

LANGZEITEINWIRKUNGEN VON FREILANDRELEVANTEN SO₂- UND CADMIUMKONZENTRATIONEN AUF PFLANZEN

Von

GRÜNHAGE L., KLEIN H. und JÄGER H.J.

Institut für Pflanzenökologie der Justus Liebig-Universität Gießen

E I N L E I T U N G

Die Kontamination der Umwelt mit Schadstoffen, die in jüngster Zeit in zunehmendem Maße deutlich wird, wird zu einem erheblichen Teil durch saure Schadgase und Schwermetalle verursacht. Hierbei kommen dem SO₂ unter den gasförmigen Immissionskomponenten aufgrund seiner ubiquitären Verbreitung und dem Cadmium unter den Schwermetallen wegen seiner hohen Toxizität und der Akkumulation in der Nahrungskette besondere Bedeutung zu. Die Einzelwirkungen von SO₂ und Cadmium auf Ertrag und Symptomatologie von Pflanzen sowie die stoffwechselphysiologischen Reaktionen auf SO₂-Einwirkung sind aus Kurzzeitexperimenten weitgehend bekannt (VAN HAUT und STRATMANN 1970, JÄGER 1974, ERNST 1974, ZIEGLER 1975, KLEIN et al. 1979, JÄGER und KLEIN 1980). Dagegen fehlt es an Untersuchungen zur Wirkung freilandrelevanter Schadstoffkonzentrationen auf Pflanzen über eine vollständige Vegetationsperiode. Solche Untersuchungen, die Informationen über die Cadmiumgehalte der erntereifen, verwertbaren Teile von Kulturpflanzen liefern, sind zur Vermeidung der ökotoxikologischen Konsequenzen der Cadmiumkontamination von Nahrungs- und Futterpflanzen von besonderer Wichtigkeit. Ebenfalls kaum untersucht sind die Kombinationswirkungen niederer SO₂- und Cadmiumkonzentrationen auf Pflanzen, obwohl an immissionsbelasteten Standorten oft saure Schadgase und Schwermetalle gleichzeitig auf die Pflanzen einwirken. Im vorliegenden Beitrag werden daher Langzeitversuche zur Einzel- und Kombinationswirkung freilandrelevanter SO₂- und Cadmiumkonzentrationen auf Ertrag, Schadstoffgehalte² und ausgewählte stoffwechselphysiologische Kriterien von Erbsenpflanzen vorgestellt.

M A T E R I A L U N D M E T H O D E N

1. Kultivierung und Kontamination der Pflanzen

Die Versuche wurden mit Erbsen (*Pisum sativum* L., cv. Wunder von Kelvedon) durchgeführt. Die Kultivierung der Pflanzen erfolgte in Pflanzenwuchsschränken bei einer Be-

leuchtungsstärke von 16.000 lx, einer relativen Luftfeuchte von 75 %, Tag-Nacht-Temperaturen von 21,5/14,5°C, einem 12-stündigen Licht-Dunkel-Rhythmus und einer 100-fachen stündlichen Lüfterneuerung. Als Versuchsboden diente Einheitserde (Typ Frustosoil N).

Die Cadmiumkontamination des Bodens erfolgte durch Untermischen eines Cadmiumoxid-Sand-Gemisches. Die hierdurch erreichten Cadmiumkonzentrationen betragen 5, 10 und 15 ppm bezogen auf das Bodentrockengewicht (105°C). Die SO₂-Begasung der Versuchspflanzen wurde während der gesamten Versuchsdauer kontinuierlich mit 0,10 ± 0,02 mg SO₂/m³ Luft durchgeführt.

2. Analytik

Nach der Ernte wurden die Pflanzensprosse in vegetative und generative Teile getrennt. Das Pflanzenmaterial wurde zum Teil über Nacht bei 105°C getrocknet und zum Teil in flüssigem Stickstoff schockgefroren und anschließend gefriergetrocknet. Die Bestimmung der untersuchten Wirkkriterien erfolgte nach folgenden Methoden:

Cadmium: Flammenlose Atomabsorptionsspektrometrie mit dem Perkin Elmer 360 mit Graphitrohrküvette HGA-72.

Schwefel: Bestimmung des Gesamtschwefels nach JÄGER und STEUBING (1970).

Pufferkapazität: Titration der wäßrigen Homogenate des gefriergetrockneten Materials mit n/50 HCl (GRILL 1971).

Prolin: Bestimmung der Prolinkonzentration mit dem automatischen Aminosäureanalysator LKB 3201 nach Extraktion des gefriergetrockneten Pflanzenmaterials mit Methanol/Chloroform/Wasser (JÄGER 1975).

Saure Phosphatase: Messung der Extinktionszunahme des durch das Enzym aus p-Nitrophenylphosphat abgespaltenen Nitrophenols bei 405 nm im Alkalischen (BERGMEYER 1974).

Peroxidase: Messung der Extinktionszunahme des durch peroxidatische Dehydrogenierung aus p-Phenylendiamin entstehenden Oxidationsproduktes bei 485 nm (BERGMEYER 1974).

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

1. Ertrag und Schadstoffgehalte des Erbsenkrautes

Nach 55-tägiger Versuchsdauer waren weder infolge Cadmium- oder SO₂-Einzelwirkung noch bei kombinierter Applikation der Schadstoffe symptomatologische Veränderungen der Testpflanzen im Vergleich zur Kontrolle festzustellen. Der Ertrag des Erbsenkrautes wird durch Langzeitbegasung mit 0,10 mg SO₂/m³ Luft ebenfalls nicht signifikant beeinflusst, obwohl die Schwefelkonzentrationen der begasten Pflanzen eine beträchtliche SO₂-Aufnahme beweisen (Tab. 1). Der Befund, daß die gewählte SO₂-Konzentration, die noch unter dem Langzeitwert der TA-Luft liegt, keinen Ertragsrückgang des Erbsenkrautes verursachte, dokumentiert, daß die Einhaltung dieses Grenz-

wertes beim Auftreten von SO_2 als Einzelschadstoff die Ausbildung makroskopischer Schäden an Erbsenpflanzen verhindert.

Tabelle 1: Ertrag, Cadmium- und Schwefelkonzentration des Erbsenkrautes in Abhängigkeit von SO_2 ($0,1 \text{ mg/m}^3$)- und Cadmium (5, 10 und 15 ppm im Boden)- Einzel- und Kombinationswirkungen.

		Ertrag (g TS)	Cadmium ($\mu\text{g/g}$ TS)	Schwefel (mg/g TS)
Kontrolle		1,20	0,39	2,55
	5	1,12	5,83 ⁺⁺⁺	2,40
Cd	10	1,00 ⁻	9,08 ⁺⁺⁺	2,77
	15	0,94 ⁻⁻	11,88 ⁺⁺⁺	3,26 ⁺⁺⁺
SO_2		1,11	0,34	3,78 ⁺⁺⁺
Cd	5	0,88 ⁻⁻	6,29 ⁺⁺⁺	4,36 ⁺⁺⁺
+	10	0,85 ⁻⁻	10,46 ⁺⁺⁺	4,32 ⁺⁺⁺
SO_2	15	0,92 ⁻	13,33 ⁺⁺⁺	4,81 ⁺⁺⁺

Statistische Absicherung: +, ++, +++; -, --, ---: Signifikant verschieden von der Kontrolle auf dem 5,0 %-, 1,0 %- bzw. 0,1 %- Niveau.

In Analogie zum SO_2 ist auch bei 5 ppm Cadmium im Boden, dem als tolerierbar diskutierten oberen Grenzgehalt von Cadmium in Kulturböden (CLAUSSEN 1979), trotz bereits stark erhöhter Cadmiumkonzentrationen (Tab. 1) kein signifikanter Rückgang des Krautertrages der Erbsen zu beobachten. Erst bei 10 ppm Cadmium im Boden tritt eine statistisch gesicherte Verminderung der Substanzproduktion ein, die mit einer Cadmiumkonzentration von 9 ppm im Gewebe korreliert. Nach diesen Ergebnissen läßt sich als Toxizitätsgrenzwert (die mit einem beginnenden Ertragsrückgang korrelierende Cadmiumkonzentration) für Cadmium im Boden eine Cadmiumkonzentration von 5-10 ppm und für die Cadmiumkonzentration des Erbsenkrautes ein Wert von 5,8 - 9 ppm bei Einzelapplikation des Schwermetalls extrapolieren.

Während weder die Kontamination des Bodens mit 5 ppm Cadmium noch alleinige SO_2 -Begasung eine Ertragsdepression herbeiführen, bewirkt die kombinierte Applikation beider Schadstoffkonzentrationen einen signifikanten Ertragsrückgang (Tab. 1). Damit liegt der Toxizitätsgrenzwert für Cadmium im

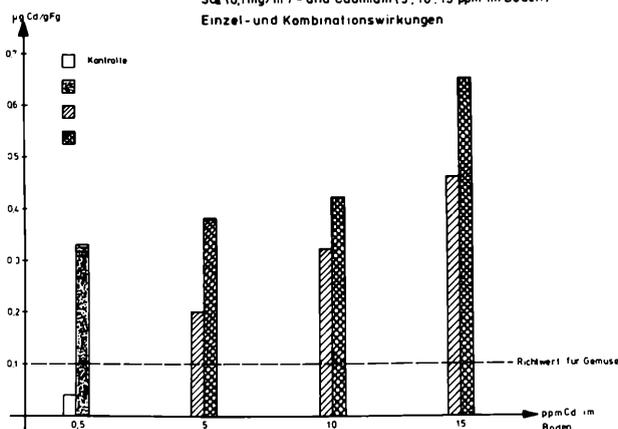
Boden bei gleichzeitiger Einwirkung von SO_2 -Konzentrationen, die unter dem Langzeit-Grenzwert liegen, unter 5 ppm, bzw. auf das SO_2 bezogen: SO_2 -Konzentrationen, die noch unter dem TA-Luft-Wert liegen, wirken bereits phytotoxisch, wenn gleichzeitig eine geringe Cadmiumkontamination des Bodens vorliegt. Die Bedeutung dieser Befunde für eine realistische Konzipierung von Schadstoffgrenzwerten beim Vorliegen multifaktorieller Immissionen liegt auf der Hand: Die zur Zeit lediglich für Einzelimmissionen erarbeiteten Immissionsgrenzwerte müssen im Hinblick auf die Möglichkeit des Auftretens von Mischimmissionen modifiziert, d.h., in der Regel reduziert werden, um den Schutz der Vegetation zu gewährleisten.

Die Gesamtschwefelkonzentration des Erbsenkrautes wird außer durch SO_2 -Einwirkung auch durch Cadmiumkontamination des Bodens (15²ppm) erhöht (Tab. 1). Dagegen ergibt sich unter SO_2 -Einfluß keine statistisch gesicherte Zunahme der Cadmiumkonzentration im Vergleich zur alleinigen Cadmiumkontamination der Pflanzen.

2. Cadmiumkonzentrationen der Samen

Aus ökotoxikologischer Sicht sind die Schadstoffgehalte der eßbaren Teile kontaminierter Nahrungs- und Futterpflanzen für die Beurteilung von Langzeitwirkungen freilandrelevanter Schadstoffkonzentrationen in Boden und Luft auf Pflanzen ausschlaggebend. Sowohl Freilandgefäßversuche mit niederen Cadmiumoxidapplikationen (KLEIN et al. 1980) als auch Freiland-erhebungen der Cadmiumgehalte pflanzlicher Lebensmittel im Wirkungsbereich einer Bleihütte (AUERMANN et al. 1979) haben gezeigt, daß es schon bei niederen Cadmiumgehalten im Boden zu Cadmiumkonzentrationen besonders in Blattgemüsearten kommt, die den vom Bundesgesundheitsamt (1979) festgelegten Richtwert von 0,1 ppm Cadmium in der Frischsubstanz weit übersteigen. In Abb. 1 sind die Cadmiumkonzentrationen der Samen (grüne Erbsen) von Erbsenpflanzen in Abhängigkeit von SO_2 - und Cadmium-Einzel- und Kombinationswirkungen wiedergegeben. Überraschend ist der Befund, daß bereits alleinige SO_2 -Begasung der auf nicht kontaminiertem Boden kultivierten Erbsenpflanzen zu einem Anstieg der Cadmiumkonzentration in den grünen Erbsen auf über das 3-fache des Richtwertes führt, während die unbegasteten, mit 5 ppm Cadmium kontaminierten Pflanzen mit 0,2 ppm "lediglich" das 2-fache des Richtwertes aufweisen. Die kombinierte Applikation von 5 ppm Cadmium im Boden und 0,1 mg SO_2/m^3 Luft bewirkt eine weitere, im Vergleich zu den Einzelwirkungen jedoch nicht additive Zunahme der Cadmiumkonzentration der Erbsen. Diese Tendenz setzt sich bei 5 und 10 ppm Cadmium im Boden, die eine weitere Zunahme der Cadmiumkonzentration der grünen Erbsen bewirken, fort. Als wichtiges Fazit dieser Befunde ist festzuhalten, daß die Cadmiumkonzentrationen der Erbsen sowohl unter freilandrelevanten Einzel- als auch Kombinationswirkungen von SO_2 und Cadmium, die zur Zeit noch als unbedenklich angesehen werden, den Richtwert für Cadmium in Gemüsepflanzen erheblich überschreiten und damit als toxisch einzustufen sind.

Abb 1 Cadmiumkonzentration ($\mu\text{g/g}$ Frischgewicht) der Samen (grüne Erbsen) von Erbsenpflanzen in Abhängigkeit von SO_2 ($0,1 \text{ mg/m}^3$) - und Cadmium ($5, 10, 15 \text{ ppm}$ im Boden) - Einzel- und Kombinationswirkungen



3. Stoffwechselphysiologische Reaktionen

Die kontinuierliche Langzeitbegasung der Erbsenpflanzen bis zur Erntereife verminderte die Transpiration der Pflanzen und erhöhte den Wassergehalt des Erbsenkrautes. Dies geht aus dem Vergleich der Transpirationskoeffizienten und der Frisch-Trockengewichts-Verhältnisse von begasteten und unbegasteten Pflanzen hervor (Tab. 2). Auch die SO_2 -bedingte Abnahme der Prolinkonzentration spricht gegen eine Anspannung des Wasserhaushaltes, die unter SO_2 -Einwirkung in Form gesteigerter Transpiration und erhöhter Prolinkonzentration wiederholt festgestellt wurde (FISCHER 1967, JÄGER 1974, JÄGER und GRILL 1975). Die Pufferkapazität von Pflanzen für H-Ionen wird nach GRILL (1971), KLEIN und JÄGER (1976) und KELLER (1977) unter SO_2 -Einwirkung vermindert. Die in der vorliegenden Untersuchung gewählte SO_2 -Konzentration von $0,1 \text{ mg/m}^3$ Luft verursacht dagegen keine Abnahme der Pufferkapazität sondern in sämtlichen Begasungsexperimenten die Tendenz zu einer Zunahme (Tab. 2). Eine Zunahme der Pufferkapazität stellen auch CZUCHAJOWSKA und PRZYBYLSKI (1978) in Nadeln immissionsbelasteter Kiefern fest. Auch die Aktivität der Peroxidase, eines Enzyms, das empfindlich auf physiologischen Stress, darunter auch SO_2 -Einwirkung, anspricht (KELLER 1976), wird durch Langzeiteinwirkung von $0,1 \text{ mg SO}_2$ nicht signifikant verändert (Tab. 2). Gegen einen gravierenden Eingriff des SO_2 in den pflanzlichen Stoffwechsel spricht im vorliegenden Fall auch das Verhalten der sauren Phosphatase, die von RABE und KREEB (1976) als ein Indikator der allgemeinen Vitalität der Pflanze angesehen wird. Während RABE und KREEB (1976) Aktivitätsabnahmen der sauren Phosphatase unter SO_2 -Einwirkung feststellen, nimmt in der vorliegenden Untersuchung die Aktivität des Enzyms zu (Tab. 2). Damit ergeben sich bei langfristiger Einwirkung niedriger SO_2 -Konzentrationen auf krautige Pflanzen andere stoffwechselphysiologische Reaktionen als im Kurzzeitexperiment mit höheren SO_2 -Konzentrationen. Inwieweit diese andere Reaktionsweise das Resultat einer Umstimmung des

pflanzlichen Stoffwechsels bzw. einer Anpassung an niedrigere SO_2 -Konzentrationen ist, ist eine zur Zeit noch offene Frage.

Tabelle 2: Ausgewählte stoffwechselphysiologische Kriterien des Erbsenkrautes in Abhängigkeit von SO_2 ($0,1 \text{ mg/m}^3$)- und Cadmium (5, 10 und 15 ppm im Boden- Einzel- und Kombinationswirkungen.

	<u>Fr.-gew.</u> <u>Tr.-gew.</u>	Pro- lin	Puffer- kapazität	Saure Phosph.	Peroxi- dase	Transp.- koeff.	
	(g/g)	($\mu\text{M/g}$)	($\text{ml}_{50}^{\text{n}}$ HCl/g)	(U/g)	(U/g)	(ml/g)	
Kontr.	5,68	8,58	23,84	24,78	508,8	518,9	
	5	5,60	7,29	28,37	-	562,6 ⁺	-
Cd	10	5,38	7,45	26,25	-	602,9 ⁺	-
	15	5,32	6,98	25,65	24,12	554,9 ⁺	-
SO_2	6,78 ⁺⁺⁺	3,26 ⁻⁻⁻	26,73	27,69 ⁺	486,8	390,3 ⁻⁻⁻	
	5	6,59 ⁺⁺	2,87 ⁻⁻⁻	28,40	-	556,1 ⁺	-
Cd	10	6,36 ⁺	3,06 ⁻⁻⁻	27,24	-	511,4	-
⁺ SO_2	15	6,26	3,30 ⁻⁻⁻	28,19	26,56	521,1	-

Statistische Absicherung: +, ++, +++; -, --, ---: Signifikant verschieden von der Kontrolle auf dem 5,0 %-, 1,0 %- bzw. 0,1 %-Niveau.

Über die Wirkungen niedriger Cadmiumkonzentrationen im Boden auf den pflanzlichen Stoffwechsel ist bisher wenig bekannt. In den hier vorgestellten Langzeituntersuchungen bewirkten bereits 5 ppm Cadmium im Boden eine signifikante Erhöhung der Peroxidase-Aktivität des Erbsenkrautes (Tab. 2). Da diese vor dem Auftreten von Ertragsdepressionen (Tab. 1) in Erscheinung tritt, muß diese Reaktion des pflanzlichen Stoffwechsels als eine zwar unspezifische, jedoch empfindliche Reaktion auf Einwirkung niedriger Cadmiumkonzentrationen gewertet werden, womit der Erhöhung der Peroxidase-Aktivität in Verbindung mit der Schadstoffanalyse Bedeutung für die Frühindikation von Cadmiummissionen zukommt. Der Befund, daß schon bei 5 ppm Cadmium im Boden in Einzelwirkung Veränderungen im pflanzlichen Stoffwechsel auftreten, dokumentiert, daß es bei diesem zur Zeit noch als tolerierbar angesehenen Wert durchaus schon zu Schädigungen der Pflanzen kommen kann, ohne daß diese in einem volkswirtschaftlichen Schaden manifest werden müssen. Außer der Reaktion der Peroxidase sind keine weiteren signifikanten Veränderungen der

untersuchten stoffwechselphysiologischen Parameter durch Cadmium-Einzelwirkung festzustellen (Tab. 2).

Die kombinierte Applikation von SO_2 und Cadmium führt in der niedrigsten Cadmiumkontaminationsstufe zur Veränderung der Wirkungskriterien im Sinne der Einzelwirkung der Schadstoffe. Sowohl die für SO_2 beschriebene Zunahme des Wasser- und Abnahme des Prolingehältes als auch die für Cadmium festgestellte Erhöhung der Peroxidase-Aktivität sind infolge SO_2 -Cadmium-Kombinationswirkung nachweisbar. (Tab. 2). Mit zunehmender Cadmiumkonzentration im Boden verringern sich die Kombinationswirkungen im Vergleich zu den Einzelwirkungen. Bei 15 ppm Cadmium im Boden ist als signifikante Kombinationswirkung nur noch die in sämtlichen Begassungsversuchen nachweisbare Prolinabnahme festzustellen. Ein Grund hierfür ist sicherlich die entgegengesetzte Richtung der Einzelwirkungen von SO_2 und Cadmium auf einige stoffwechselphysiologische Kriterien (Peroxidase-Aktivität, Wassergehalt), die in Kombination infolge Überlagerung geringere Nettowirkungen im Vergleich zu den Einzelwirkungen bedingt. Da die Erträge jedoch, wie Tabelle 1 zeigt, durch sämtliche Cadmium- SO_2 -Kombinationen signifikant reduziert werden, legt die beschriebene Reaktion der stoffwechselphysiologischen Parameter die Vermutung nahe, daß die den Ertragsdepressionen vorausgehenden Stoffwechseländerungen in anderen, hier nicht erfaßten Teilbereichen des pflanzlichen Stoffwechsels stattfinden. Um Aussagen über den Mechanismus der Cadmium- SO_2 -Kombinationswirkungen machen zu können, sind daher weitere Untersuchungen pflanzlicher Stoffgruppen notwendig.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Erbsenpflanzen wurden unter kontrollierten Bedingungen bis zur Erntereife der Samen Einzel- und Kombinationswirkungen freilandrelevanter Cadmium (5, 10 und 15 ppm Cadmium i.d. Boden-TS)- und SO_2 (0,1 mg/m³ Luft)-Konzentrationen ausgesetzt. Der Ertrag des Erbsenkrautes wird durch Einzelapplikation von SO_2 nicht beeinflusst, dagegen ab 5-10 ppm Cadmium bei Einzelapplikation und durch 5 ppm Cadmium in Kombination mit SO_2 reduziert. Die Cadmiumkonzentration des Krautes nimmt mit zunehmender Cadmiumkontamination des Bodens zu und wird durch SO_2 nicht signifikant beeinflusst. Der Gesamtschwefel wird dagegen sowohl durch SO_2 - und Cadmiumeinzelwirkung (15 ppm Cadmium im Boden) als auch in Kombination erhöht. Die Cadmiumkonzentration der Samen (grüne Erbsen) überschreitet bei alleiniger SO_2 - und Cadmiumeinwirkung und bei Kombination der Schadstoffe den Richtwert für Cadmium in pflanzlichen Lebensmitteln. Auf stoffwechselphysiologischer Ebene dokumentieren die Prolinabnahme, der erhöhte Wassergehalt sowie die Pufferkapazität begaster Pflanzen eine andere Wirkungsweise des SO_2 bei Langzeiteinwirkung niederer Konzentrationen als im Kurzzeitversuch mit höheren Konzentrationen. Als stoffwechselphysiologische Langzeitwirkung niederer Cadmiumkonzentrationen im Boden wurde eine Erhöhung der Peroxidase-Aktivität festgestellt. Bei kombinierter Applikation

niederer Cadmium- und SO_2 -Konzentrationen treten den Einzelwirkungen der Schadstoffe analoge Effekte auf.

Schlüsselwörter: Erbsen, Cd- SO_2 -Einzel-, Kombinationswirkungen, Toxizitätsgrenzwerte, Stoffwechsel.

S U M M A R Y

Pea plants were grown under controlled environmental conditions until maturity and subjected to realistic concentrations of cadmium (5, 10, 15 ppm soil dry matter) and SO_2 (0,1 mg/m^3), singly and in combination. The dry matter yield of the vegetative shoots is not reduced by SO_2 applied singly but by 5-10 ppm cadmium singly and by 5 ppm cadmium combined with SO_2 . The cadmium concentration of the shoots increases with increasing cadmium contamination of the soil and is not affected by SO_2 . In contrast to this, total sulfur is elevated by both SO_2 and cadmium singly (15 ppm) and in combination. The cadmium concentration of the seeds (small peas) exceeds the safety level of cadmium in vegetables in all cadmium treatments and even at single application of SO_2 . On the metabolic level, the decreased proline and the increased water content as well as the buffer capacity of the fumigated plants suggest a different mode of action of SO_2 during long-time exposure to low levels than in short-time experiments with relatively high SO_2 concentrations. As the only metabolic response to single long-time cadmium exposure a stimulation of the peroxidase activity could be established. The metabolic alterations of plants subjected to the combined impact of SO_2 and cadmium are similar to the effects of the single toxicants.

Key words: Pea plants, Cd- SO_2 contamination, single and combined effects, toxic levels, metabolism.

L I T E R A T U R

- Auermann, E., Dässler, H.-G., Cumbrowski, J., Kneuer, M., Jacobi, J. und Kühn, H., 1979: Cadmiumgehalt pflanzlicher Nahrungsmittel im Wirkungsbereich einer Bleihütte. Die Nahrung, 23, S. 875-890.
- Bergmeyer, H.U., 1974: Methoden der enzymatischen Analyse. Verlag Chemie, Weinheim, 2353 S.
- Bundesgesundheitsamt, 1979: Richtwerte 1979 für Blei, Cadmium und Quecksilber in und auf Lebensmitteln. Bundesgesundheitsblatt 22, Nr. 15, S. 282-283.
- Claussen, T., 1979: Schwermetalle und andere toxische Spurenelemente in der Nahrungskette des Menschen. Ber.Ldw. 57, S. 105-117.
- Czuchajowska, Z. und Przybylski, T., 1978: The seasonal changes of acidity and buffer capacity of aqueous homogenates of Pinus silvestris needles and the influence of zinc-plant immissions. Bull.de L'Academie Pol.des Sci., 26, S. 361-368.

- Ernst, W., 1974: Schwermetallvegetation der Erde. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 194 S.
- Fischer, K., 1967: Cytologische und physiologische Wirkungen von SO_2 auf höhere Pflanzen. Diss. Darmstadt.
- Grill, D., 1971: Pufferkapazität gesunder und rauchgasgeschädigter Fichtennadeln. Z.Pflanzenkrankh., Pflanzenschutz, 78, S. 612-621.
- Haut, van, H. und Stratmann, H., 1970: Farbtafelatlas über Schwefeldioxidwirkungen an Pflanzen. Verlag W. Girardet, Essen, 206 S.
- Jäger, H.-J., 1974: Mechanismen der SO_2 -Schädigung von Pflanzen. Tagungsbericht der IX. internat. Tagung über die Luftverunreinigung und Forstwirtschaft in Mariánske Lázně (Tschechoslowakei), S. 415-425.
- Jäger, H.-J., 1975: Zur säulenchromatographischen Bestimmung freier Aminosäuren und Diamine in Pflanzenmaterial. Angew. Bot., 49, S. 25-30.
- Jäger, H.-J. und Steubing, L., 1970: Fraktionierte Schwefelbestimmung in Pflanzenmaterial zur Beurteilung einer SO_2 -Einwirkung. Angew. Bot., 44, S. 209-221.
- Jäger, H.-J. und Grill, D., 1975: Einfluß von SO_2 und HF auf freie Aminosäuren der Fichte (*Picea abies* L. Karsten). Eur.J.Forest Pathol., 5, S. 279-286.
- Jäger, H.-J. und Klein, H., 1980: Biochemical and physiological effects of SO_2 on plants. Angew. Bot., im Druck.
- Keller, T., 1976: Auswirkung niederer SO_2 -Konzentrationen auf junge Fichten. Schweiz. Z. Forstwesen, 127, S.237-251.
- Keller, T., 1977: Begriff und Bedeutung der "latenten Immissionschädigung".Allgem.Forst- und Jagdz., 148, S.115-120.
- Klein, H. und Jäger, H.-J., 1976: Einfluß der Nährstoffversorgung auf die SO_2 -Empfindlichkeit von Erbsenpflanzen. Z. Pflanzenkrankh., Pflanzenschutz, 83, S. 555-568.
- Klein, H., Jensch, U.E. und Jäger, H.-J., 1979: Die Schwermetallaufnahme von Maispflanzen aus Zink-, Cadmium- und Kupferoxid-kontaminiertem Boden. Angew.Bot., 53, S. 19-30.
- Klein, H., Priebe, A. und Jäger, H.-J., 1980: Grenzen der Belastbarkeit von Kulturpflanzen mit dem Schwermetall Cadmium. Angew.Bot., im Druck.
- Rabe, R. und Kreeb, K., 1976: Eine Methode zur Laborbegasung von Testpflanzen mit Schwefeldioxid und ihre Anwendungen bei Untersuchungen zur Enzymaktivität. Angew. Bot., 50, S. 71-78.
- Ziegler, I., 1975: The effect of SO_2 -pollution on plant metabolism. Residue Rev., 56, S. 79 - 105.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien](#)

Jahr/Year: 1981

Band/Volume: [137_2_1981](#)

Autor(en)/Author(s): Grünhage Ludger, Klein Hartmut, Jäger Hans-Jürgen

Artikel/Article: [Langzeitwirkungen von freilandrelevanten SO₂- und Cadmiumkonzentrationen auf Pflanzen 309-317](#)