

Aus der Bezirks-Hygieneinspektion und -institut Magdeburg
 Abteilung Lufthygiene und Referenzlaboratorium
 Reinhaltung der Luft der DDR
 (Bezirkshygieniker und Direktor: MR Dr. med. B. Thriene)

Der Luftschadstoff SO₂ und seine Wirkung auf die Vegetation

Von Claus-Jürgen Schulz und Johannes Richter

Mit 3 Abb. und 8 Tabellen

(Eingegangen am 13. April 1984)

1. Einleitung

Der Luftschadstoff Schwefeldioxid besitzt die Bedeutung eines Leitschadstoffes in der Umwelt des Menschen. Zur Charakterisierung dieses Schadstoffes beschäftigt sich die vorliegende Arbeit in Auswertung der Literatur mit dem Emissions- und Immissions- sowie dem Ausbreitungs-, Reaktions- und Depositionsverhalten. In den folgenden Abschnitten soll dann auf die Wirkung von Schwefeldioxid auf Pflanzen eingegangen werden. Eine Zusammenstellung charakteristischer Daten zum Luftschadstoff SO₂ zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1. Charakteristische Daten zum Luftschadstoff SO₂

Chemische Bezeichnung: Schwefeldioxid				Formel: SO ₂	
MIK _K (mg/m ³)	MIK _D (mg/m ³)	MAK _K (mg/m ³)	MAK _D (mg/m ³)	Geruchsschwellenwert (mg/m ³)	Giftabt.
0,5	0,15	10,0	—	0,8	—
Molekulargewicht: 64,06		Aggregatzustand: gasförmig		Umrechnung 1 ppm \triangleq 2,86 mg	
Siedepunkt (°C) - 10		Dichte (g/cm ³) 1,462		Umrechnung 1 ppm \triangleq 0,35 ppm	
Farbe: farblos		Geruch: stechend			

2. Emission, Immission und Schadstoffverhalten von SO₂

Schwefeldioxid entsteht in großer Menge vorwiegend bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energiegewinnung. Global übersteigt die anthropogene SO₂-Emission die natürliche Emission von Schwefelverbindungen gegenwärtig um den Faktor 3 (Möller 1982). Als Emissionsquellen natürlicher Emissionen unterscheidet man geophysikalische (Vulkanismus, Meeressgisch) und biogene Quellen.

In Industriestaaten nehmen SO₂-Emissionen aus Kraftwerken und Industriefeuerungen und aus dem Hausbrand etwa 90 % der anthropogenen Gesamt-SO₂-Emission ein.

Die restlichen 10 % der Gesamtemission werden von technologischen Prozessen der chemischen Industrie und der Stahlindustrie verursacht.

Die anthropogene SO₂-Emission in Europa soll sich nach Highton (1983) wie folgt entwickeln:

1972	61 · 10 ⁶ t/a	1992	71 · 10 ⁶ t/a
1982	61 · 10 ⁶ t/a	2002	81 · 10 ⁶ t/a

In den lufthygienisch belasteten mitteleuropäischen Staaten liegt die Emissionsdichte für SO₂ zur Zeit etwa zwischen 10 und 40 t SO₂/km²a. Bei den Energiegewinnungsanlagen als Hauptemissionsquellen für SO₂ können notwendige Emissionssenkungen durch Energieeinsparungen, durch Brennstoffschwefelung oder den Einsatz schwefelärmer Brennstoffe und durch Abgasentschwefelungsanlagen erreicht werden. In der DDR ist der Energieträger Rohbraunkohle die Grundlage der Energiegewinnung, und es bestehen zur Zeit kaum Anwendungschancen einer Brennstoffschwefelung. Neben der Energieeinsparung ist die Rauchgasentschwefelung an ausgewählten Objekten in industriellen Ballungsräumen die anzuwendende Maßnahme zur Senkung der SO₂-Emissionen. Dabei bietet das bereits erprobte trockene Kalkstein-Additivverfahren beim Einsatz von Rohbraunkohle günstige Voraussetzungen (Kluge 1980).

In der Atmosphäre unterliegt SO₂ verschiedenen Oxydationsreaktionen. Je nach Konzentration an katalytisch wirksamen Stoffen, wie Stäuben von Metalloxiden, Stickoxiden und Kohlenwasserstoffradikalen in der Luft und dem Vorhandensein von photochemisch wirksamem Licht werden 20–50 % des SO₂ zu Sulfaten oxydiert. Diese liegen dann in Form von Schwefelsäuretröpfchen, als (NH₄)₂SO₄, CaSO₄, MgSO₄, Na₂SO₄ bzw. zu einem geringen Anteil in Form organischer Schwefelverbindungen vor. Die Verweildauer der Reaktionsprodukte beträgt in der Regel 3–5 Tage, wobei Transportwege je nach Ableitungshöhe von mehr als 1000 km zurückgelegt werden können.

Das geschätzte Konzentrationsmittel beträgt 100 µg⁻³, wobei Massenströme von 0,08 × 10⁻⁹ g cm⁻²s⁻¹ bzw. 25,2 t km⁻²a⁻¹ berechnet werden (Knabe 1979). Weitere Angaben zur Belastungssituation gibt Tabelle 2 wieder.

Tabelle 2. SO₂-Belastungssituation

Parameter	Angabe in	Unbelastetes Gebiet	Belastetes Gebiet	Literatur
durchschnittliche Immissionskonzentration	mgSO ₂ /m ³	0,005–0,04	0,07–0,5	(Schärer 1980)
	mgSO ₄ ²⁻ /m ³	0,001–0,01	0,01–0,02	(Häberle 1982)
Regen	mgS/l	≈ 1	≈ 2	(Waldschäden 1982)
	pH-Wert	5,2–5,6	< 4,2	(Ulrich 1981)
Sulfat in Schwebstaub	mgS/m ³	1000–3000		(Schärer 1980)
SO ₂ -Oxydationsrate	% SO ₂ /h	0,5	2–4	(Schärer 1980)
S-Trockendepositon	kgS/ha × a	50 (bei	125 (bei	(Energie 1981)
		0,04 mgSO ₂ /m ³)	0,1 mgSO ₂ /m ³)	

Zur Charakterisierung von Umwandlungsschemismen kann man ausgehend von SO₂ die Werte für SO₃ mit etwa 1/100 und für H₂SO₄ mit etwa 1/50 der SO₂-Konzentration angeben (Groß 1979). Gesetzlich festgelegte Maximale-Immissions-Konzentrationen (MIK) einiger Länder für SO₂ sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Aufgrund der hohen Verweildauer von SO₂ und seiner Reaktionsprodukte und der weiten Transportwege entwickelt sich die SO₂-Belastung zu einem internationalen Problem der europäischen Länder, insbesondere auch durch den grenzüberschreitenden Langstreckentransport.

Tabelle 3. SO₂-MIK-Werte

Land	Mittlere SO ₂ -Konzentration mg/m ³				Literatur
	30 min	1 h	24 h	1 Jahr	
BRD	0,4			0,14	(Knoepfel 1980)
ČSSR	0,5		0,15		(Stern 1977 b)
DDR	0,5		0,15		(Tabellen 1982)
Frankreich			1,0		(Stern 1977 b)
Italien	0,75		0,38		(Stern 1977 b)
Polen ¹	0,9		0,35		(Stern 1977 b)
²	0,25		0,075		
Rumänien	0,75		0,25		(Stern 1977 b)
Spanien				0,15	(Stern 1977 b)
Ungarn	0,5		0,15		(Stern 1977 b)
UdSSR	0,5		0,05		(Grenzkonzentration 1978)
EG-Leitwerte ³			0,1–0,15	0,04–0,06	(Schärer 1980)
WHO			0,2	0,06	(Knoepfel 1980)
Japan		0,26	0,1		(Schärer 1980)
USA			0,365	0,08	(Schärer 1980)

¹ geschützte Gebiete ² speziell geschützte Gebiete ³ in Zusammenhang mit Staub

3. SO₂-Wirkungsbeschreibung auf die Vegetation

Schwefeldioxid kann je nach Einwirkungskonzentration und -dauer zu unterschiedlichen Schädigungsarten führen. Man unterscheidet akute und chronische Pflanzenschädigungen (Däfler 1981, Schwefeldioxid 1975). Akute Schädigungen durch kurzzeitige Einwirkung höherer SO₂-Konzentration äußern sich als:

- typische Nekrosen der Blattspitzen, Blattränder oder Interkostalfelder,
- Ausfall eines großen Teiles der assimilationsfähigen Zellen,
- Verminderung der organischen Stoffproduktion,
- Depression von Wachstum, Entwicklung und Produktivität.

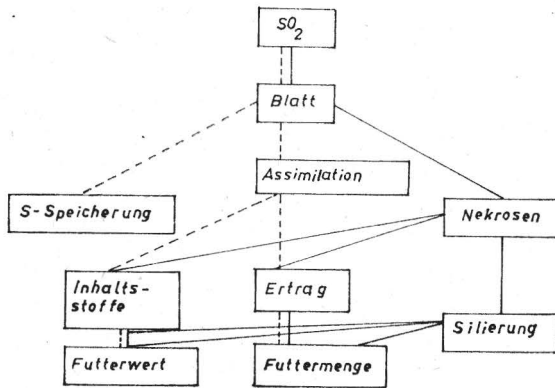
Chronische Schädigungen durch wiederholte oder länger andauernde Einwirkung von nicht akut schädigenden (unterschwellig) Konzentrationen sind gekennzeichnet durch:

- meist äußerlich nicht sichtbare Schädigungssymptome,
- Schädigungen im mikroskopischen und submikroskopischen Bereich,
- eventuell örtliche Absterbeerscheinungen mit Auswirkungen auf die Stoffproduktion,
- Schadstoffanreicherung in Pflanzenteilen,
- schwer nachweisbare Schäden, wie zunehmende allgemeine Schwächung der Pflanzen, Kleinerbleiben bzw. vorzeitiges Absterben der Assimilationsorgane, verminderter Zuwachs und geringere Ertragsleistung.

Bei SO₂-Einwirkung unterschiedlicher Konzentrationen besteht folgende in Abb. 1 dargestellte Wirkungskette (Däfler 1971).

Die darin beschriebenen Schädigungssymptome sind Resultat folgender Wirkungsmechanismen:

- stoffwechselphysiologische Veränderungen,
- Verminderung der Photosyntheseleistung (Assimilationsdepression),
- pH-Wertänderungen mit Auswirkungen auf Fermentsysteme (Stoffwechselstörungen),
- Störung von Enzymsystemen (Atmungsstoffwechsel, Photosynthese),
- Störungen im Zellstoffwechsel.

Abb. 1. Wirkungskette SO₂ nach (Däfler 1971)

—— Wirkung hoher SO₂-Konzentrationen

----- Wirkung langfristiger SO₂-Immissionen niedriger Konzentrationen

Oft resultieren aus der allgemeinen Schwächung besondere Anfälligkeiten gegenüber anderen Einflüssen wie Schädlingsbefall, parasitischer Pilzbefall, Frost, Dürre oder Nährstoffmangel. Auch Veränderungen in der gentyptischen Struktur von Populationen, Verminderung des Genbestandes einer Population oder gar Auslöschung werden beschrieben (Scholz 1981).

4. Meßgrößen bzw. Bewertungskriterien für Pflanzenschädigungen

Im wesentlichen stützen sich Schadbewertungen auf folgende Untersuchungen (Rudolph 1978 a):

1. physiologisch-biochemische Untersuchungen wie:

- chemische Analysen (Schadstoffakkumulation, Proteingehalte, Chlorophyllgehalt),
- ökophysiologische Analysen (Gaswechsel, Wasserhaushalt),
- biochemische Analysen (Enzymaktivität, Pigmentspiegel, Fermentaktivität),

2. visuelle Untersuchungen wie:

- ertragskundliche Untersuchungen (Zuwachs, Bestandshöhe, Jahrringanalyse),
- pflanzenchorologische Untersuchungen (Artenspektrum, Artenhäufigkeit),
- morphologische Untersuchungen (Entwicklungsstörungen, Nekrosen, Schäden, Wachstumsänderungen, Regenerationserscheinungen),
- cytologische Untersuchungen (Zellschädigung, Chloroplastendeformationen, Gerbstoffausfällungen).

In der Literatur werden Begasungsversuche und Freilandversuche beschrieben. In der Vergangenheit führte man vielfach Begasungsversuche mit relativ hohen SO₂-Konzentrationen durch, um sich zunächst an die schädigenden Konzentrationsbereiche heranzutasten bzw. Relativempfindlichkeiten festzustellen. Aufgrund vielfältiger chronischer Schadenerscheinungen in der Vegetation untersucht man in letzter Zeit häufiger die SO₂-Schadwirkungen unter Freilandbedingungen bei niedrigeren Schadstoffkonzentrationen, wobei man Vergleichsuntersuchungen mit gefilterter Außenluft parallel dazu durchführt. Diese Art der Untersuchung bedingt allerdings meist einen größeren Zeitaufwand.

5. Bioindikation

Den Bioindikatoren kommt bei der Kontrolle und Überwachung anthropogener Einflüsse auf die Biosphäre große Bedeutung zu. Für die Erfassung des Umweltschadstoffes Schwefeldioxid finden die verschiedensten Verfahren bzw. Bioindikatoren Verwendung. Die biologische Wirkung kann sowohl in ihrer Langzeit- als auch in ihrer Kurzzeitwirkung gemessen werden. Dabei spielen allerdings auch andere ökologische Faktoren sowie weitere Schadstoffe eine Rolle. Man unterscheidet zwischen sensitiven und akkumulativen Bioindikatoren. Erstere, deren Wirkungsfeld äußerlich erkennbar ist, reagieren empfindlicher gegenüber Schadstoffen, während letztere die Schadstoffe ohne erkennbare Schädigung anreichern. Anhand dieser Anreicherung wird die Belastungshöhe eingestuft. Generell kann man sagen, daß eine Kontrolle der ökologischen Änderungen in der Biosphäre mittels Bioindikatoren energie-, zeit- und kostensparend ist. Gemeinsam mit technischen Meßverfahren für Umweltschadstoffe ist somit eine effektive Überwachung unserer Umwelt optimal möglich. Bei der Anwendung schadstoffunspezifischer Indikatoren kann es allerdings Schwierigkeiten bei der Ursachenermittlung geben.

Eine Auswahl bisher verwendeter Bioindikatorenverfahren für den Schadstoff SO₂ sowie wichtige Ergebnisse daraus werden in den folgenden Punkten vorgestellt. Auch die im Abschnitt 6 beschriebenen Dosis-Wirkungsbeziehungen hinsichtlich Ertragsdepressionen stellen eine Art Bioindikation dar.

5.1. Blätter und Nadeln als Bioindikatoren

Die Schwefelanreicherung in pflanzlichen Substraten ist ein Maß für Immissionswirkungen von SO₂. Dabei haben Standortunterschiede nur einen geringen Einfluß auf den S-Gehalt. Genetische Unterschiede beeinflussen dagegen den S-Gehalt erheblich. Während der Vegetationsperiode stellt man an den Assimilationsorganen eine S-Zunahme fest. In Tabelle 4 sind S-Gehalte in verschiedenen pflanzlichen Substraten für immissionsfreie Gebiete und für Belastungsgebiete zusammengetragen.

In der DDR arbeiten eine Reihe von Wissenschaftlern auf dem Gebiet der Bioindikation. Schadstoffanreicherungen in und auf Pflanzenteilen eignen sich als Indikatoren von Luftverunreinigungen (Börtitz 1980). Nadeljahrgangsuntersuchungen und Nekroseklassifizierungen an Nadeln stellen wichtige Methoden zur Bioindikation von ökologischen Veränderungen in industriellen Ballungsgebieten dar (Schubert 1977). In der BRD existieren einige dezentrale flächendeckende Kataster, die auf der analytischen S-Gehaltserfassung von Fichtennadelproben bestimmter Standorte basieren und somit Bioindikatormessnetze darstellen (Rudolph 1978 a). Das Verfahren der standardisierten Graskultur (Messen 1978) ermöglicht durch die Messung von Schadstoffanreicherungen einen Einblick in Höhe und Art der Belastung durch Immissionskomponenten.

5.2. Flechten als Bioindikatoren

Flechten werden seit längerer Zeit als Bioindikatoren für die Phytotoxizität von Luftverunreinigungen verwendet.

Dabei kommen sie meistens als komponentenunspezifische, sensible Bioindikatoren zum Einsatz. Bei SO₂-Belastung läßt sich folgendes Wirkungsverhalten feststellen:

- Drastische Beeinträchtigung der Photosynthese des Algenpartners der Flechten
- Auftreten sichtbarer Symptome in Form von Thallusaufhellung oder Nekrosen
- Veränderung des Thallusaufbaues, Nachlassen der Vitalität, Dezimierung der Flechtenarten durch Absterben empfindlicher Spezies (Flechtenwüsten)
- Morphologische und physiologische Veränderung der chlorophyllführenden Algenzellen (Plasmolyse → Chlorophyllzerstörung → Zelltod).

Tabelle 4. Bioindikation durch S-Gehaltsbestimmungen in Pflanzenteilen

Unbelastetes Gebiet SO ₂ -Belastung 0,04 mg/m ³	Industriegebiet SO ₂ -Belastung 0,08 mg/m ³		Bemerkungen	Literatur
S-Gehalt µg/gTS	S-Gehalt µg/gTS			
Fichten- u. Kiefernadeln: 1340—1460	1490—1610 2000—2100		Fichtennadel Fichtennadel/Spitzenwerte	(Rudolph 1978 a)
1200 1600	1600 2500 2300	0,1 mgSO ₂ /m ³ 0,1 mgSO ₂ /m ³ 0,08 mgSO ₂ /m ³	1jährige Fichtennadel 2jährige Fichtennadel 2jährige Fichtennadel	(Solar 1981)
200—1400 300—1800	2900—3000	starke Immission	1jährige Fichtennadeln, verschiedene Autoren 1jährige Kiefernadeln, verschiedene Autoren	(Rudolph 1978 b)
	2150	Großstadt	Fichten- und Kiefernadeln Umgebung Frankfurt/Main	(Wentzel 1979)
	3000	Überlastungszone	Wirkungsgrenzwerte (Knabe) NRW, Stufe I Immissionsschutzwald	(Moser 1981)
	2500—3000 ab 2000	Belastungszone	NRW, Stufe II wirtschaftliche Schäden in Forstbeständen	
Andere Biosubstanzen 2200	3930 4450—6250	1 mgSO ₂ /m ³	Begasungsversuch Futterhirse je nach verschärften Klimabedingungen	(Wirkungen 1981)
3450	8650 7250 9200	1 mgSO ₂ /m ³ 0,4 mgSO ₂ /m ³ 1 mgSO ₂ /m ³	Weidelgras Weidelgras Weidelgras, verschärfte Klimabedingungen	
3900 4100 4600 2900	5300 8200 8800 7400		Getreidepflanzenblätter Weizen Gerste Hafer Roggen	(Fragen 1956)
	5200 4900		Weidelgras (Verfahren der standardisierten Graskultur) — Schutz weniger empfindl. Pflanzen — Schutz sehr empfindl. Pflanzen	(Messen 1978)

Bei der Einstufung der Dübener Heide in verschiedene Schadzonen wurden SO₂-empfindliche Flechten eingesetzt (Schubert 1977). Dabei untersuchte man insbesondere den Schädigungsgrad (Farbänderung), den Chlorophyll a-Gehalt und den Gesamtkohlenhydratgehalt. Flechtentransplantate eignen sich zur lufthygienischen Überwachung sowohl in Ballungsräumen als auch in Kleinstädten (Schuschke 1974, Schulze 1982). Als Schwellenwert für ein ungeschädigtes Überleben von Flechten gelten SO₂-Konzentrationen unter 0,005–0,013 mg/m³. Entscheidenden Wirkungseinfluß haben neben dem Gesamtschadstoffgehalt der Luft auch Substratqualität und Wasserversorgung (Mikroklima). Flechtentransplantate zeigen schon bei einer Beaufschlagung von 15 mg SO₃ je 100 cm⁻² und 28 d irreversible Nettophotosyntheseeinschränkungen (Türk 1980). Einige Artenbeispiele von Flechten und Moosen und ihre Empfindlichkeit gegenüber SO₂ sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5. Flechten- und Moosempfindlichkeit gegenüber SO₂ (Schärer 1980)

Flechten	sehr empfindlich	<i>Parmelia furturacia</i> <i>Cetraria chlorophylla</i>
	empfindlich	<i>Parmelia physodes</i> (findet Verwendung für Flechten-expositionsverfahren) <i>Cladonia bellidiflora</i>
	sehr widerstandsfähig	<i>Rhizocarpon geographicum</i> <i>Lecanora varia</i>
Moose	sehr empfindlich	<i>Sphagnum spec.</i> <i>Polytrichum commune</i>
	ziemlich widerstandsfähig	<i>Dicranella heteromella</i> <i>Pohlia nutans</i>

Verschiedene Dosis-Wirkungsbeziehungen für SO₂-Einwirkung auf Flechten und Moose zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6. Dosis-Wirkungsbeziehungen von Moosen und Flechten (Schärer 1980, Arzani 1974)

Schadstoffkonz. mg/m ³	Art	Bemerkung
0,0055–0,013	Moose Flechten	keine Schäden bei Dauereinwirkung
0,025–0,03	Flechten	Verarmung der Flechtenflora bei Jahresmittel
0,05	Flechten Moose	eine Reihe von Flechten und empfindlichen Moosen sterben bei Dauereinwirkung ab
0,016–0,08	Flechten Moose	latent geschädigt bei Dauereinwirkung
> 0,08	Flechten Moose	akut geschädigt bei Dauereinwirkung
0,4	Flechten	nach 19 Tagen Einwirkung sterben Flechten ab
0,5	Flechten	lufttrockene Flechten – keine Assimilationssenkung gequollener Zustand, 11 h Wirkung im Dunkeln 30 % Assimilationsdepression
3	Flechten	5 h letal
8,6	Flechten	45 min Bruttoassimilation sinkt signifikant (noch langsam partielle Erholung möglich)
11,4	Flechten	signifikantes Absinken der Photosyntheserate

Das in der BRD praktizierte Verfahren der standardisierten Flechtentafeln gestattet z. B. die Feststellung der pflanzenschädlichen Summenwirkung der einwirkenden relevanten Luftverunreinigungen (Messung 1982). Bei 10 % Flechtenabsterberate und darüber treten Blatt- und Nadelschädigungen in Form von Chlorosen und Nekrosen an der Vegetation im Freiland auf. Dagegen muß bei 16–35 % Absterberate die Artenauswahl bei Neuaufforstungen eingeschränkt werden. Über 35 % Flechtenabsterberate ermöglicht nur noch sehr stark eingeschränkte Artenauswahl bei Neuaufforstungen, wobei hauptsächlich nur noch Laubbäume zur Aufforstung Verwendung finden sollten.

6. Dosis - Wirkungsbeziehungen in Land- und Forstwirtschaft

Aus der recherchierten Literatur, Schadwirkungen von SO₂ auf Pflanzen betreffend, konnten Dosis-Wirkungsbeziehungen bei verschiedenen SO₂-Konzentrationen für die Land- sowie Forstwirtschaft zusammengestellt werden. Neben der Betrachtung wirtschaftlich wichtiger Pflanzenarten muß auch die SO₂-Langzeitimmissionswirkung auf die Stabilität von Ökosystemen Berücksichtigung finden. Dies bedeutet Verlust an Formenvielfalt in der Vegetation, z. B. sind durch anthropogene Einflüsse 20 000 von etwa 250 000 bekannten Gefäßpflanzen akut vom Aussterben bedroht (Schärer 1980). Gleichzeitig stellt dies einen irreversiblen Verlust an Genmaterial dar.

Hauptschwierigkeit bei der Erfassung von Wirkungen ist der klare wissenschaftliche Nachweis darüber, daß Artenverschiebungen und Ertragsminderungen auf Luftverschmutzungen zurückzuführen sind und nicht auf die Änderung anderer ökologischer Faktoren. Zu den beeinflussenden ökologischen Faktoren gehören z. B. die Bodenqualität, die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie klimatische Faktoren wie Lichtintensität, Lufttemperatur und Luftfeuchte. Eine Reihe weiterer biologischer und Umweltfaktoren beeinflussen die pflanzlichen Reaktionen auf SO₂ ebenfalls stark, z. B.:

- Der Entwicklungsstand der Pflanze hat einen ausschlaggebenden Einfluß auf den Umfang der Schädigung.
- Die Jahreszeit ist für die Wirkungsausprägung von großer Bedeutung. So ist z. B. die Toleranz von Nadelhölzern und immergrünen Pflanzen bei niedrigen Temperaturen (im Winter) am höchsten.
- Bei guter mineralischer Nährstoffversorgung (besonders N, P, K und Ca) und bei ungenügender S-Versorgung durch den Boden ist bei verschiedenen Pflanzen eine höhere SO₂-Toleranz zu beobachten.
- Einzelne Spezies und Varietäten bestimmter Arten (z. B. Getreide, Koniferen) sind besonders empfindlich, andere besonders unempfindlich gegen SO₂.
- Bei höherer Windgeschwindigkeit ist eine stärkere Pflanzenschädigung zu erwarten.

Eine zusammengefaßte Darstellung zu Dosis-Wirkungsbeziehungen enthält Tabelle 7, wobei die zitierte Literatur meist schon Übersichtscharakter besitzt. Anhand der prozentualen Ertragsdepressionen in Abhängigkeit von der SO₂-Schadstoffbelastung wird eine eventuelle Wirkungsabschätzung ermöglicht. In der Tabelle sind wichtige land- und forstwirtschaftliche Kulturen beschrieben, mit denen große Teile des Waldes bzw. der landwirtschaftlichen Nutzfläche bebaut werden. Generell muß man davon ausgehen, daß Pflanzen gegenüber Schadstoffkonzentrationen um 0,15 mgSO₂/m³ (MIK_D-Wert) bereits mit erheblichen Ertragsschäden reagieren.

7. Mathematische Zusammenhänge zu Dosis - Wirkungsbeziehungen

Folgende Regressionsgleichung beschreibt die Beziehung zwischen vermindertem

Ertrag und dem Prozentsatz der geschädigten Blattfläche für Alfalfa (Luzerne) und SO₂-Wirkung (Stern 1977 a):

$$y = a + bx$$

y = Ertrag, in % der Kontrolle
 a = Konstante von annähernd 100 %
 b = Neigung der Ausbeute-Blattzerstörungskurve
 x = % geschädigter Blattfläche

Tabelle 7. Dosis-Wirkungsbeziehungen in der Forst- und Landwirtschaft

Schadstoffbelastung mgSO ₂ /m ³	Kultur	Bemerkungen	Ertragsdepression [%]	Zusammengefaßt aus Literatur
0,05 0,07 0,10 0,15 0,18 0,20	Koniferen		— 20 20—40 40—60 60—80	(Schärer 1980, Energie und Umwelt 1981, Guderian 1968, Papers 1980)
		keine Überlebenschance		
0,10 0,12 0,15 0,24 0,4	Laubwald	noch immissionschutzrelevante Flächennutzungsart Zuwachsverlust bei Dauereinwirkung		(Schärer 1980, Energie und Umwelt 1981, Guderian 1968)
		Zuwachsverluste bei kurzzeitiger Einwirkung	40—50 60—75	
0,06 0,10 0,15 0,20	Getreide (Roggen, Weizen, Gerste, Hafer)		0—10 10—15 15—20 20—30	(Däfler 1981, Guderian 1968, The costs 1981)
0,06 0,15 0,25 0,40	Hackfrüchte (Kartoffel, Runkelrübe)		0—10 10—15 20—30 30—50	(Guderian 1968)
0,06 0,15 0,25 0,40	Feldfutterpflanzen (Rotklee, Luzerne)		0—1 1—4 15—80 40—80	(Däfler 1981, Guderian 1968, Krause 1979)
0,05 0,10 0,20 0,38 0,75	Weidegrasland (Lolium perenne)		0 20 40 60 80	(Papers 1980)
		ausreichender Bodenschwefel		
0,1 0,2 0,3 0,4 0,6	Intensivgrasland (Mehrfachernte, durchgängig geringer Verlust, da S-Mangel ausgeglichen wird)		0 2 12 20 30	(Papers 1980)

In Tabelle 8 sind Bedingungen und Beziehungen für einige unterschiedliche Regressionsgleichungen zusammengefaßt.

Tabelle 8. Regressionsgleichungen zu Dosis-Wirkungsbeziehungen

Beziehung	Bedingungen	Pflanzenart
$y = 99,5 - 0,30 x$	1—5 ppm für 1—2 h	Alfalfa
$y = 95,5 - 0,49 x$	— einmal exponiert	(Luzerne)
$y = 96,6 - 0,75 x$	— zweimal exponiert	
	— dreimal exponiert	
$y = 99 - 0,37 x$	0,1—3 ppm für 1—600 h	Alfalfa (Luzerne)
$y = 98 - 0,06 x$	erstes Vegetationsstadium	Gerste (vergleichbar mit
$y = 98 - 0,40 x$	blühendes Stadium	anderen Getreidesorten)

Nach einer OECD-Studie (The costs . . . 1981) können Ertragsverluste für Raigras (*Lolium perenne*) nach folgender Formel berechnet werden:

$$y = 116,25 + 29,62 \log_e x \quad \begin{array}{l} y = \text{Ertragsverlust} \\ x = \text{Jahresdurchschnitt SO}_2\text{-Konz. } \mu\text{g/m}^3 \end{array}$$

Da Roggen, Weizen, Gerste und Hafer ähnlich empfindlich gegenüber SO₂ sind wie Raigras, kann mit Einschränkungen für diese Getreidesorten vorerst diese Formel Anwendung finden, wobei gegenüber den obigen Berechnungen, die Einbeziehung der Immissionskonzentration von Vorteil ist.

8. Kombinationswirkung

Die durch Luftverunreinigungen verursachten Schadwirkungen werden von der Gesamtmission, d. h. der Summe aller Luftschadstoffe bestimmt. Weitere Faktoren für Schadwirkungen sind z. B. Klima, Standort, Frost, Trockenheit und Schädlingsbefall. Die verschiedenen Einzelkomponenten der komplexen Immissionen führen zu unterschiedlichen Kombinationswirkungen. Neben verringerter oder additiver Wirkung kommt es auch oft zu einer synergistischen Wirkung verschiedener Luftschadstoffe.

In der Literatur werden dazu die verschiedensten Untersuchungsergebnisse erläutert. So waren Ertragsverluste von auf schwermetallbelasteten Böden angebauten Pflanzen bei SO₂-Einwirkung wesentlich höher als nur bei SO₂-Einwirkung (Däfler 1981). Kombinationswirkungen von SO₂ (0,009 bzw. 0,024 mg/m³) mit geringen Konzentrationen von H₂S, CS₂, Cl, F oder Kohlenwasserstoffen führen bei Buchweizen, Mais, Zuckerrübe, Hafer, Gerste, Alfalfa, Erbse, Bohne und Klee zu erheblicheren Trockenmasseproduktionsminderungen, als eine Alleinwirkung von SO₂ verursacht hätte (Navara 1978). Kombinationswirkungen von SO₂ und NO_x oder SO₂ und HF führen zu größeren Schädigungen als die Einzelkomponenten (Ashenden 1979, Wirkungen 1981). Die Abbildungen 2 und 3 zeigen beispielhaft die Auswirkungen einer solchen Kombination unter Berücksichtigung von Klimaeinflüssen.

9. Schlußfolgerungen

Die vorliegende Literaturstudie macht noch einmal deutlich, das Dosis-Wirkungsbeziehungen für den Luftschadstoff SO₂ auf Pflanzen nur unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Randbedingungen verwendet werden können, wie z. B. auch im Rahmen eines Wirkungskatasters (Richter 1983). So sind folgende Randbedingungen flächenmäßig für ausgewählte Schwerpunkte zu berücksichtigen, da sie entscheidenden Ein-

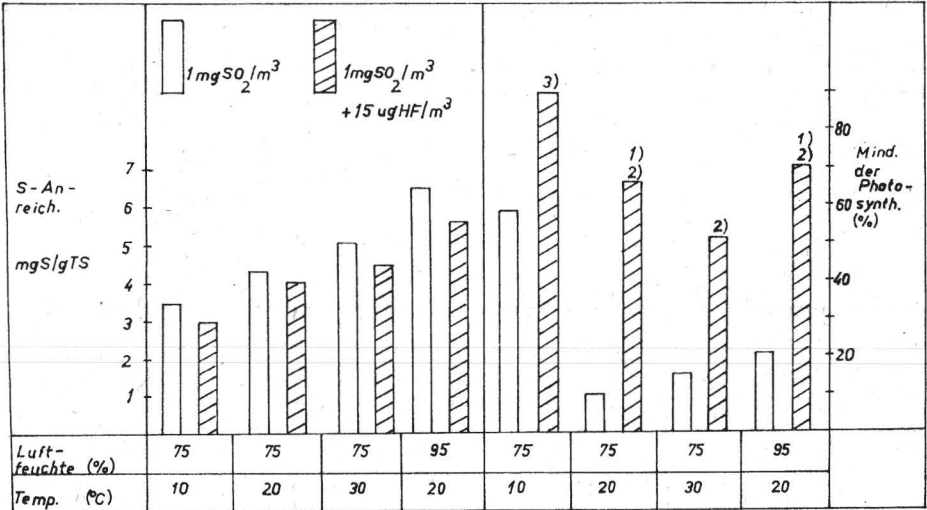


Abb. 2. Kombinationswirkung SO₂ und HF auf Futterhirse nach (Wirkungen 1981)
 1) signifikante Minderung des Trockensubstanzertrages, 2) Nekrosen, 3) Chlorosen

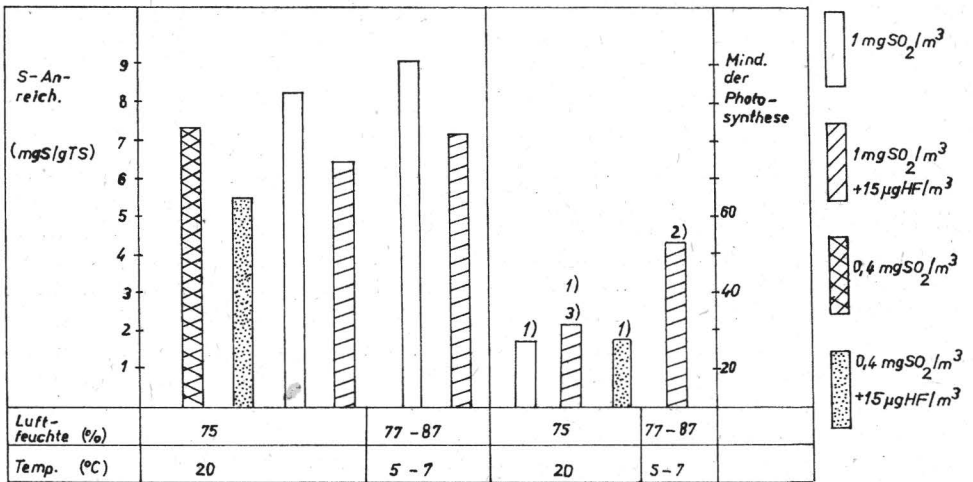


Abb. 3. Kombinationswirkungen SO₂ und HF auf Weidelgras nach (Wirkungen 1981)
 1) signifikante Minderung des Trockensubstanzertrages, 2) starke Nekrosen (50%),
 3) leichte Chlorosen

fluß auf Schadwirkungen besitzen können:

- sorten- bzw. artspezifische Unterschiede (Pflanzenempfindlichkeit differenziert),
- Entwicklungsstand der Pflanzen,
- Bodenqualität (Nährstoffversorgung, S-Versorgung),
- Klimabedingungen (Wasserversorgung, Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Lichtintensität),
- Jahreszeit,
- Schadstoffkombinationen,
- Sekundärschäden (Schädlingsbefall).

Die Komplexität eines solchen Zusammenwirkens verschiedenster Faktoren wird in letzter Zeit besonders bei den intensiven Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Waldschäden deutlich.

S c h r i f t t u m

- Arzani, G.: Ökophysiologische Untersuchungen über die SO₂-, HCl- und HF-Empfindlichkeit verschiedener Flechtenarten. Gießen: Univ., Fachber. Angew. Biologie, Diss. 1974.
- Ashenden, T. W.: Die Wirkungen langfristiger Einwirkungen von SO₂- und NO₂-Verunreinigungen auf das Wachstum von Hahnenfuß und Rispengras. Environm. Pollut., London **18** (1979) 249–258.
- Börtitz, S., und H. G. Däßler: Eignung von Schadstoffanreicherung in und auf Pflanzenteilen zur Indikation von Luftverunreinigungen. Wissenschaftliche Beiträge der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 1980/24 (P 8) 38–44.
- Däßler, H. G., und S. Börtitz: Zur Wirkungsweise von Luftverunreinigungen auf landwirtschaftlicher Erzeugnisse. Biolog. Zentralblatt **90** (1971) 611–619.
- Däßler, H. G.: Einfluß von Luftverunreinigungen auf die Vegetation, 2. Aufl. Gustav Fischer Verlag, Jena 1981.
- Energie und Umwelt, Sondergutachten März 1981. Verlag W. Kohlhammer GMBH, Stuttgart und Mainz 1981.
- Fragen der Luftverunreinigung: Vorträge der VDI-Tagung, Essen 1955, VDI-Berichte 15, VDI-Verlag, Düsseldorf 1956.
- Grenzkonzentrationen für die atmosphärische Luft in bewohnten Gebieten (PDK), Übersetzung der UdSSR-MIK-Werte vom 1. August 1978 Nr. 1892–78.
- Groß, H.: Wirkung von Luftverunreinigungen auf Anstriche und ähnliche Beschichtungen, Umweltbundesamt-Berichte 3/79. E. Schmidt-Verlag, Berlin (West) 1979.
- Guderian, R., und H. Stratmann: Freilandversuche zur Ermittlung von SO₂-Wirkungen auf die Vegetation, III. Teil: Grenzwerte schädlicher SO₂-Immissionen für Obst- und Forstkulturen sowie für landwirtschaftliche und gärtnerische Pflanzenarten. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1920. Westdt. Verlag, Köln und Opladen 1968.
- Häberle, M.: Stoffkreisläufe der Natur und Einfluß des Menschen. Umwelt, Düsseldorf **12** (1982) 15–22.
- Highton, N. H., und M. J. Chadwick: The effects of energy shiftson sulphur oxide levels in Europe: 1972–2002. Strategies and Methods to Control Emissions of Sulphur and Nitrogen Oxides. National Swedish Environment Protection Board Report PM 1637 (1983) 165–176.
- Kluge, W.: Methoden zur Reinhaltung der Luft: Rauchgasentschwefelung. Umweltinform., Information für leitende Kader. Umweltschutz 4. Jahrgang 7/80.
- Knabe, W.: Capacity and efficiency of vegetation in reducing airborne pollution in urban and industrial areas. ECE 11. Juli 1979 AGRI/SEM. 8/R. 12, TIM/SEM 9 R. 12.
- Knoepfel, P.: Handbuch der SO₂-Luftreinhaltepolitik (Teil I und II). E. Schmidt Verlag, Berlin W. 1980.
- Krause, G. H. M.: Relative Phytotoxizität von Schwefelwasserstoff. Staub **39** (1979) 165–167.
- Messen der Wirkdosis, Verfahren der standardisierten Graskultur, VDI 3792, Bl. 1, Juli 1978. VDI-Verlag, Düsseldorf 1978.
- Messung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen, Flechtenexpositionsverfahren, VDI 3793 E Bl. 2. VDI-Verlag, Düsseldorf 1982.
- Möller, D.: Das Verhältnis von anthropogener zu natürlicher globaler Schwefelemission. Z. ges. Hyg. **28** (1982) 11–15.
- Moser, E.: Beispiel einer konstruktiven Zusammenarbeit bei der Beurteilung der Immissionsschäden im Wald. Schweiz. Zschr. f. Forstwesen (1981) 214–222.
- Navara, J., I. Horvath und M. Kaleta: Contribution to the determination of limiting values of sulphur dioxide for vegetation in the region of Bratislava. Environm. Pollut., London **16** (1978) 263–275.

- Papers presented to the Symposium on the Effects of Airborne Pollution on Vegetation. Warschau 1980.
- Richter, J., und C.-J. Schulz: Lufthygienische Wirkungskataster. Hercynia N. F., Leipzig **20** (1983) 421–427.
- Rudolph, E.: Wirkungen von Luftverunreinigungen auf pflanzliche Indikatoren in Bayern. Schriftenreihe Naturschutz und Landschaftspflege Heft 9. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. R. Oldenbourg Verlag, München/Wien 1978.
- Rudolph, E.: Untersuchungen über S-Anreicherungen in Fichtennadeln im Bereich von Belastungsgebieten. VDI-Bericht 314, 1978, 257–261.
- Schärer, B.: Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid, Ursachen, Wirkungen, Minderung. Umweltbundesamt, Texte, Berlin (West), 1980.
- Scholz, F.: Genökologische Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Grund von Expositionsunterschieden im Bestand. Mitt. d. Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien **137** (1981) 93–102.
- Schubert, R.: Ausgewählte pflanzliche Bioindikatoren zur Erfassung ökologischer Veränderungen in terrestrischen Ökosystemen unter besonderer Berücksichtigung industrieller Ballungsgebiete. Hercynia N. F., Leipzig **14** (1977) 399–412.
- Schulze, H. D., und U. Mielke: Flechtentransplantationen in Kleinstädten – eine lufthygienische Überwachungsmöglichkeit. Z. ges. Hyg. **28** (1982) 114–116.
- Schuschke, G., U. Mielke und H. D. Schulze: Rindenbewohnende Flechten als lufthygienischer Bioindikator in Magdeburg. Z. ges. Hyg. **20** (1974) 415–421.
- Schwefeldioxid in der Atmosphäre – Luftqualitätskriterien SO₂. Bundesministerium für Gesundheits- und Umweltschutz, Wien 1975.
- Solar, M.: Versuch einer Großraumimmissionsbelastungsdiagnose nach der immissionsökologischen Waldzustandserfassungsmethode von Dr. W. Knabe. Mitt. d. Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien **137** (1981) 27–38.
- Stern, A. C.: Air Pollution, Vol. II: The Effects of Air Pollution, 3. Aufl. Academic Press, New York, San Francisco, London 1977.
- Stern, A. C.: Air Pollution, Vol. V: Air Quality Management, 3. Aufl. Academic Press, New York, San Francisco. London 1977.
- Tabellen der MIK- und TIB-Werte, 3. DB zur 5. DVO zum Landeskulturgesetz – Reinhaltung der Luft vom 15. März 1982, GBI. Teil I Nr. 21.
- The costs and benefits of sulphur oxide control – a methodological study. OECD, Paris 1981.
- Türk, R., und R. Christ: Untersuchungen des CO₂-Gaswechsels von Flechtenexplantaten zur Indikation von SO₂-Belastung im Stadtgebiet von Salzburg. Wissenschaftliche Beiträge der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 1980/25/P 9, 39–45.
- Ulrich, B.: Destabilisierung von Waldökosystemen durch Akkumulation von Luftverunreinigungen. Der Forst- und Holzwirt **36** (1981) 525–542.
- Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland, LIS-Berichte Nr. 28. Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Essen 1982.
- Wenzel, K.-F.: Die Schwefel-Immissionsbelastung der Koniferen-Wälder des Raumes Frankfurt/M. Forstarchiv Hannover **50** (1979) 112–121.
- Wirkungen von Fluorwasserstoff auf Lolium multiflorum, LIS-Berichte Nr. 14. Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Essen 1981.

Dipl.-Chem. Claus-Jürgen Schulz und
 Dipl.-Ing. Johannes Richter
 Bezirks-Hygieneinspektion
 und -institut Magdeburg
 DDR - 3040 Magdeburg
 Wallonerberg 2/3, PF 317