

UNTERSUCHUNGEN IN OPEN-TOP KAMMERN ZUR KOMBINATIONSWIRKUNG VON SCHADGASEN (O₃, NO₂, SO₂) AUF PFLANZEN*

Jürgen Bender, Hans-Joachim Weigel und Hans-Jürgen Jäger

ABSTRACT

Bush Beans (*Phaseolus vulgaris* L. cv. 'Rintintin') were exposed in open-top chambers to low concentrations of ozone (O₃), sulfur dioxide (SO₂) and nitrogen dioxide (NO₂), each alone and in mixture, during a 6-week period until pod maturity. While total leaf area and biomass (leaves and stems) of plants were not affected by the pollutant treatments during vegetative growth metabolic alterations (e.g. peroxidase, ascorbate) occurred at these early stages of plant development. At final harvest, the total plant leaf area was significantly reduced by O₃, but pollutant interactions were not detected by measurements of leaf area and total above-ground biomass. However, when all three pollutants were present bean fruit dry weight was markedly reduced and a O₃xSO₂xNO₂-interaction was noticed.

keywords: *growth and yield, metabolic effects, nitrogen dioxide, ozone, Phaseolus vulgaris, pollutant interaction, sulfur dioxide*

1. EINFÜHRUNG

Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂) und Stickstoffdioxid (NO₂) stellen nach wie vor die bedeutendsten phytotoxischen Komponenten unter den Luftschadstoffen dar. Über die Phytotoxizität vor allem von SO₂ und O₃ liegen eine Vielzahl von Untersuchungen vor (Übersicht bei GUDERIAN et al. 1985; WINNER et al. 1985), während die Stickoxidwirkung in geringerem Umfang experimentell untersucht worden ist (GUDERIAN und TINGEY 1987). Die überwiegende Zahl dieser Untersuchungen wurde jedoch mit unrealistisch hohen Schadgaskonzentrationen unter zumeist naturfernen Umweltbedingungen durchgeführt. Die heutige Immissions-situation in Europa ist gekennzeichnet durch das Vorherrschen langanhaltender, großräumiger Belastungen mit kombiniert auftretenden Schadgasen. Das gegenwärtige Interesse richtet sich daher zunehmend auf die Untersuchung von Langzeitwirkungen relativ niedriger Konzentrationen unter freilandähnlichen Expositionsbedingungen. Um zu einer realistischen Abschätzung möglicher Immissionsschädigungen an Pflanzen zu gelangen, müssen ferner die Wirkungen von Schadgasgemischen differenziert analysiert werden. Kombinationsexperimente mit drei Schadgasen (O₃, SO₂, NO₂) erfordern einen faktoriellen Versuchsaufbau, in dem sowohl die Wirkungen aller Einzelgase als auch aller denkbaren Kombinationen getrennt untersucht werden können. Im einfachsten Fall erfolgt die Zudosierung einer definierten Konzentration des jeweiligen Gases einzeln und in allen Zwei- und Dreifachmischungen in Expositions-kammern, die mit gefilterter Luft versorgt werden. Diese acht Behandlungen (bei einfacher Wiederholung: 16 getrennte Expositionen) erlauben anschließend eine Ermittlung von Haupt- und Wechselwirkungen eines jeden Schadgases (OSHIMA und BENNETT 1979). Bisherige Versuche mit drei Schadgasen blieben in dieser Hinsicht in ihrer Aussage oftmals u. a. dadurch begrenzt, weil nicht genügend Expositions-kammern für ein vollständiges faktorielles Design zur Verfügung standen (EPA 1984; REINERT 1984).

Um die Zusammenhänge zwischen den Immissionen gasförmiger Luftverunreinigungen und deren Wirkung auf Pflanzen zu untersuchen, wurde am Institut für Produktions- und Ökotoxikologie eine Schadgasexpositionsanlage aus 24 open-top Kammern aufgebaut, mit deren Hilfe

* Herrn Prof. Dr. O. Härtel, Institut für Pflanzenphysiologie der Universität Graz, zum 80. Geburtstag gewidmet.

Versuchspflanzen mit O₃, NO₂ und SO₂ einzeln und in faktorieller Kombination unter freilandähnlichen Umweltbedingungen begast werden können. Am Beispiel von Buschbohnen (*Phaseolus vulgaris* L.) werden erste Ergebnisse über Einzel- und Kombinationswirkungen umweltrelevanter Konzentrationen von O₃, SO₂ und NO₂ auf den Ertrag und auf den pflanzlichen Stoffwechsel vorgestellt.

2. MATERIAL UND METHODE

Expositionsanlage

Die Experimente wurden in einer Versuchsanlage des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie in Braunschweig während der Vegetationsperiode 1988 durchgeführt. Die gesamte Expositionsanlage, die im wesentlichen nach dem in den USA entwickelten open-top-Kammer-Prinzip arbeitet (MANDL et al. 1973; HEAGLE et al. 1973), umfaßt 24 Kammern und ist ausführlich bei WEIGEL und JÄGER (1988) beschrieben.

Jede open-top Kammer besteht aus einem Aluminiumgestell, das mit einer transparenten, UV-stabilisierten Polyäthylenfolie bespannt ist. Im unteren Teil der Kammer ist die Folie doppel-lagig und zwecks Luftzufuhr- und verteilung zum Kammerinneren hin gelocht. Mit Hilfe eines Gebläses wird in diesen doppel-lagigen Folienschlauch Luft eingeleitet, die einen mechanischen Grobfilter, Staubvorfilter und Aktivkohleplatten passiert hat. Die Kammern wurden während des Versuchs mit einer Luftmenge von 2200 m³/h versorgt, was etwa einem zwei-fachen Luftwechsel pro Minute entspricht.

Die Luft entweicht durch den oberen offenen und sich konisch verengenden Teil der Kammer, wodurch ein Eindringen von Außenluft durch Diffusion und Turbulenz weitgehend verhindert wird (HOGSETT et al. 1985). Zu der über Aktivkohle-gefilterten und damit schadgasfreien Zuluft können über Dosierleitungen die Einzelgase oder deren Gemische in definierten Konzentrationen in den Zuluftstrom zugegeben werden.

Zur Ermittlung der aktuellen Schadgaskonzentrationen (SO₂, O₃, NO_x) befindet sich im Zentrum jeder open-top Kammer eine Probestichnahmestelle, von der aus die Gasproben kontinuierlich über Meßgasleitungen Monitoren zugeführt werden. Über verschiedene Meßverfahren erfolgt die Konzentrationsbestimmung der betreffenden Gaskomponente: SO₂ über UV-Fluoreszenz (MONITOR LABS Modell 8850), NO₂ über Chemilumineszenz (MONITOR LABS Modell 8840), O₃ über UV-Absorption (MONITOR LABS Modell 8810). Alle Monitore wurden in regelmäßigen Abständen mittels eines MONITOR LABS Prüfgasgenerators (ML Modell 8550) für die Gase SO₂, NO₂, NO, O₃ sowie für Null-Luft kalibriert.

Pflanzenmaterial und Schadstoffbelastung

Topfpflanzen von *Phaseolus vulgaris* L. cv. "Rintintin" wurden etwa zwei Wochen nach erfolgter Keimung in die open-top Kammern gebracht und über 43 Tage (23.6. - 4.8.1988) bis zur Grünreife der Früchte mit O₃, SO₂ und NO₂ (einzeln oder in Kombination) belastet. Als Kulturgefäße fanden Rohrtöpfe (10 x 60 cm) Verwendung, die als Substrat Einheitserde (ED 73) enthielten. Für eine regelmäßige Wasserversorgung der Versuchspflanzen sorgte eine automatische Tropfbewässerungsanlage. Die Tabelle 1 gibt Auskunft über den zeitlichen Ablauf des Begasungsexperiments mit den Buschbohnen. Im Verlauf des Expositionszeitraumes wurden insgesamt drei Ernten zu verschiedenen Entwicklungsstadien der Pflanzen durchgeführt, wobei jeweils 6 bzw. 8 Pflanzen pro Kammer geerntet wurden (vgl. Tab. 1).

Das Begasungsexperiment beinhaltete insgesamt folgende Behandlungsvarianten: Kontrolle; O₃; SO₂; NO₂; O₃ + NO₂; SO₂ + NO₂ und O₃ + SO₂ + NO₂ (2x2x2x faktorielles Design). Jede Behandlung wurde wiederholt, d.h. in jeweils zwei open-top Kammern wurden identische Parallelversuche durchgeführt. Die beiden Wiederholungen wurden durch Blockbildung getrennt, die Verteilung der Behandlungen innerhalb der Blöcke erfolgte randomisiert.

SO₂ wurde kontinuierlich, O₃ täglich für 8 h (von 8⁰⁰ - 16⁰⁰ Uhr) und NO₂ täglich für 16 h (von 16⁰⁰ - 8⁰⁰ Uhr) zur gefilterten Luft dosiert. Die Dosierung wurde so eingestellt, daß die Konzentrationen in der jeweiligen Begasungszeit für O₃ um 100 µg/m³ Luft, für SO₂ und NO₂ um 50 - 60 µg/m³ lagen. Der zeitliche Verlauf der mittleren Tageskonzentrationen von O₃, SO₂ und NO₂ (einzeln und in Kombination) für den gesamten Expositionszeitraum ist in

Tab. 1: Zeittafel zum Begasungsversuch 1988: Einzel- und Kombinationsbegasung von Buschbohnen mit SO₂, O₃ und NO₂ in open-top Kammern

Aussaat:	03.06.1988
Einbringen der Töpfe in OTCs (Begasungsbeginn):	23.06.1988
Tage nach Aussaat:	20
<u>1. Ernte:</u>	07.07.1988
	8 Pflanzen/Behandlung und Wiederholung
Expositionsdauer (Tage):	15
Tage nach Aussaat:	35
Entwicklungsstadium:	vor Beginn der Blühphase; vegetatives Stadium
<u>2. Ernte:</u>	21.07.1988
	6 Pflanzen/Behandlung und Wiederholung
Expositionsdauer (Tage):	29
Tage nach Aussaat:	49
Entwicklungsstadium:	Ende der Blühphase/Beginn der Fruchtbildung
<u>3. Ernte:</u>	04.08.1988
	6 Pflanzen/Behandlung und Wiederholung
Expositionsdauer (Tage):	43
Tage nach Aussaat:	63
Entwicklungsstadium:	Grünreife der Früchte

Abbildung 1 dargestellt. Die Saisonmittelwerte der Gaskonzentrationen in den Kontrollkammern (nur gefilterte Luft) sowie in den Kammern, in die O₃, SO₂ oder NO₂ nicht zudosiert wurden, waren bei keinem der Schadgase höher als 10 µg/m³. Die Konzentrationen von NO, das durch den verwendeten Kohletyp nicht aus der Kammerzuluft entfernt wird, lagen in allen Kammern in der Regel unter 5 µg/m³.

Analytische Methoden

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, wurden während des Begasungsversuchs drei Ernten von jeweils 8 bzw. 6 Pflanzen pro open-top Kammer zu verschiedenen Zeitpunkten der Entwicklung der Buschbohnen durchgeführt. Nach Frischgewichtsbestimmung von Blättern, Stengeln und von Früchten (bei Schlußernte) wurden die gesamten Pflanzen in zwei Gruppen getrennt. Für die biochemischen Analysen wurden Blätter von je drei Pflanzen der ersten und zweiten Ernte sofort nach Frischgewichtsbestimmung auf flüssigen Stickstoff aufbewahrt. Diese Proben wurden anschließend unter flüssigem N₂ mit Mörser und Pistill zu einem Pulver homogenisiert, in Kunststofffläschchen (Polyvials) abgefüllt und bis zur Analyse in flüssigem Stickstoff konserviert.

Die Blätter der restlichen Pflanzen wurden zur Blattflächenmessung (LI-COR 3100 Area Meter, LI-Cor Inc., Lincoln, Nebraska) herangezogen und anschließend gefriergetrocknet. Das Trockengewicht der Blätter wurde von den gefriergetrockneten Proben ermittelt. Die Trockengewichtsbestimmung der Stengel sowie der Früchte erfolgte nach 24stündiger Trocknung bei 105 °C im Trockenschrank.

Die Bestimmung des Chlorophyllgehaltes erfolgte nach Extraktion des Pflanzenmaterials in 80 %igem Aceton nach der Methode von ZIEGLER und EGGLE (1965). Der Ascorbatgehalt wurde mit der DCPIP-Methode in Anlehnung an KELLER und SCHWAGER (1977) ermittelt. Die Peroxidase wurde mit einem Ultra-Turrax in kaltem Tris-Puffer (0.1 M Tris/HCL, pH 7,5; 0.4 % Triton X-100) extrahiert; die Enzymaktivität wurde modifiziert nach GRÜN-HAGE und JÄGER (1982) ermittelt.

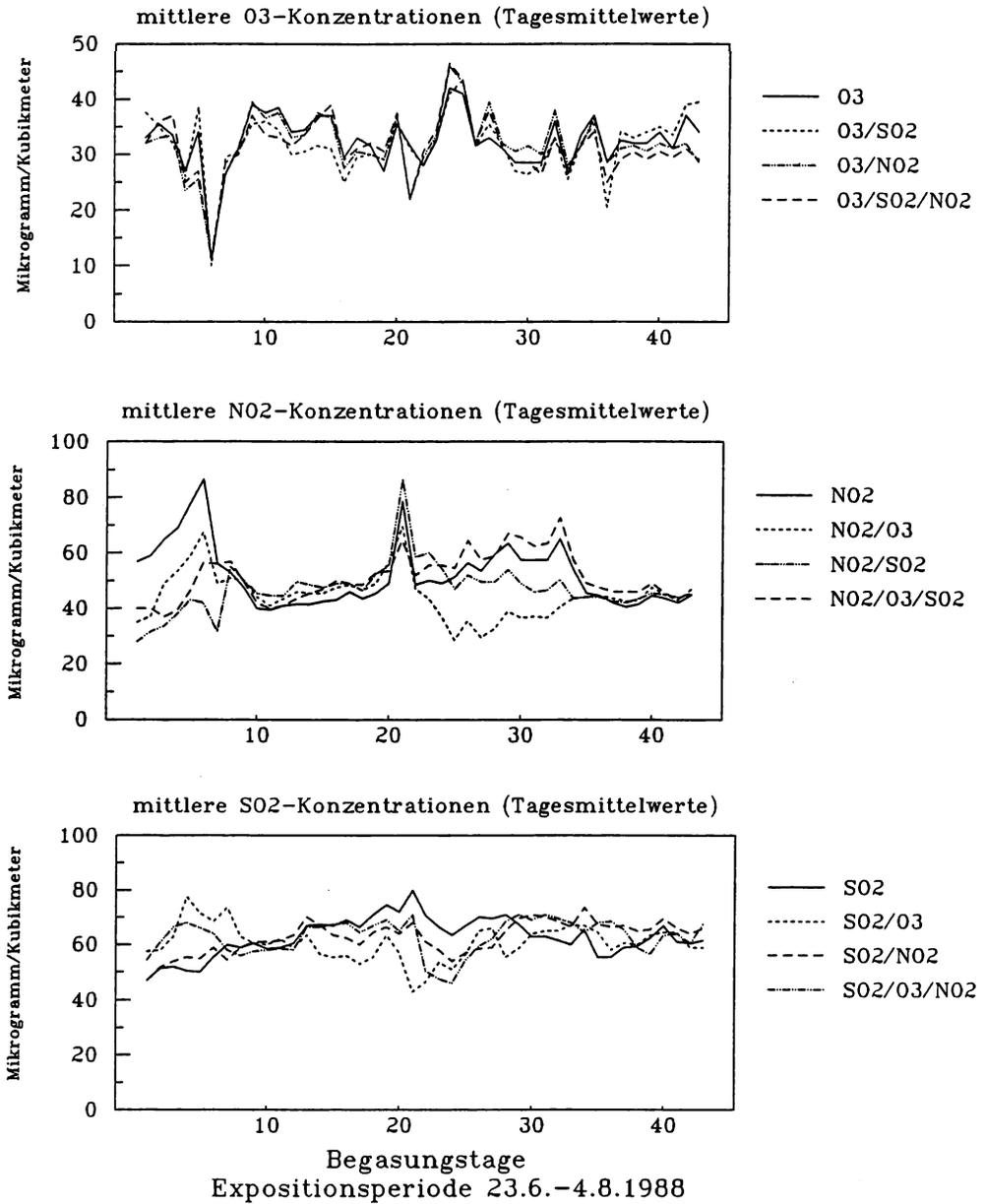


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der Schadgaskonzentrationen in den open-top Kammern im Versuchsjahr 1988

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In Abbildung 2 sind die Auswirkungen der Einzel- und Kombinationsbegasung mit O₃, SO₂ und NO₂ auf Wachstums- und Ertragsparameter bei den Buschbohnen dargestellt. Es zeigt sich, daß die Blattfläche sowie die oberirdische Biomasse (Stengel und Blätter) im vegetativen Entwicklungsstadium der Pflanzen bis zum Ende der Blühphase (nach 15 bzw. 29 Tagen Exposition) durch die Schadgasbelastung nicht beeinträchtigt wurden. Weder die Einzel- noch die Kombinationsbehandlungen wiesen bei seperater Betrachtung der Mittelwerte signifikante Unterschiede gegenüber den Kontrollen auf. Bei der Schlußernte nach einer Expositionszeit von 43 Tagen war das Trockengewicht von Stengeln und Blättern in der Kontrollvariante am höchsten, während die Pflanzen aus der Behandlung mit allen drei Gasen die niedrigsten Gewichte (- 22 %) aufwiesen. Obwohl bei der Gesamtblattfläche am Ende des Versuchs ein ähnlicher Trend festzustellen war, ließen sich auch hier bei einfacher Mittelwertbetrachtung keine statistisch signifikanten Unterschiede gegenüber den unbelasteten Kontrollen nachweisen. Die Ergebnisse der dreifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA; Tab. 2) belegen dagegen, daß die Veränderungen der Blattfläche bei den behandelten Pflanzen durch einen signifikanten O₃-Einfluß erklärt werden können.

Unterschiede traten zum Zeitpunkt der Schlußernte auch bei den Fruchterträgen auf. Die Hülsen der Kontrollpflanzen erbrachten die höchsten Trockengewichtserträge, Pflanzen aus der Behandlung mit allen drei Gasen um 30 % niedrigere Fruchterträge. Auffallend ist zudem die negative Wirkung der NO₂-Einzelbegasung auf den Hülsenertrag, die allerdings in Kombination mit SO₂ und/oder O₃ rückgängig wurde. Die ANOVA (Tab. 2) ermittelte für das Trockengewicht der Hülsen eine 3-fach-Interaktion, d.h. erst das Zusammenwirken aller drei Gase führte zu einem signifikanten Ertragsrückgang.

Tab. 2: Kombinationswirkungen von O₃, SO₂ und NO₂ auf Ertrags- und Stoffwechselkenngrößen von Buschbohnen nach 15, 29 und 43 Tagen Exposition in open-top Kammern: Ergebnisse der dreifaktoriellen Varianzanalyse (F-Test; ***p < 0,001; **p < 0,01; *p < 0,05; § p < 0,10).

Streuungsursache	Blattfläche			Trockenbiomasse			Hülsen-TG
	15	29	43	15	29	43	43
O ₃ (O)	0,14	0,69	4,03 *	0,36	0,92	1,42	0,49
SO ₂ (S)	0,44	0,34	0,39	0,042	0,026	2,02	3,40 §
NO ₂ (N)	1,87	0,81	0,27	1,40	1,52	1,28	2,61
OxS	1,66	0,006	2,99 §	2,92 §	0,58	2,25	2,61
OxN	0,32	0,25	0,008	2,68	0,077	0,001	0,036
SxN	0,52	0,76	0,39	0,32	0,081	0,708	0,303
OxSxN	3,90 *	0,25	0,69	0,004	0,77	0,52	3,86 *

Streuungsursache	Chlorophyll		Peroxidase		Ascorbat	
	15	29	15	29	15	29
O ₃ (O)	3,66 §	0,44	15,1 ***	0,41	1,55	0,97
SO ₂ (S)	0,25	1,49	6,00 *	5,18	0,16	2,85 §
NO ₂ (N)	0,14	0,28	2,28	3,41	0,83	3,07 §
OxS	0,15	4,84 *	1,75	0,004	0,78	0,16
OxN	0,07	0,001	1,21	1,29	1,38	2,50
SxN	3,49 §	0,27	0,37	0,009	0,082	0,077
OxSxN	0,03	1,99	7,93 **	1,39	4,76 *	0,44

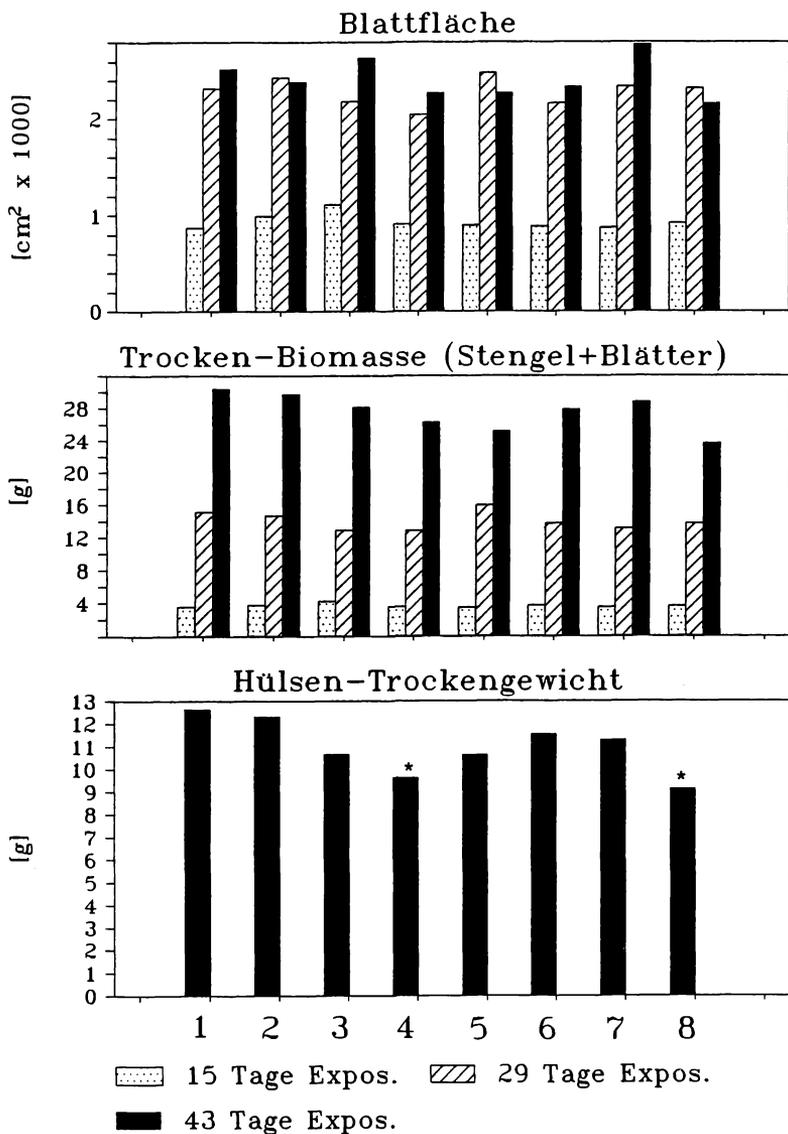


Abb. 2: Einfluß der Einzel- und Kombinationsbegasung mit O_3 , SO_2 und NO_2 auf Wachstum und Ertrag von Buschbohnen.

Behandlungsvarianten: 1 = Kontrolle, 2 = O_3 , 3 = SO_2 , 4 = NO_2 , 5 = O_3/SO_2 , 6 = O_3/NO_2 , 8 = $O_3/SO_2/NO_2$.

Signifikant verschieden von der Kontrolle *, $p < 0.05$ (one-way ANOVA).

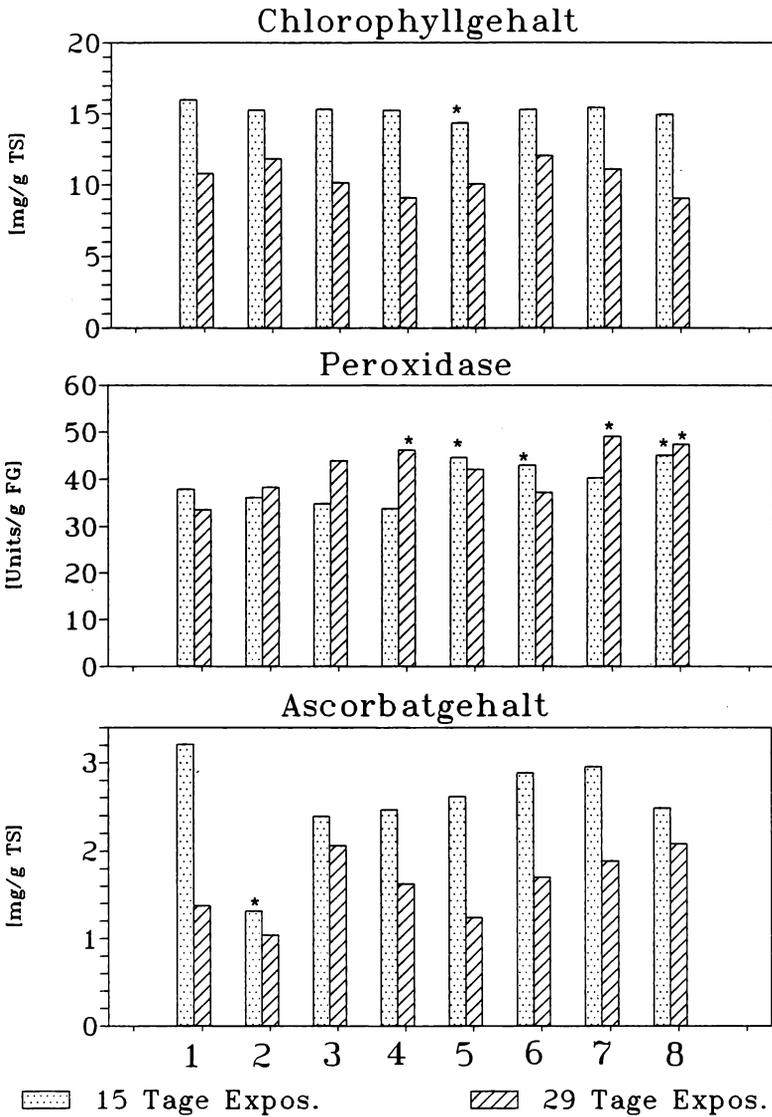


Abb. 3: Einfluß der Einzel- und Kombinationsbegasung mit O₃, SO₂ und NO₂ auf den Chlorophyll- und Ascorbatgehalt sowie auf die Peroxidase-Aktivität von Buschbohnen. Behandlungsvarianten; siehe Legende Abb. 2. Signifikant verschieden von der Kontrolle: *, p < 0.05 (one-way ANOVA).

In den wenigen bisher ausschließlich unter Gewächshausbedingungen durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung von Kombinationswirkungen bei simultaner Belastung mit O_3 , SO_2 und NO_2 konnten 3-fach-Wechselwirkungen nicht festgestellt werden. So fanden REINERT und GRAY (1981) bei exponierten Radiespflanzen eine Reduktion des Hypokotylgewichtes durch O_3 , die in Anwesenheit von SO_2 und/oder NO_2 in additiver Weise verstärkt wurde. Zweifach- bzw. dreifach-Interaktionen traten nicht auf. Über ähnliche Ergebnisse berichten SANDERS und REINERT (1982). Untersuchungen an Tomaten, Radieschen und Bohnen ergaben eine verstärkte Ertragsminderung durch NO_2 bei gleichzeitiger Applikation von SO_2 und/oder O_3 , während NO_2 allein keinen Effekt ausübte (REINERT und HECK 1982). Biochemische Ursache für diese verstärkende Wirkung von Immissionsgemischen mit NO_2 gegenüber der NO_2 -Einzelbelastung ist offenbar eine Beeinträchtigung von Pflanzen, unter Kombinationsstreß das durch die NO_2 -Aufnahme gebildete Nitrit zu entgiften (WELLBURN et al. 1981). Ebenso ist denkbar, daß endogene Reparaturmechanismen, über die die pflanzliche Zelle zur Vermeidung von O_3 - oder SO_2 -Streß verfügt, bei gleichzeitiger Einwirkung mehrerer Schadgase nicht mehr funktionieren.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen des Chlorophyll- und Ascorbatgehalts sowie der Aktivität des Streß- und Entgiftungsenzyms Peroxidase in den Blättern der einzeln und kombiniert belasteten Buschbohnen. Über die Untersuchungen zum Einfluß der Kombinationsbegasung auf den N-Metabolismus wird an anderer Stelle berichtet.

Während sich die Immissionswirkungen auf das Wachstum und den Ertrag erst zu einem relativ späten Zeitpunkt in der Entwicklung der Pflanze bemerkbar machten, waren Veränderungen im Stoffwechsel bereits früher nachweisbar. So reagierte die Peroxidase bereits nach 15 Expositionstagen sowie nach 29 Tagen mit signifikanten Aktivitätserhöhungen, insbesondere in den Kombinationsbehandlungen. Die ANOVA-Tabelle (Tab. 2) weist für die Peroxidase zum ersten Erntetermin einen signifikanten Haupteffekt von O_3 ($p < 0.001$) und von SO_2 ($p < 0.05$) sowie eine Wechselwirkung zwischen allen drei Gasen ($p < 0.01$) aus. Auch im Ascorbatgehalt der Blätter waren frühzeitig Effekte zu beobachten. Als wichtigstes Ergebnis ist festzuhalten, daß nach 15 Tagen in den Blättern aller Behandlungsvarianten niedrigere Ascorbatwerte im Vergleich zu den unbelasteten Kontrollen gemessen wurden. Der Gesamtchlorophyllgehalt wurde nur in einem einzigen Fall (O_3/SO_2) signifikant beeinträchtigt.

Mit den hier vorgestellten ersten Ergebnissen aus einem Kombinationsexperiment mit drei Gasen zeigt sich, daß niedrige, umweltrelevante Konzentrationen von O_3 , SO_2 und NO_2 in Kombination miteinander besonders effektiv in der Auslösung von Pflanzenreaktionen sein können. Bevor sich immissionsbedingte Ertrags- oder Wachstumsminderungen bei den Buschbohnen einstellten, ließen sich bereits Änderungen im Stoffwechsel feststellen. Der Nachweis von 3-fach-Interaktionen unterstreicht die Bedeutung, die das simultane Vorkommen aller drei Schadgaskomponenten für die Vegetation darstellen kann. Art und Ausmaß der Pflanzenreaktion auf Immissionsgemische hängen in hohem Maße von der jeweiligen Konzentration der beteiligten Komponente, ihrer Einwirkungsdauer sowie der zeitlichen Aufeinanderfolge ab (GUDERIAN und TINGEY 1987) und können von Pflanzenart zu Pflanzenart variieren (ORMROD 1982). Weitere Untersuchungen sind daher erforderlich, um das Gefährdungspotential von Immissionsgemischen für die Vegetation abzuschätzen.

Die vorliegende Arbeit ist Teil eines von der Kommission der Europäischen Gemeinschaft geförderten Vorhabens (Vertrag-Nr. EV4V-0026-D).

LITERATUR

- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1984: A review and assessment of the effects of pollutant mixtures on vegetation - research recommendations. - EPA-600/3-84. U.S. Environmental Protection Agency. Corvallis, Oregon.
- GRÜNHAGE L., JÄGER H.J., 1982: Kombinationswirkungen von SO_2 und Cadmium auf *Pisum sativum* L. 2 Enzyme, freie Aminosäuren und Zucker. - Angew. Bot. 56: 167-178.

- GUDERIAN R., TINGEY D.T., 1987: Notwendigkeit und Ableitung von Grenzwerten für Stickstoffoxide. - Umweltbundesamt, Berichte 1/87. E. Schmidt. Berlin.
- GUDERIAN R., TINGEY D.T., RABE R., 1985: Effects of photochemical oxidants on plants. - In: GUDERIAN R. (ed.): Air pollution by photochemical oxidants. Formation, transport, control and effects on plants. Ecological Studies 52, Springer, Berlin, Heidelberg, New York: 129-335.
- 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: 265-368.
- HOGSETT W.E., TINGEY D.T., HOLMAN S.R., 1985: A programmable exposure control system for determination of the effects of pollutant exposure regimes on plant growth. - Atmos. Environ. 19: 1135-1145.
- KELLER T., SCHWAGER H., 1977: Air pollution and ascorbic acid. - Eur. J. For. Path. 7: 338-350.
- MANDL R.H., WEINSTEIN L.H., McCUNE D.C., KEVENY A., 1973: A cylindrical open-top chamber for the exposure of plants to air pollutants in the field. - J. Environ. Qual. 2: 371-376.
- ORMROD D.P., 1982: Air pollutant interactions in mixtures. - In: UNSWORTH M.H., ORMROD D.P. (eds): Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture. Butterworth Scientific. London: 307-332.
- OSHIMA R.J., BENNETT J.P., 1979: Experimental design and analysis. - In: HECK W.W., KRUPA S.V., LINZON S.N. (eds.): Handbook of methodology for the assessment of air pollution effects on vegetation, 4-1-22. Air Poll. Control Assoc. Pittsburgh.
- REINERT R.A., 1984: Plant responses to air pollutant mixtures. - Ann. Rev. Phytopathol 22: 421-442.
- REINERT R.A., GRAY D.T., 1981: The responses of radish to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone, alone and in combination. - J. Environ. Qual. 10: 240-243.
- REINERT R.A., HECK W.W., 1982: Effects of nitrogen dioxide in combination with sulfur dioxide and ozone on selected crops. - In: SCHNEIDER T., GRANT L. (eds.): Air pollution by nitrogen oxides. Elsevier. Amsterdam: 533-546.
- SANDERS J.S., REINERT R. A., 1982: Screening azalea cultivars for sensitivity to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone alone and in mixtures. - J. Amer. Soc. Hort. Sci. 107: 87-90.
- WEIGEL H.J., JÄGER H.J., 1988: Zur Ökotoxikologie von Luftschadstoffen. II. Aufbau und Funktionsweise einer Expositionsanlage aus open-top Kammern zur Untersuchung von Immissionswirkungen auf Pflanzen. - Landbauforschung Völkenrode 38: 182-195.
- WELLBURN A.R., HIGGINSON C., ROBINSON D., WALMSLEY C., 1981: Biochemical explanation of more than additive inhibitory effects of low atmospheric levels of sulphur dioxide plus nitrogen dioxide upon plants. - New Phytol 88: 223-237.
- WINNER W.E., MOONEY H.A., GOLDSTEIN R.A., 1985: Sulfur dioxide and vegetation. Physiology, ecology, an policy issues. - Stanford University Press. Stanford.
- ZIEGLER R., EGLÉ K., 1965: Zur quantitativen Veränderung der Chloroplastenpigmente. - Beitr. Biol. Pflanzen 41: 11-37.

ADRESSE

Dr. Jürgen Bender
 Dr. Hans-Joachim Weigel
 Prof. Dr. Hans-Jürgen Jäger
 Institut für Produktions- und Ökotoxikologie
 Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
 Bundesallee 50
 D-W-3300 Braunschweig

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1991

Band/Volume: [19_3_1991](#)

Autor(en)/Author(s): Bender Jürgen, Weigel Hans-Jochen, Jäger Hans-Jürgen

Artikel/Article: [Untersuchungen in Open-Top Kammern zur Kombinationswirkung von Schadgasen \(O3, NO2, SO2\) auf Pflanzen 321-329](#)