

## Zur Ökotoxikologie von Luftschadstoffen

### 1. Experimentelle Verfahren zur Schadstoffexposition von Pflanzen

HANS-JOACHIM WEIGEL und HANS-JÜRGEN JÄGER

Institut für Produktions- und Ökotoxikologie

#### Einleitung

Vor dem Hintergrund derzeitiger Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden und reaktiven Kohlenwasserstoffen, die zusammen mit den Stickoxiden als Vorläufersubstanzen für Photooxidantien gelten, stellen gasförmige Luftverunreinigungen – neben den säurehaltigen Niederschlägen – nach wie vor ein Gefährdungspotential für Pflanzen dar. Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Ozon (O<sub>3</sub>) als Leitkomponente für Photooxidantien sind dabei als die entscheidenden, die Vegetation großräumig gefährdenden Schadgase anzusehen. Die vorliegenden luftanalytischen Meßdaten und die in mehreren europäischen Ländern festgestellten Pflanzenschäden stimmen dahingehend überein, daß diese Gase weitverbreitet in pflanzenschädigenden Konzentrationen auftreten können (Roberts, 1984; Bell, 1985; Guderian et al., 1985a; Guderian und Tingey, 1987).

Neben aktuellen Diskussionen über das Ausmaß der Beteiligung von Luftschadstoffen an den „neuartigen Waldschäden“ und im Gegensatz zu den Forschungsanstrengungen, die in diesem Zusammenhang unternommen werden, wurde bisher die Untersuchung der Frage vernachlässigt, inwieweit auch agrarisch genutzte Ökosysteme einer Beeinflussung durch Luftschadstoffe unterliegen. Prinzipiell ist jedoch auch diesem Problem erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken, da – ebenso wie der Wald – auch die Pflanzenbestände dieser Ökosysteme Absorptionsflächen für atmosphärische Schadstoffe darstellen.

Die potentielle Phytotoxizität von Schadgasen wie SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> ist zwar in einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen belegt worden (Übersicht bei: Unsworth und Ormrod, 1982; Koziol und Whalley, 1984), häufig wurden diese Untersuchungen jedoch unter Bedingungen durchgeführt, die der tatsächlichen Immissionsituation im Freiland kaum gerecht werden. Oft handelt es sich um Kurzzeitbegasungsversuche mit hohen Schadgaskonzentrationen unter für die Pflanzen unnatürlichen Umweltbedingungen. Erhebliche Kenntnislücken bestehen dagegen noch immer über die chronischen Auswirkungen langanhaltender, niedriger Schadgaskonzentrationen auf Agrarökosysteme bzw. auf die Produktionsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Dies gilt besonders für die Wirkungen von Schadgasgemischen, da die genannten Gase im Freiland in wechselnden Konzentrationen und Kombinationen gleichzeitig oder alternativ nacheinander auftreten können, wobei auch die Wechselwirkungen gasförmiger Schadstoffe mit anderen Schadstoffformen, wie etwa den sauren Niederschlägen berücksichtigt werden müssen.

Besondere Beachtung sollte in diesem Zusammenhang der Phytotoxizität des in den strahlungsintensiven Monaten Mai-September in Mitteleuropa in hohen Konzentrationen auftretenden O<sub>3</sub> geschenkt werden. In diesem Schadgas wird u.a. die mitentscheidende Ursache für die derzeitigen Waldschäden vermutet (Guderian et al., 1985a).

Untersuchungen in den USA ergaben, daß mittlere saisonale O<sub>3</sub>-Konzentrationen von 55-60 µg/m<sup>3</sup> (7-h tägl.), wie sie auch in Europa auftreten können (Becker et al., 1985), zu Ertragseinbußen landwirtschaftlicher Kulturpflanzen führen (Heck et al., 1982; 1984). Generell ist festzustellen, daß gesicherte quantifizierbare Beziehungen zwischen den Konzentrationen von O<sub>3</sub> und den Auswirkungen des Gases auf Pflanzen in der Bundesrepublik Deutschland bisher noch nicht vorliegen.

Dies gilt in gleichem Maße auch für das Stickoxid NO<sub>2</sub>. Experimentelle Untersuchungen zeigen zwar, daß dieses Gas erst in unrealistisch hohen Konzentrationen zu Pflanzenschäden führt (Guderian und Tingey, 1987), es gibt allerdings Hinweise darauf, daß bei gleichzeitiger Einwirkung freilandrelevanter SO<sub>2</sub>-Konzentrationen schon bei sehr viel niedrigeren NO<sub>2</sub>-Konzentrationen phytotoxische Wirkungen nachweisbar sind (Ashenden und Mansfield, 1978). Beim Zusammenwirken mehrerer Schadstoffe muß also damit gerechnet werden, daß die Schwellendosis, die bei Einzelapplikation eine Wirkung hervorruft, beträchtlich herabgesetzt werden kann.

Selbst für das Schadgas SO<sub>2</sub>, dessen Phytotoxizität schon seit mehr als 100 Jahren bekannt ist und dessen Wirkmechanismen z.T. schon geklärt sind (Jäger und Klein, 1980) bestehen noch immer Schwierigkeiten, klare Dosis-Wirkungsbeziehungen zum Schutz der Vegetation abzuleiten (Roberts, 1984).

Um die Voraussetzungen für eine allgemeine Beurteilung des phytotoxischen Gefährdungspotentials von Luftschadstoffen zu schaffen und um zur Anbahnung von Abhilfemaßnahmen beizutragen, müssen daher Wege gefunden werden, die Interaktion zwischen Immission und Wirkung qualitativ vor allem aber quantitativ zu beschreiben.

Zur experimentellen Untersuchung dieser Zusammenhänge, die außer durch die Immissionen selbst durch Faktoren wie Boden, Klima, Entwicklungsalter der Pflanzen etc. mitbestimmt werden, steht ein differenziertes Spektrum verschiedener Versuchsmethoden zur Verfügung, mit deren Hilfe Schäden, die durch Luftverunreinigungen verursacht werden, erkannt und bewertet werden können. Schäden sind dabei nicht nur im wirtschaftlichen Sinn, d.h. als Ertragsminderungen, Beeinträchtigungen der äußeren Beschaffenheit und sonstiger Qualitätsverluste pflanzlicher Nahrungs- und Futtermittel zu verstehen, sondern auch als Störungen und Veränderungen der Funktionsfähigkeit agrarischer und forstlicher Ökosysteme. Zudem gibt es Hinweise darauf, daß Schadgase wie O<sub>3</sub> und SO<sub>2</sub> die Anfälligkeit einiger Pflanzenarten gegenüber Pathogenen (Pilze, Insekten, Bakterien) erhöhen (Heagle, 1973) und damit indirekt einen verstärkten Einsatz von Pestiziden nach sich ziehen können. Von diesen sowohl ökologisch als auch ökonomisch negativ zu bewertenden Folgen leitet sich generell die Frage ab, inwieweit Luftschadstoffe den Aufwand der in landwirtschaftlichen Produktionsprozessen eingesetzten Hilfsmittel beeinflussen bzw. erhöhen. Auch in diesem Sinne wäre von einem Schaden zu sprechen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein kurzer Überblick über verschiedene Methoden zur Schadstoffexposition von Pflanzen gegeben, die zur Untersuchung von Immissionswirkungen eingesetzt werden, wobei der Schwerpunkt der Ausführungen auf gasförmigen Luftschadstoffen liegt. Unter diesen Methoden finden open-top-Kammern aufgrund entscheidender Vorteile gegenüber anderen Expositionssystemen zunehmend Beachtung. Die Einsatzmöglichkeiten dieser open-top-Kammern werden zusammenfassend beschrieben und bewertet. Über die verschiedenen Möglichkeiten und Verfahren zum Nachweis von Schadstoffwirkungen auf Pflanzen wird von Tingey et al. (1979) und Weigel und Jäger (1985) berichtet.

#### Methoden zur Exposition von Pflanzen gegenüber Luftschadstoffen

Zur Untersuchung der Auswirkungen luftgetragener Schadstoffe auf Pflanzen stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung, deren Auswahl primär von der jeweiligen Versuchsfrage abhängt und die sich hinsichtlich ihrer Repräsentanz für praktische Immissionsverhältnisse stark unterscheiden (Heagle und Philbeck, 1979; Guderian et al., 1985a).

Zwei Gesichtspunkte, nach denen eine Klassifikation von Versuchseinrichtungen möglich ist, sollen im Folgenden erörtert werden. Unterteilt man die Methoden nach Art der auszubringenden Schadstoffe bzw. nach Art und Ausmaß der verwendeten Hilfsmittel lassen sich folgende Systeme unterscheiden (EPA, 1987).

Unter Systeme zur Untersuchung der Auswirkungen trockener Depositionen fallen in der Mehrzahl der Fälle Versuchsanordnungen, die sich mit den Auswirkungen gasförmiger Luftverunreinigungen auf Pflanzen befassen, wobei unter trockener Deposition der direkte Transfer von Gasen (z.B. SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>) und Partikeln von der Atmosphäre auf natürliche Oberflächen (z.B. die Vegetation) und deren Absorption durch diese Oberflächen zu verstehen ist (Fowler, 1980). Relativ wenige Verfahren wurden zur Untersuchung der Wirkungen partikelförmiger Schadstoffe (z.B. schwermetallhaltiger Stäube) entwickelt und eingesetzt (Darley et al., 1968; Krause, 1974; Klein et al., 1980). Abhängig vom Ausmaß, in dem Systeme zur Applikation gasförmiger Stoffe die Atmosphäre und die sonstigen Umweltbedingungen der Versuchspflanzen beeinflussen, kann weiter differenziert werden zwischen kammerlosen Expositionssystemen, die im Freiland eingesetzt werden und mit denen eine relativ geringe Kontrolle des Schadstoffangebotes ohne jegliche Beeinflussung der Umweltbedingungen der Pflanzen möglich ist, und Systeme unter Verwendung von Kammern, die einen hohen Grad an Kontrolle des Schadstoffangebotes (kontrollierbar nach Konzentration, Dauer, Frequenz etc.) gewährleisten, die jedoch gleichzeitig die Wachstumsbedingungen der Versuchspflanzen mehr oder weniger stark modifizieren. Zu den kammerlosen Systemen im engeren Sinne gehören auch Freilanderhebungen entlang eines gegebenen Schadstoffgradienten (siehe unten). Versuchseinrichtungen, die unter Verwendung von Kammern arbeiten, beinhalten sowohl Freilandexpositionskammern, die entwickelt wurden, um die Schadstoffatmosphäre der Pflanzen möglichst weitgehend zu kontrollieren, in denen jedoch eine Kontrolle bzw. experimentelle Beeinflussung des Kam-

merklimas entfällt, d.h. in denen das Klima den natürlichen Gegebenheiten folgt und Expositionskammern, die innerhalb von Räumen betrieben werden. In diesen Kammern können sowohl die Schadstoffatmosphäre als auch die Umweltbedingungen der Pflanzen kontrolliert bzw. beeinflusst werden.

Unter nasser Deposition ist nach Fowler (1980) der Transfer eines Elementes oder einer Substanz von der Atmosphäre zur Erdoberfläche innerhalb oder an der Oberfläche eines „Hydrometeors“ (z.B. Regen, Nebel, Schnee) zu verstehen. Die Mehrzahl der Versuchseinrichtungen, mit denen sich die Auswirkungen nasser Depositionen auf die Vegetation untersuchen lassen, sind Systeme zur Simulation von Niederschlägen in Form von Regen oder Nebel. Die phytotoxischen Wirkungen saurer Niederschläge z.B. werden in Beregnungsanlagen mit künstlichen Regenlösungen entweder unter Freiland- oder unter Laborbedingungen untersucht. Beregnungen im Freiland können zusätzlich zum natürlichen Niederschlag durchgeführt werden, d.h. ohne Ausschluß des natürlichen Regens (Irving, 1983; Heagle et al., 1983b; Troiano et al., 1984) oder die zu untersuchenden Versuchspflanzen werden ständig oder nur während eines natürlichen Regenereignisses mit einem (mobilen) Schutzdach überdeckt (Lee et al., 1981; Evans et al., 1983; Lewin und Evans, 1984; Troiano et al., 1984; Kujala et al., 1986). Bei dieser Art der Versuchsanordnung kann die Beregnung der Versuchspflanzen nach festgelegten Zeitplänen und festgesetzten Mengen erfolgen (Evans et al., 1983) oder es wird mit Hilfe entsprechender Regensensoren ein nach Menge und Zeitdauer freilandgleiches Regenereignis simuliert (Kujala et al., 1987; vgl. Abb. 1).

Beregnungen unter Laborbedingungen werden häufig in Klimakammern, Begasungsküvetten oder auch Gewächshäusern durchgeführt, die mit entsprechenden Dosiervorrichtungen ausgestattet sind (Scherbatowski und Klein, 1983; Chevone et al., 1984; Jacobson et al., 1985; Enyedi und Kujala, 1986; Könnicker et al., 1987; vgl. Abb. 2). Auf Einzelheiten der Systeme zum Ausschluß natürlicher Niederschläge im Freiland und zur Ausbringung von Regenlösungen oder Nebel im Freiland und unter Laborbedingungen soll nicht weiter eingegangen werden.

Eine andere Art der Kategorisierung von Versuchsmethoden zur Erfassung von Immissionswirkungen auf Pflanzen nehmen Guderian et al. (1985a) vor. Nach Ansicht dieser Autoren stellen die drei Grundanforderungen an die Ergebnisse von Wirkungsuntersuchungen, nämlich Repräsentanz für die Praxis, kausalanalytische Sicherheit und Quantifizierbarkeit von Immission und Wirkung, sehr verschiedene Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Versuchsmethodik. Im Hinblick auf diese Leistungsfähigkeit lassen sich Versuchsmethoden unterteilen in Systeme, die unter naturfernen bzw. künstlichen, naturnahen und natürlichen Bedingungen arbeiten. Als natürlich werden Verhältnisse verstanden, wie sie in natürlichen, naturnahen oder naturfernen Ökosystemen (Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Gartenbau) herrschen. Als natürliche, naturferne bzw. künstliche Versuchsbedingungen sind solche Verhältnisse zu verstehen, bei denen die Erhebungssysteme zur Ermittlung von Immissionwirkungen die natürlichen Gegebenheiten sehr schwach bis stark beeinträchtigen (Guderian et al., 1985a). Anhand dieser Einteilung sollen einige Beispiele für Versuchsanlagen zur Ausbringung gasförmiger Schadstoffe gegeben werden.

Zur Kategorie der naturfernen oder künstlichen Versuchsanordnungen gehören Gewächshäuser, Klima- bzw. Pflanzenanzuchtschränke oder begehbare Klimakammern sowie verschiedene andere Arten von geschlossenen Kammern oder Küvetten. Die Beaufschlagung von Versuchspflanzen mit Schadstoffen geschieht z.B. in mehreren nebeneinander aufgestellten Kleingewächshäusern (Guderian, 1977; Posthumus, 1978; Guderian et al., 1985b) und in entsprechend modifizierten Klimaschränken (Jäger und Steubing, 1970) bzw. begehbaren Klimakammern oder in darin untergebrachten Untereinheiten, d.h. speziellen, geringer dimensionierten Kammern oder Küvetten (Heck et al., 1968; Lockyer et al., 1976; McLaughlin et al., 1976; Guderian et al., 1985b; Payer et al., 1986). Im ersten Fall fungieren die Gewächshäuser, Klimakammern und -schränke selbst als Expositionssysteme, im zweiten Fall wird dadurch lediglich das Klima für die Versuchspflanzen vorgegeben, während die eigentliche Begasung in den Kammern oder Küvetten erfolgt. Abb. 3 zeigt ein Beispiel für derartige Begasungskammern, die innerhalb von Klimäräumen untergebracht sind. Weite Verbreitung hat eine von Rogers et al. (1977) entwickelte, zylindrische Kammerkonstruktion, das Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) System erlangt. Diese Kammerkonstruktion kann ebenfalls innerhalb von Gewächshäusern oder begehbaren Klimakammern bzw. klimatisierten Räumen benutzt werden (Heck et al., 1978; vgl. Abb. 4) und hat u.a. aufgrund besonderer Strömungsverhältnisse gegenüber anderen Kammersystemen eine Reihe von hier nicht zu spezifizierenden Vorteilen.

Geschlossene Kammern oder Küvetten variieren erheblich in Design und Ausführung und reichen von relativ einfachen Anlagen (van Haut, 1972) mit nur geringen Möglichkeiten der Kontrolle des Schadstoffangebotes und des Klimas bis hin zu technisch sehr aufwendigen Anlagen, die durch entsprechende Regel- und Kontrollsysteme ein breites Spektrum an Umweltbedingungen und an Schadstoffszenarien simulieren können (Aiga et al., 1984; Musselmann et al., 1986; Payer et al., 1986; Lucas et al., 1987).

Derartige Versuchsanordnungen erlauben es, Hypothesen zu überprüfen, Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden Wirkmechanismen zu ziehen und die phytotoxischen Gefährdungen abzuschätzen, die von kurzfristigen Einwirkungen von Schadgasen ausgehen.

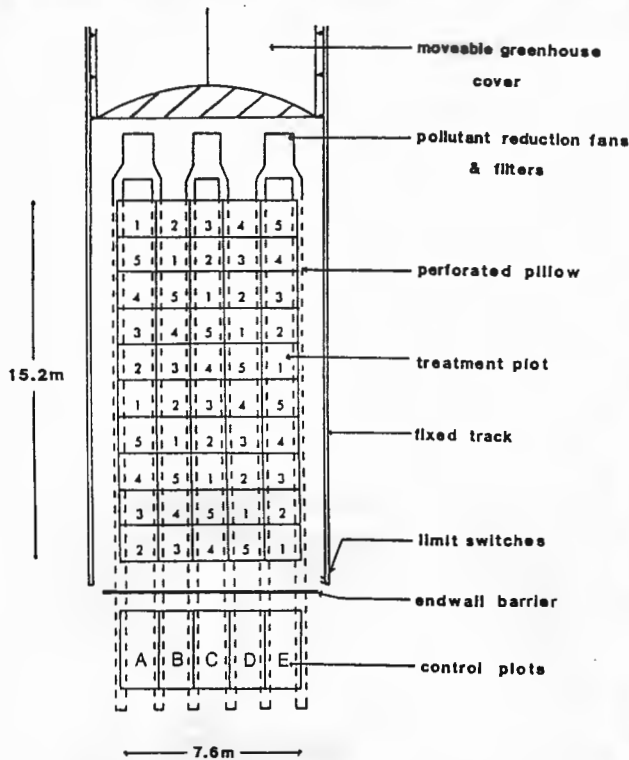


Abbildung 1: Gesamtansicht (oben) und schematische Darstellung (unten) der mobilen Beregnungseinheit (mobile rain exclusion canopy system) des Ontario Ministry of the Environment/Air Resources Branch/Phytotoxicology Section in Brampton/Ontario: ein auf Schienen bewegliches Gewächshaus wird mit Hilfe computergesteuerter Kontrollsysteme bei Beginn eines natürlichen Regenereignisses über die Versuchfläche bewegt. Regendüsen und Dosierschläuche sind unterhalb des Daches des Gewächshauses installiert. Zwischen den Pflanzenreihen verlaufende, gelochte PVC-Röhren (perforated pillows) können bei Bedarf die Versuchspflanzen zusätzlich mit gefilterter Umgebungsluft versorgen (pollution reduction filters and fans).

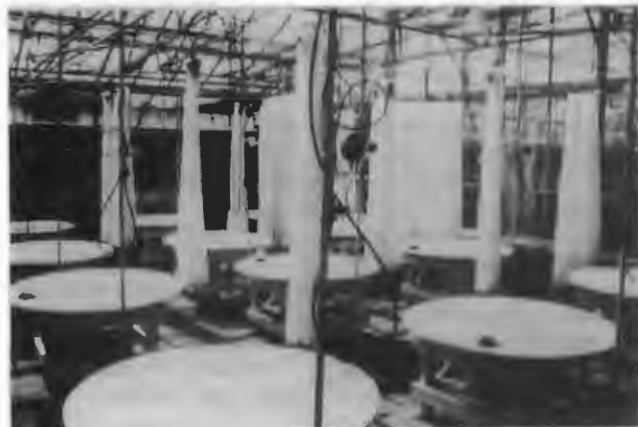


Abbildung 2: Gewächshausberegnungsanlage des USDA Agricultural Research Service, Air Quality Programme. North Carolina State University/Raleigh, NC. Die Versuchspflanzen werden auf drehbaren Tischen artifiziellen Regenlösungen verschiedener pH-Stufen ausgesetzt. Die Regendüsen befinden sich in ca. 2 m Höhe über den Tischen. Während der Regenereignisse werden die einzelnen Behandlungsvarianten durch Plastikvorhänge voneinander getrennt.



Abbildung 3: Expositionskammern des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie für Kurzzeitbegasungen von Pflanzen. Insgesamt vier derartige Plexigalkammern sind innerhalb eines begehbaren, vollklimatisierten Pflanzenanwachtraumes untergebracht. Die Luftführung in den Kammern erfolgt von oben nach unten, wobei die klimatisierte und mit Schadgasen angereicherte Luft mit Hilfe der an der Kammerdecke angebrachten Lochplatte gleichmäßig über die Versuchspflanzen verteilt wird.

Aufgrund artifizierlicher Klimabedingungen in vielen dieser Kammern ergibt sich jedoch generell das Problem der Übertragbarkeit der damit gewonnenen Erkenntnisse auf Freilandbedingungen u.a. auch deshalb, weil eine langfristige Kultivierung von Versuchspflanzen unter diesen Bedingungen unmöglich ist. So lassen sich damit die Auswirkungen längerfristiger Schadstoffbelastungen in niedrigen Konzentrationen auf perennierende Pflanzen (z.B. Wintergetreide) oder auf Dauerkulturen (z.B. Forstpflanzen, Dauergrünland) und die Konsequenzen, die sich daraus für den praktischen Immissionsschutz ergeben, nur schwer prüfen.

Bei Erhebungen unter natürlichen Bedingungen dagegen wird die Reaktion von Pflanzen entlang eines gegebenen Schadstoffgradienten oder in einer speziellen Region, etwa im Einflußbereich einer Abgasquelle oder in einem großräumigen Belastungsgebiet, untersucht (Guderian und Stratmann, 1952; Oshima et al., 1976). Im weiteren Sinne gehören hierzu auch Verfahren der Bioindikation, wie das aktive oder passive Biomonitoring (Schubert, 1985; Arndt, 1987). Die gegebenen Umweltbedingungen in dem jeweili-

gen Gebiet (Bodentyp, Niederschlagsverhältnisse etc.) lassen eine verallgemeinernde Aussage über entsprechende Schadwirkungen in anderen Regionen jedoch nicht zu. Ferner ist es kaum möglich, die entscheidende phytotoxische Komponente aus dem vor Ort meist vorherrschenden Schadstoffgemisch zu erkennen und wirkungsgemäß zu charakterisieren.

Die Schwierigkeiten, die sich bei der Übertragbarkeit der in geschlossenen Expositionssystemen gewonnenen Ergebnisse auf die praktischen Immissionsverhältnisse ergeben, und die Probleme bei Freilandhebungen, Immission und Wirkung ursächlich als zusammenhängend zu erkennen und quantitativ zueinander in Verbindung zu setzen, haben zu der Entwicklung von Freilandbegasungssystemen geführt, die hinsichtlich der Schadstoffapplikation, der klimatischen Faktoren und der Möglichkeiten der Pflanzenzucht unter natürlichen Bedingungen arbeiten (Guderian et al., 1985).

Kammerlose Feldbegasungssysteme sind von verschiedenen Forschergruppen zur Untersuchung der Auswirkungen gasförmiger Schadstoffe auf landwirtschaftliche Kulturpflanzen und Forstpflanzen eingesetzt worden (De Cormis et al., 1975; Miller et al., 1980; Reich et al., 1982; Laurence et al., 1982). Dazu gehören z.B. das linear gradient system nach Shinn et al. (1977) und das zonal air pollution system (ZAPS) nach Lee und Lewis (1978). Bei beiden Systemen wird mit Hilfe gelochter Rohrleitungen, die zwischen den Pflanzenreihen oder unmittelbar über den Beständen verlaufen, entweder gefilterte bzw. ungefilterte Umgebungsluft oder mit Schadgasen angereicherte Luft den Versuchspflanzen zugeführt (vgl. Abb. 5). Je nach Fragestellung ist es Zweck dieser Feldbegasungssysteme, zum einen über die gesamte zur Untersuchung anstehende Versuchsfläche gleichmäßige Schadgaskonzentrationen einzustellen, zum anderen innerhalb der Versuchsfläche einen Schadgasgradienten (linear gradient) zu schaffen, und in diesem Fall die Reaktion der Versuchspflanzen entlang dieses Gradienten zu untersuchen.

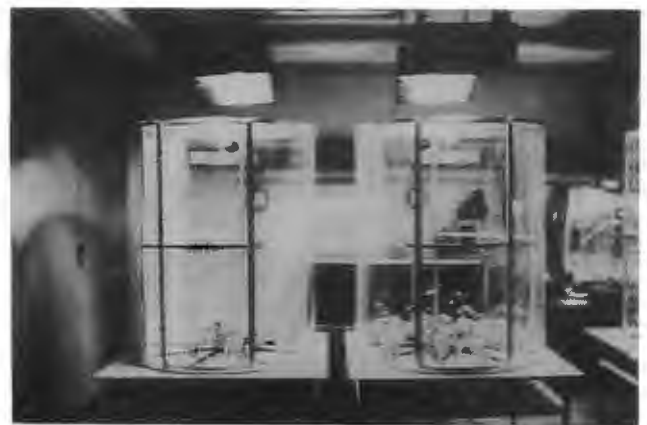


Abbildung 4: Expositionskammern des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie nach dem Vorbild des Continuous Stirred Tank Reactor Systems. Zuluft und Schadgase treten von oben in die Kammern ein und werden mit Hilfe eines Ventilators an der Kammerdecke gleichmäßig verteilt. Das Kammergestell besteht aus Aluminium, die Folienbespannung aus Teflon. Zu sehen sind zwei von vier Kammern, die innerhalb eines klimakontrollierten Raumes untergebracht sind.



Abbildung 5: Ansicht des Feldbegasungssystems des Ontario Ministry of the Environment/Air Resources Branch/Phytotoxicology Section in Brampton/Ontario, das dem linear gradient system (s. Text) analog ist. Zu erkennen sind die Gebläseeinheiten (links), in denen die Luftfilter enthalten sind sowie die nach rechts in die Reihen der Versuchspflanzen verlaufenden, gelochten Folienschläuche, durch die konditionierte Luft (z.B. gefiltert/ungefiltert) den Beständen zugeführt wird.

Durch den Verzicht auf jegliche Form von „Einschluß“ der Pflanzen sind Einflüsse auf deren Klima- oder Umweltbedingungen („Kammereffekte“) nahezu völlig ausgeschlossen. Vor allem durch den Einfluß der Windrichtung und -geschwindigkeit kommt es jedoch zu unkontrollierbaren Fluktuationen der Schadgaskonzentration und somit zu einer eingeschränkten Kontrolle des Schadstoffangebotes. Weitere Nachteile sind u.a. der hohe Bedarf an Fläche bzw. Pflanzenbeständen, um Querkontaminationen verschiedener Schadgasstufen zu trennen sowie die Tatsache, daß Schadgasbehandlungen mit niedrigeren Konzentrationen als in der jeweiligen Umgebungsluft nur schwer möglich sind. Weiterentwicklungen von Freilandbegasungssystemen, die diesen Nachteilen z.B. schon Rechnung tragen, werden von Greenwood et al. (1982) und McLeod et al. (1985) beschrieben.



Abbildung 6: Open-top-Kammern des USDA, Agricultural Research Service in Raleigh, NC, in der Ausführung des ursprünglich von Heagle et al. (1973) entwickelten Typs. Links von der Kammer ist die Gebläseeinheit zu erkennen, die auch die Aktivkohle zur Luftfilterung enthält.

Mit den zur Kategorie der Freilandexpositionssysteme zählenden (s.o.) und von Mandl et al. (1973) und Heagle et al. (1973) erstmals vorgestellten „open-top chambers“ steht dagegen eine Methode zur Verfügung, die wesentliche Vorteile von Schadgasexpositionen in geschlossenen Systemen einerseits und in der freien Atmosphäre andererseits in sich vereinigt. In Abb. 6 ist der ursprüngliche, von Heagle et al. (1973) entwickelte Typ einer derartigen open-top-Kammer zu sehen. Der ehemals für landwirtschaftliche Kulturpflanzen entwickelte, zylindrische Kammertyp ist inzwischen in verschiedener Weise modifiziert worden (Jäger et al., 1987). In der Regel bestehen open-top-Kammern aus einem Aluminiumgestell und sind mit einer lichtdurchlässigen Folie aus Polyäthylen, PVC oder ähnlichen Materialien bespannt. Mit Hilfe eines Gebläses wird Luft, die entweder ungefiltert, mit Aktivkohle gefiltert oder auch mit Schadgasen angereichert sein kann (s.u.) in den unteren Teil der Kammer eingespeist und entweicht durch den oberen, offenen Teil („open-top“) der Kammer. Das Institut für Produktions- und Ökotoxikologie verfügt seit 1985 über insgesamt 36 Kammern des oben erwähnten zylindrischen Kammertyps (vgl. Abb. 7). An anderer Stelle werden anhand dieser Anlage die genauen Konstruktionsmerkmale und die Funktionsweise dieser open-top-Kammern sowie ein System zur Dosierung und Messung verschiedener Schadgase beschrieben. Hier sollen zunächst nur einige Möglichkeiten zusammengefaßt werden, wie open-top-Kammern eingesetzt werden können.



Abbildung 7: Gesamtansicht der Begasungsanlage aus 24 open-top-Kammern des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie. Um das Eindringen von Fremdluft in die Kammern weiter zu reduzieren und um den natürlichen Niederschlag auszuschließen, sind die Kammern mit einer kragenförmigen Verengung bzw. mit einem Regendach versehen worden.

#### Prinzipielle Einsatzmöglichkeiten von open-top-Kammern

Open-top-Kammern können auf zwei grundsätzlich verschiedenen Wegen zur Untersuchung von Immissionswirkungen auf Pflanzen eingesetzt werden:

- in Wachstumsvergleichen mit gefilterter Umgebungsluft und
- in Versuchen mit kontrollierter Zudosierung von atmosphärischen Schadstoffen (trockene und nasse Deposition).

In beiden Fällen können die Kammern entweder mit Gefäßkulturen beschickt (vgl. Abb. 8) oder aber über Pflanzenbestände gestülpt werden, die im anstehenden Boden gewachsen sind (vgl. Abb. 9).

Der Vergleich der Auswirkungen gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft ermöglicht Aussagen über die potentielle Belastung der pflanzlichen Leistungsfähigkeit durch die vorherrschende Immissionsituation bzw. als Folge der aktuellen Luftqualität am Ort der Untersuchung (Brough et al., 1980; Buckenham et al., 1982). Bei diesem Ansatz ist von Vorteil, daß das Muster der Luftschadstoffe, wie z.B. das Auftreten von Spitzenkonzentrationen, von Schadstoffgemischen oder schadstofffreien Perioden in der gleichen Weise wie im Freiland fluktuiert. Da jedoch nur eine Kontrolle und eine Behandlungsvariante (d.h. gefiltert/ungefiltert) untersucht werden, sind generelle Aussagen über Belastungs- und Wirkungszusammenhänge nur bedingt möglich. Schlußfolgerungen über die Konsequenzen einer Verbesserung oder Verschlechterung der Luftqualität sind nur begrenzt zu ziehen. U.a. wegen den von Jahr zu Jahr wechselnden Klimabedingungen gilt dies



Abbildung 8: Blick in eine open-top-Kammer des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie mit Gefäßkulturen von Wintergerste. In insgesamt acht dieser Kammern wurden die Versuchspflanzen von November – August gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft ausgesetzt und während der Vegetationsperiode anhand einer Wachstumsanalyse verglichen untersucht. Zum Schutz vor Frosteinflüssen wurden die Gefäße in Torf eingeschlossen (vgl. Weigel et al., 1987).



Abbildung 9: Open-top-Kammern in einem Baumwollfeld des USDA, Agricultural Research Service, Air Quality Programme, North Carolina State University, Raleigh, NC. Nachdem die Aussaat der Baumwolle nach ortsüblichen Praktiken erfolgt war, wurden die Kammern über ausgesuchte Areale des noch jungen Baumwollfeldes gestülpt. Der Versuch diente der Untersuchung der Auswirkungen steigender Ozon-Dosen auf die Baumwollerträge, d.h. es wurde Ozon zudosiert. Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen einer Ozon-Belastung und der Wasserversorgung der Pflanzen wurde ein Teil der Kammern mit Regendächern versehen.

besonders für annuelle Pflanzen. Längerfristige (Colvill et al., 1983; Weigel et al., 1987) oder sogar mehrjährige Wachstumsvergleiche in gefilterter Luft können jedoch dazu beitragen, aus der Vielzahl der auf Pflanzen bzw. Pflanzenbestände einwirkenden Umweltfaktoren (Klima, Pathogenbefall, Bewirtschaftungsmaßnahmen etc.) eine Immissionswirkung herauszulösen. Ein derartiger Versuchsansatz unter Verwendung von open-top-Kammern wird seit 1984 am Institut für Produktions- und Ökotoxikologie durchgeführt; anhand langjähriger Wachstumsvergleiche von Teilflächen eines Dauergrünlandbestandes, über denen open-top-Kammern installiert wurden und die mit gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft versorgt werden, soll das Gefährdungspotential von Luftschadstoffen für diese Ökosysteme festgestellt und bewertet werden.

Die Zufuhr von gefilterter, d.h. gereinigter Umgebungsluft in open-top-Kammern gestattet es, prinzipiell jeden gasförmigen Luftschadstoff unter definierten Bedingungen zuzudosieren. In dieser Hinsicht unterscheiden sich open-top-Kammern nicht von geschlossenen Expositionssystemen. Die bisher durchgeführten Versuche zur Schadgasdosierung bestätigen, daß sich reproduzierbare Gaskonzentrationen in den Kammern einstellen lassen. Beim Einsatz von open-top-Kammern für Begasungsversuche sind verschiedene Möglichkeiten der Schadstoffapplikation gegeben:

#### Zudosierung von Einzelschadstoffen.

Untersuchungen zur phytotoxischen Wirkung von Einzelschadgasen unter Verwendung von open-top-Kammern sind bisher vorwiegend mit den Schadgasen  $\text{SO}_2$  und  $\text{O}_3$  durchgeführt worden (Kochhar et al., 1980; Kress and Miller, 1985; Kress et al., 1985; Cure et al., 1986). Als exemplarisch für den Einsatz von open-top-Kammern in diesem Zusammenhang können die langjährigen Untersuchungen des amerikanischen National Crop Loss Assessment Network (NCLAN) Programmes herange-

zogen werden, für dessen Durchführung die Kammern entwickelt wurden und im Rahmen dessen sie ihre bisher weiteste Verbreitung fanden. In diesem Programm wurden die Auswirkungen vor allem von O<sub>3</sub> auf wichtige landwirtschaftliche Kulturpflanzen in verschiedenen Teilen der USA, d.h. unter verschiedenen klimatischen Bedingungen untersucht. Durch proportionales Zudosieren eines Vielfachen (z.B. des 1,31,9fachen) der jeweils herrschenden O<sub>3</sub>-Konzentration der Umgebungsluft zu Behandlungsvarianten, die in open-top-Kammern mit ungefilterter Umgebungsluft kultiviert wurden, und durch Vergleich mit gefilterten Varianten wurde es möglich, quantitative Beziehungen zwischen Schadgasdosis und Erträgen (Dosis-Wirkungsbeziehungen) zu ermitteln (Heck et al., 1982, 1984). Die durch das NCLAN Programm festgestellten Ertragsverluste wurden ökonomisch bewertet und auf mehrere Milliarden Dollar geschätzt.

Im Vergleich zum O<sub>3</sub> sind nur wenige Begasungsversuche in open-top-Kammern zur Untersuchung der Einzelwirkung von SO<sub>2</sub> unternommen worden (Colvill et al., 1983; Murray, 1984; Kats et al., 1985; Adaros et al., 1988). Untersuchungen zur Phytotoxizität von Stickoxiden unter Verwendung dieser Kammern sind bisher noch nicht bekannt.

Mit open-top-Kammern können außer den Wirkungen der erwähnten Schadgase auch andere, die Land- und Forstwirtschaft berührende Problemkreise, wie etwa die Frage nach den Auswirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre (Strain, 1987) oder regional erhöhter Konzentrationen an NH<sub>3</sub>, auf die Vegetation, experimentell bearbeitet werden (Lockyer und Whitehead, 1986). Weiterhin wäre der Einsatz von open-top-Kammern zur phytotoxischen Risikoabschätzung von Automobilabgasen denkbar. Während über die Wirkungen einiger Hauptbestandteile von Automobilabgasen (CO, NO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) bereits einige experimentelle Daten vorliegen, fehlt es, speziell in der Bundesrepublik Deutschland, noch an Untersuchungen unter naturnahen Bedingungen zur Auswirkung des Gesamtkomplexes Kraftfahrzeugabgase auf Pflanzen (Clausen, 1976). Zur Untersuchung von Vegetationsschäden entlang dicht befahrener Verkehrswege oder in Ballungsgebieten wären open-top-Kammern deshalb geeignet, da vor Ort Wachstumsvergleiche in gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft durchgeführt werden könnten und eine Bewertung direkter Abgaswirkungen möglich wäre. Grundlegende Fragen zur Wirkung von Kraftfahrzeugabgasen könnten durch gezielte Begasungen von Versuchspflanzen mit Rohabgasen beantwortet werden, die in Motorständen erzeugt werden und die nach entsprechender Verdünnung in die open-top-Kammern hineindosiert werden. Die Notwendigkeit derartiger Untersuchungen wird vor allem aus der aktuellen Diskussion über das Ausmaß der Beteiligung von Automobilabgasen an den Waldschäden deutlich.

#### Zudosierung von Schadstoffgemischen

Über die Kombinationswirkungen freilandrelevanter Konzentrationen der Gase SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> sowie deren Interaktionen mit nassen Depositionen, z.B. den sauren Niederschlägen bestehen noch immer erheblich Wissenslücken (Roberts, 1984; Guderian et al., 1985a; Guderian und Tingey, 1987). Entsprechende Untersuchungen in open-top-Kammern sind nur vereinzelt unternommen worden, was z.T. auch auf den hohen experimentellen Aufwand zurückzuführen ist (eine Untersuchung der Einzel- und Kombinationswirkungen dreier Schadgase umfaßt bereits acht Behandlungsvarianten). Die Phytotoxi-

zität von Dreikomponenten-Gasgemischen ist bisher nur in kleineren Expositionssystemen unter Laborbedingungen überprüft worden (Reinert et al., 1982; Mooi, 1984). Über die Auswirkungen einer gleichzeitigen Begasung mit SO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> auf Sojabohnen, Baumwolle und Winterweizen in open-top-Kammern berichten z.B. Heagle et al. (1983a), Heagle et al. (1986) bzw. Kohut et al. (1987). Seit Anfang 1987 werden mit der aus 24 open-top-Kammern bestehenden Begasungsanlage des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie (vgl. Abb. 7) ebenfalls Kombinationsbegasungen verschiedener landwirtschaftlicher Kulturpflanzen (Weidelgras, Raps, Gerste) mit SO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> durchgeführt. Die Untersuchungen sollen 1988 auf drei Gase (SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und NO<sub>2</sub>) ausgeweitet werden.

Nach Einbau entsprechender Dosiervorrichtungen (Regen- oder Nebeldüsen) sind open-top-Kammern ferner zur Untersuchung der Wechselwirkungen gasförmiger Schadstoffe mit sauren Niederschlägen geeignet. Entsprechende Daten liegen bereits für landwirtschaftliche Kulturpflanzen (Johnson et al., 1986; Adaros et al., 1988; vgl. Abb. 10) und für Waldbäume (Seufert und Arndt, 1985; Krause, 1986) vor. Zur Erstellung von Stoffbilanzen und zur Untersuchung nasser und trockener Depositionen auf Böden werden open-top-Kammern mit Lysimetern eingesetzt (Seufert und Arndt, 1985; Krause, 1986).

#### Simulation und Zudosierung von Schadstoffprofilen

Unter Freilandbedingungen ist die Immissionssituation u.a. gekennzeichnet durch das gleichzeitige oder zeitversetzte Auftreten mehrerer Schadstoffe, durch schadstoffarme oder -freie Zeitspannen und durch eine hohe Variabilität der Konzentrationen einzelner Schadstoffe. Die Reaktion einer Pflanze oder Pflanzengemeinschaft auf einen Schadstoff wird also von dessen Konzentration, seiner Interaktion mit anderen Luftverunreinigungsbestandteilen und der Frequenz und Dauer seiner Einwirkung abhängen.

Experimentelle Untersuchungen (Begasungen, Berechnungen etc.) dieser dynamischen Natur einer Schadstoffbelastung Rechnung tragen und die Bedeutung der einzelnen Komponenten einer Schadstoffexposition (Konzentration, Dauer, Frequenz) für deren Wirkung bewerten, stecken noch in den Anfängen (Garsed et al., 1982; Hogsett et al., 1985). In der überwiegenden Mehrzahl der in der Vergangenheit durchgeführten Begasungsversuche wurden Schadgase in konstanten Konzentrationen und kontinuierlich appliziert. Dies geschah nicht nur, weil zunächst grundlegende Fragen der Zusammenhänge von Immission und Wirkung beantwortet werden mußten, sondern auch, weil die technischen Voraussetzungen für derartige Experimente noch nicht gegeben waren, und vor allem, weil es an entsprechenden Rohdaten zur Immissionssituation, d.h. Schadstoffmeßwerten, z.B. auf der Basis von Halbstunden-, Stunden- oder Tagesmittelwerten, mangelte.

Zur Simulation repräsentativer Immissionsszenarien in Begasungsversuchen sind derartige Immissionsrohdaten jedoch unbedingt nötig. Ältere Untersuchungen konnten bereits zeigen, daß die Konzentration eines Schadgases für seine Wirkung auf Pflanzen stärker bestimmend ist als die Dauer seiner Einwirkung (Heck und Tingey, 1971; Reinert und Nelson, 1979). Bei gleicher Dosis (= Konzentration x Zeit) reagierten einige Pflanzenarten unterschiedlich stark auf eine O<sub>3</sub>-Begasung, wenn sie entwe-

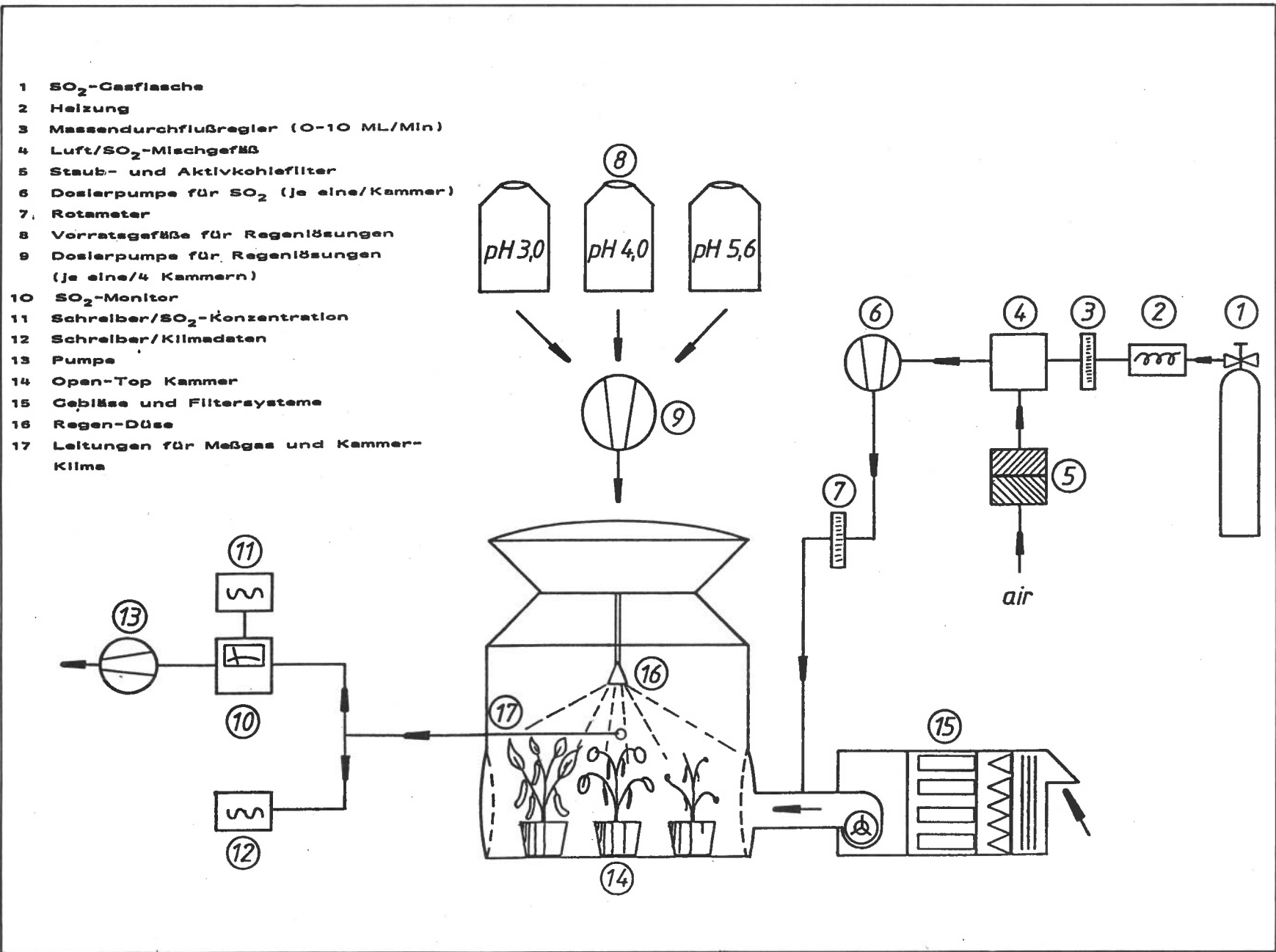


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Versuchsordnung des Instituts für Produktions- und Ökotoxikologie zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schwefeldioxid und künstlichen sauren Niederschlägen auf Pflanzen unter Verwendung von open-top-Kammern (vgl. Adaros et al., 1988).



der konstanten oder variierenden Konzentrationen des Gases ausgesetzt wurden (Musselman et al., 1983).

Diese Beispiele zeigen, daß zur exakten Identifikation und Vorhersage möglicher Effekte der z.Z. relevanten Schadgase SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und NO<sub>2</sub> auf die Vegetation experimentelle Schadstoffbelastungen entwickelt werden müssen, die die fluktuierenden Immissionsverhältnisse des Freilandes widerspiegeln. Ziel zukünftiger Untersuchungen muß daher sein, die Immissionssituation im Freiland anhand der vorliegenden Daten aus den Meßnetzen zur Luftqualitätsüberwachung des Bundes oder der Länder zunächst zu erfassen und auszuwerten und danach, auf der Basis dieser Daten, Schadgasprofile bzw. -szenarien in Begasungsversuchen zu simulieren (Leffohn et al., 1986). Aufgrund der oben erwähnten Naturnähe und der Möglichkeit, Schadgase definiert in die Kammer zu applizieren, sind open-top-Kammern zur Untersuchung der Wirkungen derartiger Profile besonders geeignet. Der Versuch einer Simulation von Freilandimmissionsverhältnissen und eine Bewertung von deren Wirkung erscheint nur sinnvoll, wenn auch die übrigen Wachstumsbedingungen für die zu untersuchenden Pflanzen naturnah sind, d.h. den Freilandverhältnissen entsprechen. Diese Bedingungen sind in open-top-Kammern gegeben (Jäger et al., 1987). In Untersuchungen zur Auswirkung verschiedener O<sub>3</sub>-Profile (täglich oder nur periodisch auftretender Spitzenkonzentrationen) konnten die Kammern in den USA bereits erfolgreich eingesetzt werden (Hogsett et al., 1985). Nach Umrüstung bereits vorhandener Dosier- und Regelsysteme zur kontinuierlichen Schadgasapplikation sollen mittelfristig auch in den open-top-Kammern des Institutes für Produktions- und Ökotoxikologie freilandrelevante Immissionsprofile der Gase SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und NO<sub>2</sub> simuliert werden. Vorbereitend dazu werden z.Z. vom Institut für Produktions- und Ökotoxikologie in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt und der U.S. Environmental Protection Agency Immissionsmeßwerte für diese Gase von verschiedenen Meßstellen in der Bundesrepublik Deutschland zusammengestellt und ausgewertet.

#### Zusammenfassende Bewertung

Nach Heagle und Philbeck (1979) sollen Versuchseinrichtungen zur Begasung von Pflanzen, die unter Verwendung von Kammern arbeiten, folgende essentielle Grundanforderungen erfüllen:

- die Schadstoffkonzentrationen und die Umweltbedingungen innerhalb und zwischen einzelnen Kammern sollen möglichst gleich sein,
- die Oberflächen der verwendeten Materialien sollen inert gegenüber den zu untersuchenden Luftschadstoffen sein,
- die Schadstoffkonzentrationen sollen möglichst präzise kontrollierbar sein und
- die Umwelt- bzw. Klimabedingungen in den Kammern sollen den natürlichen Verhältnissen weitgehend ähnlich sein.

Für spezielle Kammertypen (z.B. Freilandkammern) ist darüber hinaus eine transparente Kammerwandung nötig, die das einfallende Licht qualitativ und quantitativ möglichst wenig verändert. Weiterhin sollen die Kammern ständig mit einem Frischluftstrom versorgt werden, möglichst unter einem leichten Unterdruck stehen, gut mit Pflanzen zu beschicken und leicht zu pflegen sein sowie geringe Kosten verursachen.

Aufgrund der bisher vorliegenden Erfahrungen werden fast sämtliche dieser Kriterien in nahezu idealer Weise von

open-top-Kammern erfüllt. Einzelheiten zu den verschiedenen Ausführungen von open-top-Kammern, der Art der Luftführung und den klimatischen Bedingungen innerhalb der Kammern sind von Jäger et al. (1987) vergleichend beschrieben und bewertet worden und sollen hier nicht aufgeführt werden. Die bei einigen Kammertypen festgestellten Abweichungen des Kammerklimas von den Freilandverhältnissen können – besonders beim Vergleich mit geschlossenen Kammern – als geringfügig angesehen werden und sind bei der Auswertung von Schadstoffwirkungen zu berücksichtigen (Jäger et al., 1987).

Die hier nur kurz skizzierten Einsatzmöglichkeiten von open-top-Kammern gestatten es zum einen, quantitative Beziehungen zwischen Schadstoffangebot und Schadstoffeffekt (Dosis-Wirkungsbeziehungen) zu erarbeiten und damit konkrete Entscheidungshilfen zur Festlegung von Grenzwerten zum Schutz der Vegetation zu liefern, zum anderen, durch Einbeziehung physiologisch-biochemischer und anatomisch-histologischer Untersuchungen an belasteten Pflanzen grundsätzliche Wirkmechanismen aufzuklären, und damit Wirkungskriterien für eine möglichst frühe Diagnose latenter, nicht sichtbarer Schäden zu finden. Mit open-top-Kammern können beide Fragestellungen sowohl unter produktions- als auch ökotoxikologischen Gesichtspunkten bearbeitet werden.

#### Zusammenfassung

Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>) und säurehaltige Niederschläge stellen nach wie vor ein Gefährdungspotential für die Vegetation dar. Neben dem Problemkreis „neuartige Waldschäden“ stellt sich dabei zunehmend die Frage, ob und in welchem Ausmaß landwirtschaftliche Kulturpflanzen bzw. agrarische Ökosysteme einer Beeinflussung durch diese Luftverunreinigungen unterliegen. Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Immissionen dieser Schadstoffe und ihrer Wirkung steht ein differenziertes Spektrum verschiedener Versuchsmethoden zur Verfügung, mit deren Hilfe sich Pflanzenschäden erkennen und bewerten lassen. Im vorliegenden Beitrag wird ein kurzer Überblick über verschiedene Methoden zur Schadstoffexposition (trockene und nasse Deposition) von Pflanzen gegeben, wobei die Einteilung dieser Versuchsmethoden sowohl nach Art und Ausmaß der verwendeten Hilfsmittel, die für die Untersuchung eingesetzt werden, als auch nach der daraus resultierenden Repräsentanz für praktische Immissionsverhältnisse vorgenommen wird. Die aufgeführten Versuchseinrichtungen reichen von völlig geschlossenen Begasungs- oder Beregnungskammern oder -küvetten, mit teilweiser oder vollständiger Kontrolle des Klimas, über Freilandbegasungssysteme bis hin zu Erhebungen unter natürlichen, vorgegebenen Immissionsverhältnissen. Die Vor- und Nachteile dieser Systeme, bei denen einerseits eine hohe Kontrolle des Schadstoffangebotes bei gleichzeitiger, erheblicher Modifizierung der natürlichen Wachstumsbedingungen der Versuchspflanzen, andererseits freilandgleiche Wachstumsbedingungen mit geringer Reproduzierbarkeit des Schadstoffangebotes gegeben sind, werden kurz beschrieben. Besondere Berücksichtigung finden die auch am Institut für Produktions- und Ökotoxikologie vorhandenen „open-top chambers“, mit denen eine Methode zur Verfügung steht, die wesentliche Vorteile von Schadstoffexpositionen in geschlossenen Systemen und in der freien Atmosphäre in sich vereinigt. Die prinzipiellen Einsatzmöglichkeiten dieser open-top chambers sind:

- a) Wachstumsvergleiche zwischen gefilterter und ungefilterter Umgebungsluft und  
 b) Versuche mit kontrollierter Zudosierung von atmosphärischen Schadstoffen.

Dabei können die Kammern entweder über im anstehenden Boden gewachsene Pflanzenbestände gestülpt oder mit Gefäßkulturen beschickt werden. Die bei der gezielten Zudosierung von Schadstoffen gegebenen aktuellen und zukünftigen Möglichkeiten, open-top chambers einzusetzen (Zudosierung von Einzelschadstoffen und Schadstoffgemischen, Simulation von Schadstoffprofilen etc.), werden diskutiert.

### Ecotoxicological Aspects of Air Pollutants

#### 1. Exposure systems for plant effect studies

Air pollutants like sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>), nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), ozone (O<sub>3</sub>) and acidic precipitation still have a great impact on vegetation. This is particularly evident in the problem of the "novel forest decline". However, there is limited information how and to what extent these air pollutants affect growth and yield of agricultural crops and the functioning of agricultural ecosystems, respectively. There are a variety of methodological approaches available, which can be used to investigate exposure - response relationships and to assess possible detrimental effects of air pollutants of agricultural plants.

In this presentation different air pollution exposure systems for wet and dry deposition studies are briefly summarized. A description of various facilities and an evaluation of their performances are given on the basis of i) the degree of environmental control the various systems are capable of and ii) the extent they represent natural, i.e. ambient pollution conditions. The facilities described range from different types of exposure chambers for indoor and outdoor use, to field fumigation systems and methods using ambient pollution gradients. Special emphasis is laid on "open-top chambers", which represent a special type of outdoor chambers and which have significant advantages e.g. over closed chambers and open-atmosphere approaches. 36 of these open-top chambers are operated by the Institut für Produktions- und Ökotoxikologie to investigate the effects of air pollutants on crops and agricultural ecosystems. The principal ways to use open-top chambers, which are comparison of plant growth in filtered and non-filtered ambient air and controlled addition or injection of pollutants into the chambers, are described. Future possibilities to use open-top chambers especially in fumigation studies are also briefly discussed.

### Literatur

- Adaros, G., Weigel, H.J. und Jäger, J.-J.: Effects of sulphur dioxide and acid rain alone or in combination on growth and yield of broad bean plants. - In: *The New Phytologist* 47 (1988), in press.
- Aiga, J., Omasa, K. und Matsumoto, S.: Phytotrons in the National Institute for Environmental Studies. - In: *Reserach Report of the National Institute of Environmental Studies, Japan* 66 (1984), S. 133-154.
- Arndt, U., Nobel, W. und Schweizer, B.: *Bioindikatoren*. - Ulmer, Stuttgart, 1987.
- Ashenden, T.W. und Mansfield, T.A.: Extreme pollution sensitivity of grasses when SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> are present in the atmosphere together. - In: *Nature* 273 (1978), S. 142-143.
- Becker, K.H., Fricke, W., Löbel, J. und Schurath, U.: Formation, transport, and control of photochemical oxidants. - In: *Air Pollution by Photochemical Oxidants*. Guderian, R. (Hrsg.). Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1985, S. 3-125.
- Bell, J.N.B.: The direct effects of air pollution on plants. - In: *Air pollution and plants*. Troyanowsky, C. (Hrsg.) VCH Verlagsgesellschaft Weinheim 1985, S. 116-127.
- Brough, A., Parry, M.A.J. und Whittingham, C.P.: The effect of low concentrations of ambient pollutants on the growth and yields of crops. - In: *Reference Book, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food* 326 (1980), S. 87-94.
- Buckenham, A.H., Parry, M.A.J. und Whittingham, C.P.: Effects of aerial pollutants on the growth and yield of spring barley. - In: *Annales of Applied Biology* 100 (1982), S. 179-187.
- Chevone, B.J., Yang, Y.S., Winner, W.E., Storks-Colter, J. und Long, S.J.: A rainfall simulator for laboratory use in acidic precipitation studies. - In: *Journal of Air Pollution Control Association* 31 (1984), S. 355-359.
- Claussen, T.: *Untersuchungen über die Reaktionen von Pflanzen auf Automobilabgase*. - In: *Dissertation, Technische Universität Berlin*, 1976.
- Collvill, K.E., Bell, R.M., Roberts, T.M. und Bradshaw, A.D.: 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.
- Cure, W.W., Sanders, J.S. und Heagle, A.S.: Crop yield response predicted with different characterizations of the same ozone treatments. - In: *Journal of Environmental Quality* 15 (1986), S. 251-254.
- Darley, E.F., Lerman, S. und Oshima, R.J.: Plant exposure chambers for dust studies. - In: *Journal of Air Pollution Control Association* 18 (1968), S. 28-29.
- DeCormis, L., Bonte, J. und Tisne, A.: Experimental technique for determining the effect on vegetation of sulphur dioxide pollutants applied continuously in subnecrotic doses. - In: *Pollution Atmospherique* 17 (1975), S. 103-107.
- Enyedi, A. und Kuja, A.L.: Assessment of relative sensitivities during early growth stages of selected crop species subjected to simulated acidic rain. - In: *Water, Air and Soil Pollution* 31 (1986), S. 325-335.
- 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).

- Evans, L.S., Lewin, K.F., Patti, M.J. und Cunningham, F.A.: Productivity of field-grown soybeans exposed to simulated acidic rain. – In: *New Phytologist* 93 (1983), S. 377-388.
- Fowler, D.: Removal of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere in rain and dry deposition. – In: *Proceedings of International Conference on Ecological Impact of Acid Precipitation*. SNSF Project, Sandeford, Norway, 1980, S. 22-32.
- Garsed, S.G., Mueller, P.W. und Ruther, A.J.: An experimental design for studying the effects of fluctuating concentrations of SO<sub>2</sub> on plants. – In: *Effects of gaseous air pollutants in agriculture and horticulture*. Unsworth, M.H. und Ormrod, D.P. (Hrsg.). Butterworths, London, 1982, S. 455-457.
- Greenwood, P., Greenhalgh, A., Baker, C. und Unsworth, M.: A computer-controlled system for exposing field crops to gaseous air pollutants. – In: *Atmospheric Environment* 16 (1982), S. 2261-2266.
- Guderian, R.: Air Pollution. Phytotoxicity of acidic gases and its significance in air pollution control. – *Ecological Studies* 22, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1977.
- Guderian, R. und Stratmann, H.: Freilandversuche zur Ermittlung von Schwefeldioxidwirkungen auf die Vegetation. Teil 1. Übersicht zur Versuchsmethodik und Versuchsauswertung. – *Forschungsberichte des Landes Nordrhein Westfalen*, Nr. 1118. Westdeutscher Verlag Köln und Opladen 1962.
- Guderian, R. und Tingey, D.T.: Notwendigkeit und Ableitung von Grenzwerten für Stickstoffoxide. – *UBA Berichte* 1/87. Umweltbundesamt, Berlin, 1987.
- Guderian, R., Tingey, D.T. und Rabe, R.: Effects of photochemical oxidants on plants. In: *Air pollution by photochemical oxidants*. – Guderian, R. (ed.). *Ecological Studies* 52, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1985 a, S. 129-333.
- Guderian, R., Küppers, K. und Six, R. (1985b): Wirkungen von Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid auf Fichte und Pappel bei unterschiedlicher Versorgung mit Magnesium und Kalzium sowie auf die Blattflechte *Hypogymnia physodes*. – In: *VDI-Berichte* 560 (1985b), S. 657-701.
- Heagle, A.S.: Interactions between air pollutants and plant parasites. – In: *Annual Review of Phytopathology* 11 (1973), S. 365-388.
- Heagle, A.S. und Philbeck, R.B.: Exposure techniques. – In: *Methodology for the assessment of air pollution effects on vegetation*. Heck, W.W., Krupa, S.V. und Linzon, S.N. (eds.). *Air Pollution Control Association*, Pittsburgh, 1979, S. 6/1-6/19.
- Heagle, A.S., Body, D.E. und Heck, W.W. (1973): An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants. – In: *Journal of Environmental Quality* 2 (1973), S. 365-368.
- Heagle, A.S., Heck, W.W., Rawlings, J.O. und Philbeck, R.B.: Effects of chronic doses of ozone and sulphur dioxide on injury and yield of soybeans in open-top field chambers. – In: *Crop Science* 23 (1983a), S. 1184-1191.
- Heagle, A.S., Philbeck, R.B., Brewer, P.F. und Ferrell, R.F.: Responses of soybeans to simulated acid rain in the field. – In: *Journal of Environmental Quality* 12 (1983b), S. 539-543.
- Heagle, A.S., Heck, W.W., Lesser, V.M., Rawlings, J.O. und Mowry, F.L.: Injury and yield response of cotton to chronic doses of ozone and sulfur dioxide. – In: *Journal of Environmental Quality* 15 (1986), S. 375-382.
- Heck, W.W. und Tingey, D.T.: Ozone time – concentration model to predict acute foliar injury. – In: *Proceedings of the Second International Clean Air Congress*. England, H.M. und Beery, W.T. (Hrsg.). Academic Press, New York, 1971, S. 249-255.
- Heck, W.W., Dunning, J.A. und Johnson, H.: Design of a simple plant exposure chamber. – In: *U.S. Dep. of Health, Educ., Welfare. National Center for the Pollution Control Publication* APTD-68-6, 1968.
- Heck, W.W., Philbeck, R.B. und Dunning, J.A.: A continuous stirred tank reactor (CSTR) system for exposing plants to gaseous air contaminants. Principles, specifications, construction and operation. – In: *U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-5-181* (1978).
- Heck, W.W., Taylor, O.C., Adams, R., Bingham, G., Miller, J., Preston, E. und Weinstein, L.: 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 Temple, P.J.: 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 Holmann, S.R.: 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.
- Irving, P.M.: Acidic deposition effects on vegetation: a review and analysis of methodology. – In: *VDI-Berichte* 500 (1983), S. 215-223.
- Jacobson, J.S., Troiano, J., Heller, L.: Stage of development, responses, and recovery of radish plants from episodic exposure to simulated acidic rain. – In: *Journal of Experimental Botany* 36 (1985), S. 159-167.
- Jäger, H.-J. und Steubing, L.: Fraktionierte Schwefelbestimmung in Pflanzenmaterial zur Beurteilung einer SO<sub>2</sub>-Einwirkung. – In: *Angewandte Botanik* 44 (1970), S. 209-221.
- Jäger, H.J. und Klein, H.: Biochemical and physiological effects of SO<sub>2</sub> on plants. – In: *Angewandte Botanik* 54 (1980), S. 337-348.

- Jäger, H.J., Weigel, H.J., Guderian, R., Arndt, U. und Seufert, G.: Methodological approaches: Part I: Experiments with open-top chambers: Results, advantages and limitations. – Commission of the European Communities: Symposium: Effects of Air Pollution on Terrestrial and Aquatic Ecosystems. Grenoble, France 1987. In press.
- Johnston, J.W., Shriner, D.S. und Abner, C.H.: Design and performance of an exposure system for measuring the response of crops to acid rain and gaseous pollutants in the field. – In: Journal of Air Pollution Control Association 36 (1986), S. 894-899.
- Kats, G., Dawson, P.J., Bytnerowicz, A., Wolf, J.W., Thompson, D.R. und Olszyk, D.M.: Effects of ozone or sulphur dioxide on growth and yield of rice. – In: Agriculture, Ecosystems and Environment 14 (1985), S. 103-117.
- Klein, H., Priebe, A., Weigel, H.J. und Jäger, H.-J.: Ökophysiologische Aspekte der Kontamination von Kulturpflanzen mit dem Schwermetall Cadmium. – In: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie (Freising-Weißenstephan 1979), Band VIII, 1980, S. 481-491.
- Kochhar, M., Blum, U. und Reinert, R.A.: Effects of O<sub>3</sub> and (or) fescue on ladino clover: interactions. – In: Canadian Journal of Botany 58 (1980), S. 241-249.
- Könnecker, G., Aust, H.J. und Jäger, H.-J.: Der Einfluß säurehaltiger Niederschläge auf die Entwicklung von Erysiphe graminis DC. f. sp. tritici Marchal. – In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 94 (1987), S. 58-67.
- Kohut, R.J., Amundson, R.G., Laurence, J.A., Colavito, L., van Leuken, P. und King, P.: Effects on ozone and sulphur dioxide on yield of winter wheat. – In: Phytopathology 77 (1987), S. 71-74.
- Koziol, M.J. und Whatley, F.R.: Gaseous air pollutants and plant metabolism. – Butterworths, London 1984.
- Krause, G.H.M.: Zur Aufnahme von Zink und Cadmium durch oberirdische Pflanzenorgane. – In: Dissertation, Universität Bonn, 1974.
- Krause, G.H.M.: Persönliche Mitteilung. 1986.
- Kress, L.W. und Miller, J.E.: Impact of ozone on field-corn yield. – In: Canadian Journal of Botany 63 (1985), S. 2408-2415.
- Kress, L.W., Miller, J.E. und Smith, H.J.: Impact of ozone on winter wheat yield. – In: Environmental and Experimental Botany 25 (1985), S. 211-228.
- Kuja, A., Jones, R. und Enyedi, A.: A mobile rain exclusion canopy system to determine dose-response relationships for crops and forest species. – In: Water, Air, and Soil Pollution 31 (1986), S. 307-315.
- Laurence, J.A., Maclean, D.C., Mandl, R.H., Schneider, R.E. und Hansen, K.S.: Field tests of a linear gradient system for exposure of row crops to SO<sub>2</sub> and HF. – In: Water, Air and Soil Pollution 17 (1982), S. 399-407.
- Lee, J.J. und Lewis, R.A.: Zonal Air Pollution System: Design and performance. – In: Preston, E.M. und Lewis, R.A. (Hrsg.): The bioenvironmental impact of a coal-fired power plant. Third Interim Report, Colstrip, Montana. U.S. EPA, Corvallis Environmental Research Laboratory. EPA - 600 /3-78-021, 1978.
- Lee, J.J., Neely, G.E., Perrigan, S.C. und Grothaus, L.C.: Effects of simulated sulphuric acid rain on yield, growth and foliar injury of several crops. – In: Environmental and Experimental Botany, 21 (1981), S. 171-185.
- Lefohn, A.S., Hogsett, W.E. und Tingey, D.T.: A method for developing ozone exposures that mimic ambient conditions in agricultural areas. – In: Atmospheric Environment 20 (1986), S. 361-366.
- Lewin, K.F. und Evans, L.S.: Design of an experimental system to determine the effects of rainfall acidity on vegetation. – In: Brookhaven National Laboratory Report 34649. 1984.
- Lockyer, D.R. und Whitehead, D.C.: The uptake of gaseous ammonia by the leaves of Italian ryegrass. – In: Journal of Experimental Botany 37 (1986), S. 919-927.
- Lockyer, D.R., Cowling, D.W. und Jones, L.H.P.: A system for exposing plants to atmospheres containing low concentrations of sulphur dioxide. – In: Journal of Experimental Botany 27 (1976), S. 397-409.
- Lucas, P.W., Cottam, D.A. und Mansfield, T.A.: A large-scale fumigation system for investigating interactions between air pollution and cold stress on plants. – In: Environmental Pollution 43 (1987), S. 15-28.
- Mandl, R.H., Weinstein, L.H., McCune, D.C. und Keneny, M.: 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.
- McLaughlin, S.B., Schorn, V.J. und Jones, H.C.: A programmable exposure system for kinetic dose-response studies with air pollutants. – In: Journal of Air Pollution Control Association 26 (1976), S. 132-135.
- McLeod, A.R., Fackrell, J.E. und Alexander, K.: Open-air fumigation of field crops: criteria and design for a new experimental system. – In: Atmospheric Environment 19 (1985), S. 1639-1649.
- Miller, J.E., Spurgel, D.G., Muller, R.N., Smith, H.J. und Xerikos, P.B.: Open air fumigation system for investigating sulphur dioxide effects on crops. – In: Phytopathology 70 (1980), S. 1124-1128.
- Mooi, J.: Wirkungen von SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> und ihrer Mischungen auf Pappeln und einige andere Pflanzenarten. – In: Der Forst- und Holzwirt 18 (1984), S. 438-444.
- Murray, F.: Responses of subterranean clover and ryegrass to sulphur dioxide under field conditions. – In: Environmental Pollution 36 (1984), S. 239-249.
- Musselmann, R.C., Oshima, R.J. und Gallavan, R.E.: Significance of pollutant concentration dis-

- tribution on the response of red kidney beans to ozone. — In: *Journal of the American Society of Horticultural Scientists* 108 (1983), S. 347-351.
- Musselmann, R.C., McCool, P.M., Oshima, R.J. und Teso, R.R.: Field chambers for assessing crop loss from air pollutants. — In: *Journal of Environmental Quality* 15 (1986), S. 152-157.
- Oshima, R.J., Poe, M., Braegelmann, P.K., Baldwin, D.W. und von Way, V.: Ozone dosage — crop loss function for alfalfa: a standardized method for assessing crop losses from air pollutants. — In: *Journal of Air Pollution Control Association* 26 (1976), S. 861-865.
- Payer, H.D., Blank, L.W., Bosch, C., Gnatz, G., Schmolke, W. und Schrammel, P.: Simultaneous exposure of forest trees to pollutants and climatic stress. — In: *Water, Air and Soil Pollution* 31 (1986), S. 485-491.
- Posthumus, A.C.: New results from SO<sub>2</sub>-fumigations of plants. — In: *VDI-Berichte* 314 (1978), S. 225-230.
- Reich, P.B., Amundson, R.G. und Lassoie, J.P.: Reduction in soybean yield after exposure to ozone and sulphur dioxide using a linear gradient exposure technique. — In: *Water, Air and Soil Pollution* 17 (1982), S. 29-35.
- Reinert, R.A. und Nelson, P.V.: Sensitivity and growth of twelve elatior begonia cultivars to ozone. — In: *Horticultural Science* 14 (1979), S. 747-749.
- Reinert, R.A., Schriener, D.S. und Rawlings, J.O.: Responses of radish to all combinations of three concentrations of nitrogen dioxide, sulphur dioxide and ozone. — In: *Journal of Environmental Quality* 11 (1982), S. 52-57.
- Roberts, T.M.: Long-term effects of sulphur dioxide on crops: an analysis of dose-response relations. — In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 305 (1984), S. 299-316.
- Rogers, H.H., Jeffries, H.E., Stahel, E.P., Heck, W.W., Ripperton, L.A. und Whitherspoon, A.M.: Measuring air pollutant uptake by plants: a direct kinetic approach. — In: *Journal of Air Pollution Control Association* 27 (1977), S. 1192-1197.
- Scherbatskoy, T. und Klein, R.M.: Responses of spruce and birch foliage to leaching by acidic mist. — In: *Journal of Environmental Quality* 12 (1983), S. 179-185.
- Schubert, R.: Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen. — Gustav Fischer, Stuttgart 1985.
- Seufert, G. und Arndt, U.: Open-top Kammern als Teil eines Konzeptes zur ökosystemaren Untersuchung der neuartigen Waldschäden. — In: *Allgemeine Forstzeitschrift* 40 (1985), S. 13-18.
- Shinn, J.H., Clegg, B.R. und Stuart, M.L.: A linear gradient chamber for exposing field plants to controlled levels of air pollutants. — In: UCRL Reprint No. 80411. Lawrence Livermore Laboratory. University of California 1977.
- Strain, B.R.: Direct effects of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> on plants and ecosystems. — In: *Trends in Ecology and Evolution* 2 (1987), S. 18-21.
- Tingey, D.T., Wilhour, R.G. und Taylor, O.C.: The measurement of plant responses. — In: *Methodology for the assessment of air pollution effects on vegetation*. Heck, W.W., Krupa, S.V. und Linzon, S.N. (Hrsg.). Air Pollution Control Association, Pittsburgh, 1979, S. 7/1-7/35.
- Troiano, J., Jacobson, J.S. und Heller, L.: Effects of simulated acidic rain applied alone and in combination with ambient rain on growth and yield of field-grown snap bean. — In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 11 (1984), S. 161-172.
- Unsworth, M.H. und Ormrod, D.P.: Effects of gaseous air pollutants in agriculture and horticulture. Butterworths, London 1982.
- VanHaut, H.: Test methods to prove phytotoxic pollutants. — In: *Environmental Pollution* 3 (1972), S. 123-132.
- Weigel, H.J. und Jäger, H.-J.: Physiologische und biochemische Verfahren zum Nachweis von Schadstoffwirkungen. — In: *Staub, Reinhaltung der Luft* 45 (1985), S. 269-271.
- Weigel, H.J., Adaros, G. und Jäger, H.-J.: An open-top chamber study with filtered and non-filtered air to evaluate the effects of air pollutants on crops. — In: *Environmental Pollution* 47 (1987), S. 231-244.
- 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 (m.d.W.d.G.b.): Prof. Dr. H.-J. Jäger.