

## Zur Ökotoxikologie von Luftschadstoffen

### II. Aufbau und Funktionsweise einer Expositionsanlage aus open-top Kammern zur Untersuchung von Immissionswirkungen auf Pflanzen

HANS-JOACHIM WEIGEL und HANS-JÜRGEN JÄGER

Institut für Produktions- und Ökotoxikologie

#### 1. Einleitung

Die Möglichkeiten, Auswirkungen gasförmiger Luftschadstoffe auf Pflanzen experimentell zu untersuchen und zu bewerten, reichen von reinen Freilandhebungen entlang vorgegebener natürlicher Schadstoffgradienten über kammerlose Freilandbegasungsmethoden und Freilandexpositionskammern bis hin zu Expositionssystemen, die unter Laborbedingungen betrieben werden und mit denen sich Klimabedingungen und Schadstoffangebot völlig kontrollieren lassen (EPA, 1987; Weigel und Jäger, 1988). Jede dieser Methoden hat eine Reihe von Vor- und Nachteilen und ihr Einsatz richtet sich in erster Linie nach der zu untersuchenden Fragestellung.

Mit den im Freiland einsetzbaren open-top Kammern steht ein Expositionssystem zur Verfügung, das entscheidende Vorteile von Untersuchungsmöglichkeiten in der freien Atmosphäre und in vollkontrollierbaren Systemen in sich vereinigt (EPA, 1987; Jäger et al., 1988a; Weigel und Jäger, 1988). Zur Untersuchung der Auswirkungen gasförmiger Immissionen auf Pflanzen sind diese Kammern in Europa - und hier speziell in der Bundesrepublik Deutschland - nur vereinzelt eingesetzt worden (Buckenham et al., 1982; Colvill et al., 1983; CEC, 1986; Weigel et al., 1987; Adaros et al., 1988). Umfangreiche Untersuchungen in den USA zur Auswirkung von O<sub>3</sub> auf Kulturpflanzen haben die Einsatzmöglichkeiten dieser Kammern jedoch eindrucksvoll bestätigt (Heck et al., 1982, 1984).

Das Design und die Konstruktion einer ursprünglich für landwirtschaftliche Kulturpflanzen entwickelten open-top Kammer (Heagle et al., 1973; Mandl et al., 1973) sind inzwischen mehrfach verändert worden, sodaß heute auch open-top Kammern für Untersuchungen an älteren Bäumen zur Verfügung stehen (EPA, 1987).

Grundsätzlich sind open-top Kammern auf zwei verschiedenen Wegen verwendbar: in Wachstumsvergleichen mit gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft und in Versuchen zur kontrollierten Zudosierung von atmosphärischen Schadstoffen (trockene und nasse Deposition).

Am Institut für Produktions- und Ökotoxikologie werden diese beiden Möglichkeiten unter Verwendung von z.Z. insgesamt 36 open-top Kammern des Typs nach Heagle et al. (1973) und Mandl et al. (1973) genutzt, um die Auswirkungen atmosphärischer Schadstoffe auf agrarische Ökosysteme (Dauergrünland) und auf die Produktionsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen experimentell zu untersuchen. Während über die Verwendung von open-top Kammern in Wachstumsvergleichen mit gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft z.B. bei Weigel et al. (1987) und bei Jäger et al. (1988b) berichtet wird, beschreibt der vorliegende Beitrag

den Aufbau und die Funktionsweise einer aus 24 open-top Kammern bestehenden Begasungsanlage (vgl. Abb. 1) zur kontrollierten Dosierung der Schadgase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>.

#### 2. Bau und Funktionsweise der Begasungsanlage

##### 2.1. Lageplan

Abb. 2 gibt einen schematischen Überblick über die Anordnung der open-top Kammern in der Begasungsanlage des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie. Für Wachstumsvergleiche zwischen den Kammern und der freien Atmosphäre wurden zusätzlich vier kammerlose Referenzflächen gleicher Grundfläche eingerichtet. Jede Kammer ist über einer ca. 20 cm dicken Kiesschicht errichtet worden, um die Gefahr von Staunässe an den als Topfkulturen gezogenen Versuchspflanzen zu verhindern. Alle Kammern sind über betonierte Gehwege zu erreichen. Jede open-top Kammer ist mit einer separaten Gebläse- und Filtereinheit ausgestattet sowie über beheizte Teflonleitungen mit den im angrenzenden Laborgebäude untergebrachten Schadgasdosier- und -meßsystemen verbunden. Im gleichen Gebäude befinden sich die Steuerung und die Wasserentnahmestelle einer automatischen Tropfbewässerungsanlage zur Wasserversorgung der Versuchspflanzen sowie eine Datenerfassungsanlage zur Speicherung und Verrechnung der anfallenden Klima- und Schadgasmeßwerte. Klimameßstationen sind in 3 open-top Kammern sowie



Abb. 1: Begasungsanlage des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie aus open-top Kammern. Zu sehen sind 18 von insgesamt 24 Kammern, ein Teil der Gebläse- bzw. Filtereinheiten sowie die Schadgasdosier- und -meßleitungen

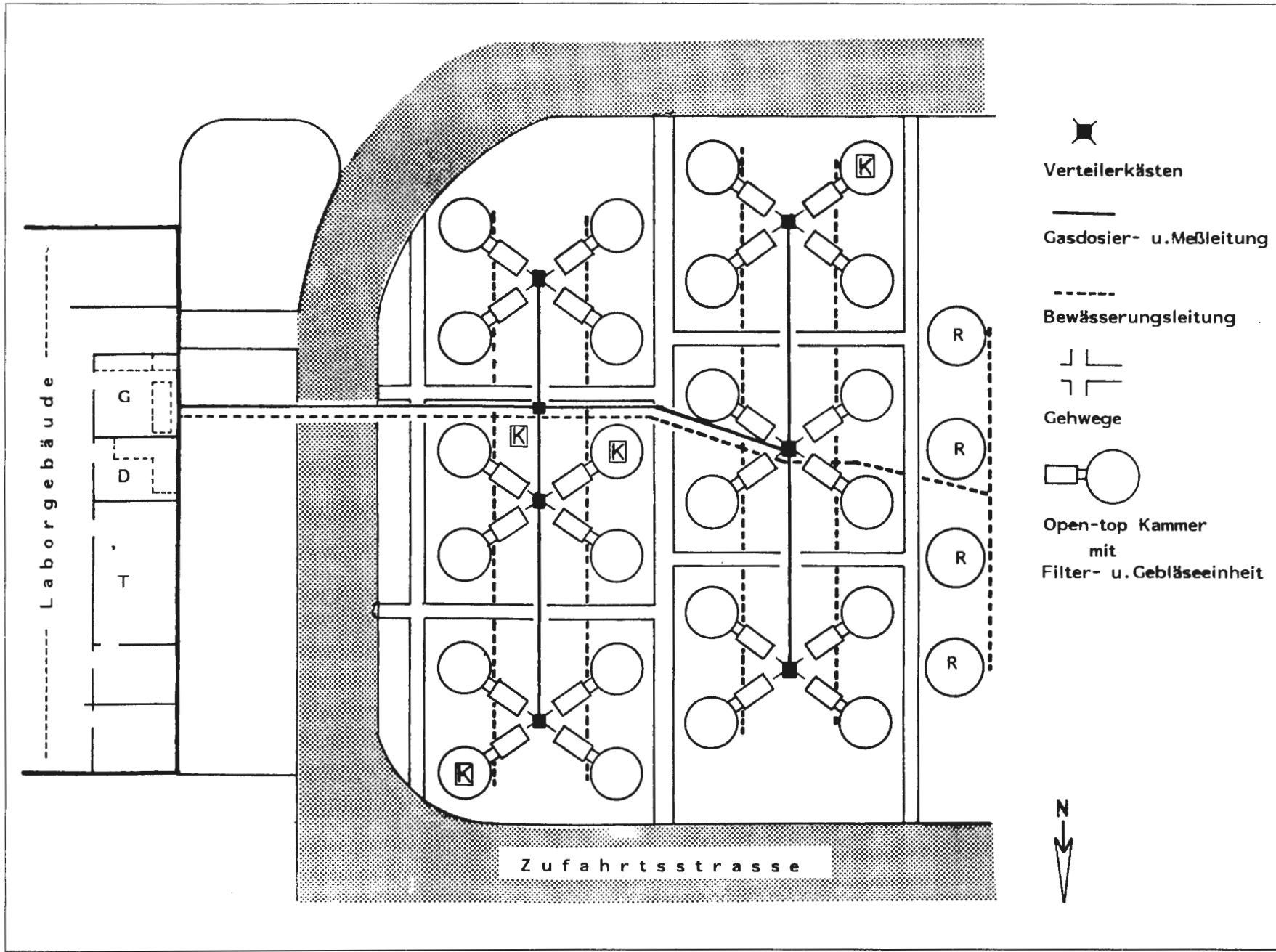


Abb. 2: Lageplan der Begasungsanlage aus open-top Kammern. K = Klimameßstation; R = kammerlose Referenzparzelle; G = Gasdosier- und -meßraum; D = Datenverarbeitung; T = Steuerung der Tropfbewässerung

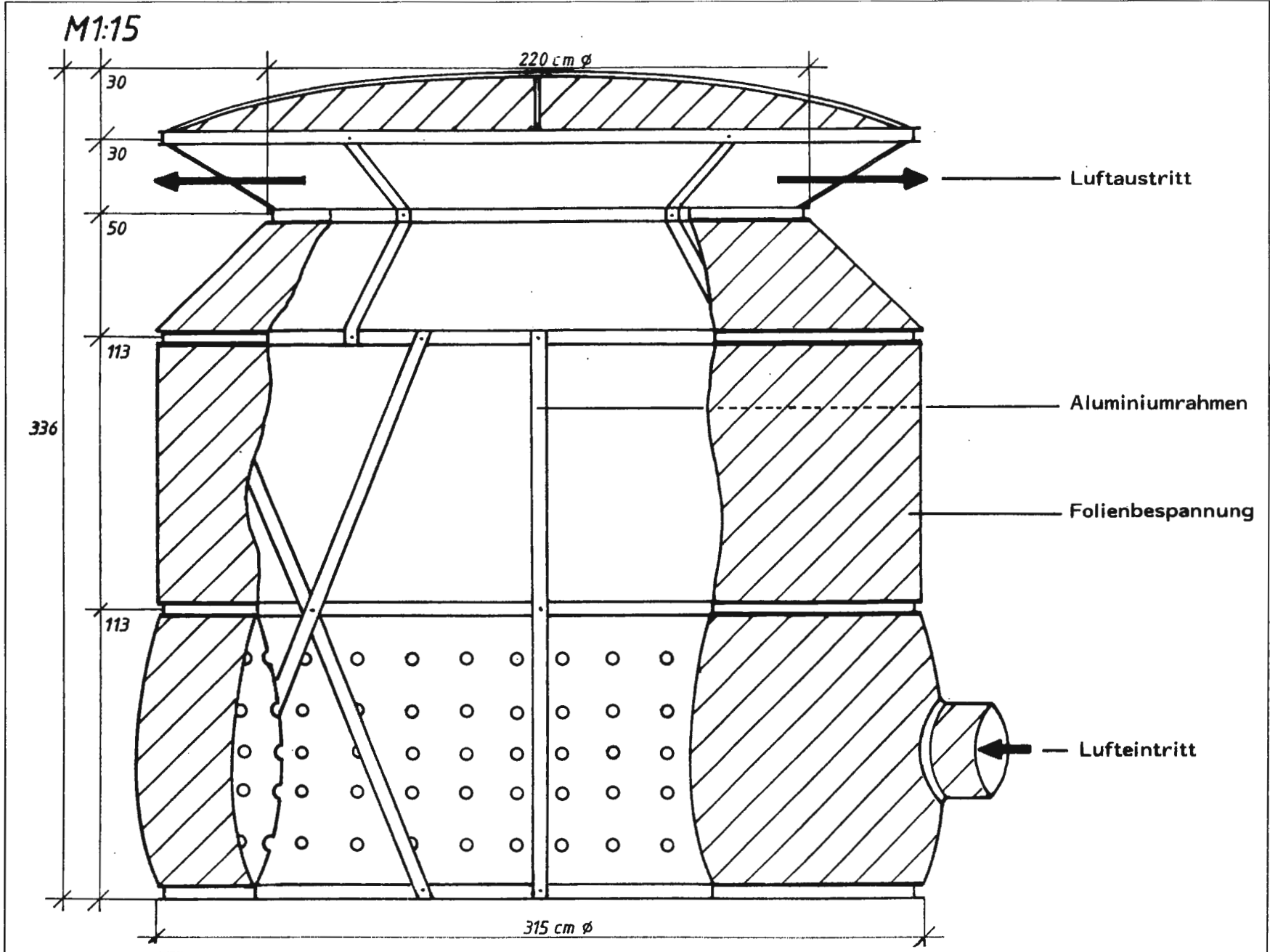
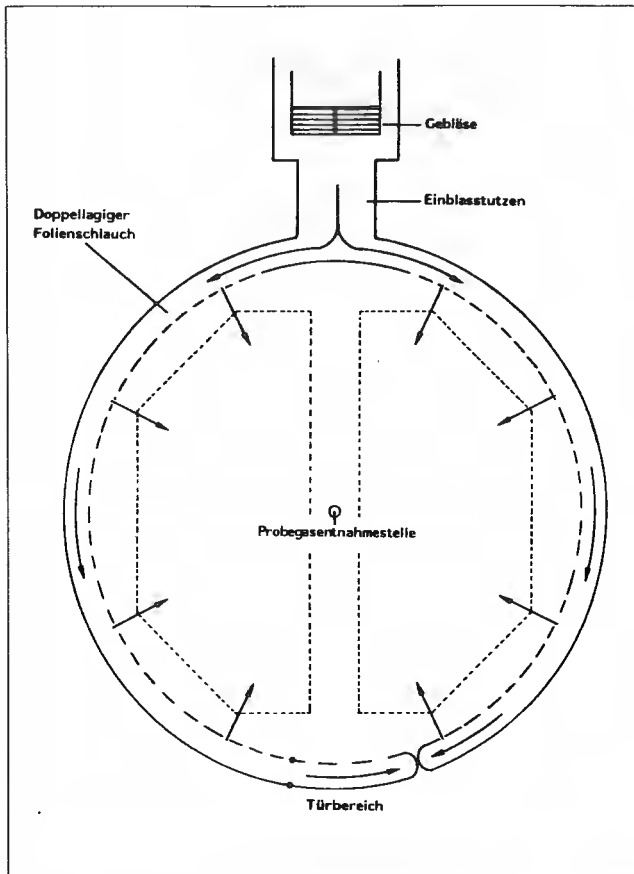


Abb.3: Schematisierte Darstellung einer open-top Kammer (Seitenansicht).



im Freiland errichtet worden. Im folgenden werden die Bausteine dieser Begasungsanlage detailliert beschrieben.

## 2.2. Open-top Kammern

Zu jeder open-top Kammer gehören:

- (1) das Kammergestell,
- (2) eine lichtdurchlässige Folie,
- (3) ein Gebläse zur Ventilation der Kammer,
- (4) Vorrichtungen zur Verteilung bzw. Vermischung der in die Kammern eingeblasenen Zuluft sowie
- (5) Staub-, Partikel- und Aktivkohlefilter zur Reduzierung der Schadstoffgehalte der Umgebungsluft.

Kammergestell und Folienbespannung wurden durch die Firma STOLTE /Diepholz hergestellt bzw. geliefert, die Gebläse- und Filtereinheit wurde nach Vorgaben des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie durch die Firma WIMA-KLIMATECHNIK/Garbsen gefertigt.

(1) Das Kammergestell ist eine zylinderförmige Rahmenkonstruktion aus Aluminium-U-Profilen und -bändern, die sich am oberen Ende konusförmig verengt und die mit einer Dachkonstruktion versehen ist (vgl. Abb.3). Jede Kammer hat eine Grundfläche von ca. 7,8 m<sup>2</sup>, eine Gesamthöhe von ca. 3,35 m und ein Volumen von ca. 21 m<sup>3</sup> (einschließlich des Kegelstumpfes).

(2) Bespannt sind die Kammern mit einer transparenten, UV-stabilisierten Polyäthylenfolie Typ SPR 3 (Hersteller: POLY-DRESS/Neumünster) von 0,2 mm Dicke, deren Lichtdurchlässigkeit im Bereich der photosynthetisch aktiven Strahlung bei ca. 88%-90% liegt. Jede Kammerbespannung besteht aus vier Teilen: Dachabdeckung, Kegelstumpf, obere-einlagige Folienbahn und untere-doppellagige Folienbahn. Die einzelnen Folieneile, an deren Rändern Seilkanäle angeschweißt sind, werden mit Hilfe von Nylonseilen an der Aluminiumrahmenkonstruktion befestigt, wodurch ein rasches Wechseln der Folienbespannung möglich ist. Der untere doppellagig ausge-

Abb.4: Querschnitt durch den unteren Teil einer open-top Kammer im Bereich der doppellagigen Folienschicht. Die Pfeile zeigen den Lufteintritt in die Kammer. Dargestellt ist ferner die durch eine Holzrahmenkonstruktion begrenzte effektive Nutzfläche zur Aufnahme der Pflanzencontainer (weitere Einzelheiten: vgl. Text).

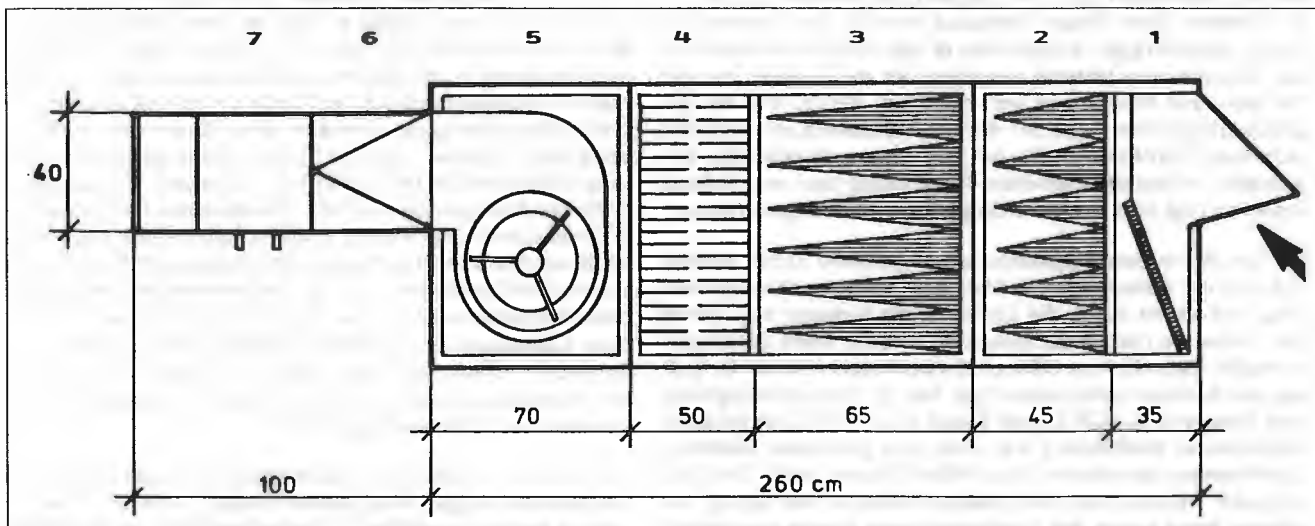


Abb.5: Schematisierte Darstellung einer zu jeder open-top Kammer gehörenden Gebläse- bzw. Filtereinheit (Seitenansicht). 1 = Ansaugöffnung mit Aluminiumgrobfilter; 2 = Textiltaschenfilter EU 4; 3 = Textiltaschenfilter EU 7; 4 = Aktivkohleplatten; 5 = Gebläse; 6 = Ausblasöffnung; 7 = Strömungsmeßvorrichtung. 2 und 3 sind in der Ansicht von oben gezeigt (weitere Einzelheiten: vgl. Text).

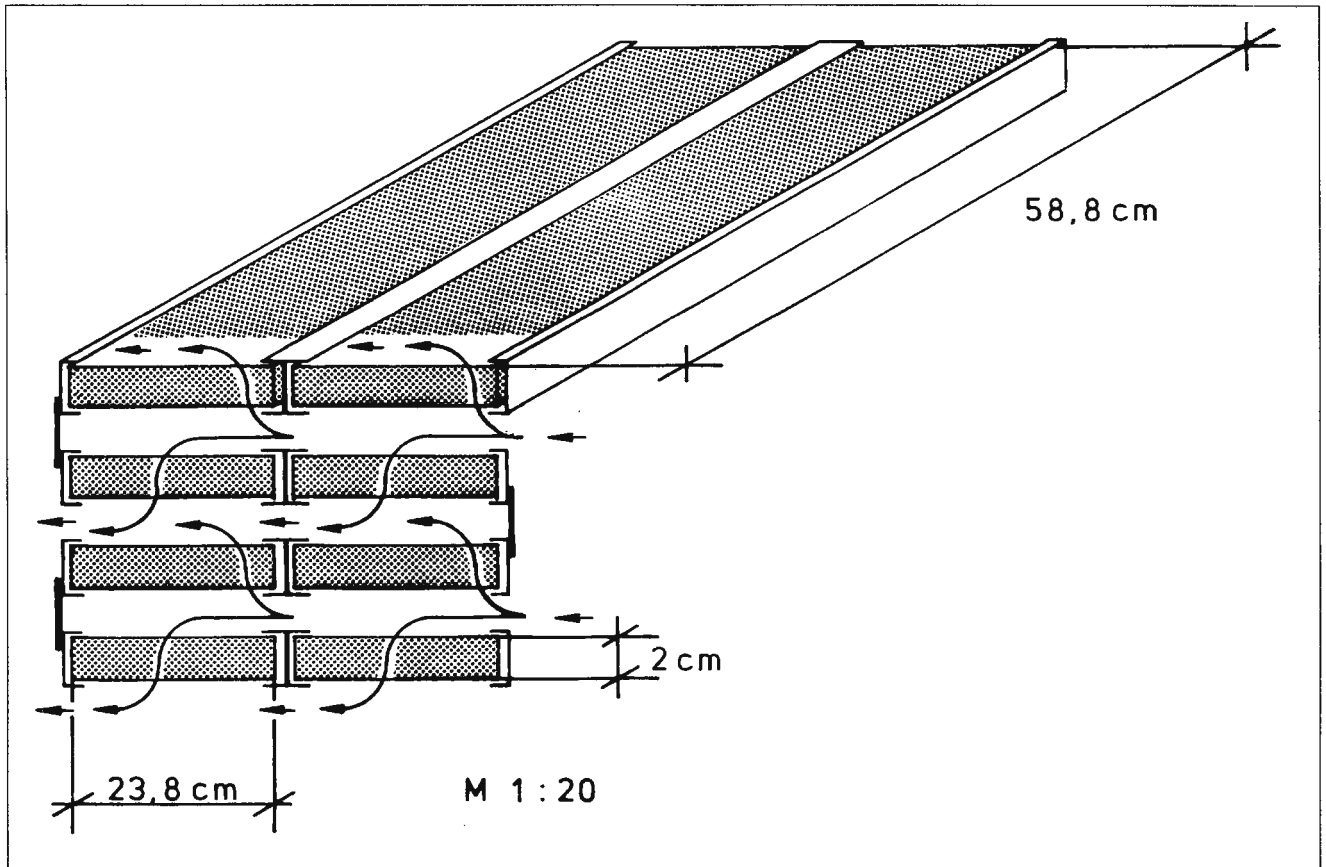


Abb.6: Schematisierte Detailzeichnung der in der Filtereinheit einer open-top Kammer enthaltenen Aktivkohleplatten. Die Pfeile zeigen die Strömungsverhältnisse entlang der Kohleplatten an.

führte Folienteil bildet einen Schlauch bzw. Kanal (vgl. Abb.3), der auf der zum Kammerinneren zeigenden Seite gelocht ist und damit der Luftzufuhr und -verteilung in die Kammer dient (vgl. Abb.4). Je nach Ausführung bzw. je nach Art der Versuchspflanzen sind 250 - 340 Löcher (Durchmesser 2,0 cm) in 5- 6 Reihen über diesen Folienteil verteilt. Der äußere Teil dieser doppellagigen Folienbahn ist mit einem Einblasstutzen aus dem gleichen Material versehen, der die Kammer mit der Gebläse- und Filtereinheit verbindet (vgl. Abb.4). Auf der gegenüberliegenden Seite zu diesem Einblasstutzen befindet sich eine Türöffnung, die auf die untere Folienbahn beschränkt ist und die entweder doppellagig und mit Löchern versehen (vgl. Abb.4) oder einlagig ohne Lochung sein kann.

(3) Die durch den Einblasstutzen zugeführte Zuluft verteilt sich in dem Folienschlauch über den gesamten Kammerumfang und strömt durch die Löcher in die Kammer ein. Durch den zwischen Dachabdeckung und oberem Rand des Kegelstumpfes befindlichen offenen Zwischenraum kann die Luft aus der Kammer entweichen (vgl. Abb. 3). Die ursprüngliche, von Heagle et al. (1973) und Mandl et al. (1973) entwickelte zylindrische Ausführung war über den gesamten Kammerdurchmesser am oberen Ende offen ("open-top"). Die hier gezeigte Kammer mit der kragenförmigen Verengung am oberen Rand sowie der Dachabdeckung wurde entwickelt, um das Eindringen von Fremdluft - vor allem bei hohen Windgeschwindigkeiten in der Umgebung - zu mindern und um den natürlichen Niederschlag auszuschließen (Buckingham et al., 1981; Hogsett et al., 1985). Die in die Kammer eingeblasene Zuluft kann entweder ungefiltert, mit Aktivkohle

gefiltert oder mit Gasen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , etc.) angereichert sein.

(4) Bei dem in einem eloxierten Aluminiumgehäuse untergebrachten Zuluftgebläse (Fabrikat GEBHARDT Typ SZA 11-315-4, Silentovent) handelt es sich um einen doppelseitig saugenden Radialventilator (vgl. Abb.5). Das Gebläse ist stufenlos drehzahl geregelt und für eine Luftleistung von  $3000 \text{ m}^3/\text{h}$  bei einem Gesamtgedruck von  $\Delta p = 450 \text{ Pa}$  ausgelegt. In der Ausblasöffnung der Gebläse- bzw. Filtereinheit ist druckseitig zum Gebläse (vgl. Abb.5) eine Strömungsmeßvorrichtung (Hersteller: TROX/Neukirchen) eingebaut, die nach dem Differenzdruckprinzip arbeitet. Mittels eines transportablen Differenzdruckmanometers können Luftleistung und damit auch Luftdurchsatz durch jede open-top Kammer bzw. deren Luftwechsel/Zeiteinheit über die Gebläsedrehzahl eingeregelt und überprüft werden. Zur Zeit werden die Kammern mit einer Luftmenge von  $2200 \text{ m}^3/\text{h}$  versorgt, woraus sich ein ca. 1,9-facher Luftwechsel/min ergibt. Die Zulufrate ist auch bei der Einstellung bestimmter Schadgasatmosphären in den Kammern zu berücksichtigen (s.u.).

(5) Zur Reduzierung bzw. Ausfilterung der in der Kammerzuluft enthaltenen gas- und partikelförmigen Schadstoffe sind in dem in Abb.5 dargestellten Gehäuse weiterhin folgende Filtersysteme untergebracht: während ein mechanisches Grobfilter aus Aluminium größere Verunreinigungen wie Blätter und Insekten zurückhält, werden Grob- und Feinstaub durch Vorfilter der Güteklasse EU 4 und Feinstfilter der Güteklasse EU 7, die beide als Textiltaschenfilter ausgeführt sind, ausgefiltert.

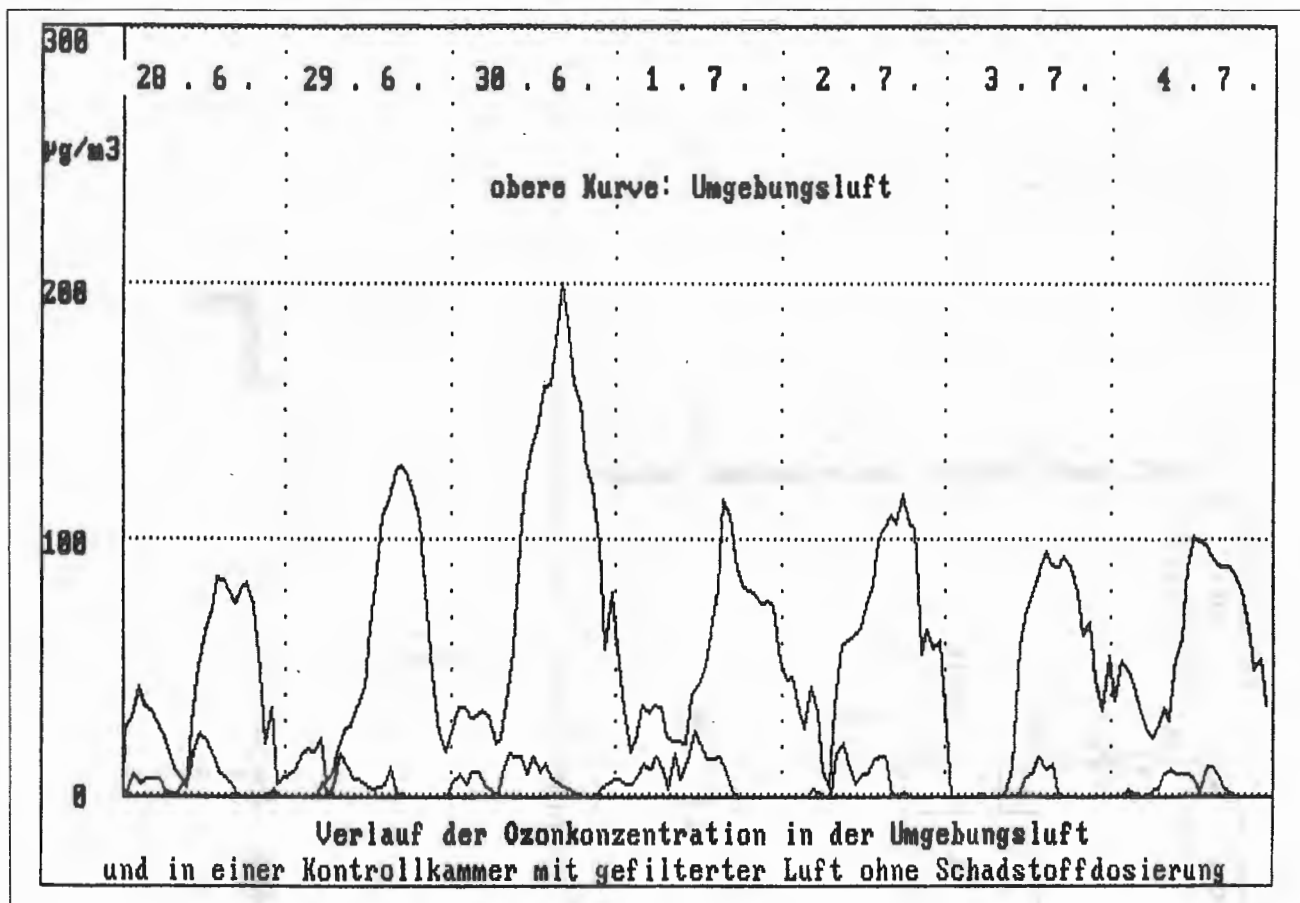


Abb.7: Beispiel für die "Ausschlußeffizienz" der open-top Kammern für Schadgase der Umgebungsluft: Tagesgänge der O<sub>3</sub>-Konzentrationen während einer Woche in der Vegetationsperiode 1987.

Die Reduktion der Konzentrationen gasförmiger Luftschadstoffe wie SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> geschieht durch Aktivkohleplatten Typ NORITHENE™ RBBA (Hersteller: NORIT Adsorptions GmbH, Düsseldorf). Aus den Abb. 5 und 6 wird ersichtlich, wie je 40 dieser aus granulierter Aktivkohle hergestellten Platten, die mit KOH imprägniert und mit einem Rand aus Polyurethanschaum versehen sind, in der Gebläse- bzw. Filtereinheit untergebracht bzw. wie die Strömungsverhältnisse entlang der Platten sind. Die Filtereffizienz der Aktivkohle bestimmt neben dem Ausmaß des Fremdlufteinfalls durch den oben offenen Teil der open-top Kammer die gesamte "Ausschlußeffizienz" für ein bestimmtes Schadgas.

Abb.7 zeigt anhand eines Vergleichs der O<sub>3</sub>-Konzentrationen in der Umgebungsluft und innerhalb einer open-top Kammer, die nur mit gefilterter Luft versorgt wurde, ein Beispiel für die Effektivität der Schadgasreduktion.

Durch die alkalische Imprägnierung der Kohleplatten werden ähnliche Filtereigenschaften auch für die "sauren" Schadgase SO<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub> erzielt. NO wird durch den oben beschriebenen Kohletyp dagegen nicht aus der Kammerzuluft entfernt. Der Verschmutzungsgrad der Taschenfilter und der Aktivkohle wird ebenfalls durch Differenzdruckmessungen an entsprechend vorbereiteten Stellen des Aluminiumgehäuses der Filtereinheiten regelmäßig kontrolliert.

### 2.3. Schadgasdosierung

Zur kontrollierten Beaufschlagung der in den open-top Kammern kultivierten Versuchspflanzen mit den gasförmigen Schadstoffen SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> wurde von der Firma MESSER-GRIESHEIM/Duisburg nach Plänen des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie ein Schadgasdosiersystem entwickelt und aufgebaut, das in Abb.8 vereinfacht-schematisch dargestellt ist. Das System, das so ausgelegt ist, daß es jederzeit auf andere Gase (z.B. CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) umgerüstet werden kann, setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- den Dosiergasversorgungen für die Gase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>
- der Dosiersteuereinheit und
- den zu den open-top Kammern hinführenden Dosierleitungen.

#### 2.3.1. Dosiergasversorgung

Die Entnahmestellen für die Flaschengase SO<sub>2</sub> (99,98%; 63,4 kg) und NO<sub>2</sub> (99,80%; 65 kg) sowie des zur O<sub>3</sub>-Erzeugung notwendigen Sauerstoffs und der synthetischen Luft für die NO<sub>2</sub>-Verdünnung (s.u.) sind aus Sicherheitsgründen in einer stark ventilierten, begehbaren Abzugseinheit untergebracht. Die Gasentnahmestellen sind bestückt mit Entnahmedruckminderern, 2/2- Wege Magnetventilen als Absperrvorrichtungen und

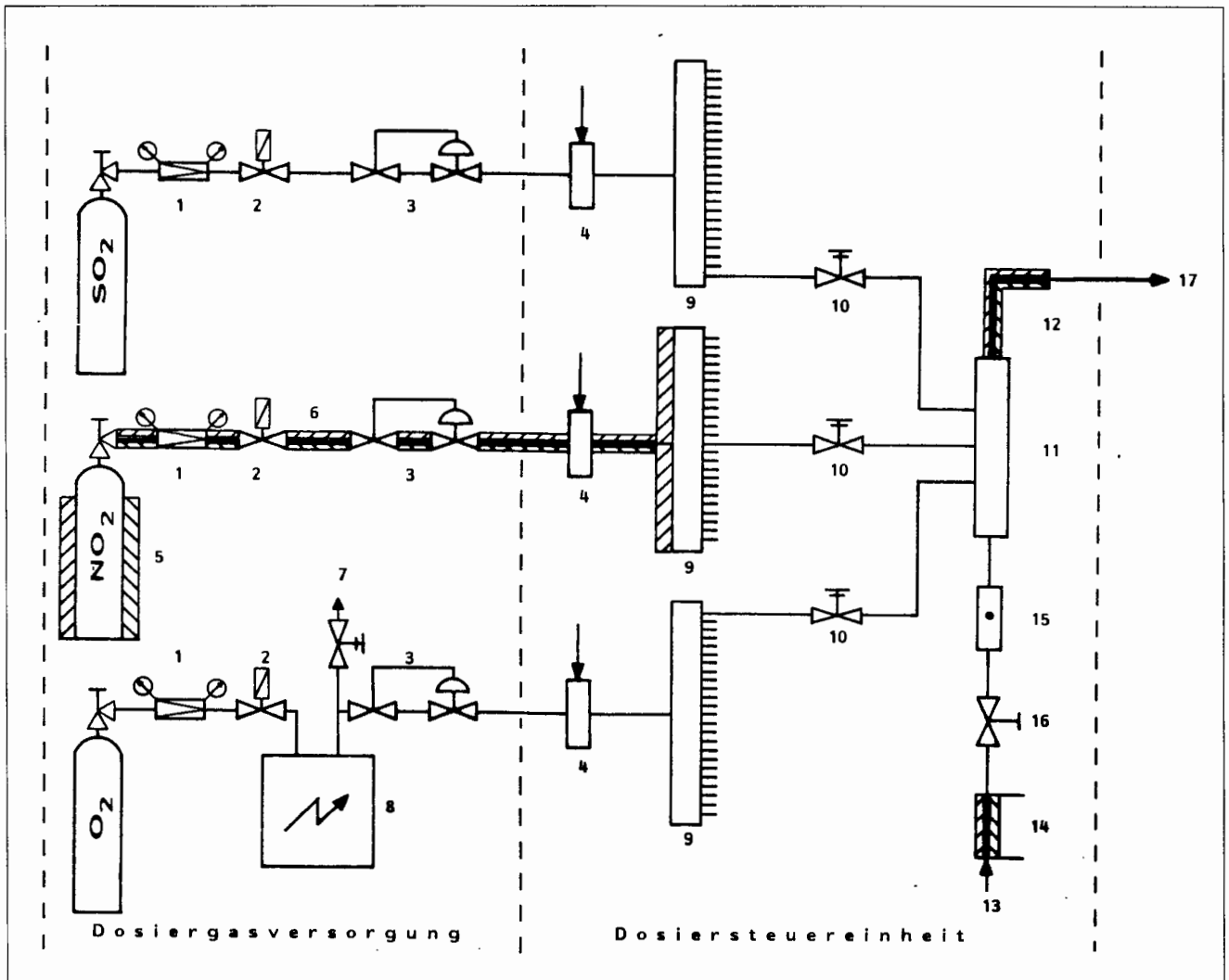


Abb. 8: Vereinfacht-schematisierte Darstellung des Systems zur Dosierung der Gase  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_3$  in open-top Kammern. 1-3 = Feinstdruckminderer; 4 = thermischer Massendurchflußregler; 5 = Jackenheizung; 6 = Begleitheizung; 7 = Bypass; 8 =  $\text{O}_3$ -Generator; 9 = Gasverteiler; 10 = Feinst-Dosierventile; 11 = PTFE-Mischbehälter; 12 = Begleitheizung zu den Kammern; 13 = Verdünnungsluftzuführung; 14 = Gaswärmegerät; 15 = Durchflußmesser; 16 = Regelventil; 17 = Dosierleitung zu den open-top Kammern. Der Übersicht halber ist die Gasdosierung hinter den Gasverteilern nur für eine Kammer dargestellt (weitere Einzelheiten: vgl.Text).

Druckmindererufen für Hinterdrücke von 0-2,5 bar. Reines  $\text{NO}_2$  wird mit Hilfe der synthetischen Luft auf ca. 6 % vorverdünnt. Da der Siedepunkt des  $\text{NO}_2$  bei  $21.1^\circ\text{C}$  liegt, wird die  $\text{NO}_2$ -Flasche mit einer Jackenheizung auf ca.  $35^\circ\text{C}$  beheizt. Um Kondensationen des  $\text{NO}_2$  im gesamten übrigen Dosiersystem zu vermeiden, werden außerdem sämtliche  $\text{NO}_2$ -führenden Teile (Leitungen, Ventile, Verteiler etc.) mit einer Begleitheizung thermostatisiert.  $\text{O}_3$  wird aus getrocknetem, medizinischen Sauerstoff mittels stiller elektrischer Entladung (FISCHER  $\text{O}_3$ -Generator Modell 503) erzeugt, wobei überschüssiges  $\text{O}_3$  über eine Bypass-Vorrichtung abgeleitet werden kann. Da die  $\text{O}_3$ -Dosierung diskontinuierlich erfolgt, werden die Sauerstoff- und Stromversorgung des  $\text{O}_3$ -Generators über Zeitschaltuhren angesteuert.

Von den Gasentnahmestellen werden die Schadgase über Edelstahl- ( $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_2$ ) oder Teflon (PTFE = Polytetrafluoräthylen)-Leitungen ( $\text{O}_3$ ) der Dosiersteuereinheit zugeführt.

### 2.3.2. Dosiersteuereinheit

Die in einem 19-Zoll Schrank untergebrachte Dosiersteuereinheit enthält die Elektronik zur Schadgassteuerung und zur Verdünnungsluftverschaltung, den Dosierventileinschub, die Mischkammerverschaltung, die Verdünnungsluftverteilung sowie eine Temperaturreglereinheit für die  $\text{NO}_2$ -Dosierheizung von der Gasentnahmestelle über die Dosiersteuereinheit bis hin zum Ende der Dosierleitungen an den open-top Kammern (s.u.). Die Steuerung des Schadgasdurchflusses für die Dosierung erfolgt über thermische Massendurchflußregler (Hersteller: TYLAN), die als Regler oder Durchflußmesser fungieren können (vgl. Abb.8). Über die eingebaute Elektronik lassen sich Schadgasmengen vorwählen und Ist- bzw. Soll durchflußmengen digital ablesen. Über diese thermischen Massendurchflußregler ist zudem die Möglichkeit gegeben, die Schadgasdosierung bei Bedarf durch einen rückgekoppelten Regelkreis zu automatisieren. Die von den thermischen Massendurchflußreglern wegführenden Gasleitungen sind in der Dosiersteuereinheit an Gasverteiler aus V4A



Abb.9: Teilansicht der open-top Kammern und der Gebläse- bzw. Filtereinheiten mit den auf Kabelpritschen montierten, mit Isoliermaterial umhüllten Dosier- und Meßgasleitungen sowie der Stromversorgung der Gebläse. Die Dosierleitungen für die Schadgase münden vor den Kammern in die Gebläse- bzw. Filtereinheit.

Stahl mit je 24 Gasabgängen angeschlossen. Direkt an diesen Gasverteiltern befinden sich Feinst-Dosierventile aus V4A-Stahl mit einem Regelbereich von 0-100 ml/min, mit denen eine präzise Regulation der Gasflüsse möglich ist und mit denen die für die einzelne open-top Kammer gewünschte Schadgasatmosphäre eingestellt wird. Um jede der 24 open-top Kammern gleichzeitig mit allen drei Gasen versorgen zu können, sind insgesamt 72 dieser Ventile (3/open-top Kammer) eingebaut. Nach Verlassen der Ventile werden die entsprechend angewählten Gaskomponenten Mischbehältern aus PTFE zugeführt, von denen 24 Stück vorhanden sind und die über je 4 Gaseingänge und je einen Gasausgang verfügen. Hier erfolgt zum einen die Mischung der Reingase untereinander (bei Kombinationsbegasungen) und zum anderen deren Verdünnung und Vermischung mit aufbereiteter Verdünnungsluft. Öl- und wasserfreie Verdünnungsluft (=Druckluft) wird durch eine Druckluftanlage (Hersteller: MAHLE) mit nachgeschalteter Adsorptionstrockneranlage (ZANDER/Essen) erzeugt, nach Erwärmung mit einem Gaswärmegerät über 2 Luftverteiler an 24 Durchflußmesser mit Regelventilen verteilt und den PTFE-Mischkammern zugeführt. Der Verdünnungsluftfluß ist zwischen 10-60 l/h regelbar. Der Verdünnungsluftdruck ist über einen Druckminderer einstellbar (0.4-0.6 bar) und derart mit den Absperrventilen an den Gasentnahmestellen (s.o) verschaltet, daß bei Druckabfall bzw. einem Verdünnungsluftausfall die Zufuhr der unverdünnten Gase in die Dosiersteuereinheit automatisch unterbrochen wird.

### 2.3.3. Gasdosierleitungen

Von jeder der 24 Mischkammern der Gasdosiersteuereinheit führt eine 5 x 1 mm starke PTFE-Leitung zu dem Gebläseteil einer open-top Kammer (vgl. Abb.1, 2 und 9). Alle 24 Dosierleitungen sind in einem Hochtemperaturrohr (40 mm) zusammengefaßt, mit einer Begleitheizung versehen und durch eine Isolierung aus ARMAFLEX™ umhüllt. Außerhalb des Gasdosier- bzw. -meßraumes verlaufen die zu den open-top Kammern führenden Dosiergasleitungen (ebenso wie die Meßgasleitungen, s.u.) in ca. 2 m Höhe auf Kabelpritschen. An den Abzweigstellen und Rohrenden sind Isolierstoffgehäuse mit

Klemmleisten installiert. Jede Dosierleitung mündet in den Gebläseteil der Filter- bzw. Gebläseeinheit (vgl. Abb.9), wo sie sich teilt und wo mit Hilfe zweier an den Leitungsenden angebrachter Düsen die Einzelgase oder deren Gemische in den Zuluftstrom zu den open-top Kammern eingespeist werden. Durch die festgelegte Gebläseleistung erfolgt hier eine gründliche Vermischung der Zuluft mit den Schadgasen sowie deren endgültige Verdünnung auf die für die jeweilige open-top Kammer vorgewählte Konzentration.

## 2.4. Schadgasmessung

Zur Interpretation möglicher Schadwirkungen an den für die Wirkungsuntersuchungen eingesetzten Versuchspflanzen ist die genaue Kenntnis der jeweiligen Belastungshistorie durch die angewählten Schadgase erforderlich. Zur Kontrolle bzw. Überwachung der in den einzelnen open-top Kammern eingestellten Schadgasatmosphären wurde daher ein Schadgasmeßsystem aufgebaut, das diese Forderung erfüllt. Zu diesem System gehören eine Meßgaseinheit, die Meßstellenleitungen sowie die eigentliche Schadgasanalytik.

### 2.4.1. Meßgaseinheit

Aufgabe der Meßgaseinheit ist die Ansteuerung der einzelnen open-top Kammern für die Probegasentnahme sowie die kontinuierliche Meßgasabsaugung für die Gasanalyse. Der gaspneumatische Aufbau der gesamten Einheit, die ebenfalls durch die Firma MESSER-GRIESHEIM/Duisburg realisiert wurde, ist in Abb.10 schematisch dargestellt. Zu der Meßgaseinheit gehören die elektronische Meßgassteuerung, die Magnetventile, die Behälter für die Probegasvorabsaugung und die Meßgasabsaugung, die Membrankompressoren sowie die Temperaturregelung für die Begleitheizung der zu den open-top Kammern führenden Meßstellenleitungen. Zusätzlich zu den 24 open-top Kammern werden die Konzentrationen der Schadgase im Gasdosiererraum und in der Umgebung der open-top Kammern mitüberwacht (vgl. Abb.10), d.h. insgesamt sind 26 Meßstellen vorhanden. Zur Messung einer Schadgaskomponente (z.B. SO<sub>2</sub>) stehen jeweils drei Analysengeräte zur Verfügung (s.u.). Da die Schadgasatmosphäre jeder open-top Kammer möglichst oft kontrolliert werden soll, ist die Meßgasabsaugung derart geschaltet, daß getrennt in eine Gruppe zu 8 bzw. zwei Gruppen zu 9 Meßstellen, jede Meßstelle kontinuierlich abgesaugt wird. Diese kontinuierliche Probegasvorabsaugung erfolgt durch drei Membrankompressoren (je 28 l/min), deren Absaugleistung pro open-top Kammer bei ca. 1 l/min liegt. Bei der längsten Meßstellenleitung von ca. 70 m ergibt sich damit eine Probegasverweilzeit zwischen open-top Kammer und Meßgaseinheit, die kleiner als 40 sec ist. Wird eine der Meßstellen über ein Magnetventil angewählt, sorgt ein zweiter Saugkreis (vgl. Abb.10) für die Meßgasabsaugung, d.h. Probegas wird durch Membrankompressoren geringerer Leistung (5 l/min) abgesaugt und in die Probegassammelbehälter gedrückt, wo das Gas für die Analysensysteme (s.u.) bereitsteht. Die Funktion aller Membrankompressoren wird mit Durchflußschaltern überwacht, die bei Fehlfunktion (1/3 des Sollwertes) einen Alarm auslösen. Überschüssiges Gas wird aus beiden Saugkreisen herausgeführt und über die Abzugseinheit abgeleitet.

Die Ansteuerung der Meßstellen erfolgt über eine freiprogrammierbare Steuerung (MELSEC F2-40 M). Die dazugehörigen Schaltfunktionen erlauben im Automatik- oder im Handbetrieb u.a. ein Ausblenden einzelner Meßstellen oder



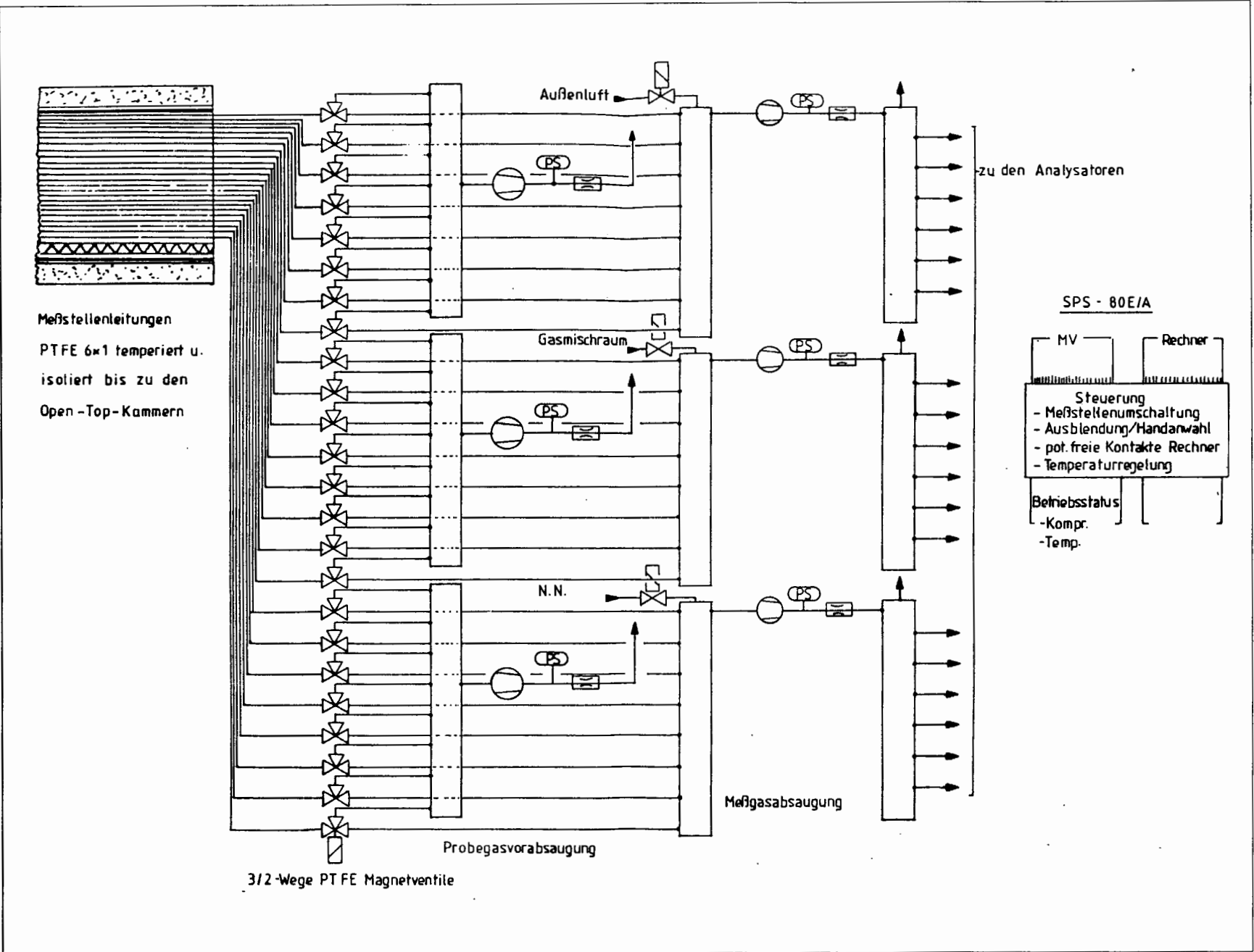


Abb. 10: Schematisierte Darstellung des Schadgasmeßsystems (Ohne Schadgasmonitore) zur Konzentrationsmessung der in die open-top Kammer eindestrieren Gase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> (Zeichnung: MESSER-GRIESHEIM/Duisburg).

eine manuelle Anwahl der 24 bzw. 26 Meßstellen, wobei das Zeitraster des Meßzyklus in Schritten von 30 sec von 30-270 sec einstellbar ist. Für einen eventuellen Rechneranschluß stehen pro Meßstelle ein potentialfreier Kontakt zur Verfügung (vgl. Mejer et al., 1989).

#### 2.4.2. Meßstellenleitungen

Jede open-top Kammer ist über eine 6 x 1 mm starke PTFE-Leitung mit der Meßgaseinheit verbunden. Ebenso wie die Dosierleitungen (s.o) sind insgesamt 24 Meßgasleitungen in einem Hochtemperaturrohr zusammengefaßt, mit einer Begleitheizung bzw. einer Isolierung aus ARMAFLEX™ versehen und außerhalb des Gasdosier- bzw. -meßraumes in 2 m Höhe auf Kabelpritschen montiert (vgl. Abb.9). Die Probegasentnahmestelle befindet sich im Zentrum jeder open-top Kammer (vgl. Abb.4) in ca. 50 cm Höhe über dem Erdboden, kann jedoch der jeweiligen Höhe eines Versuchspflanzenbestandes angepaßt werden.

#### 2.4.3. Schadgasanalytik

Mit insgesamt neun Monitoren der Firma MONITOR LABS (ML) werden die Konzentrationen der Schadgase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> (einschließlich NO und NO<sub>x</sub>) und O<sub>3</sub> in den Gasproben der angewählten Meßstellen (=open-top Kammern) bestimmt, wobei für die betreffende Gaskomponente einer Meßstellen-Gruppe (s.o) je ein Gerät zur Verfügung steht. Die Meßverfahren für die einzelnen Gase sind: SO<sub>2</sub> = UV-Fluoreszenz (ML Modell 8850), NO<sub>2</sub> = Chemilumineszenz (ML Modell 8840) und O<sub>3</sub> = UV-Absorption (ML Modell 8810). Die Gasanalyse bzw. die Gasabsaugung durch die Pumpen der Monitore erfolgt aus den Probegassammelbehältern der Meßgaseinheit (vgl. Abb.10). Da die Länge eines Meßzyklus pro Meßstelle durch die kontinuierliche Probegasvorabsaugung praktisch ausschließlich durch die Ansprechgeschwindigkeit der Schadgasmonitore bestimmt wird, wobei die größte Verzögerungszeit durch die SO<sub>2</sub>-Monitore vorgegeben ist, konnte ein Meßzyklus von lediglich 6 min pro Meßstelle realisiert werden. Daraus ergibt sich, daß eine Konzentrationsmessung pro Meßstelle etwa 1 x pro Stunde, d.h. ca. 24 x pro Tag erfolgt (vgl. Mejer et al., 1988).

Alle Monitore werden in regelmäßigen Abständen mittels eines MONITOR LABS Prüfgasgenerators (ML Modell 8550) für die Gase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub> sowie für Null-Luft kalibriert.

#### 2.5. Klimaüberwachung

Um mögliche Schädwirkungen an den in den open-top Kammern kultivierten Versuchspflanzen ursächlich auf die zugesetzten Gase zurückführen zu können, müssen auch die übrigen für das Pflanzenwachstum relevanten Parameter - und hier vor allem die Klimabedingungen - bekannt sein. Darunter sind nicht nur die Einflüsse des Klimas an sich auf die Pflanzenentwicklung zu verstehen, sondern auch die durch das Expositionssystem ( d.h. die open-top Kammer) verursachten Klimaabweichungen von den Freilandverhältnissen. Im Bereich der Begasungsanlage wurden deshalb 4 Klimameßstationen aufgebaut, von denen 3 mobile Ausführungen für Messungen innerhalb der open-top Kammern vorgesehen sind und beliebig auf verschiedene Kammern verteilt werden



Abb.11: Blick in eine open-top Kammer mit Topfkulturen von Raps, Weidelgras und Gerste. Zu erkennen ist ferner die Holzkonstruktion zur Aufnahme der Pflanzencontainer.

können, während eine an einem Wettermast festinstallierte Meßstation das Freilandklima überwacht (vgl. Abb.2). Erfasst werden die Parameter Strahlung, relative Luftfeuchte, Temperatur und (nur im Freiland) Windgeschwindigkeit. Zur Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) im Bereich von 400-700 nm werden Quantumsensoren vom Typ Li 190-SB (Hersteller: LiCOR/Lincoln, Nebraska; Vertrieb: WALZ/Effeltrich) eingesetzt. Die Temperaturmessungen werden mit Widerstandsfühlern Pt-100 durchgeführt, wobei die relative Luftfeuchte psychrometrisch aus den Feuchte- und Trocken-temperaturen ermittelt wird. Die Windgeschwindigkeit im Freiland (Bereich 0,5- 30 m/sec) , die zur Bewertung des Fremdlufteinfalls in die open-top Kammern durch deren oberen offenen Teil benötigt wird (vgl. Jäger et al., 1988a), wird durch einen Windgeschwindigkeitsgeber (Hersteller: THIES/Göttingen) gemessen. Die Meßwertgeber für alle Klimaparameter sind mit Meßverstärkern ausgestattet.

#### 2.6. Datenerfassung

Während des Betriebs der Begasungsanlage fallen Daten aus dem im Multiplexverfahren arbeitenden Schadgaskonzentrationsmessungen der 26 Meßstellen sowie aus den kontinuierlich messenden Klimameßstationen an. Zur Erfassung, Speicherung und Verrechnung dieser Datenmengen wurde mit Hilfe des Instituts für Biosystemtechnik der FAL eine Datenerfassungsanlage entworfen und installiert, mit deren Hilfe nicht nur eine Datensicherung im Hinblick auf die Korrelation - Schadgasbelastung <=> phytotoxische Wirkung - nach Versuchsende (d.h. nach den Wirkungserhebungen) möglich ist, sondern die über entsprechende Bildschirmgraphiken auch eine ad hoc Überwachung bzw. Kontrolle der laufenden Schadgasdosierung ermöglicht. Aufbau und Funktionsweise dieses Datenerfassungssystems einschließlich der eingesetzten Hard- und Software sind bei Mejer et al. (1989) detailliert dargestellt.

#### 2.7. Pflanzenanzucht/Tropfbewässerungsanlage

In ihrer derzeitigen Form ist die Begasungsanlage so ausgelegt, daß Versuchspflanzen in den open-top Kammern nur als Topfkulturen kultiviert werden können. Die unter den Kam-

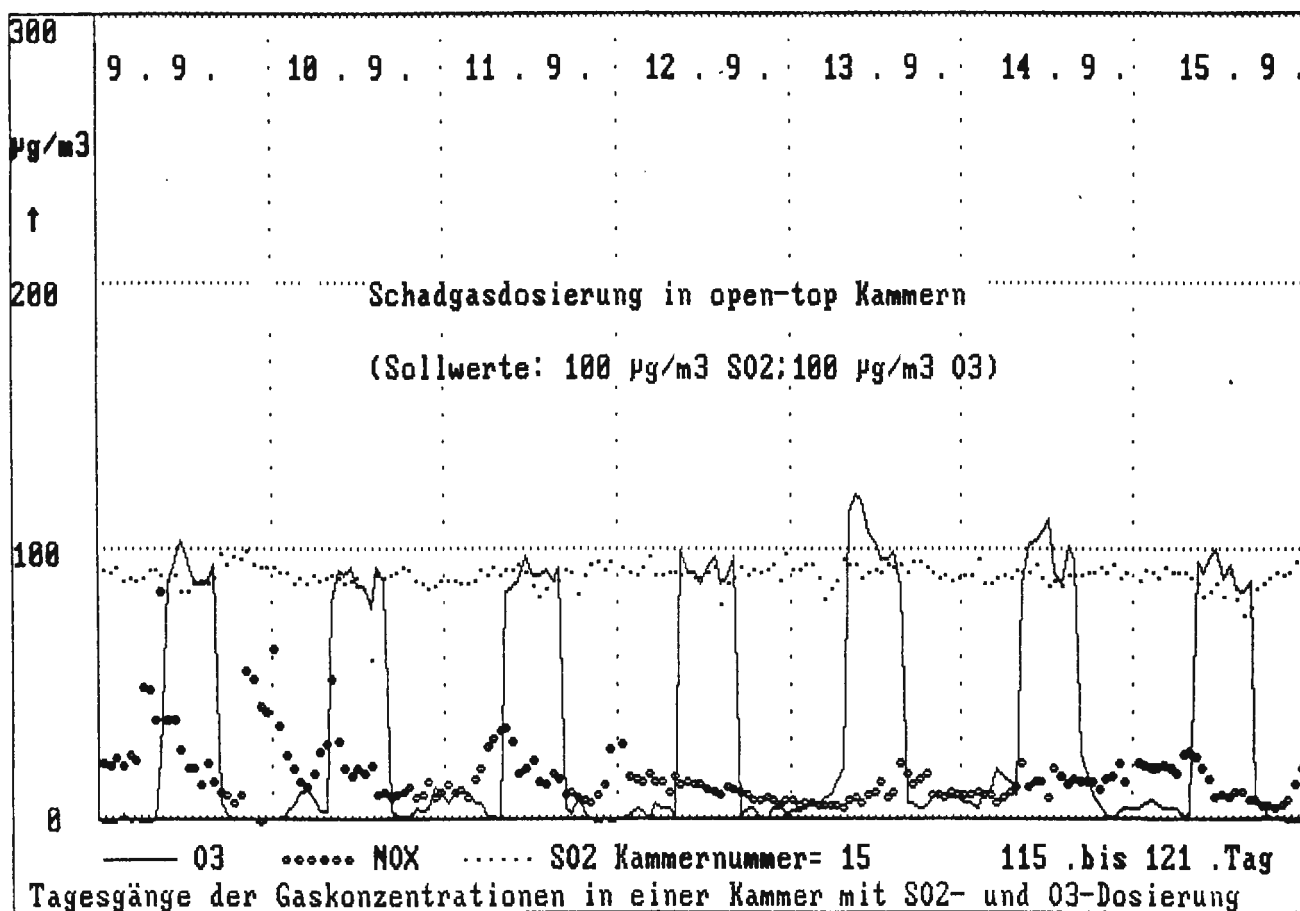


Abb. 12: Tagesverläufe der O<sub>3</sub>- und SO<sub>2</sub>-Konzentrationen in einer open-top Kammer, in die beide Gase dosiert wurden, während einer Woche im September 1987. O<sub>3</sub>- wurde täglich von 8.00 Uhr bis 16.00 Uhr, SO<sub>2</sub>-kontinuierlich dosiert. Die gezeigten NO<sub>x</sub>-Konzentrationswerte beruhen fast ausschließlich auf NO, das nicht durch die Aktivkohle ausgefiltert wurde (weitere Einzelheiten: vgl. Text).

mern angelegte Kiesschicht kann jederzeit durch natürliche Böden bzw. durch Bodentransplantate verschiedenster Herkunft ersetzt werden, sodaß auch Begasungsversuche mit im anstehenden Boden gewachsenen Pflanzen durchgeführt werden können. Für die Topfversuche werden aus Kabelschutzrohr hergestellte, mit einer Endkappe versehene PVC-Zylinder von 40 cm Länge, 10,5 cm Durchmesser und ca. 3,2 Liter Inhalt verwendet, die auf einer über der Kiesschicht jeder open-top Kammer liegenden Holzlattenkonstruktion stehen (vgl. Abb. 11). Abhängig vom Platzanspruch der verwendeten Versuchspflanzen kann jede open-top Kammer mit maximal 300 dieser Gefäße bestückt werden, d.h. einschließlich der 4 kammerlosen Referenzflächen kann mit maximal 8400 Versuchspflanzen gleichzeitig gearbeitet werden. Um die Wasserversorgung einer derart großen Zahl von Einzelpflanzen zu gewährleisten, wurde eine automatische Tropfbewässerungsanlage (Typ VOLMATIC; Hersteller: VOLMATIC OHG, Skt. Augustin) installiert, deren Hauptversorgungsleitungen in Abb. 2 angedeutet sind. Entsprechend der maximalen Zahl der Versuchspflanzen können damit 300 Tropfstellen (= Gefäße) pro open-top Kammer versorgt werden. Zu der Bewässerungsanlage gehören ein Bewässerungsautomat, der im angrenzenden Laborgebäude untergebracht ist und mit dem eine halb- oder vollautomatische Steuerung der Wasserversorgung von jeweils 4 Gruppen zu 6 open-top Kammern sowie der 4 kammerlosen Referenzflächen möglich ist (vgl. Abb. 2), und eine dem Wasserstrom zuschaltbare Düngemischstation

für 3 Düngervarianten. Die Leistung jeder Tropfstelle liegt bei ca. 15 ml Wasser/min, wobei Dosierintervalle in Schritten von 0,5 min zwischen 0 - 10 min vorgewählt werden können.

### 3.0. Erste Erfahrungen

Der derzeitige Forschungsschwerpunkt, für den die oben beschriebene Begasungsanlage eingesetzt wird, liegt auf der Untersuchung der Auswirkungen niedriger Konzentrationen der Schadgase SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und O<sub>3</sub> auf den Ertrag und die Qualität landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Darüber hinaus soll durch physiologische und biochemische Untersuchungen versucht werden, die Wirkmechanismen dieser Schadstoffe bei Pflanzen näher zu charakterisieren. Dabei wird sowohl die Wirkung der 3 Einzelgase in verschiedenen Konzentrationsstufen als auch die aller sich ergebender Gaskombinationen untersucht. Ein derartiger experimenteller Ansatz erfordert eine Dosierung der genannten Gase in niedrigen Konzentrationen, über relativ lange Zeiträume und unter reproduzierbaren Bedingungen.

Erste Begasungsversuche mit Kulturen von Raps, Gerste, Weidelgras und Buschbohnen in der Vegetationsperiode 1987 mit verschiedenen Konzentrationsstufen der Gase SO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> sowie mit deren Kombination haben gezeigt, daß sich mit

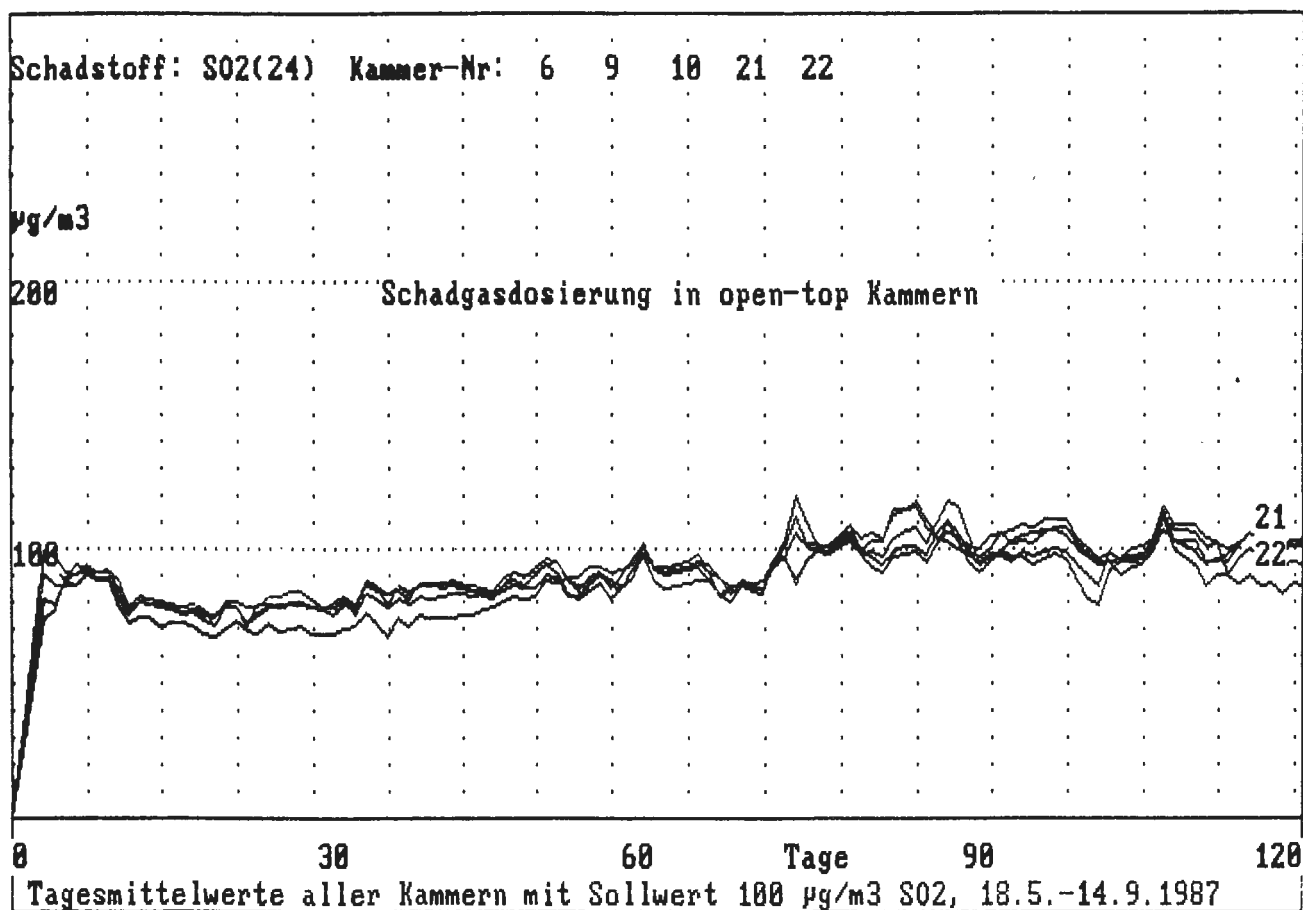


Abb.13: Vergleich der Tagesmittelwerte der SO<sub>2</sub>-Konzentrationen mehrerer mit SO<sub>2</sub> versorgter open-top Kammern während eines 120-tägigen Begasungszeitraumes in der Vegetationsperiode 1987.

Hilfe des Gaskosiersystems reproduzierbare Schadgasatmosphären in den open-top Kammern einstellen lassen. Als Beispiele dafür sind in den Abb.12 und 13 Konzentrationsverläufe der Gase SO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> in den Kammern dargestellt. Über die Homogenität der Gaskonzentrationen innerhalb der Kammern sowie über Einzelheiten zum Kammerklima wird an anderer Stelle berichtet. Während im genannten Versuchszeitraum keine Ausfälle des Dosiersystems zu verzeichnen waren, konnten kurzfristige Ausfälle von Analysegeräten (O<sub>3</sub>-Monitor) durch Ersatzmonitore abgefangen werden, sodaß eine lückenlose Dokumentation der Schadgasbelastung der Versuchspflanzen vorliegt. Für die Gaskomponente O<sub>3</sub> muß generell berücksichtigt werden, daß aufgrund der Länge der Meßstellenleitungen und der hohen Zerfallsrate dieses Gases die tatsächliche O<sub>3</sub>-Konzentration in den open-top Kammern ca. 10% höher liegt als die am Monitor gemessene Konzentration. Kurzfristige Schwankungen der O<sub>3</sub>-Konzentration in den Kammern (vgl.Abb.12) entstanden vermutlich durch die in den Sommermonaten aufgetretenen hohen O<sub>3</sub>-Konzentrationen in der Umgebungsluft (vgl.Abb.7), durch häufiges Öffnen der Kammertüren während der fast täglich durchgeführten Zwischenernten der Versuchspflanzen oder durch Spannungsschwankungen am O<sub>3</sub>-Generator. Das Schadgas NO<sub>2</sub> wurde im Jahr 1987 noch nicht in die Wirkungsuntersuchungen miteinbezogen, da zunächst die Langzeitdosierung dieses schwer handhabbaren Gases getestet werden sollte. Die probeweise NO<sub>2</sub>-Dosierung über einen Zeitraum von 120 Tagen in eine open-top Kammer verlief noch nicht zufriedenstellend. Da die Luftqualität am Standort

der Begasungsanlage durch niedrige NO-Konzentrationen gekennzeichnet ist (Monatsmittelwerte Mai-September 1987: < 10 µg/m<sup>3</sup>), kam es nicht zu "Verbrauchsreaktionen" zwischen O<sub>3</sub> und dem nicht durch die Aktivkohle zurückgehaltenen NO. Vereinzelt wurden kurzfristig erhöhte NO-Konzentrationen in den Kammern gemessen (vgl.Abb.12). Aufgrund dieser Standorteigenschaften der Begasungsanlage kann auch zukünftig auf die sehr aufwendige Ausfilterung des NO aus der Umgebungsluft verzichtet werden, wobei auftretende Hintergrundkonzentrationen dieses Gases in den Kammern mitüberwacht werden müssen und entsprechend zu interpretieren sind.

Zudem kann berücksichtigt werden, daß phytotoxische Wirkungen des NO und auch des NO<sub>2</sub> bei Einzelapplikation erst bei sehr viel höheren Gaskonzentrationen beobachtet werden (Guderian und Tingey, 1987).

#### Zusammenfassung

Zur Erfassung und Bewertung der phytotoxischen Auswirkungen gasförmiger Luftschadstoffe hat das Institut für Produktions- und Ökotoxikologie eine Freilandbegasungsanlage aus open-top Kammern aufgebaut und in Betrieb genommen, mit deren Hilfe eine kontrollierte Begasung von landwirtschaftlichen, gärtnerischen und forstlichen Versuchspflanzen mit niedrigen Konzentrationen der Schadgase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und

O<sub>3</sub> über längere Zeiträume möglich ist. Die Anlage besteht aus 24 zylindrischen open-top Kammern (Durchmesser 3,15 m; Höhe 3,35 m) einschließlich einer entsprechenden Zahl von Gebläse- und Filtereinheiten zur Ventilation der Kammern bzw. zur Filterung der Umgebungsluft, den Dosier- und Meßsystemen für die Schadgase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>, vier Klimameßstationen (Temperatur, rel. Feuchte, Strahlung, Windgeschwindigkeit), einer Datenverarbeitungsanlage zur kontinuierlichen Erfassung und Verarbeitung der anfallenden Schadgaskonzentrations- und Klimameßwerte, sowie einer automatischen Tropfbewässerungsanlage für die als Topfkulturen gezogenen Versuchspflanzen (max. Kapazität: 300 Gefäße/open-top Kammer). Im vorliegenden Beitrag werden die einzelnen Bausteine und die Funktionsweise dieser Begasungsanlage, die auch auf andere Gase umrüstbar ist, detailliert beschrieben. Die bisher durchgeführten ersten Begasungsversuche, die der Untersuchung der Einzel- und Kombinationswirkung der obengenannten Schadstoffe auf Ertrag, Qualität und verschiedene Stoffwechselkenngrößen landwirtschaftlicher Kulturpflanzen (Raps, Gerste, Weidelgras, Bohnen) dienen, zeigen, daß reproduzierbare Schadgaskonzentrationen in den open-top Kammern eingestellt werden können.

### Ecotoxicological Aspects of Air Pollutants

#### II. Design of an open-top field chamber system to investigate the effects of air pollutants on plants

A field fumigation facility is described which has been developed to determine the long-term effects of low-levels of air pollutants on plants. The permanent facility consists of 24 cylindrical open-top chambers (3.15 diameter; 3.35 m height), each equipped with an air ventilation and air filtration system to assure a continuous air flow through the chambers and to reduce ambient levels of pollutants, respectively. A dispensing and monitoring system for the gases SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> was installed to expose potted plants to low concentrations of these pollutants under controlled fumigation conditions. Climatic parameters are measured in 3 open-top chambers and in ambient air. Data parameters from the air quality and climatic measurements are acquired and stored by a data acquisition system. A drip irrigation system is capable of supplying water to up to 300 pots per chamber. First experiments, which were carried out to investigate the effects of SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>, singly or in combination, on growth, yield, quality parameters and on metabolic reactions of crops (rape, barley, ryegrass, bush beans) revealed that definite pollutant atmospheres can be maintained in the chambers throughout a whole growing season.

### Literatur

Adaros, G., Weigel, H.J. und H.J. Jäger: Effects of sulphur dioxide and acid rain alone or in combination on growth and yield of broad bean plants. - In: *The New Phytologist* 108 (1988), S. 67 - 74.

Buckenham, A.H., Parry, M.A., Whittingham, C.P. und A.T. Young: An improved open-topped chamber for pollution studies on crop growth. - In: *Environmental Pollution* 2 (1981), S. 475-482.

Buckenham, A.H., Parry, M.A. und C.P. Whittingham: Effects of aerial pollutants on the growth and yield of spring barley. - In: *Annales of Applied Biology* 100 (1982), S. 179-187.

CEC: Microclimate and plant growth in open-top chambers. Commission of the European Communities. Air Pollution Research Report 5 (1986).

Colvill, K.E., Bell, R.M., Roberts, T.M. und A.D. Bradshaw: The use of open-top chambers to study the effects of air pollutants, in particular sulphur dioxide, on the growth of ryegrass *Lolium perenne* L. Part II: The long term effect of filtering polluted urban air or adding SO<sub>2</sub> to rural air. - In: *Environmental Pollution* 31 (1983), S. 35-55.

EPA: Air Pollution Exposure Systems and Experimental Protocols. Volume 1: A Review and Evaluation of Performance. U.S. Environmental Protection Agency, EPA / 600 / 3-87 / 037a (1987).

Guderian, R. und D.T. Tingey: Notwendigkeit und Ableitung von Grenzwerten für Stickoxide. - UBA Berichte 1/87. Umweltbundesamt, Berlin, 1987.

Heagle, A.S., Body, D.E. und W.W. Heck: An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants. - In: *Journal of Environmental Quality* 2 (1973), S. 365-368.

Heck, W.W., Taylor, O.C., Adams, R., Bingham, G., Miller, J., Preston, E. und L. Weinstein: Assessment of crop loss from ozone. - In: *Journal of Air Pollution Control Association* 32 (1982), S. 353-361.

Heck, W.W., Cure, W.W., Rawlings, J.O., Zaragoza, L.J., Heagle, A.S., Heggstad, H.E., Kohut, R.J., Kress, L.W. und P.J. Temple: Assessing impacts of ozone on agricultural crops: I. Overview. - In: *Journal of Air Pollution Control Association* 34 (1984), S. 729-735.

Hogsett, W.E., Tingey, D.T. und S.R. Holman: A programmable exposure control system for determination of the effects of pollutant exposure regimes on plant growth. - In: *Atmospheric Environment* 19 (1985), S. 1135-1145.

Jäger, H.J., Weigel, H.J., Guderian, R., Arndt, U. und G. Seufert: Methodological approaches: Part I: Experiments with open-top chambers: results, advantages and limitations. - In: *Air Pollution and Ecosystems*, P. Mathy (ed.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht 1988a, S. 327 - 337.

Jäger, H.J., Grünhage, L., Dämmgen, U., Hertstein, U. und J. Fleckenstein: Auswirkungen luftgetragener Schadstoffe auf Vegetation und Boden von Grünlandökosystemen. I. Zusammenhänge, Arbeits- und Meßkonzept. - In: *Landbauforschung Völkenrode* 38 (1988b), S. 57 - 89.

Mandl,R.H.,Weinstein,L.H.,McCune,D.C. und M.Keveny: A cylindrical open-top chamber for the exposure of plants to air pollutants in the field. - In: Journal of Environmental Quality 2 (1973), S.371-376.

Weigel,H.J.,Adaros,G. und H.J.Jäger: An open-top chamber study with filtered and unfiltered air to evaluate the effects of air pollutants on crops. - In: Environmental Pollution 47 (1987), S.231-244.

Mejer,G.-J.,Speckmann,H.,Paul,W. und H.J.Jäger: Zur Ökotoxikologie von Luftschadstoffen. III. Erfassung und Verarbeitung von Schadstoff- und Klimameßdaten einer Pflanzenbegassungsanlage aus open-top Kammern. Landbauforschung Völkenrode 1989, im Druck.

Weigel,H.J. und H.J.Jäger: Zur Ökotoxikologie von Luftschadstoffen. I. Experimentelle Verfahren zur Schadstoffexposition von Pflanzen. - In: Landbauforschung Völkenrode 38 (1988), S. 103 - 115.

Verfasser: Weigel,Hans-Joachim , Dr.rer.nat., Jäger, Hans-Jürgen, Prof.Dr.rer.nat., Institut für Produktions- und Ökotoxikologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL). Leiter: Prof.Dr.H.-J.Jäger.