

EUR 5217 d

KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN

METEOROLOGISCHE TRACER
IN DER REGIONALPLANUNG

von

K.H. MULLER

1974



Gemeinsame Kernforschungsstelle
Forschungsanstalt Ispra - Italien

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Gemeinschaften ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, daß die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, ihre Vertragspartner und die in deren Namen handelnden Personen :

keine Gewähr dafür übernehmen, daß die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder daß die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;

keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird in den auf der vierten Umschlagseite genannten Vertriebsstellen

zum Preise von BF 50,—

verkauft.

**Kommission der
Europäischen Gemeinschaften
GD XIII - ZID**
29, rue Aldringen
L u x e m b o u r g

November 1974

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 5217 d

KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN

METEOROLOGISCHE TRACER IN DER REGIONALPLANUNG

von

K.H. MULLER

EUR 5217 d

METEOROLOGICAL TRACERS IN REGIONAL PLANNING
by K.H. MÜLLER

Commission of the European Communities
Joint Nuclear Research Centre - Ispra Establishment (Italy)
Luxembourg, November 1974 - 30 Pages - 7 Figures - B.Fr. 50.—

Atmospheric tracers can be used as indicators to study both the ventilation of an urban region and its dispersion meteorology for air pollutants.

A correlation analysis applied to the space-time dependent tracer concentrations is able to give transfer functions, the structure and characteristic parameters of which describe the meteorological and topographical situation of the urban region and its surroundings in an integral manner.

To reduce the number of persons usually involved in a tracer experiment an automatic air sampling system had to be developed.

EUR 5217 d

METEOROLOGICAL TRACERS IN REGIONAL PLANNING
by K.H. MÜLLER

Commission of the European Communities
Joint Nuclear Research Centre - Ispra Establishment (Italy)
Luxembourg, November 1974 - 30 Pages - 7 Figures - B.Fr. 50.—

Atmospheric tracers can be used as indicators to study both the ventilation of an urban region and its dispersion meteorology for air pollutants.

A correlation analysis applied to the space-time dependent tracer concentrations is able to give transfer functions, the structure and characteristic parameters of which describe the meteorological and topographical situation of the urban region and its surroundings in an integral manner.

To reduce the number of persons usually involved in a tracer experiment an automatic air sampling system had to be developed.

ZUSAMMENFASSUNG

Atmosphärische Tracer werden als Indikatoren benutzt, um sowohl die Ventilation einer Stadt als auch die Ausbreitungsmeteorologie von Luftschadstoffen zu ermitteln.

Eine Korrelationsanalyse vermag aus den raum-zeitlichen Konzentrationen des Tracers Transferfunktionen herzuleiten, deren Struktur und charakteristische Parameter die meteorologischen und topographischen Gegebenheiten des Stadtbereichs und seiner unmittelbaren Umgebung integral berücksichtigen.

Um den bei der Durchführung von Tracerexperimenten üblichen großen Personalaufwand zu reduzieren, mußte ein automatisches Probenahmesystem entwickelt werden.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	5
2. Ventilation	5
3. Tracerexperimente	6
4. Transferfunktionen	7
5. Bestimmung der Transferfunktion	8
6. Beispiel	11
7. Effektive Parameter	13
8. Puff-Formel	13
9. Beispiel	15
10. Immissionsprognose	17
11. Tracer-Substanzen	17
12. Emission und Probenahme	19
13. Automatische Probenahme	20
14. Robot-Konstruktionen	21
15. Literatur	23

Kollege Andre SIEFFERT besorgte in dankenswerter Weise die Umsetzung von Ideen in realisierbare Konstruktionen und die Ausarbeitung der in Abschnitt 14 vorgestellten Robottypen.

Meteorologische Tracer in der Regionalplanung

"Die Städte sind mehr als wir gemeinhin annehmen Mitgestalter an ihrem Klima".

P.A. Kratzer/1/

1. Einleitung

Erst die Kenntnis der lokalen Ausbreitungsmeteorologie von Wohn- und Industriegebieten - neben der der üblichen sozio-ökonomischen Belange - ermöglicht die Aufstellung eines sinnvollen Bebauungsplanes für einen Siedlungsraum. Eine "Klimatechnik des Städtebaus" kann nur dann planend und korrigierend ein Höchstmaß an Luftqualität aus dem gegebenen Rahmen des Makroklimas herausholen, wenn die Zusammenhänge zwischen allen maßgeblichen Faktoren quantitativ erfaßt sind. Hierzu bedarf es für das jeweilige Siedlungsgebiet einer Korrelation von lufthygienischen und meteorologischen Meßdaten.

2. Ventilation

Die Stadtstruktur selbst bestimmt weitgehend die dortigen Windverhältnisse. Die Bebauung beeinflusst durch vermehrte Reibung die allgemeine Luftbewegung und erzeugt zusammen mit dem städtischen Temperaturexzess ein eigenes Windsystem. Die wärmere Stadtluft steigt auf und saugt aus der Umgebung Luft an, die auf ihrem Weg fortgesetzt Verunreinigungen aufnimmt. Damit wird die Dunstschicht über der Stadt immer mächtiger. Erst mittlere Winde vermögen das eigene Windsystem der Stadt aufzuheben und damit auch zu zerstreuen. Diese lebensnotwendige Ventilation der Stadt wird weitgehend von der Struktur ihrer Umgebung, von Höhenzügen, Wäldern, Wasserflächen usw. geprägt. Es interessiert hierbei z.B., inwieweit der Kaltluftstrom eines Bergtales zur Ventilation der City einer benachbarten

Großstadt beizutragen vermag oder inwieweit eine teilweise Besiedlung des Tales den Frischluftzstrom behindert. Fragen dieser Art lassen sich derzeit nur für den konkreten Einzelfall beantworten. Analogieschlüsse ermöglichen jedoch Indikationen, die wertvolle Entscheidungshilfen bei der Zulassung anstehender Bauvorhaben sein können.

3. Tracerexperimente

Da noch keine zufriedenstellende Theorie zur Beschreibung der Stadtventilation vorliegt, ist man zunächst auf experimentelle Untersuchungen angewiesen.

Versuche mit sogen. atmosphärischen Tracern zur Simulation der Luftschadstoffausbreitung zeigten erfolgversprechende Ergebnisse / 2 / . Dabei wurden entweder fluoreszente oder radioaktive oder andere Tracer-substanzen in die Atmosphäre abgelassen. Ein Netz von Stationen zur Luftprobennahme verfolgt die Wanderung des Tracers von der Quelle aus.

Es liegt nun nahe, atmosphärische Tracer als Indikatoren zu benutzen, um die die Ventilation einer Stadt bestimmenden Luftströmungen zu ermitteln, da nach dort, wo Tracersubstanz registriert wird, auch Luft aus dem Tracerquellbereich gelangt sein muß.

Quantitative Aussagen erhält man jedoch erst, wenn man über eine Korrelationsanalyse aus den raum-zeitlichen Konzentrationen eine oder mehrere die Tracerausbreitung beschreibenden Transferfunktionen ermitteln kann, deren Struktur und charakterisierende Parameter letztlich die meteorologischen und topographischen Gegebenheiten des Stadtbereiches und seiner Umgebung integral berücksichtigen. Da ja in erster Linie die Luftqualität interessiert, wird eine solche integrale Information dienlicher sein als eine detaillierte meteorologische Aussage, die letztlich doch in Aussagen über die Luftqualität umgesetzt werden muß, wenn sie über den Rahmen einer akademischen Studie hinausgehen soll.

4. Transferfunktionen

Es wird allgemein angenommen, daß die Konzentration χ gasförmiger Tracer der konvektiven Diffusionsgleichung genügt:

$$(1) \quad \frac{\partial \chi}{\partial t} + u \cdot \nabla \chi + \alpha \chi = \nabla \cdot (K \nabla \chi)$$

Die darin auftretenden Parameter α , u und K sind Funktionen von Ort und Zeit; sie gilt es, für vorgegebene Rand- und Anfangsbedingungen aus Tracerexperimenten zu erschließen.

Um den dazu erforderlichen experimentellen und mathematischen Aufwand in vernünftigen Grenzen zu halten, wird man sich mit einer approximativen Lösung des Problems zufrieden geben.

Da jegliche Information über lokale Mikrometeorologie und Luftqualität zwangsläufig nur an diskreten Raumpunkten zu erhalten ist, liegt es nahe, das Stadtgebiet und seine Umgebung als Multikompartmentssystem aufzufassen, bei dem die Meßstationen durch Transmissionsbereiche getrennt sind. Eine naheliegende Approximation besteht nun darin, jedem dieser Bereiche eine ihm eigene homogene Ausbreitungscharakteristik, d.h. einen konstanten Parametersatz α , u , K zuzuordnen.

PASQUILL / 3 / hat mittels Tracermessungen über ebenem Grasland für verschiedene meteorologische Bedingungen Relationen zwischen u und K gefunden. Als Transferfunktion verwendete er eine Elementarlösung der obigen Diffusionsgleichung, die sogen. Gauß'sche Plumeformel.

Bei Anwendung dieser Transferfunktion auf bewaldetes, bebautes oder hügeliges Terrain jedoch werden Tracerexperimente Relationen zwischen α , u und K ergeben, die mehr oder weniger stark von denen Pasquills abweichen. Solche Diskrepanzen jedoch bringen in integraler Weise sowohl die unterschiedliche Oberflächenstruktur als auch das recht komplizierte dreidimensionale Strömungsfeld über dem Siedlungsraum und seiner unmittelbaren Umgebung zum Ausdruck. Es erhebt sich hier allerdings die Frage, inwieweit es noch sinnvoll ist, eine für stark idealisierte Bedingungen abgeleitete Ausbreitungsformel als Transferfunktion für realistische Situationen zu verwenden.

Bevor man jedoch dazu übergeht, anders geartete Transferfunktionen zu konstruieren, wird man durch eine Korrelationsanalyse der Tracermessungen versuchen, Teilgebiete ausfindig zu machen, innerhalb derer sich die Verwendung einer so einfachen Transferfunktion wie der obigen noch rechtfertigen läßt.

Eine völlig davon abweichende Methode, Transferfunktionen zu konstruieren, und aus ihnen die wesentlichen, die Einzelbereiche charakterisierenden Ausbreitungsparameter herzuleiten, folgt aus der Korrelation von Zeitreihen gemessener Tracerkonzentrationen. Allerdings benötigt diese Methode für jede Meßstation eine ausreichende Anzahl von Luftproben, die den spezifischen Zeitverlauf der dort gemessenen Tracerkonzentration erkennen läßt. Der zugehörige mathematische Formalismus ist der gleiche, wie der bei der Tracerung industrieller Produktionsabläufe oder der in der medizinisch-biologischen Diagnose verwendete / 4 / . Das System der Transferfunktionen vermag schließlich das Strömungsverhalten der Luft über dem Stadtgebiet und seiner Umgebung in ihrer derzeitigen Beschaffenheit über Tracer-Ausbreitungsparameter auszudrücken. Eine bauliche Veränderung innerhalb eines Kompartments modifiziert zwangsläufig dessen Transferfunktionen. Dieses Faktum gibt die Möglichkeit, mit Hilfe einer Computersimulation die Konsequenzen von solchen Modifikationen zu studieren und damit den Einfluß zukünftiger Bauvorhaben auf die so wichtige Ventilation des städtischen Lebensraumes vorausschauend abzuschätzen.

5. Bestimmung der Transferfunktion

Der Transfer zwischen punktueller Momentanquelle (ξ, τ) und punktuelltem Empfänger (x, t) läßt sich über eine Green'sche Funktion $G(x-\xi, t-\tau)$ beschreiben. Sie gibt eine Eigenschaft des Transmissionsbereiches an, nämlich seine Dispersionscharakteristik. Um deren Zusammenhang mit den gemessenen Tracerkonzentrationen herzustellen, wichtet man sie mit der Quellverteilung $Q(\xi, \tau)$ und integriert über den raum-zeitlichen Quellbereich \mathcal{B} . Es resultiert das Dichtefeld:

$$(2) \quad \chi(x, t) = \int_{\mathcal{B}} G(x-\xi, t-\tau) Q(\xi, \tau) d\xi d\tau$$

Die am Punkte x_i während des Zeitraums Δt_j angesaugte Tracermenge m_{ij} ist gegeben durch:

$$(3) \quad m_{ij} = \int_{\Delta t_j} p_i(t) \chi(x_i, t) dt$$

wenn $p_i(t)$ die Pumpencharakteristik bei x_i bezeichnet.

Der nun folgende Formalismus dient zur Bestimmung sowohl der Ausbreitungsparameter u, α, K als auch der Transferfunktion G aus einem Satz von m_{ij} -Werten.

Die Dichte χ genüge der linearen Differentialgleichung

$$(4) \quad \mathbb{L} \chi = f$$

wobei der parabolische Differentialoperator \mathbb{L} einen unbekannt Parameter λ enthält, den es ebenfalls zu bestimmen gilt.

Dichte χ und Quellstärke f sind Funktionen von Ort x und Zeit t . Mit dem Ansatz

$$(5) \quad \chi = [\varphi(x) a(t)]$$

in dem φ eine vorgegebene Raumfunktion bezeichnet, die eventuell selbst von λ abhängt, gehen wir in die Galerkin-Gleichung:

$$(6) \quad \int_{\mathcal{B}} (\mathbb{L} \chi - f) \varphi dx = 0 \quad \frac{\partial \chi}{\partial n} \text{ Rand von } \mathcal{B} = 0$$

Es resultiert die lineare Gleichung:

$$(7) \quad \frac{da}{dt} + Aa = b$$

die sich formal integrieren läßt:

$$(8) \quad a(t) = \int_0^t e^{-A(t-\tau)} b(\tau) d\tau$$

Eingesetzt in (5) folgt die Darstellung

$$(9) \quad \chi = \left[\varphi \cdot \int_0^t e^{-A(t-\tau)} b(\tau) d\tau \right]$$

Am Meßpunkt x_i wird während der Zeitspanne Δt_j Substanz akkumuliert. Eine Integration von (9) über diesem Zeitintervall führt zur Relation:

$$(10) \quad m_{ij} = \left[\varphi_i \alpha_j \right]$$

Sie verknüpft die bei (i,j) gemessene Dichte m_{ij} mit dem Formfaktor

$$(11) \quad \alpha_j = \int_{\Delta t_j}^t \left[P_i(t) - P_i(\tau) \right] e^{A\tau} d\tau$$

wobei $P_i(t) = \int_0^t p_i(\tau) e^{-A\tau} d\tau$ ist.

Den gesuchten Parameter λ errechnet man unter Hinzunahme der Meßwerte m_{ij} aus der Forderung

$$(12) \quad \sum_{ij} (m_{ij} - [\varphi_i a_j])^2 = \text{Minimum}$$

Es bieten sich die beiden Darstellungen an:

$$(13) \quad [\varphi a] = \sum_k \varphi_k(x) a_k(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dk e^{ikx} a_k(t)$$

6. Beispiel

Für den recht häufig verwendeten Robert'schen Operator / 3 /

$$(14) \quad \mathbb{L} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} - K_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} - K_2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} - K_3 \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

und die Klasse

$$(15) \quad \varphi_k = \frac{1}{(8\pi^3 K_1 K_2 K_3)^{1/4}} \exp \left[-\frac{(x-ut_k)^2}{4K_1 t_k} - \frac{y^2}{4K_2 t_k} - \frac{(z-h)^2}{4K_3 t_k} \right]$$

ergibt sich bei allseitig unendlichem Bereich

$$(16) \quad \varphi_{ik} = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_i \varphi_k dX = \left(\frac{2 t_i t_k}{t_i + t_k} \right)^{3/2} \exp \left[- \frac{u^2}{4 \kappa_1} \frac{(t_k - t_i)^2}{t_k + t_i} \right]$$

mit
$$A = \{ \varphi_{ik} \}^{-1} \left\{ \left[\frac{1}{2 t_k} \left(\frac{1}{2} - \gamma \right) \left(\frac{K_1}{\kappa_1} + \frac{K_2}{\kappa_2} + \frac{K_3}{\kappa_3} \right) - \frac{u^2}{\kappa_1} \gamma \left(1 + \frac{K_1}{\kappa_1} \gamma \right) \right] \varphi_{ik} \right\}$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{t_k - t_i}{t_k + t_i}$$

Um die φ_k -Darstellung den praktischen Gegebenheiten noch besser anzupassen, empfiehlt es sich, die χ -Parameter mit den entsprechenden K-Werten zu identifizieren:

$$(17) \quad \chi_i = K_i \quad i = 1, 2, 3$$

Die φ_k -Klasse wird damit problemorientierter. Das zugehörige A lautet dann:

$$(18) \quad A = \{ \varphi_{ik} \}^{-1} \left\{ \left[\frac{3}{2 t_k} \left(\frac{1}{2} - \gamma \right) - \frac{u^2}{K_1} \gamma (1 + \gamma) \right] \varphi_{ik} \right\}$$

Die Inversion $\{ \varphi_{ik} \}^{-1}$ bereitet hierbei keine Schwierigkeit, weil die Parameterkombination u^2 / K_1 mit Hilfe der Relation $\sigma_1 = 0.4 u \Delta t$ (vgl. / 5 /) durch den parameterfreien Ausdruck

$$(19) \quad \frac{u^2}{4 K_1} = \frac{1}{0.08 \Delta t}$$

ersetzt werden kann und φ_{ik} damit zur reinen Zeitfunktion wird.

7. Effektive Parameter

Wie bereits angedeutet, eignet sich die Beschreibung der Tracerverteilung mittels Dgl. mit konstanten Koeffizienten nur für Raum-Zeit Bereiche innerhalb derer die Parameter α, u, K nicht allzustark um die entsprechenden Mittelwerte schwanken. Diese a priori unbekanntes Mittelwerte verwenden wir zur Charakterisierung des Ausbreitungsverhaltens im gewählten Bereich. Diese Mittelwerte haben natürlich nicht genau die Bedeutung wie im Idealfall, sondern beinhalten auf recht komplizierte Weise auch Information über Topographie, Oberflächenbeschaffenheit u.a.m. So ist K lediglich ein "künstlicher" Wirbeldiffusionskoeffizient und u nur eine (hinsichtlich der Tracerausbreitung) "effektive" Geschwindigkeit. Da die Quellstärke am Abblaspunkt nur zum Teil zur Immission am Boden des Bereiches beiträgt - der Rest wird meist durch Höhenströmung u.a.m. ungenutzt weggetragen - ist auch die "effektive" Quellstärke Ausgangs unbekannt.

Alle diese "effektiven" Parameter müssen allein aus den Tracermessungen erschlossen werden.

Es soll hier darauf hingewiesen werden, daß sich die Streuung der charakteristischen Parameter um ihre Mittelwerte dazu eignet, sogenannte "Homogenitätsbereiche", d.h. Bereiche mit praktisch konstanten Ausbreitungsparametern ausfindig zu machen, bzw. den gesamten Raum-Zeitbereich geeignet in Homogenitätsbereiche zu gliedern.

8. Puff-Formel

Eine mathematisch weitaus einfachere, aber leider im allgemeinen Fall nur sehr schwer zu rechtfertigende Vorgehensweise ist, eine bestimmte, in ihrer Struktur fixierte Fundamentallösung der konvektiven Diffusionsgleichung (1) mit unbestimmten Koeffizienten als Transferfunktion anzusetzen und mit Hilfe der bei (x_i, t_i) gemessenen Tracerkonzentrationen μ_i die freien Ausbreitungsparameter festzulegen. Diesen Weg wollen wir nun mit der folgenden Grundlösung illustrieren:

$$(20) \quad \chi = \frac{Q}{t^{3/2}} \exp \left[- \frac{(x-ut)^2}{4 t K_1} - \frac{y^2}{4 t K_2} - \frac{(z-h)^2}{4 t K_3} \right]$$

Emissionszeit und Pumpencharakteristik seien δ -Funktionen.

Logarithmieren von (20) führt mit den Abkürzungen zur Tabelle 1:

ψ_{ik}	$-\frac{(x-ut)^2}{4t}$	$-\frac{y^2}{4t}$	$-\frac{(z-h)^2}{4t}$
a_k	$1/K_1$	$1/K_2$	$1/K_3$

$$\mu_i = \ln \left(\frac{\chi(x_i, t_i) t_i^{3/2}}{Q} \right)$$

zur linearen Darstellung

$$(21) \quad \mu_i = \sum_{k=1}^3 \psi_{ik} a_k$$

aus der man die gesuchten Parameter a_i bzw. K_i auf folgende Art berechnet.

Die zu (20) gehörende Vektorform

$$\mu = \Psi a$$

wird mit der Transponierten Ψ^T multipliziert und quadriert. Der gesuchte Vektor a errechnet sich aus

$$(21) \quad (\Psi^T \cdot \mu - \Psi^T \Psi \cdot a)^2 = \text{Minimum}$$

Um gleichzeitig die "effektive" Quellstärke Q aus den Tracermessungen zu bestimmen, fügt man

$$\psi_{i4} = 1 \quad \text{und} \quad a_4 = \ln Q$$

zur Tabelle 1 hinzu; um schließlich noch die "effektive" Geschwindigkeit u festzulegen, arbeitet man mit der Tabelle 2:

ψ_{ik}	$-\frac{x^2}{4t}$	$-\frac{y^2}{4t}$	$-\frac{(z-h)^2}{4t}$	1	$\frac{x}{2}$	$\frac{t}{4}$
a_k	$1/K_1$	$1/K_2$	$1/K_3$	$\ln Q$	u/K_1	u^2/K_1

Die "effektive" Geschwindigkeit

$$u = \frac{a_5}{a_1} \quad \text{bzw.} \quad u = \frac{a_6}{a_5}$$

folgt somit ebenfalls direkt aus dem Tracerexperiment. Diese beiden Darstellungen von u ermöglichen eine gegenseitige Kontrolle.

9. Beispiel

Wir starten von der vorgegebenen Tabelle 3 der Meßwerte

X	Y	T	μ	
1	1	1	0.610E-00	1
1	1	3	0.120E-00	2
1	1	5	0.360E-01	3
1	3	1	0.820E-01	4
1	3	3	0.600E-01	5
1	3	5	0.240E-01	6
3	3	1	0.300E-01	7
3	3	3	0.830E-01	8
3	3	5	0.440E-01	9
4	1	1	0.640E-01	10
4	1	3	0.150E-00	11
4	1	5	0.770E-01	12
6	3	2	0.140E-01	13
6	3	4	0.520E-01	14

6	3	6	0.450E-01	15
6	5	6	0.230E-01	16
7	1	5	0.660E-01	17
7	1	8	0.400E-01	18
9	5	9	0.180E-01	19
10	1	4	0.120E-01	20
10	1	7	0.360E-01	21
11	3	5	0.900E-02	22
11	3	9	0.250E-01	23

betrachten diese Menge als Grundgesamtheit und wählen aus ihr 15 Stichproben zu je 10 stochastische herausgegriffenen Messungen. Es ergibt sich Tabelle 4:

<u>K1</u>	<u>K2</u>	<u>K3</u>	<u>Q</u>	<u>U</u>	<u>V</u>
1.031	0.993	1.062	0.994	0.980	0.985
1.140	0.964	0.404	1.374	1.075	0.897
1.021	1.002	0.806	1.023	1.016	0.995
1.307	0.874	0.785	1.129	0.771	0.801
1.605	1.069	0.788	1.059	0.398	0.587
1.247	0.538	2.041	0.926	0.500	0.835
1.013	0.996	1.061	0.989	0.999	1.002
2.297	1.010	0.381	1.062	0.994	0.952
0.964	0.936	2.336	1.068	1.015	0.956
1.592	1.105	0.080	2.059	0.990	0.732
0.979	1.000	1.998	0.964	0.991	1.000
1.006	1.002	0.923	1.004	1.011	1.005
0.978	1.080	3.887	0.912	0.955	0.978
1.336	1.036	0.296	1.500	0.959	0.766
0.909	0.881	1.721	1.402	1.175	1.008

Die daraus errechneten Mittelwerte und Streuungen:

$$K_1 = 1,228 \pm 0,092$$

$$K_2 = 0,966 \pm 0,034$$

$$K_3 = 1,238 \pm 0,250$$

$$Q = 1,164 \pm 0,076$$

$$U = 0,921 \pm 0,052 \quad (a_6/a_5)$$

$$V = 0,900 \pm 0,032 \quad (a_5/a_1)$$

lassen den Schluß zu, daß dem von den Meßwerten überdeckten Raum-Zeitbereich ein konstanter Parametersatz zugeordnet werden darf, der das Ausbreitungsverhalten des Bereichs charakterisiert.

Die in Tabelle 4 auftretenden stärkeren Abweichungen bei einzelnen Stichproben können auf fehlerhafte Messung und lokale Fluktuationen zurückgeführt werden.

10. Immissionsprognose

Über die oben skizzierte Vorgehensweise gelangt man schließlich zu einer räumlichen Verteilung der Ausbreitungsparameter. Die Diffusionsgleichung über dem betrachteten Gebiet verfügt demnach über stückweise konstante Koeffizienten. Die Integration dieser Dgl. läßt sich für ein vorgegebenes Emissionskataster auf klassische Weise durchführen und braucht deshalb hier nicht weiter dargelegt zu werden.

Eine bisher nicht behandelte, aber trotzdem recht häufig auftretende Fragestellung folgt aus dem folgenden Problem:

Ein neuer Fabrikschornstein darf nur dann an einer vorgegebenen Stelle errichtet werden, wenn nirgendwo im Siedlungsgebiet die durch seine Emission erhöhte Bodenimmission einen von der Gesundheitsbehörde vorgeschriebenen Grenzwert übersteigt. Die Baugenehmigung hängt also u.a. von einer Immissionsprognose ab. Diese folgt aus einer Tracersimulation. Am zukünftigen Standort des geplanten Emittenden wird bei verschiedenen, lufthygienisch ungünstigen Wettersituationen ein Tracer abgeblasen und an festgelegten Kontrollpunkten die dadurch verursachte Immission gemessen. Das Verhältnis Emission/Immission dient als Kriterium für das Zulassungsverfahren. Selbstverständlich setzt diese Vorgehensweise die Kenntnis der entsprechenden Ähnlichkeitsgesetze zwischen Luftschadstoff und Tracerausbreitung voraus.

11. Tracer-Substanzen

Eine Substanz muß zahlreichen Kriterien genügen, um als atmosphärischer Tracer zu gelten. Die wichtigsten hiervon sind: (siehe/ 6/ 7/)

- vernachlässigbare Toxizität im verwendeten Konzentrationsbereich
- ähnliches Transportverhalten in der Luft wie die zu studierenden Schadstoffe
- vernünftige analytische Techniken zu seiner Bestimmung in einem breiten Konzentrationsbereich
- vernachlässigbare Wechselwirkung mit den zu studierenden Schadstoffen
- gute chemische und physikalische Stabilität
- annehmbare Kosten der experimentellen Ausstattung.

Aufgrund dieser Kriterien gibt es nur relativ wenige gut geeignete atmosphärische Tracer.

Sowohl gasförmige Substanzen als auch Aerosole wurden bisher als Tracer verwendet. Einige seien hier erwähnt:

- Ölrauch
- anorganische Fluoreszenzteilchen (Zink, Zink, Cadmium-Sulfid, Zink-Silikate)
- fluoreszente Farben (Uranine, Rhodamine B)
- Sporen (Lysopodium)
- neutron-aktivierte Substanzen (Indium Antimon, Mangan)
- Radioisotope
- Gase (SF_6 , CBrF_3 , SO_2 , Ar^{41} etc.)

Unterwirft man diese Substanzen den obigen Kriterien, so ist das Ergebnis nicht in jedem Fall zufriedenstellend.

Die Hauptschwierigkeiten liegen in:

- stark von einem idealen Gas abweichenden Ausbreitungsverhalten (Wash-out durch Regen, Fall-out usw.)
- Instabilität (chemische Umsetzung durch Temperatur, Sonnenlicht usw.)
- kompliziertem experimentellen Aufwand.

Besonders gut eignet sich das Gas SF_6 als atmosphärischer Tracer. Einige seiner Eigenschaften seien hier aufgezählt:

- ungiftig, geruchlos, farblos, geschmacklos, nicht brennbar
- hohe technische Stabilität (600°C), deshalb aus Industriekaminen ausstoßbar

- chemisch-stabil gegen Hydrolyse, Oxidation und Photolyse
- chemisch inert gegen die meisten Luftschadstoffe
- resistent gegen Sonnenstrahlung und gegen Wash-out und Rain-out
- einfache Probenahme
- sehr empfindliche Analysetechnik ($< 0,01$ ppb).

Um die Beschreibung von SF_6 abzurunden, muß darauf hingewiesen werden, daß SF_6 in der Elektroindustrie und bei Hochspannungsanlagen als Dielektrikum verwendet wird. Bei dort auftretenden Verlusten und Unfällen tritt SF_6 in die Atmosphäre.

Es ist also vor Beginn von Tracer-Experimenten erforderlich, den natürlichen SF_6 -Background zu ermitteln, zumindest in der Nähe von potentiellen SF_6 -Emittenten.

12. Emission und Probenahme

Zu Beginn des Experiments wird der in der Regel mit Überdruck gespeicherte gasförmige Tracer in die umgebende Atmosphäre abgeblasen; dies geschieht während einer endlichen Zeitspanne, um das Gas vor dem Gefrieren zu bewahren. Der Emissionsvorgang schafft dabei in der unmittelbaren Umgebung der Ablaßstelle ein sehr starkes Strömungsfeld, in dem die Ausbreitungsparameter u , α und K keinesfalls konstant angenommen werden können. Da die mathematische Erfassung dieses Feldes großen Aufwand erfordert, wird man in der Umgebung des Quellpunktes die durch den Emissionsprozeß aufgebaute Tracerwolke als "effektiven" Quellbereich annehmen. Von dort aus beginnt die Wanderung des Tracers. Die Luft fungiert als Träger, d.h. bewegte Luftmassen transportieren den Tracer über Land; gleichzeitig sorgen Diffusionsvorgänge für eine Dispersion. Auf seinem Wege gelangt der Tracer schließlich zum Ort der Probenahme. Dort saugt eine Pumpe auf vorgeschriebene Weise ein gewisses Volumen der sie umgebenden Luft mitsamt ihren Beimengungen in ein evakuiertes Gefäß. Um irrelevante und störende Konzentrationsschwankungen des Tracers am Ort der Probenahme auszugleichen, wird man die Ansaugedauer nicht beliebig verringern. Schon eine mehrminütige Ansaugzeit mittelt die meisten dieser Störungen heraus. Während dieses Zeitraums muß allerdings die Pumpencharakteristik bekannt sein.

Zur Analyse der Luftproben verwendet man einen Gaschromatographen mit Electron Capture Detector. Diese Geräte dienen zur Ermittlung der mittleren Tracerkonzentration in jeder der eingesackten Luftproben.

13. Automatische Probenahme

Obwohl die Tracertechnik ein außerordentlich leistungsfähiges Hilfsmittel darstellt, wurde sie bisher doch recht selten angewandt. Dies liegt z.T. daran, daß jedes Experiment zur Probenahme eine relativ große Anzahl von Mitarbeitern erfordert; ca. 50 Personen müssen sich so lange bereithalten, bis sich die geeignete Wetterlage einstellt und das Experiment durchgeführt werden kann. Unter diesen Umständen wird man natürlich die Anzahl der Tracereexperimente so klein wie möglich zu halten suchen, ganz im Widerspruch zu den Bedürfnissen der Luftqualitätsüberwachung, die ihrerseits möglichst viele experimentelle Aussagen für ungünstige Wetterlagen benötigt. Um dieses durch Personalmangel geschaffene Handicap auszuschalten, wird man anstreben, die Probenahme zu automatisieren. Es liegt nahe, ein sogen. Robotersystem, d.h. ein Netz von automatischen Probenahmestationen zu entwickeln. Die Grundforderungen an den einzelnen Robot: einfach in der Handhabung, wetterbeständig, robust, zuverlässig, preiswert etc. Letztere Forderung, weil eine jede Stadt über ihr eigenes Robotersystem verfügen sollte, um die immer wieder anfallenden Entscheidungen bei Standortfragen zukünftiger Emitter selbständig experimentell untermauern zu können.

Wir haben in der letzten Zeit nun verschiedene Robots entwickelt, die den oben genannten Forderungen nachkommen. Allen gemeinsam ist, daß sie bestehen aus (a) einer einfachen Membranpumpe (wie sie für die Belüftung von Aquarien verwendet wird) von ca. 1,5 l/min Pumpenleistung, die Luft aus ihrer Umgebung ansaugt, (b) einem Verteiler, der die Luft nach einem vorgegebenen Zeitplan auf verschiedene zuvor evakuierte Plastiksäcke verteilt, und (c) einer mechanischen Schaltuhr, die den Verteiler antreibt und Beginn, Sequenz, Dauer und Ende der Probenahme steuert.

Diese drei Bauteile werden in einem wetterfesten Kasten untergebracht und dieser schließlich auf ein Drahtgestell, wie es in Haushalten oft Verwendung findet (Abb. 1), geklemmt.

Die Plastiksäcke zur Aufnahme der Luftproben werden im Korbinneren angeordnet und sind somit hinreichend geschützt.

Die Robots werden vor Beginn des Experiments mit einem Transporter an den jeweiligen Meßort transportiert. Dort werden die Uhren auf die zuvor zu fixierenden Vorlaufzeiten eingestellt, nach deren Ablauf dann die Pumpen über die Verteiler die Luftproben in die Säcke abfüllen. Nach Abschluß der Probenahme werden die Robots wieder eingesammelt und der Inhalt der Säcke im Labor gaschromatographisch analysiert.

14. Robot-Konstruktionen

Die ersten vier der im folgenden vorgeschlagenen Robottypen unterscheiden sich hinsichtlich der Verteilerkonstruktion voneinander. Die Entwürfe 5 und 6 zeigen komplizierteren Aufbau und genügen höheren Ansprüchen.

Bei den Typen 1 bis 4 dreht die mechanische Uhr den Verteilerarm an den Ansatzstutzen für die Luftproben vorbei. Währenddessen presst die Membranpumpe die aus ihrer Umgebung angesaugte Luft durch die Hochlachse des Verteilers und den Verteilerarm über den jeweiligen Ansatzstutzen in den daran befestigten und zuvor evakuierten Plastiksack.

Typ 1

verwendet ausschließlich Bauteile, die sich bereits im Handel befinden: Pumpe, Uhr und Verteiler. Leider verfügt dieser Typ a priori nicht über die Möglichkeit eines Vorlaufs. Durch Dazwischenschalten einer Übersetzung zwischen Uhr und Verteiler läßt sich jedoch auf einfache Weise ein Vorlauf einbauen.

Typ 2

verfügt über einen Vorlauf. Dabei überstreicht der Verteilerarm den stutzenfreien Teil des Verteilermantels; die angesaugte Luft entweicht ungenutzt in die freie Atmosphäre. Während hier die Ansatzstutzen auf dem Verteilermantel angeordnet und damit der Zeitplan der Probenahme weitgehend fixiert ist, verfügt

Typ 3

über eine auswechselbare Frontplatte des Verteilers, die jetzt die Ansatzstutzen trägt. Frontplatten mit verschiedener Lochung ermöglichen Modifikationen des Zeitplans der Probenahme.

Typ 4

Hier sind auf der Frontplatte verschiedene Lochreihen angebracht. Ein einfacher Mechanismus ermöglicht den Übergang von einer Lochreihe auf eine andere. Die Verteiler der Typen 2-4 müssen speziell angefertigt werden.

Typ 5

Diese Konstruktion weicht dadurch von den vorhergehenden ab, daß sie jeder Luftprobe ein eigenes pneumatisches Ventil zuordnet. Die zugehörigen Timer sind auf der Achse der mechanischen Uhr angebracht. Die Membranpumpe wird über eine Nockenscheibe ein- und ausgeschaltet. Die zweite im Schaubild erkennbare Nockenscheibe ermöglicht eine weitere Variation der Probenahmesequenz.

Typ 6

verwendet einen pressluftgetriebenen pneumatischen Schrittmotor, der der Reihe nach die Zweiwegeventile öffnet und schließt und so eine sequentielle Probenahme ermöglicht.

Die beigelegt Kontrolluhr mit Drucker registriert die Öffnungszeiten der Ventile auf einem auf der Trommel des Schrittmotors angebrachten Papierstreifen.

Die bei all den genannten Typen 1-6 benötigte elektrische Leistung für Pumpe und Steuerung wird durch Trockenbatterien aufgebracht.

Literatur

- / 1/ Kratzer, P.A. "Das Stadtklima", Braunschweig 1956
- / 2/ Pooler, F. "A tracer study of dispersion over a city", J.A.P.C.A. 11 (1966), 677
- Smith, D.B. "Tracer study in an urban valley", J.A.P.C.A. 13 (1968), 600
- Tucker, W.D. ed. "The atmospheric diagnostics program at BNL", 4th status report, 1972, BNL 50361
- / 3/ Pasquill, F. "Atmospheric Diffusion", London 1962
- / 4/ Sheppard, C.W. "Basic principles of the tracer method", New York 1962
- / 5/ Sheih, C.M. and Moroz, W.J. "A Lagrangian Puff Diffusion Model for the Prediction of Pollutant Concentrations over Urban Areas" Proc. 3rd Internat. Clean Air Congress, Düsseldorf 1973 B 43
- / 6/ Saltzman, B.E. et al. "Halogenated compounds as gaseous meteorological tracers", Analytical Chemistry 38 (1966), 753
- / 7/ Turk, A. "Sulfur hexafluoride as a gas-air tracer", Envir. Sci. Technology 2 (1968)

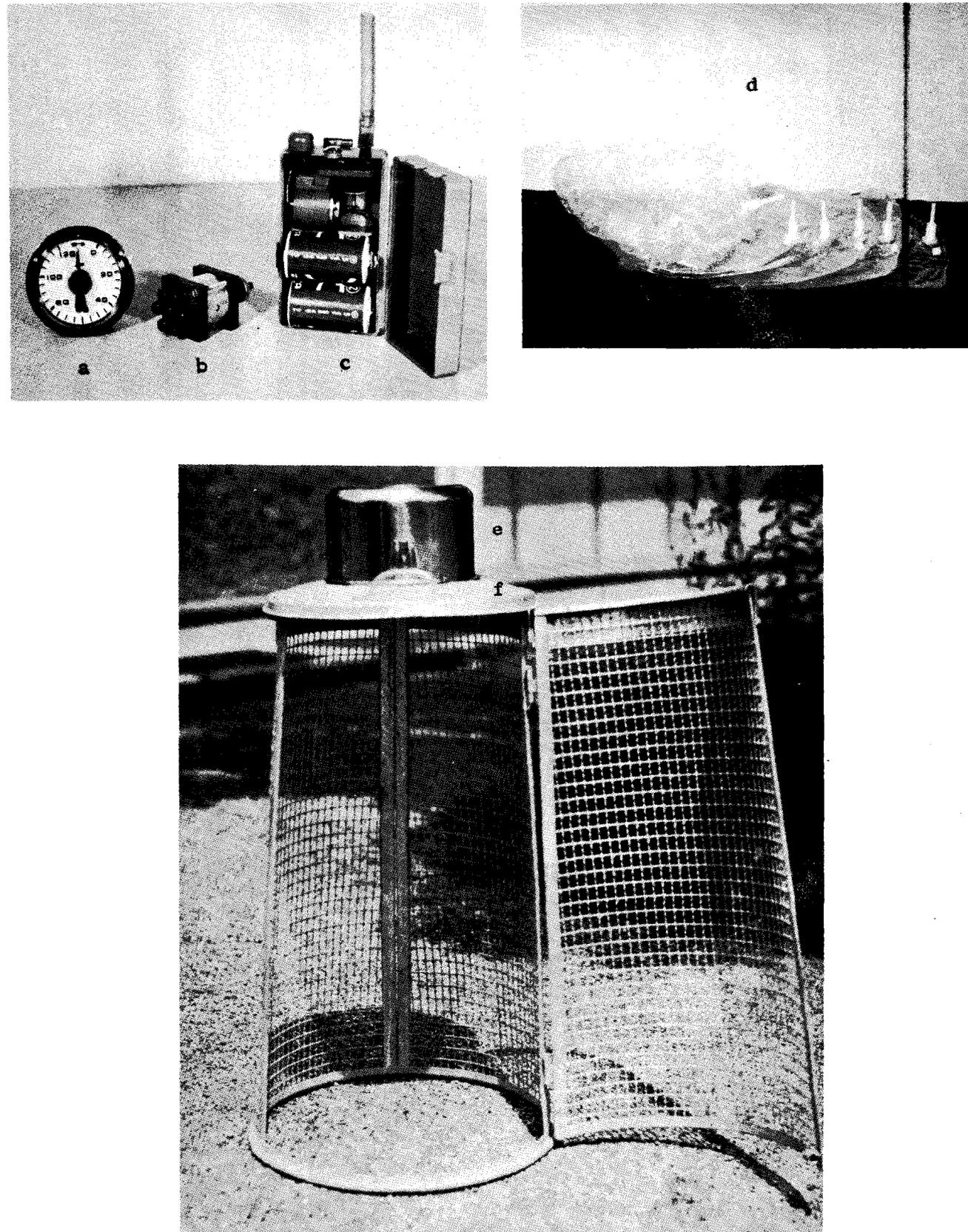
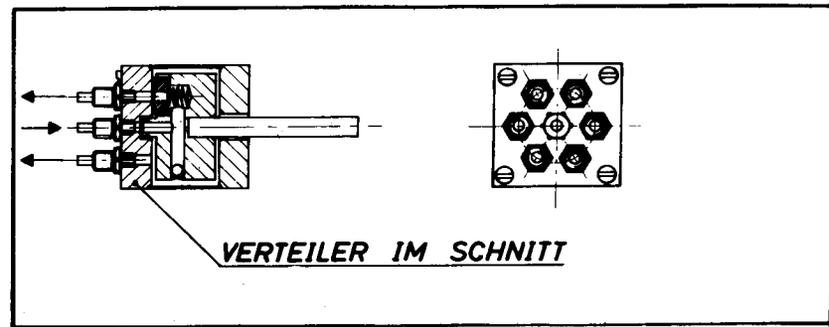
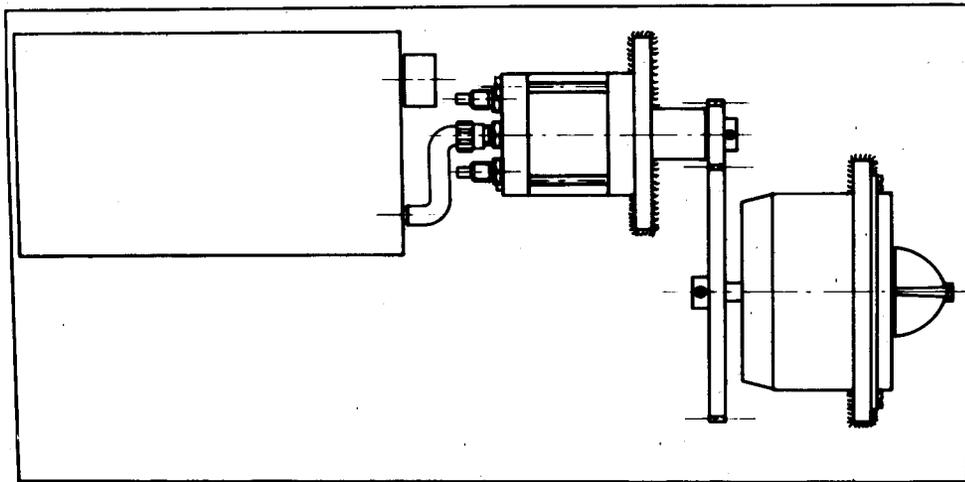
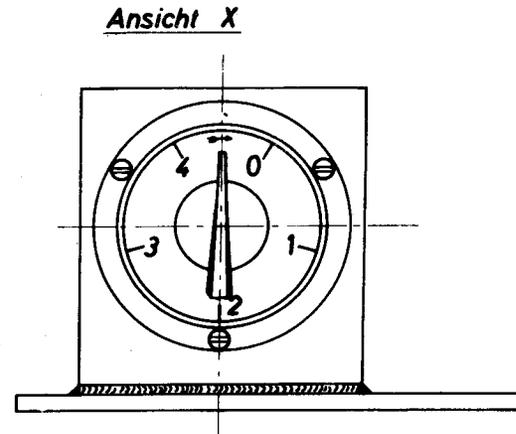
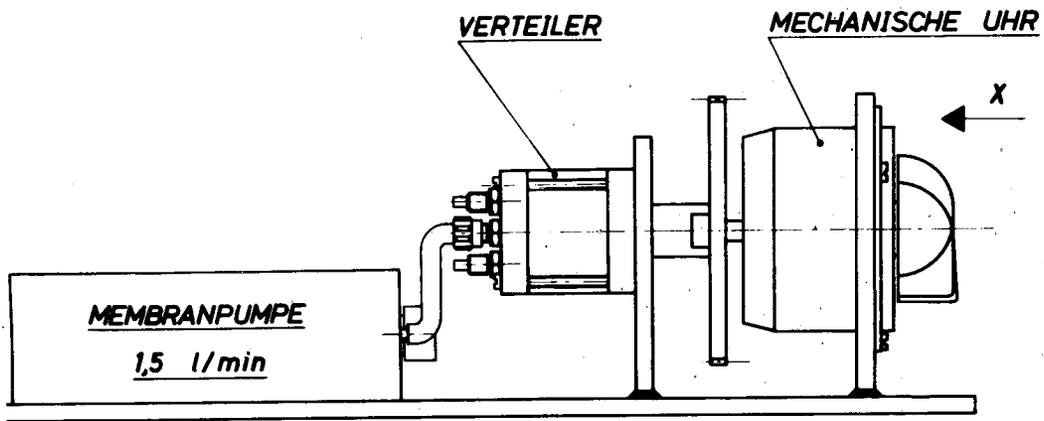
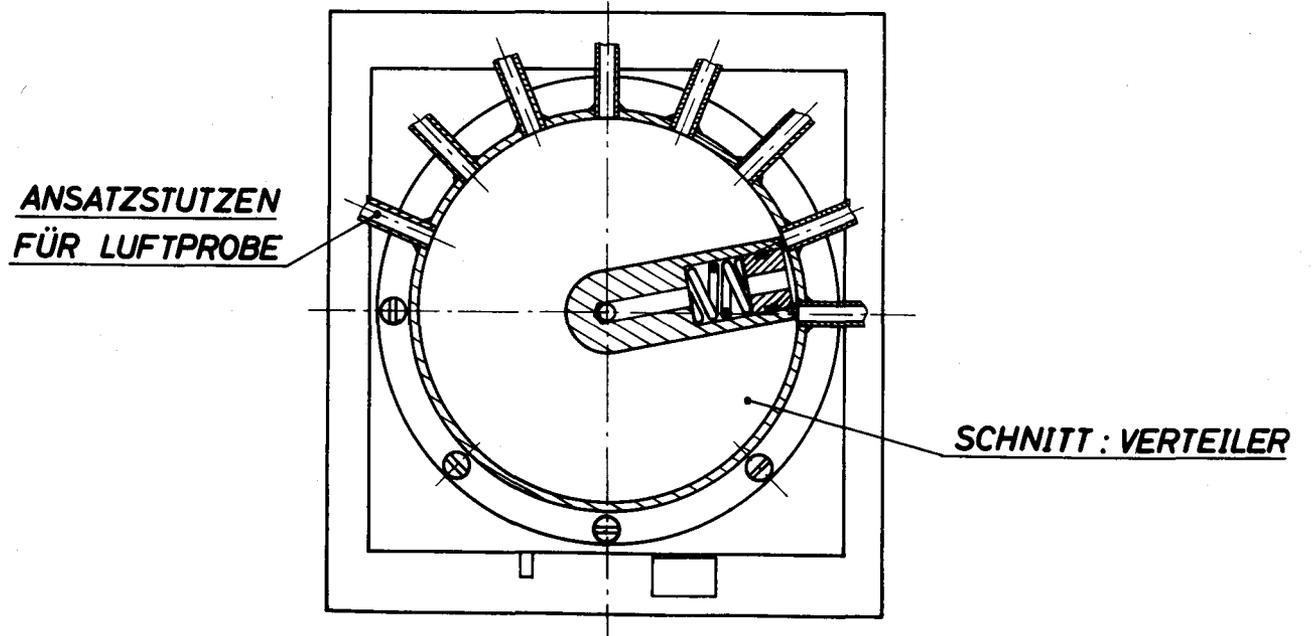
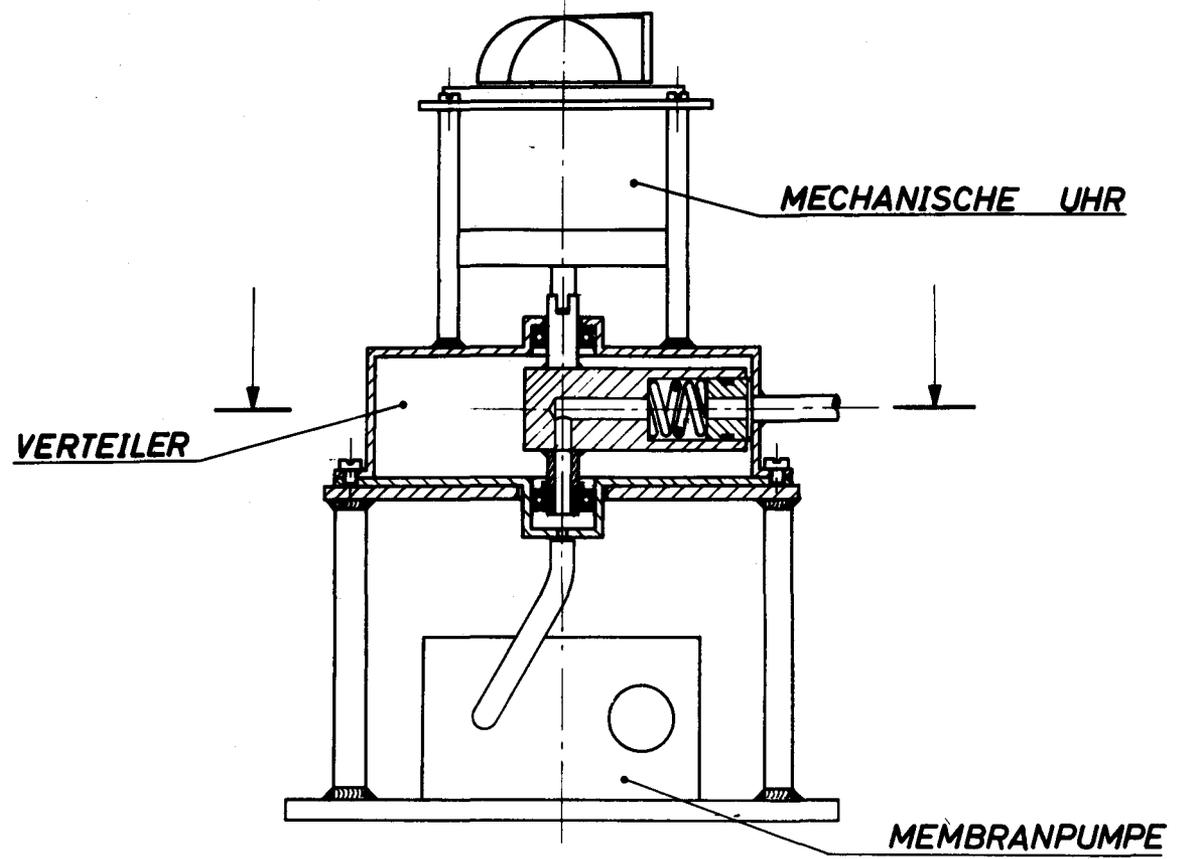


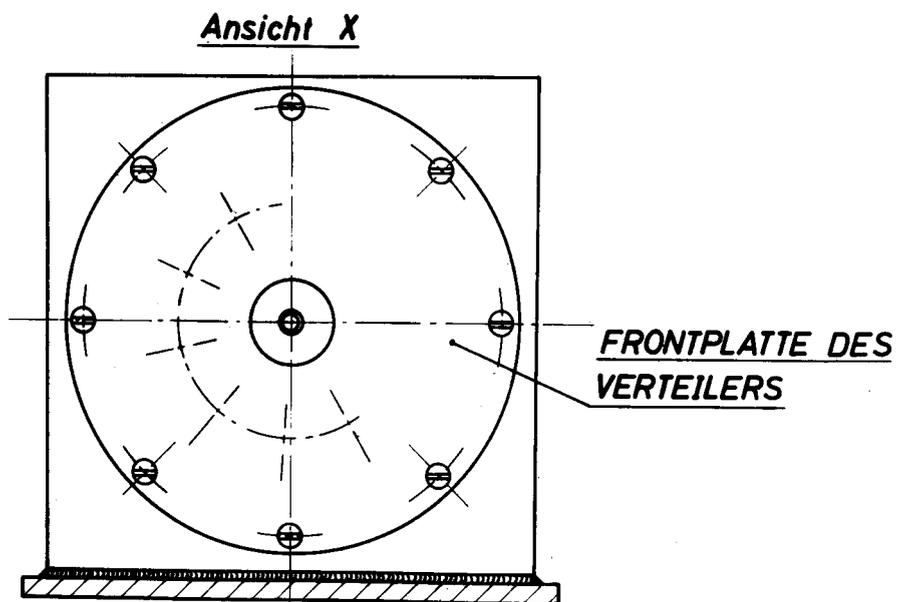
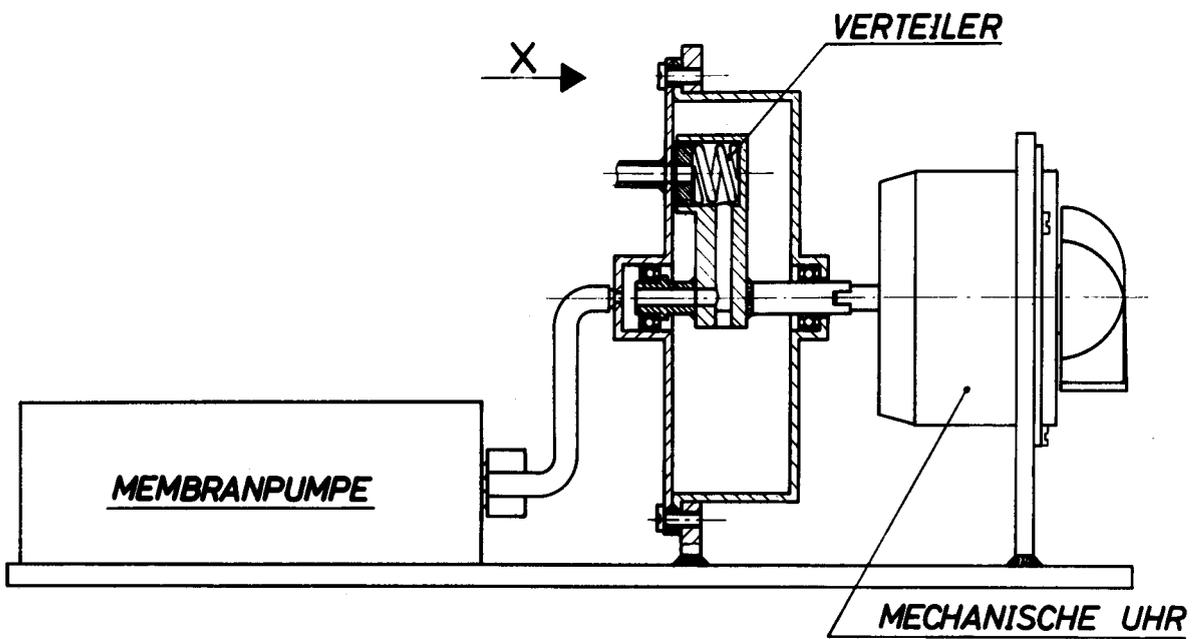
Fig. 1 Automatische Probenahmestation

a) mechanische Uhr, b) Verteiler, c) Membranpumpe, d) Plastiksäcke, e) Robotgehäuse, f) Stativ + Gehäuse für Plastiksäcke

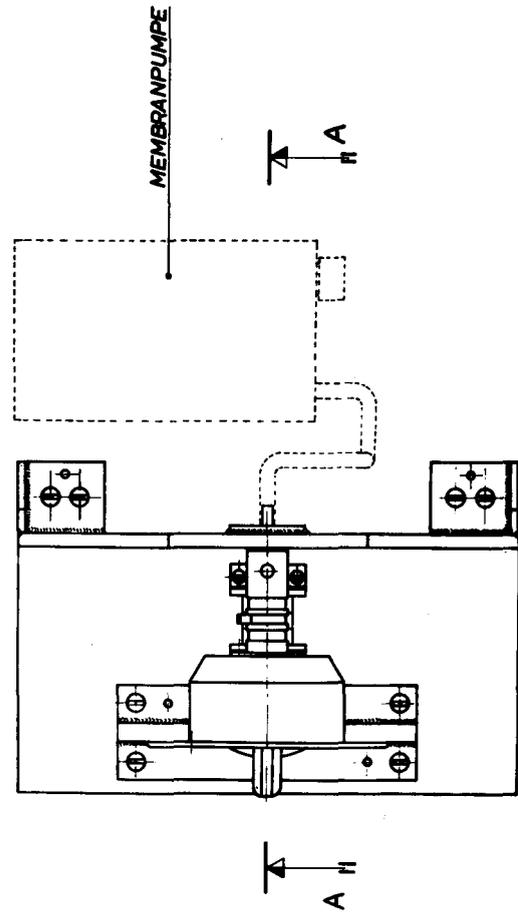
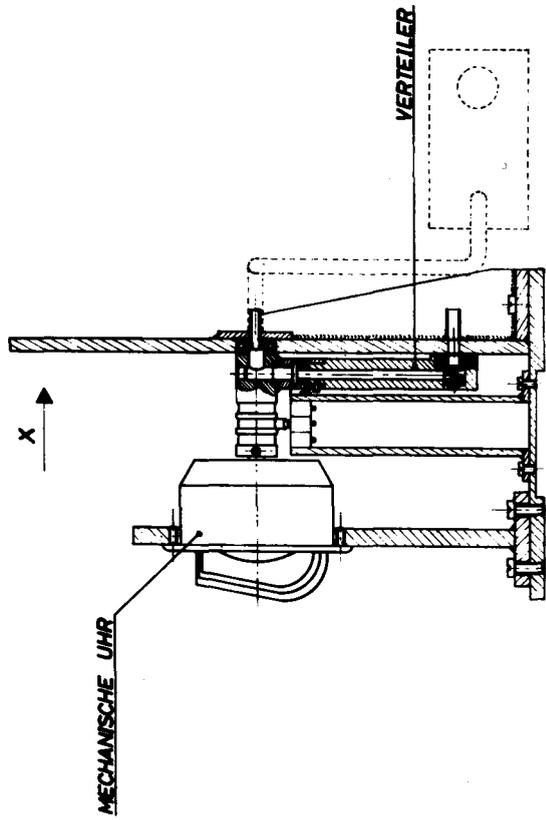
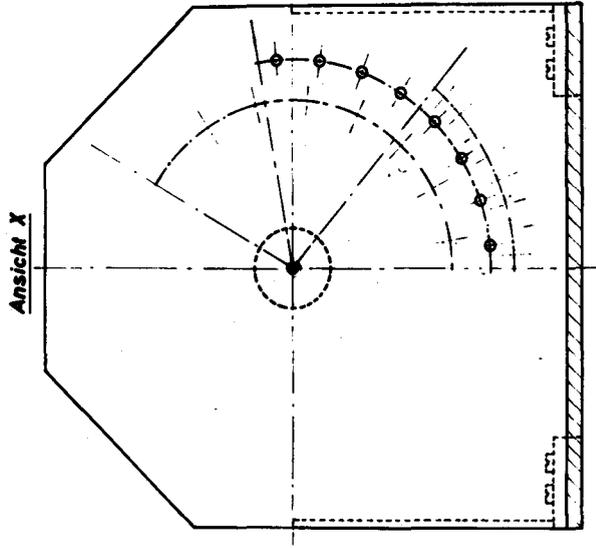


TYPE 1

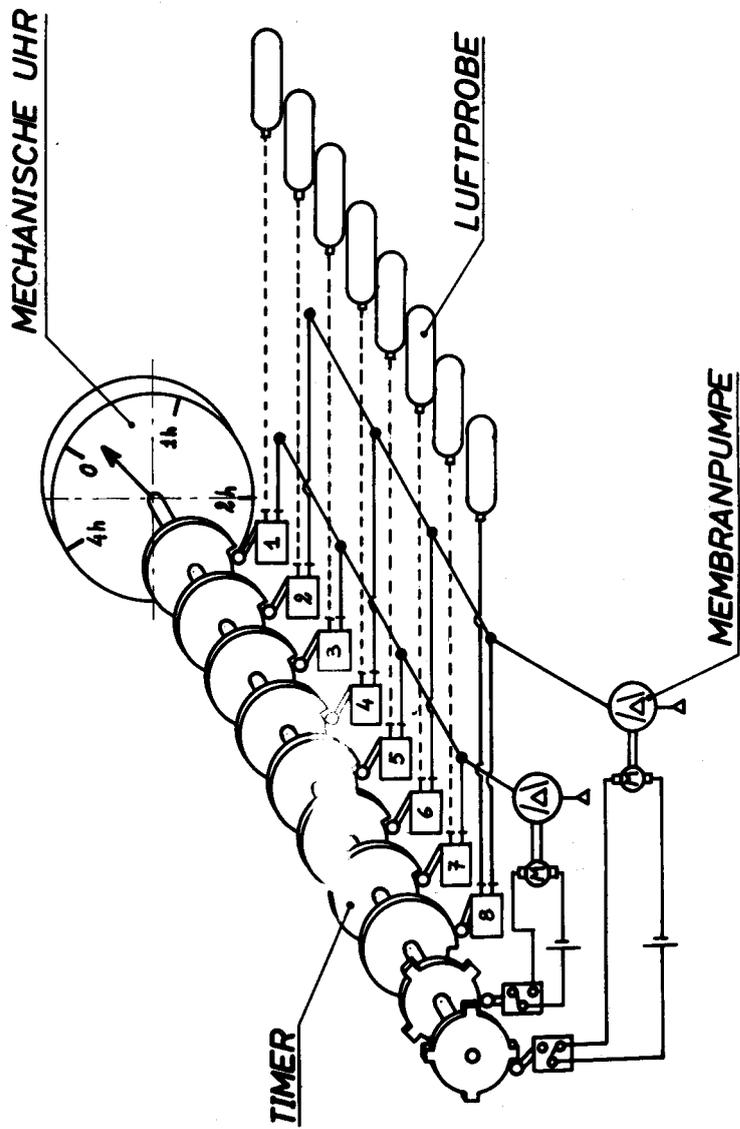
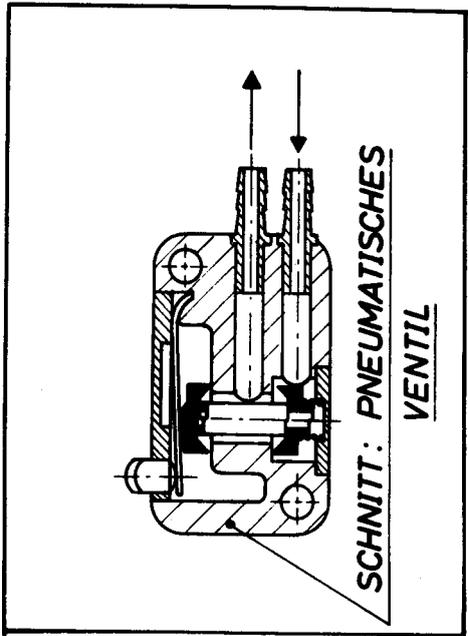




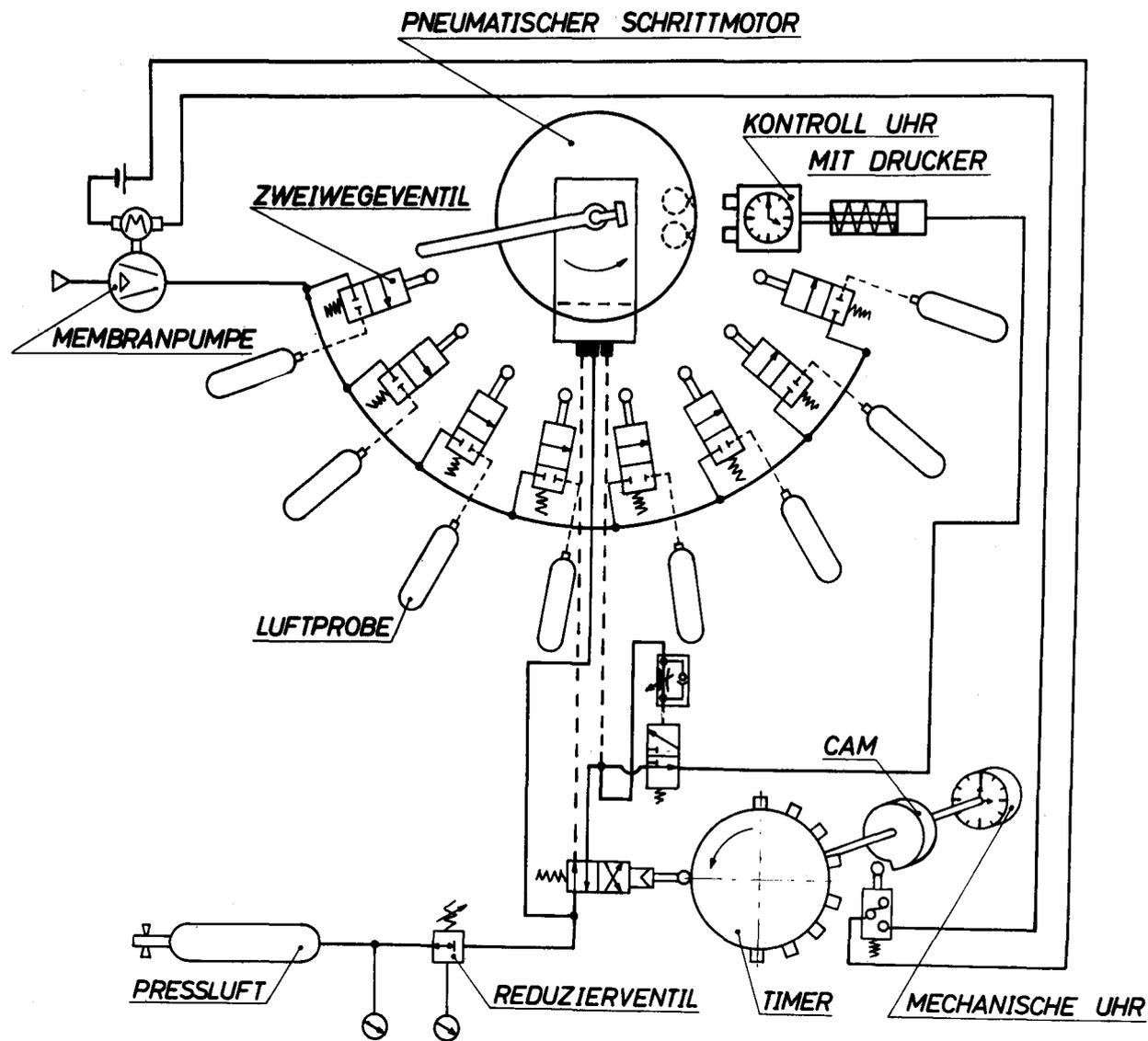
TYPE 3



TYP 4



TYP 5

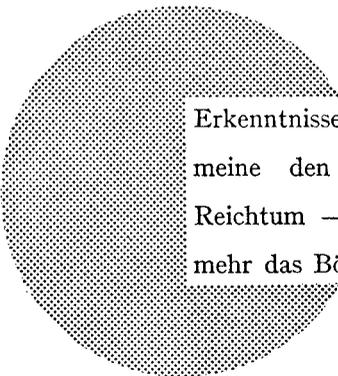


Typ 6

AN UNSERE LESER

Alle von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten wissenschaftlichen und technischen Berichte werden in der Monatszeitschrift „euro-abstracts“ angezeigt. Abonnement (1 Jahr: BF 1 025,—) und Probehefte sind erhältlich bei:

Amt für amtliche Veröffentlichungen
der Europäischen Gemeinschaften
Boîte postale 1003
Luxembourg



Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

VERTRIEBSSTELLEN

Alle von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichten Dokumente werden durch das Amt für amtliche Veröffentlichungen bei den unten angegebenen Anschriften zu dem auf dem Umschlag angegebenen Preis verkauft. Bei schriftlicher Bestellung bitte die genaue Referenz und den Titel des Dokumentes deutlich angeben.

DEUTSCHLAND (BR)

Verlag Bundesanzeiger
5 Köln 1 — Postfach 108 006
Tel. (0221) 21 03 48
Fernschreiber: Anzeiger Bonn 08 882 595
Postcheckkonto 834 00 Köln

NIEDERLANDE

Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf
Christoffel Plantijnstraat
's-Gravenhage — Tel. (070) 81 45 11
Postgiro 42 53 00

BELGIEN

Moniteur belge — Belgisch Staatsblad
Rue de Louvain 40-42 — Leuvenseweg 40-42
1000 Bruxelles — 1000 Brussel — Tel. 12 00 26
CCP 50-80 — Postgiro 50-80

Nebenstelle:
Librairie européenne — Europese Boekhandel
Rue de la Loi 244 — Wetstraat 244
1040 Bruxelles — 1040 Brussel

VEREINIGTES KÖNIGREICH

H.M. Stationery Office
P.O. Box 569
London S.E. 1 — Tel. 01-928 69 77, ext. 365

VEREINIGTE STAATEN VON AMERIKA

European Community Information Service
2100 M Street N.W.
Suite 707
Washington, D.C., 20 037 — Tel. 296 51 31

DÄNEMARK

J.H. Schultz — Boghandel
Møntergade 19
DK 1116 København K — Tel. 14 11 95

SCHWEIZ

Librairie Payot
6, rue Grenus
1211 Genève — Tel. 31 89 50
CCP 12-236 Genève

FRANKREICH

*Service de vente en France des publications
des Communautés européennes — Journal officiel*
26, rue Desaix — 75 732 Paris - Cédex 15*
Tel. (1) 306 51 00 — CCP Paris 23-96

SCHWEDEN

Librairie C.E. Fritze
2, Fredsgatan
Stockholm 16
Post Giro 193, Bank Giro 73/4015

GROSSHERZOGTUM LUXEMBURG

*Amt für amtliche Veröffentlichungen
der Europäischen Gemeinschaften*
Boîte postale 1003 — Luxembourg
Tel. 4 79 41 — CCP 191-90
Compte courant bancaire: BIL 8-109/6003/200

SPANIEN

Libreria Mundi-Prensa
Castelló 37
Madrid 1 — Tel. 275 51 31

IRLAND

Stationery Office — The Controller
Beggars' Bush
Dublin 4 — Tel. 76 54 01

ANDERE LÄNDER

ITALIEN

Libreria dello Stato
Piazza G. Verdi 10
00198 Roma — Tel. (6) 85 08
CCP 1/2640

*Amt für amtliche Veröffentlichungen
der Europäischen Gemeinschaften*
Boîte postale 1003 — Luxembourg
Tel. 4 79 41 — CCP 191-90
Compte courant bancaire: BIL 8-109/6003/300