

# Soznat

Materialien für den Unterricht 10



Luftverschmutzung  
sauren Regen

Naturwissenschaften sozial

STÄUDEL, LUTZ :

Saurer Regen : Materialien zu d. Unterrichtsreihe /  
Lutz Stäudel, Hrsg.; AG Chemie u. Physik in  
d. Oberstufe, Gesamthochsch. Kassel. - 1. Aufl.  
- Marburg : Redaktionsgemeinschaft Soznat,  
1982.

(Soznat ; 10)

ISBN 3-922850-12-X

NE: QT

Erste Auflage 1982

(c) Redaktionsgemeinschaft Soznat Marburg  
Ernst-Gillier-Str. 5, 3550 Marburg  
Druck: Alpdruck Marburg

Alle Rechte vorbehalten - Kopien für Unterrichtszwecke erlaubt

ISBN 3 - 922850 - 12 - X

MATERIALIEN FÜR DEN UNTERRICHT BAND 10

LUTZ STÄUDEL

S A U R E R R E G E N

MATERIALIEN ZU EINER UNTERRICHTSREIHE

MARBURG 1982

REDAKTION: R. GEORGE, A. KREMER, C. OPPER  
GRAPHIK : A. STILLE

HERAUSGEBER: AG CHEMIE UND PHYSIK IN  
DER OBERSTUFE  
C/O LUTZ STÄUDEL,  
GESAMTHOCHSCHULE KASSEL,  
FB 19, HEINRICH-PLETT-  
STRASSE 40, 3500 KASSEL

## I N H A L T

1. ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DES INHALTS
2. ZUSAMMENHANG VON KURSINHALT UND KSP
3. SACH-/PROBLEMSTRUKTURSKIZZE MIT ANMERKUNGEN
4. DER TATSÄCHLICHE UNTERRICHTSVERLAUF
5. MATERIALIEN
6. LITERATUR
7. ERFAHRUNGSBERICHT
8. HINWEISE ZUR LEISTUNGSÜBERPRÜFUNG

## 1. Allgemeine Beschreibung des Inhalts

Diesem Materialpaket für eine Unterrichtseinheit/einen Kurs "Saurer Regen" liegen Erfahrungen aus verschiedenen Klassen (9/10/11) und verschiedenen Schulformen (Gesamtschule, Gymnasium, Berufsfachschule) zugrunde. Das Thema eignet sich sowohl für den Chemieunterricht in der Sekundarstufe II wie auch für Unterrichtsprojekte in der Sekundarstufe I.

"Sauren Regen" gibt es nicht erst seit dem Erscheinen der ähnlich betitelten Spiegel-Serie im Herbst 1981. Seit mehr als 15 Jahren ist das Problem des zunehmenden Säuregehalts von Niederschlägen in den Industriestaaten - und ihren Nachbarländern - bekannt, jedoch nur wenig im öffentlichen Bewußtsein. Hauptursache für den Säuregehalt sind Emissionen von Schwefeldioxid aus Industrieanlagen, durch Energieerzeugung, Hausbrand und Verkehr. Die Tendenz der  $\text{SO}_2$ -Belastung ist weiterhin steigend.

Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit der Luftbelastung im Unterricht ist die regionale und globale Bedrohung der Ökosphäre durch  $\text{SO}_2$ . Eine vorläufige Bestandsaufnahme kann zu folgenden Schwerpunkten führen:

- Ausmaß der Luftverschmutzung
- Ursachen der Luftverschmutzung
- Interessenkonflikte (Ökologie versus Ökonomie)
- ökologische Wirkungen von Saurem Regen / $\text{SO}_2$
- staatliche Maßnahmen / Kontrollen (Gesetzgebung, Zuständigkeiten)
- Meßverfahren

Die Festlegung der Schwerpunkte der sich anschließenden Unterrichtsarbeit sollte sich in erster Linie an den Interessen der Kursgruppe und dem Rahmenthema des Kurses orientieren.

Die Materialien dieses Heftes bieten Texte und Versuchsanleitungen an für zwei Alternativen:

- Variante A mit einem meßtechnischen Akzent
- Variante B mit einem chemisch/ökologischen Akzent.

Für beide Varianten gilt gleichermaßen, daß auch Untersuchungen außerhalb der Schule durchgeführt werden können, daß die lokale

Situation ein Gegenstand dieser Untersuchung ist, und daß die Ergebnisse schließlich im gesellschaftlichen Kontext (Verursacher, Folgen, Staat, Interessen) diskutiert und bewertet werden müssen.

Mögliche konkrete Unterrichtsprodukte: Dokumentation, Ausstellung.

Die Materialien und Vorschläge eignen sich für folgende Kursthemen (KSP-Chemie Hessen):

- Analysen- und Trennungsmethoden (LK in 13/I)
- Chemie und Umwelt (LK in 13/II)
- Analysenmethoden zur Umweltuntersuchung (GK in 13/I)
- Aspekte der chemischen Technologie (GK in 13/II)
- Chemische Gleichgewichte (GK in 13/I)

## 2. Zusammenhang von Kursinhalten und Kursstrukturplänen

Nicht nur die hessischen Kursstrukturpläne Chemie betonen die "Rolle der Chemie als Zivilisationsfaktor". In diesem "übergeordneten Zusammenhang" ist es von Bedeutung, die Schüler möglichst so zu qualifizieren, daß sie zur "Mitwirkung an Entscheidungsprozessen z.B. zum Schutze der Umwelt und zur Verbesserung der Lebensbedingungen" fähig sind (S. 4). Ökologische Themen sind besonders geeignet, die "Wechselbeziehungen zu den Nachbarwissenschaften (Physik, Biologie, Medizin, Geowissenschaften)" für den Schüler deutlich zu machen (S. 3). Durch gleichzeitige exemplarische Auswahl und durch problemorientiertes Arbeiten und Lernen (S. 2) lassen sich einerseits diese Beziehungen erschließen, andererseits können so Wissens Elemente des eigenen Faches in neue strukturelle Zusammenhänge gestellt werden (Beispiel:  $\text{SO}_2$  in der Luft: Welche Möglichkeiten der Konzentrationsmessung ergeben sich aus der Kenntnis der chemischen Eigenschaften?  $\text{SO}_2$  im Boden: Welche Folgereaktionen - Gleichgewichtsverschiebungen - Lösungsvorgänge sind durch pH-Wertänderung zu erwarten? Wie lassen sich physiologische Schädigungen erklären?). Somit können auch "die Stoffkenntnisse erweitert und das Verständnis für die der Stoffsystematik zugrunde liegenden Zusammenhänge vermittelt" werden. (S. 3).

Ebenso wird den Schülern die Möglichkeit zum "Erlernen von Methoden wissenschaftlichen, insbesondere chemischen Arbeitens" (S. 2) gegeben, mit all den diesem Verfahren zugeschriebenen Verhaltensweisen. Unterstützt wird dies durch die Möglichkeit zahlreicher "Experimente, die vom Schüler selbst ausgeführt werden" ... "bis hin zur selbständigen Lösung kleiner, eventuell selbst gestellter experimenteller Aufgaben" (S. 5). Entsprechendes gilt für ein sorgfältiges methodenkritisches Arbeiten, für den Umgang mit Fachliteratur und eine klare Unterscheidung zwischen Beobachtung und Deutung.

Auf Zuordnungsmöglichkeiten zu bestimmten Grund- und Leistungskursen wurde bereits unter 1. hingewiesen. Um die starke inhaltliche Affinität mit dem Kursstrukturplan Chemie zu verdeutlichen, sind im folgenden Stichpunkte zu den beiden Leistungskursen in Jahrgangsstufe 13 zitiert:

a) Analysen- und Trennungsmethoden LK 13/I (S. 18)

- Aufspüren und Identifizieren von sehr geringen Substanzmengen
- Prüfung und Überwachung der Luftreinheit
- klassische analytische Methode und Methodenkritik
- Methoden der Stofftrennung
- elektroanalytische Methoden und ihre Anwendung
- Anwendung der Analysen- und Trennungsmethoden zur selbständigen Untersuchung eines kleineren Problems

b) Chemie und Umwelt LK in 13/II (S. 26)

- Wirkungen der Industrialisierung auf die Umwelt
- umweltbewußte Einstellung
- Auswerten statistischen Materials aus verschiedenen Fachbereichen und kritische Analyse
- Exkursionen zur Erkundung der örtlichen Gegebenheiten
- Ursachen der Luftverschmutzung, ihre Folgen für Mensch, Tier und Pflanze, Möglichkeiten der Verminderung der Luftverunreinigung.

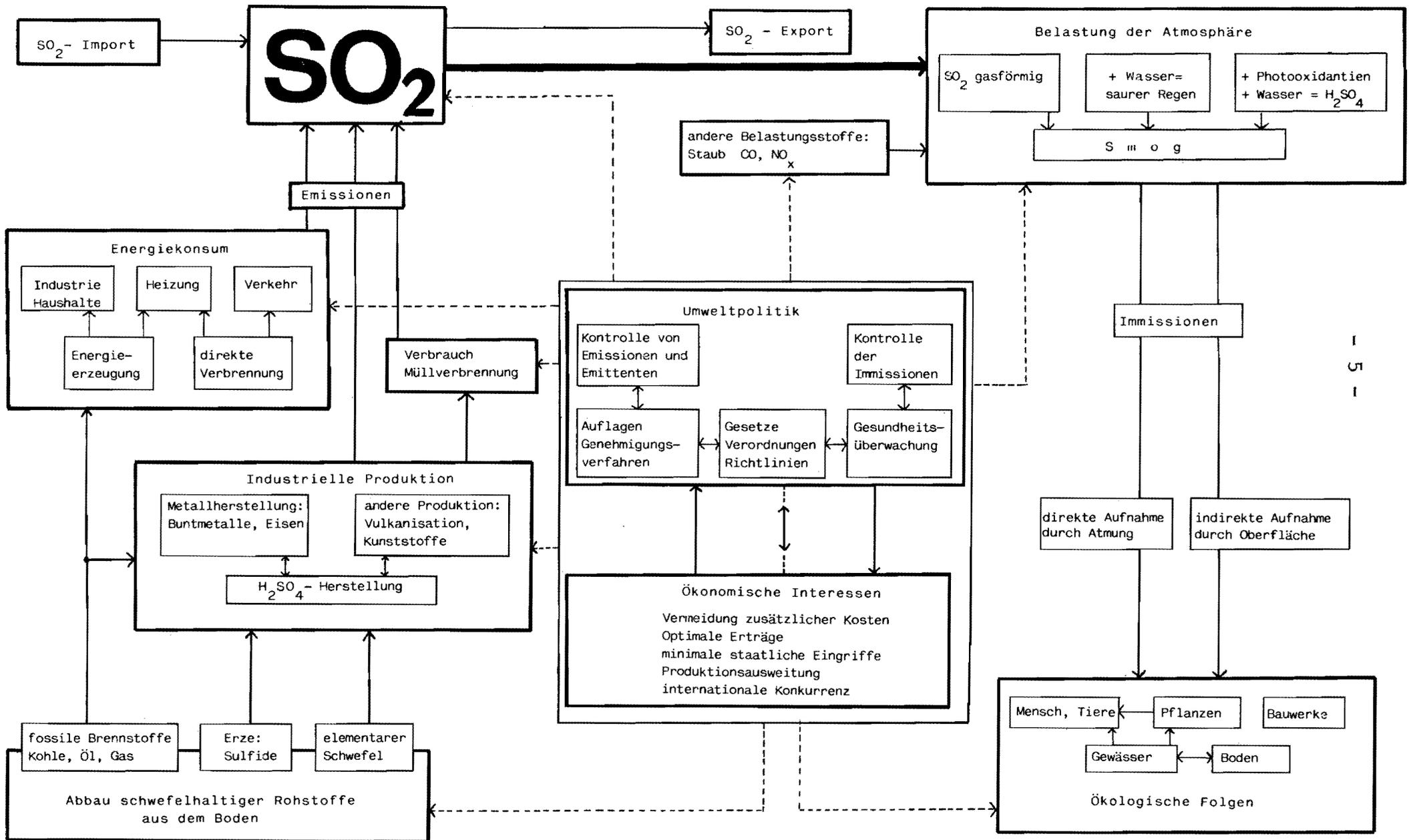
3. Anmerkungen zur Sach-/ Problemstrukturskizze (S. 5):

Die Sach-/ Problemstrukturskizze stellt einen Versuch dar, die komplexen Zusammenhänge von Verursachern und gesellschaftlich-wirtschaftlichen Interessen, Immissionen und ökologischen Folgen im Falle des "Sauren Regens" darzustellen. Verbindendes Element ist dabei der Stofftransport des Schwefeldioxids (durchgezogene Pfeile).

Im mittleren Block "Umweltpolitik - ökonomische Interessen" sind die z.T. gegenläufigen Interessen und wechselseitigen Einflußnahmen von Staat/Gesellschaft und Wirtschaft angedeutet. Die von diesem Block ausgehenden gestrichelten Pfeile haben daher pauschalen Charakter und sind interpretationsbedürftig. Z.B. beinhaltet die unterbrochene Linie, die auf dem Block "industrielle Produktion" weist, sowohl die Interessen der Kapitaleigner (etwa Produktionsausweitung, Vermeidung zusätzlicher Kosten durch staatliche Auflagen) wie auch das Bestreben des Staates, die Umweltbelastung auf einem "vertretbaren Niveau" zu halten.

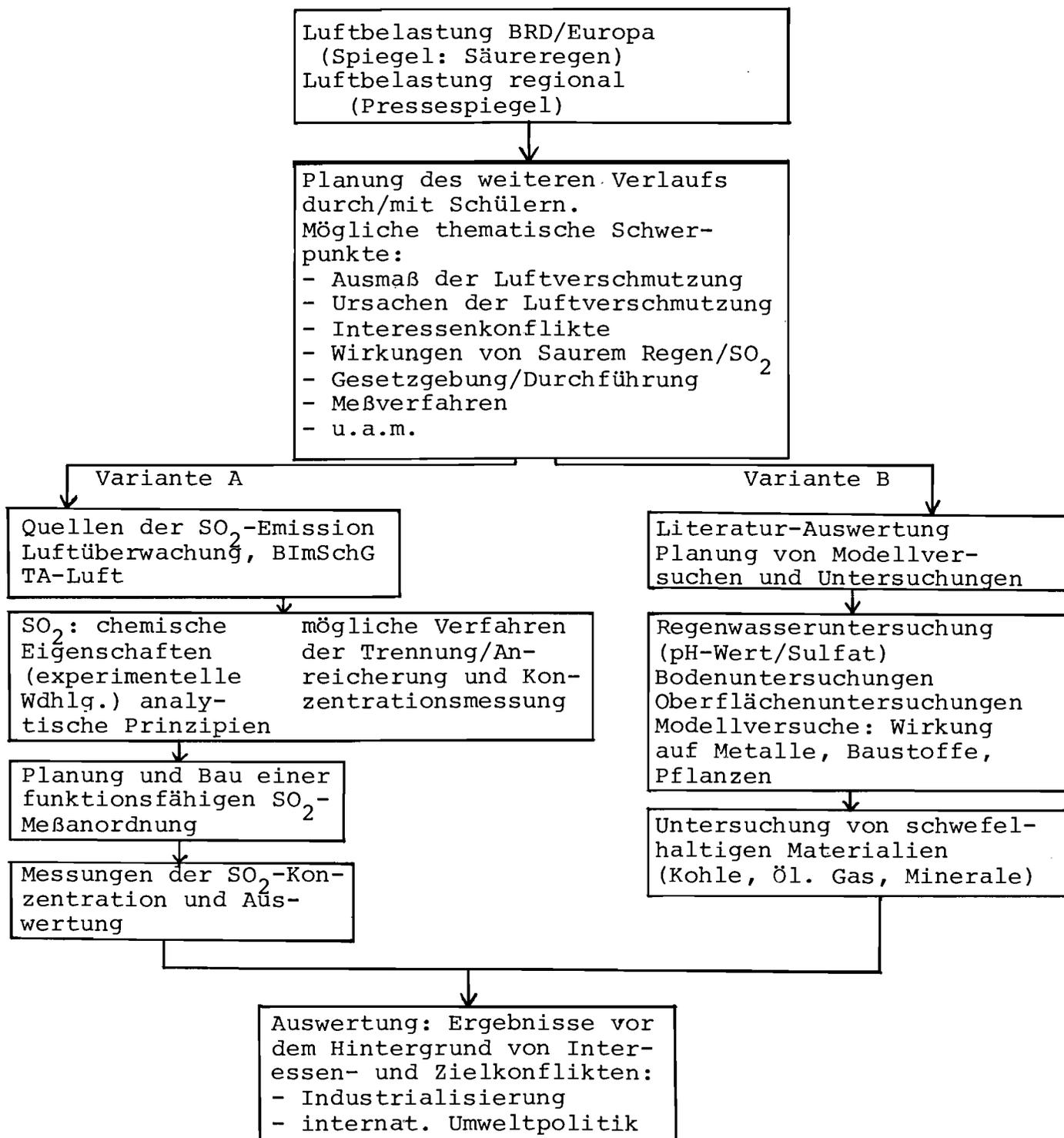
Unterricht über Sauren Regen kann mit verschiedenen Schwerpunkten durchgeführt werden, er bezieht sich dann auf unterschiedliche Teile und Stränge des Diagramms. Selbstverständlich ist es auch möglich, daß Sie mit Ihren Schülern selbst eine ähnliche Strukturskizze erarbeiten.

Im Unterschied zu den bisher erschienenen Materialien (Kunststoffe, Heizenergie) weist diese Strukturskizze keine explizierte Zuordnung von naturwissenschaftlichen Inhalten zu bestimmten Problemfeldern auf. Der Stoffkreislauf schließt diese Inhalte bereits weitgehend ein.



#### 4. Unterrichtsverlauf

##### "SAURER REGEN"



### Anmerkungen zum Unterrichtsverlauf

Das einleitende Referat "Säureregen" (unter Verwendung der Spiegel-Serie Heft 47, 48, 49/1981) kann bei rechtzeitiger Vorplanung bereits von einem Schüler/einer Schülergruppe eingebracht werden. Es ist dabei darauf zu achten, daß die Detailfülle der Artikel drastisch eingeschränkt wird, zugunsten einiger zentraler Aussagen ( $\text{SO}_2$  als wahrscheinliche Ursache; Herkunft; Wirkungen auf Pflanzen, Menschen, Tiere; Umweltpolitik; usw.).

Alternativ oder ergänzend kann ein "Pressespiegel" mit Meldungen zur Luftbelastung erstellt und vorgestellt werden. Dazu reicht die örtliche Tageszeitung des letzten halben Jahres in der Regel aus. Die sich anschließende Diskussion konzentriert sich erfahrungsgemäß zunächst auf Medien-kritische Aspekte ("unsachliche Berichterstattung", "unklare Aussagen"). Das gleichzeitige Bedürfnis nach genauerer Information soll für die folgende Planung genutzt werden und den weiteren Unterrichtsverlauf strukturieren helfen.

Die angegebenen Schwerpunkte wurden bei den verschiedenen Unterrichtserprobungen verschieden stark akzentuiert. Mit Kursgruppen, die selbständiges Arbeiten gewohnt sind, könnten einige der Schwerpunktthemen arbeitsteilig parallel behandelt werden. Problematisch erscheint dabei die gegenseitige Vermittlung der Gruppenergebnisse.

Als realistische Varianten haben sich zwei Unterrichtsverläufe ergeben, die im Flußdiagramm alternativ gegenüberstehen:

Variante A hat einen meßtechnischen Schwerpunkt. Sie geht aus von der politisch-gesellschaftlichen Verantwortung für die Luftbelastung und deren Ursachen (Stichpunkte: Quellen der  $\text{SO}_2$  Emission; Umfang der  $\text{SO}_2$ -Immission; politische Einflußnahme: Bundesimmissionsschutzgesetz - Ziele und Kontrolle, TA-Luft, VDI-Richtlinien).

Die Frage nach der Überwachung der Luft und deren meßtechnischer Realisierung führt über eine (experimentelle) Teilwiederholung der chemischen Eigenschaften des Schwefels und seiner Oxide zu möglichen Analysenverfahren. Die Kombination der Reaktionsmöglichkeiten von  $\text{SO}_2$  mit physikalisch-chemischen Anreicherungs- und Trennverfahren erlaubt eine große Auswahl prinzipiell funktio-

nierender Anordnungen. Unserer Erfahrung nach liefert jedoch nur eine Absorption in  $H_2O_2$  verbunden mit Leitfähigkeits-Differenzmessung im notwendigen Konzentrationsbereich befriedigende Ergebnisse. Der Bau einer solchen Meßapparatur kann entweder frei oder nach Vorlage erfolgen oder sich an die VDI-Richtlinie "Picoflux" anlehnen.

Messungen im Freien an möglicherweise besonders belasteten Stellen - während und außerhalb des Unterrichts - geben Hinweise auf die lokale Luft-Situation. Ergänzt werden sollte dies auf jeden Fall durch Auskünfte von Behörden am Ort und Anfragen beim zuständigen Landesamt/Ministerium.

Variante B betont die ökologischen und sonstigen Auswirkungen des "Sauren Regens". Beispiele für Modellversuche ( $SO_2$ -Wirkung auf keimende Kresse, auf Marmor, auf Metalle) sind im Anhang wiedergegeben. Daneben sind Real-Untersuchungen möglich: pH-Wert von Regenwasser und von Gewässern, Bodenuntersuchungen, Bestimmung des Sulfatgehalts von Sandsteinoberflächen und Rost u.a.m. Biologisch versierte Lehrer können auch Felduntersuchungen (z.B. Flechtenverbreitung, Zustand von Nadelbäumen) initiieren bzw. anleiten. Die Planung und Auswahl der Experimente kann sich an einer textkritischen Auswertung der Spiegel-Serie orientieren. Weitere Untersuchungen können sich mit den  $SO_2$ -Quellen befassen (Schwefel in Kohle, Öl, Erdgas). Für halbquantitative Versuche kann hier auch das Dräger-Gas-Spürgerät eingesetzt werden (für  $SO_2$ -Messungen in der Luft ist es nicht geeignet!). Die hier erhaltenen Ergebnisse sind im Unterschied zu Variante A eher indirekter Art (Rückschluß von Umweltzerstörung auf Luftbelastung), eignen sich aber ebenso wie die dort erhaltenen direkten Meßwerte für eine (Schul-) öffentliche Dokumentation.

Beide Varianten münden in eine abschließende (oder weiterführende) Auswertungsphase. Neben einer kritischen Betrachtung der Versuchsergebnisse sollte hier auf alle Fälle ein Rückbezug auf das gesellschaftlich-politische Umfeld der Luftverschmutzung erfolgen. Im Zusammenhang mit dem meßtechnischen Schwerpunkt sind dabei folgende Aspekte möglich:

- Stand der Technik (TA-Luft), wer bestimmt diesen, welche Interessen gibt es?

- Meßverfahren, Aussagefähigkeit, Genauigkeit usw.
- Darstellung von Meßdaten: Informationsverlust bei Zusammenfassung, Glättung durch Mittelwertbildung

Für die Variante B kommen außerdem in Betracht:

- wissenschaftliche Vorhersagen (Baumsterben), Theoriebildung und politische (Nicht-) Berücksichtigung
- Veränderungen im Bereich von Produktion und Konsum (mögliche Alternativen zu emissionsträchtigen Prozessen)

#### 5. Materialien:

Die Materialien sind als Lehrer- und/oder Schülerarbeitsblätter konzipiert. Als Basisinformation bieten sich verschiedene Texte an (z.B. aus der Zeitschrift Natur oder aus dem Funkkollieg Mensch und Umwelt, siehe Literaturliste). Als M1 ist eine gekürzte Fassung der Spiegel-Artikel-Serie "Säureregen" wiedergegeben. Erfahrungsgemäß erleichtert eine journalistische Aufbereitung - trotz ihrer Problematik - den Schülern den Einstieg in eine komplexe Thematik. Die Auslassungen wurden nicht besonders kenntlich gemacht.

Als Ergänzung sollte unbedingt die kostenlos erhältliche Broschüre des Umweltbundesamtes angefordert werden:

Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid - Ursachen, Wirkungen, Minderung; UBA-Texte, Berlin 1980  
Bezugsadresse: Umweltbundesamt, Bismarkplatz 1, 1000 Berlin 33.

Ebenso sollten Kopien beschafft werden von:

- Bundes-Immissionsschutz-Gesetz vom 21.3.1974, zuletzt geändert am 14.12.1976, Bundesgesetzblatt Teil I, S. 721 bzw. S. 3341.
- Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) vom 28.8.1974, Gemeinsames Ministerialblatt S. 426.
- VDI-Richtlinie Nr. 2451 Blatt 1-4 (Meßverfahren zur Bestimmung von Schwefeldioxid in der Atmosphäre).

Original-Artikel  
abrufbar im Spiegel-  
Archiv - siehe  
Anhang



**Fichtensterben im Harz:** „Die Schäden haben stürmisch zugenommen, viele Bäume gehen in wenigen Wochen kaputt“

## Säureregen: „Da liegt was in der Luft“

Schwefelhaltige Niederschläge vergiften Wälder, Atemluft und Nahrung (I)

In Westdeutschlands Wäldern, warnen Forstexperten, „tickt eine Zeitbombe“: Ein großflächiges Tannen- und Fichtensterben ist, wie Fachleute befürchten, erstes Vorzeichen einer weitweiten „Umweltkatastrophe von unvorstellbarem Ausmaß“. Denn der Auslöser des

stillen Wald-Untergangs, saure Niederschläge aus den Schloten von Kraftwerken und Raffinerien, bedroht nicht nur Flora und Fauna, sondern auch die menschliche Gesundheit. In einer dreiteiligen Serie untersucht der SPIEGEL Ausmaß und Ursachen der Gefahr

Einer der ersten, denen es auffiel, war Karl Scheffold, Forstdirektor im Schwarzwald-Städtchen Alpirsbach. „Etwa zehn Jahre“ ist es her, erzählt er, da wurden die imposanten Kronen 200jähriger Tannen schütter, und die bis zu 45 Meter hohen Wipfel färbten sich grau.

Mittlerweile gibt es in Scheffolds Schwarzwaldrevier „kaum eine Tanne mehr, die nicht betroffen ist“.

Der sogenannte pathologische Naßkern im Innern der Stämme – eine breiige, faulige Masse, die normalerweise allenfalls ein Zehntel der Schnittfläche gefällter Bäume füllt – macht nun oft 80 Prozent und mehr aus, und seit ein paar Jahren verlieren selbst Jungtannen vorzeitig die Nadeln.

Auch weniger empfindliche Nadelbäume sind neuerdings ebenso vom Siechtum befallen wie die Tanne. Am Westhang des Bayerischen Waldes modern bereits vier Fünftel aller Fichten.

„Im Herbst 1980“, beobachtete Waldwissenschaftler Professor Schütt, „häufte sich die Schäden an Fichten erstmals. Im Winter haben sie stürmisch zugenommen, sowohl an Zahl wie auch an Intensität. Viele Bäume gehen in wenigen Wochen kaputt.“

Hoch im Norden, im Ostfriesischen bei Krummhörn, sind Pappeln und Erlen seit einiger Zeit so sehr geschwächt, daß sie nur noch auf der windabgewandten Seite Blätter tragen. Im Taunus, wo ein großflächiges Fichtensterben nach Feststellung des Forstamtes Usingen „unmittelbar bevorsteht“, werden nun alkalische Schlämme auf den Waldboden geschüttet.

Im Staatsforst Rosengarten, in der Nähe von Hamburgs Schwarzen Bergen, läßt Förster Wilken Wiebalck den Humus mit Kalk bestreuen – in der vagen Hoffnung, auf diese Weise die auch dort schon grassierende Baumkrankheit kurieren zu können.

Ob Ostbayern oder Ostfriesland, ob Schwarzwald oder Schwarze Berge – viele Landstriche sind in diesem Jahr, stärker als je zuvor, von Waldkalamitäten betroffen. Schadensmeldungen und Schilderungen mannigfacher Symptome treffen aus allen Bundesländern immer wieder ein:

▷ In Nordrhein-Westfalen schlug Landwirtschaftsminister Hans Otto Bäumer „Alarm“, nachdem eine amtliche „Waldzustandserfassung“ ergeben hatte, daß in 58 Prozent der untersuchten Fichtenbestände mit akuter „Waldgefährdung“ gerechnet werden muß, vor allem im nördlichen Ruhrgebiet, in der Haard und im Staatsforst Wesel.

▷ In Hessen, insbesondere in der Rhein-Main-Region und im Lahn-Dill-Kreis, sind nach einer Diagnose des Wiesbadener Umweltministeriums bereits 3000 Hektar Wald erkrankt; Forstleute registrieren vor allem bei Kiefer und Fichte spärliche Benadlung, Verfärbung und „schnelle Vergreisung“.

▷ In Bayern, ob im Frankenwald oder am Alpenrand, sind nach Feststellung des „Bundes Naturschutz“ 55 000 Hektar Nadelbaumbestand „am Ende“; unweit von München starben hundertjährige Fichten binnen 14 Tagen vollständig ab. Für kleinere

Privatwald-Besitzer hat das Baumsterben, so ein Fachmann im Münchner Landwirtschaftsministerium, bereits „das Ausmaß einer existenziellen Bedrohung erreicht“.

▷ In Baden-Württemberg ist die Tanne gar auf 64 000 Hektar hinfällig, zudem sind Tausende von Fichten erkrankt. „Und man muß befürchten“, sagt der Freiburger Forstbotaniker Hans-Jochen Schröter, „daß sich das Fichten-Sterben ausdehnt, bis in den Norden.“

Behält Schröter recht, wäre allein durch die Fichtenkrankheit die Hälfte des westdeutschen Waldbestandes langfristig gefährdet: Fast zehn der zwanzig Milliarden Waldhäume, die knapp ein Drittel der Bundesrepublik bedecken, zählen zur Art *Picea abies*, die als „Brotbaum“ der Forstwirtschaft gilt.

Das Umwelt-Übel scheint dem deutschen Wald mehr zu schaden als die Summe jener Gefahren, die der Forstwirtschaft seit eh zu schaffen machen: Rotfäule und Rüsselkäfer, Waldbrand und Wildverbiß. Für Forstexperten adieren sich die Schadensmeldungen zu einem Krankheitsbild, das manchen schon den Zusammenbruch des gesamten Ökosystems befürchten läßt.

Nachdem Forstkundler sich in den siebziger Jahren auf manchen Holzweg begeben und eine wahre „Odyssee von Vermutungen, Spekulationen und Hypothesen“ (Schütt) bewältigt haben, gilt nun als wahrscheinlich, daß das Baumleiden nicht auf irgendeine Einzelursache zurückzuführen, sondern offenbar eine sogenannte Komplexkrankheit ist – die gleichwohl eine Primärursache zu haben scheint.

Quelle: Spiegel, Heft 47, 48, 49; 1981

Von Monat zu Monat verdichten sich wissenschaftliche Indizien, die einer seit Jahren diskutierten Hypothese von hoher politischer Brisanz mehr und mehr Gewicht verleihen:

▷ Die allerorten auftretenden verschiedenartigen Baumseuchen haben wahrscheinlich eine gemeinsame Hauptursache: die zunehmende Luftverschmutzung über Westdeutschland, insbesondere durch Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) aus Ölheizungen, Auspuffröfen und, vor allem, den Schloten von Kraftwerken, Erzhöfen und Raffinerien.

▷ Das rapide Absterben der besonders SO<sub>2</sub>-gefährdeten Nadelbäume ist - bei zunehmender Schwefelbelastung der Luft - nur die „Spitze eines Eisberges“ (Schütt), der Anfang vom Ende vieler anderer Baumarten.

▷ Schwefelverbindungen, die als Staub oder „Saurer Regen“ auf die Bundesrepublik niedergehen, schädigen nicht nur das bewaldete Drittel des Landes, sondern richten auch an anderen Nutzpflanzen sowie an Bauwerken Milliarden Schäden an und bedrohen zunehmend die Gesundheit Zehntausender von Bundesbürgern.

Wenn sich die SO<sub>2</sub>-Theorie weiter erhärtet, droht der Bundesrepublik, wie Forstbotaniker Schütt warnt, „eine Umweltkatastrophe von bisher unvorstellbarem Ausmaß“. Der „Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland“ (BUND) sieht die grünen Lungen des Landes „vom schwarzen Atem“ angeweht.

Das Schwefeldioxid, von dem das Unheil droht, steht zwar von der Menge her (hinter dem Kohlenmonoxid) auf dem zweiten Rang der westdeutschen Luftschmutz-Tabelle, in der Schadwirkung aber eindeutig auf Platz eins.

Schwefel - jener Stoff, an dessen Geruch im Mittelalter der Teufel zu erkennen war - wird freigesetzt, wann immer fossiler Brennstoff verfeuert, verflüssigt, vergast oder verstromt wird. Jährlich gehen auf die Bundesrepublik mittlerweile rund 3,5 Millionen Tonnen SO<sub>2</sub> nieder, das Doppelte der 1950 registrierten Menge.

Zunehmend wird deutlich, was die satanische Substanz an toter wie an lebender Materie anzurichten vermag. Wann immer etwa im Ruhrgebiet während der letzten Jahre Smog-Alarm drohte, war Schwefeldioxid die Hauptursache.

Das farblose, stechend stinkende Gas scheint, kombiniert mit überdurchschnittlicher Belastung durch Kohlenmonoxid, schuld daran zu sein, daß zum Beispiel in einigen Duisburger Stadtteilen bis zu viermal so viele Menschen an chronischer Bronchitis leiden wie in ländlichen Gegenden und daß auch die Lungenkrebssterblichkeit im Ruhrgebiet oder im Saarland weit über dem Bundeschnitt liegt.

Wie gefährlich die Gift-Gas-Mixtur Smog vor allem Kindern, Alten und Kranken werden kann, ist seit Jahrzehnten bekannt. Am drastischsten zeigte es sich 1952 in London, wo Smoke und Fog sich zu derart giftigem Rauch-Nebel mischten, daß binnen drei Tagen 4000 Menschen ums Leben kamen. Im Dezember 1962, als im Ruhrgebiet wieder mal der Smog waberte, starben 156 Menschen mehr als im gleichen Zeitraum des Vorjahres.

Was in Deutschland, nicht nur an Rhein und Ruhr, vom Himmel fällt, hat mit dem Regen vorindustrieller Zeiten nur noch den Namen gemeinsam. Nicht Wasser, sondern verdünnte Lösungen von Schwefel- und Salpetersäure gehen

hernieder - allemal aggressiv genug, selbst Marmor, Stein und Eisen zu zerschlagen.

So ist der Kölner Dom, erbaut aus Sand- und Kalksandstein, in den vergangenen 30 Jahren schneller verwittert als in den 300 Jahren zuvor. Die Renovierung des gotischen Gemäuers, das jetzt mit einer Art Schutzlack überzogen wird, kostet Jahr für Jahr vier Millionen Mark.

Sandstein- und Muschelkalk-Proben, die Luftforscher den Bauwerken entnommen hatten, verloren unter Einwirkung von SO<sub>2</sub> innerhalb eines einzigen Jahres durchschnittlich drei bis vier Prozent ihres Gewichts.

Auch Stahlbeton ist vor dem Schwefelregen nicht mehr sicher. Der Bochumer Klimatologe und Stadtökologe Wilhelm Kuttler weist in einer jüngst vorgestellten Studie nach, daß die Lebensdauer von Betonbauten durch den scharfen Regen um nahezu die Hälfte verkürzt wird - möglicherweise eine der vielen Ursachen dafür, daß allerorten Spannbeton-Bauwerke reißen oder zusammenbrechen, von Autobahnbrücken im Sauerland bis zur West-Berliner Kongreßhalle, an der letztes Jahr ein Teil des Daches herunterkrachte.

Eine grobe Schätzung beziffert allein für die Bundesrepublik Deutschland die Kosten für die Beseitigung von Gebäude- und Korrosionsschäden durch Luftverschmutzung auf jährlich vier Milliarden Mark, Wasch- und Reinigungsaufwand inbegriffen.

Daß der betonfressende Regen Pflanzen erst recht zu schädigen vermag, nimmt da nicht wunder - und ist altbekannt: Winterlinde und Lärche, Fichte und Tanne etwa, von Botanikern allesamt als besonders SO<sub>2</sub>-empfindlich eingestuft, werden von den Behörden für Aufforstungen im Kerngebiet des Ruhrreviers gar nicht mehr zugelassen.

Schwefeldioxid, so und ähnlich steht es seit langem in jedem besseren Nachschlagewerk, wirkt „bes. giftig“ auf Pflanzen: „Nadelhölzer gehen vielfach ein, wenn in der Luft auch nur geringe Spuren von SO<sub>2</sub> enthalten sind“, heißt es etwa in „Römpps Chemie-Lexikon“.

Der Bonner Sachverständigenrat für Umweltfragen weist in seinen Gutachten ebenfalls darauf hin, daß es nicht einmal extremer SO<sub>2</sub>-Schübe bedarf, um Bäume zu schädigen - im Gegenteil. Gerade „bei geringer Konzentration und langer Einwirkungszeit“ sei „die Schwefelanreicherung in den Blättern besonders groß“. Die Folge seien verminderte „Wuchsleistung, Ertragshöhe und Qualität von Pflanzen“.

Während diese Umstände zumindest seit den sechziger Jahren bekannt sind, ist eine andere Erkenntnis für etliche bundesdeutsche Umweltwissenschaftler offenbar jüngerer Datums: daß sich Schwefelschäden nicht, wie noch vor einigen Jahren angenommen, auf wenige besonders belastete Wälder am Rande von Industriezonen beschränken.

Schwefeldioxid sei, verlautebarte noch 1975 beispielsweise das Bonner Innenministerium, ein „lokal eng begrenztes Problem“. Luftforscher Wilhelm Knabe von der NRW-Landesanstalt für Ökologie registrierte 1978 in einem Aufsatz über „Luftverunreinigungen und Waldwirt-

schaft“ außerhalb des Ruhrgebiets lediglich „lokale Waldschäden in der Nähe von Industrieanlagen“. Der Berliner Biologe Adolf Kloke von der Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft publizierte im selben Jahr die Ansicht, „der größere Teil der Vegetationsdecke der Bundesrepublik“, „etwa 93 Prozent der Fläche“, werde „durch Immissionen praktisch nicht beeinflusst“.

Dabei hatten schon damals, im Inland wie im Ausland, zwei Entwicklungen eingesetzt, die das glatte Gegenteil erwarten ließen:

▷ Seit Jahren steigt weltweit der Verbrauch schwefelhaltiger Brennstoffe und damit der SO<sub>2</sub>-Gehalt des Regenwassers; bis zum Jahre 1990 wird, so die US-Studie „Global 2000“, die Verbrennung von Kohle um 13 Prozent, die von Öl um 58 Prozent zunehmen.

▷ Die sogenannte Luftreinhaltepolitik der siebziger Jahre hat vor allem bewirkt, daß die Industrie-Schornsteine höher geworden sind, vielerorts um das Fünffache. Mit ihrem giftigen Auswurf verseuchen die Kamine mehr und mehr industrieferne Regionen.

Den hohen Schornsteinen - deren Bau allemal billiger kommt als die Installation aufwendiger Filteranlagen - ist zu verdanken, daß die SO<sub>2</sub>-Belastung in Gegenden wie dem Ruhrgebiet leicht rückläufig ist, während sie etwa im Schwarzwald oder im Bayerwald steigt. „Unsere kranken Wälder“, sagt der hessische Naturschutzbeauftragte Wentzel, „sind das Opfer der Hochschornsteinpolitik.“

Die schwefelspuckenden Monsterschlote, teils höher als 300 Meter, wirken schon seit Jahren überall auf der nördlichen Erdhalbkugel wie chemische Waffen - nur weniger rasch. Die Giftschwaden driften aus den USA nach Kanada, Abgase aus Westeuropa machen den Regen über Skandinavien sauer - die Schäden sind, längst vor dem Jahr 2000, global. Gänzlich unbelasteten Regen messen Meteorologen noch in exotischen Zonen wie auf Samoa im Stillen Ozean. Ansonsten gibt es saubere Niederschläge lediglich, als

Überbleibsel aus vorindustrieller Zeit, tiefgefroren im grönländischen Packeis.

Der auf diese Weise konservierte reine Regen früherer Jahrhunderte hat einen sogenannten pH-Wert unterhalb des „chemischen Neutralpunktes“ von 7,0, in der Nähe eines gleichsam biologischen Neutralpunktes von 5,6; die Skala der pH-Werte reicht von 0 (extrem sauer) bis 14 (extrem alkalisch).

Auf der Wetterstation Schauinsland im Schwarzwald betrug der pH-Jahresmittelwert der Niederschläge 1965, als er erstmals gemessen wurde, noch 5,2. Drei Jahre später war er auf 4,6 abgesunken. Derzeit liegt der mittlere pH-Wert von Regenwasser in Westdeutschland bei 4,1.

Weil sich mit abnehmender pH-Zahl der Säuregehalt einer Flüssigkeit jeweils um eine Zehnerpotenz erhöht, signalisieren diese Daten, daß der Regen, der heute auf Westdeutschland fällt, mehr als zehnmal so sauer ist wie vor 16 Jahren.

Während der winterlichen Heizperiode, wenn schwefeliger Hausbrandqualm aus den Kaminen quillt, wird gelegentlich gar das Dreißigfache der einstigen Normalwerte gemessen. „Wenn es heute regnet“, faßt Heinz Detlef Gregor vom Berliner Umweltbundesamt die Resultate zahlreicher Einzelmessungen zusammen, „kommt oft genug die reine Säure nieder.“

Gut verdrängen läßt sich das stille Sterben der deutschen Forste, weil nicht nur Politiker in Bund und Ländern betroffen schweigen, sondern auch manch einer jener Aktivbürger, die gegen Atomprojekte anrennen: Die Erkenntnis, daß Schwefel-Schwaden aus Kohlekraftwerken dazu beitragen, die Wälder verkümmern zu lassen, stört ganz entschieden viele Kernkraftgegner, die auf die Kohle setzen.

Daß die Gefahren für Westdeutschlands Wälder noch immer weithin verkannt werden, liegt aber auch daran, daß sich Laien, etwa beim sonntäglichen Waldspaziergang, das Ausmaß der Schäden nur selten erschließt: Was abstirbt oder vertrocknet, wird gewöhnlich bei den Routine-Durchforstungen ausgeräumt.

Im Bereich der Oberforstdirektion Regensburg beispielsweise wurden zwischen 1975 und 1979 über 160 000 Festmeter toter oder sterbender Tannen geschlagen. Der ZE-Anteil dieser Baumart erreichte im Durchschnitt 27 Prozent, obwohl ihr Anteil am dortigen Wald nur drei Prozent beträgt.

Die komplizierten chemischen, meteorologischen und biologischen Prozesse, die zum Tannensterben führen, glauben Waldwissenschaftler wie der Göttinger Bodenkundler Ulrich plausibel rekonstruieren zu können.

Die aus den Ballungsgebieten emporsteigenden SO<sub>2</sub>-Abgase werden, das steht für die Wissenschaftler fest, durch Sonnenlicht und Luftfeuchtigkeit in Schwefelsäure sowie in schweflige Säure verwandelt, die sich Hunderte, teils Tausende von Kilometern weiter niederschlagen.

Die sauren Wolken regnen ihre Giftfracht vor allem über Berghängen ab; zudem gehen gas- und staubförmige Schwefelverbindungen nieder, sogenannter trockener Regen.

Nadelbäume mehr noch als Laubbäume: Weil Eichen oder Buchen ihren schwefeligen Ballast wenigstens im Herbst zusammen mit den Blättern abwerfen können und im Winter nur noch wenig Angriffsfläche bieten, sind die immergrünen Koniferen den nassen Niederschlägen wie dem trockenen Regen ungleich stärker als Laubbäume ausgesetzt.

Welche Gift-Mengen sich im Laufe der Zeit im Boden anreichern, lassen Statistiken der internationalen Wirtschaftsorganisation OECD vermuten. Danach hat sich die Menge des in die Luft geblasenen Schwefels allein von 1950 (zwölf Millionen Tonnen) bis 1972 (25 Millionen Tonnen) mehr als verdoppelt. Auf jeden einzelnen Europäerkopf fielen 1978 exakt 46,62 Kilogramm reiner Schwefel – fast ein Zentner\*.

Am ehesten kann der Wald dort durchhalten, wo er auf kalkhaltigem Boden stockt, etwa im Jura. Denn das dort in der Erde reichlich vorhandene Kalziumkarbonat neutralisiert die Schwefelsäure; dabei entsteht (für den Baum unschädlicher) Gips, der mit dem Sickerwasser fortgeschwemmt wird.

\* An der Spitze lag die DDR (118 Kilogramm pro Kopf), in der ebenso wie in der Tschechoslowakei (103 Kilogramm) besonders stark schwefelhaltige Braunkohle verfeuert wird. In der Bundesrepublik entfielen pro Kopf 29 Kilogramm Schwefel.

Wo aber Kalk seit jeher Mangelware ist, zum Beispiel in den silikatreichen Böden von Schwarz- und Franken-, Oberpfälzer und Bayerischem Wald, löst die Säure radikale Reaktionen aus: Das Gift, das vom Himmel fällt,

- > greift die organischen Verbindungen im Humus und im Wurzelboden an,
- > wäscht lebensnotwendige Bodenbestandteile wie Magnesium ins Grundwasser aus und
- > löst Tonerde, Feldspat sowie andere sogenannte Alumo-Silikate, so daß giftige Aluminium-Ionen frei werden.

Die aggressive Wirkung von Aluminium aber ist in der Medizin seit alters her bekannt. Der Mensch nutzte sie, als er mit Alaun (Kaliumaluminiumsulfat) Warzen ausmerzte oder als er essigsaurer Tonerde (Aluminiumazetat) nahm, um Eiterbakterien abzutöten.

Im Waldboden wirkt Aluminium mörderisch. Zuerst vernichtet es nützliche Bodenbakterien, die zur Kompostierung des Laubes nötig sind, und vertreibt hilfreiche Bodenwühler wie den Regenwurm. Dann, über die Wurzeln ins Holz eingeschleust, agiert das Metall als tödliches Zellgift.

Laut Ulrich können toxische Aluminium-Schübe „einen drastischen Rückgang der lebenden Feinwurzel-Biomasse von 2500 auf wenige hundert Kilogramm pro Hektar“ bewirken. Das Absterben der Feinwurzeln wiederum, die dem Stamm Halt verliehen haben, macht den Baum anfällig für Windwurf und Schneebruch. Dem schlecht durchwurzelten Boden drohen Nässestau und Erosion.

Wenn die wurzelkranken Bäume nicht bald eingehen, kümmern sie zergewöhnlich dahin. Der Naßkern, der sich im unteren Teil des Stammes bildet und in dem es von Fäulnisbakterien nur so wimmelt, hemmt den Wassertransport von der Wurzel zur Krone. Die Rinde bröckelt vom Stamm, die Zweige beginnen zu nadeln. Schütterer, graubrauner Wipfelgebilde, von Forstarbeitern „Storchennester“ genannt, gelten als typische Vergiftungserscheinungen.

Auch die allgemeine Anfälligkeit des Waldes für konventionelle Streßfaktoren erhöht sich durch den SO<sub>2</sub>-Einfluß. Zu den Sekundärwirkungen der Luftverunreinigung zählen Waldforscher verminderte Frostfestigkeit von Koniferen ebenso wie verstärktes Auftreten etwa des Schmarotzerpilzes Hallimasch.

„Obwohl dieser Sommer für Schädlinge gar nicht günstig war“, stürzen sich laut Rehbock die Insekten in „besorgniserregendem Umfang“ aufs schwefelkranke Holz. In Baden-Württemberg gedeihen die Fichtengespinnt-Blattwespe und die Tannentrieblaus, in Niedersachsen der Kieferngraürübler und der Eichenwickler, in Bayern die Gestreiften Gallwespen.

Dem komplexen Ursachengefüge des Waldniederganges ist mit Oberflächen-Kalkung kaum mehr beizukommen, mit der Forstleute früher versuchten, jene vergleichsweise harmlose Bodenversauerung abzuwenden, die nach Trockenzeiten lokal immer mal wieder vorübergehend auftrat.

Zwar versucht die Düngemittel-Industrie neuerdings, unter Hinweis auf den Säureregen, ihren Kalk-Absatz anzukurbeln: „Forstkalkung“, wirbt das Fachblatt „Die Düngung“, „ist durchaus wieder aktuell.“ Besonders geeignet sei „Hüttenkalk“, der sich mit Hilfe von Turbinen gut „verblasen“ lasse. Einige Experten jedoch sind skeptisch: Kalk steht im Verdacht, das Wachstum gewisser Fäulnispilze zu fördern.

So scheint sich die Bodenschädigung mit anhaltender Schwefelausschüttung unaufhaltsam von den Hochlagen auf große Teile der europäischen Biosphäre – von den Apenninen bis Nordschweden, von den Pyrenäen bis zum Böhmerwald – auszudehnen.

Die Schadstoffe greifen die Bäume keineswegs nur über die Wurzeln an, sondern auch übers Blattwerk.

Wann Tannen, Kiefern, Lärchen und Fichten im Flachland durch oberirdische Begasung erste „leichte Zuwachsverluste“ sowie eine „Prädisposition für Sekundärschäden“ zeigen, fand das West-Berliner Umweltbundesamt heraus: 60 Mikrogramm SO<sub>2</sub> pro Kubikmeter Luft reichen hin.

Schon bei 80 Mikrogramm sind „schwere Erkrankungen“ und „vorzeitige Absterben“ von Flachland-Koniferen die unvermeidliche Folge.

Die kritische 60-Mikrogramm-Grenze jedoch ist in weiten Teilen der Bundesrepublik längst überschritten.

Obwohl auch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) aus medizinischen Gründen seit Jahren für dieses Limit plädiert, liegen die Werte von fast jeder zweiten automatischen Meßstation in westdeutschen Belastungsgebieten darüber, zum Teil erheblich: Jede achte Station registriert eine Dauerbelastung von mehr als 100 Mikrogramm – ein Bereich, in dem „jeder wirtschaftliche Koniferenanbau ausgeschlossen“ ist.

Obendrein vergiftet nicht allein Schwefeldioxid die Wälder. In einigen Gegenden richtet Fluor zumindest ebenso schlimme Schäden an – im Frankenwald, wo die heimische Glasindustrie das Pflanzengift emittiert, im Emsland, das von Aluminiumwerken im holländischen Delfzijl begast wird, oder im Alten Land bei Hamburg, wo die „Vereinigten Aluminiumwerke“ die gefährliche Flußsäure ausstoßen.

Was immer auch im Einzelfall die Bäume zugrunde richtet – ob die Forstwirtschaft dort, wo derzeit Wälder zusammensinken, auf andere, gleichermaßen nutzbare Baumarten ausweichen kann, ist überaus fraglich.

Zwar zeigen sich Blattpflanzen gegenüber Schwefeleinwirkung gewöhnlich weniger empfindlich als Nadelhölzer. Wenn jedoch die Giftstoffe in höheren Konzentrationen auftreten, waschen sie – bisweilen binnen weniger Stunden – die schützende Wachsschicht vom Laub, zersetzen das Chlorophyll, lähmen die Atmungsorgane und reduzieren so die Assimilationsfähigkeit des Waldes. Botaniker Schütt: „Solche Bäume verdunsten sich zu Tode.“

Die typischen Symptome dieses Leidens sind auch mitten im Sommer fast überall in Deutschlands Wäldern zu beobachten: braunstichige oder bereits abgestorbene Blätter.

Hinfällig ist beispielsweise die Buche: Dieser Baum, ohnehin seit Jahrzehnten von überhöhten Wildbeständen und von fichtenfreundlichen Forstwirten zurückgedrängt, wächst seit einiger Zeit mancherorts nicht mehr von selber nach, obwohl die Art als extrem anpassungsfähig und durchsetzungsstark galt. „Die natürliche Verjüngung der Buche“, ermittelte die nordrhein-westfälische Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung, „fällt im Ruhrgebiet praktisch ganz aus.“

## 2. Teil

Als Umweltskandal erweist sich nun, was mitunter noch als Umweltverfolg gerühmt wird: die Eindämmung der Luftverschmutzung in den industriellen Belastungsgebieten.

Denn der Ausstoß von Schwefeldioxid, einem der gefährlichsten Schadstoffe, die aus den Schloten von Erzhöfen und Kraftwerken emporsteigen, ist in den letzten Jahren keineswegs drastisch verringert worden.

Vielmehr hat die Industrie den giftigen Auswurf durch den Bau höherer Schornsteine nur besser übers Land verteilt. „Hohe Schornsteine als Element der Luftreinhaltepolitik in Nordrhein-Westfalen“ – das war noch im Dezember 1980 Titel eines von der Düsseldorfer Landesregierung veranstalteten Kolloquiums.

Die Hochschornsteinpolitik ist die Hauptursache dafür, daß bei anhaltenden Gift-Emissionen die Bundesrepublik auf lange Sicht zu einem riesigen Ruhrgebiet zu werden droht und das Waldsterben durch SO<sub>2</sub> fortschreitet.

Weit weg von den Schmutzmachern regnet das Gift ab, und jüngst erst meldete die Bundesregierung, daß dieser Trend anhält: „Ergebnisse aus dem Meßnetz des Umweltbundesamtes bestätigen frühere Befunde, daß in emittentfernen Gebieten die Niederschläge häufig saurer sind als in den Ballungsgebieten.“

Giftige Abgase fein zu streuen, statt gründlich zu filtern – diese Methode hat aus der Verseuchung weniger Industriegebiete durch SO<sub>2</sub> ein internationales Umweltschutz-Politikum gemacht.

Seit mancher Schornstein 300 oder 400 Meter hoch ist, haben die Emissionen nordamerikanischer und mitteleuropäischer Schloten Reichweiten wie Interkontinental- und Mittelstreckenraketen. Opfer sind, wegen der vorherrschenden Windrichtungen, vor allem die jeweiligen Nachbarn im Norden, Nordosten und Osten, oft gar noch deren Nachbarn.

„Acid rain“ aus Japan geht in den Vereinigten Staaten nieder, wo der Säuregrad von Seen bisweilen, wie die „Neue Zürcher Zeitung“ meldete, „dem des menschlichen Magensafts“ entspricht. Die USA wiederum exportieren ätzenden Schmutz per Luftfracht nach Kanada.

Diesseits des Atlantiks vollzieht sich ein ähnlicher SO<sub>2</sub>-Ringtausch zu Lasten der Umwelt. Über Norwegen gehen nach einer Statistik des Umweltbundesamtes in Berlin alljährlich rund 56 000 Tonnen Schwefel nieder – sechsmal soviel wie in diesem Land erzeugt wird (siehe Schaubild Seite 196).

Großbritannien, praktisch ohne Rauchentgiftungsanlagen, dafür aber vom Wind begünstigt, verfrachtet mehr als die Hälfte seiner SO<sub>2</sub>-Produktion auf den Kontinent, zwölfmal soviel wie zu den Britischen Inseln geweht wird. Industrieanlagen der CSSR verseuchen mit Schwefelregen die DDR, die wiederum gibt den Schweden Saures.

Besonders tückisch wirkt die Schwefelsäure, weil sie giftige Metalle wie Beryllium, Cadmium, Quecksilber, Blei, Nickel, Zinn und vor allem Aluminium, das drithäufigste Element in der Erdkruste, aus Sanden und Sedimenten zu lösen vermag. In US-Seen wurde beobachtet, daß Fische am Absterben ihres Kiemengewebes zugrunde gehen, hervorgerufen durch eine Aluminiumvergiftung.

In Kanada und Skandinavien lassen sich Konsequenzen des Säureregens ablesen, die der Bundesrepublik womöglich noch bevorstehen.

So läßt das aggressive Naß in Norwegen Metalle rosten, die gegen Oxidation relativ widerstandsfähig sind. In den Turbinen-Zuleitungen von Wasserkraftwerken korrodiert außer Aluminium auch galvanisierter Stahl.

Saures Grundwasser löst in der schwedischen Provinz Kupferleitungen auf – was bisweilen bizarre Effekte verursacht. Wer das mit Metallverbindungen angereicherte Wasser zum Haarewaschen verwendet, dem kann widerfahren, daß sich seine blonden Locken blaugrün verfärben.

Bei schwedischen Kleinkindern häufen sich Durchfallkrankheiten, seit vielerorts mehr als ein Milligramm Kupfer pro Liter Trinkwasser gemessen wird. Bei erhöhten Aluminiumwerten im Wasser werden auf Hühnerfarmen, wie Fachleute im Mai bei einer Schwefelregen-Konferenz in Göteborg berichteten, Eier mit dünner Schale produziert.

Schwefeldioxid ist nach einer Untersuchung des Umweltbundesamtes „für die Mehrzahl aller immissionsbedingten Werkstoffschäden verantwortlich“. Denn SO<sub>2</sub> löst nicht nur aus Baumaterialien die Kalkanteile heraus (wobei gefügesprengender Gips entsteht), sondern zersetzt auch Anstriche, läßt Leder zerfallen, macht Papier brüchig und Textilien wie Baumwolle, Leinen und Nylon mürrig. Auf Glasgemälden bildet Säureregen eine „feuchtigkeitsspeichernde, schädliche Wettersteinschicht“ (Umweltbundesamt), die vielerorts bunte Kirchenfenster blind werden läßt.

Komplexe Folgen der sauren Niederschläge zeichnen sich für die Wasserwirtschaft ab. Denn auch die Filterwirkung des Waldes ist gefährdet, die dazu beiträgt, das Grundwasser zu schützen.

Im Quellwasser aus Gebieten am Westrand des Kaufunger Waldes wurden pH-Werte von 3,75 und hochgiftige Aluminium-Konzentrationen (sieben Milligramm pro Liter) gemessen. Dort wie anderswo bahnte sich, mahnt der Göttinger Bodenkundler Professor Bernhard Ulrich, eine in ihren Ausmaßen noch weithin unbekannt „Gefährdung der Hydrosphäre“ an.

Die Erkrankung selbst der industriefernen Bergwälder muß sich um so verhängnisvoller auswirken, als viele andere einstmals baumbestandene Gebiete längst laublos sind:

▷ Die meisten westdeutschen Feldgehölze wurden während des vergangenen Vierteljahrhunderts der Flurbereinigung und viele Moore der Torfindustrie geopfert; die letzten Flußwälder weichen samt ihrer Flora und Fauna ehrgeizigen Wasserbauprojekten (SPIEGEL 40/1981).

▷ Das innerstädtische Grün ist vor allem durch Autoabgase und den Einsatz von Streusalz so sterbenskrank geworden, daß Gartenbau-Fachleute jüngst auf einem Kongreß in Baden-Baden verkündeten: „Im Jahr 2000 werden wir keine Straßenbäume mehr in den Städten haben“ (siehe Kasten Seite 192).

Bei anhaltendem Vitalitätsverfall des deutschen Waldes wird auch die Volkswirtschaft Schaden nehmen.

Schon heute verbraucht die Bundesrepublik das Doppelte jener 30 Millionen Festmeter Holz, die alljährlich im Inland geschlagen werden. Die Holzimporte belasten die Bonner Außenhandelsbilanz derzeit mit sechs Milliarden Mark; die Einfuhr von Holz und Holzprodukten liegt, nach dem Öl, bereits jetzt auf Platz zwei der Importstatistik.

Bis zum Jahr 2000 wird, wie der Forstkundler Professor Hans-Joachim Fröhlich schätzt, die Nachfrage um 60 Prozent zunehmen. Die tropischen Regenwälder Afrikas und Amaziens jedoch fallen schon in wenigen Jahrzehnten als Holzlieferanten aus.

Nach einer Prognose des Amerikanischen Rates für Umweltqualität wird der Raubbau an den scheinbar endlosen Dschungeln in vierzig Jahren mangels Biomasse ein jähes Ende finden. „Im Jahr 2020“, so die US-Experten, „dürfte aller physisch erreichbare Wald in den unterentwickelten Ländern abgeholzt sein.“

Schlüssig scheint, was der Göttinger Forstkundler Ulrich voraussagt: Wenn das Regenwasser in Deutschland weiterhin deutlich sauer bleibt (pH-Wert 4,1), müsse die ständige Überforderung des Erdreichs dazu führen, daß die alkalischen „Puffersubstanzen“ im Humus zur Neige gehen. Folglich werde der Säuregrad des Bodens allmählich dem pH-Wert des Regens „zustreben“, also um das Zehnfache und mehr zunehmen.

Großflächige Säurerreg-Schäden in der westdeutschen Landwirtschaft scheinen bislang vor allem aus einem Grund ausgeblieben zu sein: Jährlich wird schon jetzt im Durchschnitt mehr als ein Zentner Kalziumoxid pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche ausgestreut. Diese Menge sei, so das Umweltbundesamt, „inzwischen erforderlich“, um „einer Versauerung durch ... Luftverunreinigungen entgegenzuwirken“.

Auch abseits der Agrarsteppen droht Gefahr: Von den rund 60 000 pflanzlichen Organismen, die es in der Bundesrepublik gibt, sind nach einer Schätzung des Kieler Ökologen Professor Berndt Heydemann ungefähr die Hälfte „empfindlich“ gegen so tückische Abluftbestandteile wie Schwefeldioxid. Am dramatischsten mutet der Rückgang der besonders sensiblen Flechten an; im Münsterland ist die Zahl der Flechtenarten schon von 111 auf 11 gesunken.

Zwar hat die Bundesregierung bereits vor sieben Jahren als Standard für SO<sub>2</sub>-Emissionen 140 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft festgelegt. Dieser Wert jedoch liegt weit über der Empfehlung der Weltgesundheitsorganisation (60 Mikrogramm), und er wird vielerorts überschritten.

Der Berliner Professor Martin Jänicke, der Anfang dieses Jahres die Staub- und SO<sub>2</sub>-Belastungen von mehr als hundert Großstädten in Ost und West miteinander verglichen hat, fand Verblüffendes heraus:

Beim Giftgehalt der Luft wird Berlin „nur von einigen ost- und südeuropäischen Städten“ übertroffen; schlechter dran sind Mailand, Halle und Ankara. In Dortmund und Oberhausen ist die Luft schwefelhaltiger als in Hongkong oder Tokio. Städte wie Hamburg, Frankfurt, Kassel und der Kurort Wiesbaden liegen gleichauf mit der US-Industriemetropole Chicago.

Bewohner des Berliner Bezirks Wedding jedoch mußten in den letzten Jahren zeitweise Schwefeldioxid-Belastungen von etwa 2000 Mikrogramm ertragen. Drei von vier Kindern in Dortmund haben nach einer Untersuchung des Gesundheitsministeriums infolge der schlechten Luft geschwollene Lymphknoten am Hals, in Duisburg liegt die Zahl der Bronchitiskranken mit 21,1 Prozent fast doppelt so hoch wie in sauberen Landstrichen.

Es sieht auch nicht nach Zufall aus, daß im Saarland wie in Nordrhein Westfalen, Ländern mit besonders hoher SO<sub>2</sub>-Belastung, Krebserkrankungen der Atmungsorgane besonders häufig auftreten - mit 109,3 beziehungsweise 90,0 Toten pro 100.000 Männer, gegenüber 62,3 beispielsweise in Bayern.

Verstärkt wird durch Schwefeldioxid auch die krankmachende Wirkung von anderen, gleichfalls sauer reagierenden Schadstoffen, deren Emission ständig steigt: gasförmige Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen, die von Kraftfahrzeugen, Kohlekraftwerken und Düngemittelfabriken ausgeworfen werden.

Diese Stickoxide, die laut Umweltbundesamt „Lungenzündungen mit tödlichem Ausgang“ hervorrufen können, lassen in Kombination mit SO<sub>2</sub> sowie Kohlenmonoxid „in noch unbekanntem Ausmaß“ sogenannte Nitroverbindungen entstehen. Die wiederum können, so das Berliner Amt, „cancerogene Wirkung“ entfalten, also Krebs auslösen.

In den letzten Jahren ist denn auch die Zahl jener Wissenschaftler gestiegen, die Zusammenhänge zwischen der hochgradigen Luftverschmutzung und dem Umstand sehen, daß Westdeutschland, bezogen auf die Bevölkerungszahl, eine der höchsten Krebsraten der Welt hat. Derzeit werden in der Bundesrepublik, bei steigender Tendenz, mehr als 150.000 Krebstote pro Jahr gemeldet.

Auf eine andere Gefahr hat zu Beginn dieses Jahres eine Forschergruppe der nordschwedischen Universität Umeå hingewiesen: Die Wissenschaftler haben handfeste Anhaltspunkte dafür gefunden, daß Schwefeldioxid auch zu Erbschäden führen kann.

Das Gift verursache, so die schwedischen Mediziner, Chromosomendefekte, die Mißbildungen von Embryos auslösen. Das Gewicht von Neugeborenen, deren Mütter während der Schwangerschaft in schwefelverseuchten Gebieten wohnten, sei niedriger als das von Kindern, deren Eltern in Reinluft-Zonen lebten. Auch Fehlgeburten mehrten sich infolge hoher SO<sub>2</sub>-Belastung.

Als erwiesen gilt schon seit etlichen Jahren, daß Schwefeldioxid den Menschen nicht nur per Luft angreift, sondern auch gleichsam zu Lande.

Denn: Der Säuregehalt des Regens, der sich aufgrund der SO<sub>2</sub>-Emissionen in industriellen Regionen der Bundesrepublik seit 1965 mehr als verzehnfacht hat, erhöht die sogenannte Pflanzenverfügbarkeit hochgiftiger Schwermetalle wie Cadmium, die unter anderem mit Klärschlamm, Abgasen und Phosphatdünger zunehmend auf die Äcker aufgebracht werden. (Während der letzten Jahre hat sich der Cadmiumgehalt des bundesdeutschen Bodens von 100 auf 400 Mikrogramm pro Kilo erhöht.)

Die Kombination von Cadmium und Säureregen kann tödlich wirken. Schwefelversauerter Boden nämlich ermöglicht es diversen Nahrungs- und Futterpflanzen, das Drei- bis Zehnfache der üblichen Cadmium-Menge zu speichern. Im menschlichen Organismus, der Cadmium mit dem Verzehr von Eiern, Kar-

toffeln, Gemüse, Getreide, Pilzen, Rind- und Kalbfleisch aufnimmt, wird das schwer abbaubare Gift durch das Blut transportiert und in der Niere angefil- tert, wo sich die Cadmium-Konzentration lebenslang kontinuierlich erhöht.

Schon jetzt beträgt die durchschnittliche orale Cadmium-Aufnahme der Westdeutschen laut Umweltbundesamt „70 bis 80 Prozent“ des Wertes, den die Weltgesundheitsorganisation als „oberste tolerierbare Aufnahme“ angibt\*.

Mithin deutet vieles darauf hin, daß die durch den Schwefelregen mitbewirkte, weder mit dem Auge noch mit dem Geruchssinn wahrnehmbare Belastung des Bodens sich als ebenso bedrohlich erweisen kann wie die offenkundige, augenfällige Verschmutzung von Flüssen, die Verseuchung der Luft und das Verkümmern der Wälder.

Bodenkundler wissen, was das bedeutet. Während Luft und Wasser gereinigt werden können, ist die Eliminierung der kaum abbaubaren Schwermetalle aus größeren landwirtschaftlichen Arealen technisch schlechterdings nicht möglich.

Gleichwohl haben die meisten Bonner Politiker in dem bundesweiten Wald- und Baumsterben bislang kaum ein Thema gesehen. Wenn der Walduntergang einem Abgeordneten mal eine Anfrage wert war, gab Forst- und Bauernminister Josef Ertl nichtssagende Antworten.

Ertl blockte im Juni die Fragesteller ab, sie bezeichneten den Niedergang der Nadelwälder „etwas voreilig“ als Fichtensterben. Über das Ausmaß der Erscheinung ließen sich „keine genauen Angaben machen“. Über die Ursachen bestimme „ebenfalls keine Klarheit“. Mithin sehe er, erklärte Ertl, auch „keine Möglichkeit, kurzfristig die weitere Ausbreitung“ zu verhindern.

Jahrelang, klagt der Münchner Professor Schütt, habe Bonn sich in Sachen Tannensterben „auf beiden Ohren taub gestellt“. Auch der Münchner Agrarminister Hans Eisenmann wertete die Warnungen von Waldwissenschaftlern jüngst noch als „Unkenrufe“ und „Panikmache“. Schütt: „Die wollen verhindern, daß das ganze Ausmaß des Falles ans Tageslicht kommt.“

Kein Wunder. Würden Bundes- und Landespolitiker die These akzeptieren, daß die industrielle Luftverschmutzung den Tod von Menschen wie von Wäldern verursacht, so müßten sie bestätigen, was sie noch vor wenigen Jahren bestritten haben. Blamiert waren

- ▷ die Freidemokraten, deren Umweltminister Genscher, Maihofer und Baum laut Regierungspropaganda der Republik das beste Umweltrecht der Welt beschert haben,
- ▷ viele Sozialdemokraten, die unter dem Druck von Gewerkschaftern jahrelang dazu beigetragen haben, Entwürfe zum Luftreinhaltegesetz zu verwässern, weil von denen angeblich Arbeitsplatz-Gefährdung droht
- ▷ die Unionschristen, denen selbst die laschen Entwürfe der Regierungsparteien zu weit gingen und die mit Hilfe des Bundesrates jede Verbesserung der Luft-Gesetze blockiert haben.

Eine Anatomie der Bonner Immissionschutzgesetzgebung der letzten Jahrzehnte fördert zutage, was symptomatisch für die Behandlung chemischer Schadstoffe jeglicher Art anmutet, von Klärschlämmen über Quecksilber bis hin zum Plutonium: die Neigung der Verantwortlichen, Industriegifte lieber zu verdrängen als sie zu beseitigen.

Auch wenn Schwefelgase von hohen Schloten in jene Schichten, 3000 Meter

über dem Erdboden, emporgeblasen werden, in denen ewige Winde wehen: herunter kommen die Gifte immer, wenn auch größtenteils im Ausland.

Weil aber Wirtschaftsgiganten wie die USA und die Bundesrepublik zumindest ebensoviel Schmutz exportieren, wie sie importieren, haben sie vergleichsweise wenig Interesse an der Ausarbeitung internationaler Verträge, die sich streng am Verursacherprinzip orientieren.

Das Wettrennen der Schornsteinbauer hält unvermindert an. Ähnlich wie bei Rüstungskontrollverhandlungen zeigt sich kein Land zu Vorleistungen bereit. Jedwedes nationale Gesetz, das eine bessere Rauchentgiftung strikt vorschreibt, würde, so die Logik der Ökonomen, Wettbewerbsverzerrungen zu Lasten der heimischen Wirtschaft bewirken.

Entsprechende Gesetzentwürfe werden mithin von den Interessenverbänden regelmäßig bekämpft. Das Argument, zunächst einmal sei internationale „Harmonisierung“ vonnöten, wird dabei „immer wieder“, wie schon vor Jahren der Rheinisch-Westfälische TÜV rügte, von der Industrie „als Vorwand gebraucht, um die Anforderungen, die wir beispielsweise bei der Entstaubung stellen wollen, herunterzuschrauben“.

Eine von 34 Nationen aus Ost und West 1979 in Genf unterzeichnete Konvention verpflichtet die nationalen Industrien lediglich, den Export von luftigem Giftmüll „soweit wie möglich“ einzuschränken. Irgendwelche Höchstgrenzen oder Sanktionen schreibt das Pakt-Papier nicht vor.

Vom Kabinett Schmidt hat die Energiewirtschaft, so scheint es, eine drastische Verschärfung der Auflagen ebensowenig zu befürchten wie die US-Industrie von der Reagan-Administration. Ölverknappung und -verteuerung, Wirtschaftslaute und Arbeitslosigkeit veranlassen Bonns Politiker, weiterhin Nachsicht gegenüber den großen Umweltverschmutzern walten zu lassen.

Zwar fordern mittlerweile auch Waldexperten im Agrarministerium eine Herabsetzung des SO<sub>2</sub>-Limits von derzeit 140 auf 40 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft. Zumindest sei, argumentieren Umweltschützer, eine Senkung des Standards auf 60 Mikrogramm notwendig - jene Grenze, die seit Jahren auch von der Weltgesundheitsorganisation empfohlen wird.

Dennoch stellte die Bundesregierung am Montag letzter Woche bei einer Anhörung von Verbandsvertretern im Innenministerium einen Entwurf zur Änderung der „Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (TA Luft) zur Debatte, der einiges verbessert, vieles jedoch beim alten beläßt und manches wohl noch verschlimmert.

Der natur- wie gesundheitsschädigende SO<sub>2</sub>-Wert von 140 Mikrogramm soll unangetastet bleiben. Zwar meinen Bonner Innenministeriale, aufgrund neuer Meß- und Beurteilungsmethoden würden „die nominal unveränderten Grenzwerte ... praktisch verschärft“, Kritiker aber befürchten das Gegenteil (siehe Kasten Seite 178).

Durch die Novellierungsvorlage, analysiert der West-Berliner Umweltforscher und Politikwissenschaftler Volker Prittwitz, würden die Genehmigungsanforderungen „erheblich gesenkt“. Prittwitz: „Warnungen der Wissenschaftler werden nicht berücksichtigt.“

Sachverständige erklärten damals in Bonn, die bis dahin (schon seit 1964) gültigen SO<sub>2</sub>-Immissionswerte seien „nicht unproblematisch“, mehr als bislang müsse der „additiven Wirkung“ mehrerer Schadstoffe, auch auf „Vorbastete“, Rechnung getragen werden -

### 3. Teil

\* 0,4 bis 0,5 Milligramm pro Woche, bezogen auf 60 Kilogramm Körpergewicht.

kurzum, es gebe einen „gewaltigen Nachholbedarf an umweltschützenden Maßnahmen“.

Und keinesfalls, so die Experten, dürften „Probleme in einem Teilbereich durch Belastung des anderen gelöst werden“. Dies genau geschah jedoch, als 1974 das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in Kraft trat:

In der dazugehörigen TA Luft wurde der höchstzulässige SO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert zwar von 400 auf 140 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft herabgesetzt. Weil das Gesetz aber die Möglichkeit offenhielt, Belastungsgebiete einfach durch Höherhängen der Rauchfahnen zu entlasten, waren die Konsequenzen für Sachkenner bereits damals absehbar: Schädigung zumindest der besonders SO<sub>2</sub>-empfindlichen Tier- und Pflanzenwelt, wahrscheinlich sogar der menschlichen Gesundheit auch weit außerhalb der Industriezonen – Effekte, die nun weithin eingetreten sind.

Bereits Anfang der siebziger Jahre hatte Professor Christian Junge, Direktor des Mainzer Max-Planck-Instituts für Chemie, den Bundestag davor gewarnt, sich nur um die Beseitigung der örtlichen Luftverschmutzung zu bemühen:

In dem Augenblick, wo durch die Verdünnung ... die Konzentrationen unter gewissen Werten liegen, ist das Problem im allgemeinen lokal gelöst. Aber es ist nicht für den regionalen Raum und nicht für die Atmosphäre als Ganzes gelöst; denn durch die Verdünnung werden natürlich nicht die Schadstoffe aus der Atmosphäre eliminiert.

Gleichwohl war den Verursachern des Säureregens bislang Erfolg beschieden bei ihren Bemühungen, umweltfreundliche Entschwefelungsvorschriften abzuwenden. „Da die Maßnahmen zur Luftreinhaltung meistens erfolgsnegative Investitionen bedingen“, so der Düsseldorfer Sozial-Ministeriale Franz-Josef Dreyhaupt, „ist die Industrie an einer raschen Entwicklung des Standes der Technik zur Luftreinhaltung nicht sehr interessiert.“

Wirtschaftsvertreter setzen die Umwelt-Behörden regelmäßig mit dem Argument unter Druck, Umwelt-Auflagen könnten Arbeitsplätze gefährden: „Die Genehmigungsbehörde“, klagte der Düsseldorfer Dreyhaupt, „gerät in ein Dilemma zwischen Luftreinhaltung und Wirtschaftswachstum.“

In dieser Zwangslage konnte in der Bonner Politik die Ansicht gedeihen, die Natur sei im Zweifel stärker belastbar als die Wirtschaft. Dagegen setzen Umwelt-Verbände wie der BUND vergebens einen anderen Paragraphen ihres Öko-Gesetzes: „Nichts ist umsonst.“

Der Glaube, die natürliche Umwelt sei durch menschliche Eingriffe nahezu beliebig manipulierbar, bestimmte schon zu Beginn der siebziger Jahre die Debatten über die damals gerade zur Veränderung anstehende „TA Luft“.

Zwar mahnten bei einer Anhörung in Bonn medizinische und biologische Sachverständige, bei der Festsetzung von SO<sub>2</sub>-Höchstwerten dürfe nicht zugrunde gelegt werden, was gesunde Menschen gerade noch aushalten. Die – um ein Vielfaches höhere – Empfindlichkeit etwa von Bäumen dürfe nicht außer acht gelassen werden.

Die Umweltexperten der Industrie aber schlugen derlei Bedenken glatt in den Wind. Ein Jahrzehnt nach dem Hearing – während Wissenschaftler millionenfaches Baumsterben registrieren und die TA Luft aufs neue novelliert werden soll – ist die Lektüre der Protokolle von einst nicht ohne Reiz.

Richard Zahn, entsandt von den Farbwerken Hoechst AG in Frankfurt, etwa beteuerte, die geschädigten Wälder im Ruhrgebiet machten gerade „rund 0,5 Prozent der Gesamtwaldfläche in der Bundesrepublik“ aus, der forstwirtschaftliche Schaden betrage maximal zehn Millionen Mark – was ist das schon: „Das sind, wenn Sie mir den Vergleich gestatten, weniger als fünf Prozent des Betrages, den allein die chemische Industrie jährlich für Abluftreinigungsmaßnahmen aufwendet.“

„Zum Glück vertragen die Pflanzen“, versicherte der Chemie-Mann, „eine nicht unerhebliche Menge an schädlichen Substanzen.“

Wenn ein paar Arten draufgehen sollten, sei zu bedenken, daß „in unserem hochindustrialisierten Land“ eben ein „gewisses Risiko für die Vegetation in Kauf“ genommen werden müsse.

Im übrigen, schloß der Hoechst-Vertreter, gebe es ja die Möglichkeit, dem Land eine andere Vegetation zu verschaffen. Zahn präsentierte den Parlamentariern ein paar Tips, wie die westdeutsche Flora notfalls dem Giftgehalt der Landluft angepaßt werden könnte, nämlich:

Durch Umwandlung von Nutzwald in Erholungswald, wobei widerstandsfähigere Baumarten gewählt werden können als Fichten und Kiefern, schließlich durch Einsatz resistenterer Sorten und Pflanzenherkünfte.

Verbandsfunktionäre nannten die „TA Luft“ einen „Morgenthau-Plan für die deutsche Industrie“. Ein Sprecher der „Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber“ drohte gar an, aus Protest gegen das Luftrecht den Bundesbürgern das Licht auszuknipsen: „Unter Umständen muß man einen Abschaltplan aufstellen, um der Bevölkerung drastisch zu demonstrieren, wie notwendig eine gesicherte Energieversorgung ist.“

Unter dem Eindruck solcher Drohungen verband Bonn vor sieben Jahren hohe SO<sub>2</sub>-Richtwerte mit einer Fülle von wirtschaftsfreundlichen Ausnahme- und Übergangsregelungen – mit dem Effekt, daß die von Ökologen dringend empfohlene radikale Reduzierung des Schwefel-ausstoßes unterblieb und die Naturzerstörung anhält.

Vergangene Woche machte Hans Bibelriether, Leiter der Nationalparkverwaltung im Bayerischen Wald, publik, daß Säureregen in Westdeutschland nicht nur Bäume, sondern, wie in Kanada und in Schweden, auch Fische sterben läßt: In Ostbayern, wo im August Regen mit dem Säurewert pH 3,4 niederging, seien „die makellos erscheinenden Bergbäche“ nunmehr „fast völlig fishleer“.

Und in einer soeben abgeschlossenen, noch unveröffentlichten Studie weist der Mainzer Geoökologe Manfred Krieter nach, daß auch „die meisten Gewässer im südlichen Hunsrück heute bereits als biologisch tot angesehen werden müssen“. Krieter:

Wo vor 60 Jahren noch die Lebensgemeinschaft im Wasser intakt war und Forellen sich tummelten, herrschen nun abiotische Verhältnisse. Das klare Wasser ist gleichsam sterilisiert durch den tiefen Säuregrad (3,0–4,5), belastet mit überhöhen toxischen Aluminiumkonzentrationen, gekrönt von dicken Schaumflocken aus Stickstoffverbindungen, alles schubweise aus den Böden ausgewaschen.

Auch für Krieter steht fest, daß das Baum- und Bachsterben den bevorstehenden „Zusammenbruch des gesamten Wald-Ökosystems“ ankündigt, mithin eine unmittelbare Gefährdung der natür-

lichen Lebensgrundlagen des Menschen:

Der Säureregen und die unter seiner Einwirkung im Boden mobilisierten Aluminium- und Schwermetallfrachten schlagen im Hunsrück voll über das Sicker- und Grundwasser bis letztlich zum Quellwasser durch. Es ist nur noch eine Frage der Zeit, wann nach dem Tod der Oberflächenwässer als nächstes das Grundwasser wegen toxikologischer Bedenken keine Verwendung zu Trinkwasserzwecken mehr finden kann.

Gegen die Folgen des sauren Regens existiere, meint der Bayer Bibelriether, nur ein Heilmittel: „Sauberer Regen.“ Den wiederum wird es nur geben, wenn der Gesetzgeber zunächst bei den Hauptemittenten ansetzt, den Kraftwerken und Industriebetrieben mit 82 Prozent Anteil am SO<sub>2</sub>-Gesamtausstoß.

Doch Hunderte von Kraftwerken ließen sich bislang nicht dazu bewegen, für den nachträglichen Einbau von Entschwefelungsanlagen zu sorgen. Nach Feststellung der Düsseldorfer Landesregierung sind allein in Nordrhein-Westfalen Kohlekraftwerke mit einer Gesamtleistung von 5000 Megawatt in Betrieb, die technisch veraltet sind.

Die Betreiber der Anlagen, darunter das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk, der größte private Stromversorger Europas, weigern sich beharrlich, die Anfang der fünfziger Jahre gebauten, längst abgeschriebenen und daher hochrentablen Kraftwerke durch neue zu ersetzen oder wenigstens zu modernisieren. „Alles, was die tun“, zürnte Düsseldorfs Sozialminister Friedhelm Farthmann, „ist, daß die den Leuten einreden, mehr Strom zu kaufen.“

Jahrelang mühte sich Farthmann, die Unternehmen mit staatlichen Subventionen zum Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen zu bewegen. „Wir müssen den Herren Steuergelder in den Hintern blasen“, sinnierte der Minister, „damit sie sich bequem, die alten Mühlen aus dem Gelände zu nehmen.“

Vor kurzem mußte Farthmann öffentlich gestehen, daß seine Subventionsstrategie gescheitert ist. Obwohl das Land offeriert, bei Installation von Entschwefelungsanlagen 50 Prozent der Investitionskosten beizusteuern, hatte sich kein einziges nordrhein-westfälisches Unternehmen bereitgefunden, das Angebot anzunehmen.

Auf neue Anlagen üben die derzeitigen gesetzlichen Bestimmungen nur milden Zwang aus: Diese Kraftwerke müssen 75 Prozent des Rauchgases – der Rest geht ohnehin ungefiltert in die Luft – durch eine Kalkwaschanlage schicken, die im Jahresmittel rund 80 Prozent des Schwefels zurückhält.

So werden beispielsweise zwei von der „VeBa“ im Westerwald bei Weitfeld geplante 740-Megawatt-Blöcke trotz Entschwefelungsanlage stündlich vier Tonnen SO<sub>2</sub> auswerfen – das sind zwei Tonnen reiner Schwefel pro Stunde oder 10 000 bis 15 000 Tonnen pro Jahr, die über die Wälder des hessischen Dillkreises gen Nordosten ziehen werden.

Dabei ist das Prinzip einer umweltfreundlichen Methode der Kohleverbrennung seit einem halben Jahrhundert bekannt: das sogenannte Wirbelschichtverfahren, bei dem gemahlene Kohle durch Preßluft in einen Schwebestand gebracht, mit Kalk versetzt und bei relativ niedrigen Temperaturen verbrannt wird.

Giftige Stickoxide entstehen bei diesem Verfahren kaum. Und der in der Kohle vorhandene Schwefel verläßt das Kraftwerk nicht durch den Schlot, sondern verwandelt sich in Gips, der mit der Asche abgezogen wird und als Baumaterial verwendbar ist.

Der Wirbelschichtofen aber ist, mangels Nachfrage, erst jüngst zur Serienreife entwickelt worden. Im Düsseldorf Stadtteil Flingern steht das bislang einzige Kraftwerk dieser Art. In Völklingen an der Saar wird ein zweites montiert, eine Anlage ohne Schornstein.

Solche Beispiele werden Ausnahmen bleiben, wenn Bonn weiterhin dem Widerstand der Industrie nachgibt. Deren Verbandsfunktionäre operieren nach wie vor mit Kosten-Nutzen-Rechnungen, die Forderungen nach besserem Immissionschutz ins Absurde abdrängen sollen.

Krebserkrankungen, Nierenleiden, Erbschäden durch Schwefel in der Luft und Schwermetalle in der Nahrung – diese Auswirkungen des Säureregens, die Wissenschaftler nun nachgewiesen haben, belegen drastisch die Gültigkeit des grünen Gemeinplatzes „Naturschutz ist Menschenschutz“.

Fachleute wie der Düsseldorfer Mediziner Hans Werner Schlipkötter und der Hamburger Biochemiker Gernot Grimmer hatten bereits vor zehn Jahren Bonner Abgeordnete auf Zusammenhänge beispielsweise zwischen SO<sub>2</sub> und Krebserkrankungen hingewiesen (SPIEGEL 48/1981). Doch die gesundheitlichen Folgen der Umweltverschmutzung scheinen Millionen von Westdeutschen – instinktiv – besser zu erfassen als die Politiker der Parteien, die „Grünen“ ausgenommen.

Gift in der Nahrung (unter anderem eine Folge des durch Säureregen erhöhten Cadmiumgehaltes von Nutzpflanzen) halten die Bundesdeutschen für ein noch größeres Zukunftsrisiko als selbst einen dritten Weltkrieg: 47 Prozent der Bevölkerung fürchten, so eine von NRW-Minister Hans Otto Bäumer vorgestellte demoskopische Erhebung, die Folgen gesundheitsschädlicher Rückstände in der Nahrung\*.

Wie eng jedoch der Spielraum der Bundesregierung ist, wenn es darum geht, Umweltgefahren zu begegnen, erwies sich in Sachen SO<sub>2</sub> beispielhaft am 20. Oktober 1978.

An diesem „schwarzen Freitag“ der Umweltpolitik (Innen-Staatssekretär Günter Hartkopf) verwarf der Bundesrat eine Novelle zum Immissionschutzgesetz, mit der die Bundesregierung versucht hatte, es allen recht zu machen: der Industrie, die eine Lockerung der Bedingungen verlangte, wie auch den Natur- und Menschenschützern, die Verschärfung forderten.

Den Umweltverbänden gegenüber – einerseits – hatte die Bundesregierung damals eingeräumt, „nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen“ (die in Wahrheit zu diesem Zeitpunkt mindestens zehn Jahre alt waren) seien die geltenden SO<sub>2</sub>-Standards nicht mehr geeignet, „auch Tiere, Pflanzen und sonstige Sachgüter ausreichend zu schützen“. Daher sollten fortan für jene gut 90 Prozent des Bundesgebietes, die vorwiegend land- und forstwirtschaftlich genutzt werden, verschärfte Schutzvorschriften gelten.

Der Wirtschaft – andererseits – wollte das Kabinett mit diversen Zugeständnissen entgegenkommen, die den Bau etwa von Kohlekraftwerken in den ohnehin versuchten Zonen, rund 5 Prozent der Bundesfläche, noch erleichtern sollten. So industriefreundlich dieser Gesetzentwurf auch war, dem unionsbeherrschten Bundesrat war er bei weitem nicht industriefreundlich genug. Statt einer Zweiteilung des Bundesgebietes in eine Schutz- und eine Schmutzzone wünsch-

ten sich die auf Industrieansiedlung bedachten Provinzregierungen jene Luftbelastung, die im Ruhrgebiet gestattet sein sollte, als Generalmaßstab für die gesamte Bundesrepublik.

Zwar würden bei einer Verabschiedung des Regierungsentwurfs, so argumentierte damals der Deutsche Industrie- und Handelstag, in 5 Prozent des Bundesgebietes endlich „unvertretbar hohe Investitionshindernisse teilweise abgebaut“, auf den übrigen 95 Prozent der Fläche aber neue Hemmnisse für die Industrie geschaffen werden.

Weil sich weder Industrie- noch Umweltverbände für den Kompromißentwurf von 1978 erwärmen mochten, ließ die Bonner Koalition die Vorlage schließlich fallen. Diese Schlappe hat Baums Planer veranlaßt, nun den Versuch zu wagen, das Luftrecht „auf kaltem Wege“ (ein Umweltjurist) zu novellieren.

Geändert werden sollen jetzt nicht mehr die Paragraphen des Immissionschutzgesetzes, dessen Reform Bundestag und Bundesrat zustimmen müßten, sondern allein Richtwerte und Meßregelungen in der TA Luft, einer Verwaltungsvorschrift, die vom Innenminister (nach Abstimmung mit den Länderbehörden) geändert werden kann.

Inhaltlich haben die Autoren des neuen Entwurfs, urteilt Umweltforscher Prittwitz, in einem zentralen Punkt die Bundesratsposition von einst weitgehend übernommen: Während das Innenministerium 1978 ein grundsätzliches „Verschlechterungsverbot“ für 95 Prozent der Bundesfläche vorsah, soll Westdeutschland nun generell „für Investitionen erschlossen“ werden können, mit Ausnahmeregelungen lediglich für Nationalparks und Naturschutzgebiete.

Obwohl der Entwurf mit derartigen Änderungen den Wünschen der SO<sub>2</sub> auswerfenden Wirtschaftsbranchen weiter entgegenkommt als die alte Vorlage, gab der Bundesverband der Deutschen Industrie letzte Woche eine Stellungnahme ab, die Minister Baum verwundert als „ungewöhnlich hart“ qualifizierte: Durch den Entwurf, klagt der Dachverband, werde der „Industriestandort Bundesrepublik in Gefahr“ gebracht.

Hinter der schroffen BDI-Stellungnahme stecke, vermuten Baum-Berater, „vor allem die Steinkohle“: Während „die Chemie relativ flexibel und diskussionsbereit“ auftrete, reagiere die Kohlewirtschaft selbst auf minimale umweltpolitische Neuerungen ungemein allergisch.

Karlheinz Bund etwa, Vorstandsvorsitzender des Gesamtverbandes des deutschen Steinkohlenbergbaus, muß befürchten, nach Jahren defizitärer Entwicklung könnten Umweltauflagen gefährden, was er auf dem jüngsten „Steinkohlentag“ in Düsseldorf noch hoffnungsfroh als Ziel fixiert hatte: „Ausbau der Kohle zu der Energiebasis der Industrieländer.“

Bereits jetzt, verkündet deshalb der neueste Jahresbericht des Gesamtverbandes, sei der „Schutz der Vegetation“ in „weitestem Umfang gewährleistet“. Weitergehende Forderungen brächten nur „immer größere Unsicherheit“ der Planer und Betreiber.

Auch die BDI-Vertreter tun in einem letzte Woche vorgelegten 89-Seiten-Papier so, als hätten sie von Wald- und Seensterben nie etwas gehört: Der Verband kommt „zu dem Schluß, daß durch die geltenden Immissionswerte auch Tiere und Pflanzen ausreichend geschützt sind“.

Die sich verschärfende Energiekrise, hoffen Industrievertreter, werde all denjenigen schon den Wind aus den Segeln nehmen, die, wie Forstdirektor Joachim

Pampe von der Arbeitsgemeinschaft der Waldbesitzerverbände, von Kraftwerken nur noch als „Giftschleudern“ reden. Auch Norbert Rehbock, Forst-Obmann im Agrarministerium, hatte bereits „Besuch von der Steinkohle“.

Deren Lamento, zusätzliche Filteranlagen zur Bindung von mehr Schwefel (und auch von Schwermetallen) würden ein Viertel der eh in die Milliarden gehenden Kraftwerk-Investitionen verschlingen, kommentierten Ertls Forstbeamte mit einem „Na und?“ Darauf die Steinkohlen-Vertreter: „Das wird Ihnen der Wirtschaftsminister schon beibringen, was das bedeutet.“

Josef Ertl selber scheint vor allem darauf bedacht, seine freidemokratischen Kabinettskollegen, den Marktgrafen Lambsdorff und den zwischen Ökonomen und Ökologen lazierenden Umwelt-Ressortchef Baum, nicht durch alarmierende Äußerungen über den Zustand des Waldes in zusätzliche Schwierigkeiten zu bringen.

Ertl kommt zugute, daß die Ursachen des Baumsterbens im Detail noch nicht abschließend erforscht sind. Auf „ganz bestimmt zwölf Theorien“ schätzt beispielsweise der Stuttgarter Forstdirektor Peter Weidenbach das derzeitige Diagnoseangebot der Wissenschaft allein für die indisponierte Weißtanne. Das renommierte „Forstwissenschaftliche Centralblatt“ hat die diversen Erklärungsversuche unlängst in einer Sondernummer auf fast 300 Seiten versammelt\*.

Viele Forscher freilich, sagt der Kieler Biologe Professor Berndt Heydemann, scheuen eindeutige Aussagen über die Ursachen von Umweltschäden. Beliebt seien darum Gutachter-Formulierungen wie:

Es müßten weitere Untersuchungen eingeleitet werden, um zu klären, ob sich durch die aufgezeigten Tatbestände langfristig chronische Schäden ergeben könnten. Diese sind vorläufig mit endgültiger Sicherheit nicht – oder noch nicht in vollem Umfang – experimentell nachweisbar beziehungsweise vorauszusagen.

„Diese Schlußbemerkung“, spottet Heydemann über seine Kollegen, „ist gut für den Gutachter, weil er neue Forschungsgelder haben muß. Gut ist sie auch für den Politiker, weil er nun vorläufig keine Entscheidung zu fällen braucht“, die, im Falle des Waldsterbens, Kosten in Multi-Millionen-Höhe verursachen würde.

Die Unfähigkeit der Bonner Koalition, des Schwefel-Problems Herr zu werden, sei ein geradezu „klassischer Fall“ umweltpolitischen Versagens, kommentierte kürzlich die „Stuttgarter Zeitung“: „Der Schaden ist erkannt, die potentielle Ursache festgestellt. Aber der ökologische Wahnsinn schreitet fort, weil letzte wissenschaftliche Beweise (noch) nicht zu erbringen sind.“

Waldforscher Ulrich sieht keine andere Möglichkeit, als innerhalb „der nächsten zwei, drei Jahrzehnte die Emissionen auf Null herunterzubringen“. Ulrich: „Das ist eine Existenzfrage.“ Auch Liesel Hartenstein, Fach-Sprecherin der SPD-Bundestagsfraktion, fordert eine „umweltpolitische Offensive“ gegen die Verschmutzung der Luft und des „nicht vermehrbaren Rohstoffs ‚Boden‘“; eine Verschärfung der von Baum vorgeschlagenen SO<sub>2</sub>-Werte sei „vordringlich“.

Waldpolitiker Ertl wiederum möchte die schwefligen Gefahren durch atomare Risiken ersetzen: „Nur der Einsatz der Kernenergie kann unsere Natur retten.“ Unabhängige Energieexperten dagegen sind sicher, daß umweltfreundliche Kohleverbrennung durchaus machbar ist,

\* 45 Prozent der Befragten nannten einen Verkehrsunfall, 34 Prozent Krieg, 14 Prozent Atomkraftwerke; Mehrfachnennungen waren möglich.

\* „Forstwissenschaftliches Centralblatt“, Jahrgang 100, Heft 3-4, Verlag Paul Paray, Hamburg und Berlin: 54 Mark.

wenn nur die Politiker die richtigen Schwerpunkte setzen.

Auf eine Finanzierungsmöglichkeit wies am Mittwoch letzter Woche der BUND hin. Bonn brauche nur den Bau des „ökonomisch unsinnigen und ökologisch zerstörerischen“ Rhein-Main-Donau-Kanals zu stoppen, den auch Bundesverkehrsminister Volker Hauff für „das dümmste Projekt seit dem Turmbau von Babel“ hält. Die dafür vorgesehenen vier Milliarden Mark könnten für die Entschwefelung ausgegeben werden.

Bei einem zweitägigen „Kohlekongress“ in Essen, zu dem unter anderen die Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute geladen hatte, einigten sich unlängst 200 Fachleute auf einen Zehn-Punkte-Katalog zur Energiepolitik. Danach soll die Bundesregierung ihr Programm zur Kohleverflüssigung und -vergasung aus Gründen der Energieeinsparung wie auch der Luftreinhaltung aufgeben und die freierwerdenden Milliarden für die Einführung der Würlschichttechnologie und für den Bau von Fernheizzentralen bereitstellen.

Fernwärme könnte in der Tat, wie eine Untersuchung der Technischen Überwachungsvereine Rheinland und Westfalen bestätigt, nicht nur eine optimale Nutzung der Kohlevorräte ermöglichen, sondern auch die Abgase aus privaten Einzelöfen drastisch verringern: In den Belastungsgebieten zwischen Köln und Dortmund könnten mit Hilfe von Fernwärme laut TÜV die SO<sub>2</sub>-Immissionen aus Heizungen um durchschnittlich 93 Prozent gesenkt werden.

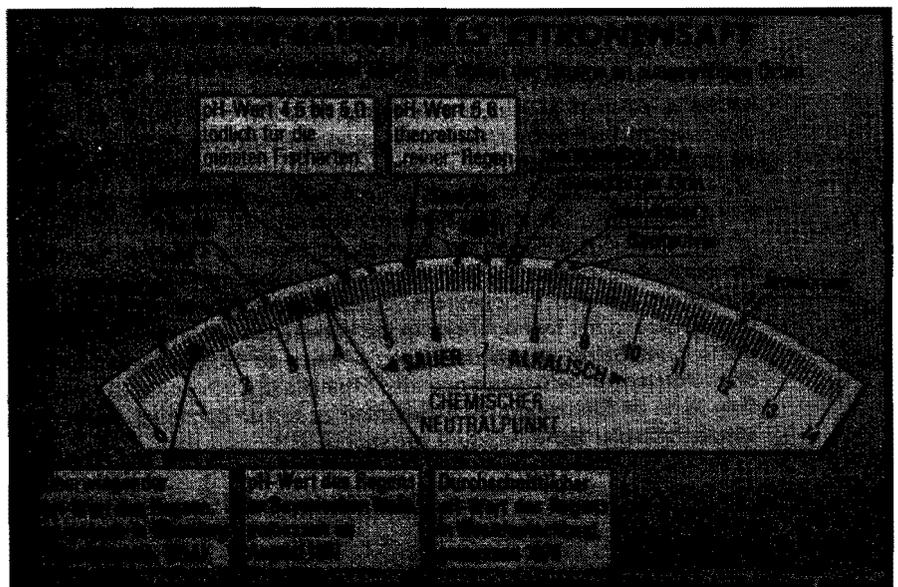
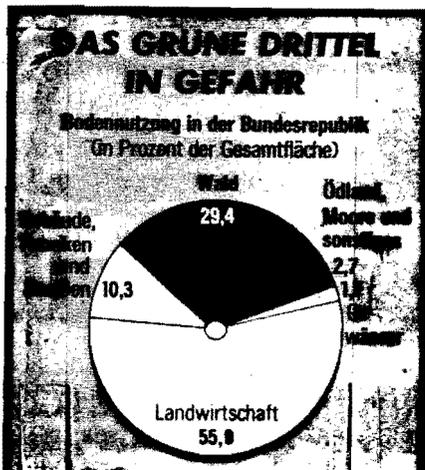
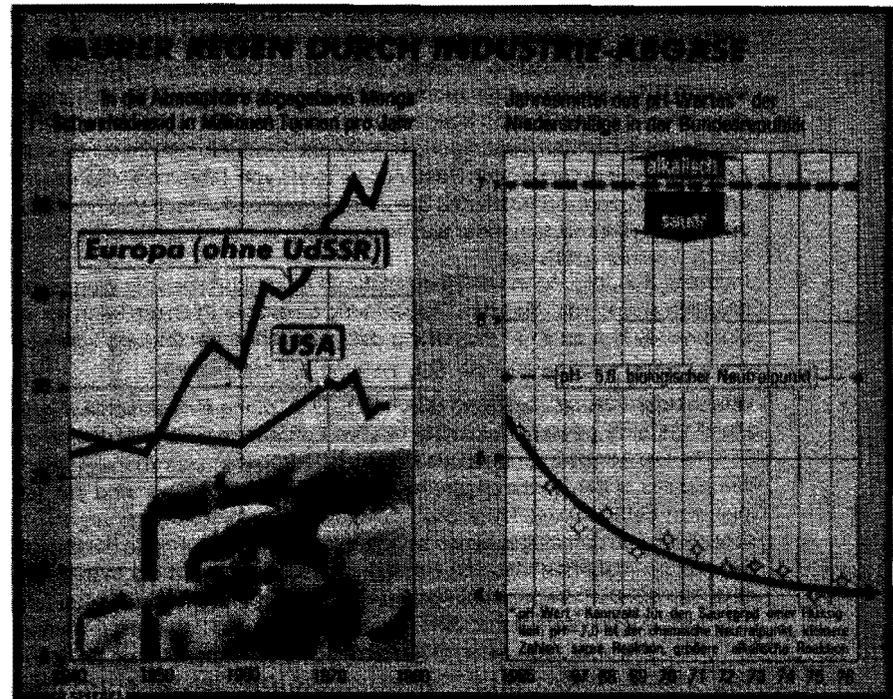
Was Kohlenutzung ohne Naturzerstörung kosten würde, hat jüngst die OECD errechnen lassen, der die USA, Kanada, Japan, Australien, Neuseeland und 19 europäische Staaten angehören. Um die SO<sub>2</sub>-Emissionen bis 1985 auf den Stand von 1974 zu drücken, müßten die westeuropäischen Länder rund 0,5 Promille ihres Bruttosozialprodukts für die Schwefeldioxid-Verminderung aufwenden, insgesamt 1,17 Milliarden Dollar.

Dem allerdings würde, so die OECD-Experten, möglicher Nutzen bis zu acht Milliarden Dollar gegenüberstehen – durch Minderung von forst- und landwirtschaftlichen Einbußen, Korrosionsschäden und Krankenkosten.

Die durchschnittliche Lebenserwartung der Westeuropäer könnte laut OECD um 500 Tage steigen.

Eine britische Umweltstudie hat vor einigen Jahren schon dargelegt, vor welcher schlichten Alternative die Industrienationen stehen: „Wir haben uns zu entscheiden, ob wir die Kosten der Luftreinhaltung tragen wollen oder aber die Kosten unterlassener Reinhaltung.“

Ende



## 2. Umweltschäden durch SO<sub>2</sub>

Für die Wirkung von SO<sub>2</sub> auf Objekte findet man außerordentlich unterschiedliche Dosis-Antwortbeziehungen. Während bei bestimmten Materialien alle Werte > 0 einen Schaden verursachen und bestimmte Arten der Flora auf geringe Schadgaskonzentrationen sehr empfindlich reagieren, haben Versuche mit reinem SO<sub>2</sub> beim Menschen eine Verträglichkeit etwas höherer Dosen ergeben. Dies ändert sich jedoch erheblich, wenn man epidemiologische Untersuchungen auswertet, bei denen das SO<sub>2</sub> gemeinsam mit anderen Luftverunreinigungen auftritt. Während die Zusammenhänge zwischen einigen Schadstoffkombinationen und der Schädigung bereits erkannt und somit für Reglementierungen berücksichtigt werden konnten, sind andere Untersuchungen noch im Gange und müssen nach Abschluß beim Festlegen von Grenzwerten berücksichtigt werden.

### 2.1.5 Problematik der Grenzwertfindung

In der Beurteilung der SO<sub>2</sub>-Wirkung ergeben sich erhebliche Unschärfen. Wissenschaftlich exakte Dosis-Wirkungsbeziehungen sind nach derzeitigem Kenntnisstand für den Bereich umweltrelevanter Konzentrationen nicht ableitbar. Die über einen Jahresmittelwert auf der Basis epidemiologischer Erhebungen ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehungen sind nicht auf beliebige Situationen übertragbar, da

- der Nachweis des kausalen Zusammenhangs zwischen Konzentration und Wirkungsmodell fehlt
- durch den Jahresmittelwert Konzentrationsschwankungen nicht zum Ausdruck gebracht werden
- die Immissionsmuster gleicher Jahresmittelwerte in verschiedenen Gebieten erheblich voneinander abweichen
- die Zusammensetzung und Toxizität anderer, kombinatorisch wirkender Noxen stark schwankt.

Vor allem bezüglich des Langzeitwertes sollte daher nicht übersehen werden, daß eine Begrenzung der SO<sub>2</sub>-Immissionskonzentrationen derzeit nur durch pragmatisch festgesetzte Orientierungswerte erfolgen kann. Ein Minimalrisiko bleibt dabei nicht ausgeschlossen.

### 2.2.3 Wirkungen auf Böden, indirekte Schädigung von Pflanzen

Atmosphärisches SO<sub>2</sub> bewirkt im Boden eine Abnahme des pH-Wertes<sup>26 29</sup> und eine Zunahme der Sulfatkonzentration<sup>41</sup>. Neben einer Beeinträchtigung der Mikroflora<sup>66</sup> sind dadurch auch bodenstrukturelle Veränderungen zu erwarten. Bei der Zersetzung der von SO<sub>2</sub>-geschädigten Gehölzen abgeworfenen Nadeln und Blätter wird weiteres Sulfat oder andere angereicherte Schwefelverbindungen dem Boden zugeführt<sup>36 41 44 61</sup>. In einer Untersuchung des Solling, eines industriefernen Ökosystems, hat sich gezeigt, daß die Bodenversauerung auf diese Weise erheblich zugenommen hat<sup>13</sup>, in deren Folge die Speicherkapazität, z. B. für Calcium-Ionen und andere Nährstoffe stark zurückgegangen ist. Durch diese Veränderungen des Bodenzustandes ist eine erhöhte Gefahr der indirekten Schädigung besonders durch Aluminium-Ionen in der Bodenlösung gegeben, so daß ein Absterben der untersuchten Bestände im Laufe von Jahren oder Jahrzehnten befürchtet wird<sup>13</sup>. Kalkstandorte, arme Böden, wasserbeeinflusste Standorte sowie landwirtschaftlich behandelte (gedüngte) Flächen sind wegen ihrer Pufferwirkung, fehlender aluminium-haltiger Ton-Mineralen oder -Silikate und Düngungsmaßnahmen (Kalkung) weniger gefährdet.

Indirekte Schädigungen von Pflanzen durch Absenkung des pH-Wertes im Boden betreffen insbesondere oberflächlich wurzelnde Pflanzen. Die Keimung derartiger Pflanzen kann so stark behindert werden, daß es z. B. in Buchenwäldern zu einer Hemmung der natürlichen Verjüngung kommen kann<sup>79</sup>.

### 2.3.2 Qualitative Angaben zur SO<sub>2</sub>-Wirkung auf Materialien

Verschiedene Metalle erfahren durch SO<sub>2</sub>-Einwirkung eine Beschleunigung ihrer natürlichen Korrosion, wozu allerdings eine gewisse minimale relative Luftfeuchtigkeit erforderlich ist (je nach Metall zwischen 45 und 65%)<sup>7 8</sup>. Die Korrosionsrate eines Metalls ist darüber hinaus von weiteren Faktoren abhängig: von der Stellung des Metalls in der Spannungsreihe, von der Betauungsdauer und der Temperatur, vom Reaktionsmechanismus, von der Form des Metallobjekts sowie von seinen Abmessungen und seiner Orientierung im Raum und schließlich von den möglicherweise schützenden Eigenschaften der Korrosionsprodukte. Es gibt Hinweise darauf, daß bei manchen Metallen ein Wirkungsschwellenwert der Immissionsrate besteht (bei etwa 40 mg SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>d). Nachstehend werden einige gebräuchliche Metalle in der Reihenfolge zunehmender Korrosion unter Industrieluft-Einfluß aufgeführt: Zinn, Blei, Aluminium, Kupfer, Nickel, Messing, Zink, Cadmium, Stahl (unlegiert). Im Falle der Bronzedenkmäler bilden sich in sauren Atmosphären Krusten aus Kupfersulfat und Staub, die keinen Schutz darstellen, weil sie aufbrechen und abplatzen, wobei gleichzeitig die originale Oberfläche nivelliert wird<sup>9</sup>. Zum Schutz kann Bronze mit Wachs oder Kunstharzlack überzogen werden.

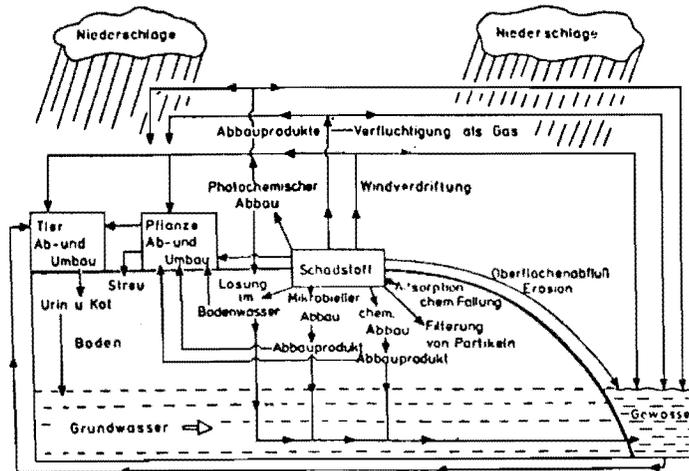
Eine Reihe von mineralischen Baustoffen, besonders carbonatische und carbonathaltige, kann durch SO<sub>2</sub> angegriffen werden<sup>10 11 12</sup>. Carbonate [z. B. Kalk(sand)stein, Kalkmörtel, Marmor, Fresken] werden durch die aus dem SO<sub>2</sub> entstehende Schwefelsäure in Sulfate umgewandelt, die wegen ihres Kristallwassergehalts ein größeres Volumen als das ursprüngliche Carbonat einnehmen und gefügesprengend wirken können. Außerdem sind die Sulfate löslicher als die Carbonate und können durch Wasser an die Wandoberfläche transportiert werden, wo eine Gipskruste ausblüht, unter der ein geschwächtes Gefüge zurückbleibt. Regen löst die Gipskruste auf bzw. verhindert ihr Entstehen. Als Beispiele für den geschilderten Steinzerfall sind die Akropolis<sup>13</sup> und der Kölner Dom<sup>14</sup> besonders bekannt geworden. Es sei darauf hingewiesen, daß der Steinzerfall auch allein durch Witterungseinflüsse, vor allem durch Frost-Tau-Wechsel, hervorgerufen werden kann. Ein eindeutiger Nachweis der Schadensursache(n) ist daher selten möglich. Während es für Marmor derzeit noch keine Möglichkeit der Schutzbehandlung am Originalstandort gibt, kann man Kalk(sand)stein gegen sauren Regen durch Imprägnierung mit hydrophobierenden Wirkstoffen schützen, z. B. mit Siliconen oder Alkyltrialkoxysilanen<sup>11</sup>. Zement und Beton – besonders wenn sie reich an Tricalciumaluminat sind – können durch SO<sub>2</sub> unter Bildung des voluminösen gefügesprengenden Ettringits (3 CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3 CaSO<sub>4</sub> · 31 H<sub>2</sub>O) angegriffen werden; außerdem kann im Stahlbeton die Bewehrung zu rosten beginnen, wenn die Alkalireserve des Betons durch die atmosphärische Schwefelsäure verbraucht ist<sup>15</sup>.

Quelle: Umweltbundesamt: Texte, Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid, Berlin 1980

# M3

## Luftverunreinigende Stoffe

Verunreinigungsstoff	hauptsächliche Herkunft	Wirkungen auf Mensch und Umwelt (zulässige obere Grenzwerte)
Schwefeldioxid	Kohle- und Ölheizungen, Industrie (z.B. Erdölraffinerie, Zellulose-, Düngemittel-, Soda- und Schwefelsäurefabr.) Energieerz. / Kraftwerke	Bronchitis und Reizungen der Schleimhäute des Atemsystems, zunehmender Durchströmungswiderstand der Lunge $MIK_D(IW1) = 0,14 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ $MIK_K(IW2) = 0,40 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ Schäden an Pflanzen- u. Baustoffen
Kohlenmonoxid	Kfz-Abgase, unvollst. Verbrennung, Hochofen	Beeinträchtigung des Sauerstofftransportes im Blut $IW1 : 10,0 \text{ mg CO}/\text{m}^3$ $IW2 : 30,0 \text{ mg CO}/\text{m}^3$
Stickoxide	Kfz-Abgase, Industrie (z.B. Salpetersäure, Düngemittelfabriken)	Reizungserscheinungen der Augen sowie der Luftwege. $IW1 : 0,1 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3$ (NO:0,2) $IW2 : 0,3 \text{ mg NO}_2/\text{m}^3$ (NO:0,6)
Kohlenwasserstoffe	Kfz-Abgase, Industrie (z.B. Raffinerien, Petrol- und Kohlechemie)	Lungenkrebs
Staub	Verkehr, Industrie (z.B. Zement-, Kalk-, Gips- und Düngemittelfabriken), Hausbrand	Reizung und Schädigung des Atemsystems $IW1: 0,2 \text{ mg Schwebstaub}/\text{m}^3$ $IW2: 0,4 \text{ mg " "}/\text{m}^3$ (Staubniederschlag: $0,35 \text{ g} / \text{m}^2 \text{ d};$ $0,65 \text{ g} / \text{m}^2 \text{ d}$ )
Schwermetalle (Pb, Cd, Hg, Zn)	Industrie, Hütten- und Bergwerksbetriebe, Kfz-Abgase	Schädigung des Stoffwechsels und Nervensystems, genetische Schäden
Geruchsstoffe (z.B. Mercaptane, Scheffelwasserstoffamine)	Industrie (Erdölraffinerien, erdölverarbeitende Betriebe), Massentierhaltung	von allgemeiner Belästigung bis zu körperlichen Schäden



Wege von Schadstoffen in der Biosphäre  
(Quelle: Sachverständigenrat für Umweltfragen)

Versuche zur Schwefelchemie

**M4**

Bukatsch/Glöckner (Hrsg.): Experimentelle Schulchemie (Aulis-Verlag) Köln 1977,  
Band 1 (Anorganische Chemie, Nichtmetalle) Seite 150-194

SO <sub>2</sub> :	V 24 (Rösten)	S. 163
	V 26 (S. Verbrennung)	S. 165
	V 27 (SO <sub>2</sub> -Darstellung)	S. 165
	V 29 (Eigenschaften)	S. 166
	V 31 (Bildung)	S. 168
	V 32 (Claus-Verfahren)	S. 169
Schweflige Säure:	V 33 (bleichende Wirkungen)	S. 170
	V 35 (Reduktionswirkung)	S. 171
	V 36 (oxidierende Wirkung)	S. 172
Schwefelsäure:	V 38, V 41 (Nachweisr.)	S. 173/174
	V 43 (Bildung aus SO <sub>2</sub> )	S. 176
	V 52 (Eigenschaften) <sup>2</sup>	S. 182
	V 61, V 62, V 64 (Nachweisr.).	S. 189-190

Band 4 (analytische Chemie)

Qualitative Nachweise:	V 127 (Heparprobe)	S. 79
	V 130 (Sulfat)	S. 80
	V 132 (Sulfit)	S. 81
Quantitative Analytik:	V 183 (Sulfat gravimetrisch)	S. 104

W. Wolff, Umweltschutz, Praxis-Schriftenreihe Chemie Band 28 (Aulis-Verlag) Köln 1974

Bestimmung des SO<sub>2</sub>-Gehaltes der Luft

- Absorption in H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Leitfähigkeitsmessung	S. 60
- Coulometrische Titration Br <sup>-</sup> /Br <sub>2</sub>	S. 61
- Drägergasspürgerät	S. 61
- Reaktion mit Zitronensäure	S. 62

(außerdem: ältere Daten zur Luftbelastung)

E. Philipp, Experimente zur Untersuchung der Umwelt

(Bayerischer Schulbuchverlag) München 1977

Kapitel 1.1. Luftverschmutzung

V 3 Untersuchung von Benzinverbrennungsprodukten	S. 8/15
V 4 SO <sub>2</sub> erhöht die Leitfähigkeit einer H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Lösung	S. 9/16
V 5 SO <sub>2</sub> -Darstellung und Begasung verschiedener Materialien	S. 10/16
V 6 Sulfit/SO <sub>2</sub> -Wirkungen auf verschiedene Materialien <sup>2</sup> (im Exsikkator)	S. 11/17/18

Kapitel 4.1. Bodenbelastung

V 1 Wässriger Extrakt von Bodenproben, Untersuchung auf pH, Sulfat u.a.	S. 96/105
---	-----------

Mögliche Vorschläge für SO<sub>2</sub>-Abtrennung und Bestimmung

- Allgemein: \* Abtrennung und Anreicherung von SO<sub>2</sub> durch Ausnutzung der Löslichkeit in Wasser
- \* Ausfrieren des SO<sub>2</sub>. SO<sub>2</sub> hat einen relativ niedrigen Siedepunkt: - 10°C (Verwendung als Kältemittel in Kühlaggregaten)
- \* Ausnutzung der Reduktionswirkung von SO<sub>2</sub>
- \* Ausnutzung der Säurewirkung von SO<sub>2</sub>

- Spezielle quantitative Bestimmungsvorschläge und ihre Durchführbarkeit:

Prinzip:

- Schweflige Säure entwickelt eine bestimmte Menge H<sub>2</sub> bei Reaktion mit einem unedlen Metall
- Schweflige Säure entwickelt bei Reaktion mit einem Carbonat eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub>
- Schweflige Säure führt zu einem bestimmten pH-Wert in der Lösung
- Schweflige Säure kann mit einer Lauge neutralisiert werden. Die Menge der verbrauchten Lauge ist ein Maß für den SO<sub>2</sub>-Gehalt
- Schweflige Säure als Reduktionsmittel kann eine bestimmte Menge KMnO<sub>4</sub>-Lösung entfärben
- Schweflige Säure ergibt nach Oxidation eine entsprechende Menge Schwefelsäure. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> kann als Sulfat bestimmt werden.

Schwierigkeiten:

- Schweflige Säure ist nur eine schwache Säure und reagiert nur sehr langsam mit dem Metall, u.U. auch unvollständig
- wie oben; außerdem: CO<sub>2</sub> ist ebenfalls wasserlöslich
- wie oben; außerdem: der pH-Wert ist bei einer schwachen Säure, die nicht vollständig dissoziiert ist, nicht proportional dem Säuregehalt der Lösung; die Abhängigkeit ist auch nicht einfach logarithmisch!
- Die Neutralisation ist nur bei einer Rücktitration reproduzierbar; Schwierigkeiten mit der kleinen Säuremenge
- Bei den Redox-Reaktionen ist die Gleichgewichtslage günstiger, d.h. diese laufen praktisch quantitativ ab. Schwierigkeiten sind bei der Endpunktbestimmung der Entfärbungsreaktionen zu erwarten
- Die Oxidation zu Sulfationen ist von allen Reaktionen vorzuziehen, eine anschließende gravimetrische Bestimmung des BaSO<sub>4</sub> ist bei der sehr geringen Menge jedoch problematisch.

Versuchsaufbau zur SO<sub>2</sub>-Bestimmung

Prinzip: SO<sub>2</sub> soll in einer H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Lösung zu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oxidiert werden. Die Menge der gebildeten Schwefelsäure soll durch Leitfähigkeitsmessung bestimmt werden.

Wir brauchen folgende Geräte:

- 1.) Eine Gaswaschflasche zum Durchleiten der Luft
- 2.) Wasserstoffperoxidlösung zum Füllen der Waschflasche
- 3.) Eine Pumpe - Wasserstrahlpumpe - zum Ansaugen der Luft
- 4.) Schlauchstücke zum Verbinden
- 5.) Ein Gerät zur Messung der durchgesaugten Luft
- 6.) Einen Transformator (Wechselspannung) und ein Amperemeter mit austauschbaren Einsätzen (1mA bis 300 mA)
- 7.) Einen Meßstab zur Leitfähigkeitsmessung.

Vorversuche

Wir gaben 3%ige Wasserstoffperoxid-Lösung in die Gaswaschflasche (80 ml). Diese verbanden wir mit der Wasserstrahlpumpe. Hier müßte z.B. ein Rotameter dazwischengeschaltet werden, um die durchgesaugte Menge Luft zu messen. Zur Verbindung nahmen wir PE-Schläuche. Wird nun die Wasserstrahlpumpe angestellt, so zieht sie Luft durch das Rotameter und die Waschflasche. Ist eine bestimmte Menge Luft durchgesaugt, so erfolgt die Messung der Leitfähigkeit in der Waschflasche.

Wir überlegen uns, wie man aus der Leitfähigkeit bzw. aus dem abgelesenen Wert der Stromstärke in mA auf die SO<sub>2</sub>-Menge schließen kann: Dazu müßte man in einer anderen Waschflasche soviel SO<sub>2</sub> lösen, bis sich der gleiche Wert einstellt. Das ist aber zu umständlich, weil es bei jeder Messung wiederholt werden muß. Einfacher ist es, für die Apparatur eine Eichkurve aufzustellen.

Protokoll

Christa L.

Um eine Eichkurve aufstellen zu können, brauchen wir reines Schwefeldioxid. Wenn man SO<sub>2</sub> durch Verbrennen von Luft herstellt, hat man immer 80 % Stickstoff dabei, außerdem ist vielleicht nicht der ganze Sauerstoff verbraucht.

Deshalb wählten wir eine andere Methode:

Wir bauten eine Gasentwicklungsapparatur zusammen aus

- einem Erlenmeyerkolben mit weitem Hals,
- einem Tropftrichter mit Hahn,
- einem zweifach durchbohrten Stopfen und
- einem gewinkelten Glasrohr.

In den Tropftrichter gaben wir konzentrierte Schwefelsäure und in den Kolben eine konzentrierte Lösung von Natriumsulfit (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>). Wenn die Säure auf die Lösung tropft, entwickelt sich SO<sub>2</sub>.

Dieses ist schwerer als Luft und füllt langsam den Kolben. Dann kann es mit einer Spritze entnommen werden.

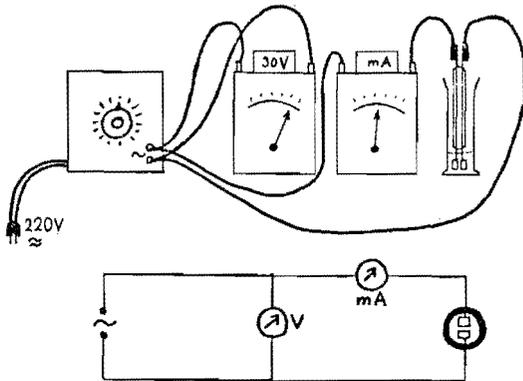
Protokoll

Renate K.

Für die Eichmessung benutzten wir die 5-Liter-Gas-Meßglocke aus der Sammlung. Für jede Messung wurden 5 Liter Luft durch die Waschflasche gesogen. Bei der ersten Messung wurde kein Schwefeldioxid dazugegeben, bei den folgenden Messungen wurde mit einer Plastikspritze jeweils 0,5 cm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub> mit in die Waschflasche eingespritzt. Nach jeder Einleitung erfolgt eine Messung der Leitfähigkeit.

Für die Messung des Blindwertes - Luft ohne  $\text{SO}_2$  - sind wir davon ausgegangen, daß die Luft im Klassenraum praktisch kein  $\text{SO}_2$  enthält. Will man das genauer machen, dann muß man gereinigte Luft durchleiten.

Aufbau zur Messung der Leitfähigkeit:



Schaltskizze

Bei einer konstanten Spannung von 25 V Wechselstrom wurden folgende Werte gemessen:

$\text{SO}_2$ -Einspritzung ( $\text{cm}^3$ )	$\text{SO}_2$ -Gesamtmenge ( $\text{cm}^3$ )	mA
-	0	0,3
0,5	0,5	20
+ 0,5	1,0	35
+ 0,5	1,5	50
+ 0,5	2,0	60
+ 0,5	2,5	72
+ 0,5	3,0	80
+ 0,5	3,5	93
+ 0,5	4,0	110

Danach haben wir alle Wertepaare der Tabelle zu einem Graphen verarbeitet (auf Millimeter-Papier). Die Punkte liegen nicht genau auf einer Geraden, obwohl sie das theoretisch sollten. Die Abweichungen sind Meßfehler und beruhen wahrscheinlich auf folgenden Ungenauigkeiten:

- Beim Einspritzen des  $\text{SO}_2$  und schon beim Abmessen des Gases mit der Spritze.
- Beim Ablesen des Amperemeters.

Für die Eichkurve müssen wir aber eine Gerade ziehen, damit wir später für Meßergebnisse in mA eine entsprechende Menge  $\text{SO}_2$  ablesen können. Am einfachsten ist es, die Gerade so zu legen, daß alle Punkte möglichst nahe liegen.

Wenn man den Fehler der Eichung kleiner machen will, muß man die Eichmessung (mehrmals) wiederholen oder die Ergebnisse mit einer anderen Methode überprüfen, z.B. durch Bestimmung des Sulfatgehaltes der Lösung als  $\text{BaSO}_4$ .

#### Hinweise zur Apparatur und zur Eichung:

Um die Querempfindlichkeit (= Störung der Ergebnisse durch andere Luftbestandteile) zu verringern, kann eine Filterpatrone benutzt werden. Näheres ist den VDI-Richtlinien zu entnehmen.

Die Eichung sollte in den wesentlichen Bedingungen mit den Umständen der Messung übereinstimmen. Das ist bei der Vorgehensweise in den oben aufgeführten Protokollen nicht unbedingt der Fall. Zu achten ist darauf,

- daß die Dauer der Luftdurchleitung durch die Waschflasche bei Messung und Eichung gleich ist, d.h. daß auch die Luftvolumina gleich sind. Zwar spielt die Luftmenge bei der Eichung wegen der einmaligen Einspritzung des  $\text{SO}_2$  keine so wichtige Rolle, hinsichtlich der anderen Begleitstoffe (z.B.  $\text{CO}_2$ ) kann dies jedoch von Bedeutung sein.
- daß eine Blindwertmessung zwar von Bedeutung zur Abschätzung des Meßfehlers ist. Für die Ergebnisse ist sie jedoch ohne großen Einfluß, wenn statt einer Absolutmessung der Leitfähigkeit eine Differenzmessung durchgeführt wird. In diesem Fall wird die Luft durch eine verdünnte Lösung von  $\text{H}_2\text{O}_2$  und  $\text{H}_2\text{SO}_4$  durchgeleitet. Damit wird gleichzeitig eine Absorption von  $\text{CO}_2$  wegen des Säuregehaltes der Lösung verhindert. Diesem Vorgehen ist daher der Vorzug zu geben.
- daß die Eichkurve für einen Bereich bzw. für eine Empfindlichkeit vorgenommen werden sollte, die der realen Luftbelastung entspricht. Man kann dabei von einem Maximalwert von  $2 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$  Luft ausgehen. Führt man Differenzmessungen durch, dann ist die Steigung der Geraden (Zunahme der Stromstärke in mA / Zugabe von  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ SO}_2$ ) ein ein-facher Faktor für die Umrechnung.

- daß die im konkreten Fall erhaltenen Werte der Leitfähigkeit natürlich von Lösungs-  
menge, Elektrodenabstand, Spannung u.a. abhängig sind. Die weiter oben aufgeführten  
Werte haben daher nur Beispielcharakter. Günstiger als im vorliegenden Fall wäre die  
Benutzung höherfrequenter Wechselspannung, da dann die Polarisationserscheinung auf  
ein Minimum reduziert und eine Elektrolyse des Wassers vermindert werden könnten. Bei  
25 V Wechselspannung (50 Hz) empfiehlt es sich, während der Messung zu schütteln, um  
Gasblasen an den Elektroden zu entfernen.

### Protokoll

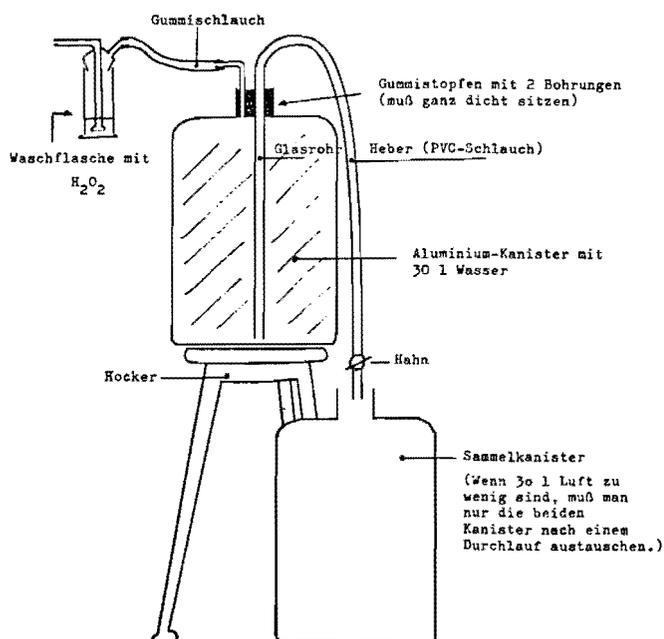
Michael U.

Da ein Rotameter nicht zu beschaffen war, mußten wir das Problem der Gas-Volumen-Mes-  
sung anders lösen. Auch das Ansaugen der Luft kann nur in der Schule mit einer Wasser-  
strahlpumpe gemacht werden. Beide Probleme mußten daher anders gelöst werden.

Einige schlugen vor, eine tragbare Motorpumpe zu benutzen, aber die hatte auch keiner.  
K. schlug vor, etwas ähnliches wie eine pneumatische Wanne zu benutzen. Diese müßte  
aber hinter der Waschflasche sein, damit das Sperrwasser kein  $\text{SO}_2$  aufnimmt. Aber auch  
die Luftmenge wäre zu gering.

In der Sammlung fanden wir eine Gasmeßglocke. Für die Messung im Freien ist eine sol-  
che Glocke auch zu empfindlich. Man ersetzt sie besser durch ein anderes Gefäß. Herr  
S. sagte uns, daß er einen oder zwei Aluminiumkanister hätte. Die könnte man benutzen,  
wenn man das Wasser durch einen Aquarienheber herauslaufen läßt und gleichzeitig die  
angesaugte Luft durch die Waschflasche leitet.

Wir beschlossen, die Kanister-Methode bei der Messung im Freien anzuwenden. Das sollte  
dann so aussehen:



Hinweise zur Auswertung der Messungen:

- Im einfachsten Fall wird der Leitfähigkeitswert abgelesen und anhand der Eichkurve in die entsprechende Menge  $\text{SO}_2$  "übersetzt". Es fehlt dann nur noch die Umrechnung auf  $1 \text{ m}^3$  Luft bzw. in eine andere gewünschte Maßeinheit.
- Ist der Meßwert klein im Vergleich zu den Werten der Eichkurve, oder erscheint eine graphische Auswertung aus anderem Grund unangebracht, so wird eine rechnerische Ermittlung der  $\text{SO}_2$ -Menge erforderlich.  
Dazu kann die Steigung der Eich-Geraden bzw. ein entsprechender Umrechnungsfaktor benutzt werden.
- Sind elektronische Taschenrechner im Unterricht bereits eingeführt, so ist u.U. auch die Berechnung einer Ausgleichsgeraden für die Eichwerte möglich, womit eine Vereinheitlichung und bessere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erreicht werden können.

Zum Vergleich der Ergebnisse mit offiziellen oder veröffentlichten Werten sind häufig Umrechnungen notwendig.

In der Literatur und in den Medien treten Angaben von Immissionskonzentrationen in mindestens drei verschiedenen Einheiten auf:

- $\text{cm}^3 \text{ Gas/m}^3 \text{ Luft}$  bzw.  $\text{ml Gas/m}^3 \text{ Luft}$
- ppm oder ppb
- $\text{mg Gas/m}^3 \text{ Luft}$

Beim Gebrauch in Chemie oder Physik werden Prozentangaben entweder als Gewichts-% oder Volumen-% benutzt. Angaben in ppm oder ppb beziehen sich im ökologischen Gebrauch stets auf Volumenverhältnisse.

Damit läßt sich leicht der Zusammenhang von

$\text{cm}^3 \text{ Gas/m}^3 \text{ Luft}$  und ppm ermitteln:

$$1 \text{ cm}^3 \text{ Gas/1 m}^3 \text{ Luft} = 1 \text{ cm}^3 \text{ Gas}/10^6 \text{ cm}^3 \text{ Luft} = 1 \text{ ppm}$$

Beide Einheiten haben den Vorteil, daß sie stoffunabhängig sind. (Molekulargewicht o.ä. gehen nicht in die Rechnung ein.)

Eine Umrechnung von ppm oder  $\text{cm}^3 \text{ Gas/m}^3 \text{ Luft}$  in  $\text{mg Gas/m}^3 \text{ Luft}$  kann exakt nur bei bekanntem Druck und Temperatur erfolgen. Für den Bereich der Spurenkonzentrationen spielen jedoch Druck- und Temperatureinflüsse für die Umrechnung praktisch keine Rolle.

Für Normalbedingungen gilt, wie bekannt,

- der Satz von Avogadro: Gleiche Volumina (idealer) Gase besitzen bei gleichen Bedingungen (Druck und Temperatur) gleiche Anzahlen von Teilchen.
- außerdem gilt: 1 Mol eines Gases nimmt bei Normalbedingungen ein Volumen von ca. 22,4 Litern ein.  
1 Mol eines Stoffes hat eine Masse, die seiner Molekularmasse im Gramm entspricht.

Für  $\text{SO}_2$  folgt daraus speziell:

Molekularmasse: 64

1 Mol  $\text{SO}_2$  wiegt demnach 64 g und nimmt bei Normalbedingungen ein Volumen von 22,4 l ein.

$$1 \text{ cm}^3 \text{ SO}_2 \text{ wiegt daher: } \frac{64}{22,4 \cdot 10^6} \text{ g} = \frac{64 \cdot 10^3}{22,4 \cdot 10^6} \text{ mg}$$

$$\text{Also: } 1 \text{ ppb SO}_2 = 0,002857 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3 \text{ Luft}$$

$$\text{Oder: } 1 \text{ ppm SO}_2 = 2,857 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3 \text{ Luft.}$$

Schüler- A r b e i t s b l a t t

=====

Meßergebnisse:

- Durchgesaugte Luftmenge: **1**
- Ausschlag des Amperemeters: mA

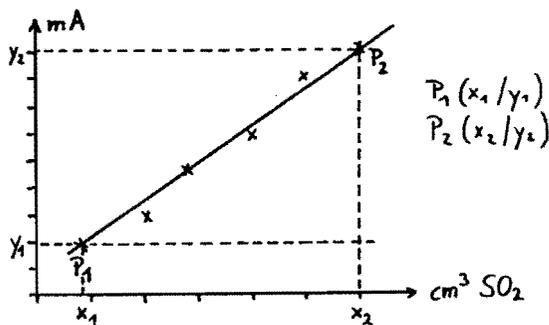
Berechne aus den Meßergebnissen den SO<sub>2</sub>-Gehalt von einem m<sup>3</sup> Luft!

Überlegungshilfen:

Der am Amperemeter abgelesene Wert von ... mA ist sehr klein. Der zugehörige Wert der SO<sub>2</sub>-Menge kann deswegen aus der Eichkurve nur ungefähr abgelesen werden.

Besser ist es, den SO<sub>2</sub>-Wert aus der Steigung der Geraden zu berechnen.

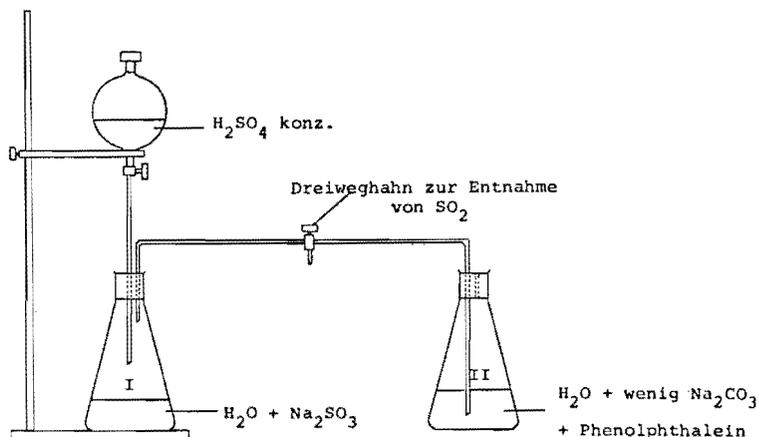
Hier ist nochmals die Eichkurve dargestellt:



Daraus läßt sich ablesen, daß einer Zunahme der SO<sub>2</sub>-Menge von x<sub>1</sub> (cm<sup>3</sup>) auf x<sub>2</sub> (cm<sup>3</sup>) eine Zunahme des Stromflusses von y<sub>1</sub> (mA) auf y<sub>2</sub> (mA) entspricht.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$
$$\Delta X = \frac{\Delta Y}{m}$$

V1 Kontrollierte Herstellung von SO<sub>2</sub>



5 g Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> werden mit 50 ml aqua dest. in einem 300 ml-Erlenmeyerkolben gelöst. Durch den Tropftrichter wird H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> konz. in die Lösung getropft.

Das gebildete SO<sub>2</sub> gelangt über den geöffneten Dreiweghahn in Kolben II. Die Flüssigkeit in Kolben II ist rosa gefärbt, da Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> basisch ist und Phenolphthalein als Indikator zugesetzt wird.

Nach deren Entfärbung ist gewährleistet, daß die gebildete SO<sub>2</sub>-Menge die Luft aus dem Verbindungsrohr zwischen Kolben I und II verdrängt hat, und somit aus dem freien Ende des Dreiweghahns reines SO<sub>2</sub> mit der Gasspritze entnommen werden kann.

V2 Zerstörende Wirkung von SO<sub>2</sub> / Saurem Regen auf verschiedene Materialien:

a) Nylonstrumpf-Versuch

Ein Standzylinder wird mit SO<sub>2</sub>-Gas gefüllt. Ein Nylonstrumpf wird angefeuchtet und in das Glasgefäß eingehängt: Es erfolgt rasche Auflösung und Zerstörung des Kunststoffgewebes.

b) Wirkung auf Kalkstein/Marmor

- Auf ein Stück polierten Marmor werden einige Tropfen schweflige Säure aufgebracht: Lokale Anätzung der Oberfläche, bei höherer Konzentration Blasenbildung durch CO<sub>2</sub>.
- Marmor oder Kalkstein werden angefeuchtet und im Exikator mit SO<sub>2</sub> begast. Zur Kontrastbildung werden Teile mit

Wachs oberflächlich versiegelt.

- Marmor oder Kalkstein werden im Exsiccator über eine  $\text{NaHSO}_3$ -Lösung gebracht (Langzeitversuch unter realistischen Bedingungen)

### V3 Nachweis von Schwefeldioxid bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe

#### a) Öl (Erdöl, Heizöl, Motorenöl):

Material: Öl, Porzellanschale, Dräger-Gasspürgerät-Teströhrchen ( $\text{SO}_2$ ), Bunsenbrenner.

Wenig Öl wird in einer Porzellanschale entzündet und die Verbrennungsgase mit dem Gasspürgerät untersucht.

(Zur Vermeidung von Flammeneinwirkungen auf das Gasspürgerät sollte ein Polyethylen-Schlauch mit Flastrichter auf das Teströhrchen aufgesteckt werden. Ein trockener Wattebausch im PE-Schlauch hält den Ruß zurück).

#### b) Öl (mit hohem Schwefelgehalt):

Material: Öl, Porzellanschale, Trichter, PE-Schlauch, Waschflasche mit 10 %iger  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Lösung, Wasserstrahlpumpe

Die Verbrennungsgase werden durch die Waschflasche gesaugt. Die Lösung wird aufgekocht und mit  $\text{BaCl}_2$  auf Sulfat untersucht (Blindprobe!)

#### c) Erdgas: siehe a) oder b)

#### d) Kohle:

Kohlestückchen werden am besten im Glasrohr (oder Quarzrohr) verbrannt. Wenn Sauerstoff-Flasche vorhanden, Verbrennung im Sauerstoffstrom. Sonst wie a) oder b).

Hinweis: Ebenso kann  $\text{SO}_2$  bei der Verbrennung von vulkanisiertem Gummi nachgewiesen werden.

### Auswirkungen von $\text{SO}_2$ / Saurem Regen auf die Vegetation - M 10 Versuche

Die folgenden Versuchsanleitungen sind entnommen aus:

L. Steubing, Ch. Kunze, Pflanzenökologische Experimente zur Umweltverschmutzung (Biologische Arbeitsbücher Bd. 11), Heidelberg (Quelle & Meyer) 1975<sup>2</sup> (ca. 20 DM).

Versuch Nr. 61: S. 91; Versuch Nr. 20; S. 42

**Versuch Nr. 61: Beeinflussung der Wurzelhaarausbildung bei der Kresse durch SO<sub>2</sub>**

*Untersuchungsmaterial:* Kresse

*Geräte und Reagenzien:* Begasungsglocke (Glassturz) nach Härtel entsprechend Versuch Nr. 20, ferner Petrischalen, Filtrierpapier; NaHSO<sub>3</sub> 0,1 %ig.

*Durchführung:* In 4 Petrischalen werden je 25 Kressesamen auf gut angefeuchtetem Filtrierpapier ausgelegt, anschließend 2 Schalen unter eine Begasungsglocke gestellt, unter der sich außerdem noch eine kleine Petrischale mit der Natriumbisulfatlösung und eine weitere Schale mit aqua dest. befinden (s. Versuchsanordnung Nr. 20). Unter eine andere Glocke gibt man außer einem Petrischälchen mit Wasser die beiden anderen mit Kresse beschickten Petrischalen. Die Kontroll- und die Begasungsglocke werden nebeneinander an einem warmen Ort aufgestellt.

*Auswertung:* Nach 36–48 Stunden wird der Versuch abgebrochen: die begasten Kressesamen sind in ihrer Entwicklung hinter den unbegasten Kontrollen zurückgeblieben und haben im Gegensatz zu letzteren keine Wurzelhaare gebildet.

**Versuch Nr. 20: Aufbau einer Begasungsanlage für definierte, niedrige SO<sub>2</sub>-Spannungen (Glockenmethode nach HÄRTEL)**

*Prinzip der Methode:* Über einer NaHSO<sub>3</sub>-Lösung stellt sich in einem abgeschlossenen Raum ein bestimmter SO<sub>2</sub>-Partialdruck ein, der von der Konzentration der Lösung und der herrschenden Temperatur abhängig ist. Befindet sich in dem Versuchsraum reines Wasser, so vermag dieses so lange SO<sub>2</sub> zu absorbieren, bis der SO<sub>2</sub>-Dampfdruck der Lösung mit dem SO<sub>2</sub>-Partialdruck der Luft im Gleichgewicht steht. Die SO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft in der Glocke und die HSO<sub>3</sub>-Konzentration im Wasser werden gleichermaßen durch die Konzentration der im Versuchsraum befindlichen NaHSO<sub>3</sub>-Lösung sowie durch die Temperatur bestimmt.

*Untersuchungsmaterial:* Kleinere Sprosse oder Blätter.

*Geräte und Reagenzien:* Glassturz (z.B. Glasglocke, Aquarium, großes Weckglas) oder Exsiccator, flache Schale oder Teller mit ebenem Boden, in der Größe zur Glocke (Aquarium, Weckglas) passend, Petrischalen, Dichtungsmasse (z.B. Plastilin, Terostat); NaHSO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (3%ig), destilliertes Wasser.

*Durchführung:* In eine flache Schale mit ebenem Boden stellt man zwei Glasschälchen, von denen eines mit der NaHSO<sub>3</sub>-Lösung, das andere mit destilliertem Wasser beschickt wird. Über die Schälchen stülpt man einen Glassturz, der mit einer Dichtungsmasse am Boden der Schale gut abge-

dichtet wird. Diese Begasungsanlage sollte möglichst unter Temperaturkonstanz gehalten werden. Innerhalb weniger Minuten stellt sich eine der NaHSO<sub>3</sub>-Lösung und der Temperatur entsprechende SO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft in dem Begasungsraum ein. Man kann nach Abschluß des Versuches das im Schälchen befindliche Wasser zur Bestimmung der SO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft benutzen. Die in dem „Wasserschälchen“ befindliche schweflige Säure wird sofort nach Öffnen der Glocke durch Zusatz von 3%igen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zu Schwefelsäure oxydiert. Das Sulfat läßt sich dann nach Versuch Nr. 16 bestimmen. Für viele Versuche wird man sich aber mit folgenden Näherungswerten begnügen können:

Bei einer Raumtemperatur von 20° C stellt sich über einer 0,01 % NaHSO<sub>3</sub>-Lösung eine SO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft von 1,2 ppm ein. Die Berechnung ist nach folgender Formel möglich:

$$\log C_1 = 1,28 \cdot \log C_2 + 0,019 (t - 20) + 1$$

$C_1$  = SO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft in mg/l  
 $C_2$  = SO<sub>2</sub>-Gehalt des mit der Luft im Gleichgewicht stehenden Wassers in g/l  
 $t$  = Raumtemperatur in °C

Der MIK-Wert (s. S. 15) für die SO<sub>2</sub>-Belastung der Luft ist mit 0,5 ppm in Deutschland angesetzt.

Unter der Begasungsglocke können Sprosse oder Blätter der Einwirkung von SO<sub>2</sub> ausgesetzt werden.

*Auswertung:* Je nach Konzentration des Schadgases und der Einwirkungszeit werden sich Schäden makroskopisch an den Blättern oder nur mikroskopisch (beginnend mit Zerstörungen im Bereich der Spaltöffnungen) nachweisen lassen. Bei Monokotylen treten nekrotische Streifen auf den Blättern besonders an den Blattspitzen auf. Bei Koniferen machen sich Schäden durch eine langsam von der Nadelspitze zur Basis fortschreitende Bräunung bemerkbar, bei Dikotylen werden sie häufig zuerst in den Interkostalfeldern sichtbar.

*Literatur:* HÄRTEL, O. u. S. MIKLAU: Eine Methode zur Herstellung definierter SO<sub>2</sub>-Spannungen. Z. Pflanzenkrankheiten u. Pflanzenschutz 78, 538–543 (1971).

Bezugsquelle für Terostat: Odenwald-Chemie GmbH, 6901 Schönau über Heidelberg.

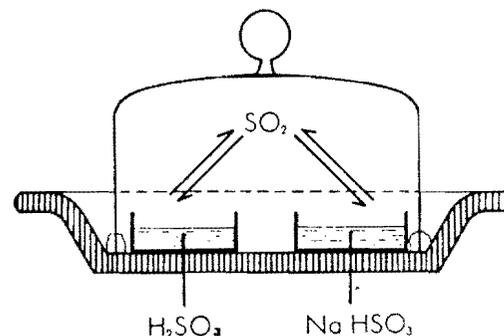


Abb. 8. Glockenmethode zur SO<sub>2</sub>-Begasung

Hinweise auf weitere Versuche aus L. Steubing, Ch. Kunze,  
Pflanzenökologische Experimente zur Umweltverschmutzung:

- V16 (S. 34): Bestimmung von Sulfat im Regenwasser  
Ausfällung von Sulfat mit  $\text{BaCl}_2$  in methanolischer Lösung und Bestimmung der Trübung mit einem Photometer.
- V17 (S. 36): Bestimmung der relativen  $\text{SO}_2$ -Konzentration in Städten (Wattebausch-Methode)  
Mit  $\text{H}_2\text{O}_2$  befeuchtete Watte wird in Weckgläsern 100 Stunden der Luft ausgesetzt. Das anschließend ausgefällte  $\text{BaSO}_4$  wird gravimetrisch oder photometrisch bestimmt.
- V18 (S. 38): Mycel-Wachstum von Aspergillus in Abhängigkeit vom  $\text{SO}_2$ -Gehalt der Außenluft  
Schwarzschimmel wird verschiedenen Wachstumsbedingungen unterworfen und z.T. mit belasteter Luft begast.
- V19 (S. 40): Nachweis einer Immissionsbelastung durch  $\text{SO}_2$  an Koniferen mit dem Trübungstest nach Härtel  
Koniferennadeln werden gesammelt, gereinigt und getrocknet. Durch Erhitzen in Wasser wird eine Suspension erzeugt und deren Trübung kolorimetrisch gemessen.
- V21, V22, V23 (S. 44 ff.): Schädigung von Pflanzenmaterial durch  $\text{SO}_2$ -Begasung (Chlorophyll-Zerstörung, Beeinträchtigung der Atmung und der Katalyse-Aktivität)
- V29, V30, V31 (S. 57 ff.): Wirkungen von  $\text{SO}_2$  auf Saatgut und Samen

Modellrechnung zum Einfluß des pH-Wertes auf die Aluminium-

Löslichkeit:

$$c_{\text{Al}^{3+}} \cdot \left(c_{\text{OH}^-}\right)^3 = 1,9 \cdot 10^{-33} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^4$$

$$c_{\text{H}^+} \cdot c_{\text{OH}^-} = 10^{-14} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^2$$

$$c_{\text{OH}^-} = \frac{10^{-14} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^2}{c_{\text{H}^+}}$$

$$c_{\text{Al}^{3+}} \cdot \left(\frac{10^{-14} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^2}{c_{\text{H}^+}}\right)^3 = 1,9 \cdot 10^{-33} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^4$$

$$c_{\text{Al}^{3+}} = \left(c_{\text{H}^+}\right)^3 \cdot 1,9 \cdot 10^{(-33+3 \cdot 14)} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^{-2}$$

$$c_{\text{Al}^{3+}} = \left(c_{\text{H}^+}\right)^3 \cdot 1,9 \cdot 10^9 \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^{-2}$$

$$\downarrow$$

$$c_{\text{Al}^{3+}} \sim \left(c_{\text{H}^+}\right)^3$$

pH	$c_{\text{Al}^{3+}}$
7	$1,9 \cdot 10^{-12}$
6	$1,9 \cdot 10^{-9}$
5	$1,9 \cdot 10^{-6}$
4	$1,9 \cdot 10^{-3}$

Die Modellrechnung gilt nur für reines  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ! In Böden liegt  $\text{Al}^{3+}$  in der Regel zusammen mit Silikaten (in Tonen etc.) oxidisch vor. Von Hydrolyse-Effekten wurde abgesehen.

Bei Bodenkalkung wird  $\text{CaO}$  ausgestreut.

$$\text{a) } c_{\text{Ca}^{2+}} \cdot \left(c_{\text{OH}^-}\right)^2 = 1,6 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right)^3$$

b) Bei  $20^\circ\text{C}$  sind  $0,278 \text{ g Ca}(\text{OH})_2$  im Liter Wasser gelöst.

# M12 - Glossar

## Aerosol

Feines Gemisch aus gasförmigen und festen (z. B. Staub) oder flüssigen (z. B. Spray) Schwebstoffen in der Luft. Sofern die Schwebstoffpartikel wie z. B. bei Sprays sehr klein sind, können sie u. U. in die Lunge gelangen und dort abgelagert werden. Hiervon kann eine Gesundheitsgefährdung ausgehen.  
**Fluorchlorkohlenwasserstoffe, Belästigungswirkung**

**Atmosphäre** - die an der Rotation teilnehmende Luft-hülle der Erde, ein verhältnismäßig dünnes Gemisch von Gasen, das im Schwerefeld der Erde festgehalten wird. Die Dichte der Atmosphäre nimmt nach oben rasch ab.

**Belästigungen** - im Sinne des Immissionsschutzes (§ 25 Abs. 3 Gewerbeordnung) und des Bürgerlichen Gesetzbuches (§ 906 sowie § 907) sind Beeinträchtigungen des körperlichen Wohlbefindens.

**Belastung** - hier: Beanspruchung des → *Naturhaus-halts* durch Verunreinigung der Luft, der Gewässer, des Bodens und der Pflanzen mit artfremden Stoffen, die bei einer Aufnahme durch Tiere und Menschen auch diese belasten können. So werden z. B. die Luft durch die Abgase des Hausbrands mit Schwefeldioxid, die Gewässer durch → *Abwärme* thermisch und durch → *Abwasser* chemisch belastet; auch → *Lärm*.

## Belastungsgebiete

Gebiete, in denen Luftverunreinigungen auftreten oder zu erwarten sind, die durch Häufigkeit und Dauer, durch hohe Konzentrationen oder die Gefahr von Kombinationswirkungen schädliche Umwelteinwirkungen in besonderem Maße hervorrufen können (insbesondere, wenn die geltenden Immissionswerte der TA-Luft überschritten werden). Ein B. wird aufgrund des Bundes-Immissionsschutzgesetzes durch Rechtsverordnung der zuständigen Landesregierung festgesetzt, die in diesen Gebieten eine besonders intensive Überwachung der Luftverunreinigungen durchführt. Für B. werden Emissionskataster und Luftreinhaltepläne aufgestellt. In der Bundesrepublik Deutschland sind bis heute folgende B. festgesetzt: Berlin; Nordrhein-Westfalen: Rheinschiene Süd und Mitte, Ruhrgebiet West-Mitte-Ost; Rheinland-Pfalz: Ludwigshafen-Frankenthal, Mainz-Bodenheim; Hessen: Untermain, Rhein-Main, Wetzlar, Kassel; Saarland: Dillingen, Völklingen, Saarbrücken, Neunkirchen; Bayern: Aßchaffenburg, Augsburg, Burghausen, Erlangen-Fürth-Nürnberg, Ingolstadt-Neustadt-Kelheim, München, Regensburg, Würzburg. Da die verschiedenen Bundesländer B. nach unterschiedlichen Gesichtspunkten festsetzen, kann z. B. von der Anzahl nicht auf die Umweltsituation unmittelbar geschlossen werden.

## Bioindikatoren

Organismen (Bakterien, Pflanzen, Tiere), die sich besonders zum Nachweis von Schadstoffen und deren Wirkungen in der Umwelt eignen. Sie unterteilen sich in Akkumulationsindikatoren, die Schadstoffe besonders gut anreichern und somit besser erfassbar machen (z. B. in Gräsern angereichertes Blei) und in Wirkungsindikatoren, die auf Schadstoffe besonders empfindlich reagieren und an denen deshalb Schadwirkungen besser analysiert werden können (z. B. Flechten oder Tabakpflanzen, die auf Schwefeldioxid oder auf Oxidantien besonders gut ansprechen).

## Bundes-Immissionsschutzgesetz

Das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge vom 15. 3. 1974 (BGBl. I S. 721, 1193) bildet die Grundlage für ein umfassendes bundeseinheitliches Recht der Luftreinhaltung und Lärmbekämpfung. Das Gesetz enthält u. a. Bestimmungen über die Errichtung und den Betrieb umweltgefährdender Anlagen, die Beschaffenheit und den Betrieb umweltgefährdender Fahrzeuge, die Aufstellung von Emissionskatastern und Luftreinhalteplänen für Belastungsgebiete, die Bestellung eines Immissionsschutzbeauftragten für genehmigungsbedürftige Anlagen, die Beschaffenheit von Brenn- und Treibstoffen, den Schutz bestimmter Gebiete und Vorkerungen bei Smogsituationen. Das Gesetz schafft die Grundlage für weitere Rechtsverordnungen und allgemeine Verwaltungsvorschriften (z. B. TA-Luft, Chemischreinigungsanlagenverordnung, Feuerungsanlagenverordnung, Schwefelgehaltsverordnung).

## Emission

Bezeichnet die von einer (festen oder beweglichen) Anlage an die Umwelt abgegebenen Luftverunreinigungen (Gase, Stäube), Geräusche, Strahlen, Wärme (z. B. Abwärme von Kühltürmen), Erschütterungen und ähnliche Erscheinungen.

## Emissionskataster

Datenzusammenstellung zur räumlichen Beschreibung des Schadstoffausstoßes von Emissionsquellen im regionalen oder überregionalen Bereich (z. B. Hausbrand-Emissions-Kataster).

**Emissionsmessungen** - gezielte Erfassung der → *Emissionen* eines Betriebes als anlagebezogene Messung. Meist als gesetzliche Messung nach § 25 Abs. 2 Gewerbeordnung vom → *Staatlichen Gewerbeaufsichtsamt* angeordnet.

**Emitenten** - Verursacher von → *Emissionen*

## Feuerungsanlagenverordnung

Die am 20. 8. 1974 erlassene „Verordnung über Feuerungsanlagen“ (BGBl. I S. 2121) schreibt eine regelmäßige Kontrolle (und damit bessere Wartung) von Feuerungsanlagen (z. B. Ölheizung) mit dem Ziel vor, schädliche Emissionen zu begrenzen und durch optimalen Betrieb der Anlage den Brennstoffbedarf so gering wie möglich zu halten.

**fossile Brennstoffe** - im Laufe der Erdgeschichte unter Luftabschluß und durch Druck darüberliegender Schichten aus Pflanzen und Tieren entstandene Braunkohle, Steinkohle, Erdöl, Torf und Erdgas.

**Hausbrand-Emissionen** - hängen von der Wahl des Brennstoffes ab:

Kohle (Steinkohle, Brikett)	gibt Ruß, viel Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )
Koks	gibt weniger Ruß, weniger SO <sub>2</sub>
Öl	gibt Ruß, überliechende Gase, bei Heizöl (EL) relativ wenig SO <sub>2</sub> .

Nimmt man die Brennstoffmenge, die eine Wärmeabgabe von 10 000 Kilokalorien bewirkt, als Vergleichsgrundlage, dann beträgt die Emission von SO<sub>2</sub> annähernd bei

Stadtgas	0,3 Gramm
Heizöl (EL)	5,0 Gramm
Steinkohle	14,0 Gramm.

## Heizung

Mit fossilen Brennstoffen (u. a. Steinkohle, Braunkohle, Erdöl) betriebene Haushaltsheizungen haben einen erheblichen Anteil an der Luftverschmutzung. Im Jahre 1975 betrug der Anteil der H. Emissionen an den Gesamtemissionen bei Staub 12,9%, bei Schwefeldioxid 13%, bei Stickoxiden 6,3% und bei Kohlenwasserstoffen 7,4%. Die geringsten Umweltbelastungen gehen von H. aus, die mit Erd- oder Stadtgas betrieben werden. Die Schadstoffmengen bei H. können nur dann auf einem Mindestmaß gehalten werden, sofern die H. Anlagen regelmäßig überprüft und gewartet werden.

**Immissionen** - Einleitung luftfremder Stoffe, von Geräuschen, Erschütterungen, Licht, Wärme und Strahlen. Immissionen wirken auf Menschen sowie Tiere, Pflanzen oder tote Materie bei Überschreiten bestimmter Grenzwerte schädigend ein. → *Immissionsbelastung*.

**Immissionsbelastung** - Beeinträchtigung durch Immissionen, z. B. Anreicherung der Luft mit Schadstoffen. Solche Luftverunreinigungen werden hauptsächlich am Leitgas → *Schwefeldioxid* (SO<sub>2</sub>) gemessen. In der → *„Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft -“* zu § 16 → *Gewerbeordnung* sind folgende Grenzwerte festgelegt: arithmetischer Jahresmittelwert: 0,40 mg SO<sub>2</sub> pro Kubikmeter Luft. Höchstwert innerhalb zwei Stunden: 0,75 mg SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> Luft. Bei diesen Werten ist nach der → *VDI-Richtlinie 2058* auch der Schutz empfindlicher Pflanzen noch gewährleistet. Der international bestimmte → *MAK-Wert*, das ist die zulässige maximale Konzentration von SO<sub>2</sub> am Arbeitsplatz, beträgt 13 mg/m<sup>3</sup> Luft.

Quellen: Was Sie schon immer über Umweltchemikalien wissen wollten  
Umwelt-ABC 1972 (Wiesbaden)

**Inversion** · heißt wörtlich Umkehrung. Dieser Ausdruck stammt aus der → *Meteorologie* und hat Eingang in die Sprache des → *Immissions-* und *Umweltschutzes* gefunden. Man bezeichnet hiermit die in der → *Atmosphäre* beobachtete Erscheinung, daß die Temperatur nicht wie gewöhnlich mit der Höhe abnimmt, sondern in mehr oder minder dicker Schicht zunimmt.

Inversionen verhindern den Austausch zwischen bodennahen und höheren Luftschichten und führen deshalb oft zur Anreicherung der (Stadt-)Luft mit schädlichen Gasen und → *Stäuben*. → *Smog*

**Immissionsmessung** · Erfassung der → *Immissionen* mit physikalisch-chemischen Verfahren und ihre statistisch-mathematische Auswertung.

**Immissionschutz** · Schutz vor schädlichen → *Immissionen*.

**Kombinationswirkungen**

Wirkungen, die von gleichzeitigen oder aufeinanderfolgenden **Einwirkungen mehrerer Umweltfaktoren auf einen Organismus** ausgehen. Es können additive Wirkungen (die Einzelwirkungen summieren sich), synergistische Wirkungen (die Einzelwirkungen verstärken sich in unerwartetem Umfang wie z. B. bei Einnahme von Alkohol mit bestimmten Arzneimitteln) und antagonistische Wirkungen (die Einzelwirkungen heben sich gegenseitig auf oder schwächen die Gesamtwirkung) unterschieden werden.

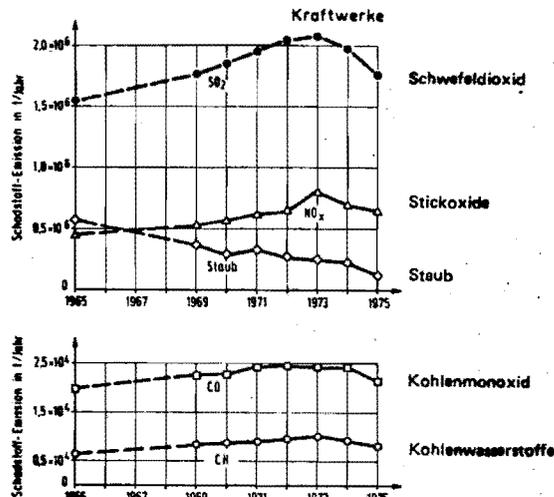
**Kompetenzen im Umweltschutz** · Durch Nichtaus-schöpfung seiner Gesetzgebungs-Kompetenzen durch den Bund waren die Länder gezwungen, eigene **Gesetze** zu erlassen. Aus diesem Grund wurde bisher eine gleichmäßige Durchführung von Maßnahmen zum Schutze der Umwelt erschwert. → **Gesetzgebungszuständigkeit**.

**Kraftfahrzeug**

(KFZ) Fahrzeug mit Verbrennungs- (z. B.: **Otto-Motor**, **Dieselmotor**, **Schieb-lademotor**) oder **Elektromotor**. In der Bundesrepublik Deutschland gab es 1975 ca. 18 Mio K., diese gaben ca. 7 Mio t Kohlendioxid, 0,55 Mio t Stickoxide, 0,76 Mio t **Kohlenwasserstoffe**, 80 000 t Schwefeldioxid, 18 500 t Ruß und 7600 t Blei an die Umwelt ab. (Ein K. erzeugt pro Betriebsstunde ca. 1000 Liter Abgase.) Die Emissionen aus K. werden aufgrund von Vorschriften gem. der Straßenverkehrs-zulassungs-Ordnung begrenzt. Neufahrzeuge, die ab 1. Okt. 1979 erstmalig in den Verkehr kommen, dürfen je nach Fahrzeuggewicht maximal zwischen 15,9 und 34,9 Gramm **Kohlenmonoxid**, 1,5 bis 2,3 Gramm **Kohlenwasserstoffe** und 2,0 bis 3,3 Gramm **Stickoxide** pro Fahrkilometer abgeben. Das **Benzin-Blei-Gesetz** begrenzt den Bleigehalt des Benzins (seit 1. 1. 1976 max. 0,15 g/l), die 3. Bundesimmissionschutzverordnung den Schwefelgehalt von **Dieselmotoren** (seit 1. 1. 1979 max. 0,3 %).

**Kraftwerke**

Mit **fossilen Brennstoffen** (**Steinkohle**, **Braunkohle**, **Heizöl**) betriebene K. (und **Fernheizwerke**) gehören zu den bedeutendsten Luftverschmutzern in der Bundesrepublik Deutschland. Nahezu die Hälfte aller **Schwefeldioxid-Emissionen** sowie nahezu ein Drittel aller **Stickoxid-** und **Staub-Emissionen** stammt aus **Kraft-** und **Fernheizwerken**. Ein einziges steinkohlebefeuertes Großkraftwerk (Leistung 1400 Megawatt) gibt pro Betriebsstunde bis zu 1400 t Kohlendioxid, 0,3 t **Kohlenmonoxid**, 13 t **Schwefeldioxid**, 0,6 t **Schwefeltrioxid**, 3,5 t **Stickoxide**, 0,05 t **Kohlenwasserstoffe** und 1,5 t **Staub** ab. Durch Einsatz von **Entstaubungsvorrichtungen** (vor allem **Elektroentstauber**) konnte die Staubemission in den vergangenen 15 Jahren bei steigender Kraftwerkskapazität auf etwa ein Drittel reduziert werden. Künftig wird es möglich sein, durch **Rauchgasentschwefelung** und **Zweistufenverbrennung** die Emissionen an **Schwefeldioxid**, **Staub** und **Stickoxiden** noch weiter zu reduzieren.



Rückgang der Schadstoffmengen aus Kraftwerken im jährlichen Vergleich (Quelle: Umweltbundesamt)

**Luft** · das die Erde umhüllende Gasgemisch (→ *Atmosphäre*) hat in den untersten 12 Kilometern eine nahezu konstante Zusammensetzung. Die wesentlichen Bestandteile sind:

Stickstoff N <sub>2</sub>	78,09 %
Sauerstoff O <sub>2</sub>	20,95 %
Argon Ar	0,93 %
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	0,03 %

Dazu kommen geringe Mengen an **Edelgasen** (**Neon**, **Krypton**, **Helium** und **Xenon**) sowie **Wasserstoff**, **Ozon**, **Ammoniak** und **Wasserstoffsuperoxid**. Außerdem enthält die Luft – besonders in ihren untersten Schichten – zeitlich und örtlich stark wechselnde Anteile an **Wasserdampf** sowie andere **Beimengungen** (**Staub**, **Industrieabgase** u. a.).

Für die **relative Beständigkeit** der Luftzusammensetzung sorgt der **biologische Kreislauf**, in dem **Sauerstoff**, **Kohlendioxid** und **Stickstoff** zwar umgesetzt, aber nicht verbraucht werden, sondern im Zuge der **menschlichen** und **tierischen** **Abbau-** und **Atmungsprozesse** sowie der **pflanzlichen** → *Assimilation* der Luft und dem **biologischen Kreislauf** wieder zur **Verfügung** gestellt werden. Der größte **Sauerstoffproduzent** ist das → *Plankton* der **Weltmeere**. Deshalb kann eine **Verschmutzung** der **Ozeane** durch **Öl** und **industrielle Abfälle**, wodurch das **Plankton** vernichtet wird, **schwerwiegende Konsequenzen** für die **Menschheit** haben. Die genaueren **quantitativen Zusammenhänge** müssen noch **erforscht** werden.

**luftfremde Stoffe** · vor allem **Flugasche**, **andere** → *Stäube*, **Ruß**, **zahlreiche Gase** und viele **Geruchsstoffe**. Die **Wahrnehmbarkeit** solcher **Fremdstoffe** ist kein Maßstab für eine etwaige **Gefährlichkeit**. **Gerade** **geruchlose Gase** wie → *Kohlenmonoxid* (**CO**) oder **geruchschwache Gase** wie → *Schwefeldioxid* (**SO<sub>2</sub>**) und → *Fluorverbindungen* sind besonders **schädlich** und **gefährlich**. Andere Gase wiederum, so **Schwefelkohlenstoff** (**CS<sub>2</sub>**) und → *Schwefelwasserstoff* (**H<sub>2</sub>S**), die sehr **giftig** sind, machen sich bereits in **geringsten Konzentrationen** weit unter der **Gefährdungsschwelle** durch ihren **überaus unangenehmen Geruch** bemerkbar. **Grob vereinfacht** ist bei den **häufigsten Schadstoffen** mit folgenden **Wirkungen** zu rechnen:

- Stäube** = meist **schädlich**, wenn **lungengängig** (0,5–5 µ)
- Blei-  
verbindungen** = **blut-** und **gefäßschädigend**, dadurch auch **nervenschädigend** (noch nicht exakt belegt)
- brauner  
Rauch** = beide fördern **Umwandlung** von **SO<sub>2</sub>**
- Ruß** = **krebserregend** in **SO<sub>2</sub>** = **Schwefelsäure** (**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**)
- CO** = **giftig**, weil es den **Blutfarbstoff** für den **Sauerstofftransport** **unbrauchbar** macht
- SO<sub>2</sub>** = **schädigt** die **Lungenfunktionen**, **Pflanzenschäden**
- Fluor-  
verbindungen** = **Lungenschäden**, **Pflanzenschäden** bei **geringsten Mengen**
- Kohlen-  
wasserstoffe** = z. T. **Zellgifte**, **Krebsbildner**, **reizen Atemwege**

### Luftverschmutzung

Bezeichnet die Verunreinigung des natürlichen Luftgemisches (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Edelgase) mit gasförmigen und festen Stoffen. Hierzu gehören u. a. Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Fluor- und Chlorverbindungen sowie Staub und Schwebstoffe (z. B.: Ruß,

**Luftverunreinigung** - das natürliche Gasgemisch der → Luft reichert der Mensch mit festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen an. Die → Luft wird etwa zu gleichen Teilen verunreinigt durch die → Emissionen der Industrie, des Hausbrands und der Kraftfahrzeuge. Von der Industrie werden die meisten Schadstoffe durch hohe Schornsteine ausgestoßen, so daß sie vielfach in kaum noch gefährdenden Verdünnungen (Ausnahme bei → Inversion) auf den Boden auftreffen. Im Gegensatz dazu ist der Mensch den → Emissionen aus Hausbrand und von Kraftfahrzeugen direkt ausgesetzt.

### MAK-Werte-Liste

Eine von der „Kommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Bonn) erarbeitete Liste mit Angaben der jeweils zulässigen Maximalen Arbeitsplatz-Konzentrationen. Die M.W.L. gibt Grenzwerte für gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe an, um Gesundheitsschäden am Arbeitsplatz zu vermeiden. Neben der Stoffliste enthält die M.W.L. im Abschnitt III eine Klassifizierung von Arbeitsstoffen nach bewiesener oder vermuteter Kanzerogenität in drei Klassen: III A 1 (Stoff verursacht nachweislich beim Menschen Krebs), III A 2 (Stoff verursacht nachweislich im Tierversuch Krebs) und III B (krebserzeugende Wirkungen werden vermutet).

### Maßeinheiten

Umweltbelastungen werden u. a. in folgenden M. angegeben:

MENGEN	kg = 1000 g	(Kilogramm)
	g = 1 g	(Gramm)
	mg = 0,001 g	(Milligramm)
	µg = 0,000001 g	(Mikrogramm)
	ng = 0,000000001 g	(Nanogramm)
ZEIT	d = 86 400 s	(Tag)
	h = 3 600 s	(Stunde)
	s = 1 s	(Sekunde)
	KONZEN- TRATION	ppm = 1/1 000 000 (1 mg/kg oder 1 mg/Liter)
	ppb = 1/1 000 000 000 (1 µg/kg oder 1 µg/Liter)	
	ppt = 1/1 000 000 000 000 (1 ng/kg oder 1 ng/Liter)	

**ppb** - parts per (amerikanischer) billion. Die amerikanische Billion entspricht im deutschen Sprachgebrauch der Milliarde. 1 ppb ist also ein Milliardstel des Volumens oder Gewichtes oder auch ein Milligramm einer Verunreinigung in einer Tonne Substanz.

**ppm** - parts per million, also ein Millionstel des Volumens oder ein Milligramm pro Kilogramm oder Liter, das ist z. B. ein Gramm einer Verunreinigung in einer Tonne Substanz.

### Materialschäden

Verunreinigungen der Luft wie z. B. Staub, Schwefeldioxid, Stickoxide und andere säurebildende Gase sowie Photooxidantien können bei Materialien die natürlichen Verwitterungs- und Alterungsvorgänge beschleunigen oder diese in anderer Weise angreifen und so erhebliche M. verursachen. U. a. wird durch Schadstoffeinwirkung die Metallkorrosion und die Verwitterung von Baustoffen beschleunigt, bei Textilien kann sich die Zugfestigkeit (und damit die Gebrauchsdauer) verringern, gefärbte Textilien können ausbleichen oder sich verfärben. In staubbelasteten Gebieten müssen Textilien außerdem öfters gewaschen werden. Besorgniserregend sind die Schäden an Kunstgütern und Denkmälern, besonders bei Bronzedenkmälern, Kalksandsteinbauten und mittelalterlichen Glasfenstern (z. B. Stein- und Glaserfall am Kölner Dom).

**Meß- und Prüfstelle** - für die Gewerbeaufsichtsverwaltung des Landes Hessen in Kassel. Zuständig u. a. für → Immissionsmessungen und bestimmte → Emissionsmessungen, Strahlenschutzmessungen und andere Überwachungsaufgaben im Umweltschutz.

### MIK-Werte

Von der „Kommission zur Reinhaltung der Luft“ (Verein Deutscher Ingenieure) erarbeitete Maximale Immissionskonzentrationen, unterhalb derer Menschen, Tiere, Pflanzen und schutzwürdige Sachgüter vor Schädigung und erheblicher Belästigung geschützt sein sollen (VDI-Richtlinie 2310).

### Photochemischer Smog

Stickoxide können sich mit gleichfalls in der Luft befindlichen Kohlenwasserstoffen und Sauerstoff unter Einfluß intensiver Sonnenstrahlung (d. h. vor allem im Sommer) zu sog. Photooxidantien umwandeln. Zu diesen gehört auch das Ozon, das zusätzlich durch atmosphärische Transportvorgänge von der Stratosphäre in erdnahe Luftschichten gelangt und die Ozonkonzentration erhöhen kann. Übersteigt die Ozonkonzentration einen Wert von etwa 300 Mikrogramm/m<sup>3</sup> Luft, kommt es zur Sichttrübung, zum sog. „Photochemischen Smog“ („Los-Angeles-Smog“).

### Smog

### Photooxidantien

P. entstehen durch physikalische und chemische Prozesse in den unteren Luftschichten unter Einwirkung starker Sonnenstrahlung aus Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden. Zu den P. gehören u. a. Ozon, Peroxyacetylnitrat, Aldehyde, Salpetersäure und organische Säuren. P. sind stärker umweltbelastend als ihre Ausgangsstoffe. Beim Menschen reizen P. Augen und Schleimhäute, beeinträchtigen Atemwege und das Lungengewebe. An landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturen können z. T. schwere Schäden entstehen (vor allem in USA und Holland beobachtet). P. bleichen bestimmte Textilfarbstoffe aus und machen Nylon-, Acryl- und Baumwollfasern brüchig (Materialschäden).

### pH-Wert

Der pH-Wert dient zur Kennzeichnung des basischen (Lauge) oder sauren (Säure) Verhaltens einer wässrigen Lösung. Ein pH-Wert von 7 zeigt eine neutrale Lösung an. Je kleiner der pH-Wert ist, um so saurer ist die Lösung. Die gängige pH-Wert-Skala reicht von 0 bis 14.

### Rauchgasentschwefelung

Verfahren zur Reduzierung des Schwefeldioxidanteils im Rauchgas. In der Bundesrepublik Deutschland wurden im Auftrage des Bundesministers des Innern drei Verfahren zur R. entwickelt (Bischoff-Verfahren, Saarberg-Hölter-Verfahren, Bergbau Forschung-Verfahren), die sich allesamt für einen großtechnischen Einsatz eignen.

**rauchresistente Gehölze** - Bäume und Sträucher, die auch dort leben können, wo sie ständig oder über längere Zeiträume hinweg starken Raucheinwirkungen ausgesetzt sind, z. B. bei SO<sub>2</sub>, Eiche, Ahorn, Buche und bei Fluorverbindungen Eiche, Thuja, Pappel.

### Saurer Regen

Schwefeldioxid kann in der Atmosphäre zu Schwefelsäure und sauren Sulfaten oxidiert werden und hierdurch saure Niederschläge hervorrufen, die insbesondere in den Skandinavischen Ländern zu erheblichen Umweltschäden führen (der überwiegende Teil der Schwefeldioxidimmissionen stammt dabei aus anderen europäischen Industrieländern!). S.R. kann große Mengen Kalk im Boden zersetzen und die Bodenerosion begünstigen. Gewässer können durch S.R. in ihrem pH-Wert verändert werden und dadurch „versauern“. Die Folge ist ein Absterben der Mikroorganismen, in schweren Fällen sogar der Fischbrut. Während der Wintermonate, der Zeit der höchsten Schwefeldioxidkonzentrationen, können sich die sauren Schwefelverbindungen in der Schneedecke ansammeln und mit der Schneeschmelze zu einem plötzlichen, sehr starken Versauern der Gewässer führen.

### Schädigung von Pflanzen

Pflanzen reagieren gegenüber Umweltgiften teilweise wesentlich empfindlicher als der Mensch. Dieses gilt insbesondere für Einwirkungen von Schwefeldioxid, Fluorwasserstoff, Chlor, Salze und bestimmte Kohlenwasserstoffe. Gegen Kohlenmonoxid sind Pflanzen hingegen unempfindlich. In der Nähe verkehrsreicher Straßen können z. B. durch Kraftfahrzeugabgase und Streusalze Schäden an der Vegetation entstehen, die sich z. B. im Vergilben der Blätter, im Kümmerwuchs oder im Absterben von Pflanzenteilen oder der ganzen Pflanze zeigen. Unter dem Begriff Schädigung ist auch die Schadstoffanreicherung zu fassen, die Nutzpflanzen für die Ernährung oder Verfütterung (Gressenicher Kuhkrankheit) ungeeignet werden läßt.

### Schädigung von Tieren

Tiere werden ebenso wie Menschen durch Umweltgifte geschädigt. Von Schädigungen kann nur bedingt auf mögliche Gefährdungen des Menschen rückgeschlossen werden. Landwirtschaftliche Nutztiere sind gegenüber Fluor und Blei besonders empfindlich.

### Schwefeldioxid

Farbloses, stechend riechendes Gas, das überwiegend beim Verbrennen schwefelhaltiger Energieträger (Kohle, Erdöl) und in geringem Umfang bei industriellen Prozessen (u. a. Eisen- und Stahlerzeugung, Zellstoffherstellung, Schwefelsäure- und Düngemittelproduktion) entsteht. S. wirkt insbesondere in Kombination mit Staub auf die Atemwege, reizt Haut und Schleimhäute, führt in höheren Konzentrationen zu Atembeschwerden und Brustschmerzen und in hohen Konzentrationen zum Tod durch Ersticken. Gefährdet sind insbesondere Asthmatiker. S. verursacht bei Pflanzen Absterben von Gewebepartien durch Abbau von Chlorophyll. Insbesondere können Obst- und Forstkulturen geschädigt werden. S. schädigt ebenfalls Gewässer (Saurer Regen) und Sachgüter (Materialschäden).

Immissionswerte sind in der TA-Luft geregelt: IW 1 = 0,140 / IW 2 = 0,40 mg/m<sup>3</sup>.

### Schwefelgehaltverordnung

Die am 23. 1. 1975 erlassene „Verordnung über Schwefelgehalt von leichtem Heizöl und Dieseldieselkraftstoff“ (BGBl I S. 264) schreibt eine stufenweise Verminderung des in diesem Brennstoff enthaltenen Schwefels vor (seit 1. Januar 1979 auf 0,30%). Aufgrund dieser Verordnung wird eine Verminderung der Schwefeldioxidbelastung in Ballungsgebieten um 25–30% erwartet.

### Smog

Aus dem englischen stammende Wortkombination aus „smoke“ (Rauch) und „fog“ (Nebel). S. bezeichnet starke Anreicherungen von Luftverunreinigungen in Ballungsgebieten. S. kann entstehen, sofern die in der Luft enthaltenen Schadstoffe aufgrund austauscharmer (Inversion) Wetterlagen nicht mehr in die höheren Luftschichten entweichen können. Die Konzentration der Schadstoffe kann schnell ein gesundheitsgefährdendes Ausmaß erreichen und zu Beeinträchtigungen der Atmung, zur Reizung der Schleimhäute und zu Kreislaufstörungen führen. Hierdurch können insbesondere alte und kranke Menschen gefährdet werden. An den Folgen der „Londoner Smog-Katastrophe“ (1952) sollen innerhalb von zwei Wochen mehrere tausend Menschen, im Ruhrgebiet Ende 1962 innerhalb von drei Tagen 156 Menschen gestorben sein. Aufgrund des Bundes-Immissionsschutzgesetzes haben die Bundesländer für besonders gefährdete Gebiete Smog-Alarm-Pläne erarbeitet, die bei Smog-Gefahr bestimmte Gegenmaßnahmen (z. B.: Umstellung auf schwefelarmes Heizöl, Verkehrsbeschränkungen) vorsehen.

**Smogalarmplan** · im Gegensatz zum → Smogwarnplan weitergehende Stufe, bei der unter extremen → Immissionsbelastungen kurzfristig zusätzliche Maßnahmen zur Herabsetzung der → Emissionen von den wesentlichen Verursachern der → Luftverunreinigungen in den belasteten Gebieten verlangt werden.

**Smogwarnplan** · in Teilen des Landes Hessen ist das Auftreten hoher Immissionskonzentrationen in den Gebieten mit großen Emissionsquellen, insbesondere bei länger anhaltenden austauscharmen Wetterlagen (→ Inversionswetterlagen), möglich. Solche sogenannten Smogerscheinungen können, wie Erfahrungen gezeigt haben, zu Gesundheitsgefahren führen; besonders sind solche Personen gefährdet, die an Erkrankungen der Atemwege und Atmungsorgane oder an Herz- und Kreislaufkrankungen leiden.

Vor solchen Gefahren soll die Bevölkerung gewarnt werden. Desgleichen soll die Warnung den Krankenanstalten und Notdiensten ermöglichen, entsprechende Vorkehrungen zu treffen.

Ferner wird mit der Smogwarnung an die Bevölkerung, das Gewerbe und die Industrie appelliert, durch verantwortungsbewusstes Verhalten zur Verminderung der Luftverunreinigungen bei den austauscharmen Wetterlagen beizutragen.

Die Warnstufe ist erreicht, wenn

- an einer Meßstation die Schwefeldioxidkonzentration den Halbstundenmittelwert von 1,2 mg SO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> Luft übersteigt sowie eine weiter ansteigende Tendenz erkennen läßt und
- eine Inversionswetterlage vorherrscht, mit deren Andauer noch mindestens 24 Stunden zu rechnen ist.

**Stand der Technik** · spezieller Begriff im → Immissionsschutz. Danach ist der „Stand der Technik“ zu vergleichen mit solchen fortschrittlichen Verfahren und Einrichtungen, die sich bewährt haben. Die → Genehmigungsbehörden haben im Genehmigungsverfahren mindestens solche technischen Auflagen zu machen, die dem Stand der Technik entsprechen.

### Staub

In der Luft verteilte feste Teilchen, die je nach Größe in Grobstäube und Feinstäube unterteilt werden. Gesundheitsschäden können in erster Linie von Feinstäuben (Teilchendurchmesser weniger als fünf Tausendstel Millimeter) ausgehen, die u. U. in den Lungenbläschen abgelagert werden und schädliche Auswirkungen haben können. Feinstäube können durch Adsorption an ihrer Oberfläche Umweltgifte wie z. B. chlorierte Kohlenwasserstoffe in den Organismus tragen. Zu den besonders umweltbelastenden Staubkomponenten gehören u. a. Arsen, Beryllium, Cadmium, Nickel, Blei, Selen, Chrom, Quecksilber, Vanadium und Asbest.

(Immissionswerte für Staubbiederschlag – IW 1 = 0,35 g/m<sup>2</sup> · Tag, IW 2 = 0,65 g/m<sup>2</sup> · Tag – und Schwebstaub – IW 1 = 0,20 / IW 2 = 0,40 mg/m<sup>3</sup> – sind in der TA-Luft geregelt.)

### TA-Luft

In der am 28. 8. 1974 in Kraft getretenen „Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (GMBl S. 416, 525) sind Vorschriften enthalten, die die zuständigen Behörden bei der Betriebsgenehmigung neuer Anlagen zu beachten haben. Die T.A.L. enthält u. a. Emissions-Grenzwerte für mehr als 50 staubförmige und mehr als 120 gasförmige Stoffe, Vorschriften zum Stand der Technik umweltgefährdender Anlagen und Immissionswerte für Chlor, Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Stickoxide (Stickstoffdioxid, Stickstoffmonoxid).

### Toxizität

Giftigkeit eines Stoffes. Die Wirkung der T. kann akut (die Giftwirkung tritt innerhalb kurzer Zeit – Minuten – Stunden – Tagen – ein), subchronisch (Giftwirkung nach Tagen oder Wochen) und chronisch (Giftwirkung nach Monaten, Jahren oder Jahrzehnten) auftreten.

### Umweltgifte

(Umweltschadstoffe) In der Umwelt vorkommende Stoffe, von denen schädliche Wirkungen auf Lebewesen und Sachgüter ausgehen können und denen der einzelne Mensch unfreiwillig ausgesetzt ist. U. können vom Menschen mit der Atmung, über die Haut oder mit Nahrungs- und Genußmitteln (Nahrungskette) aufgenommen werden. Wichtige U. sind Schwermetalle (z. B.: Blei, Cadmium, Quecksilber), anorganische Gase (z. B.: Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Ozon), N-Nitrosoverbindungen und chlorierte Kohlenwasserstoffe (z. B.: DDT, Vinylchlorid). Wichtige Quellen für U. sind industrielle Produktionsstätten, Kraftwerke, Kraftfahrzeuge, Landwirtschaft und Haushaltsheizungen, die U. in gasförmiger, fester oder gelöster (z. B. im Abwasser) Form freisetzen. U. können unmittelbare (akute) oder langfristige Schäden (z. B. durch krebserzeugende, mutagene oder embryo-toxische Stoffe) hervorrufen. U. können allein oder mit anderen Stoffen (Kombinationswirkung) schädigen, ungiftige Stoffe können sich untereinander zu giftigen Stoffen verbinden (z. B.: N-Nitrosoverbindungen). Die Umwandlung von ungiftigen zu giftigen Stoffen (und umgekehrt) kann sich sowohl in der Umwelt (Wasser, Boden, Luft) als auch im Körper von Lebewesen vollziehen. Besonders gefährliche U. zeichnen sich durch gute Aufnahmefähigkeiten im menschlichen Körper (gute Resorbierbarkeit), lange Abbaueiten (lange biologische Halbwertszeiten) und große Stabilität (Persistenz) aus, hierdurch können sie lange in den natürlichen Kreisläufen verweilen und ihre Schädwirkungen entfalten.

### Verursacherprinzip

In den Umweltgesetzen (z. B. Abwasserabgabengesetz, Bundes-Immissionsschutzgesetz) der Bundesrepublik Deutschland enthaltenes Grundprinzip, wonach grundsätzlich derjenige die Kosten einer Umweltbelastung tragen muß, der für ihre Entstehung verantwortlich ist. Dieses gilt auch für die Folgekosten. Als Verursacher gilt neben dem Produzenten auch der Anwender eines Produktes, sofern durch unsachgemäße Anwendung Umweltbelastungen entstehen.

### Vorsorgeprinzip

In den Umweltgesetzen (z. B. Bundes-Immissionsschutzgesetz) der Bundesrepublik Deutschland enthaltenes Grundprinzip, wonach Umweltbelastungen ohne Berücksichtigung evtl. Schädigungen grundsätzlich zu vermeiden oder auf ein nach dem Stand der Technik erreichbares Mindestmaß zu beschränken sind (z. B. „Luft nicht so belastet wie zulässig, sondern so sauber wie möglich“).

## Einschränkung der Schwefeldioxid-Immission bei Kraftwerksaltanlagen

Von Helmut Wolter

Die Verwertung von Abfallgas aus Kraftwerken der Bundesrepublik Deutschland ermöglicht die Herstellung von Abfallgips für die Zementindustrie in einer Menge von ca. 1,2 Millionen t jährlich. Die Produktion steigt künftig infolge erhöhter Anforderung an die Reinhaltung der Luft beim Betrieb neuer Kohlenkraftwerke weiter an. Das im Rauchgas vorhandene Schwefeldioxid wird in Entschwefelungsanlagen unter Zugabe von Kalkstein oder Calciumhydroxid in Gips übergeführt. Ein Kraftwerk der „MW-Klasse 700“ mit jährlich 4000 Betriebsstunden liefert nach Entschwefelung einen Anfall von ca. 40 000 bis 70 000 t – je nach Entschwefelungsgrad – verkäuflichen Kraftwerksgips [1].

Das Altanlagen-Investitionsprogramm des Bundes für die Luftreinhaltung umfaßt 560 Millionen DM bei einer Laufzeit von 6 Jahren (1979 bis 1984). Eine angemessene Eigenbeteiligung der Unternehmer soll bei Vergabe der Mittel vorausgesetzt werden. Die geförderten Demonstrationsobjekte sollen zeigen, wie bestehende Industrieanlagen nachträglich dem neuesten Stand der Luftreinhaltungstechnik angepaßt werden können. Das Umweltbundesamt in Berlin ist mit der Durchführung beauftragt worden.

Eine Sanierung ist häufig besonders dringlich, weil es sich um oft sehr überalterte Betriebsanlagen handelt. Erschwerend kommt hinzu, daß diese Anlagen heute oftmals in unmittelbar benachbarten Wohngebieten angesiedelt sind [2].

### Ökonomische und ökologische Denkweisen

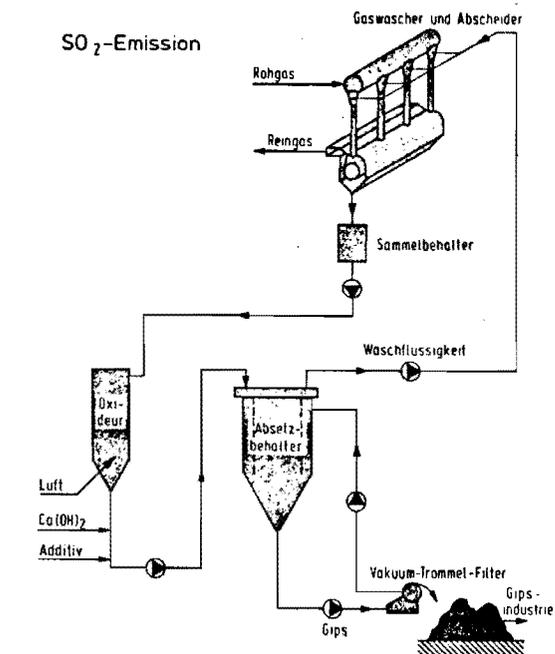
Im November 1979 wurden kritische Äußerungen von Professor *Farthmann* (Arbeits- und Sozialminister in Nordrhein-Westfalen) bekannt: Veraltete Kraftwerke, die erneuerungsbedürftig sind sowie ein Zuviel an Bürokratie! Unternehmen wie die VEBA und die STEAG weigern sich, den Steinkohlenkraftwerken in Vörde, Herne, Westhofen und Scholven zusätzliche Entschwefelungsanlagen einzubauen. Dabei könnten durch Nachrüstungen bei acht Kraftwerksblöcken die Schwefeldioxid-Emission um 80 000 t jährlich vermindert werden. Die Investitionskosten der einzubauenden Entschwefelungsanlagen würden ca. 400 Millionen DM und anschließend die jährlichen Betriebskosten ca. 80 Millionen DM betragen.

Der Bund will 75% der Investitionskosten zur Verfügung stellen. Doch die großen Energieunternehmen lehnen aus betriebswirtschaftlichen Gründen die Sanierung zugunsten der Luftreinhaltung ab. Bald soll eine neue Verordnung für Großfeuerungsanlagen herauskommen, für die eine Entschwefelung für jeden Kraftwerksblock über 500 Megawatt vorgeschrieben wird. Das Umweltbundesamt in Berlin fordert die Bewilligung von Investitionsvorschüssen für Entschwefelungsanlagen. Die Industrieunternehmen weisen auf die komplizierten Antrags- und Genehmigungsverfahren mit erschwerenden Auflagen hin. Beschleunigte Abwicklung wird von der Bundesregierung erwartet.

Das europäische Emissionsregister für Nordrhein-Westfalen und für das Saargebiet macht Angaben über Emissionen von je 500 t stündlich. Die Saarbergwerke AG melden Erfolge bei den Kraftwerken insofern es sich um Schwefeldioxidverwendung zur Gipsherstellung handelt [3, 4].

### Literatur

- [1] Chemie für Labor und Betrieb 1979, Heft 10, S. 438, Verlag Chemie, Weinheim
- [2] Umwelt, Informationen des Bundesministeriums des Innern zur Umweltplanung und zum Umweltschutz Nr. 71 (6. Sept. 79), S. 21
- [3] *Römpps Chemie-Lexikon* Bd. V, S. 3126, 7. Auflage
- [4] Ein großtechnisch erprobtes wirtschaftliches Verfahren zur Entschwefelung von Rauchgas bei Kraftwerken mit verwendbarem Endprodukt Gips wendet die Hoechst-Gruppe UHDE an (FAZ 7. 9. 79)



Rauchgasentschwefelung nach dem Saarberg-Höltler-Verfahren  
(Quelle: Umweltbundesamt)

## 6. Literatur

### Ia) Allgemeine Informationen von staatlichen Stellen (meist kostenlos auf Anfrage erhältlich):

Umweltbundesamt (Hrsg.), Luftverschmutzung durch Schwefeldioxid - Ursachen, Wirkungen, Minderung -, Berlin 1980

Rat der Sachverständigen für Umweltfragen (Hrsg.), Umweltgutachten 1978, Stuttgart/Mainz 1978; (billiger als Bundesdrucksache Nr. 8/1978, Verlag Dr. Hans Heger, Postfach 208021, Herderstraße 56, 5300 Bonn 2)

Umweltbundesamt, Materialien 2/77, Messungen von Luftverunreinigungen - Ergebnisse aus dem Meßstellennetz des UBA

Umweltbundesamt, Materialien zum Immissionsschutzbericht 1977 der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag, Berlin 1977

Umweltbundesamt (Hrsg.), Räumliche Erfassung der Emission ausgewählter luftverunreinigender Stoffe aus Industrie, Haushalt und Verkehr in der Bundesrepublik Deutschland 1960-1980, Bonn/Berlin 1976

Bundesministerium des Inneren (Hrsg.), Überwachung der Luftqualität in der Bundesrepublik Deutschland 1960-1975, Bonn 1976

Umweltbundesamt, Grenzüberschreitender und weiträumiger Transport von Luftverunreinigungen, Statusbericht, Juli 1978

Der Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Luftreinhalteplan Ruhrgebiet West 1978-1982, Düsseldorf 1978

Hessisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Lufthygienischer Monatsbericht, Wiesbaden

Umweltbundesamt (Hrsg.), Medizinische, biologische und ökologische Grundlagen zur Bewertung schädlicher Luftverunreinigungen, Sachverständigenanhörung 20.-24.2.1978, Berlin, August 1978

Der Bundesminister des Inneren (Hrsg.), Umweltbrief 20, Bericht über die Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf das globale Klima, Bonn 1980

Ib) Gesetze und Verordnungen:

Bundes-Immissionsschutzgesetz, Bundesgesetzblatt Teil 1,  
Nr. 27, Bonn 21.3.1974

Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, vom 28.8.1974,  
Gemeinsames Ministerialblatt, S. 426ff.

Verordnungen zur Verhinderung schädlicher Umwelteinwirkungen  
bei austauscharmen Wetterlagen (Smogverord-  
nungen) in:

- Baden-Württemberg vom 3.5.1977 Gesetz- und  
Verordnungsblatt,
- Berlin vom 24.10.1977, GVBL 1978
- Hessen vom 15.10.1976, GVBL, geändert am  
13.9.1977, GVBL
- Nordrhein-Westfalen vom 29.10.1974, GVNW,  
geändert am 18.10.1978 GVNW
- Rheinland-Pfalz vom 27.10.1976, GVBL
- Saarland vom 28.7.1976, Amtsblatt

18. Strafrechtsänderungsgesetz, Gesetz zur Bekämpfung der Um-  
weltkriminalität vom 18.3.1980, BGBL

Ic) VDI-Veröffentlichungen:

VDI-Richtlinie 2451, Blatt 1-4; Meßverfahren zur Bestimmung  
der SO<sub>2</sub>-Konzentration

VDI-Richtlinie 2310, Blatt 11, Entwurf Juli 1980; Maximale  
Immissionsschutzwerte zum Schutze des Men-  
schen; Maximale Immissionskonzentrationen  
für Schwefeldioxid; - (Richtlinien enthalten  
umfassende Literaturübersicht)

VDI-Bericht Nr. 186, Die Emission von Schwefelverbindungen  
(1972), VDI-Verlag Düsseldorf; auch Nr. 149,  
179, 184, 189, 200

L. und H. Ziegler, Biochemie und Physiologie der Wirkungen  
von SO<sub>2</sub> auf Pflanzen, in: VDI-Bericht Nr. 314,  
S. 219-223, Düsseldorf 1978

R. Guderian, Wirkungen sauerstoffhaltiger Schwefelverbindungen,  
Einführung, VDI-Bericht Nr. 314, S. 207-217,  
1978

Id) Sonstige Materialien:

H. Strohm, Politische Ökologie - Arbeitsmaterialien und Lern-  
modelle für Unterricht und Aktion, Reinbek 1979

G. Wallraff, J. Hagen, Was wollt ihr denn, ihr lebt ja noch,  
Reinbek 1973

DIFF (Hrsg.), Funkkolleg, Mensch und Umwelt, Studienbegleit-  
brief 5 (Luft), Weinheim 1981

Zeitschrift Natur, Nr. 12/81 (Saurer Regen setzt den Bäumen zu)  
und Nr. 6/82 (Technische Anleitung Schmutz)

II. Fachliteratur:

W.L.H. Moll, Taschenbuch für Umweltschutz:

- Bd. 1: Chemische und Technologische Informationen, 1973
- Bd. 2: Biologische Informationen, 1976
- Bd. 3: Ökologische Informationen, 1980  
Darmstadt, UTB Taschenbuchreihe

O. Eisenbarth, Umweltschutz, Tabelle von Luftverunreinigungen Comburg-Papier IV. 6, Institut für Bildungsplanung und Studieninformationen, Stuttgart 1974,

Bundesministerium des Inneren (HRSG.), Was sie schon immer über Umweltchemikalien wissen wollten, Stuttgart/Berlin/Köln/Mainz 1980

T. Keller, Begriff und Bedeutung der 'latenten Immissions-schädigung', in: Allg. Forst- und Jagdzeitung 148, S. 115-120, 1978

J. Jarre, Umweltbelastungen und ihre Verteilungen auf soziale Schichten, Göttingen 1975

P. Davids, L. Düwel, K.H. Krieb, Luftverbesserung durch den Neubau von Steinkohlenkraftwerken, Rhein/Ruhr Stiftung, Essen 1978

III. Für die Schule aufbereitete Materialien:

W. Engelhardt, Umweltschutz, 3. Aufl., München 1977

W. Wolf, Umweltschutz, Köln 1974

L. Steubing, Ch. Kunze, Pflanzenökologische Experimente zur Umweltverschmutzung, Heidelberg 1972

Fahrenberger, Müller, Luft und Wasser in Gefahr, Ausgewählte Schulversuche zum Thema Umweltschutz, Phywe-Schriftenreihe, Göttingen 1972

M. Braun, Umweltschutz experimentell, Düsseldorf 1974

Versuche zum Umweltschutz, Weinheim/Basel 1972

Bergerow u.a., Thema Luft, assoziierte Umwelteinheit der IPN-Einheitenbank, Köln 1977

W. Münzinger, Luftverschmutzung, Bericht über ein Unterrichtsprojekt in der Sekundarstufe I einer Gesamtschule, in: Praxis Geographie 9 (1979), H. 3, S. 108-114

P. Drutjons, K. Krusche, Luftverschmutzung durch Industriebetriebe, in: Unterricht Biologie (1), S. 32-37 (1976)

## 7. Erfahrungsbericht:

Als die, diesem Materialpaket zugrundeliegenden Unterrichtseinheiten durchgeführt wurden, lagen viele der hier aufgenommenen Untersuchungsberichte und Informationen noch nicht vor. Die im folgenden beschriebenen Erfahrungen können daher nur punktuell auf die jetzige Situation übertragen werden.

Der interessanteste Teil der Unterrichtsreihe war bei fast jedem Durchgang (Variante A) die Konstruktion einer Meßanordnung. Die offene Aufgabenstellung "Entwerfen, realisieren und erproben Sie eine Meßanordnung zur Bestimmung des  $\text{SO}_2$  in der Atmosphäre" leitete stets eine intensive Arbeit in Kleingruppen ein. Als Nebeneffekt, aber deutlich erkennbar, trat eine Art von Reorganisation chemischen Wissens bei den Schülern zutage; diese konnten plötzlich Verbindungen herstellen zwischen Elektrochemie und Lösungsphänomenen, Säure-Basen-Theorie und realem pH-Wert, chemischen Eigenschaften und beobachtetem Reaktionsverhalten. Allerdings waren diese Transferleistungen auf das angesprochene Gebiet begrenzt. Die entworfenen Meßvorrichtungen waren größtenteils realistisch, z.T. "nur" phantasievoll aber wenig funktions-tüchtig.

Die Vorstellung, eine Apparatur für die Wirklichkeit zu bauen, half oft über die auftretenden praktischen Probleme hinweg.

Was nicht geht: Schülern ohne einige Vorkenntnisse am konkreten Problem sehr viel Chemie beizubringen. Die Ermüdungserscheinungen schlagen sehr schnell in Ablehnung um, dann schon lieber gleich "richtig Chemie"!

Ähnlich positive Erfahrungen wurden mit dem Nachbau gemacht: Auf Basis der VDI-Richtlinie 2451 (Blatt 4, Picoflux) wurden auch hier Leitfähigkeitsanordnungen entwickelt und Messungen durchgeführt.

Gewarnt werden muß vor dem Einsatz des Dräger-Gas-Spür-Gerätes. Schüler kennen dieses z.T. aus dem Biologieunterricht ( $\text{CO}$  aus Abgasen) und schlagen dies als "leicht durchführbare" Methode vor. Für reale  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen ist der Erfassungs-

bereich der verfügbaren Teströhrchen nicht ausreichend. Frust kam aber auch mit der beschriebenen Apparatur zustande. Wenn der Stundenplan nur Messungen zu einer bestimmten Zeit zuläßt und es z.B. gerade geregnet hat, dann ist eben kein  $\text{SO}_2$  mehr in der Luft. Beim ersten Durchgang war ich selber nicht flexibel genug, anstelle der  $\text{SO}_2$ -Messung Regenwasser auffangen zu lassen und damit weiterzuarbeiten. Auch in ländlichen Gegenden ist die Wasseruntersuchung erfolgversprechender als die Luftanalyse. Übrigens kann die ganze Versuchsanordnung noch an vielen Stellen verbessert werden, z.B. durch die Verwendung von Intensiv-Waschflaschen bei der Absorption u.a.m.

Politisches Lernen gibt es beim "Sauren Regen" auch über die Textbearbeitung und die Experimente hinaus. Mehrmals sind z.B. Versuche gescheitert, auf Stadt- oder Kreisebene Verantwortliche zu finden, die über die örtliche Situation Auskunft geben konnten. Noch nicht einmal Smog-Warn-Pläne und wie sie in Kraft treten konnten bei Schülerinterviews von Behördenvertretern hinreichend erläutert werden. Alleine die Ermittlung der zuständigen Stellen verwandelte sich für die Schüler bisweilen zum Hürdenlauf.

Gewarnt werden muß schließlich noch vor der unbedenklichen Verwendung einiger Demonstrationsversuche: Der vorne beschriebene Nylon-Strumpf-Versuch ist, wie so viele andere, nicht besonders wirklichkeitsnah. Bäume sterben langsam, und es gibt andererseits mehr zu verlieren, als die Fassade des Kölner Domes. Die Devise "Was wollt Ihr denn, Ihr lebt ja noch" (Wallraff, siehe Literatur) muß auf der einen Seite von den Interessenkonflikten her angegangen werden, auf der anderen Seite spielen auch Massenwirkungsgesetz und Löslichkeitsprodukt eine wichtige Rolle.

8. Hinweise zur Leistungsüberprüfung:

Geeigneter als Kursarbeiten erscheinen für eine Leistungsbewertung Referate oder andere Schüler(-Gruppen)-Aktivitäten, z.B. die Entwicklung und Erprobung von Meßanordnungen oder die weitgehend selbständige Untersuchung von Regenwasser oder Regen. Für eventuell trotzdem durchzuführende schriftliche Kontrollen sind folgende Aufgabenstellungen denkbar:

1. Saurer Regen ist die vermutliche Hauptursache für das Bäumesterben.

Erläutern Sie mögliche chemische Wechselwirkungen im Boden, die zu einer Veränderung der Lebensbedingungen von Bäumen führen können.

Gehen Sie dabei insbesondere auf die Verschiebung von Lösungsgleichgewichten durch pH-Wert-Veränderung ein!

Wie ist eine Boden-Kalkung unter chemischen Aspekten zu beurteilen?

2. Schwefeldioxid wirkt zerstörend auf Gebäude. Beschreiben und erklären Sie den Wirkungsmechanismus an den folgenden Beispielen: a) Kalkstein, Sandstein;  
b) Metalle.

3. Was hat man sich im Zusammenhang mit Immissions-Schutz und -überwachung unter "Stand der Technik" vorzustellen? Benutzen Sie die Auszüge aus dem BImSchG und der TA Luft.

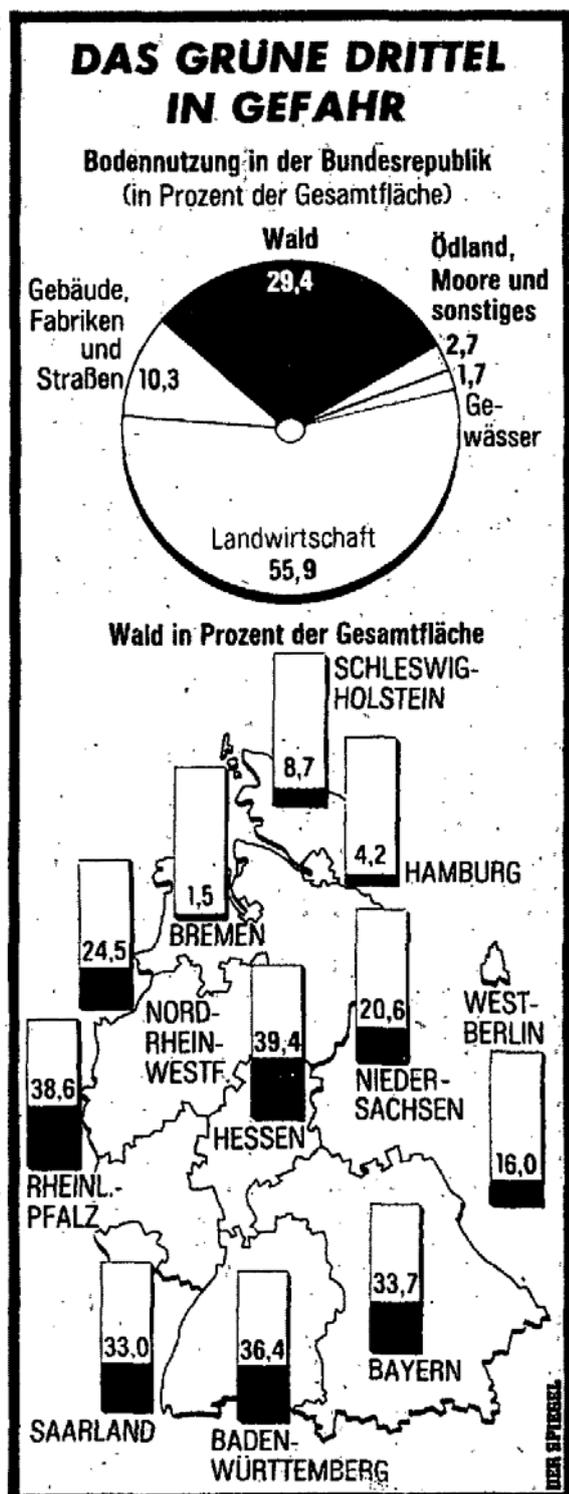
4. Erläutern Sie am Beispiel des  $\text{SO}_2$  den letzten "Paragrafen des Öko-Gesetzes" (BUND): "Alles bleibt irgendwo". Nehmen Sie Stellung zur Hoch-Schornstein-Politik der 70er Jahre.

Anhang:

Links und Grafiken zum Material **M 1**

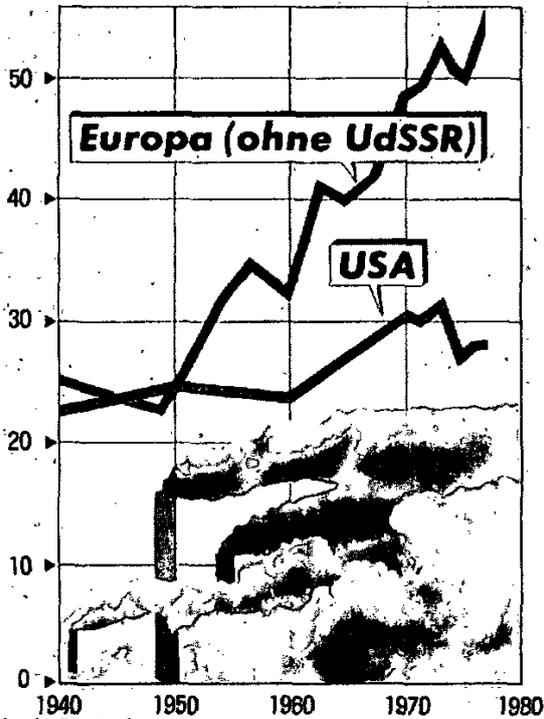
**DER SPIEGEL 47/1981 vom 16.11.1981, Seite 96 ff**

<http://wissen.spiegel.de/wissen/dokument/dokument.html?titel=SPIEGEL+Titel+S%C3%A4ureregen%3A+%22D+a+liegt+was+in+der+Luft%22&id=14347006&top=SPIEGEL&suchbegriff=s%C3%A4ureregen&quellen=%2BBX%2CWIKI%2C%2BSP%2C%2BMM%2CALME%2CSTAT%2C%2BMEDIA&qcrubrik=artikel>

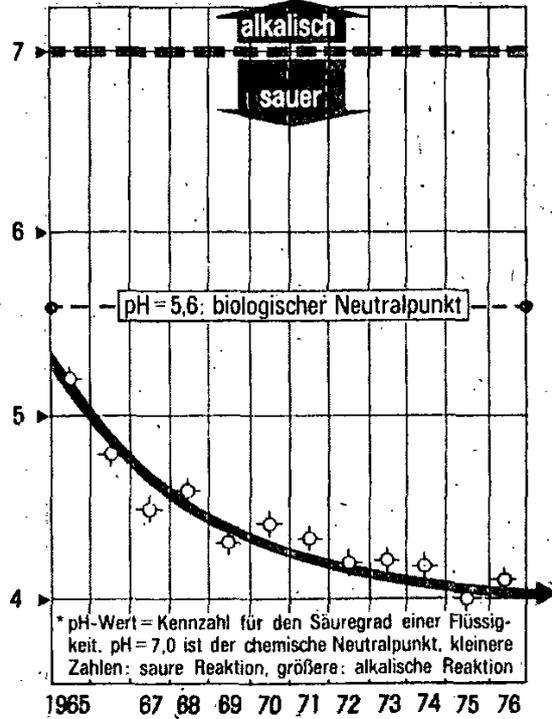


# SAURER REGEN DURCH INDUSTRIE-ABGASE

In die Atmosphäre abgegebene Menge Schwefeldioxid in Millionen Tonnen pro Jahr



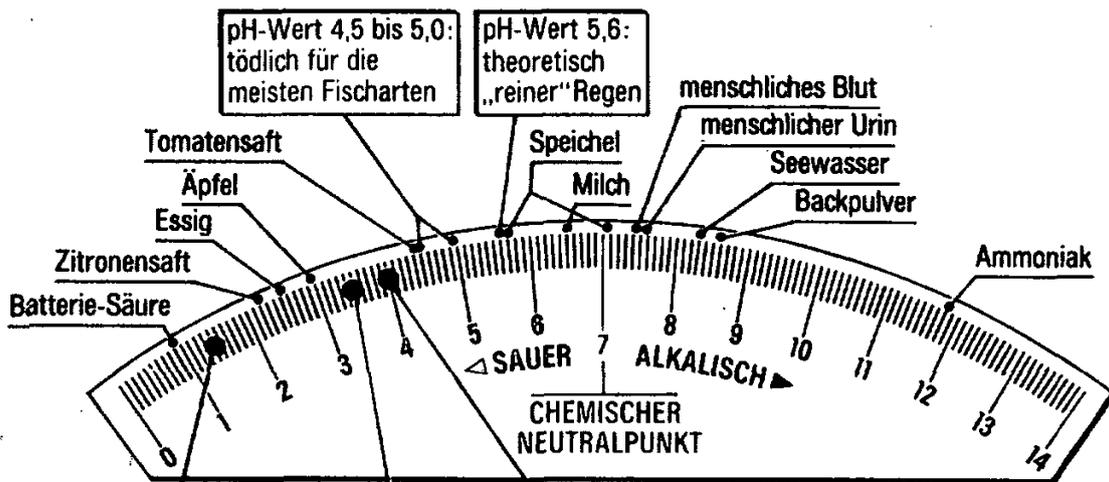
Jahresmittel des pH-Wertes\* der Niederschläge in der Bundesrepublik



DER SPIEGEL

## SAURE-REGEN: SAURER ALS ZITRONENSAFT

Vergleich der pH-Werte\* verschiedener Stoffe mit denen des Regens an ausgewählten Orten



Überwiegender pH-Wert des Regens, gemessen in Wheeling (Westvirginia, USA)

pH-Wert des Regens im Bayerischen Wald, gemessen im August 1981

Durchschnittlicher pH-Wert des Regens in Westdeutschland, gemessen 1976

\* pH-Wert = Kennzahl für den sauren oder alkalischen Gehalt

