat er direkte Auswirkungen auf die Vegetation. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die möglichen Effekte erhöhter Spurengaskonzentrationen auf die Bestandesentwicklung, die oberirdische Biomasse, den Ertrag und die verwertungsspezifische Ertragsqualität von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zu untersuchen, die für die menschliche Ernährung als Quelle für Kohlenhydrate, Proteine und Mineralstoffe eine große Bedeutung besitzen. Qualitätsaspekte waren bei Weizen die ernährungsphysiologische Bewertung sowie die verarbeitungstechnische Eignung zur Herstellung von Mahl- und Backprodukten, bei Gerste die Anforderungen zur Verarbeitung in der Malz- und Brauereitechnik und bei Kartoffeln die Forderungen der verarbeitenden Industrie zur Herstellung von höherwertigen Nahrungsmitteln in Form von Pommes frites und Chips.

Entsprechend den Prognosen verschiedener Modelle über den weiteren Anstieg der Spurengaskonzentrationen in den nächsten Jahrzehnten wurden Sommerweizen (*Triticum aestivum* L. cv. *Minaret*), Sommergerste (*Hordeum vulgare* L. cv. *Alexis*) und Kartoffelpflanzen (*Solanum tuberosum* L. cv. *Bintje*) während der gesamten Vegetationsperiode in open-top Kammern (OTC) oder in einem kammerlosen Freiland-CO₂-Anreicherungssystem (FACE) mit verschiedenen CO₂-Konzentrationen (380, 550 und 680 µl l⁻¹ CO₂) und Ozonkonzentrationen (Umgebungs-Ozon und 60 nl l⁻¹ Ozon) exponiert. Durch die gleichzeitige Behandlung der Getreidepflanzen mit verschiedenen Stickstoffversorgungsstufen (Weizen: 270 bzw. 300 und 150 kg N ha⁻¹, Gerste: 140 und 80 kg N h⁻¹) wurden mögliche Interaktionen von CO₂ und Stickstoff aufgedeckt.

Erhöhtes CO₂ minderte 1998 bei Kartoffelpflanzen den Wasserverbrauch des Bestandes und die Pflanzenhöhe, Ozon verursachte keinen Effekt. Bei Sommerweizen konnte unter erhöhtem CO₂ eine vermehrte Allokation von Stärke, löslichen Kohlenhydraten und Saccharose beziehungsweise eine Entwicklungsbeschleunigung während der Kornfüllung beobachtet werden. Die phänologische Entwicklung der Kartoffelpflanzen schien dagegen durch erhöhtes CO₂ unbeeinflusst, allerdings deutete die höhere Anzahl seneszenten Blätter zum Ende der Vegetationsperiode und der frühere Blattchlorophyllabbau auf eine beschleunigte Seneszenz hin. Erhöhtes Ozon verursachte eine frühere Knolleninduktion und beschleunigte ebenfalls die Blattseneszenz, so dass bei Kombination beider Spurengase von einer Verstärkung der Seneszenzprozesse ausgegangen werden kann.

Generell bewirkte erhöhtes CO₂ bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen einen Anstieg der oberirdischen Biomasse und des Ertrags sowie eine verbesserte Stickstoffnutzungseffizienz. Damit verbunden waren Veränderungen der verwertungsspezifischen Ertragsqualität. Bei Getreide ergab sich der größte Zuwachs der oberirdischen Biomasse (Weizen 42,0 %, Gerste 37,7 %) und des Kornertrags (Weizen 38,5 %, Gerste 27,9 %) in der Exposition mit 680 µl l⁻¹ CO₂ in Kombination mit einer hohen Stickstoffversorgung, der Harvest-Index blieb weitgehend unverändert. Obwohl eine niedrigere Stickstoffversorgung die CO₂-Antwort der Getreidearten offensichtlich limitierte, konnten Interaktionen von CO₂ und Stickstoff nur vereinzelt festgestellt werden. Die oberirdische Biomasse und der Ertrag von Kartoffelpflanzen hingegen reagierte nur gering auf erhöhtes CO₂. Während der für die Herstellung von Pommes frites und Chips wichtige industrielle Ertrag unbeeinflusst blieb, stieg der Gesamtertrag um 12,6 % (OTC) und 8,8 % (FACE) und der kommerzielle Ertrag um 15,4 % (OTC) und 8,7 % (FACE) in der Behandlung mit 550 µl l⁻¹ CO₂ tendenziell an. Ein Konzentrationsanstieg auf 680 µl l⁻¹ CO₂ bewirkte in den OTC keinen weiteren Ertragsanstieg. Erhöhtes Ozon verursachte bei Kartoffelpflanzen trotz der massiven sichtbaren Blattschäden keinen eindeutigen Ertragsverlust. Tendenziell auftretende Verluste des Gesamt- und des kommerziellen Ertrags wurden durch erhöhtes CO₂ geschmälert, so dass das Ertragsmaximum in der OTC680O3-Behandlung erzielt wurde. Eindeutige Interaktionen von CO₂ und Ozon ergaben sich bei Kartoffelpflanzen jedoch nicht. Die positive Ertragsantwort von Getreidearten auf erhöhte CO₂- und Stickstoffkonzentrationen basierte auf ansteigenden Kornzahlen durch eine vermehrte Anlage und Ausbildung von Nebenähren, bei Sommerweizen zusätzlich auf einer höheren Kornzahl pro Ähre. Obwohl das Tausendkorngewicht durch erhöhtes CO₂ unbeeinflusst erschien, ergab sich aus der Siebsortierung eine Verschiebung der Korngrößen hin zu kleineren Körnern, wodurch bei Sommerweizen die Mahlqualität und bei Sommergerste die Brauqualität abnahm. Dagegen deutete der unter erhöhtem CO₂ unverminderte Vollgersteanteil und die trotz reduzierter Kornstickstoffkonzentrationen unbeeinflusste Keimfähigkeit auf keine Veränderungen der Braugerstequalität hin. Bei den Kartoffelpflanzen ergab sich der Trend, dass die Ertragszunahme 1998 aus dem Anstieg des durchschnittlichen Knollengewichtes, 1999 dagegen aus dem Anstieg der Knollenzahl pro Fläche resultierte. Die optische Qualität (schorfige, grüne und deformierte Knollen) und die physikalische Qualität (spezifisches Gewicht, Unterwassergewicht und Glasigkeit) blieben unter erhöhtem CO₂ und Ozon überwiegend unbeeinflusst, lediglich erhöhtes CO₂ bewirkte durch einen Trockensubstanzzuwachs eine Qualitätsverbesserung der Kartoffelknollen, erhöhtes Ozon verursachte ein Absinken des Trockensubstanzgehaltes.

Die Beurteilung der chemischen Ertragsqualität basierte bei den landwirtschaftlichen Nutzpflanzen verwertungsspezifisch auf den Konzentrationen von Kohlenhydraten, Mineralstoffen, Proteinen und Aminosäuren. Bei den Kartoffelknollen wurden zusätzlich die Konzentrationen von Organischen Säuren, Glycoalkaloiden und Anionen in die Qualitätsbewertung einbezogen. Die unter erhöhtem CO₂ (FACE 1998) und Ozon (OTC 1999) geringeren Glucose- und Fructosekonzentrationen verbesserten die Kartoffelknollenqualität. Erhöhtes CO₂ verminderte die Ertragsqualität bei Sommerweizen durch Anstieg der Stärkekonzentration und Abnahme der Mineralstoffkonzentration (N, S, Zn, P, Fe, Mg, Ca) und 1999 bei Kartoffeln durch Reduktion der Ascorbatkonzentration. Erhöhtes Ozon verursachte in den Kartoffelknollen 1999 eine unter Qualitätsaspekten positiv zu bewertende Zunahme der Mineralstoff- (N, S, Zn) und Proteinkonzentration sowie einen negativ zu beurteilenden Anstieg der Aminosäurekonzentration.

Die CO₂-bedingte Abnahme der Proteinkonzentration im Getreidekorn und in der Kartoffelknolle verbesserte bei Sommergerste die Brauqualität, bei Sommerweizen und Kartoffeln kam es dagegen zu einer Verschlechterung der Ertragsqualität, die im Fall von Sommerweizen nur teilweise durch eine höhere Stickstoffversorgung kompensiert werden konnte. Auch der Trend der veränderten Anteile der einzelnen Aminosäuren am hydrolysierten Kornprotein deutete bei Sommerweizen auf eine CO₂-bedingte Qualitätsverschlechterung in Form einer Abnahme der Gluteline hin. Auch die Reduktion der Aminosäurekonzentration unter erhöhtem CO₂ wies bei Sommerweizen auf eine Qualitätsverschlechterung hin, im Gegensatz dazu verbesserte sich bei Kartoffeln die Knollenqualität.

Erhöhte CO₂- und Ozonkonzentrationen verursachten eine Reihe von Veränderungen mit Folgen für die Bestandesentwicklung, den Ertrag und die verwertungsspezifische Qualität der getesteten Nutzpflanzenarten. Obwohl unter erhöhten Spurengaskonzentrationen das Potential zur Qualitätsveränderung vorhanden ist, wird dieses derzeit in den verschiedenen Züchtungsprogrammen und Klimamodellen nicht ausreichend berücksichtigt. Im Hinblick auf eine zukünftige globale Ernährungssicherung erscheint die Einbeziehung der möglichen Folgen auf die Ertragsqualität jedoch zwingend notwendig. Weiterhin ungeklärt ist derzeit die Frage, ob in einer zukünftigen „CO₂- und Ozonwelt“ - je nach Verwertung der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen - die positiven oder die negativen Qualitätseffekte überwiegen werden, so dass an dieser Stelle weiterhin Forschungsbedarf besteht.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- Acock, B. & Allen, L.H. (1985): Crop responses to elevated carbon dioxide concentrations. In: Strain, B.R. & Cure, J.D. (eds.): Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. United States Department of Energy (DOE), Washington D.C., 53-97.
- Acock, B., Reddy, V.R., Hodges, H.F., Baker, D.N. & McKinion, J.M. (1985): Photosynthesis response of soybean canopies to full-season carbon dioxide enrichment. *Agron. J.* 77, 942-947.
- Agle, W.M. & Woodbury, G.W. (1968): Specific gravity-dry matter relationship and reducing sugar changes affected by potato variety, production area and storage. *Am. Potato J.* 45, 119-131.
- Allen, E.H. & Kuć, J. (1968): α -Solanine and α -chaconine as fungitoxic compounds in extracts of Irish potato tubers. *Phytopathol.* 58, 776-781.
- Allen, L.H. (1990): Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *J. Environ. Qual.* 19, 15-34.
- Allen, E.J. & Scott, R.K. (1991): Principles of agronomy and their application in the potato industry. In: Harris, P. (ed.): *The Potato Crop*. Chapman & Hall, London.
- Anfossi, D., Sandroni, S. & Viarengo, S. (1991): Tropospheric ozone in the nineteenth century: the montcalieri series. *J. Environ. Qual.* 19, 15-34.
- Anguissola, J., Scotti, S. & Botteschi, G. (1994): Effects of ozone on grain quality of wheat grown in open-top chambers: three years of experimentation. *Environ. Pollut.* 86, 31-35.
- Archbold, H.K. (1942): Physiological studies in plant nutrition. XIII. Experiments with barley on defoliation and shading of the ear in relation to sugar metabolism. *Ann. Bot.* 6, 487-531.
- Arp, W.J. (1991): Effects of source-sink relations on photosynthesis acclimation to elevated CO₂. *Plant Cell Environ.* 14, 869-875.
- Arutyunyan, L.A. (1940): The solanine content of potatoes. *Vop. Pitan.* 9, 30-36.
- Ashmore, M.S. (1988): A comparison of indices that describe the relationship between exposure to ozone and reduction in the yield of agricultural crops. *Atmos. Environ.* 22, 2060-2061.
- Ashmore, M.R. & Bell, J.N. (1991): The role of ozone in global change. *Ann. Bot.* 67, 39-48.

- Austin, R.B. (1980): Physiological limitations to cereal yields and ways of reducing them by breeding. In: Hurd, R.G., Biscoe, P.V. & Dennis, C. (eds.): Opportunities for Increasing Crop Yields. Association of Applied Biologists, London, 3-19.
- Avigad, G. (1990): Disaccharides. In: Dey, P.M. & Harborne, J.B. (eds.): Methods in plant biochemistry: Carbohydrates. Academic Press, London, San Diego, New York, 111-188.
- Azcon-Bieto, J. (1983): Inhibition of photosynthesis by carbohydrates in wheat leaves. *Plant Physiol.* 73, 681-686.
- Barnes, J.D. & Pfirrmann, T. (1992): The influence of CO₂ and O₃, singly and in combination, on gas exchange, growth and nutrient status of radish (*Raphanus sativa* L.). *New Phytol.* 121, 403-412.
- Barnes, J.D. & Wellburn, A.R. (1998): Air pollutant combinations. In: De Kok, L.J. & Stulen, I. (eds.): Responses of Plant Metabolism to Air Pollution and Global Change. Backhuys Publ., Leiden, 147-164.
- Batts, G.R., Wheeler, T.R., Morison, J.I.L., Elis, R.H. & Hadley, P. (1996): Developmental and tillering responses of winter wheat (*Triticum aestivum*) crops to CO₂ and temperature. *J. Agric. Sci.* 127, 23-35.
- Bazzaz, F.A. (1990): The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 21, 167-196.
- Belitz, H.-D., Grosch, W. & Schieberle, P. (2001): Lehrbuch der Lebensmittelchemie. Springer, Berlin, Heidelberg, 1059 S.
- Benoit, G.R., Stanley, C.D., Grant, W.J. & Torrey, D.B. (1983): Potato top growth as influenced by temperatures. *Am. Potato J.* 60, 489-501.
- Bergmann, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- Bertoni, G.P. & Becker, W.M. (1996): Expression of the cucumber hydroxypyruvate reductase gene is down-regulated by elevated CO₂. *Plant Physiol.* 112, 599-605.
- Bindi, M. & Fangmeier, A. (im Druck): Comparison of open air (FACE + OTC ambient air plots) to CO₂ exposure. *Eur. J. Agron.* 12.
- Black, V.J., Black, C.R., Roberts, J.A. & Stewart, C.A. (2000): Impact of ozone on the reproductive development of plants. *Transley Review No 115, New Phytol.* 147, 421-447.

- Blankeney, A.B. & Matheson, N.K. (1984): Some properties of stem and pollen starches in rice. *Stärke* 36, 265-269.
- Blumenthal, C.S., Bekes, F., Batey, I.L., Wrigley, C.W., Moss, H.J., Mares, D.J. & Barlow, E.W.R. (1991): Interpretation of grain quality results from wheat variety trials with reference to high temperature stress. *Aust. J. Agric. Res.* 42, 325-334.
- Blumenthal, C., Rawson, H.M., McKenzie, E., Gras, P.W., Barlow, E.W.R. & Wrigley, C.W. (1996): Changes in wheat grain quality due to doubling the level of atmospheric CO₂. *Cer. Chem.* 73, 762-766.
- Bodlaender, K.B.A. (1963): Influence of temperature, radiation, and photoperiod on development and yield. In: Irwins, J.D. & Milthorpe, F.L. (eds.): *Growth of the Potato*. Butterworths, London, UK, 199-210.
- Borah, M.N. & Milthorpe, F.L. (1962): Growth of the potato as influenced by temperature. *Ind. J. Plant Physiol.* 5, 53-72.
- Bowes, G. (1993): Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO₂. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 44, 309-332.
- Bowler, C., Slooten, L., Vandenbranden, S., De Rycke, R., Botterman, J., Sybesma, C., Van Montagu, M. & Inzé, D. (1991): Manganese superoxide dismutase can reduce cellular damage mediated by ozone radicals in transgenic plants. *EMBO J.* 10, 1723-1732.
- Brandenburger, V. (1992): Der Einfluß der Düngung auf Ertrag und Qualität der Braugerste. *Brauwelt*, 419-421.
- Brautechnische Analysenmethoden (1984). Drawert, F. (Hrsg.): Band I, Methodensammlung der Mitteleuropäischen Analysenkommission (MEBAK). Selbstverlag der MEBAK, Freising-Weihenstephan.
- Bulman, P., Zarkadas, C.G. & Smith, D.L. (1994): Nitrogen fertilizer affects amino acid composition and quality of spring barley grain. *Crop Sci.* 34, 1341-1346.
- Burton, W.G., Van Es, A. & Hartmans, K.J. (1992): The physics and physiology of storage. In: Harris, P. (ed.). *The Potato Crop. The Scientific Basis for Improvement*. Chapman and Hall, London, 608-728.
- Bushway, R.J. & Ponnampalam, R. (1981): α -Chaconine and α -solanine content of potato products and their stability during several modes of cooking. *J. Agric. Food Chem.* 29, 814-817.

- Bushway, R.J, Bureau, J.L. & McGann, D.F. (1984): Determinations of organic acids in potatoes by high performance liquid chromatography. *J. Food Sci.* 49, 75-77, 81.
- Buttler, L.K. & Tibbits, T.W. (1979): Variation in ozone sensitivity and symptom expression among cultivars of *Phaseolus vulgaris* L.. *J. Am. Soc. Hort.* 104, 208-210.
- Cao, W. & Tibbits, T.W. (1991): Physiological responses in potato plants under continuous irradiation. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 116, 525-527.
- Cao, W.B., Tibbits, T.W. & Wheeler, R.M. (1994): Carbon dioxide interactions with irradiance and temperature in potatoes. *Adv. Space Res.* 14, 243-250.
- Cao, W. & Tibbits, T.W. (1997): Starch concentration and impact on specific leaf weight and element concentrations on potato leaves under varied carbon dioxide and temperature. *J. Plant Nutr.* 20, 871-881.
- Ciešlik, E. (1994): The effect of naturally occurring vitamin C in potato tubers on the level of nitrates and nitrites. *Food Chem.* 49, 233-235.
- Clarke, B., Henninger, M. & Brennan, E. (1978): The effect of two antioxidants on foliar injury and tuber production in “Norchip” potato plants exposed to ambient oxidants. *Plant Dis. Rep.* 62, 715-717.
- Clarke, B.B., Greenhalgh-Weidman, B. & Brennan, E.G. (1990): An assessment of the impact of ambient ozone on field grown crops in New Jersey using EDU method: Part 1 – white potato (*Solanum tuberosum*). *Environ. Pollut.* 66, 351-360.
- Coffin, R., Yada, R.Y., Parkin, K.L., Grodzinski, B. & Stanley, D.W. (1987): Effect of low temperature storage on sugar concentrations and chip color of certain processing potato cultivars and selections. *J. Food Sci.* 52, 639-645.
- Collins, W.B. (1976): Effect of carbon dioxide enrichment on growth of the potato plant. *Hort. Science* 11, 467-469.
- Conroy, J.P. (1992): Influence of elevated atmospheric CO₂ concentrations on plant nutrition. *Aust. J. Bot.* 40, 445-456.
- Conroy, J. & Hocking, P. (1993): Nitrogen nutrition of C₃ plants at elevated atmospheric CO₂ concentrations. *Physiol. Plant.* 89, 570-576.
- Conroy, J.P., Seneweera, S., Basra, A.S., Rogers, G. & Nissen-Wooller, B. (1994): Influence of rising atmospheric CO₂ concentrations and temperature on growth, yield and grain quality of cereal crops. *Aust. J. Plant Physiol.* 21, 741-758.

- Corke, H. & Atsmon, D. (1988): Effect of nitrogen nutrition on endosperm protein synthesis in wild and cultivated barley grown in spike culture. *Plant Physiol.* 87, 523-528.
- Cotrufo, M.F., Ineson, P. & Scott, A. (1998): Elevated CO₂ reduces the nitrogen concentration of plant tissues. *Glob. Change Biol.* 4, 43-54.
- Craigon, J., Fangmeier, M., Jones, M., Donnelly, A., Bindi, M., De Temmerman, L., Persson, K. & Ojanpera, K. (im Druck): Growth and marketable-yield responses of potato to increased CO₂ and ozone. *Eur. J. Agron* 12.
- Crutzen, P.J., Lawrence, M.G. & Pöschl, U. (1999) : On the background photochemistry of tropospheric ozone. *Tellus* 51 A-B, 123-146.
- Cure, J.D. & Acock, B. (1986): Crop response to carbon dioxide doubling: a literature survey. *Agr. For. Meteorol.* 38, 127-145.
- Davidson, D.J. & Chevalier, P.M. (1992): Storage and remobilization of water-soluble carbohydrates in stem of spring wheat. *Crop Sci.* 32, 186-190.
- De Temmerman, L., Vandermeiren, K. & Guns, M. (1992): Effects of air filtration on spring wheat grown in open-top chambers at a rural site. I. Effects of growth, yields and dry matter partitioning. *Environ. Poll.* 77, 1-5.
- De Temmerman, L., Hacour, A. & Guns, M. (im Druck a): Changing climate and potential impacts on potato yield and quality "CHIP": introduction, aims and methodology. *Eur. J. Agron.* 12.
- De Temmerman, L., Phil-Karlson, G., Donnelly, A., Ojanperä, K., Jäger, H.-J., Finnan, J. & Ball, G. (im Druck b): Visible ozone injury on potato and interaction with increasing carbon dioxide concentrations in ambient air. *Eur. J. Agron.* 12.
- Dijkstra, P., Schapendonk, A.H.C.M., Groenwold, K.O., Jansen, M. & Van de Geijn, S.C. (1999): Seasonal changes in the response of winter wheat to elevated atmospheric CO₂ concentration grown in open-top chambers and field tracking chambers. *Glob. Change Biol.* 5, 563-576.
- Dimenstein, L., Lisker, N., Kedar, N. & Levy, D. (1997): Changes in the content of glycoalkaloids in potato tubers grown in the field and in the greenhouse under different conditions of light, temperature and daylength. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 50, 391-402.
- Dionex Operator Manual (1993): Introduction to the Dionex DX 500 chromatography systems. Dionex Corporation, Sunnyvale, California, U.S.A.

- Donnelly, A., Jones, M.B., Burke, J.L. & Schnieders, B.J. (1999): Does elevated CO₂ protect grain yield of wheat from the effects of ozone stress? *Zeitschr. Naturforsch. C-A J. Biosci.* 54 c, 802-811.
- Donnelly, A., Craigon, J., Black, C.R., Colls, J.J. & Landon, G. (2001 a): Does elevated CO₂ ameliorate the impacts of O₃ on chlorophyll content and photosynthesis in potato (*Solanum tuberosum* L.)? *Physiol. Plant.* 111, 501-511.
- Donnelly, A., Craigon, J., Black, C.R., Colls, J.J. & Landon, G. (2001 b): Elevated CO₂ increases biomass and tuber yield in potato even at high O₃ level. *New Phytol.* 149, 265-274.
- Donnelly, A., Lawson, T., Craigon, J., Black, C.R., Colls, J.J. & Landon, G. (2001 c): Effects of elevated CO₂ and O₃ on tuber quality in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Agr. Ecosys. Environ.* 87, 273-285.
- Drake, B.G., Rogers, H.H. & Allen, L.H. (1985): Methods of exposing plants to elevated carbon dioxide. In: Strain, B.R. & Cure, J.D. (eds.): *Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation.* United States Department of Energy (DOE), Washington, D.C. 20545.
- Dubois, D., Winzeler, M. & Nosberger, J. (1990): Fructan accumulation and sucrose: sucrose fructosyltransferase activity in stems of spring wheat genotypes. *Crop Sci.* 30, 315-319.
- Ebel, A., Elbern, H. & Oberreuter, A. (1993): Stratosphere-troposphere air mass exchange and cross-troposphere fluxes of ozone. In: Thrane, E.V. et al. (eds.): *Coupling progresses in the lower and middle atmosphere.* Kluwer Acad. Publ., Netherlands, 49-65.
- Einarsson, S., Josefsson, B. & Lagerkvist, S. (1983): *J. Chromatogr.* 282, 609-618.
- Evans, L.T. & Wardlaw, I.F. (1996): Whole plant source-sink relationship of selected crops: wheat. In: Zamski, E. & Schaffer, A.A. (eds.): *Photoassimilate Distribution in Plants and Crops: Source-Sink Relationship.* Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong, 501-519.
- Ewart, J.A.D. (1967): Amino acid analysis of glutenins and gliadins. *J. Sci. Food Agric.* 18, 111.
- Ewart, J.A.D. (1969): Isolation and characterization of wheat albumin. *J. Sci. Food Agric.* 20, 730.

- Fangmeier, A., De Temmerman, L., Black, C., Perrson, K. & Vorne, V. (im Druck): Effects of elevated CO₂ and/or ozone on nutrient content and nutrient uptake of potatoes. *Eur. J. Agron* 12.
- Fangmeier, A., Stein, W., & Jäger, H.-J. (1992): Advantages of an open-top chamber plant exposure system to assess the impact of atmospheric trace gases on vegetation. *Angew. Bot.* 66, 97-105.
- Fangmeier, A., Brockerhoff, U., Grütters, U. & Jäger, H.-J. (1994): Growth and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Turbo) grown in open-top chambers to ozone and water stress. *Environ. Pollut.* 83, 317-325.
- Fangmeier, A., Grütters, U., Vermehren, B. & Jäger, H.-J. (1996 a): Response to some cereals to CO₂ enrichment and tropospheric ozone at different levels of nitrogen supply. *J. Appl. Bot.* 70, 12-18.
- Fangmeier, A., Grütters, U., Hertstein, U., Sandhage-Hofmann, A., Vermehren, B. & Jäger, H.-J. (1996 b): Effects of elevated CO₂, nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat. I. Growth and yield. *Environ. Pollut.* 91, 381-390.
- Fangmeier, A., Grütters, U., Högy, P., Vermehren, B. & Jäger, H.-J. (1997): Effects of elevated CO₂, nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat – II. Nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn). *Environ. Pollut.* 96, 43-59.
- Fangmeier, A. (1997): Nährstoffdynamik in Weizenbeständen unter veränderter CO₂-Versorgung. In: Overdieck, D. & Forstreuter, M. (Hrsg.): Stoffverlagerung in Pflanzen und von Pflanzen zum Ökosystem – 2. Treffen des GfÖ-Arbeitskreises in Berlin „Experimentelle Ökologie der Pflanzen“, Landschaftsentwicklung und Umweltforschung. Schriftenreihe im Fachbereich 7 – Umwelt und Gesellschaft, Technische Universität Berlin.
- Fangmeier, A. & Jäger, H.-J. (1998): CO₂ enrichment, ozone, nitrogen fertilizer and wheat: physiological background of growth and yield response. In: De Kok, L.J. & Stulen, I. (eds.): *Response of Plant Metabolism to Air Pollution and Global Change*. Backhuys Publishers, Leiden, 299-304.
- Fangmeier, A., De Temmerman, L., Mortensen, L., Kemp, K., Burke, J., Mitchell, R., Van Oijen, M. & Weigel, H.J. (1999): Effects on nutrients and on grain quality in spring wheat crops grown under elevated CO₂ concentrations and stress conditions in the European, multiple-site experiment “ESPACE-wheat”. *Eur. J. Agron.* 10, 215-229.

- Fangmeier, A. & Jäger, H.-J. (2001): Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen. In: Guderian, R. (Hrsg.): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie, Band 2a: Terrestrische Ökosysteme. Berlin, Heidelberg, New York. Springer.
- FAO (2002): web site of the FAO (<http://www.fao.org>).
- Farrar, J.F. & Williams, M.L. (1991): The effect of increased atmospheric carbon dioxide and temperature on carbon partitioning, source-sink relations and respiration. *Plant Cell Environm.* 14, 819-830.
- Feil, B. & Bänziger, M. (1993): Weshalb haben ertragreiche Weizensorten eine niedrigere Kornproteinkonzentration? *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 6, 113-116.
- Feil, B. (1998): Physiologische und pflanzenbauliche Aspekte der inversen Beziehung zwischen Ertrag und Proteinkonzentration bei Getreidesorten – eine Übersicht. *Pflanzenbauwiss.* 1. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 37-46.
- Feil, B. (1999): Beziehungen zwischen dem Kornertrag und den Konzentrationen von Protein, Phosphor und Kalium in den Körnern von Sommerweizensorten. *Pflanzenbauwiss.* 3. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 1-8.
- Feister, U. & Warmbt, W. (1987): Long-term measurements of surface ozone in the German Democratic Republic. *J. Atm. Chem.* 5, 1-21.
- Fichtner, K., Koch, G.W. & Mooney, H.A. (1994): Photosynthesis, storage, and allocation. In: Schulze, E.-D. & Caldwell, M.M.: *Ecophysiology of photosynthesis*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 133-144.
- Fido, R.J., Bekes, F., Gras, P.W. & Tatham, A.S. (1997): Effects of α -, β -, γ - und ω -gliadins on the dough mixing properties of wheat flour. *J. Cereal Sci.* 26, 271-277.
- Field, C.B., Chapin III, F.S., Matson, P.A. & Mooney, H.A. (1992): Responses of terrestrial ecosystems to changing atmosphere: a resource-based approach. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 23, 201-235.
- Finney, K.F. (1985): Experimental breadmaking studies, functional (breadmaking) properties, and related gluten protein fractions. *Cer. Foods World* 30, 794-801.
- Fiscus, E.I., Reid, C.D., Miller, J.E. & Heagle, A.S. (1997): Elevated CO₂ reduces O₃ flux and O₃-induced yield losses in soybean: possible implications for elevated CO₂ studies. *J. Exp. Bot.* 48, 307-313.

- Fisher, D.B. (1987): Changes in concentration and composition of peduncle sieve tube sap during grain filling in normal and phosphate-deficient wheat plants. *Aust. J. Plant Physiol.* 14, 147-156.
- Foster, K.W., Timm, H., Labanauskas, C.K. & Oshima, R.J. (1983): Effects of Ozone and Sulfur Dioxide on Tuber Yield and Quality of Potatoes. *J. Environ. Qual.* 12, 75-80.
- Foyer, C.H., Descourvieres, P. & Kunert, K.J. (1994): Protection against oxygen radicals: an important defense mechanism studied in transgenic plants. *Plant Cell Environ.* 17, 507-523.
- Fowler, D. & Cape, J.N. (1982): Air pollutants in agriculture and horticulture. In: Unsworth, M.H. & Ormrod, D.P. (eds.): *Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture.* Butterworth Scientific, London, 3-26.
- French, D. (1984): Chemistry and biochemistry of starch. In: Whelan, W.J. (ed.): *Biochemistry of carbohydrates.* MTP International review of science. Butterworths, London, 267-335.
- Friedman, M. & McDonald, G.M. (1997): Potato glycoalkaloids: chemistry, analysis, safety, and plant physiology. *Crit. Rev. Plant Sci.* 16, 55-132.
- Fuhrer, J., Egger, A., Lehnerr, B., Grandjean, A. & Tschannen, W. (1989): Effects of ozone on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Albis) grown in open-top field chambers. *Environ. Pollut.* 65, 181-192.
- Fuhrer, J., Lehnerr, B., Moeri, P.B., Tschannen, W. & Shariatmadari, H. (1990): Effects of ozone on the grain composition of spring wheat grown in open-top field chambers. *Environ. Pollut.* 65, 181-192.
- Fuhrer, J., Skärby, L. & Ashmore, M.R. (1997): Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environ. Pollut.* 97, 91-106.
- Gelang, J., Pleijel, H., Sild, E., Danielsson, H., Younis, S. & Selldén, G. (2000): Rate and duration of grain filling in relation to flag leaf senescence and grain yield in spring wheat (*Triticum aestivum*) exposed to different concentrations of ozone. *Physiol. Plant.* 110, 366-375.
- Gershoff, S.N. (1993): Vitamin C (Ascorbic acid): New roles, new requirements? *Nutr. Rev.* 51, 313-326.
- Giese, H., Andersen, D. & Doll, H. (1983): Synthesis of the major storage protein, hordein, in barley. Pulse labelling study of grain-filling in liquid cultured detached spikes. *Planta* 159, 60-65.

- Gifford, R.M., Bremner, P.M. & Jones, D.B. (1973): Assessing photosynthetic limitations to grain yield in a field crop. *Austr. J. Agric. Res.* 24, 297-307.
- Gifford, R.M. (1977): Growth pattern, carbon dioxide exchange and dry weight distribution in wheat growing under different photosynthetic environments. *Austr. J. Plant Physiol.* 4, 99-110.
- Gifford, R.M. (1979): Growth and yield of CO₂ enriched wheat under water limited conditions. *Austr. J. Plant Physiol.* 6, 367-368.
- Gifford, R.M. & Morison, J.I.L. (1993): Crop response to the global increase in atmospheric CO₂ concentration. *Int. Crop Sci.* 1, 325-331.
- Gouderiaan, J. & De Ruiter, H.E. (1983): Plant growth in response to CO₂ enrichment, at two levels of nitrogen and phosphorus supply. I. Dry matter, leaf area and development. *Neth. J. Agric. Sci.* 31, 157-169.
- Graedel, T.E. & Grutzen, P.J. (1994): *Chemie der Atmosphäre – Bedeutung für Klima und Umwelt.* Heidelberg, Berlin, Spektrum Akademischer Verlag.
- Grant, R.F., Garcia, L.R., Pinter, P.J., Hunsaker, D., Wall, G.W., Kimball, B.A. & Lamorte, R.L. (1995): Interaction between atmospheric CO₂ concentration and water deficit on gas exchange and crop growth: testing of ecosys with data from the Free Air CO₂ Enrichment (FACE) experiment. *Glob. Change Biol.* 1, 443-454.
- Grantz, D.A. & Farrar, J.F. (1999): Acute exposure to ozone inhibits rapid carbon translocation from source leaves of Pima cotton. *J. Exp. Bot.* 50, 1253-1262.
- Grünhage, L., Herm, K., Hanewald, K. & Jäger, H.-J. (1992): Auswirkungen von Ozon auf Pflanzen – Bewertung hessischer Ozonprofile. *Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz (Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt)* 143, 1-74.
- Grünhage, L. & Jäger, H.-J. (1994): Influence of the atmospheric conductivity on the ozone exposure of plants under ambient conditions: considerations for establishing ozone standards to protect vegetation. *Environ. Pollut.* 97, 125-129.
- Grünhage, L., Hanewald, K., Jäger, H.-J. & Ott, W. (1996): Auswirkungen dynamischer Veränderungen der Luftzusammensetzung und des Klimas auf terrestrische Ökosysteme in Hessen. *Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden, Jahresbericht 1995. Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt* 220, 1-191.

- Grünhage, L., Jäger, H.-J., Haenel, H.-D., Löpmeier, F.-J. & Hanewald, K. (1999): The european critical levels for ozone: improving their usage. *Environ. Pollut.* 105, 163-173.
- Grünhage, L., Jäger, H.-J., Köllner, B. & Krause, G. (2000): Richt- und Grenzwerte für Ozon zum Schutz der Vegetation. In: KRdL im VDI und DIN (Hrsg.): Troposphärisches Ozon. Eine kritische Bestandsaufnahme über Ursache, Wirkung und Abhilfemaßnahmen. Düsseldorf: Schriftenreihe der KRdL, Band 32.
- Grünhage, L. & Jäger, H.-J. (2001): Austausch von Stoffen zwischen Atmosphäre und Biosphäre. In: Guderian, R. (Hrsg.): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie, Band 2a: Terrestrische Ökosysteme. Berlin, Heidelberg, New York. Springer.
- Gupta, R.B., Batey, I.L. & MacRitchie, F. (1992): Relationship between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chem.* 69, 125.
- Guri, A. (1983): Variation in glutathione and ascorbic acid content among selected cultivars of *Phaseolus vulgaris* prior to and after exposure to ozone. *Can. J. Plant Sci.* 63, 733-737.
- Hack, H., Gall, H., Klemke, T., Klose, R., Meier, U., Strauß, R. & Witzemberger, A. (1993): Phänologische Entwicklungsstadien der Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.). *Deutscher Pflanzenschutzdienst* 45, 11-19.
- Hacour, A., Ojanperä, K., Pleijel, H., Danielsson, H., Högy, P., Finnan, J., Bindi, M. & Craigon, J. (im Druck): Phenological development, tuber initiation and leaf development in potato across Europe in response to CO₂ and ozone. *Eur. J. Agron* 12.
- Hakala, K. (1998): Growth and yield potential of spring wheat in a simulated changed climate with increased CO₂ and higher temperature. *Europ. J. Agron.* 9, 41-52.
- Hare, J.D. & Moore, R.E.B. (1988): Impact and management of late-season population of the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) on potato in Connecticut. *J. Econ. Entomol.* 81, 914-921.
- Havelka, U.D., Wittenbach, V.A. & Boyle, M.G. (1984): CO₂-enrichment effects on wheat yield and physiology. *Crop Sci.* 24, 1163-1168.
- Hay, R.K.M. & Walker, A.J. (1989): An introduction to the physiology of crop yield. Longman Scientific & Technical, New York.
- Haynes, K.G., Haynes, F.L. & Swallow, W.H. (1988): Temperature and photoperiod effects on tuber production and specific gravity in diploid potatoes. *Hort. Science* 23, 562-565.

- Heagle, A.S., Body, D.E. & Heck, W.W. (1973): An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants. *J. Environ. Qual.* 2, 365-368.
- Heagle, A.S., Miller, J.E., Sherrill, D.E. & Rawlings, J.O. (1993): Effects of ozone and carbon dioxide mixtures on two clones of white clover. *New Phytol.* 123, 751-762.
- Heath, R.L. (1980): Initial events in injury to plants by air pollutants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31, 395-431.
- Heck, W.W., Taylor, O.C., Adams, R., Bingham, G., Miller, J., Preston, E. & Weinstein, L. (1982): Assessment of crop loss from ozone. *J. Air Pollut. Ass.* 32, 353-361.
- Heftman, E. (1983): *Chromatography – fundamentals and applications of chromatographic and electrophoretic methods, Part B.* (Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing).
- Hendrey, G.R. & Kimball, B.A. (1994): The FACE program. *Agricultural and Forest Meteorology* 70, 3-11.
- Hertstein, U., Fangmeier, A. & Jäger, H.-J. (1996): ESPACE-wheat (European Stress Physiology and Climate Experiment – Project 1: wheat): Objectives, general approach and first results. *J. Appl. Bot.* 70, 172-180.
- Hocking, P.J. & Meyer, C.P. (1991 a): Effects of CO₂ enrichment and nitrogen stress on growth and partitioning of dry matter and nitrogen in wheat and maize. *Aust. J. Plant Physiol.* 18, 339-356.
- Hocking, P.J. & Meyer, C.P. (1991 b): Carbon dioxide enrichment decreases critical nitrate and nitrogen concentrations in wheat. *J. Plant Nutr.* 14, 571-584.
- Hodge, J.E. (1953): Dehydrated food, chemistry of browning reactions in model systems. *J. Agric. Food Chem.* 1, 928-943.
- Hofstaetter, B., Grüters, U., Fangmeier, A. & Jäger, H.-J. (1996): Der Halm als Kohlenstoffsенke prägt die Reaktion von Weizen auf erhöhte CO₂-Konzentration. *Verh. Ges. Ökologie* 26, 613-617.
- Hollo, J. (1992): Stickstoffdüngung und Eiweißgehalt von Braugerste. *Monatsschrift f. Brauerei*, 340.
- Hooker, W.J., Yang, T.C. & Potter, H.S. (1973): Air pollution injury of potato in Michigan. *Am. Potato J.* 50, 151-161.
- Hough, A.M. & Derwent, R.G. (1990): Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities. *Nature* 344, 645-648.

- Houghton, J.J., Meiro Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. & Maskell, K. (1996): Contribution of working group I on the second assessment report of intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 525 S.
- Hudak, C., Bender, J., Weigel, H.J. & Miller, J.E. (1999): Interactive effects of elevated CO₂, O₃, and soil water deficit on spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Nandu). *Agronomie* 19, 677-687.
- Internationale Vereinigung für Saatgutprüfung (1985). *Seed Sci. & Technol.* 13, Supplement 1, 3-241.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. In: Houghton, J.T. et al. (eds.): Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York.
- Jackson, S.D. (1999): Multiple signalling pathway control tuber induction in potato. *Plant Physiol.* 119, 1-8.
- Jadhav, S.J. & Salunke, D.K. (1975): Formation and control of chlorophyll and glycoalcaloids in tubers of *Solanum tuberosum* L. and evaluation of glycoalcaloid toxicity. *Adv. Food Res.* 21, 307-354.
- Jadhav, S.J. & Andrew, W.T. (1977): Effects of cultivars and fertilizers on non-volatile organic acids in potato tubers. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 10, 13-18.
- Jahn-Deesbach, W. & Weipert, D. (1965): Untersuchungen über den Einfluß des Stickstoffdüngung auf Ertrag und bäckereitechnologische Qualitätseigenschaften des Weizens. *Landw. Forsch.* 18, 132-145.
- Johnson, E.L. & Stevenson, R. (1978): *Basic liquid chromatography*. Varian Associates. Hansen Way, Palo Alto, California, 354 S.
- Johnson, H.B., Polley, H.W. & Mayeux, H.S. (1993): Increasing CO₂ and plant-plant interactions: effects on natural vegetation. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): *CO₂ and biosphere*. Kluwer Academic, Dordrecht, 157-170.
- Jones, P., Allen, L.H., Jones, J.W., Boote, K.J. & Campbell, W.J. (1984): Soybean canopy growth, photosynthesis, and transpiration responses to whole season carbon dioxide enrichment. *Agron. J.* 76, 633-637.

- Kadam, S.S., Wankier, B.N. & Adsule, R.N. (1991): Processing. In: Salunkhe, D.K., Kadam, S.S. & Jadhav, S.J. (eds.): Potato: production, processing, and products. CRS Press, Inc., Boca Raton, Florida, 111-154.
- Karl, T.R., Nicholls, N. & Gregory, J. (1998): Das Klima der Zukunft. Spektrum der Wissenschaft November 1998, 80-88.
- Keeling, C.D. & Whorf, T.P. (2001): Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Kerstiens, G. & Lenzian, K.J. (1989): Interactions between ozone and plant cuticles. I. Ozone deposition and permeability. *New Phytol.* 112, 13-19.
- Killermann, B., Brönneke, V. & Zimmermann, G. (1999): Einfluss hochmolekularer Glutenin-Untereinheiten und D-Zonen Gliadine auf die Backqualität deutscher Weizensorten. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (EBP) Freising-München, 51-66.
- Kimball, B.A. (1983): Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agron. J.* 75, 779-788.
- Kimball, B.A. & Idso, S.B. (1983): Increasing atmospheric CO₂: Effects on crop yield, water use and climate. *Agric. Water Man.* 7, 55-72.
- Kimball, B.A., Mauney, J.R., Nakayama, F.S. & Idso, S.B. (1993): Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): CO₂ and biosphere. Kluwer Academic, Dordrecht, 65-75.
- Kimball, B.A., Morris, C.F., Pinter, P.J., Wall, G.W., Hunsaker, D.J., Adamsen, F.J., LaMorte, R.L., Leavith, S.W., Thompson, T.L., Mathias, A.D. & Brooks, T.J. (2001): Elevated CO₂, drought and soil nitrogen effects of wheat grain quality. *New Phytol.* 150 (2), 295-303.
- Kirkman, M.A., Shewry, P.R. & Mifflin, B.J. (1982): The effect of nitrogen nutrition on the lysine content and protein composition of barley seeds. *J. Sci. Food Agric.* 33, 115-127.
- Köllner, B., Lamprecht, S. & Krause, G. (2000): Direkte und indirekte Wirkungen von Ozon auf den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen. In: KRdL im VDI und DIN (Hrsg.). Troposphärisches Ozon. Eine kritische Bestandsaufnahme über Ursache, Wirkung und Abhilfemaßnahmen. Düsseldorf: Schriftenreihe der KRdL, Band 32.

- Körner, C. & Arnone, J.A.I (1992): Responses in elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. *Science* 257, 1672-1675.
- Körner, C., Pelaez-Riedl, S. & Vanbel, A.J.E. (1995): CO₂ responsiveness of plants. A possible link to phloem loading. *Plant Cell Environ.* 18, 595-600.
- Køie, B. & Doll, H. (1979): Protein and carbohydrate components in the Risø high-lysine barley mutants. In: *Seed Protein Improvement in Cereals and Grain Legumes*, Vol. 1. International Agency for Atomic Energy (Food and Agriculture Organization), Vienna, 205-215.
- Krijthe, N. (1955): Observations on the formation and growth of tubers on the potato plant. *Neth. J. Agric. Sci.* 3, 291-304.
- Krupa, S.V. & Manning, W.J. (1988): Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation. *Environ. Pollut.* 50, 101-137.
- Krupa, S.V. & Kickert, R.N. (1989): The greenhouse effect: Impacts of ultraviolet-B (UV-B) radiation, carbon dioxide (CO₂), and ozone (O₃) on vegetation. *Environ. Pollut.* 61, 263-393.
- Krupa, S.V. & Kickert, R.N. (1993): The greenhouse effect: the impacts of carbon dioxide (CO₂), ultraviolet-B (UV-B) radiation and ozone (O₃) on vegetation (crops). In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): *CO₂ and biosphere*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 223-238.
- Krupa, S.V., Grünhage, L., Jäger, H.-J., Nosal, M., Manning, W.J., Legge, A.H. & Hanewald, K. (1995): Ambient ozone (O₃) and adverse crop response: A unified view of cause and effect. *Environ. Pollut.* 87, 119-126.
- Kunze, W. (1984): *Technologie der Brauer und Mälzer*. Verlag der VLB Berlin.
- Kurtzman, R.H., Jr., Jones, F.T. & Bailey, G.F. (1973): Dissolution of starches in dimethylsulfoxide and variations in starches of several species, varieties, and maturities. *Cereal Chem.*, 50, 312-322.
- Larcher, W. (2001): *Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt*. 6. Auflage, Ulmer, Stuttgart.
- Lawlor, D.W. & Mitchell, A.C. (1991): The effects of increasing CO₂ on crop photosynthesis and productivity: a review of field studies. *Plant Cell Environ.* 14, 807-818.
- Lawson, T., Craigon, J., Black, C.R., Colls, J.J., Tulloch, A.-M. & Landon, G. (2001): Effect of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and yield of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) grown in open-top chambers. *Environ. Pollut.* 111, 479-491.

- Leach, H.W. & Schoch, T.J. (1962): Structure of starch granule. 3. Solubilities of granular starches in dimethyl sulfoxide. *Cereal Chem.* 39, 534-544.
- Leone, I.A. & Green, D. (1974): A field evaluation of air pollution effects on petunia and potato cultivars in New Jersey. *Plant Dis. Rep.* 58, 683-687.
- Leszkowiat, M.R., Barichello, V., Yada, R.Y. & Coffin, R.H. (1990): Contribution of sucrose to non-enzymatic browning in potato chips. *J. Food Sci.* 55, 281-282.
- Lever, M. (1977): Carbohydrate determination with 4-hydroxybenzoic acid hydrazide (PAHBAH): Effects of bismuth on the reaction. *Anal. Biochem.* 81, 21-27.
- Lichtenthaler, H.K. (1987): Chlorophylls and carotenoids - pigments of photosynthetic membranes. *Methods Enzymol.* 148, 350-382.
- Lichtenthaler, H.K. & Wellburn, A.R. (1983): Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b in leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 11 (603), 591-592.
- Lichtenthaler, H.K. (1996): Vegetation stress: an introduction to stress concept in plants. *J. Plant Physiol.* 148, 4-14.
- Loewus, A. (1952): Improvement in anthrone method for determination of carbohydrates, including ketosamines. *Anal. Biochem.* 139, 205-211.
- Long, S.P., Baker, N.R. & Raines, C.A. (1993): Analysing the responses of photosynthetic CO₂ assimilation to long-term elevation of atmospheric CO₂ concentration. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): CO₂ and biosphere. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 17-32.
- Ludewig, F., Sonnewald, U., Kauder, F., Heineke, D., Geiger, M., Stitt, M., Müller-Rober, B.T., Gillissen, B., Kuhn, C. & Frommer, W.B. (1998): The role of transient starch in acclimation to elevated atmospheric CO₂. *FEBS Letters* 429, 147-151.
- Lüers, H. (1950): Die wissenschaftlichen Grundlagen von Mälzerei und Brauerei. Carl, Nürnberg, 260 S.
- Luwe, M.W.F., Takahama, U. & Heber, U. (1993): Role of ascorbate in detoxifying ozone in the apoplast of spinach (*Spinacea oleracea* L.). *Plant Physiol.* 101, 969-976.
- Mackowiak, C.L. & Wheeler, R.M. (1996): Growth and stomatal behaviour of hydroponically cultured potato (*Solanum tuberosum* L.) at elevated and super-elevated CO₂. *Plant Physiol.* 149, 205-210.

- MacRitchie, F., Du Cros, D.L. & Wrigley, C.W. (1990): Flour polypeptides related to wheat quality. In: Pomeranz, Y. (ed.): *Advances in Cereal science and technology*, Vol. 10. AACC, St. Paul, MN, 79-145.
- Madamanchi, N.R., Anderson, J.V., Alschér, R.G., Cramer, C.L. & Hess, J.L. (1992): Purification of multiple forms of glutathione reductase from pea (*Pisum sativum* L.) seedlings and enzyme levels in ozone-fumigated pea leaves. *Plant Physiol.* 100, 138-145.
- Maga, J.A. (1981): Total and individual glycoalkaloid composition of stored potato slices. *J. Food Processing Preserv.* 5, 23-29.
- Maierhofer, E. (1958): Die "Knollenbildungsperiode" in der Beurteilung von Sämlingen und Kultursorten der Kartoffel (Vorl. Mitt.). *Z. Pflanzenzüchtung* 40, 59-66.
- Manderscheid, R., Bender, J., Jäger, H.-J. & Weigel, H.J. (1995): Effects of season long CO₂ enrichment on cereals. II. Nutrient concentrations and grain quality. *Agric. Ecosys. Environ.* 54, 175-185.
- Manderscheid, R. & Weigel, H.J. (1997): Photosynthetic and growth responses of old and modern spring wheat cultivars to atmospheric CO₂ enrichment. *Agr. Ecosys. Environ.* 64, 65-73.
- Manning, W.J. & Tiedemann, A. (1995): Climate Change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environ. Pollut.* 88, 219-245.
- Marenco, A., Gourget, H., Nedelec, P., Pages, J.P. & Karcher, F. (1994): Evidence of a long-term increase in tropospheric ozone from Pic du Midi data series: positive radiative forcing. *J. Geophys. Res.* 99 D (8), 16.617-16.632.
- Marquez, G. & Añón, M.C. (1986): Influence of reducing sugars and amino acids in the color development of fried potatoes. *J. Food Sci.* 51, 157-160.
- Mauney, J.R., Kimball, B.A., Pinter, P.J. Jr., Lamorte, R.L., Lewin, K.F., Nagy, J. & Hendrey, G.R. (1994): Growth and yield of cotton in response to free-air carbon dioxide enrichment (FACE) environment. *Agric. For. Meteorol.* 70, 49-68.
- McConnaughay, K.D.M., Berntson, G.M. & Bazzaz, F.A. (1993): Limitations to CO₂-induced growth enhancement in pot studies. *Oecologia* 94, 550-557.
- McKee, I.F. & Woodward, F.I. (1994): CO₂ enrichment responses of wheat: interactions with temperature, nitrate and phosphate. *New Phytol.* 127, 447-453.

- McKee, I.F., Bullimore, J.F. & Long, S.P. (1997): Will elevated CO₂ concentrations protect the yield of wheat from O₃ damage? *Plant Cell Environ.* 20, 77-84.
- McKee, I.F., Farage, P.K. & Long, S.P. (1999): The interactive effects of elevated CO₂ and O₃ concentrations on photosynthesis in spring wheat. *Photosynth. Res.* 45, 111-119.
- McMillan, M. & Thompson, J.C. (1979): An outbreak of suspected solanine poisoning in schoolboys: examination of criteria of solanine poisoning. *Quart. J. Med.* 190, 227-231.
- Mehlhorn, H. (1990): Ethylene-promoted ascorbate peroxidase activity protects plants against hydrogen peroxide, ozone and paraquat. *Plant Cell Environ.* 13, 971-976.
- Metrohm Application Bulletin Nr. 170d: Bestimmung organischer Carbonsäuren. In: Metrohm 690 Ionenchromatograph: Theorie und Applikation. IC Applikationsordner 8.690.2011, Herisau, Schweiz.
- Metrohm Application Bulletin Nr. 189/1d: Ionenchromatographische Bestimmung von Chlorid, Nitrit, Nitrat und Sulfat in Spinat. In: Metrohm 690 Ionenchromatograph: Theorie und Applikation. IC Applikationsordner 8.690.2011, Herisau, Schweiz.
- Michael, G. & Blume, B. (1960): Über den Einfluß der Stickstoffdüngung auf die Eiweißzusammensetzung des Gerstenkornes. *Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenk.* 88, 237-250.
- Miflin, B.J. & Shewry, P.R. (1979): The biology and biochemistry of cereal seed prolamins. In: IAEA staff (ed.). *Seed protein improvement in cereals and grain legumes*, Vol. 1. Vienna, IAEA, 137-158.
- Miglietta, F., Giuntoli, A. & Bindi, M. (1996): The effect of free air carbon dioxide enrichment (FACE) and soil nitrogen availability on the photosynthesis capacity of wheat. *Photosynth. Res.* 47, 281-290.
- Miglietta, F., Lanini, M., Bindi, M. & Magliulo, V. (1997): Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): design and performance of the CO₂-fumigation system. *Glob. Change Biol.* 3, 417-427.
- Miglietta, F., Magliulo, V., Bindi, M., Cerio, L., Vaccari, F.P., Loduca, V. & Peressotti, A. (1998): Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): development, growth and yield. *Glob. Change Biol.* 4, 163-172.

- Mitchell, R.A.C., Mitchell, V.J., Driscoll, S.P., Franklin, J. & Lawlor, D.W. (1993): Effects of increased CO₂ concentration and temperature on growth and yield in winter wheat at two levels of nitrogen application. *Plant Cell Environ.* 16, 521-529.
- Mitchell, R.A.C., Gibbard, C.L., Mitchell, V.J. & Lawlor, D.W. (1996): Effects of shading in different developmental phases on biomass and grain yield of winter wheat at ambient and elevated CO₂. *Plant Cell Environ.* 19, 615-621.
- Mondy, N.I. & Munshi, C.B. (1990): Effect of selenium fertilization on the glycoalkaloid and nitrate-nitrogen content of potatoes. *J. Food Qual.* 13, 343-350.
- Moore, B.D., Cheng-S.-H., Sims, D. & Seeman, J.R. (1999): The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO₂. *Plant Cell Environ.* 22, 567-582.
- Morin, F., Andre, M. & Betsche, T. (1992): Growth kinetics, carbohydrate, and leaf phosphate content of clover (*Trifolium subterraneum* L.) after transfer to a high CO₂ atmosphere or to high light and ambient air. *Plant Physiol.* 99, 89-95.
- Morison, J.I.L. (1987): Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂. In: Zeiger, E., Farquhar, G.D. & Cowan, I.R. (eds.): *Stomatal function*. Stanford University Press, Stanford, California, 229-253.
- Mosley, A.R., Rowe, R.C. & Weidensaul, T.S. (1978): Relationship of foliar ozone injury to maturity classification and yield of potato. *Am. Potato J.* 55, 147-153.
- Mosse, J., Huet, J.C. & Baudet, J. (1985): The amino acid composition of wheat grain as a function of nitrogen content. *J. Cereal. Sci.* 3, 115-130.
- Müller, J. (1993): Stoffbildung, CO₂-Gaswechsel, Kohlenhydrat- und Stickstoffgehalt von Winterweizen bei erhöhter CO₂-Konzentration und Trockenstress. *J. Agron. Crop Sci.* 171, 217-235.
- Mulchi, C.L., Slaughter, L., Saleem, M., Lee, E.H., Pausch, R., & Rowland, R. (1992): Growth and physiological characteristics of soybean in open-top chambers in response to ozone and increased atmospheric carbon dioxide. *Agric. Ecosyst. Environ.* 38, 107-118.
- Mulholland, B.J., Craigon, J., Black, C.J., Colls, J.J., Atherton, J.G. & Landon, G. (1997): Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Exp. Bot.* 48, 113-122.

- Mulholland, B.J., Craigon, J., Black, C.R., Colls, J.J., Atherton, J.G. & Landon, G. (1998): Growth, light interception and yield response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to elevated CO₂ and ozone in open-top chambers. *Global Change Biol.* 4, 121-130.
- Musselmann, R.C. & Massmann, W.J. (1999): Ozone flux to vegetation and its relationship to plant response and ambient air quality standards. *Atm. Environ.* 33, 65-73.
- Natr, L. (1992): Mineral nutrients – a ubiquitous stress factor for photosynthesis. *Photosynthetica* 27, 271-294.
- Nie, G.Y., Long, S.P., Garcia, R.L., Kimball, B.A., Lamorte, R.L., Pinter, P.J., Wall, G.W. & Webber, A.N. (1995): Effects of free-air CO₂ enrichment on the development of the photosynthetic apparatus in wheat, as indicated by changes in leaf proteins. *Plant Cell Environ.* 18, 855-864.
- Nitithamyong, A., Vonelbe, J.H., Wheeler, R.M. & Tibbitts, T.W. (1999): Glycoalkaloids in potato tubers grown under controlled environments. *Am. J. Potato Res.* 76, 337-343.
- Oechel, W.C., Riechers, G., Lawrence, W.T., Prudhome, T.T., Grulke, N. & Hastings, S.J. (1991): Long-term in situ manipulation and measurement of CO₂ and temperature. *Funct. Ecol.* 6, 86-100.
- Oechel, W.C., Vourlitis, G.L., Hastings, S.J., Zulueta, R.C., Hinzman, L. & Krane, D. (2000): Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature* 406, 978-981.
- Ojanperä, K., Pätsikka, E. & Ylärinta, T. (1998): Effects of low ozone of spring wheat on net CO₂ uptake, Rubisco, leaf senescence and grain filling. *New Phytol.* 138, 451-460.
- Okamura, M. (1980): An improved method for determination of L-ascorbic acid and L-dehydroascorbic acid in blood plasma. *Clin. Chim. Acta* 103, 259-268.
- Oparka, K.J., Viola, R., Wright, R. & Prior, D.A.M. (1992): sugar transport in the tuber. In: Farrar, J.F., Gordon, A.J. & Pollock, G.J. (eds.): Carbon partitioning within and between organisms. Bios Scientific Publishers, Oxford, 91-114.
- Osborne, T.B. (1907): *The Proteins of the Wheat Kernel*, Publ. No. 84, Carnegie Institute, Washington, DC.
- Osborne, T.B. (1924): *The Vegetable Proteins*. Longmans, Green and Co, London.

- Overdieck, D. (1993): Elevated CO₂ and the mineral content on herbaceous and woody plants. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): CO₂ and biosphere. Dordrecht: Kluwer Academic, 403-411.
- Palta, J.A. & Fillery, I.R.P. (1995): N application enhances remobilisation and reduces losses of pre-anthesis N in wheat grown on a duplex soil. *Aust. J. Agric. Res.* 46, 519-531.
- Papathanasiou, F., Mitchell, S.H. & Harvey, B.M.R. (1999): Variation in glycoalkaloid concentration of potato tubers harvested from mature plants. *J. Sci. Food Agric.* 79, 32-36.
- Pearcy, R.W. & Björkman, O. (1983): Physiological effects. In: Lemon, E.R. (ed.): CO₂ and plants – The response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide. Westview Press, Boulder, Colorado, 65-106.
- Peeters, K.M.U. & Van Laere, A.J. (1994): Amino acid metabolism associated with N-mobilization from the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.) during grain development. *Plant Cell Environ.* 17, 131-141.
- Pell, E.J., Weisberger, W.C. & Speroi, J.J. (1980): Impact of ozone on quality and quantity of greenhouse grown potatoes. *Environ. Sci. Technol.* 14, 568-571.
- Pell, E.J. & Pearson, N.S. (1984): Ozone-induced reduction in quantity and quality of two potato cultivars. *Environ. Pollut.* 35, 345-352.
- Pell, E.J., Pearson, N.S. & Vinten-Johansen, C. (1988): Qualitative and quantitative effects of ozone and/or sulfur dioxide on field grown potato plants. *Environ. Pollut.* 53, 171-186.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davies, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. & Stievenard, M. (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.
- Pinter, P.J., Kimball, B.A., Wall, G.W., LaMorte, R.L., Hunsaker, D.J., Adamsen, F.J., Frumau, K.F.A., Vugts, H.F., Hendrey, G.R., Lewin, K.F., Nagy, J., Johnson, H.B., Wechsunge, F., Leavitt, S.W., Thompson, T.L., Matthias, A.D. & Brooks, T.J. (2000): Free-air CO₂ enrichment (FACE): blower effect on wheat canopy microclimate and plant development: *Agricultural and Forest Meteorology* 103, 319-333.

- Pitcher, L.H. & Zilinskas, B.A. (1996): Overexpression of copper/zinc superoxidase dismutase in the cytosol of transgenic tobacco confers partial resistance to ozone-induced foliar necrosis. *Plant Physiol.* 110, 583-588.
- Pleijel, H., Skärby, L., Wallin, G. & Selldén, G. (1991): Yield and grain quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Drabant) exposed to different concentrations of ozone in open-top field chambers. *Environ. Pollut.* 69, 151-168.
- Pleijel, H., Danielsson, H., Gelang, J., Sild, E. & Selldén, G. (1998): Growth stage dependence of the grain yield response to ozone in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agric. Ecosyst. Environ.* 70, 61-68.
- Polle, A. & Pell, E.J. (1999): Role of carbon dioxide in modifying plant responses to ozone. In: Luo, Y. & Mooney, H.A. (eds.): *Carbon dioxide and environmental stress*. New York, USA, Academic Press, 193-213.
- Pollock, C.J. & Chatterton, N.J. (1988): Fructans. In: Stumpf, P.K., Conn, E.E. & Preiss, J. (eds.): *The biochemistry of plants, Vol. 14 Carbohydrates*. San Diego, London: Academic Press, 109-140.
- Pollock, C.J., Cairns, A.J., Sims, I.M. & Housley, T.L. (1996): Fructans as reserve carbohydrates in crop plants. In: Zamski, E. & Schaffer, A. (eds.): *Photoassimilate Distribution in Plants and Crops*. Marcel Dekker, New York, 97-113.
- Pommeranz, Y. (1988): Composition and functionality of wheat flour components. In: Pommeranz, Y. (ed.): *Wheat: Chemistry and technology (Vol. II)*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, USA, 219-370.
- Pontis, H.G. (1990): Fructans. In: Dey, P.M. (ed.): *Methods in Biochemistry Volume 2, Carbohydrates*. Academic Press, London, San Diego, New York, 353-371.
- Poorter, H. (1993): Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): *CO₂ and biosphere*. Cambridge. Kluwer Academic, Dordrecht, 77-97.
- Poorter, H., Van Berkel, Y., Baxter, R., Den Hertog, J., Dijkstra, P., Gifford, R.U., Griffin, K.L., Roumet, C., Roy, J. & Wong, S.C. (1997): The effect of elevated CO₂ on the chemical composition and construction costs of leaves of 27 C₃ species. *Plant Cell Environ.* 20, 472-482.

- Prentice, I.C., Farquhar, G.D., Fasham, M.J.R., Goulden, M.L., Heimann, M., Jaramillo, V.J., Khashgi, H.S., Le Quéré, C., Scholes, R.J. & Wallace, D.W.R. (2001): The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C.A.: *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 183-237.
- Putz, B. (1989): *Kartoffeln: Züchtung – Anbau – Verwertung*. Behr's Verlag, Hamburg.
- Rao, M.V., Hale, B.V. & Ormrod, D.P. (1995): Amelioration of ozone-induced oxidative damage in wheat plants grown under high carbon dioxide. Role of antioxidant enzymes. *Plant Physiol.* 109, 421-432.
- Rastetter, E.B. & Shaver, G.R. (1992): A model of multiple-element limitation for acclimating vegetation. *Ecology* 73, 1157-1174.
- Rauen, H.M. (1964): *Biochemisches Tagebuch, Band II*. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, New York, 92-104.
- Reiner, L. & Dörre, R. (1985): *Sommergerste aktuell*. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 224 S.
- Reiner, L., Buhlmann, V., Graser, S., Heißenhuber, A., Klasen, M., Pfefferkorn, V., Spanakakis, A. & Straß, F. (1992): *Weizen aktuell*. Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V. (Hrsg.). DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 269 S.
- Reuveni, J. & Bugbee, B. (1997): Very high CO₂ reduces photosynthesis, dark respiration and yield in wheat. *Ann. Bot.* 80, 539-546.
- Riesmeier, J.W., Willmitzer, L. & Frommer, W.B. (1994): Evidence for an essential role of the sucrose transporter in phloem loading and assimilate partitioning. *EMBO. J.* 13, 1-7.
- Rodriguez-Saona, L.E. & Wrolstad, R.E. (1997): Influence of potato composition on color quality. *Am. Potato J.* 74, 87-106.
- Roe, M.A., Faulks, R.M. & Belsten, J.L. (1990): Role of reducing sugars and amino acids in fry colour of chips from potatoes grown under different nitrogen regimes. *J. Sci. Food Agric.* 52, 207-214.
- Roe, M.A. & Faulks, R.M. (1991): Color development in a model system during frying: role of individual amino acids and sugars. *J. Food Sci.* 56, 1711-1713.
- Rogers, G.S., Payne, L., Milham, P. & Conroy, J. (1993): Nitrogen and phosphorus requirement of cotton and wheat under changing atmospheric CO₂ concentrations. *Plant Soil* 155/156, 231-234.

- Rogers, H.H. & Dahlman, R.C. (1993): Crop responses to CO₂ enrichment. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): CO₂ and biosphere. Kluwer Academic, Dordrecht, 117-131.
- Rogers, G.S., Milham, P.J., Gillings, M. & Conroy, J.P. (1996): Sink strength may be the key to growth and nitrogen responses in N-deficient wheat at elevated CO₂. *Aust. J. Plant Physiol.* 23, 253-264.
- Rogers, G.S., Gras, P.W., Batey, I.L., Milham, P.J., Payne, I. & Conroy, J.P. (1998): The influence of atmospheric CO₂ concentration on the protein, starch, and mixing properties of wheat flour. *Aust. J. Plant Physiol.* 25, 387-393.
- Rosenzweig, C. & Parry, M.L. (1994): Potential impact of climate change on world food supply. *Nature* 367, 133-138.
- Rozema, J. (1993): Plant responses to atmospheric carbon dioxide enrichment: Interactions with some soil and atmospheric conditions. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): CO₂ and biosphere. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 173-193.
- Roy, J. & Garnier, E. (1994): A whole perspective on carbon-nitrogen interactions. The Hague : SPB Academic Publishing.
- Rudorff, B.F.T., Mulchi, C.L., Lee, E.H. & Rowland, R. (1996): Effects of enhanced O₃ and CO₂ enrichment on plant characteristics in wheat and corn. *Environ. Pollut.* 94, 53-60.
- Runeckles, V.C. & Chevone, B.I. (1992): Crop responses to ozone. In: Lefohn, A.S. (ed.): Surface-level ozone exposures and their effects on vegetation. Lewis Publishers, Chelsea, 180-270.
- Russell, G. (1986): Fertilisers and quality of Wheat and Barley. *Proc.* 253. Fertiliser Society, Greenhill House, London.
- Sage, R.F., Sharkey, T.D. & Seemann, J.R. (1989): Acclimation of photosynthesis to elevated CO₂ in five C₃ species. *Plant Physiol.* 89, 590-596.
- Sage, R.F. (1994): Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO₂: the gas exchange perspective. *Photosynth. Res.* 39, 351-368.
- Saito, K., Horie, M., Hoshino, Y. & Nose, N. (1990): High-performance liquid chromatographic determination of glycoalkaloids in potato tubers. *J. Chrom.* 508, 141-147.

- Salunkhe, D.K. & Kadam, S.S. (1991): Introduction. In: Salunkhe, D.K., Kadam, S.S. & Jadhav, S.J. (eds.): Potato: production, processing, and products. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1-8.
- Sanhewe, A.J., Ellis, R.H., Hong, T.D., Wheeler, T.R., Batts, G.R., Hadley, P. & Morison, J.I.L. (1996): The effect of temperature and CO₂ on seed quality development in wheat (*Triticum aestivum* L.). J. Exp. Bot. 47, 631-637.
- Sapirstein, H.D. & Bushuk, W. (1985): Computer-aided analysis of gliadin electrophoregrams. I. Improvement of precision of relative mobility determination by using a three band standardization. Cereal Chem. 2, 372.
- Savin, R. & Nicolas, M.E. (1996): Effects of short periods of drought and high temperature on grain growth and starch accumulation of two malting barley cultivars. Aust. J. Plant Physiol. 23, 201-210.
- Schapendonk, A.H.C.M., Pot, C.S. & Gouderiaan, J. (1995): Simulated effects of elevated carbon dioxide concentration and temperature on the productivity of potato. In: Haverkort, A.J. & MacKerron, D.K.L. (eds.): Potato Ecology and Modelling of Crops under Conditions Limiting Growth, 101-114.
- Schapendonk, A.H.C.M., Van Oijen, M., Dijkstra, P., Pot, C.S., Jordi, W.J.R.M. & Stoop, G.M. (2000): Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic acclimation and productivity of two potato cultivars grown in open-top chambers. Aust. J. Plant Physiol. 27, 1119-1130.
- Schildbach, R. (1969): Einfluss von Anbauort und Stickstoffdüngung auf die Qualität von Gerste, Weizen und Malz. Monatszeitschr. Brauerei 22, 361-369.
- Schildbach, R. (1977): Versorgung mit modernen Braugerstensorten. Brauwelt, 750-758.
- Schildbach, R., Burbidge, M. & Walsamos, G. (1997): Barley varieties and production in the EBC and some other countries. In: Schildbach, R. & Rath, F. (eds.): Tätigkeitsbericht 1997. Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB), 113-130.
- Schimel, D., Alves, D., Enting, I., Heimann, M., Joos, F., Raynaud, D., Wigley, T., Prather, M., Derwent, R., Erhalt, D., Fraser, P., Sanhueza, E., Zhou, X., Jonas, P., Charlson, R., Rodhe, H., Sadasivan, S., Shine, K.P., Fouquart, Y., Ramaswamy, V., Solomon, S., Srinivasan, J., Albritton, D., Isaksen, I., Lal, M. & Wuebbles, D. (1995): Radiative forcing of climate change. In: Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. &

- Maskell, K. (eds.): Climate Change 1995. The science of climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 65-131.
- Schjoerring, J.K. (1991): Ammonia emissions from the foliage of growing plants. In: Sharkey, T.D., Holland, E.A. & Mooney, H.A. (eds.): Trace Gas Emissions by Plants. San Diego, Academic Press, 267-292.
- Schnyder, H. (1993): The role of carbohydrate storage and redistribution in the source-sink relations of wheat and barley during grain filling – a review. *New Phytol.* 123, 233-245.
- Schuster, C., Stock, H.-G. & Diepenbrock, W. (1998): Beurteilung verschiedener N-Düngungs-Bemessungsverfahren für Braugerste (*Hordeum vulgare* L.) hinsichtlich Ertragsschöpfung und Qualitätssicherung unter Bedingungen des Mitteldeutschen Trockengebiets. *Pflanzenbauwiss.* 3, 115-122.
- Sellden, G. & Pleijel, H. (1993): Influence of atmospheric ozone on agricultural crops. In: International Crop Science, Vol. I. Crop Science Society of America, Madison, WI, 315-319.
- Sharkey, T.D. (1985): Photosynthesis in intact leaves of C₃ plants: physics, physiology and rate limitations. *Bot. Rev.* 51, 590-596.
- Sharma, N., Kaur, N. & Gupta, A.K. (1998): Effects of gibberellic acid and chlorocholine chloride on tuberisation and growth of potato. *J. Sci. Food Agric.* 78, 466-470.
- Sheen, J. (1994): Feedback control of gene expression. *Photosynth. Res.* 39, 427-438.
- Shewry, P.R. & Mifflin, B.J. (1985): Seed storage proteins of economically important cereals. *Adv. Cer. Sci. Techn.*, Vol. 7, 1-83.
- Shewry, P.R., Halford, N.G. & Tatham, A.S. (1989): The high molecular weight subunits of wheat, barley and rye: genetics, molecular biology, chemistry and role in wheat gluten structure and functionality. *Oxford Surveys Plant Mol. Cell Biol.* 6, 163-219.
- Shewry, P.R., Broadhead, J., Harwood, J., Williams, M., Grimwade, B., Freedmore, R., Napier, J., Fido, R., Lawlor, D.W. & Tatum, A.S. (1994): Environmental and developmental regulation of gluten protein synthesis. In: Wheat Kernel Proteins. Molecular and Environment Aspects. Proceeding of Meeting, University of Tuscany, Viterbo, Italy, 273-275.

- Sicher, R.C. (1993): Assimilate partitioning within leaves of small grain cereals. In: Abrol, Y.P., Mohanty, P. & Govindjee, E. (eds.): Photosynthesis: Photoreactions to plant productivity. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 351-360.
- Sicher, R.C. & Bunce, J.A. (1999): Photosynthetic enhancement and conductance to water-vapor of field grown *Solanum tuberosum* (L.) in response to CO₂ enrichment. Photosynth. Res. 62, 155-163.
- Sild, E., Younis, S., Pleijel, H. & Selden, G. (1999): Effect of CO₂ enrichment on non-structural carbohydrates in leaves, stems and ears of spring wheat. Physiol. Plant. 107, 60-67.
- Silva, G.H., Chase, R.W., Hammerschmidt, R. & Cash, J.N. (1991): After cooking darkening of Spartan Pearl potatoes as influenced by location, phenolic acids, and citric acid. J. Agric. Food Chem. 39, 871-873.
- Sinclair, T.R. (1992): Mineral nutrition and plant growth response to climate change. J. Exp. Bot. 43, 1141-1146.
- Sinden, S.L., Goth, R.W. & O'Brian, M.J. (1973): Effect of potato alkaloids on the growth of *Alternaria solani* and their possible role as resistance factors in potatoes. Phytopathol. 63, 303-307.
- Sinden, S.L., Deahl, K.L. & Aulenbach, B.B. (1976): Effects of glycoalkaloids and phenols on potato flavour. J. Food Sci. 41, 520-523.
- Sinden, S.L., Sandford, L.L. & Webb, R.E. (1984): Genetic and environmental control of potato glycoalkaloids. Am. Potato J. 61, 141-156.
- Singh, R. (1993): Photosynthesis characteristics of fruiting structures of cultivated crops. In: Abrol, Y.P., Mohanty, P. & Govindjee, E. (eds.): Photosynthesis: Photoreactions to plant productivity. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 389-418.
- Sionit, N., Hellmers, H. & Strain, B.R. (1980): Growth and yield of wheat under carbon dioxide enrichment and water stress conditions. Crop Science 20, 687-690.
- Sionit, N., Mortensen, D.A., Strain, B.R. & Hellmers, H. (1981): Growth response of wheat to CO₂ enrichment and different levels of mineral nutrition. Agron. J. 73, 1023-1027.
- Smart, D.R., Chatterton, N.J. & Bugbee, B. (1994): The influence of elevated CO₂ on non-structural carbohydrate distribution and fructan accumulation in wheat canopies. Plant Cell Environ. 17, 435-442.

- Smith, D.B. (1991): Barley seed protein and its effects on malting and brewing quality. J. of the Institute of Brewing (Ed. Pierce, J.S. & Brew, F.I.), 60.
- Smith, D.B., Roddick, J.G. & Lones, J.L. (1996): Potato glycoalkaloids: some unanswered questions. Trends Food Sci. Tech. 7, 126-131.
- Sommer, G. (1977): Der Einfluss der Sortierung von Gerste auf die Malz- und Bierqualität. Monatsschr. Brauerei, 272-277.
- Sowers, K.E., Miller, B.C. & Pan, W.L. (1994): Optimizing yield and grain protein in soft white winter wheat with split nitrogen applications. Agron. J. 86, 1020-1025.
- Speroni, J.J., Pell, E.J. & Weisenberger, W.C. (1981): Glycoalkaloid levels in potato tubers and leaves after intermittent plant exposure to ozone. Am. Potato J. 58, 407-414.
- Spiertz, J.H. (1974): Grain growth and distribution of dry matter in wheat plants as influenced by temperature, light energy and ear size. Neth. J. Agric. Sci. 22, 207-220.
- Stitt, M. (1991): Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. Plant Cell Environ. 14, 741-762.
- Stitt, M. & Krapp, A. (1999): The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. Plant Cell Environ. 22, 583-621.
- Stone, P.J. & Savin, R. (1999): Grain quality and its physiological determinants. In: Satorre, E.H. & Slafer, G.A. (eds.): Wheat: ecology and yield determination. New York, USA, Food Products Press, 85-120.
- Storey, R.M.J. & Davies, H.V. (1992): Tuber quality. In: Harris, P. (ed.). The Potato Crop. The Scientific Basis for Improvement. Chapman and Hall, London, 507-570.
- Stoy, V. (1973): Assimilatbildung und -verteilung als Komponenten der Ertragsbildung beim Getreide. Angew. Bot. 47, 17-26.
- Struik, P.C. & Ewing, E.E. (1995): Crop physiology of potato (*Solanum tuberosum*): responses to photoperiod and temperature relevant to crop modelling. In: Haverkort, A.J. & MacKerron, D.K.L. (eds.): Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 19-40.
- Sturgeon, R.J. (1990): Monosaccharides. In: Dey, P.M. & Harborne, J.B. (eds.): Methods in plant biochemistry: Carbohydrates. Academic Press, London, San Diego, New York, 1-38.
- Sugimura, M. & Hirano, K. (1977): A new colorimetric method for determination of serum glucose. Clin. Chim. Act. 75, 387-391.

- Takahashi, T., Tsuchihashi, N. & Nakaseko, K. (1994): Grain filling mechanisms in spring wheat. II. Growth, accumulation and translocation in the daytime and at night during the four grain filling phases. *Jpn. J. Crop Sci.* 63, 75-80.
- Tanaka, K., Suda, Y., Kondo, N. & Sugahara, K. (1985): O₃ tolerance and the ascorbat-dependent H₂O₂ decomposing system in chloroplasts. *Plant Cell Physiol.* 26, 1425-1431.
- Tanaka, K., Saja, H. & Kondo, N. (1988): Immunological properties of spinach glutathione reductase and inductive biosynthesis of the enzyme with ozone. *Plant Cell Physiol.* 29, 637-642.
- Tester, R.F., Morrison, W.R., Ellis, R.H., Piggott, J.R., Batts, G.R., Wheeler, T.R., Morison, J.I.L., Hadley, P. & Leward, D.A. (1995): Effects of elevated growth temperature and carbon dioxide levels on some physiochemical properties of wheat starch. *J. Cer. Sci.* 22, 63-71.
- Thompson, G.B. & Woodward, F.I. (1994): Some influences of CO₂ enrichment, nitrogen nutrition and competition on grain yield and quality in spring wheat and barley. *J. Exp. Bot.* 45, 937-942.
- Thorne, G.N. (1966): Physiological aspects of grain yield in cereals. In: Milthorpe, F.L. & Ivins, J.D. (eds.): *The Growth of Cereals and Grasses*. Butterworth, London, 88-105.
- Tingey, D.T. & Taylor, G.E. (1982): Variations in plant response to ozone: A conceptual model of physiological events. In: Unsworth, M.H. & Ormrod, D.P. (eds.): *Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture*. Butterworth, London, 113-138.
- Tingey, D.T. & Anderson, C.P. (1991): The physiological basis of differential plant sensitivity to changes in atmospheric quality. In: Taylor, G.E. et al. (eds.): *Ecological genetics and air pollution*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 209-235.
- Thompson, G.B. & Woodward, F.I. (1994): Some influences of CO₂ enrichment, nitrogen nutrition and competition on grain yield and quality in spring wheat and barley. *J. Exp. Bot.* 45, 937-942.
- Topp, G.C., Davies, J.L. & Annan, A.P. (1980) : Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Res. Res.* 16, 574-582.
- Tottman, D.R. & Broad, H. (1987): The decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations. *Ann. Appl. Biol.* 110, 441-451.

- Triboi, E., Branlard, G. & Landry, J. (1990): Environmental and husbandary effects of the content and composition of proteins in wheat: cereal quality II. *Aspects Appl. Biol.* 25, 149-158.
- Tyree, M.T. & Alexander, J.D. (1993): Plant water relation and the effect of elevated CO₂: a review and suggestions for future research. In: Rozema, J., Lambers, H., Van de Geijn, S.C. & Cambridge, M.L. (eds.): CO₂ and biosphere. Kluwer Academic, Dordrecht, 47-62.
- Van de Geijn, S.C., Goudriaan, J., Van der Erden, J. & Rozema, J. (1993): Problems and approaches to integrating the concurrent impacts of elevated carbon dioxide. Temperature, ultraviolet-B radiation, and ozone on crop production. In: *International Crop Science, Vol. I.* Crop Science Society of America, Madison, WI, 333-338.
- Van der Eerden, L.J., Tonneijck, A.E.G. & Weijnands, H.M. (1988): Crop loss due to air pollution in the Netherlands. *Environ. Pollut.* 53, 365-376.
- Vandermeiren, K., De Temmerman, L., Staquet, A. & Baeten, H. (1992): Effects of air filtration on spring wheat grown in open-top field chambers at a rural site. II: Effects on mineral partitioning, sulphur and nitrogen metabolism and on grain quality. *Environ. Pollut.* 77, 7-14.
- Vandermeiren, K., Black, C., Lawson, T. & Casanova, A. (im Druck): Photosynthetic and stomatal responses of potatoes grown under elevated CO₂ and/or ozone concentrations – results from the European CHIP-programme. *Eur. J. Agron* 12.
- Van Gelder, W.J.T. (1981): Conversion factor from nitrogen to protein for potato tuber protein. *Potato Res.* 24, 423-425.
- Van Goor, B.J. & Wiersma, D. (1994): Redistribution of potassium, calcium, magnesium, and manganese in the plant. *Physiol. Plant* 31, 163-168.
- Van Kraalingen, D.W.G. (1990): Effects of CO₂ enrichment on nutrient-deficient plants. In: Goudriaan, J., Van Keulen, H. & Van Laar, H.H. (eds.): *The greenhouse effect and primary productivity in European agro-ecosystems.* Wageningen, Pudoc, 42-45.
- Van Schreven, D.A. (1956): On the physiology of tuber formation in potatoes. I. Premature tuber formation. *Plant & Soil* VIII, 49-55.
- Volz, A. & Kley, D. (1988): Evaluation of the Montesouris series of ozone measurements made in the nineteenth century. *Nature* 332, 240-242.

- Vorne, V., Ojanperä, K., De Temmerman, L., Bindi, M., Högy, P., Jones, M.B., Lawson, T. & Persson, K. (im Druck): Effects of elevated carbon dioxide and ozone on potato tuber quality in the European multiple-site experiment "CHIP-project". *Eur. J. Agron* 12.
- Wardlaw, I.F. (1990): The control of carbon partitioning in plants. *New Phytologist* 116, 341-381.
- Wardlaw, I.F. & Moncur, L. (1995): The response of wheat to high temperature following anthesis. I. The rate and duration of kernel filling. *Aust. J. Plant Physiol.* 22, 391-407.
- Webber, A.N., Nie, G.Y. & Long, S.P. (1994): Acclimation of photosynthetic proteins to rising atmospheric CO₂. *Photosynth. Res.* 39, 413-425.
- Weegels, P.L., Hamer, R.J. & Schofield, J.D. (1996): Critical review: functional properties of wheat glutenin. *J. Cereal Sci.* 23, 1-18.
- Weigel, H.-J., Meier, G.-J. & Jäger, H.-J. (1992): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft: Open-top Kammern zur Untersuchung von Langzeitwirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf landwirtschaftliche Pflanzen. *Angew. Bot.* 66, 135-142.
- Weigel, H.J., Manderscheid, R., Jäger, H.-J. & Meier, G.J. (1994): Effects of season-long CO₂ enrichment on cereals. I. Growth performance and yield. *Agr. Ecosyst. Environ.* 48, 231-240.
- Westermann, D.T., Tindall, T.A., James, D.W. & Hurst, R.L. (1994) : Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: yield and specific gravity. *Am. Potato J.* 71, 417-431.
- Wheeler, R.M., Steffen, K.L., Tibbits, T.W. & Palta, J.P. (1986): Utilization of potatoes for life support systems. II. The effects of temperature under 24-h and 12-h photoperiods. *Am. Potato J.* 63, 639-647.
- Wheeler, R.M. & Tibbits, T.W. (1989): Utilization of potatoes for life support systems in space. IV. Effect of CO₂ enrichment. *Am. Potato J.* 66, 25-34.
- Wheeler, R.M., Tibbits, T.W. & Fitzpatrick, A.H. (1991): Carbon dioxide effects on potato growth under different photoperiods and irradiance. *Crop Sci.* 31, 1209-1213.
- Wheeler, R.M., Mackowiak, C.L., Sager, J.C. & Knott, W.M. (1994): Growth of soybean and potato at high CO₂ partial pressures. *Adv. Space Res.* 14, 251-255.
- Wheeler, T.R., Hong, T.D., Ellis, R.H., Batts, G.R., Morison, J.I.L. & Hadley, P. (1996): The duration and rate of grain growth, and harvest index, of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to temperature and CO₂. *J. Exp. Bot.* 47, 623-630.

- Wheeler, R.M. & Tibbitts, T.W. (1997): Influence of changes in daylength and carbon dioxide on the growth of potato. *Ann. Bot.* 79, 529-533.
- Wheeler, G.L., Jones, M.A. & Smirnoff, N. (1998): The biosynthetic pathway of vitamin C in higher plants. *Nature* 393, 365-369.
- Williams, M., Shewry, P.R., Lawlor, D.W. & Harwood, J.L. (1995): The effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide concentrations on the quality of grain lipids in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown at two levels of nitrogen application. *Plant Cell Environ.* 18, 999-1009.
- Wilson, K.B., Carlson, T.N. & Bunce, J.A. (1999): Feedback significantly influences the stimulated effect of CO₂ on seasonal evapotranspiration from two agricultural species. *Glob. Change Biol.* 5, 903-917.
- Winner, W.E. (1994): Mechanistic analysis of plant responses to air pollution. *Ecol. Appl.* 4, 651-661.
- Winzeler, M., Dubois, D. & Nösberger, J. (1990): Absence of fructan degradation during fructan accumulation in wheat stems. *J. Plant Physiol.* 136, 342-329.
- Wolfe, J.A. (1987): *The Potato in the Human Diet*. Cambridge University Press, U.K.
- Wolfe, D.W., Gifford, R.M., Hilbert, D. & Luo, Y. (1998): Integration of photosynthetic acclimation to CO₂ at the whole-plant level. *Glob. Change Biol.* 4, 879-893.
- Wood, F.A. & Young, D.A. (1974): *TGA in potatoes*. Canada Department of Agriculture Publication no. 1533.
- Woodrow, I.E. (1994): Optimal acclimation of the C₃-photosynthetic system under enhanced CO₂. *Photosynth. Res.* 39, 401-412.
- Woolfe, J.A. (1996): *Die Kartoffel in der menschlichen Ernährung*. Behr's Verlag, Hamburg.
- Wrigley, C.W. & Bietz, J.A. (1988): Proteins and amino acids. In: Pomeranz, Y. (ed.): *Wheat: Chemistry and technology*, Vol 1. AACC, St.Paul, MN, 159-275.
- Zitnak, A. & Johnston, G.R. (1970): Glycoalkaloid content of B5141-6 potatoes. *Am. Potato J.* 47, 256-260.

