

## Nr.49

Wirkungen von  
Luftverunreinigungen  
auf die Vegetation

Bewertung der Luftanalyse auf der  
Grundlage weiterentwickelter Dosis-  
Wirkungsbeziehungen für Schwefel-  
dioxid und Ozon zur Ursachenauf-  
klärung der neuartigen Waldschäden

Herausgeber:

Landesanstalt für Immissionsschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Wallneyer Str. 6

D-4300 Essen 1

1984

ISSN 0720-8499

Wirkungen von Luftverunreinigungen  
auf die Vegetation

Bewertung der Luftanalyse auf der  
Grundlage weiterentwickelter Dosis-  
Wirkungsbeziehungen für Schwefeldioxid  
und Ozon zur Ursachenaufklärung der  
neuartigen Waldschäden

*Stratmann*  
Prof. Dr. H. Stratmann  
*✓*

## WIRKUNGEN VON LUFTVERUNREINIGUNGEN AUF DIE VEGETATION \*)

BEWERTUNG DER LUFTANALYSE AUF DER GRUNDLAGE WEITERENTWICKELTER DOSIS-WIRKUNGSBEZIEHUNGEN FÜR SCHWEFELDIOXID UND OZON ZUR URSACHENAUFKLÄRUNG DER NEUARTIGEN WALDSCHÄDEN

Prof. Dr. H. Stratmann

## Z u s a m m e n f a s s u n g

Am Beispiel der großflächigen Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland werden die wichtigsten diagnostischen Schritte zur Ursachenaufklärung von Vegetationsschäden als Folge der Einwirkungen von Luftverunreinigungen vorgestellt. Neben dem Komplex der direkten Diagnose mit Untersuchungen an den geschädigten Objekten selbst wird insbesondere der Luftanalyse in Verbindung mit Dosis-Wirkungsbeziehungen große Bedeutung als diagnostisches Hilfsmittel beigemessen.

Da dem Schadstoff Schwefeldioxid bei vielen Schadenshypothesen, mit Ausnahme der Ozonhypothese, eine vorrangige Bedeutung zugesprochen wird, sind die experimentell ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehungen des Schwefeldioxids eingehend untersucht worden. Es zeigte sich, daß die  $c \times t$ -Regel (Konzentration  $\times$  Zeit - Regel) im Laufe der letzten 60 Jahre von der O'GARA-Funktion bis zur Identität mit dem WEBER-FECHNERSchen Gesetz entwickelt wurde. Die allgemein gültige Anwendbarkeit der  $c \times t$  - Regel dürfte damit nicht nur für den sinnesphysiologischen und humantoxikologischen Bereich, sondern auch für den phytotoxischen Bereich geboten sein.

Wendet man deshalb als allgemeinere Formulierung die Potenzfunktion von STEVENS auf alle bisher ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehungen an, so läßt sich die Reizschwellenfunktion zur Auslösung von  $SO_2$ -Schäden an bestimmten Pflanzen wie folgt angeben:

$$\text{Reizschwellenfunktion : } c_0 \cdot t^n = K$$

( $c_0$  =  $SO_2$ -Konz.;  $t$  = Einwirkungszeit;  $K$  = Konstante).

Für sehr empfindliche Pflanzen, und hierunter fallen auch Forstkulturen, ist  $K$  mit  $0,23 \text{ mg} \cdot \text{h}^{0,17}/\text{m}^3$  und  $n$  mit  $0,17$  einzusetzen. Daraus lassen sich für alle möglichen Einwirkungszeiten (von Minuten bis zu mehreren Jahren) ohne Schwierigkeiten die Grenzkonzentrationen  $c_0$  berechnen. So ergibt sich beispielsweise für eine Einwirkungszeit von 10 Minuten eine Grenzkonzentration von  $312 \mu\text{g } SO_2/\text{m}^3$  und für 1 Jahr eine von  $49 \mu\text{g } SO_2/\text{m}^3$ . Zeitgebundene Grenzwerte für Luftschad-

-----  
\*) Vortrag auf der "2nd European Conference on Chemistry and the Environment" in Lindau vom 21.05. bis 25.05.1984

stoffe mit ihrer schwerfälligen Handhabung dürften damit überflüssig geworden sein.

Anhand einer nachträglichen Auswertung umfangreicher Freilanduntersuchungen aus den Jahren 1959/60 in der Umgebung eines SO<sub>2</sub>-Emittenten wird nachgewiesen, daß Schäden an Forstkulturen bei Einhaltung der Reizschwelldosis nicht festzustellen waren. Andererseits zeigen die Reinluftmeßstationen des Umweltbundesamtes, daß die SO<sub>2</sub>-Konzentrationen insbesondere in den Schadensgebieten "Bayerischer Wald" und "Schwarzwald" die Reizschwellenkonzentrationen weder für kurzfristige noch für langfristige SO<sub>2</sub>-Einwirkungen erreichen.

Die Luftanalyse liefert damit keine Anhaltspunkte für eine direkte Auslösung der großflächigen Waldschäden durch SO<sub>2</sub>-Einwirkungen. Völlig anders liegen die Verhältnisse beim Ozon, das in den Waldschadensgebieten in wesentlich höheren Konzentrationen als Schwefeldioxid auftritt. Hinzu kommt, daß nach den bisher vorliegenden experimentellen Untersuchungen über Dosis-Wirkungsbeziehungen für Ozon eine völlig andere Reizschwellenfunktion als bei allen anderen phytotoxischen Schadstoffen zu erwarten ist. Die c x t - Regel wird offenbar vom Ozon durchbrochen, wodurch auch verständlich wird, warum die Ursachenaufklärung der Waldschäden bis zu den Untersuchungen der LIS so lange im Dunkeln blieb.

#### S u m m a r y

The most important diagnostic steps employed in investigations concerning the causes of damage observed on the vegetation exposed to air pollution are introduced using the wide-spread forest damages found in the Federal Republic of Germany as an example to illustrate their application. Aside from the investigations summed up under the name direct diagnosis which include examinations of the damaged objects themselves, great emphasis is placed on the analysis of the ambient air along with investigations of the dose-effect-relationships as efficient auxiliary diagnostic means.

Because of the predominant role played by the air pollutant sulfur dioxide in many hypotheses on the causes of forest damage, with the exception of the ozone hypothesis, the experimentally determined dose-effect-relationships of sulfur dioxide were studied closely. It was found that the rule according to which the concentration is multiplied by the exposure time (c x t-rule) has progressed over the past 60 years from O'GARAS function to identity with the WEBER-FECHNER law. Thus it seems certain that the c x t-rule not only pertains to sensophysiology and human toxicology but also to phytotoxicology.

Therefore, application of the more general potential function by STEVENS to all dose-effect-relationships obtained to date leads to following threshold function for the initiation of SO<sub>2</sub>-injuries in certain plants:

$$\text{Threshold function: } c_0 \cdot t^n = K$$

(where  $c_0$  = SO<sub>2</sub> concentration;  $t$  = exposure time;  $K$  = constant).

For very sensitive plants such as forest plants  $K$  amounts to  $0,23 \text{ mg} \cdot \text{h}^{0,17}/\text{m}^3$  and  $n$  to  $0,17$ . With these the threshold concentrations  $c_0$  can be calculated easily for all occurring exposure times (from minutes to several years). For an exposure time of 10 minutes a threshold concentration of  $312 \text{ } \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$  is obtained. For an exposure time of one year the threshold concentration is  $49 \text{ } \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ . With these threshold doses the cumbersome time-related ambient air pollution standards seem to have become superfluous.

The retrospective review of the results of the extensive field investigations in the years 1959/60 in the vicinity of an  $\text{SO}_2$  emission source gave proof of the absence of injuries on forest plants in the cases of adherence to the threshold dose. Contrary to that, the results from measuring stations of the Umweltbundesamt (Federal Environmental Protection Agency) in non-polluted areas show that in the injured forest areas of the "Bayerischer Wald" and "Black Forest" the  $\text{SO}_2$  concentrations did not exceed the threshold concentrations for short-term and long-term  $\text{SO}_2$  exposure.

Ambient air analyses thus do not implicate  $\text{SO}_2$  as being responsible for directly causing the wide-spread forest damages. With ozone the conditions are entirely different. It occurs in the damaged forest areas in considerably higher concentrations than sulfur dioxide. In addition, according to experimental investigations carried out to date on dose-effect-relationships concerning ozone, a different threshold function than with all other phytotoxic pollutants is to be expected. The  $c \times t$ -rule obviously does not apply to ozone. This explains why the causes of the forest damages remained unknown for such a long time until the Landesanstalt für Immissionsschutz in Essen carried out its investigations.

Großflächige Waldschäden drohen in der Bundesrepublik Deutschland weite Teile unseres Waldbestandes zu vernichten. In den letzten Erhebungen der Bundesregierung aus dem Jahre 1983 [ 1 ] kommt zum Ausdruck, daß sich die Schadflächen innerhalb weniger Jahre bis auf etwa 34 % unseres Waldbestandes, das sind etwa 2,5 Mill. ha, ausgedehnt haben. Es scheint allgemein ohne nennenswerten Widerspruch festzustehen, daß dafür hauptsächlich Luftverunreinigungen verantwortlich gemacht werden müssen, auch wenn die Wissenschaft die Kausalitätsfrage noch nicht gelöst haben soll.

Was ist geschehen? Reichen die von den einschlägigen wissenschaftlichen Disziplinen besonders in den letzten Jahrzehnten zusammengetragenen Informationen nicht aus, um den Zusammenbruch eines wichtigen Teiles der Vegetation als Folge der Einwirkung von Luftverunreinigungen zu erkennen, geschweige denn vorausszusagen, um so die Ursache gezielt und wirkungsvoll bekämpfen zu können? Hat die Wissenschaft versagt? Fast hat es den Anschein, als wenn die Öffentlichkeit, die Medien und auch die Regierenden hier schon das Urteil gesprochen hätten; sie wollen handeln, ohne auf eine sorgfältige und gewissenhafte Klärung zu warten. Approbata Erklärungsversuche sind schnell zur Hand, wobei besonders das Schlagwort vom "Sauren Regen" Furore macht.

In Analogie zur Versauerung der Seen in Skandinavien nimmt man an, daß auch die Waldschäden auf die gleichen Ursachen zurückzuführen sind. Über eine Fernwirkung aus den industriellen Ballungszentren sollen vor allem die aus den hohen Schornsteinen der Kraftwerke entweichenden Rauchgase mit ihren Anteilen an Schwefeldioxyden infrage kommen. Dem Schwefeldioxyd ( $\text{SO}_2$ ) wird deshalb der Kampf angesagt, und so kommt es in der Bundesrepublik Deutschland zur Verabschiedung der Großfeuerungsanlagen-Verordnung mit einer Begrenzung der  $\text{SO}_2$ -Emissionen auf  $400 \text{ mg SO}_2/\text{Nm}^3$  im Rauchgas [ 2 ]. Diese Grenzkonzentration, die im übrigen noch weiter gesenkt werden soll, kann nur bei Anwendung leistungsfähiger Rauchgasreinigungsverfahren eingehalten werden.

Hier hat sich mit großer Schnelligkeit, praktisch innerhalb von 2 Jahren, ein Prozeß vollzogen, den man nur mit einem bedrückenden Erstaunen registrieren kann. Allein Plausibilitätsüberlegungen reichten aus, um folgenschwere Aktivitäten einzuleiten. Es störte offenbar nur wenige, daß keine Richtigkeitsbeweise für die angenommenen Wirkungen des Schwefeldioxyds vorlagen und Widersprüche einfach beiseite geschoben wurden. Und doch sind es gerade die Widersprüche, die besonders beachtet werden müssen.

Inzwischen hat eine überlegtere Haltung wieder an Boden gewonnen, nicht zuletzt dadurch, daß mit Hilfe einer anderen Hypothese über die Ursachen der neuartigen Waldschäden [ 3 ] die Fragwürdigkeit bloßer plausibler Annahmen offenkundig wurde. Ich will diese Hypothese über die Rückführung der Waldschäden auf eine Wirkungskette, die bei den Stickoxiden ihren Ausgang nimmt und über die Wirkung von Ozon läuft, in den Mittelpunkt meiner Betrachtungen stellen, weil für die Aufklärung wesentliche Teile des wissenschaftlichen Instrumentariums zum Einsatz kamen und weiterhin noch kommen.

An den Anfang sei die Frage gestellt, woher wir denn wissen, daß in der freien Natur beobachtete Schädwirkungen an der Vegetation auf Einwirkungen von Luftverunreinigungen beruhen. Nur in den seltensten Fällen weist ein Schadbild auf den Verursacher hin. Nekrosen, Chlorosen oder sonstige Anomalien im Wuchs oder im Habitus können manchmal durch eine spezifische Symptomatik die Ursache offenbaren, in den meisten Fällen aber sind diese Merkmale unspezifisch. Dies gilt insbesondere für Ertrags- oder sonstige Leistungsminderungen geschädigter Pflanzen. Aber selbst wenn eindeutige und spezifische Symptome diesen ersten diagnostischen Schritt erleichtern, bleibt es dabei, daß die Diagnose im Wege des Analogieschlusses vollzogen werden muß. Das heißt, daß man die Symptome schon einmal im eindeutigen Zusammenhang mit der Ursache gesehen haben muß, also Erfahrung besitzen muß.

Offenbar wird die aufgrund langjähriger Beschäftigung mit solchen Problemen erworbene Erfahrung zunehmend vernachlässigt. Wie konnte es sonst zu diesen Spekulationen im Zusammenhang mit der Beurteilung der Waldschäden kommen. Spezifische Symptome, die diagnostische Hinweise liefern, treten entweder auf oder sie bleiben aus. In beiden Fällen kann unter Nutzung der bisherigen Erkenntnisse und Erfahrungen ein erster diagnostischer Schritt eingeleitet werden. Bei den großflächigen Waldschäden lieferten die beobachteten Symptome: Nadel- und Blattbräunungen bzw. -vergilbungen, frühzeitiger Nadel- bzw. Blattfall, starke Kronenverlichtungen, Stammfäule, Abplatzen der Rinde, frühzeitiger Baumtod u.a., keine eindeutigen Hinweise für die ursächliche Einwirkung einer bestimmten Luftverunreinigung.

Sollte man daraus den Schluß ziehen, daß Luftverunreinigungen keine Bedeutung besitzen? Nein, die Entscheidung mußte zunächst noch offen bleiben.

Die sich hierin andeutende Schwierigkeit, das Schadbild allein von äußeren Merkmalen her diagnostizieren zu können, ist für den mit Immissionswirkungen befaßten Phytopathologen nicht ungewöhnlich. Treten doch selbst in den industriellen Ballungsgebieten immer wieder Schadensfälle auf, die nicht so ohne weiteres zu diagnostizieren sind. In solchen Fällen sucht man zunächst das Symptompektrum zu erweitern. Unterscheidungskriterien zwischen biotischen und abiotischen, zwischen akuten und chronischen Einwirkungen sind zusätzlich ebenso zu berücksichtigen wie das unterschiedliche Resistenzverhalten der Pflanzenarten und bei gleichen Arten die Reaktionen in den verschiedenen Entwicklungsstadien. Es ist einleuchtend, daß für die Beurteilung dieses verfeinerten und erweiterten Symptompektrums eine gründliche Ausbildung und viel Erfahrung erforderlich sind, und daß dazu der in der Literatur niedergelegte Wissensstand nicht vernachlässigt werden darf.

Leider ist bei vielen voreiligen Schlußfolgerungen dieser äußerst wichtige zweite diagnostische Schritt gar nicht oder fast gar nicht zum Zuge gekommen. Dabei wäre man gerade bei diesem diagnostischen Schritt auf gravierende Widersprüche zu der Aussage gestoßen, daß überhaupt eine der ubiquitären Luftverunreinigungen für die Auslösung der Waldschäden infrage kommt. So paßte das aus einer über 100jährigen Rauchschaadforschung bekannte Resistenzverhalten der Pflanzenarten ebensowenig wie das Reaktionsverhalten in einzelnen Entwicklungsstadien in das

angetroffene Symptombild. Man hätte das besonders gute Flechtenwachstum in den Waldschadensgebieten bemerken müssen [ 3 ], und dies bezieht sich nicht nur auf die etwas robusteren Blatt- und Strauchflechten, sondern auch auf die empfindlicheren Bartflechten. Wie war das möglich, da doch Flechten weltweit als Bioindikatoren eingesetzt werden; sie stehen in der Resistenzreihe an der Spitze der am empfindlichsten auf Luftverunreinigungen reagierenden pflanzlichen Organismen. Es gibt noch viele andere Hinweise, die hier nur angedeutet werden können; z.B. das Auftreten von Erholungsphasen insbesondere nach Regenperioden, die Verlagerung der Resistenz auf den jüngsten Trieb und eine auffällige Photosensibilität.

Mit diesem letzten Hinweis ist bereits der Übergang zum nächsten diagnostischen Schritt eingeleitet, nämlich zur Erfassung der Randbedingungen des Schädigungsprozesses. Hierher gehören auch die Standortfaktoren. Die Waldschäden nahmen ihren Ausgang in sogenannten Reinluftgebieten, nicht innerhalb oder in der Nähe von industriellen Ballungsgebieten, ferner in den Kammlagen mit einer Bevorzugung des Westhanges, an den Bestandesrändern, an freigestellten Bäumen sowie an Lichtungen. Auffällig war eine deutliche Höhenabhängigkeit. Tallagen blieben zunächst unbeeinflusst; seit 1982 werden aber auch die Niederungen erfaßt. Auch auf ausreichend mit Nährstoffen versorgten Böden blieben die Waldschäden nicht aus.

Vertreter der Hypothese, daß Schwefeldioxid mit seinen in der Atmosphäre entstehenden Folgeprodukten über saure Niederschläge und dem damit verbundenen Protoneneintrag eine Intoxikation des Bodens bewirkt und die Waldschäden auslöst, hätten spätestens nach dem Auftreten der Waldschäden auf den kalk- und magnesiumhaltigen Standorten des fränkischen Jura bzw. der schwäbischen Alb eine Revision ihrer Vorstellungen einleiten müssen. Stattdessen wurde das Augenmerk verstärkt auf die Schädigung der Mykorrhiza [ 4, 5 ] gelenkt, womit ein Schädigungssymptom aufgegriffen wurde, das keineswegs einen primären Angriff von Schadstoffen über den Boden anzeigen muß, denn wenn die Assimilationsleistung der oberirdischen Pflanzenteile geschwächt oder gar unterbunden wird, dann hat das Rückwirkungen auf das Wurzelsystem.

Wenden wir unsere Aufmerksamkeit wieder dem nächsten diagnostischen Schritt zu, der sich auf die Pflanzenanalyse stützt. Biologische, chemische oder auch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen gehören hierher. Es muß aber davor gewarnt werden, die Ergebnisse solcher Untersuchungen, die allgemein als besonders beweiskräftig gelten, durch Plausibilitätsüberlegungen vordergründig zu interpretieren. Gerade wegen Unterstellung einer besonderen Beweiswürdigkeit werden nämlich häufig die ersten drei vorgestellten diagnostischen Schritte übersprungen und man beginnt sofort mit der Pflanzenanalyse. So wurde beispielsweise der Schwefelgehalt in Nadeln oder Blättern als Indiz für die Inkorporation schwefelhaltiger Schadstoffe aus der Luft herangezogen [ 6 ]. Lassen sich aus solchen Untersuchungen Korrelationen zum Schädigungsgrad herstellen, dann können sie zusätzliche diagnostische Hilfen darstellen, müssen aber mit großer Vorsicht interpretiert werden. So wird bei akuten  $\text{SO}_2$ -Einwirkungen weniger Schwefel angereichert als bei chronischen. An den geschädigten Bäumen wiesen in unserem Falle die Nadelanalysen sogar einen Schwefelmangel aus [ 3 ]. Differentialdiagnosti-

sche Feinuntersuchungen ergaben dann auch weiter, daß die Gelbfärbung der Nadeln an den geschädigten Bäumen auf Pigmentverlusten (z.B. Chlorophyllverlust) beruht und einen Nährstoffmangel ausweisen, besonders im Magnesium-, Calcium- und Kaliumgehalt. Ein starker Befall mit pilzlichen Schwächeparasiten sorgte für Veränderungen im Symptombild [ 7 ].

Die Ursachenaufklärung der Waldschäden schien immer komplizierter und hoffnungsloser zu werden. Es ist deshalb verständlich, daß neben den Hypothesen über die Intoxikation des Bodens durch den "Sauren Regen" auch Vorstellungen über die summatische Langzeitwirkung aller Streßfaktoren [ 8 ] oder über additive Wirkungen von Luftverunreinigungen in synergistischen Kombinationen entwickelt wurden. Besonders die Heranziehung komplexer polyfaktorierlicher Systeme ist nicht nur in diesem Fall als Ausdruck einer Ohnmacht zu werten, überhaupt noch Möglichkeiten für eine Ursachenaufklärung zu besitzen. In der Tat ist es so, daß mit den grob skizzierten vier diagnostischen Schritten die Möglichkeiten dargelegt wurden, die sich auf eine Diagnose der geschädigten Organismen selbst stützen.

Damit sind unsere Möglichkeiten aber noch nicht erschöpft, denn neben dem Komplex der direkten Diagnose gibt es noch den der indirekten. Hier ist an erster Stelle die Luftanalyse zu nennen. Mit Hilfe der Luftanalyse stellt man fest, welche Schadstoffe in welchen Konzentrationen in den Schadgebieten auftreten. Aus Begasungsversuchen unter kontrollierten und eingestellten Bedingungen in Gewächshäusern oder ähnlichen Anlagen sowie aus entsprechenden Beobachtungen im Freiland ist bekannt oder sollte noch ermittelt werden, wie die einzelnen Pflanzenarten auf die Konzentrationen und Einwirkungszeiten bestimmter phytotoxischer Substanzen reagieren. Die daraus aufgestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen bilden die Grundlage für eine Beurteilung der Luftqualität bzw. des Gefährdungspotentials durch Schadstoffe in der Luft. Dies gilt im übrigen nicht nur für Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Pflanzen, sondern auch für Wirkungen auf Mensch, Tier und Sachgut. Weiterhin werden aus Dosis-Wirkungsbeziehungen [ 9 ] sogenannte Immissionsgrenzwerte [ 10 ] abgeleitet, die eine bestimmte Luftqualität sichern sollen.

Da Dosis-Wirkungsbeziehungen somit ein wichtiges diagnostisches Hilfsmittel darstellen, soll hier näher darauf eingegangen werden. Zunächst versucht man die Vielfalt der Beziehungen auf die Verknüpfung der beiden Größen Schadwirkung (W) und einwirkende Dosis (D) des Schadstoffes zu reduzieren. Man kann nun nebeneinander stellen, was man bei einer bestimmten Dosis, z.B. 8 h Begasung mit einer SO<sub>2</sub>-Konzentration von 2 ppm, an Schäden an einer bestimmten Pflanzenart gefunden hat. Gleichzeitig müssen natürlich auch die Randbedingungen, d.h. die rel. Luftfeuchte, Temperatur etc. mitnotiert werden. Es liegen dann in impliziter Form Dosis-Wirkungsbeziehungen vor. Sie stellen in dieser Form fast ausschließlich die Unterlagen dar, die in der Literatur oder in den Erläuterungen für die Aufstellung von MIK-Werten oder Immissionsgrenzwerten zu finden sind. Bei der unbegrenzten Zahl der Kombinationsmöglichkeiten aller Faktoren ist die Liste natürlich niemals vollständig, was sehr unbefriedigend ist. Von Zeit zu Zeit ist deshalb der Versuch unternommen worden, Dosis-Wirkungsbeziehungen ein für allemal explizit zu formulieren, d.h. die Kausalbeziehungen mathematisch zu fassen. Das Vorhaben ist sehr schwierig, denn zunächst geht es darum, für alle Schädigungs-

formen und Ausprägungsgrade ein gemeinsames Maß  $W$  und für alle Immissionskonstellationen ein gemeinsames Maß  $D$  aufzustellen. Bereits 1922 untersuchte O'GARA [ 11 ] die Dosis  $D$  näher und stellte für eine konstante Wirkung die Beziehung auf:

$$t(c-c_0) = K \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

$t$ = Einwirkungszeit	$c$ = Konz. des Schadstoffes
$c_0$ = tolerierte Konzentration	$K$ = Konstante

Durch Umformung ergibt sich daraus:

$$0 = -K - c_0 \cdot t + c \cdot t \quad (1a).$$

THOMAS und HILL [ 12 ] haben viele Jahre daran gearbeitet, die Konstanten in der O'GARA-Funktion für verschiedene Wirkungen und Pflanzen zu bestimmen. THOMAS war es dann auch, der mich zu der 1958 aufgestellten Reizschwellenfunktion [13, 14] inspirierte:

$$t = K \cdot \exp \left[ -a (c - c_0) \right] \quad (2)$$

oder umgeformt

$$0 = a \cdot c_0 + \ln K - a \cdot c - \ln t \quad (2a).$$

Von ZAHN wurde 1963 [ 15 ] eine Funktion bekanntgegeben, die nicht nur die beginnende Schädigung, sondern auch verschiedene Schädigungsgrade mit der Konzentration  $c$  und der Einwirkungszeit  $t$  verband. Als Reizschwellenfunktion hat die ZAHNsche Beziehung die Form:

$$t = K \frac{1 + 0,5 \frac{c}{c_0}}{c - c_0} \quad (3)$$

oder umgeformt

$$0 = K + 0,5 K \cdot c - t \cdot c^2 + c_0 \cdot t \cdot c \quad (3a).$$

LARSEN und HECK [ 16 ] haben nun 1976 einen Ansatz veröffentlicht, der sich wie folgt darstellen läßt:

$$W = K \cdot c^a \cdot t^b \quad (4)$$

oder umgeformt

$$Z = K + a \cdot \ln c + b \cdot \ln t \quad (4a).$$

Es fällt auf, daß bis auf die O'GARA-Funktion alle Ansätze eine mehr oder weniger starke Annäherung an das WEBER-FECHNERSche Gesetz für sinnesphysiologische Wahrnehmungen aufweisen.

Nach STEVENS [ 17 ] kann eine Wahrnehmungsintensität ganz allgemein durch eine Potenzfunktion mit der Reizintensität verknüpft werden. Setzt man für die Wahrnehmungsintensität eine wirkungsbeschreibende Größe  $W$  und für die Reizintensität die wirkungsauslösende Größe  $D$ , so kann die Potenzfunktion von STEVENS auch für unser Problem herangezogen werden. Dabei ist aber zu beachten, daß das Verhältnis der wirkungsbeschreibenden Größe  $W$  zu der wirkungsauslösenden Größe  $D$  als mathematisches Abbildungsproblem behandelt werden muß, da die Struktureigenschaften der beschreibenden Größen im Wirk- und Ursachenbereich nicht isomorph sind:

$$W \longrightarrow D$$

und analog STEVENS

$$W \longrightarrow k (D - D_0)^n$$

und daraus

$$\ln W = \ln k + n \cdot \ln (D - D_0)$$

bzw.

$$\begin{aligned} [W] &= K + n \cdot \ln D_x \\ \text{mit } D_x &= D - D_0, \end{aligned}$$

entsprechend dem WEBER-FECHNERSchen Gesetz.

Da sich die Dosis  $D$  aus  $c \cdot t$  ergibt und das Maß für die Wirkung  $W$  als Probit ( $Y$ ) gewählt werden kann, sind die STEVENS-Formel sowie das WEBER-FECHNERSche Gesetz dreidimensional mit linearen Regressionen zwischen wirkungsbeschreibenden und wirkungsauslösenden Größen darzustellen:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot \ln c + b_2 \cdot \ln t + (b_3 \cdot \ln c \cdot \ln t).$$

Der Term für Wechselwirkungen ist in der Klammer ( ) berücksichtigt.

UMBACH et al. [ 18 ] haben 1983 die vorgenannten Dosis-Wirkungs-Funktionen in gleicher Weise wie folgt umgeformt:

O'GARA	(1b)	$Y = b_0 + b_1 c + b_2 t + (b_3 ct)$
STRATMANN	(2b)	$Y = b_0 + b_1 c + b_2 \ln t + (b_3 c \cdot \ln t)$
ZAHN	(3b)	$Y = b_0 + b_1 \sqrt{c} + b_2 \ln t + (b_3 \sqrt{c} \cdot \ln t)$
LARSEN-HECK	(4b)	$Y = b_0 + b_1 \ln c + b_2 \ln t + (b_3 \ln c \cdot \ln t)$

In dieser Aufstellung ist deutlich zu erkennen, wie über einen Zeitraum von mehr als 60 Jahren die anhand von experimentellen Untersuchungen empirisch begründete, explizite Darstellung der Dosis-Wirkungsbeziehungen sich bis zum WEBER-

FECHNERSchen Gesetz entwickelte. Bei LARSEN und HECK ist schließlich völlige Übereinstimmung erreicht. Damit dürfte wohl die über den sinnesphysiologischen Bereich hinausgehende universellere Bedeutung des WEBER-FECHNER-Gesetzes zum Ausdruck kommen. Auch HENSCHLER klassifiziert übrigens die Dosis-Wirkungsbeziehungen für den gesamten Bereich der Humantoxikologie auf der Grundlage des WEBER-FECHNERSchen Gesetzes [ 19 ]. Das ermutigt, die Potenzfunktion von STEVENS auf alle bisher ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehungen anzuwenden.

In der Potenzfunktion

$$W = k(D - D_0)^n$$

gibt die Dosis  $D_0$  den absoluten Reizschwellenbetrag an, der zur Auslösung einer Wirkung  $W$  erforderlich ist. Nur die  $D_0$  übersteigende Dosis ist eine schädigende Dosis, so daß die Ermittlung von  $D_0$  aus allen empirisch festgestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Luftqualität darstellt. Aus allen bisherigen Untersuchungen ergibt sich, daß man  $D_0$  nicht als konstant annehmen darf. Der Reizschwellenbetrag ist vielmehr eine zeitabhängige Größe:

$$D_0 = f(t).$$

Es gilt

$$D_0 = c_0 \cdot t,$$

wobei  $c_0$  selbst wieder zeitabhängig ist, was bei O'GARA, THOMAS u.a. zur Annahme einer Reizschwellenkonzentration  $c_R$  führte.  $c_0$  nähert sich  $c_R$  asymptotisch und geht in  $c_R$  über, wenn  $t \rightarrow \infty$  geht.

Im  $c \cdot t$ -Diagramm läßt sich die Reizschwellendosis durch die allgemeine Beziehung

$$c_0^p \cdot t^q = \text{const.} = k$$

wiedergeben. Durch Umformung erhält man

$$c_0 \cdot t^{\frac{q}{p}} = k^{\frac{1}{p}} = K.$$

Mit

$$\frac{q}{p} = n$$

ergibt sich:

$$\begin{aligned} c_0 \cdot t^n &= K \\ c_0 \cdot t \cdot t^{n-1} &= K \end{aligned}$$

$$D_o = K \cdot t^{1-n} \quad \text{Reizschwelldosis}$$

oder

$$c_o = K \cdot t^{-n} \quad \text{Reizschwelenkonzentration.}$$

Für die Wirkung von Schwefeldioxid auf die Vegetation läßt sich die Reizschwelenfunktion für die empfindlichsten Pflanzen wie folgt explizit angeben:

$$c_o \cdot t^{0,17} = 0,23 \frac{\text{mg} \cdot \text{h}^{0,17}}{\text{m}^3}$$

$$D_o = 0,23 \cdot t^{1-0,17}$$

$$c_o = 0,23 \cdot t^{-0,17}.$$

Daraus errechnen sich für die verschiedenen Einwirkungszeiten  $t$  die nachfolgend aufgeführten Beträge für die Reizschwellenwerte  $D_o$  und  $c_o$  (Tab. 1).

T a b e l l e 1: Bedingungen für den Ausschluß von  $\text{SO}_2$ -Schadwirkungen an sehr empfindlichen Pflanzen

Einwirkungszeit $t$ [ h ]	Reizschwelldosis $D_o$ [ mg · h/m <sup>3</sup> ]	Reizschwelenkonzentration $c_o$ [ µg/m <sup>3</sup> ]	MIK-Werte [ µg/m <sup>3</sup> ]
1/60 = 1'	0,0077	461	
1/6 = 10'	0,052	312	
0,5	0,129	259	250
24 = 1 Tag	3,22	134	
5170 = 7 Monate	276	54	50
8760 = 1 Jahr	431	49	
10 Jahre	2911	33	

Weitere Reizschwelenfunktionen lassen sich angeben für:

$$\begin{aligned} &\text{empfindliche Pflanzen mit } c_o \cdot t^{0,17} = 0,36 \\ &\text{weniger empfindliche Pflanzen mit } c_o \cdot t^{0,17} = 0,54. \end{aligned}$$

Es ist vorgesehen, auch für  $\text{HF}^-$ ,  $\text{HCl}$ - und  $\text{NO}_2$ -Wirkungen auf die Vegetation Reizschwelenfunktionen in einer besonderen Veröffentlichung anzugeben. Zur Berechnung der Grenzdosis erhält auch hier die Einwirkungszeit  $t$  einen Exponenten  $q$ , der wesentlich kleiner ist als der Exponent  $p$  für die Grenzwertkonzentration  $c_o$ .

Ich mache auf diesen Umstand besonders aufmerksam, weil er bei der Ursachenaufklärung der Waldschäden eine große Rolle spielt.

Mit Hilfe der Reizschwellenfunktion gelingt es nun, für jede vorgegebene Zeitspanne die Grenzdosis oder Grenzkonzentration aus einer einzigen Gleichung zu bestimmen. Die starre Vorgabe von MIK-Werten oder Grenzwerten, die sich auf bestimmte Zeitspannen beziehen, könnte somit entfallen. Es ist dann auch nicht mehr erforderlich, bestimmte Meß- und Erhebungsvorschriften einzuhalten, die sich aus der Grenzwertdefinition ergeben.

Um ganz deutlich werden zu lassen, daß es sich bei diesem Vorschlag über die Einführung der Reizschwellendosis als Ersatz für die bisherigen zeitspannengebundenen Grenzwerte um eine weitreichende Erneuerung bzw. Änderung der Luftüberwachungstechnik handelt, sei besonders auf zwei herausragende Konsequenzen verwiesen:

1. Nach unterschiedlichen Erhebungssystemen durchgeführte Luftmessungen können in gleicher Weise für einen Vergleich mit der Reizschwellendosis herangezogen werden. Dies ist besonders wichtig, wenn stichprobenartige Erhebungen mit kontinuierlichen Meßreihen bezüglich der Einhaltung von Grenzwerten miteinander verglichen werden sollen. Für unterschiedlich definierte Grenzwerte - z. B. MIK-Werte und Immissionswerte - gibt es keine unterschiedlichen Anwendungsbereiche mehr; sie können in gleicher Weise und nebeneinander in einem Problemfall herangezogen werden.
2. Im Zusammenhang mit unserem Thema interessiert vor allem die Bewertung der Luftgüte für diagnostische Zwecke. Für die Aufklärung von Schadfällen, z.B. durch epidemiologische Untersuchungen, ist es besonders wichtig, einen möglichst großen Spielraum bei der Aufstellung von Maßstäben für die Luftgüte zu erhalten, d.h., der ganze Informationsgehalt von Schadstoffmessungen in der Luft sollte verfügbar sein. Dies ist durch eine Dosisbewertung ohne Zeitbegrenzung weitgehend und wesentlich besser erfüllt als bei den bisherigen Grenzwertvergleichen, die sich auf zwei oder drei vorgegebene Zeitspannen beziehen.

Zur Erläuterung der Vorgehensweise ist in Bild 1 eine  $\text{SO}_2$ -Meßreihe von einer telemetrischen Echtzeit-Meßstation im Ruhrgebiet wiedergegeben. Die Meßreihe ist in sogenannte Minuten-Meßwerte aufgelöst. Die einzelnen Säulen (obere Bildhälfte) geben das Integral der  $\text{SO}_2$ -Konzentration in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  für Zeitschritte von jeweils 1 Minute an. Von einem bestimmten Startpunkt an kann nun durch fortlaufende Addition der einzelnen Säulen die zeitabhängige Dosis  $D$  gebildet werden, wiedergegeben im unteren Teil des Bildes. Eingetragen sind ferner die Reizschwellenkonzentration  $c_0$  (oben) sowie der Kurvenzug für die Reizschwellendosis  $D_0$  (unten). Nach Ablauf von etwa 30 min kommen beide Kurvenzüge zum Schnitt. Von diesem Zeitpunkt an übersteigt die gemessene Dosis  $D$  die Reizschwellendosis  $D_0$ . Eine solche Auswertung kann für beliebige Zeitschritte erfolgen, wie Bild 2 zeigt, bei dem eine kontinuierliche Meßreihe der  $\text{SO}_2$ -Konzentration in Stundenwerte aufgelöst ist.

Zur Beurteilung von Langzeitwirkungen kann die Auflösung auch auf Tageswerte (s. Bild 3), auf Monatswerte, Jahreswerte oder auf noch größere Zeitschritte abgestellt werden.

Die Reizschwellenfunktion wird ganz wesentlich von solchen Freilanduntersuchungen unter Beweis gestellt, wie sie Ende der 50er Jahre von der gerade aus der Taufe gehobenen VDI-Kommission Reinhaltung der Luft in Biersdorf/Westerwald in der Umgebung einer Eisenerz-Röstanlage durchgeführt wurden [ 20, 21, 22 ]. An der vorhandenen Vegetation wurden alle Schädigungsstufen als Folge von  $\text{SO}_2$ -Einwirkungen angetroffen, und so konnte eine Kette von 6 Versuchsstationen, jeweils mit einer Auswahl von Versuchspflanzen besetzt, abgestuften  $\text{SO}_2$ -Einwirkungen ausgesetzt werden. Bild 4 zeigt die Station I in der Zone stärkster Vegetationsschäden mit nachfolgender Bodenerosion. Dahinter ist Station II in einer durch schwachen Kümmerwuchs der Vegetation ausgezeichneten Zone zu erkennen. Bild 5 zeigt die Lage der Station III. Im Anschluß an diese Einwirkungszone sind im Hintergrund Waldbestände zu erkennen, die auch nach jahrzehntelanger Tätigkeit des  $\text{SO}_2$ -Emittenten als ungeschädigt galten. Diese offensichtlich intakten Fichtenbestände entsprechen in der Zonierung für abgestufte  $\text{SO}_2$ -Einwirkungen der Station V.

Ein Vergleich der maximalen Dosiswerte an den einzelnen Versuchsstationen mit der Reizschwellendosis zeigt, daß bis zur Station III (s. Bild 6 und 7) auch für unempfindliche Pflanzen die Grenzdosis überschritten wurde. In dem seinerzeit erstellten Forschungsbericht [ 20, 21, 22 ], der Grundlage für die Aufstellung der ersten  $\text{SO}_2$ -MIK-Werte der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft wurde, sind für fast alle Versuchskulturen Schäden an dieser Station noch eindeutig nachgewiesen worden. Für Forstgehölze waren Schäden bis einschließlich Station IV (s. Bild 8) nachzuweisen, obwohl an dieser Station mittel- und langfristig nur für sehr empfindliche Pflanzen die Grenzdosis überschritten wurde. An Station V schließlich konnten keine Schäden an Forstkulturen nachgewiesen werden. Hier traten auch mittel- und langfristig keine Überschreitungen der Grenzdosis auf (s. Bild 9 sowie Tabelle 2).

Nachdem nun das Umweltbundesamt (UBA) mit seinen Reinluftmeßstationen auch für die Waldschadensgebiete "Bayerischer Wald" und "Schwarzwald" langjährige Meßreihen der  $\text{SO}_2$ -Konzentration zur Verfügung stellen kann, ist eine Überprüfung der Schädigungsmöglichkeit unserer Forstkulturen mit Hilfe der Reizschwellenfunktion möglich [ 23 ].

Für 5 Reinluftmeßstationen sind die Ergebnisse in Tabelle 3 dargestellt. Von einer Ausnahme abgesehen wird weder kurzfristig (durch Spitzenwerte) noch mittelfristig (über Monate) oder langfristig (über Jahre) an keiner Reinluftmeßstation die Reizschwellendosis für  $\text{SO}_2$  erreicht. Dies gilt auch für die hier nicht aufgeführten Reinluftmeßstationen. Schäden an Forstkulturen durch  $\text{SO}_2$ -Einwirkungen können damit in den gekennzeichneten Gebieten ausgeschlossen werden.

T a b e l l e 2: Maximale Dosiswerte der  $\text{SO}_2$ -Konzentration in  $\text{mg}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  an den Stationen III, IV und V des Freilandversuches Biersdorf/Westerwald 1959/60

Zeitbasis	Grenzdosis $D_0$		Maximale Dosis $D_{\text{max}}$		
	a)	b)	Station III	Station IV	Station V
1 Stunde	0,23	0,54	5,6	4,1	2,7
1 Tag	3,2	7,6	22	16	11
1 Monat	56	131	153	[ 74 ]	36
7 Monate	276	649	662	308	127
1 Jahr	431	1011	1135	528	218
2 Jahre	765	1797	2206	[ 852 ]	430

a) für sehr empfindliche Pflanzen

b) für weniger empfindliche Pflanzen

An Station V keine Schäden an Forstkulturen nachweisbar.

T a b e l l e 3: Maximale Dosiswerte der  $\text{SO}_2$ -Konzentration in  $\text{mg}\cdot\text{h}/\text{m}^3$  an UBA-Stationen von 1973 - 1982 [ 23 ]

Station	Zeitbasis			
	1 Tag	1 Monat	1 Jahr	10 Jahre
Westerland	1,2	25	76	591
Waldhof	2,7	62	226	1847
Deuselbach	2,2	44	187	1523
Schauinsland	0,9	17	68	534
Brotjacklriegel	1,4	24	128	1024
Grenzdosis $D_0$	3,2	56	431	2911

Die Luftanalyse in den Waldschadensgebieten liefert also keine Anhaltspunkte für schädigende Einwirkungen von  $\text{SO}_2$  auf die Assimilationsorgane der Forstkulturen. Kann denn ein anderer Schadstoff in der Luft für die Auslösung der Waldschäden infrage kommen? Die Landesanstalt für Immissionsschutz in Essen (LIS) ist auch dieser Frage nachgegangen, konnte aber bisher keine andere Luftverunreinigung in schädigenden Konzentrationen aufspüren, bis auf eine, und das ist Ozon!

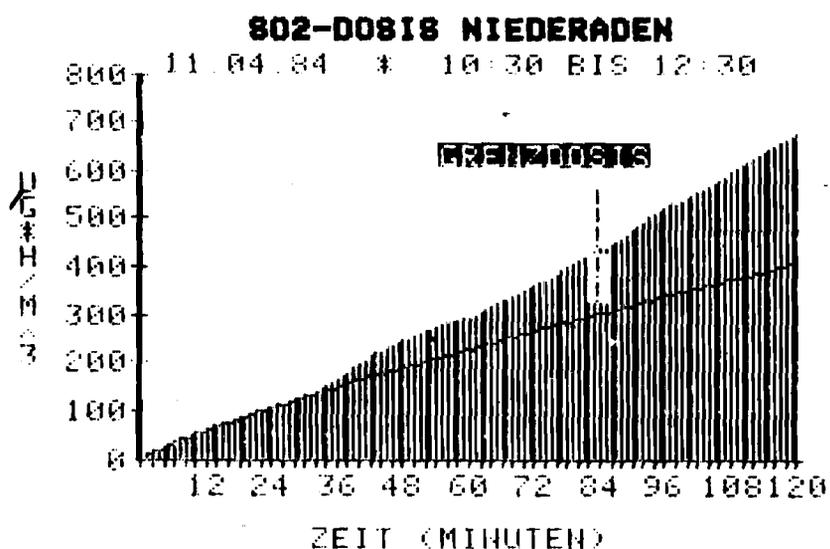
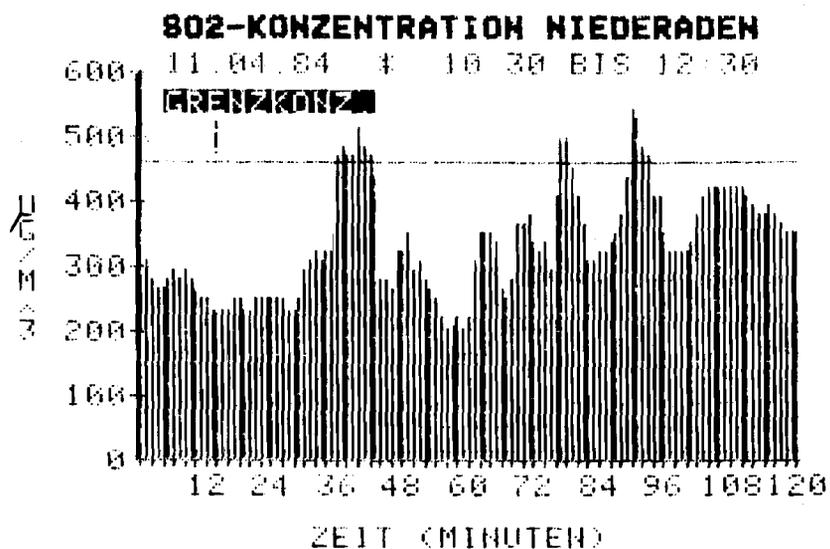


Bild 1: Minutenwerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration in µg/m<sup>3</sup> und Dosissumme in µg·h/m<sup>3</sup> an der TEMES-Meßstation Niederaden der LIS.

oben Reizschwellenkonzentration  $c_0$  für Minutenwerte = 461 µg/m<sup>3</sup> für sehr empfindliche Pflanzen;

unten Reizschwellendosis  $D_0$  für sehr empfindliche Pflanzen

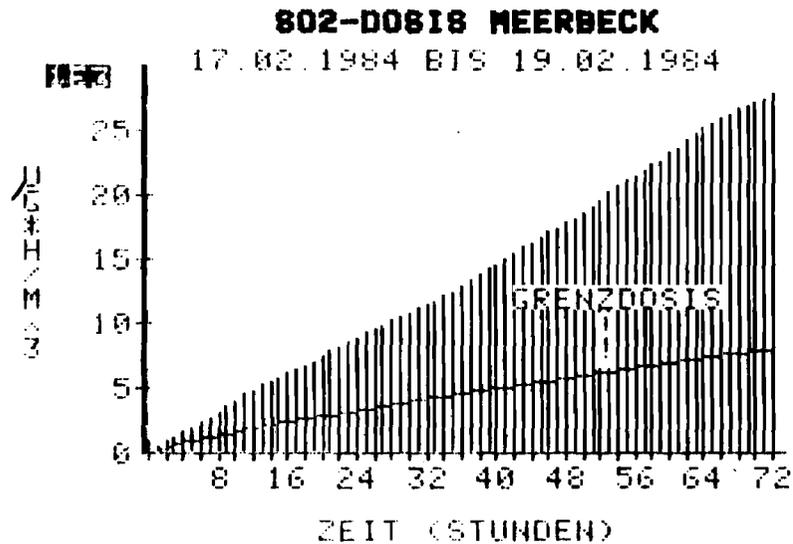
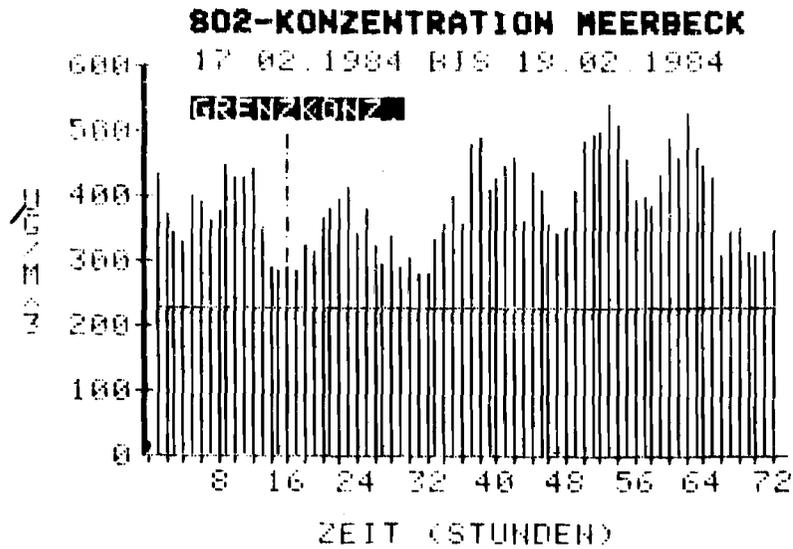


Bild 2: Stundenwerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration in µg/m<sup>3</sup> und Dosissumme in µg·h/m<sup>3</sup> an der TEMES-Meßstation Meerbeck der LIS.

oben Reizschwellenkonzentration  $c_0$  für Stundenwerte = 230 µg/m<sup>3</sup> für sehr empfindliche Pflanzen;

unten Reizschwellendosis  $D_0$  für sehr empfindliche Pflanzen

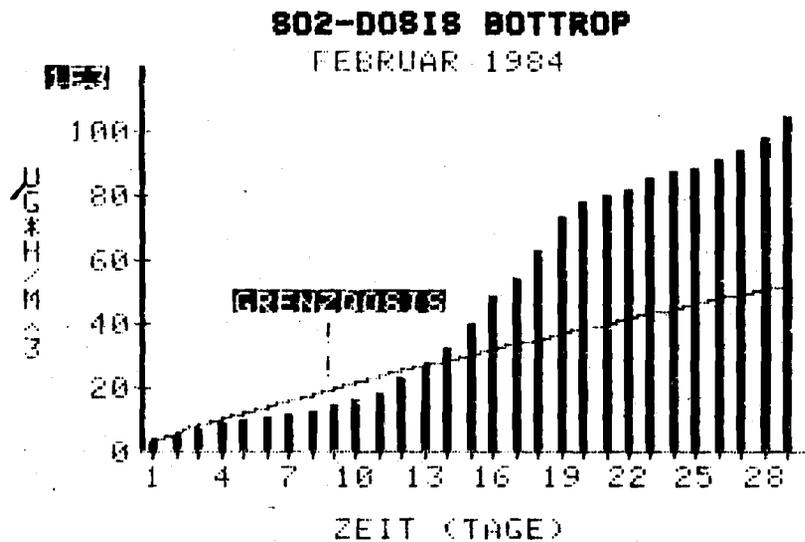
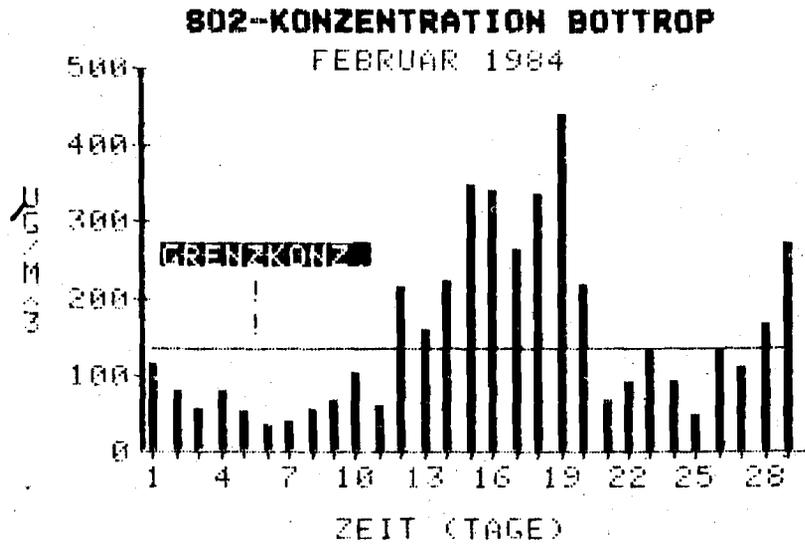


Bild 3: Tageswerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration in µg/m<sup>3</sup> und Dosissumme in µg·h/m<sup>3</sup> an der TEMES-Meßstation Bottrop der LIS.

oben Reizschwellenkonzentration  $c_0$  für Tageswerte = 134 µg/m<sup>3</sup> für sehr empfindliche Pflanzen;

unten Reizschwellendosis  $D_0$  für sehr empfindliche Pflanzen



Bild 4: Vegetationsschäden und Versuchsstationen in der Umgebung einer Eisenerz-Röstanlage in Biersdorf/Westerwald [ 20, 21, 22 ].

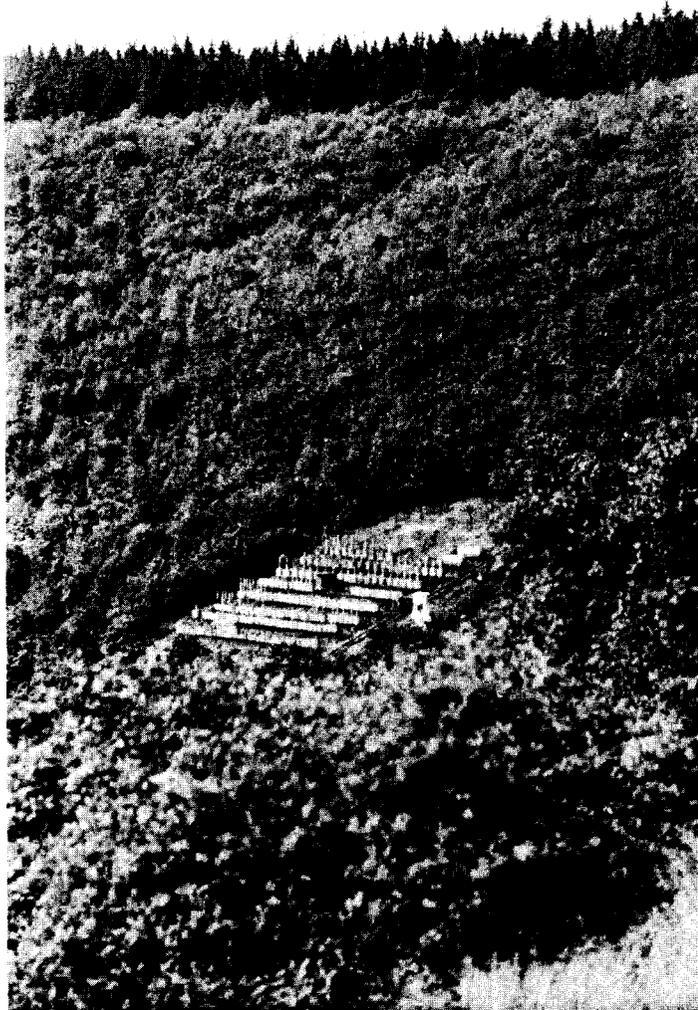
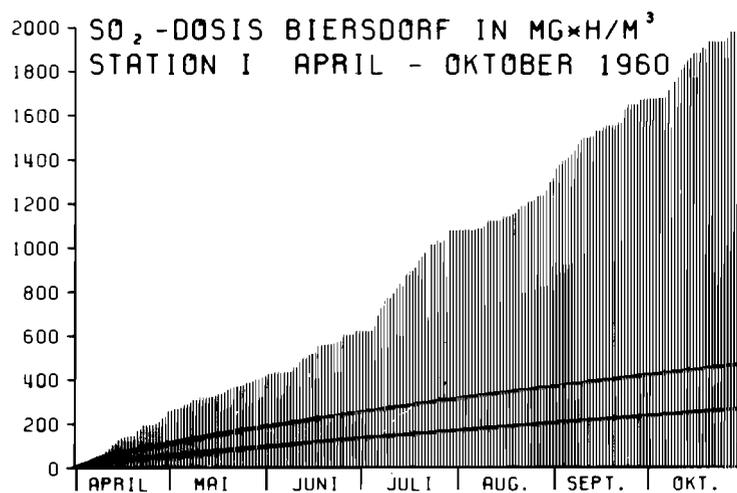
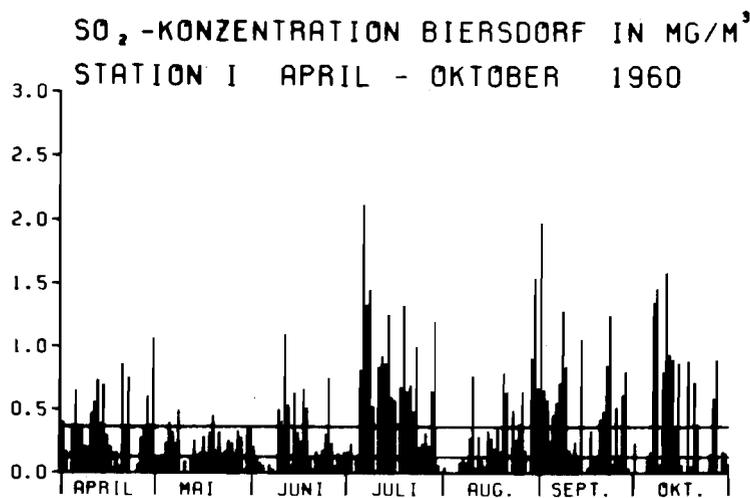


Bild 5: Lage der Versuchsstation III in der Umgebung einer Eisenerz-Röstanlage in Biersdorf/Westerwald



**Bild 6: Tageswerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration in mg/m<sup>3</sup> und Dosissumme in mg·h/m<sup>3</sup> an der Station I in Biersdorf/Westerwald von April bis Oktober 1960.**

oben Reizschwellenkonzentration  $c_0$  für sehr empfindliche Pflanzen 0,134 mg/m<sup>3</sup> und für weniger empfindliche Pflanzen 0,315 mg/m<sup>3</sup> eingetragen;

unten Reizschwellendosis  $D_0$  für sehr empfindliche und für weniger empfindliche Pflanzen

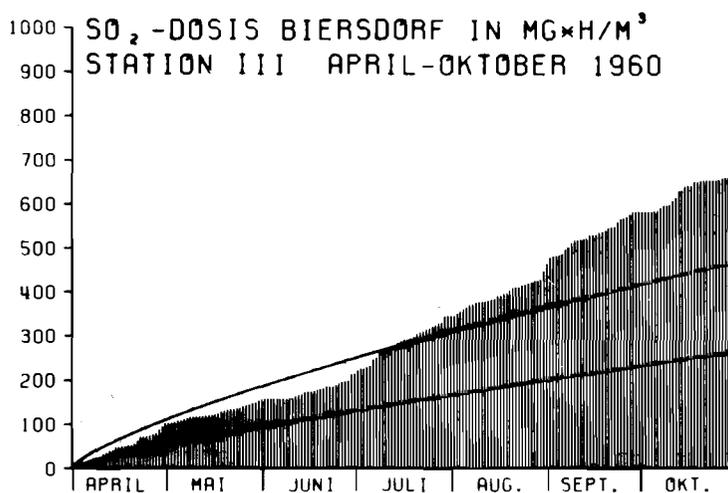
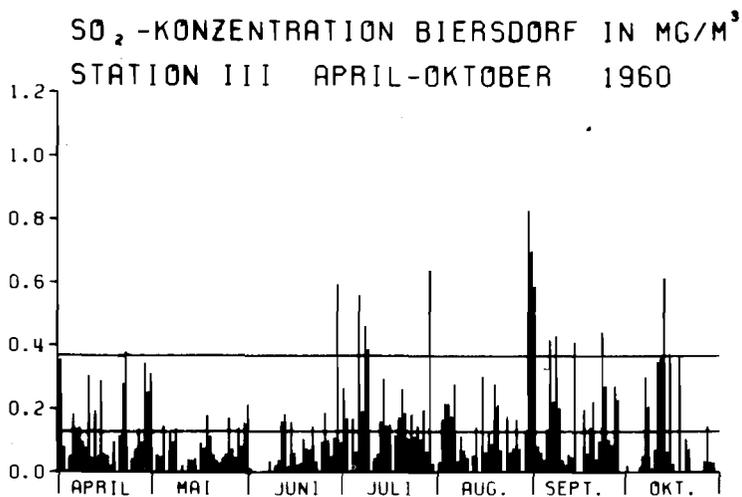


Bild 7: Tageswerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration in mg/m<sup>3</sup> und Dosissumme in mg·h/m<sup>3</sup> an der Station III in Biersdorf/Westerwald von April bis Oktober 1960. Reizschwellenkonzentration  $c_0$  und Reizschwellendosis  $D_0$  sind wie in Bild 6 eingetragen.

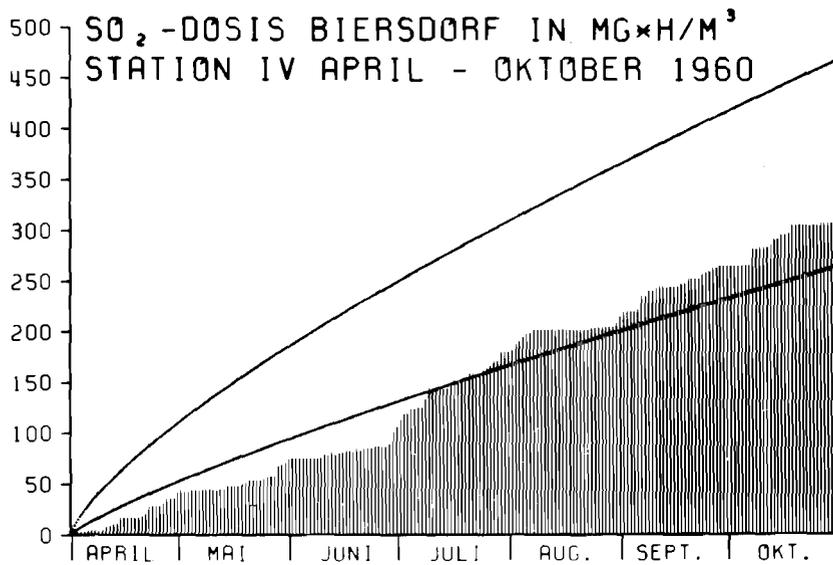
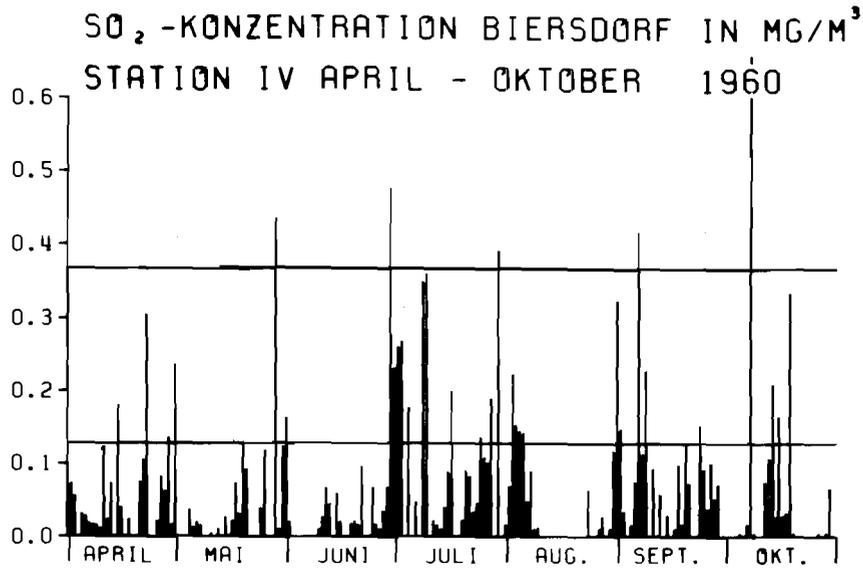
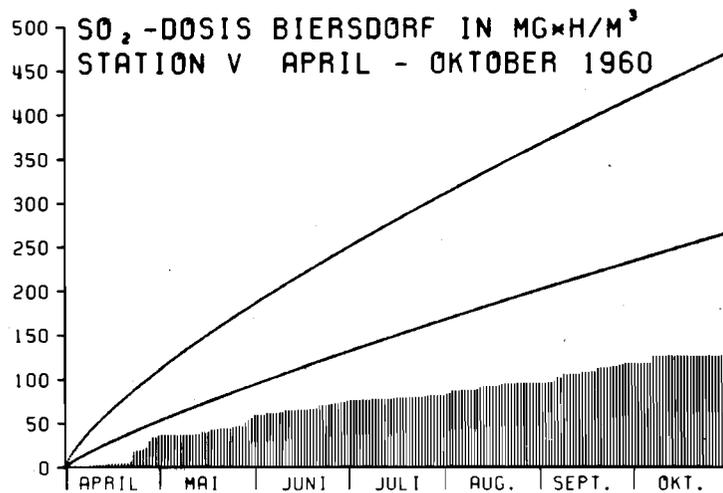
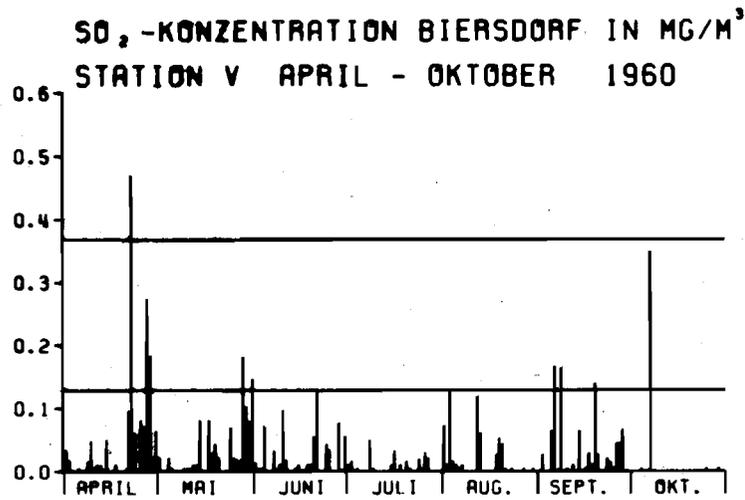


Bild 8: Tageswerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration in mg/m<sup>3</sup> und Dosissumme in mg·h/m<sup>3</sup> an der Station IV in Biersdorf/Westerwald von April bis Oktober 1960. Reizschwellenkonzentration  $c_0$  und Reizschwelldosis  $D_0$  sind wie in Bild 6 eingetragen



**Bild 9:** Tageswerte der SO<sub>2</sub>-Konzentration in mg/m<sup>3</sup> und Dosissumme in mg·h/m<sup>3</sup> an der Station V in Biersdorf/Westerwald von April bis Oktober 1960. Reizschwellenkonzentration  $c_0$  und Reizschwellendosis  $D_0$  sind wie in Bild 6 eingetragen

Die Reaktionskette vom Stickstoffmonoxid mit einem Peroxiradikal zum Stickstoffdioxid, Photodissoziation des  $\text{NO}_2$  und anschließend Bildung von Ozon läuft in der Atmosphäre bei Anwesenheit von Sonnenlicht relativ schnell ab, bis alles Stickstoffmonoxid aufgezehrt ist. Das photostationäre Gleichgewicht, das zwischen Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon je nach Licht- und Dunkelphase mit unterschiedlichen Antriebseffekten eine Art Kreisprozeß unterhält und ständig für den Abbau des gerade frisch gebildeten Ozons sorgt, wird umgangen bei Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen über die Bildung von Peroxiradikalen. Es kommen dann nur noch die unterschiedlichen Bildungs- und Abbaureaktionen des Ozons zwischen der Licht- und Dunkelphase zum Zuge. Solange  $\text{NO}$  im Überschuß auftritt, das ist in Quellnähe der Fall, wird Ozon somit am Tage gebildet und in der Nacht wieder vollständig abgebaut. Mit zunehmender Entfernung von den Quellgebieten wird  $\text{NO}$  immer mehr aufgezehrt und schließlich bleibt Ozon auch während der Nacht erhalten. So kommt es zu den in Bild 10 dargestellten Konzentrationsverläufen.

Die höchsten Konzentrationsspitzen treten zwar wegen des Bildungsprozesses in den Quellgebieten für  $\text{NO}$  auf, aber schon die Tagesdosiswerte, erst recht die Wochen- und Monatsdosiswerte, nehmen mit der Entfernung von Quellgebieten und mit der Höhe über NN zu.

Die Bedeutung des anthropogen gebildeten Ozons in der Troposphäre wird besonders ersichtlich, wenn man die  $\text{SO}_2$ - und  $\text{O}_3$ -Konzentrationen in den Waldschadensgebieten miteinander vergleicht. Bild 11 enthält eine solche Gegenüberstellung für die UBA-Meßstation auf dem Schauinsland [ 24 ].

Schon die Stundenwerte der Ozonkonzentration sind hier durchweg mehr als 20mal höher als die der  $\text{SO}_2$ -Konzentration. Eine ähnliche Situation ergibt sich für den Bayerischen Wald.

Wie sehen nun die Luftverhältnisse im Lande Nordrhein-Westfalen aus? Hierzu ist zu sagen, daß die neuartigen Waldschäden in Nordrhein-Westfalen erst relativ spät einsetzten und 1982 erst richtig bemerkt wurden. Auch hier waren zunächst die höheren Lagen betroffen. Die LIS in Essen hat daraufhin 1983 in der Eifel und im Eggegebirge je eine vollautomatische und telemetrisch betriebene Meßstation errichtet. Von der Waldmeßstation im Eggegebirge sind beispielhaft Meßergebnisse in Bild 12 und Bild 13 im Vergleich zum Ruhrgebiet aufgeführt.

Sie zeigen, daß sich großräumig ein Ozonpegel aufbaut, der im Ruhrgebiet selbst die geringsten Dosiswerte, an den Waldmeßstationen aber höhere Dosiswerte aufweist. Außerdem wird deutlich, daß die  $\text{SO}_2$ - und  $\text{NO}$ -Pegel im Ruhrgebiet erwartungsgemäß wesentlich höher liegen als an den Waldmeßstationen, während die  $\text{NO}_2$ -Pegel gemäß dem Reaktionsmechanismus zur Ozonbildung mit der Entfernung von Quellgebieten zunehmen.

## Ozonkonzentration vom 18.09.82

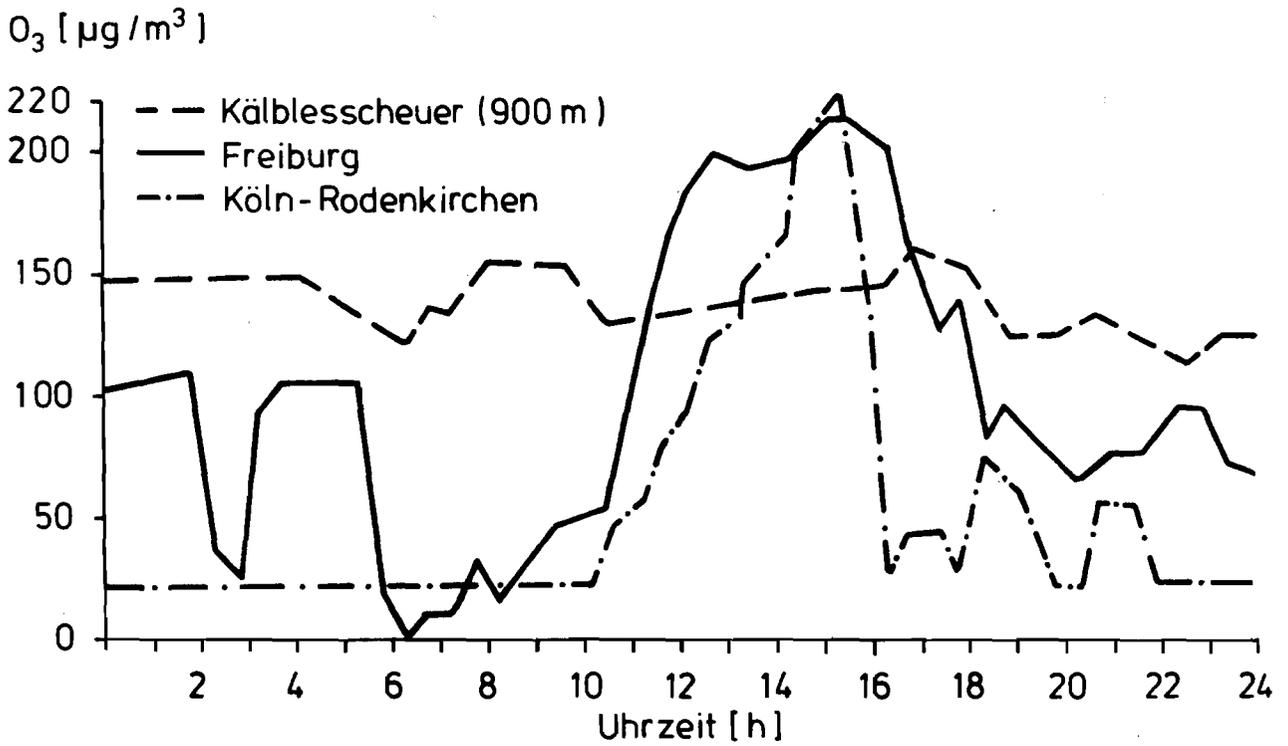


Bild 10: Tagesverlauf der Ozonkonzentration in Quellnähe und in einer höheren Schwarzwaldlage [ aus 3 ]

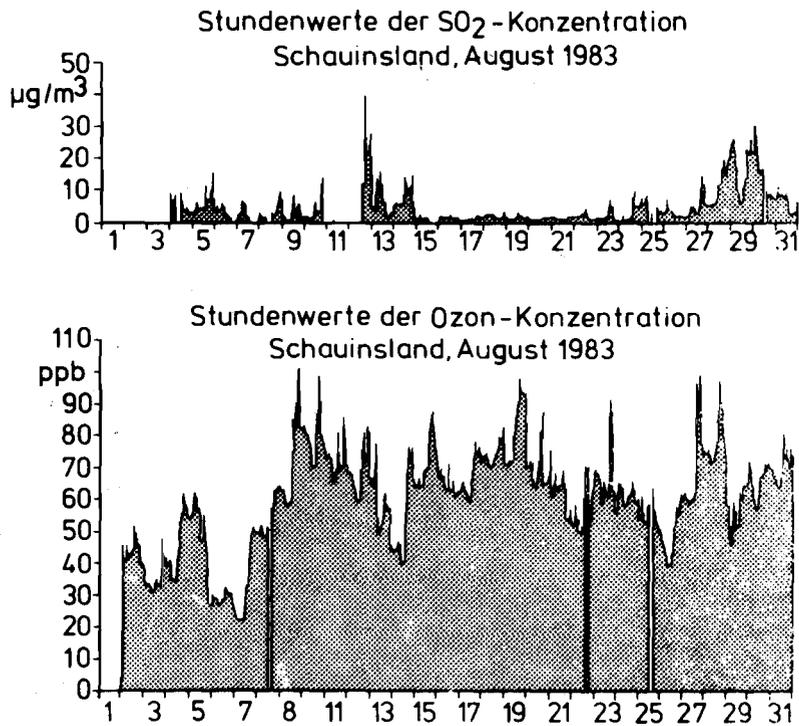


Bild 11: Stundenwerte der SO<sub>2</sub>- und O<sub>3</sub>-Konzentration auf dem Schauinsland/  
Schwarzwald (s. UBA-Monatsberichte [ 24 ]).

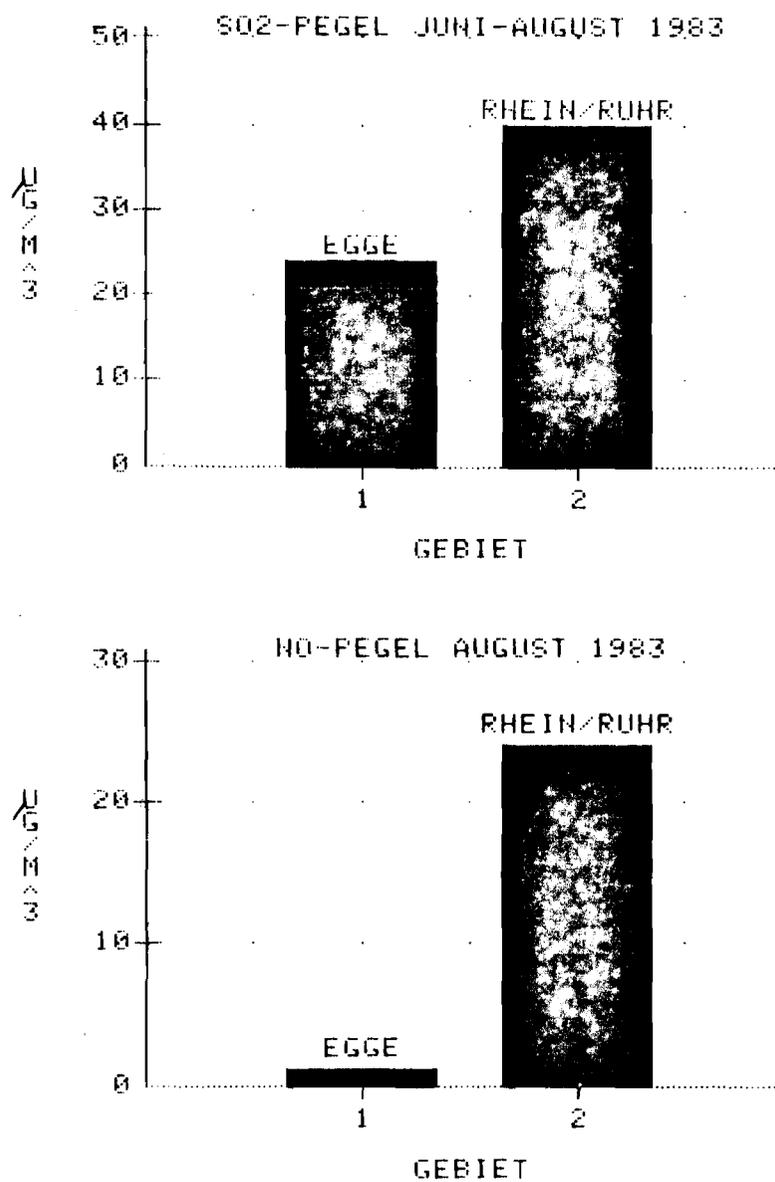


Bild 12: SO<sub>2</sub>- und NO-Pegel im Vergleich zwischen der Waldmeßstation Eggegebirge und Ruhrgebiet für den Zeitraum Juni - August 1983

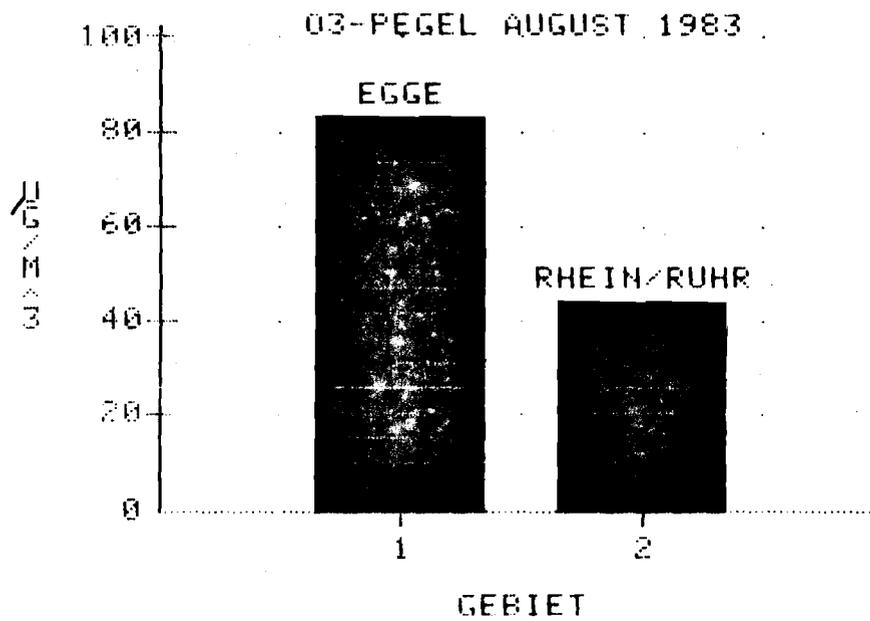
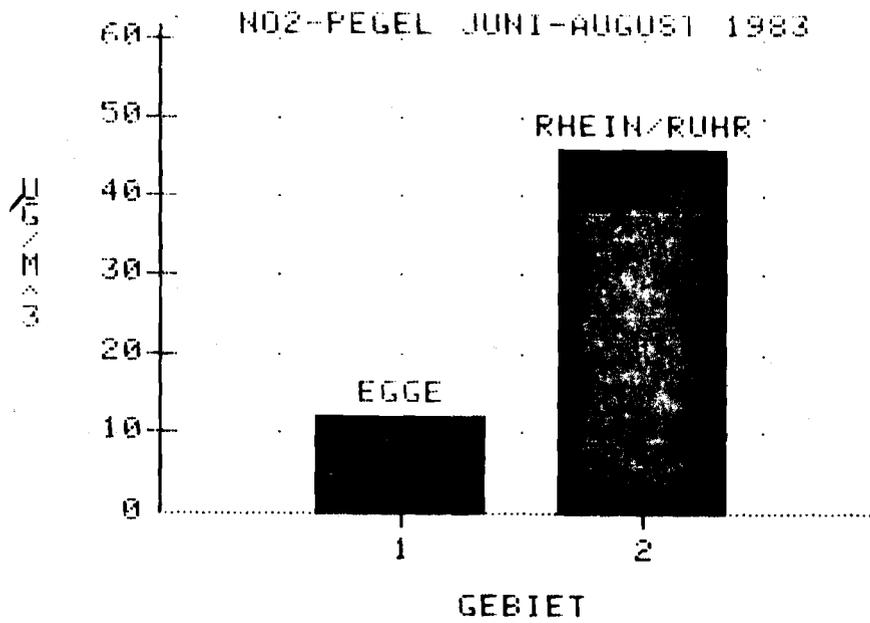


Bild 13: NO<sub>2</sub>- und O<sub>3</sub>-Pegel im Vergleich zwischen der Waldmeßstation Eggegebirge und Ruhrgebiet für den Zeitraum Juni - August 1983

Die gemessenen Ozonkonzentrationen sind z.T. so hoch, daß sie Werte erreichen, bei denen Schwefeldioxid bereits die Grenzdosis für Langzeitwirkungen überschreitet. So können auf dem Schauinsland im Schwarzwald

	Stundenwerte	bis	380 $\mu\text{g O}_3/\text{m}^3$
	Tageswerte	bis	240 $\mu\text{g O}_3/\text{m}^3$
	Monatswerte	bis	150 $\mu\text{g O}_3/\text{m}^3$
und	Jahreswerte	bis	120 $\mu\text{g O}_3/\text{m}^3$

auftreten [ 26 ]. Bei dieser Sachlage erhält natürlich die Frage nach der Reizschwelldosis für Ozonwirkungen auf die Vegetation, insbesondere auf Forstkulturen, ein besonderes Gewicht. Zwar liegen aus den USA viele Untersuchungen über Ozonwirkungen an Pflanzen vor, die nachweisen, daß es in den Konzentrationsbereichen, wie sie in den Waldschadensgebieten auftreten, durchaus zu Pflanzenschäden kommt, jedoch reichen die bisher ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehungen noch nicht für die Aufstellung einer Reizschwellenfunktion aus. Diese Aussage ist entstanden unter dem Eindruck eigener experimenteller Befunde in der LIS im Zusammenhang mit der Ursachenaufklärung der Waldschäden.

In Begasungsversuchen erwies sich, daß nicht die direkten Ozonschäden, wie wir sie von den Nekrotisierungsmerkmalen an Blättern und Nadeln von ozonempfindlichen Bioindikatoren her kennen, für den Schädigungsprozeß an Forstkulturen entscheidend sind, sondern ein kaum sichtbar in Erscheinung tretender Primärprozeß, der mit Membran- und Kutikula-Schäden einsetzt und somit Einwirkungsmöglichkeiten für sekundäre Schädigungsprozesse eröffnet, die dann ihrerseits das pathogene Symptombild bestimmen. Das ist auch der Grund, warum die entscheidende Rolle des Ozons bei der Ursachenaufklärung der Waldschäden zunächst unerkannt blieb.

Wenn auch die Luftanalyse als indirektes diagnostisches Hilfsmittel zunächst wertvolle Hinweise auf die Bedeutung des Ozons lieferte, so blieb es doch dem wichtigsten diagnostischen Schritt vorbehalten, die stärksten Beweise für die Ursachenaufklärung der Waldschäden zu liefern, und das ist die Reproduktion des Schädigungsprozesses im Experiment. So konnten durch Begasungsexperimente an Fichten, Tannen und Buchen schon in kurzer Zeit wesentliche Phasen des Schädigungsprozesses nachvollzogen werden, wie die Auswaschung von Magnesium, Calcium und sogar von Sulfat und Nitrat aus den Nadeln bei kombinierter Einwirkung von Ozon mit säurehaltigem Regen bzw. Nebel [ 25 ]. Die Photosensibilisierung, das Flechtenwachstum, der Einfluß mangelnder Ernährung, die Ausbildung der Schädigungssymptome speziell an Buchenblättern konnten experimentell schon weitgehend aufgeklärt werden. Untersuchungen über Rückwirkungen der Nadel- und Blattschädigungen auf das Wurzelsystem, der Ausgleich der Nährstoffverluste zwischen den einzelnen Nadeljahrgängen und ähnliche Fragestellungen werden in der experimentellen Bearbeitung noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Zusammenfassend kann über die Ergebnisse der Begasungsexperimente mit Ozon an der LIS in Essen gesagt werden, daß sie keine Widersprüche zu den in den Waldschadensgebieten beobachteten Phänomenen erkennen lassen. Was auch immer an zusätzlichen Einwirkungsmöglichkeiten heute noch unbekannter Faktoren im Zusammenhang mit der Ursachenaufklärung der Waldschäden entdeckt werden mag, an den Ozonwirkungen wird man nicht

mehr vorbei kommen; dafür sind die in den unteren Schichten der Troposphäre über Mitteleuropa auftretenden Ozonpegel einfach zu hoch.

Diese Feststellung führt wieder auf die Bewertung der Luftgüte und die Darstellung der Dosis-Wirkungsbeziehungen im  $c \times t$ -Diagramm zurück, eine Fragestellung, die abschließend besonders hervorgehoben werden soll. Die bisherigen Begasungsexperimente haben gezeigt, daß die Ozonwirkungen insbesondere mit nachfolgenden Nährstoffverlusten wesentlich stärker mit der Einwirkungsdauer  $t$  als mit der Ozonkonzentration  $c$  ansteigen. Die  $c \times t$ -Regel, die für gleiche Wirkungsausprägungen bei den bisher untersuchten phytotoxischen Stoffen für  $t$  einen kleineren Exponenten als für  $c$  ergab, wird offenbar für mittelfristige und langfristige Ozonwirkungen durchbrochen. Dies hat Auswirkungen auf die Gestalt und Lage der Reizschwellenfunktion für die Dosisbewertung. Auszunehmen sind hiervon zunächst nur die akuten und direkten Ozonwirkungen, vor allem auf Pflanzen, die wegen ihrer hohen Empfindlichkeit als Bioindikatoren Verwendung finden, z.B. die Tabakvarietät BEL W 3.

Die Darstellungen und Überlegungen sind in der Hoffnung vorgetragen worden, nicht nur der Diagnose bei der Aufklärung der Wirkungen von Luftverunreinigungen auf die Vegetation, sondern vor allem auch einer umfassenderen Luftgütebewertung für den vorbeugenden Immissionsschutz neue Impulse zu vermitteln.

## S c h r i f t t u m

- [ 1 ] LAMMEL, R.:  
Endgültige Ergebnisse und bundesweite Kartierung der Waldschadenserhebung 1983.  
Allgem. Forstzeitschrift (1984), Nr. 14/15, S. 340-344.
- [ 2 ] Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungsanlagen - 13. BImSchV) vom 22. Juni 1983.  
Bundesgesetzblatt, (1983), S. 719-730.
- [ 3 ] PRINZ, B., G.H.M. KRAUSE und H. STRATMANN:  
Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland.  
Hrsg.: Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NRW.  
LIS-Berichte Nr. 28 (1982), 154 Seiten.
- [ 4 ] ULRICH, B. und E. MATZNER:  
Ökosystemare Wirkungsketten beim Wald- und Baumsterben.  
Der Forst- und Holzwirt, 18 (1983), S. 468-474.
- [ 5 ] HÜTTERMANN, A.:  
Auswirkungen "saurer Deposition" auf die Physiologie des Wurzelraums von Waldökosystemen.  
Allgem. Forstzeitschrift, 38 (1983), Nr. 29, S. 663-664.
- [ 6 ] Waldschäden in Bayern - Stand: Sommer 1983.  
Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen und Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München 1983.
- [ 7 ] PRINZ, B.:  
Gedanken zum Stand der Diskussion über die Ursache der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland.  
Der Forst- und Holzwirt, 18 (1983), S. 460-468.
- [ 8 ] ULRICH, B.:  
Waldsterben durch saure Niederschläge.  
Umschau, 11 (1984), S. 348-355.
- [ 9 ] VDI-RICHTLINIE 2309, Bl.1:  
Ermittlung von Maximalen Immissions-Werten/Grundlagen.  
VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1.  
Berlin, Köln: Beuth-Verlag, März 1983.

- [ 10 ] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 28.08.1974.  
Hrsg.: Bundesministerium des Innern  
GMBI der Bundesministerien Nr. 24 (1974), S. 426 ff.
- [ 11 ] O'GARA, P.J.:  
Sulphur Dioxide and Fume Problems and their Solutions.  
Industr. Engng. Chem., 14 (1922), S. 744 ff.
- [ 12 ] THOMAS, M.D. and G.R. HILL:  
Absorption of sulfur dioxide by alfalfa and its relation to leaf injury.  
Plant Physiol., 10 (1935), S. 291.
- [13 a)] STRATMANN, H.:  
Messung und Verteilung gasförmiger Luftverunreinigungen in der Atmosphäre.  
Z. Aerosolforsch. u. -therapie, 7 (1958), S. 29-35.
- [13 b)] GUDERIAN, R., H. van HAUT und H. STRATMANN:  
Probleme der Erfassung und Beurteilung von Wirkungen gasförmiger Luftverunreinigungen auf die Vegetation.  
Z. Pflanzenkrankh. u. Pflanzenschutz, 67 (1960), S. 257-264.
- [ 14 ] VAN HAUT, H. und H. STRATMANN:  
Experimentelle Untersuchungen über die Wirkung von Schwefeldioxid auf die Vegetation.  
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 884.  
Westdeutscher Verlag/Köln und Opladen (1960).
- [ 15 ] ZAHN, R.:  
Untersuchungen über die Bedeutung kontinuierlicher und intermittierender Schwefeldioxideinwirkung für die Pflanzenreaktion.  
Staub-Reinhaltung der Luft, 23 (1963), Nr. 7, S. 343-352.
- [ 16 ] LARSEN, R.I. and W.W. HECK:  
An air quality data analysis system for interrelating effects, standards, and needed source reductions: Part 3, vegetation injury.  
JAPCA, 26 (1976), S. 325-333.
- [ 17 ] HENSEL, H.:  
Sinnesphysiologische Metrik.  
In: Lehrbuch der Sinnesphysiologie.  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1966).

- [ 18 ] UMBACH, D.M., D.D. DAVIS and S.P. PENNYPACKER:  
A Comparison of Several Dose-Response Models Based on Laboratory Exposures of Tree Seedlings to Sulfur Dioxide.  
JAPCA, 33 (1983), S. 1073-1079.
- [ 19 ] BREUER, W. und D. HENSCHLER:  
Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen: Analytische Bewertung von Durchschnitts- und Spitzenkonzentrationen.  
Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin, 10 (1975), S. 165-170.
- [20 a)] GUDERIAN, R. und H. STRATMANN:  
Freilandversuche zur Ermittlung von Schwefeldioxidwirkungen auf die Vegetation, Teil I: Übersicht zur Versuchsmethodik und Versuchsauswertung.  
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1118. Westdeutscher Verlag/Köln und Opladen (1962).
- [20 b)] GUDERIAN, R. und H. STRATMANN:  
Field experiments to determine the effects of SO<sub>2</sub> on vegetation.  
Part I: Survey of method and evaluation of results.  
C.E. Trans. 4369, Grindall House, 25 Newgate Street, E.C. 1.
- [21 a)] STRATMANN, H.:  
Freilandversuche zur Ermittlung von Schwefeldioxidwirkungen auf die Vegetation, II. Teil: Messung und Bewertung der SO<sub>2</sub>-Immissionen.  
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1184.  
Westdeutscher Verlag/Köln und Opladen (1963).
- [21 b)] STRATMANN, H.:  
Field experiments to determine the effects of SO<sub>2</sub> on vegetation, Part II: Measurement and evaluation of SO<sub>2</sub> ground level concentrations.  
C.E. Trans. 4370, Grindall House, 25 Newgate Street, E.C. 1.
- [22 a)] GUDERIAN, R. und H. STRATMANN:  
Freilandversuche zur Ermittlung von Schwefeldioxidwirkungen auf die Vegetation, III. Teil: Grenzwerte schädlicher SO<sub>2</sub>-Immissionen für Obst- und Forstkulturen sowie für landwirtschaftliche und gärtnerische Pflanzenarten.  
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1920.  
Westdeutscher Verlag/Köln und Opladen (1968).
- [22 b)] GUDERIAN, R. UND H. STRATMANN:  
Field experiments to determine the effects of SO<sub>2</sub> on vegetation, Part III: SO<sub>2</sub> ground level concentration limits damaging to fruit and forest cultivations as well as to certain types of agricultural and horticultural plants.  
C.E. Trans. 2545, Grindall House, 25 Newgate Street, E.C. 1.

- [ 23 ] Zeitliche Entwicklung der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>2</sub>-Konzentration.  
In: Monatsberichte aus dem Meßnetz des Umweltbundesamtes, H. 9/83,  
S. 2-38. Hrsg.: Umweltbundesamt, Berlin 1984.
- [ 24 ] Luftqualität im Monat August 1983.  
In: Monatsberichte aus dem Meßnetz des Umweltbundesamtes, H. 8/83,  
S. 46 und S. 50. Hrsg.: Umweltbundesamt, Berlin 1984.
- [ 25 ] KRAUSE, G.H.M., B. PRINZ and K.D. JUNG:  
Forest effects in West Germany. Paper presented by G.H.M. KRAUSE at:  
Symposium on Air Pollution and the Productivity of the Forest.  
Washington, D.C., Oct. 4-5, 1983.
- [ 26 ] Mitteilung von Herrn GROSCH, UBA-Pilotstation Frankfurt (1984).

Berichte der

LANDESANSTALT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN

- LIS-Berichte -

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus den wissenschaftlichen Untersuchungen der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Einzelexemplare werden Interessenten auf Anforderung kostenlos zur Verfügung gestellt.

Anforderungen sind zu richten an die

Landesanstalt für Immissionsschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Wallneyer Str. 6  
4300 E s s e n 1

- Berichte-Nr. 1: KRAUTSCHEID, S. und P. NEUTZ:  
(vergriffen) LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen.  
- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems - (1978).
- Berichte-Nr. 2: BUCK, M.:  
(vergriffen) Die Bedeutung unterschiedlicher Randbedingungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität (1978).
- Berichte-Nr. 3: SCHEICH, G.:  
(vergriffen) Entwicklung und Anwendung von Ausbreitungsmodellen und Luftüberwachungsprogramme in den USA (1979).
- Berichte-Nr. 4: SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:  
(vergriffen) Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten am Bau (1979).
- Berichte-Nr. 5: SPLITTGERBER, H.:  
(vergriffen) Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen (1979).
- Berichte-Nr. 6: STRAUCH, H. und K.H. GOLDBERG:  
(vergriffen) Ermittlung der Dämmwirkung von Dachentlüftern für Werkshallen im Einbauzustand unter Berücksichtigung der baulichen Nebenwege (1979).
- Berichte-Nr. 7: KRAUSE, G.M.H., B. PRINZ UND K. ADAMEK:  
(vergriffen) Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Falschfarbenfotografie für die Aufdeckung und Dokumentation von Immissionswirkungen auf Pflanzen (1980).
- Berichte-Nr. 8: WIETLAKE, K.H.:  
(vergriffen) Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schabotte-Schmiedehämmern (1980).
- Berichte-Nr. 9: STRAUCH, H.:  
(vergriffen) Methoden zur Aufstellung von Lärminderungsplänen (1980).
- Berichte-Nr. 10: HILLEN, R.:  
(vergriffen) Untersuchung zur flächenbezogenen Geräuschbelastungs-Kennzeichnung -Ziele, Methodik, Ergebnisse- (1980).
- Berichte-Nr. 11: MANNS, H., H. GIES und W. STRAMPLAT:  
(vergriffen) Erprobung des Staub-Immissionsmeßgerätes FH62I für die kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Luft (1980).
- Berichte-Nr. 12: GIEBEL, J.:  
(vergriffen) Verhalten und Eigenschaften atmosphärischer Sperrschichten (1981).
- Berichte-Nr. 13: BRÖKER, G., H. GLIWA und E. MEURISCH:  
Abscheidegrade von biologisch- und chemisch-aktiven Aggregaten zur Desodorierung osmogener Abluft von Tierkörperbeseitigungsanlagen (1981).

- Berichte-Nr. 14: BRANDT, C.J.:  
(vergriffen) Untersuchungen über Wirkungen von Fluorwasserstoff auf *Lolium Multiflorum* und andere Nutzpflanzen (1981).
- Berichte-Nr. 15: WELZEL, K. und H.D. WINKLER:  
(vergriffen) Emission und interner Kreislauf von Thallium bei einem Drehrohrofen mit Schwebegaswärmeaustauscher zur Herstellung von Portlandzementklinker unter Einsatz von Purpurerz als Eisenträger. - 1. Bericht - (1981).
- Berichte-Nr. 16: PRINZ, B. und E. KOCH:  
Umweltpolitik und technologische Entwicklung in der VR China (1984).
- Berichte-Nr. 17: BRÖKER, G. und H. GLIWA:  
(vergriffen) Untersuchungen zu den Dioxin-Emissionen aus den kommunalen Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 18: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:  
Die Entwicklung der Immissionsbelastung in den letzten 15 Jahren in der Rhein-Ruhr-Region (1982).
- Berichte-Nr. 19: PFEFFER, H.U.:  
Das Telemetrische Echtzeit-Mehrkomponenten-Erfassungssystem TEMES zur Immissionsüberwachung in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 20: BACH, R.W.:  
Über Schätzfunktionen zur Bestimmung hoher Quantile der Grundgesamtheit luftverunreinigender Schadstoffkonzentrationen aus Stichproben (1982).
- Berichte-Nr. 21: STRAUCH, H.:  
(vergriffen) Hinweise zur Anwendung flächenbezogener Schalleistungspegel (1982).
- Berichte-Nr. 22: SPLITTGERBER, H.:  
Verfahren zur Auswertung von Erschütterungsmessungen und zur Beurteilung von Erschütterungsimmissionen (1982).
- Berichte-Nr. 23: KRAUSE, G.M.H.:  
(vergriffen) Immissionswirkungen auf Pflanzen - Forschungsschwerpunkte in den Vereinigten Staaten von Amerika. Bericht über eine Reise in die USA und die Teilnahme am 13. Air Pollution Workshop in Ithaca, N. Y., in der Zeit vom 02.05.-24.05.1981 (1982).
- Berichte-Nr. 24: KÜLSKE, S.:  
(vergriffen) Analyse der Periode sehr hoher lokaler Schadstoffbelastungen im Ruhrgebiet vom 15.01.1982 bis 20.01.1982 (1982).
- Berichte-Nr. 25: VAN HAUT, H. und G.H.M. KRAUSE:  
(vergriffen) Wirkungen von Fluorwasserstoff-Immissionen auf die Vegetation (1982).
- Berichte-Nr. 26: KOCH, E., V. THIELE, J. GIEBEL, H. STRAUCH und P. ALTENBECK:  
Empfehlungen für die problemgerechte Erstellung von Immissionsschutzgutachten in Bauleitplanverfahren (1982).
- Berichte-Nr. 27: MANNS, H., H. GIES und G. NITZ:  
(vergriffen) Verbesserung der Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit von Messungen zur Ermittlung aromatischer Kohlenwasserstoffe in der Außenluft (1982).
- Berichte-Nr. 28: PRINZ, B., G.M.H. KRAUSE und H. STRATMANN:  
(vergriffen) Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland (1982).
- Berichte-Nr. 29: GIEBEL, J.:  
Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Sperrschichthöhen und Immissionsbelastung (1983).
- Berichte-Nr. 30: MANNS, H. und H. GIES:  
Ergebnisse der Laborprüfung und Optimierung des meßtechnischen Teiles der Ozon-Meßplätze im Meßnetz LIMES-TEMES (1983).

- Berichte-Nr. 31: BEINE, H., R. SCHMIDT UND M. BUCK:  
Ein Meßverfahren zur Bestimmung des Schwefelsäure- und Sulfatgehaltes in Luft  
(1983).
- Berichte-Nr. 32: BEIER, R. und P. BRUCKMANN:  
Messung und Analyse von Kohlenwasserstoff-Profilen im Rhein-Ruhrgebiet (1983).
- Berichte-Nr. 33: FRONZ, W.:  
(vergriffen) Ermittlung von Verkehrsgeräusch-Immissionen  
- zum tageszeitlichen Verlauf des Geräuschpegels und des Verkehrsaufkommens an  
Bundes- und Sammelstraßen (1983).
- Berichte-Nr. 34: BRÖKER, G.:  
(vergriffen) Zusammenfassende Darstellung der Emissionssituation in Nordrhein-Westfalen und  
der Bundesrepublik Deutschland für Stickstoffoxide (1983).
- Berichte-Nr. 35: PIORR, D. und R. HILLEN:  
Veränderung akustischer Kenngrößen infolge der nächtlichen Abschaltung von  
Lichtsignalanlagen (1983).
- Berichte-Nr. 36: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:  
Benzol-Immissionsmessungen im Lande Nordrhein-Westfalen (1983).
- Berichte-Nr. 37: BACH, R.-W. und H. STRATMANN:  
Untersuchungen zur Bestimmung der Aufnahme rate des IRMA-Gerätes bei verschiedenen  
Anströmverhältnissen (1983).
- Berichte-Nr. 38: WIETLAKE, K.H.:  
(vergriffen) Beurteilung und Minderung tieffrequenter Geräusche (1983).
- Berichte-Nr. 39: STRAUCH, H. und K. SCHWENGER:  
Geräusche und Erschütterungen, verursacht durch elektrisch angetriebene  
Wärmepumpen (1983).
- Berichte-Nr. 40: BRÖKER, G. und B. SCHILLING:  
Schwermetallemissionen bei der Verbrennung kommunaler Klärschlämme (1983).
- Berichte-Nr. 41: HILLEN, R.:  
Über Möglichkeiten zur Verbesserung der Qualität von Schießgeräuschmessungen im  
Immissionsbereich (1983).
- Berichte-Nr. 42: KLEIN, M.:  
Untersuchung zur Schallausbreitung im Freien - Ziele, Physik der  
Schallausbreitung, Vorgehensweise, Ergebnisse - (1983).
- Berichte-Nr. 43: PFEFFER, H.-U., S. KÜLSKE und R. BEIER:  
Jahresbericht 1981 über die Luftqualität an Rhein und Ruhr.  
Ergebnisse aus dem telemetrischen Immissionsmeßnetz TEMES in Nordrhein-Westfalen.  
(1984)
- Berichte-Nr. 44: BUCK, M., H. IXFELD und R. BEIER:  
Immissionsbelastung durch Fluor-Verbindungen in der Nachbarschaft der  
Aluminiumhütte LMG in Essen. (1984).
- Berichte-Nr. 45: STRAUCH, H. und R. HILLEN:  
Geräuschimmissionen in Großstädten; Flächenbezogene Kennzeichnung dieser  
Geräuschimmissionen (1984).
- Berichte-Nr. 46: BUCK, M. und P. BRUCKMANN:  
Air quality surveillance in the Federal Republic of Germany (1984).

Berichte-Nr. 47: BEIER, R.:  
Kohlenwasserstoffbelastung in Ahlen - eine statistische Analyse - (1984).

Berichte-Nr. 48: SCHADE, H.:  
Prognose der Schadstoffemissionen aus Verbrennungsanlagen im Belastungsgebiet  
Rheinschiene-Süd für die Jahre 1985 und 1990 (1984).

Anmerkung:

Die LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in zahlreichen Universitäts- und Hochschulbibliotheken zur Ausleihe bzw. Einsichtnahme zur Verfügung.