

*Ein modulares System
zur Untersuchung der Auswirkungen von
erhöhtem atmosphärischen Kohlendioxid
auf Grünland-Ökosysteme*



*Dissertation
Siegfried W. Schmidt*

**Ein modulares System
zur Untersuchung der Auswirkungen von
erhöhtem atmosphärischen Kohlendioxid
auf Grünland-Ökosysteme**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an den Naturwissenschaften (Fachrichtung Biologie)
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

SIEGFRIED W. SCHMIDT

D26

Dekan: Prof. Dr. Jürgen Janek

Gutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Jäger

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Hans-Joachim Weigel

Tag der mündlichen Prüfung:

Gießen, im März 2003

Habt Ehrfurcht vor der Pflanze.
Alles lebt durch sie.

(Über dem Eingang des Botanischen Gartens in Berlin-Dahlem, Königin-Louise-Straße)

Meinen Lehrern

AUGUST GRIMMONI
(Egelsbergschule, Göttingen)

RICHARD LIESEGANG
KARL-HEINZ STRUBE
(Jacobson Gymnasium, Seesen)

REINHARD A. FENGER
(Darmstadt)

in dankbarer Erinnerung gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Kammer- und Air-Exclusion-Expositionssysteme	5
2.1. Geschlossene Kammern	5
2.2. Offene Kammern	9
2.3. Air-Exclusion-Systeme	14
2.4. Bewertung der Kammer-Expositionssysteme	16
3. Freiland-Expositionssysteme	17
3.1. Allgemeines	17
3.2. Statische Plume-Systeme	17
3.3. Dynamische Plume-Systeme	21
3.3.1. Grundsätzlicher Aufbau	21
3.3.2. System von GREENWOOD	23
3.3.3. Systeme von McLEOD	24
3.3.4. BNL-FACE	27
3.3.5. System von KROPFF	29
3.3.6. System von WULFF	31
3.3.7. AMIBA	32
3.3.8. Mini-FACE und Mid-FACE	33
3.4. Bewertung der Freiland-Expositionssysteme	35
3.4.1. Die Regelstrecke	35
3.4.1.1. Das Plenum	35
3.4.1.2. Die Gasauslässe	37
3.4.2. Regler	40
3.4.2.1. Allgemeines	40
3.4.2.2. Struktur	41
3.4.2.3. Abtastzeit	43
3.4.3. Spurengasdosierung	44
3.4.4. Konzentrationsmeßgerät	45
3.4.4.1. Allgemeines	45
3.4.4.2. Meßgasleitungen	46
3.4.4.3. Zeitmultiplex	47
4. Theoretisches Konzept	49
4.1. Entwicklungsziele	49
4.2. Die Regelstrecke	50
4.2.1. Ein neues isotropes Plenum	50
4.2.2. Die praktische Ausführung	52
4.2.3. Luftauslässe	54
4.2.4. Schaltmuster	55
4.2.5. Die Messung des Windes	57

4.3. Simulation der Lichtverhältnisse	59
4.3.1. Allgemeines	59
4.3.2. Topf-Modell einer Anlage	60
4.3.3. Skyline des geplanten Standortes	63
4.3.4. Berechnung der Lichtverhältnisse	65
4.4. Die Regelung	67
4.4.1. PID-Regler	68
4.4.2. Reglereinstellung	70
4.4.3. Charakterisierung der Regelstrecke	72
4.4.4. Störgrößenaufschaltung	74
4.5. Konzentrationsmessung	75
4.5.1. Anforderungen	75
4.5.2. Atmosphärisches Kohlendioxid	76
4.5.3. Relative Konzentration	77
4.5.4. Kalibration	77
4.5.5. Autokalibrator	78
4.5.6. Referenzluft	78
4.6. Spurengasdosierung	79
4.6.1. Geschaltete Drosselventile	80
4.6.2. Pulsbreiten-Modulation	81
4.6.3. Vergleich der Stellgeräte	81
4.7. Funkuhr zur Tag/Nacht-Umschaltung	82
5. Prototyp	85
5.1. Das neue isotrope Plenum	85
5.1.1. Gesamtansicht	85
5.1.2. Luftauslässe	87
5.2. Speicherprogrammierbare Steuerung	89
5.3. Konzentrationsmessung	92
5.3.1. Monitor und Wechsler	92
5.3.2. Relative Konzentration	93
5.4. Gasdosierung ELPNEU	94
5.5. Regelstrecke	96
5.5.1. Allgemeines	96
5.5.2. Charakterisierung	98
5.5.3. Reglereinstellung	100
5.6. Schlußfolgerungen	102
5.6.1. Speicherprogrammierbare Steuerung	102
5.6.2. Monitor und Wechsler	103
5.6.3. Stellgerät ELPNEU	103
5.6.4. Das aktive Plenum	104
6. Die PLUMEX-Anlage	105
6.1. Gesamtansicht	105
6.1.1. Das aktive Plenum	107
6.1.2. Luftklappen	108
6.1.3. Inhärente Störgrößenaufschaltung	109
6.1.4. Luftauslässe	110

6.2. Azimutsteuerung	111
6.2.1. Allgemeines	111
6.2.2. Digitales Filter	112
6.2.3. Sender (Master)	115
6.2.4. Bussystem	118
6.2.5. Empfänger (Slave)	119
6.2.6. Ventilinsel	120
6.3. Spurengaskonzentration	122
6.3.1. Gasmeßgerät	122
6.3.2. Autokalibration	123
6.3.3. Regler	126
6.3.4. Gasbereitstellung	127
6.4. Ergänzende Systeme	129
6.4.1. Funkuhr	129
6.4.2. Aspirator	132
6.4.3. Schutzbegasung	134
6.4.4. Fehlerdiagnose mit künstlicher Intelligenz	136
6.5. Meßplatz	138
7. Bewertung des neu entwickelten Expositionssystems	141
7.1. Vergleichbarkeit von Expositionssystemen	141
7.2. Rahmenbedingungen	143
7.2.1. Versuchsgelände in Leihgestern	143
7.2.2. Windverhältnisse	145
7.2.3. Nachbareffekte	150
7.3. Qualität des Anreicherungsregimes	154
7.3.1. Stabilität der Gaskonzentration	154
7.3.2. Horizontale Konzentrationsverteilung	160
7.3.3. Betriebskosten, Gasverbrauch	161
7.3.4. Apertur der PLUMEX	170
7.3.5. Zuverlässigkeit	171
7.4. Mögliche Weiterentwicklungen	176
7.4.1. Erweiterte Regenfestigkeit	176
7.4.2. Schnellere Luftklappen	176
7.4.3. Energieeinsparung	177
7.4.4. Regelung mit <i>Fuzzy Logik</i>	178
7.4.5. Kennfeldsteuerung	179
8. Zusammenfassung	181
8.1. Spurengaskonzentration	181
8.2. Gasverbrauch	182
8.3. Zuverlässigkeit	182
8.4. Flexibilität	182
9. Literatur	183
Danksagung	191

Anhang	193
Abkürzungen und Akronyme	195
Abbildungsverzeichnis	197
Tabellenverzeichnis	201
 Programmquellen	 203
Assembler	205
dBASE	232
PASCAL	233
STEP5	245

1. Einleitung

Die Erde ist der einzige Planet des wissenschaftlich erfaßbaren Universums, der Leben trägt. Diese Sonderstellung verdankt die Erde nicht zuletzt der sie umgebenden Lufthülle mit ihrer charakteristischen Zusammensetzung. Diese Atmosphäre steht als Subsystem der überaus komplexen globalen Ökosphäre in sehr enger Wechselwirkung zur Hydrosphäre, Lithosphäre, Kryosphäre und Biosphäre. Sie ist ein alle Sphären verbindendes Transportmedium für Energie, Stoffe und Information.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre wirkt bei oberflächlicher Betrachtung zunächst recht einfach: Zwei Hauptbestandteile, Stickstoff (N_2 , 78,08 %) und Sauerstoff (O_2 , 20,95 %), machen zusammen bereits 99 % der Inhaltsstoffe aus. Nimmt man das Edelgas Argon (Ar, 0,93 %) hinzu, ist die Zusammensetzung ¹⁾ fast vollständig beschrieben.

Alle weiteren Bestandteile der Luft liegen nur in Spuren ("Spurengase") vor und lassen sich mengenmäßig nicht sinnvoll durch Prozentangaben ausdrücken. Tabelle 1 nennt die häufigsten Vertreter dieser Spurengase und gibt die durchschnittlichen Konzentrationen an ²⁾. Die Konzentrationsangaben in dieser Tabelle umspannen sieben Zehnerpotenzen. Die Summe der aufgelisteten Spurengase macht weniger als 0,04 % der Luftbestandteile aus.

Tab. 1: Spurengase in der Umgebungsluft

Bezeichnung	Symbol	Gehalt
Kohlendioxid	CO_2	7 g·m ⁻³
Neon	Ne	200 mg·m ⁻³
Stickoxide	NO_x	40 mg·m ⁻³
Ozon	O_3	50 µg·m ⁻³
Schwefeldioxid	SO_2	6 µg·m ⁻³
Kohlenmonoxid	CO	500 ng·m ⁻³

Der Anteil eines Gases an der Luftzusammensetzung sagt jedoch wenig über seine wirkliche Bedeutung für die biogeochemischen Stoffkreisläufe aus. Obwohl der atmosphärische Stickstoff (N_2) den größten N-Pool des Globus darstellt, sind die globalen N-Flüsse zwischen Atmosphäre und Biosphäre vernachlässigbar klein im Vergleich zu den internen Umsätzen in Ökosystemen (vgl. z.B. SCHLESINGER 1991).

Gase wie Argon oder die übrigen Edelgase verhalten sich in der Ökosphäre völlig inert. Mit Einschränkungen gilt dies auch für Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die erst nach ihrem

¹ Alle Angaben sind auf trockene und staubfreie Luft bezogen.

² Die wirklichen Konzentrationen unterliegen örtlich und zeitlich sehr starken Schwankungen.

Eintritt in die Stratosphäre und ihrer nachfolgenden photochemischen Zersetzung in die Stoffkreisläufe eingreifen.

Demgegenüber stellt Kohlendioxid, das nur einen Anteil von derzeit 370 ppm an der Atmosphäre besitzt, den mengenmäßig wichtigsten Pflanzennährstoff und gleichzeitig die einzige Kohlenstoffquelle in den terrestrischen Ökosystemen dar.

Der niederländische Arzt und Naturforscher INGENHOUSZ³⁾ beschrieb 1785 zusammen mit Veröffentlichungen über Elektrizität, Magnetismus und atmosphärische Gase erstmals die Kohlendioxidassimilation und die Atmung der Pflanzen. Fünfundzwanzig Jahre später präzisierte der Genfer Naturforscher DE SAUSSURE (1804) die Vorgänge in den grünen Pflanzen, die mit ihren Blättern Kohlendioxid aufnehmen, es bei Licht verarbeiten, dadurch wachsen und Sauerstoff abgeben.

Neben Kohlendioxid können auch andere Spurengase, wie Schwefeldioxid und einige gasförmige Stickstoffverbindungen, düngend wirken. Auf nährstoffarmen Standorten können bis zu 50 % der Nährstoffaufnahme der Pflanzen über Einträge aus der Atmosphäre gedeckt werden (ULRICH 1983).

Bei den letztgenannten Spurengasen ist die Grenze zwischen düngendem und toxischem Effekt allerdings fließend. Sobald die Aufnahme dieser Gase die Assimilationsfähigkeit der Vegetation übersteigt, treten toxische Effekte auf. Dies gilt besonders für Schwefeldioxid, das nur von einigen Pflanzenarten (z.B. Ölsaaten) aufgrund des hohen Schwefelbedarfs in hohen Konzentrationen metabolisiert werden kann (JÄGER *et al.* 2001), aber auch für N-haltige Verbindungen wie Ammoniak (FANGMEIER & JÄGER 2001) oder Stickstoffdioxid (GUDERIAN & TINGEY 1987).

Daneben gibt es Spurengase mit rein toxischer Wirkung, wobei hier bodennahes Ozon an erster Stelle zu nennen ist.

Aus dem oben gesagten ist erkennbar, wie bedeutsam der Einfluß von Spurengasen auf Pflanzen und Pflanzengesellschaften ist. Diese Zusammenhänge aufzuklären war seit Entdeckung dieser Einflüsse stets eine große Herausforderung für die Experimentelle Botanik.

Um Ursache-Wirkung-Beziehungen für Luftwirkstoffe in natürlichen Ökosystemen anhand von Experimenten mit Begasungssystemen zu untersuchen, dürfen die dafür einzusetzenden Anlagen die natürlichen Bedingungen im Idealfall nicht abändern.

Sind diese experimentellen Voraussetzungen gegeben, dann können Fragen nach

³⁾ JAN INGENHOUSZ, geb.: 8.12.1730 Breda, gest.: 7.9.1799 Bowood (Wiltshire) [Quelle: Der große Knauer, München]

- den Einflüssen der Luftwirkstoffe auf das Artenspektrum der Biozönose,

Kulturlandschaften haben einen hohen ökologischen und ästhetischen Wert. Viele von halbnatürlichen Ökosystemen dominierte Landschaften stehen bereits unter Naturschutz. Die Artendiversität und die Stabilität solcher Systeme kann durch luftgetragene Spurenstoffe erheblich beeinträchtigt werden. Dies gilt besonders für solche Ökosysteme, die durch Nährstoffentzug entstanden sind und nur unter solchen Bedingungen weiter bestehen können. So wird z.B. für die zunehmende Ausbreitung von Gräsern in den *Calluna*-Heiden Mittel- und Nordwesteuropas u.a. die Stickstoffdeposition verantwortlich gemacht (STEUBING & BUCHWALD 1989, FANGMEIER *et al.* 1994). Mit Begasungsexperimenten an naturbelassenen Standorten könnte das Potential der Gefährdung von "Naturparks" nach Umfang und Zeit abgeschätzt werden.

- den Veränderungen der Biomasse-Zusammensetzung,

Die explosionsartig anwachsende Weltbevölkerung erfordert zu ihrer Versorgung, daß die Ernten im gleichen Maße "explosionsartig" mitwachsen, wenn es nicht zu globalen Verteilungskonflikten kommen soll. Eine durch veränderte Spurengaszusammensetzung der Luft induzierte andere Zusammensetzung (C/N-Verhältnis, Verdaubarkeit) der Biomasse von Primärproduzenten hat Einfluß auf den energetischen Wirkungsgrad von Nahrungsketten und damit letztendlich auch auf die Ernährung der Weltbevölkerung. Durch "Simulation der Zukunft" mit Freilandbegasungssystemen können Aussagen über mögliche Veränderungen des Energietransportes innerhalb der Nahrungsketten gemacht werden.

- der Allokation von Assimilaten und

Durch Verwendung von markierten Spurengasen (Isotope) können Stoffströme in realen Ökosystemen aufgedeckt werden. Diese Kenntnis würde eine Verfeinerung der theoretischen Ökosystemmodelle ermöglichen, z.B. bei der Suche nach dem *missing sink* in den mathematischen Modellen des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Erste diesbezügliche und erfolgreiche Ansätze sind bereits in Ökosystemen mit annualen Pflanzengesellschaften durchgeführt worden (HUNGATE *et al.* 1997).

- funktionalen Zusammenhängen der Biosphäre/Atmosphäre-Interaktionen

Die Vegetation ist selber eine Quelle von Spurengasen. Neben der Abgabe von Kohlendioxid bei der Atmung ist hier die Erzeugung von Duft und Lockstoffen (u.a. Terpene) zu nennen. Eine indirekte Erzeugung ist die Freisetzung von Methan⁴⁾ aus Reisfeldern. Die Stoffumsätze bei diesen Vorgängen liefern wichtige Daten für die mathematische Modellierung von Ökosystemen. Mit Begasungsexperimenten lassen sich diese funktionalen Zusammenhänge gezielt ermitteln und dadurch die Qualität von mathematischen Modellen verbessern.

bearbeitet werden.

Um den Einfluß von unterschiedlichen Gasen und Gaskonzentrationen auf Ökosysteme experimentell zu ermitteln, wurden in der Vergangenheit viele unterschiedliche Ansätze erprobt, die wegen Schwächen in den Konzepten oder den damals begrenzten technischen Möglichkeiten nur eine sehr grobe Annäherung an reale Verhältnisse ermöglichten. Sie ließen noch keine ausreichend scharfe Aussage darüber zu, wie sich Ökosysteme unter natürlichen

⁴ Siehe auch die Versuche von DRAKE *et al.* (1989) in einer Salzmarsh.

Freilandbedingungen verhalten, wenn im Experiment lediglich die Spurengaskonzentration kontrolliert wird, die übrigen Umweltparameter aber weitgehend unbeeinflusst bleiben.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Schaffung eines neuartigen Expositionssystems, das unter Ausnutzung der heutigen technischen Möglichkeiten die natürlichen Bedingungen möglichst wenig stört und z.B. den natürlichen Licht- und Wasserhaushalt sowie die Strömungsverhältnisse erhalten soll. Gleichzeitig soll das System den Anspruch erfüllen, mit geringstem Betriebsmittel-, Energie- und Wartungsaufwand auszukommen und einen zuverlässigen und wirtschaftlichen Betrieb über eine lange Einsatzdauer zu gewährleisten.

Nachstehend werden zunächst existierende Expositionssysteme kurz vorgestellt und bewertet. Es folgt die Darstellung des theoretischen Konzeptes für die Schaffung des neuen Expositionssystems sowie dessen Beschreibung und Diskussion seiner Eigenschaften.

2. Kammer- und Air-Exclusion-Expositionssysteme

2.1. Geschlossene Kammern

Um die chemische Zusammensetzung der die Pflanzen umgebenden Luft zu ändern, war der Einschluß der Pflanzen in irgendeiner Art von Kammer der naheliegendste Ansatz. In einem geschlossenen System kann man einzelne chemische oder sogar auch klimatische Faktoren, wie Gaszusammensetzung oder Temperatur, in weiten Bereichen recht einfach vorgeben. Einzelne Versuchsbedingungen können frei bestimmt und jederzeit wiederholt werden.

Im Folgenden werden die theoretischen Ansätze und die technische Durchführung von Kammerexperimenten beschrieben. Es sei vorweggenommen, daß bisher alle Versuche, natürliche Ökosysteme in Kammern zu simulieren, praktisch nicht ausreichend gelungen sind.

Eine Beschreibung früher Begasungsversuche in geschlossenen Kammern findet man bei CUMMINGS & JONES (1918). Für ihre Experimente mit Kohlendioxid verwendeten sie Behälter aus Glas und Holz. Das erforderliche Gas wurde mit verdünnter Schwefelsäure aus einer Natriumhydrogencarbonatlösung in einer dem Kipp'schen Apparat ähnlichen Apparatur entwickelt. Eine Abscheidung von Aerosolen fand nicht statt. Das erzeugte Kohlendioxid wurde mit einem kurzen Glasrohr direkt in den Pflanzenbestand eingeleitet und das eingebrachte Gasvolumen aus der Einwaage an Substanz berechnet.

Mit zunehmender Verfeinerung der Technik entstanden komplexere Systeme. Die Entwicklung von leistungsfähigen Computern wirkte revolutionierend auf die experimentellen Möglichkeiten. In Anlehnung an Wortschöpfungen der Physiker⁵⁾ griff WENT (1948/49) zu dem Begriff **Phytotron** für das *Earhart Laboratory* am *California Institute of Technology*. Dieses Kompositum aus $\phi\upsilon\tau\omicron\nu$ (Pflanze, Gewächs) und $\tau\rho\nu$ (Gerät, Instrument) hat sich eingebürgert und ist bis heute eine allgemeine Bezeichnung für komplexe Klimakammern (DOWNS 1980).

Mit Hilfe der sich in der Folgezeit entwickelnden elektronischen Datenverarbeitung konnten Langzeit-Experimente erfolgreich durchgeführt werden, bei denen eine Vielzahl von Umgebungsvariablen experimentell manipuliert worden sind (JONES *et al.* 1984).

PAYER *et al.* (1985) beschreibt Expositionskammern, die in einer 15 m hohen Halle auf einer Stahlplattform von 250 m² aufgebaut sind. Mit Rechnerstützung ist es möglich, Licht, Temperatur, Feuchte und Gaskonzentration so zu regeln, daß entweder natürliche Tagesgänge nachgefahren oder Festwerte eingehalten werden können. Regen, Nebel und Lüftung (Wind) können rechnergesteuert ein- und ausgeschaltet und ihre Dauer festgelegt werden. Alle Kammerzustände werden laufend angezeigt und registriert.

Eine "*Biomass Production Chamber*" (**BPC**) wurde von WHEELER (1992) beschrieben. Die gasdichte Kammer hatte ein Gesamtvolumen von 113 m³; die bepflanzbare Grundfläche betrug 20 m². Die Beleuchtung erfolgte durch dimmbare Natriumdampflampen. Mit leistungsfähigen

⁵⁾ Solche Wortschöpfungen sind beispielsweise: Betatron, Zyklotron und Magnetron.

Kältemaschinen (106 kW) und Heizschlangen (150 kW) konnten klimatische Bedingungen in weiten Bereichen eingestellt und gehalten werden. Durch einen großen Ventilator (30 kW, $420 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) wurde bei Windgeschwindigkeiten zwischen $0,2$ und $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ein Gaswechsel von bis zu 4 min^{-1} erreicht.

Ein *Soil-Plant-Atmosphere-Research* System (SPAR) wurde von PHENE *et al.* (1978) beschrieben. Es bestand aus einer sonnenbeleuchteten zweiteiligen Klimakammer. Eine Bodenwanne aus Stahl ($B \cdot L \cdot H = 2,0 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \text{ m}^3$) war mit einer Haube aus Acrylglas luftdicht verbunden. Das Mikroklima wurde mit Heiz- und Kühlaggregaten eingestellt. Die Klima- und Pflanzendaten wurden von einem Mikrocomputer erfasst.

ROGERS *et al.* (1977) und HECK *et al.* (1978) beschrieben Experimente, die in einem sogenannten *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) durchgeführt wurden (Abb. 1, 2). Der CSTR (Rührkessel) ist ein Reaktor-Grundtyp aus der Verfahrenstechnik. Durch heftiges Rühren des Fluids (hier: Luft) ist eine gleichmäßige Durchmischung des Reaktionsraumes möglich. Dadurch lassen sich Stoffflüsse leicht modellieren, denn in einem durchströmten Reaktor ist - bei hinreichender Durchmischung - die Konzentration eines Stoffes in der Abluft gleich seiner Konzentration im Reaktor.

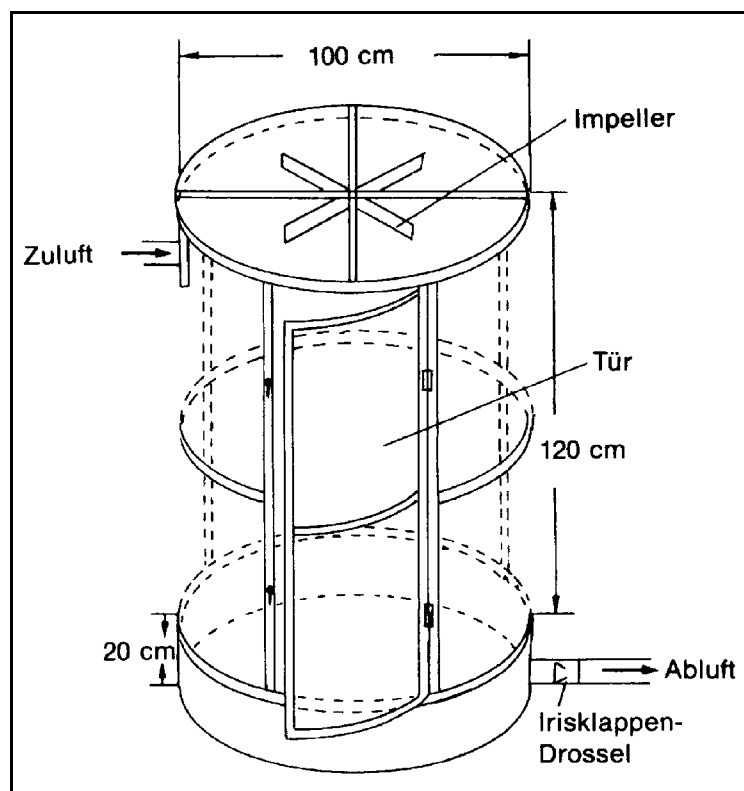


Abb. 1: Schemazeichnung einer CSTR-Kammer (aus STEUBING & FANGMEIER 1992)

Eine aufwendige Anordnung aus zwölf Rührkesseln beschrieben MARSHALL & FERNAN (1988). Die Anlage wurde durch ein für die damalige Zeit aufwendiges Computersystem gesteuert. Die zylindrischen Kammern bestanden aus PTFE-Folie und hatten bei einem

Durchmesser von 50 cm und einer Höhe von 75 cm ein Volumen von 140 Litern. Die Betriebsluft wurde aus chemisch und physikalisch aufbereiteter Preßluft durch computergeregelte Zudosierung von Spurengasen hergestellt.



Abb. 2: CSTR-Kammeranlage des Institutes für Pflanzenökologie

Obgleich teilweise sehr große Pflanzgefäße in den beschriebenen Anlagen angewendet werden können, wird doch von typischen Problemen durch den begrenzten Wurzelraum (*rooting volume*) berichtet (ARP 1991).

Eine als **EcoCELL** bezeichnete Kammer wurde von GRIFFIN *et al.* (1996) beschrieben. Diese Kammer zeichnet sich durch einen großen Wurzelraum aus. Sie besteht aus einem 5,5 x 7,3 x 2,4 m großen Stahlrohrrahmen, der über einer ebenso dimensionierten Betongrube montiert ist. An den Seiten ist das Stahlgestell mit Glas verschlossen. Die Dachfläche ist mit einer Polyethylenfolie bespannt, welche durch den Innendruck der Kammer gehalten wird. Die EcoCell ist in einem großen Gewächshaus untergebracht, um die Regelung der Umweltparameter (Temperatur) zu vereinfachen. Ein verstellbares Gebläse sorgt für die Durchströmung der Kammer mit gefilterter und temperierter Außenluft. Dieser Außenluft wird ein konstanter Strom Kohlendioxid zudosiert, der so bemessen ist, daß etwa 80 bis 90 % des Sollwertes erreicht werden. Ein zusätzliches reglerbetriebenes Dosierventil stellt die gewünschte Endkonzentration in der Kammer ein.

Die Probleme mit dem beschränkten Wurzelraum in den Pflanzenkammern führten schon sehr früh zu experimentellen Ansätzen, bei denen die beobachteten Pflanzen in ihrer natürlichen Umgebung verbleiben konnten. Als Urvater der Feldbegasung zur Simulation von schädlichen Umwelteinflüssen, (vgl. RETTSTADT 1845) ist wohl STÖCKHARDT (1850, 1871) zu nennen. Um

die Wirkung von Hüttenrauch auf Waldbäume zu untersuchen, unternahm er im Jahre 1871 Versuche an jungen Fichten ...

"... unter Belassung derselben an ihren Standorten" (*ibid*).

Für die Experimente mit Schwefeldioxid, Ruß, Bleioxidstaub und Arsendampf verwendete er oben offene Kabinen aus Holz und Glas, die er über die Pflanzen stellte. Die Problematik von möglichen Kammereffekten hatte er wohl vor Augen, denn er schreibt in seiner Arbeit, daß die Kammern ...

"... aber so einzurichten seien, daß selbst bei längere Zeit fortgesetzten Versuchsoperationen eine störende Abänderung der natürlichen Wachstumsbedingungen nicht zu befürchten ist". (*ibid*)

Eine modernere Kammer wird von RONECKLES *et al.* (1978) beschrieben. Sie erlaubt ebenfalls die Begasung von Pflanzen an ihrem natürlichen Standort. Diese Kammer erhielt aufgrund der für sie eigentümlichen vertikalen Luftführung die Bezeichnung **Down-Draft-Kammer**. In Abb. 3 ist diese Kammer dargestellt.

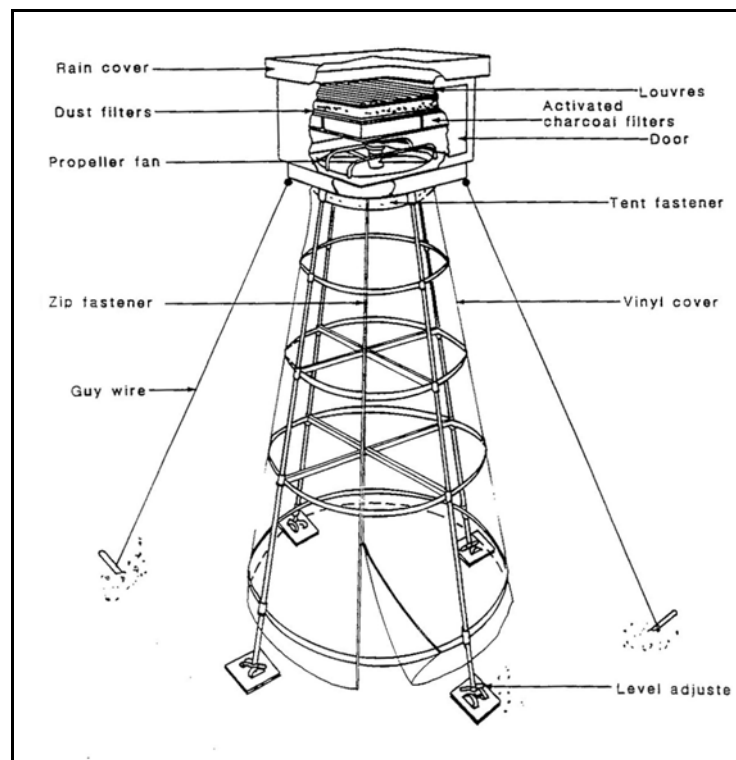


Abb. 3: Down-Draft-Kammer von RONECKLES *et al.* (1978)

Ein kegelförmiges Rohrgerüst ist mit transparenter Kunststoffolie bespannt. Durch einen Klettverschluß konnte die Folie zum Betreten der Kammer geöffnet werden. Auf der Spitze des Rohrrahmens ist der Ventilator zusammen mit einem Satz Filter in einem regendichten Gehäuse montiert. Zur Stabilisierung gegen Windlasten dienen Abspannungen aus Drahtseilen.

Auch das nachfolgend beschriebene, sogenannte **CO₂LT** (*CO₂ long term*, CO₂-Langzeit-System; Abb. 4) von OECHEL *et al.* (1991) wurde entwickelt, um *in situ* Studien mit

kontrollierten Kohlendioxid- und Temperaturbedingungen an intakten Tussock-Tundra-Ökosystemen durchführen zu können. Das System besteht aus 12 *Computer*-kontrollierten, geschlossenen Gewächshäusern, in denen jeweils individuell die CO_2 -Konzentration und die Temperatur reguliert und der ökosystemare CO_2 -Austausch ermittelt werden können. Der Einstellbereich für CO_2 geht von 150 bis $900 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. Um Interaktionen zwischen atmosphärischer CO_2 -Konzentration und Temperaturveränderungen zu analysieren, stehen verschiedene Betriebsarten zur Verfügung: Die Temperatur kann entweder konstant gehalten, der Außentemperatur nachgefahren oder um einen konstanten Betrag gegenüber der Außentemperatur angehoben werden.

Im Betrieb soll das System eine sehr gute Einhaltung der angestrebten Bedingungen bewiesen und nur vernachlässigbar kleine Kammereffekte im Vergleich mit Freiflächen verursacht haben.

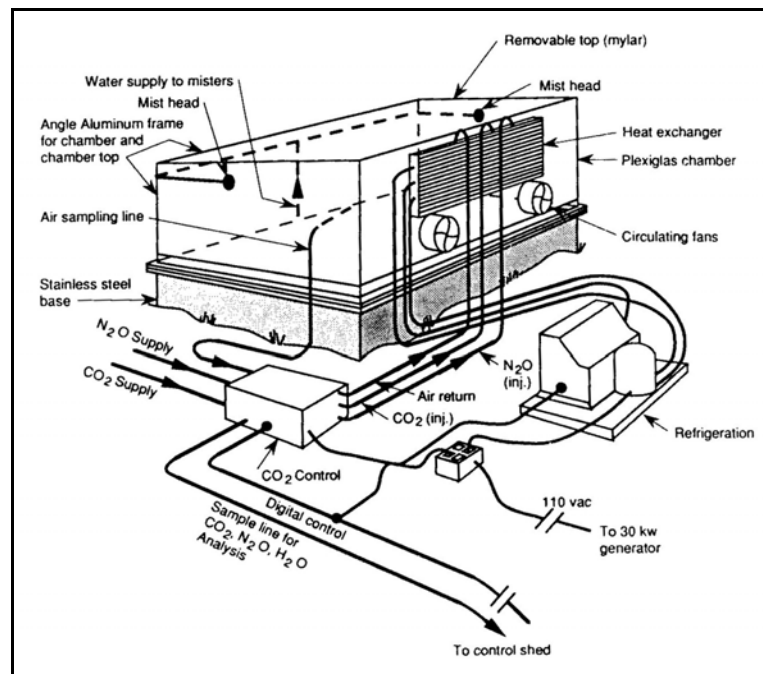


Abb. 4: Das mobile CO₂LT-Kammersystem von OECHEL *et al.* (1991)

2.2. Offene Kammern

Zum Nachweis der Wirkungsmechanismen müssen Einflüsse von nicht oder schwer zu kontrollierenden Variablen ausgeschlossen und die Versuchsbedingungen frei bestimmt und jederzeit wiederholt werden können. Experimente mit hohen Ansprüchen an die Reproduzierbarkeit sind deshalb nur in Kammern möglich. Da alle geschlossenen Expositionssysteme aber letztlich doch zu Artefakten führten, wurden offene Expositionssysteme entwickelt, mit denen eine höhere Freilandrelevanz erreicht werden sollte.

Die offenen Kammern, wie wir sie heute kennen, sind in den frühen 70er Jahren von HEAGLE *et al.* (1973) und MANDL *et al.* (1973) entwickelt worden. Abb. 5 zeigt eine typische Kammer. Zum Ausschluß von Niederschlägen sind die Kammern oft mit einer sog. *rain exclusion cap* versehen (Abb. 6, 7).

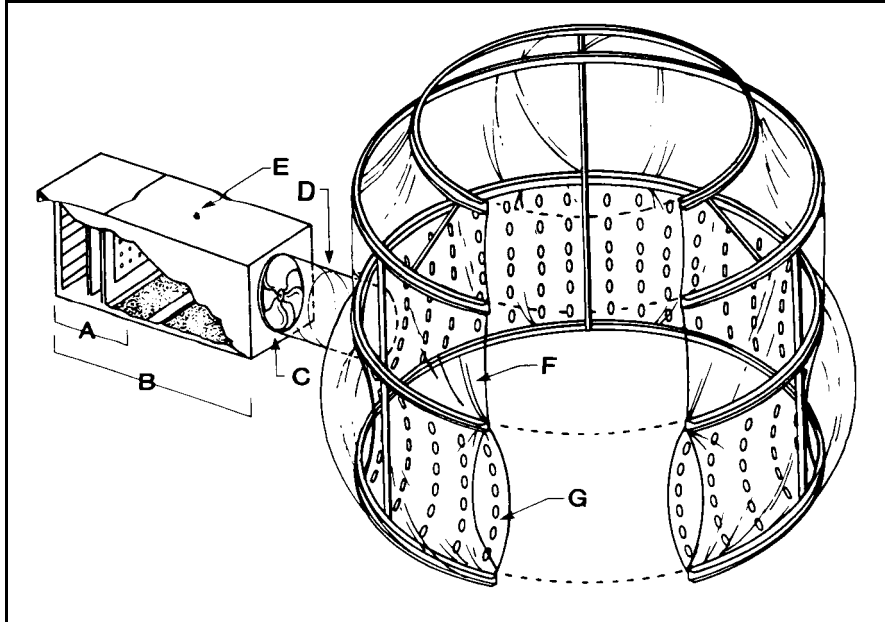


Abb. 5: Schematisierte Darstellung einer OTC (aus ALLEN *et al.* 1992)

- A: Filter (Staub und Aktivkohle) B: Filter- und Gebläsesystem C: Gebläse
 D: Luftstutzen E: Injektionsstelle für Spurengase F: Folie
 G: Folienschlauch mit Perforation auf der Innenseite

Diese Kammern sind ein Kompromiß zwischen der Notwendigkeit, die Pflanzen in ihrer natürlichen Umgebung zu belassen, und dem Ziel, dabei dennoch die Zusammensetzung der Luft experimentell zu verändern. Als Bezeichnung hat der *terminus technicus* **OTC** (*open-top chamber*) allgemeinen Gebrauch gefunden. Dieser Kammertyp ist bis heute ein wertvolles Instrument der experimentellen Botanik. Der Aufbau ist weitgehend standardisiert und dadurch kostengünstig.

Über Arbeiten mit OTC sind eine Vielzahl von Veröffentlichungen erschienen. Die nachfolgenden ausgewählten Literaturstellen skizzieren die Entwicklung der OTC und die bearbeiteten Problemstellungen.

NYSTROM *et al.* (1982) beschrieben erstmals ein Expositionssystem aus 30 OTC mit *Computer*-Steuerung für die Begasung mit Ozon und Schwefeldioxid sowie integrierter Mikroklimameßstation und -Datenerfassung.

Mit dem von HEAGLE *et al.* (1973) beschriebenen OTC-Typ war die Exposition von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen in ausreichender Flächengröße möglich. Auch für Studien an forstwirtschaftlichen Pflanzenarten ist dieser Kammertypus häufig eingesetzt worden. Aller-



Abb. 6: OTC-Anlage im Dauergrünland ohne *rain exclusion cap*
(vgl. GRÜNHAGE *et al.* 1993)



Abb. 7: OTC-Anlage des Institutes für Pflanzenökologie mit *rain exclusion cap*

dings erlauben die Dimensionen dieser OTCs allenfalls Untersuchungen an Schößlingen für wenige Vegetationsperioden. Für den Einsatz an schnellwüchsigen Baumarten (z.B. *Pinus taeda*⁶⁾) entwickelten HEAGLE *et al.* (1989) größere OTCs mit 4,5 m Durchmesser, deren Grundkonstruktion sich stark am 1973 beschriebenen Typus orientierte.

FANGMEIER *et al.* (1992) und WEIGEL *et al.* (1992) beschrieben OTC-Systeme, die in Anlehnung an die US-amerikanischen Expositionssysteme (DEAN & JOHNSON 1991) einige Jahre später in Europa etabliert wurden und über entsprechend fortschrittliche Steuer- und Dosiereinrichtungen verfügen.

Der Versuch, die Kammereffekte - vor allem den Einfluß auf Licht und Temperatur - zu vermindern, führte zu Versuchen mit OTC ohne Frustrum und auffallend niedrigen Seitenwänden. Ein typisches Beispiel dafür stellt die SACC-technologie (*Screen aided CO2 control*) dar, die von LEADLEY *et al.* (1997) beschrieben wurde (Abb. 8). Diese SACC-Systeme besitzen einen relativ niedrigen, seitlich umlaufenden Rahmen aus transparentem Material. In der Verwirbelungszone hinter der Abschirmung wird verdünntes Kohlendioxid aus einem gelochten Versorgungsrohr (*plenum*) eingeblasen.

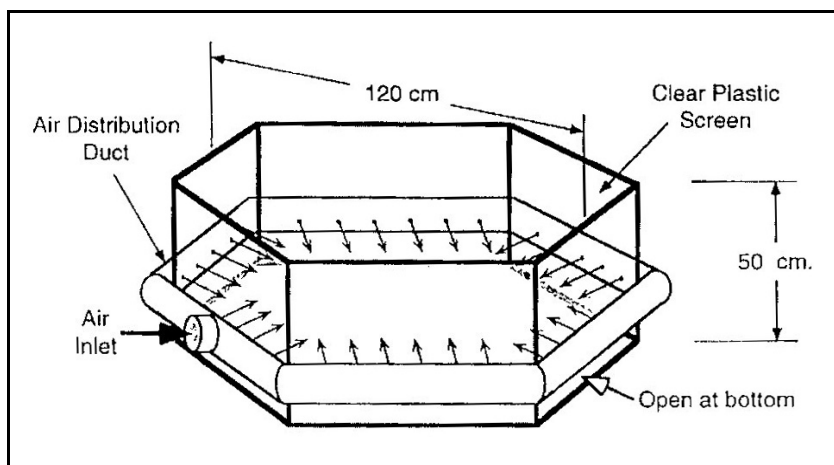


Abb. 8: SACC-System von LEADLEY *et al.* (1997)

Als Vorteil dieser Anlagen muß der gegenüber OTC wesentlich verminderte Einfluß auf das Mikroklima genannt werden. Erkauft wird dieser Vorteil jedoch durch einen deutlich höheren Spurengasverbrauch und die Notwendigkeit einer leistungsfähigen Konzentrations**regelung**. Bei klassischen OTC wird die Zielkonzentration relativ problemlos **eingestellt** (Steuerung), indem dem (konstanten) Luftstrom ein (konstanter) Spurengasstrom beigemischt wird.

Die Leistungsfähigkeit ihres Systems haben die Autoren über vier Jahre (1994 bis 1998) belegt. Sie haben für ihre Versuche einen Kalkmagerrasen mit erhöhten Kohlendioxidkonzentrationen behandelt.

⁶ *Pinus taeda* ist eine der wichtigsten Arten für die Zellstoffindustrie im Südosten der USA.

In den oben beschriebenen klassischen *open-top*-Kammern (OTC) wird die Luft seitlich von unten in den Bestand geblasen und nach oben abgeführt (*single-pass*). Das verwendete Spurengas wird diesem Luftstrom proportional beigemischt, so daß die gewünschte Konzentration in dem Luftstrom herrscht. Erhöht man den Luftstrom, sei es zur Erhöhung der Turbulenz oder der Absenkung einer Übertemperatur, dann steigt der Spurengasverbrauch proportional mit dem Luftstrom an. Der Wunsch nach einer stärkeren Turbulenz in der Kammer, ohne diese mit einem erhöhten Spurengasverbrauch zu erkaufen, hat von der *single-pass*-Gasführung zu den Umluft-Kammern geführt.

DRAKE *et al.* (1989) und LEADLEY & DRAKE (1993) beschreiben eine solche *open-top*-Kammer mit Lufrückführung (Abb. 9). Neben dem eigentlichen Frischluftgebläse hatte die Kammer einen zweiten Ventilator (*mixing blower*), der einen Teil der Luft im Kreis führte. Die Autoren haben damit über einen Zeitraum von acht Jahren (1987 bis 1994) Dauerflächen in einer Salzmarsch mit Kohlendioxid begast.

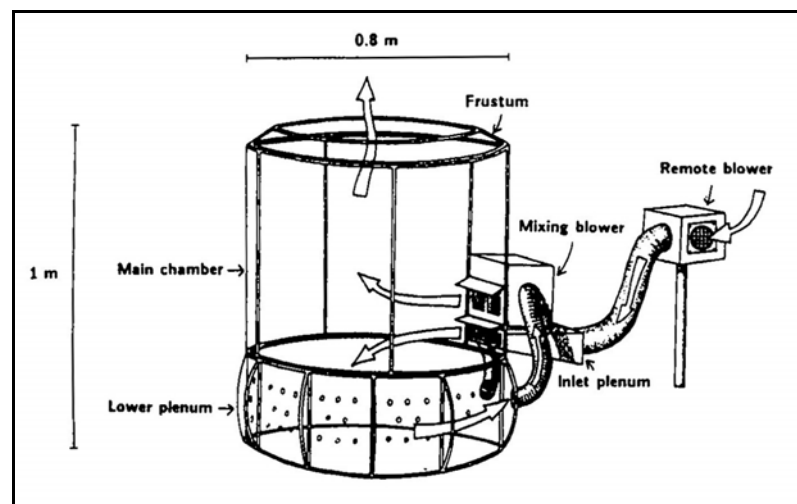


Abb. 9: *Open-top*-Kammer von DRAKE *et al.* (1989)

Durch Verwendung einer 2-Wege-Luftklappe erreichen NORRIS & BAILEY (1996) eine Lufrückführung ohne zusätzlichen Ventilator. Bei ihrer sog. **CVOTC** (*controlled-ventilation open-top chamber*; Abb. 10) bewirkt diese Luftklappe (e, f, g) in Abhängigkeit von ihrer Stellung eine dosierte Zuführung von Frischluft in den Kreislauf der Kammerluft. Die eingeschleuste Frischluftmenge wird dabei in Abhängigkeit von der sich einstellenden aktuellen Übertemperatur der Kammer gesteuert.

Beide Kammern haben als weitere Gemeinsamkeit eine umgekehrte Luftführung innerhalb der Kammer. Während bei klassischen OTC die Luft von unten nach oben geführt wird, ist die Strömungsrichtung hier entgegengesetzt. Das wird von den Autoren als die "naturgemäßere" Lüftung herausgestellt.

Gegenüber einer konventionellen *single-pass* OTC konnten NORRIS & BAILEY (1996) bei einer geduldeten mittleren Temperaturerhöhung von 1,6 Kelvin einen um etwa 80 % gesenkten

Gasverbrauch beobachten. Diese Einsparung an eingesetztem Spurengas wird dabei aber mit einer verringerten Kühlung der OTC erkaufte. Die Temperaturerhöhung (1,6 K) ist größer als in herkömmlichen Kammern (1,0 K). Wollte man die durchschnittliche Übertemperatur einer CVOTC auf Werte in der Größenordnung von Standard-OTC herabsetzen, dann müßte der Frischluftdurchsatz auf die Werte einer konventionellen OTC erhöht werden, was aber das Zirkulationsprinzip hinfällig machen würde.

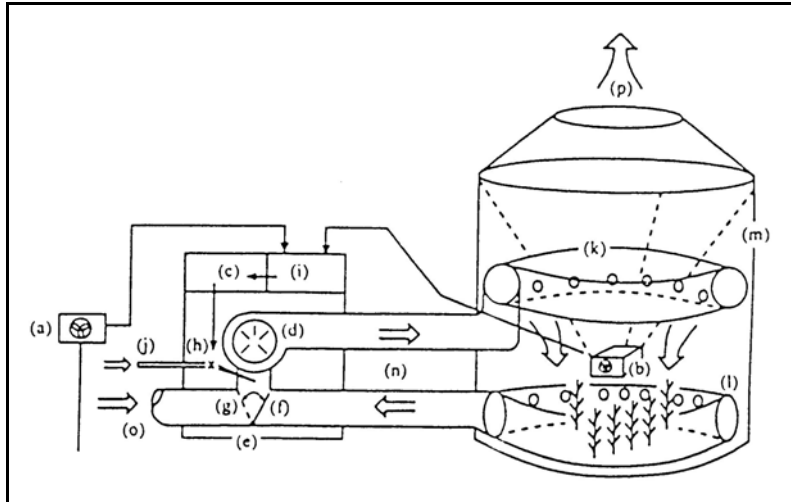


Abb. 10: Die *Controlled-Ventilation* OTC von NORRIS *et al.* (1996)

(a,b) Temperatursonden, (c) Microcontroller, (d) Ventilator, (e,f,g) Luftklappe, (h) Dosierventil, (i) Gasmeßgerät, (j) Gasleitung, (k,l) Luftaus- und einlaßring, (m) Kammerrahmen, (n) Verbindungsrohre, (o) Lufteinlaß, (p) "open top"

Die CVOTC verhält sich praktisch wie ein Rührkessel (CSTR, *Continuous Stirred Tank Reaktor*), bei dem der interne Ventilator nach außen verlegt wurde. Gegenüber der *single-pass-OTC* haben Umluft-OTC aber die bekannten Nachteile eines Rührkessels. So wird z.B. die relative Luftfeuchtigkeit gegenüber der Umgebung erhöht sein. Weiterhin können durch den Kreislauf der Luft andere Spurengase (Terpene, Kampher, Menthol) angereichert werden.

2.3. Air-Exclusion-Systeme

Die *Air-exclusion* (Luftausschluß)-Systeme wurden so genannt, weil sie die Umgebungsluft der untersuchten Pflanzenbestände weitgehend verdrängen, vom Zutritt "ausschließen". Sie waren ursprünglich entwickelt worden, um Feldfruchtreihen vor Luftschadstoffen zu schützen, indem saubere, über Aktivkohle gefilterte Luft im Bestand ausgebracht wurde. Abb. 11 zeigt die typische Anordnung in schematischer Darstellung. Gemeinsames Merkmal dieser Installationen ist, daß über Aktivkohle gefilterte Luft mit großlumigen, gelochten Folienschläuchen zwischen Feldfruchtreihen ausgebracht wird und die natürliche Umgebungsluft im Bestand dadurch weitgehend verdrängt wird. Während Perioden mit hoher Umgebungskonzentration wird auf diese Weise die Schadgasexposition der Pflanzen herabgesetzt.

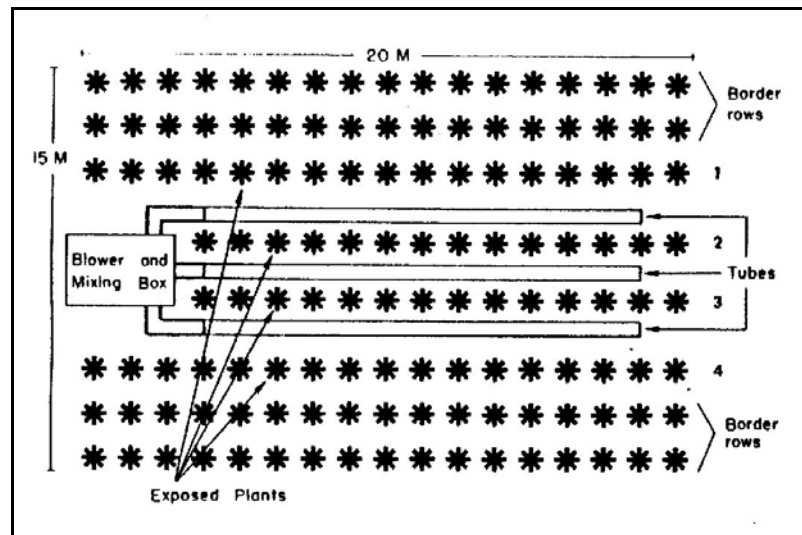


Abb. 11: Schematische Darstellung der Begasungsanlage nach LAURENCE *et al.* (1982)

Die Wirksamkeit zum Luftausschluß wurde von einigen Autoren verbessert, indem sie die Ausblasrichtung, die Lochgrößen, den Schlauchdurchmesser und die Luftleistung der Ventilatoreinheit modifizierten. Bei Ozon wurde dadurch ein Ausschluß von über 70 % erreicht (THOMPSON & OLSZYK 1985).

Obwohl diese Systeme zunächst als Luftausschlußsysteme entwickelt wurden, eigneten sie sich auch zur Begasung mit Spurengasen. REICH *et al.* (1982) untersuchten Soja unter einem Ozon- und Schwefeldioxidgradienten. OLSZYK *et al.* (1986a) experimentierten mit Schwefeldioxid und Ozon an Winterweizen und Salat. LAURENCE *et al.* (1982) haben die Begasung von *Glycine max* mit Fluorwasserstoff und Schwefeldioxid beschrieben. Bei diesen Systemen konnten durch geeignete Verteilung der Lochpositionen und -durchmesser auch quasi-lineare Konzentrationsgradienten im Bestand erzeugt werden.

Durch die Art der Luftzuführung, die den zu beobachtenden Bestand mit einem kräftigen, konstanten Luftstrom beaufschlagt, waren die *Air-exclusion*-Systeme den oben beschriebenen OTC noch sehr ähnlich. Die angewendete Verdrängungslüftung stellt aber einen groben Eingriff in die natürlichen turbulenten Austauschbedingungen dar. Ebenfalls nachteilig war die eingeschränkte Anwendbarkeit. Diese Expositionssysteme eigneten sich nur für Pflanzen, die in Reihen kultiviert wurden. Für Kulturen mit anderen Reihenabständen innerhalb der Bestände war eine völlige Neujustierung der Dosierung notwendig. Veränderungen der Vegetationshöhe im Verlauf der Vegetationsperiode beeinflussten den Dosierungserfolg ebenfalls merklich. Ein weiterer Nachteil dieser Anlagen war die starke Windabhängigkeit der erzielten Spurengas-Konzentration. Bereits schwache Winde veränderten das Konzentrationsmuster deutlich. Zur Regelung der Konzentration wurden später mit wechselndem Erfolg auch Mikrocomputer eingesetzt (OLSZYK *et al.* 1986c).

Die beschriebenen *Air-exclusion*-Systeme waren, bedingt durch ihre technischen *Handycaps*, zur Freilandexposition von Pflanzen mit Spurengasen nur eingeschränkt brauchbar. Trotzdem sind sie oft eingesetzt worden und haben bedeutende Erkenntnisse über den Einfluß von

Spurengasen auf die Vegetation geliefert. Hauptgrund für den häufigen Einsatz dürfte der vergleichsweise geringe Preis dieser Anlagen gewesen sein.

2.4. Bewertung der Kammer-Expositionssysteme

Bei allen Kammerexperimenten sind die Wachstumsbedingungen artifiziell verändert. Dies gilt auch für *open-top*-Kammern (OTC). So ist die Temperatur in OTCs durchweg höher als in der Umgebung außerhalb der Kammer. ROBERTS *et al.* (1988) beobachten 1 bis 2 Kelvin. HENDREY & KIMBALL (1994) berechnen Temperaturerhöhungen von über 6 Kelvin. Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten ESPACE-wheat-Projekts (JÄGER *et al.* 1999) sind Kühlaggregate eingesetzt worden, die den Temperatureffekt kompensieren und die dadurch bedingten Artefakte vermeiden (VAN OIJEN *et al.* 1999).

Neben den Temperatureffekten sind relative Änderungen von Wasserhaushalt, Licht und Luftbewegung meist noch entscheidender ausgeprägt (TINGEY & TAYLOR 1982). Es kann sich kein Tau bilden und Insekten oder Pilzsporen sind im allgemeinen von den Kammern ausgeschlossen (BUTLER 1985, BUTLER *et al.* 1986). Im Langzeitexperiment fehlt ein natürlicher Sameneintrag, so daß langfristig eine Artenverarmung im beobachteten Bestand eintritt. Durch diese veränderten Bedingungen ergeben sich gegenüber einer echten Freiland-situation deutliche Abweichungen der physiologischen und morphologischen Kenndaten. Diese Abweichungen sind nicht immer eindeutig vorhersagbar (OLSZYK *et al.* 1980b). Sie werden in ihrer Gesamtheit als Kammereffekt bezeichnet.

Sollen Ergebnisse aus Expositionen mit Spurengasen auf Freilandverhältnisse übertragbar sein, müssen möglichst naturnahe Bedingungen eingehalten werden. Der technische Aufwand zur Simulation aller Faktoren einer Umweltsituation in einer Kammer ist sehr hoch, und praktisch nicht zu befriedigen. Bereits eine gute Regelung der Lufttemperatur in einer Kammer erfordert erheblichen Aufwand (PAYER *et al.* 1993). Die Erzeugung von Nebel und Regen mit den spezifischen chemischen und physikalischen Eigenschaften sind sogar nur in ganz beschränktem Umfang möglich. Der wichtigste Faktor, das Sonnenlicht, stellt die größten Anforderungen an die Technologie. Im Tages- und Jahresgang der Sonne ändert sich nicht nur die Intensität, sondern auch die spektrale Zusammensetzung des Lichtes. Eine brauchbare Sonnenlicht-Simulation ist praktisch nur in Ansätzen möglich. So schreiben SECKMEYER & PAYER (1993):

"Our knowledge of the radiation conditions at the surface of the Earth is far from complete. These conditions are so complex and depend on so many parameters that, in spite of considerable financial and technical efforts, the simulation of global radiation is still far from a reality."

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß durch den veränderten Licht-, Strahlungs- und Wasserhaushalt einer Kammer die Pflanzen anders wachsen als im Freiland. Die Erkenntnisse aus solchen Versuchen sind trotz ihrer sonstigen Relevanz nur schwer, meist gar nicht, auf die freie Umwelt zu übertragen (UNSWORTH & MANSFIELD 1980), wo Luftschadstoffe mit anderen Stressoren wie Kälte, Krankheit oder Trockenheit interagieren.

3. Freiland-Expositionssysteme

3.1. Allgemeines

Wie im vorangegangenen Kapitel deutlich gezeigt werden konnte, sind bei allen Experimenten in Kammern - ob geschlossen oder offen - die Wachstumsbedingungen artifiziell verändert. Durch das veränderte Mikroklima ergeben sich gegenüber echten Freilandstudien Abweichungen der physiologischen, morphologischen und der ertragskundlichen Kenndaten. Diese Abweichungen sind deutlich, aber nicht vorhersagbar (OLSZYK *et al.* 1980).

Auch die Freiland-Expositionssysteme mit Verdrängungslüftung (*Air-exclusion*) haben infolge ihrer unnatürlichen Turbulenz einen großen, ungewünschten Einfluß auf das Mikroklima der zu beobachtenden Vegetation.

Der Wunsch nach einer unveränderten mikroklimatischen Umgebung hat zur Entwicklung von vollständig kammerlosen Systemen geführt, bei denen die natürlichen Wachstumsbedingungen, insbesondere die klimatischen Faktoren, weitgehend erhalten bleiben. Dies gelingt nur mit sogenannten *plume*-Systemen. Ihren Namen tragen sie, weil das Spurengas, das sie ausbringen, ähnlich der Rauchfahne (*plume*) eines Schornsteins von der Umgebungsluft verwirbelt und über die Versuchsfläche getragen wird. Durch schlanke, schatten- und wirbelarme Rohrleitungen sowie die Unterlassung von Eingriffen in die natürliche Turbulenz (z.B. Verdrängungslüftung – *air exclusion* - mit starken Ventilatoren), bleiben mit diesem *plume*-Prinzip die turbulenten Austauschbedingungen und Lichtverhältnisse über dem Pflanzenbestand weitestgehend erhalten.

Trotz des scheinbar einfachen Konzeptes hat es eine große Zahl von sehr unterschiedlichen experimentellen Ansätzen gegeben. Die Anfänge reichen dabei bis in das vergangene Jahrhundert zurück (BRAUNE 1884). Mit der ab etwa 1980 verfügbaren preiswerten elektronischen Signal- und Datenverarbeitung (*mini-, micro-computer*) sind die Anlagen beständig komplexer geworden. Obwohl die sog. FACE-Anlagen (*Free Air CO₂ Enrichment*; Abschnitt 3.3.4) heutzutage zwar einen quasi-Standard darstellen, ist das Ende der Entwicklung aber noch lange nicht erreicht (siehe z.B. HENDREY *et al.* 1999). Nachfolgend werden die wichtigsten Systeme unter besonderer Beleuchtung ihrer technischen Aspekte kurz beschrieben.

3.2. Statische Plume-Systeme

Die denkbar einfachste Anordnung besteht aus einer einzigen **Punktquelle**, die am Rande einer schmalen Versuchsfläche angeordnet ist. Diese Punktquelle kann durch eine geeignete Steuerung nur dann Gas abblasen, wenn der Wind so steht, daß das ausgebrachte Gas über die Versuchsfläche getragen wird.

Der Nachteil dieser Anordnung ist offensichtlich: Die Zeiträume der Begasung können nicht experimentell festgelegt werden, weil sie ausschließlich von der Zufälligkeit der Windrichtung abhängen. Selbst mit einer bestmöglichen Konzentrationsregelung sind die Ergebnisse durch große Schwankungsbreiten der Gaskonzentration charakterisiert.

Trotz dieser vorhersehbaren Systemnachteile fand dieses Prinzip gelegentliche Anwendung. Von SKYE (1968) wurde das Spurengas (Schwefeldioxid) direkt aus einer Gasflasche ausgebracht. MOSER *et al.* (1980) und auch MILLER *et al.* (1980) verwendeten ein einzelnes, senkrechtes gelochtes Rohr für ihre Begasungsexperimente

Bessere Ergebnisse als mit einer einzelnen Punktquelle wurden durch flächige Raster aus Punkt- oder Linienquellen erreicht. Als *Terminus technicus* für diese Begasungsanlagen hat sich heute das von LEE & LEWIS (1975) geprägte Akronym **ZAPS** (*zonal air pollution system*) eingebürgert.

Die vermutlich älteste Beschreibung einer Freilandbegasung nach dem obigen Prinzip eines flächigen Düsenrasters findet sich in dem Reichspatent 32194 vom 19. November 1884. BRAUNE meldete darin ein Verfahren an zum Züchten von Samen für große, zuckerreiche Rüben. Die Patentschrift beschreibt das Verfahren ⁷⁾ wie folgt:

"Endlich müssen zwischen den Reihen der Rübenpflanzen Röhren angebracht werden, welche perforiert sind und zur Zuleitung von gasförmiger Kohlensäure zu den Pflanzen dienen ..."

Ein weiterer historischer Beleg für die Anwendung eines flächigen Düsenrasters zur Ausbringung von Kohlendioxid findet sich 40 Jahre später bei dem Schwedischen Forscher LUNDEGÅRDH (1927). In den Sommermonaten Juli und August des Jahres 1923 führte er auf fünf Versuchsflächen Feldbegasungsversuche an Bohnen und Rüben durch. Aus Stahlflaschen wurde reines Kohlendioxid durch ein System von gelochten Eisenrohren ⁸⁾ ausgebracht.

Abb. 12 zeigt eine schematische Darstellung der Anordnung von LUNDEGÅRDH. Die Versuchsflächen sind 100 m² groß. Der Rohrabstand beträgt 1 m. Die Anzahl und der Durchmesser der Düsen (Bohrungen) wird nicht angegeben.

Die im Bestand erreichte Gaskonzentration wurde täglich auf naßchemischem Wege bestimmt. Für die Probenahme verwendete LUNDEGÅRDH eine eigens für diesen Zweck konstruierte Vorrichtung in der Art eines Gasometers: Eine Metallglocke war mit Glycerin gegen die Umgebung abgedichtet und wurde durch ein Gewicht über Umlenkrollen nach oben gezogen. Der in der Glocke entstehende Unterdruck saugte über einen Zeitraum von mehreren Stunden eine Luftprobe ($V = 2,3$ l) durch ein Glasrohr ($d = 3$ mm, $l = 5$ m) aus dem Pflanzenbestand. Im Gasometer wurde das Kohlendioxid der Luft an Bariumhydroxid-Lösung absorbiert und im Labor mit 0,025 N Salzsäure titriert.

LUNDEGÅRDH experimentierte im Konzentrationsbereich von 282 bis 594 ppm. Er berichtete von Ertragssteigerungen zwischen 16 % (Rübe) und 30,5 % (Bohne). Über die Mengen des freigesetzten Kohlendioxids machte er keine detaillierten Angaben. In einer Tabellenüberschrift sind 40 kg und 20 kg Kohlendioxid angegeben, die in der Zeit vom 28. Juli bis 17. August 1923 verbraucht wurden.

⁷⁾ Anwendungen des Patentes und eventuelle Erfahrungsberichte konnten in der Literatur nicht ermittelt werden.

⁸⁾ Es bleibt in den Berichten von LUNDEGÅRDH (1923, 1927) offen, ob er das 40 Jahre zurückliegende Patent von BRAUNE (1884) gekannt hat.

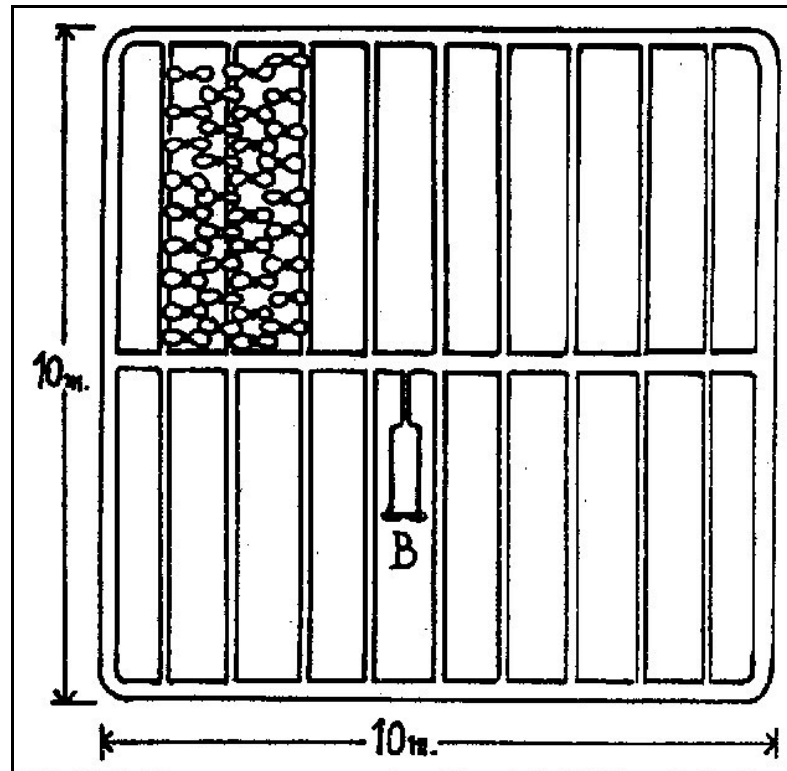


Abb. 12: Rohrnetz von LUNDEGÅRDH (1927)

(B: Gasflasche)

Eine im Vergleich zu der obigen Installation ungewöhnlich große Anlage beschreiben HARPER *et al.* (1973a, b). Das 0,6 ha große Rohrsystem lag in der Mitte eines 2,6 ha großen Baumwollfeldes. Um den Einfluß des Windes abzuschwächen, war das Baumwollfeld von Hecken und Zäunen umgeben. Die Versorgungsrohre hatten 5 cm Innendurchmesser. Mit Ventilen an "strategischen Punkten" konnte die Durchströmung beeinflusst werden. Der Innendurchmesser der horizontalen Luftauslässe (HVP, *horizontal vent pipes*) betrug 1,3 cm. In gleichen Abständen von 1 m waren Düsen mit 0,79 mm Durchmesser gebohrt. Je zwei aufeinanderfolgende Röhren wurden von entgegengesetzten Enden versorgt. Dies sollte mögliche Unterschiede in der Gasfreisetzung (wegen Druckabfall in dem Versorgungssystem) mindern.

Begast wurde täglich von 08:00 bis 18:00 Uhr. Das Kohlendioxid wurde mit einem konstanten Strom von $222,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (umgerechnet: $22,27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) eingebracht. Der erreichte CO_2 -Anteil der Luft lag bei 460 ppm (gemessen in dreiviertel Höhe der Pflanzen).

Eine ähnliche Fläche belegte das Expositionssystem von LEE *et al.* (1975, 1978) und LEE & LEWIS (1978). Es hatte die Maße $73 \text{ m} \cdot 85 \text{ m}$. Begast wurde *Pisum sativum* mit Schwefeldioxid. Abb. 13 zeigt eine schematische Darstellung des Rohrnetzes der Installation dieser Anlage. Eine verkleinerte Anlage zur Begasung von *Agropyron spicatum* und *Lolium perenne* mit Schwefeldioxid wurde von RONECKLES *et al.* (1981) beschrieben.

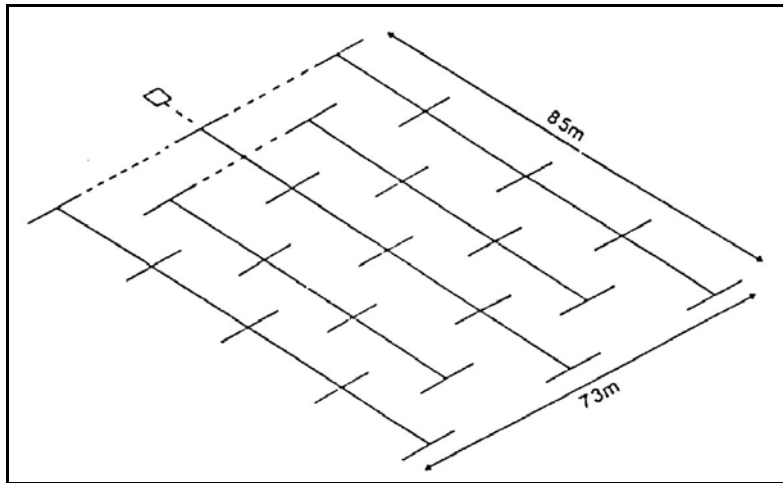


Abb. 13: Rohrnetz von LEE & LEWIS (1975)
(unterirdische Leitungen gestrichelt)

Das Originalsystem von LEE *et al.* war nicht geregelt. RONECKLES *et al.* (1990) verbesserten es durch eine Steuerung zur Nachbildung eines diurnalen Konzentrationsprofils für Ozon. Diese Steuerung ermöglichte das An- und Abfahren über einen Zeitraum von jeweils drei Stunden morgens und abends sowie eine Änderung der Ozonerzeugung alle 15 Minuten proportional zur gemessenen Umgebungskonzentration. Zusätzlich erreichten sie eine Verbesserung der Gaskonzentration über die Zeit durch ein (lineares) Herunterfahren des Ozongenerators mit fallender Windgeschwindigkeit.

In Frankreich wurde Anfang der siebziger Jahre von DECORMIS *et al.* (1975) ein System aufgebaut, welches auf einer $28 \cdot 60 \text{ m}^2$ großen Versuchsfläche aus 128 vertikalen Gasauslässen (VVP, *vertical vent pipe*) bestand (Abb. 14, 15). Die VVPs standen senkrecht in einem Abstand von etwa 4 m. Ein unterirdisches Rohrnetz versorgte die VVPs. Die Höhe der VVPs und die Art der Perforation (Düsen) wurden nicht angegeben. Aus einer Abbildung in der zitierten Arbeit kann die Höhe auf ca. 2 m geschätzt werden. Es wurde vorverdünntes Schwefeldioxid zur Begasung junger Bäume ausgebracht. Untersucht wurden Nadelbäume (*Pinus*, *Larix*, *Picea*, *Abies*, *Thuja*, *Cupressus*), Laubbäume (*Quercus*, *Populus*, *Fagus*, *Castanea*) und Obstbäume (Apfel, Birne, Pfirsich). Insgesamt waren 105 Bäume in einem quadratischen Raster gepflanzt. Eine Vergleichsfläche lag in 100 m Entfernung.

Die Dosierung erfolgte über eine einfache 2-Punkt-Regelung: Der Schwefeldioxid-Monitor (Beckman 906 A) war mit Alarmkontakten ausgerüstet, mit denen die Gaszufuhr beim Über- bzw. Unterschreiten von Schwellwerten aus- bzw. eingeschaltet wurde. Über die Lage der Schaltpunkte (Hysterese) wurde keine Angaben gemacht. Der Gasverbrauch bei einer Zielkonzentration von $195 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ betrug $400 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-3}$.

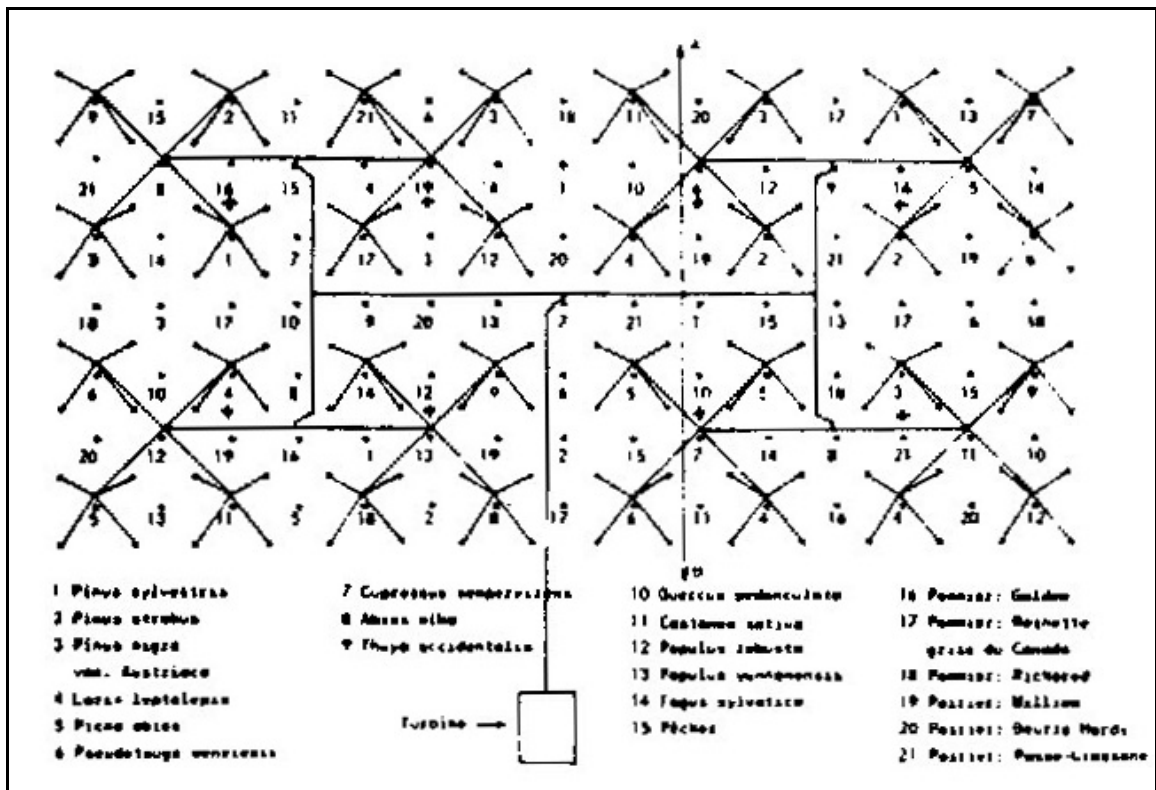


Abb. 14: Rohrnetz von DECORMIS *et al.* (1975) in Draufsicht mit den Positionen der Bäume
(Der Pflanzabstand der Bäume betrug etwa 5 m)

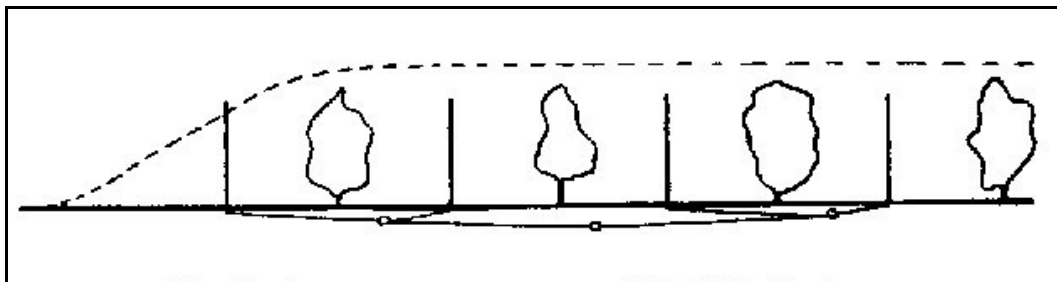


Abb. 15: Rohrnetz von DECORMIS *et al.* (1975) in Seitenansicht

3.3. Dynamische Plume-Systeme

3.3.1. Grundsätzlicher Aufbau

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen statischen Systeme (ZAPS-Systeme) bestehen aus großflächigen Düsenrastern. Das Rohrsystem zur Gasverteilung liegt mit seinen vielen Verzweigungen und Luftauslässen direkt auf der Beobachtungsfläche oder ist ganz (DECORMIS *et al.* 1975, vgl. Abb. 14) oder teilweise (LEE & LEWIS 1975, vgl. Abb. 13) im Erdreich vergraben. Mit dieser Anordnung sind eine Reihe von Nachteilen verbunden.

Das Düsenrasenraster der ZAPS-Systeme macht in der Regel den Einsatz von mechanischen Geräten zum Düngen und Ernten unmöglich oder erschwert ihn zumindest. Durch das

vollständige oder teilweise Vergraben des Rohrsystems kann dieser Nachteil abgemildert werden, jedoch ist dies dann mit einer nachhaltigen Störung des Bodengefüges erkaufte. Ein weiterer Nachteil der ZAPS-Systeme ist ihr starres Begasungsmuster, das unabhängig von der Windrichtung alle Düsen mit Spurengas versorgt. Durch diese Eigenschaft verläßt das leeseitig ausgebrachte Gas die Versuchsfläche immer ungenutzt ⁹⁾.

Diese Nachteile haben zur Entwicklung von dynamischen *Plume*-Systemen geführt. Bei diesen "dynamischen" *Plume*-Systemen ist die beaufschlagte Versuchsfläche - von zwei Ausnahmen ¹⁰⁾ abgesehen - nicht mehr rechteckig, sondern kreisrund. Die senkrechten Luftauslässe (VVP, *vertical vent pipes*) umgeben das Feld an seinem Perimeter. Innerhalb der Fläche sind keine Leitungen verlegt. Das Versuchsfeld ist dadurch nicht gestört.

Durch eine geeignete Steuerung (*upwind control*) werden in Abhängigkeit von der Windrichtung die jeweils luv-stehenden VVPs geöffnet und das Spurengas freigesetzt. Der Wind trägt es über die Versuchsfläche. Die Gasauslässe auf der Leeseite des Geländes bleiben immer verschlossen, dadurch wird kein Gas unnötig freigesetzt, wie es bei den statischen ZAPS-Anlagen geschieht.

Die Hauptkomponenten (funktionalen Einheiten) sind an allen Anlagen dieses Typs mehr oder weniger deutlich ausgeprägt vorhanden und werden deshalb im Nachfolgenden erläutert.

Plenum und Ventilator: Zur Versorgung der vertikalen Luftauslässe (VVP, *vertical vent pipe*) mit dem Spurengas führt eine Leitung um die Fläche. Diese Ringleitung zur Bereitstellung des Spurengases an den Luftauslässen wird in der Literatur mit dem englischen Begriff *Plenum* bezeichnet ¹¹⁾. Neben dem Gastransport kommt dem *Plenum* noch eine weitere wichtige Aufgabe zu: Es dient als Mischkammer zur Vorverdünnung des Spurengases, weil sich reines, unverdünntes Spurengas aufgrund der geringen erforderlichen Mengen nur schwer mit großen Volumina Umgebungsluft vermischen läßt. Die erforderliche Hilfsluft wird über einen Ventilator bereitgestellt. Das Einspeisen des Spurengases geschieht in der Regel direkt am Ventilator.

Luftauslässe und Upwind control: Durch eine geeignete elektronische Steuerung werden die Luftauslässe (VVP) in Abhängigkeit von der Windrichtung so geöffnet und geschlossen, daß das verwendete Spurengas stets luvseitig ausgebracht und, ähnlich der Rauchfahne eines Schornsteins, von der Umgebungsluft verwirbelt über das Versuchsfeld getragen wird. Diese windrichtungsabhängige Steuerung arbeitet prinzipiell völlig unabhängig von der Spurengas-Konzentrationsregelung.

Spurengasdosierung: Die Zumischung des Spurengases am Ventilator erfolgt durch ein vom Konzentrationsregler bedientes elektrisches Ventil. Wegen des bedeutenden Einflusses des jeweils verwendeten Ventils auf die Qualität der Konzentrationsregelung muß diesem Bauteil

⁹⁾ Durch Ventile an "strategischen Punkten" (HARPER, 1973) konnte dieser Effekt etwas abgeschwächt werden.

¹⁰⁾ Ein Quadrat bei GREENWOOD *et al.* (1982), ein Sechseck bei WULFF *et al.* (1992)

¹¹⁾ In Ermangelung eines deutschen Fachbegriffes soll er hier beibehalten werden.

eine besondere Beachtung geschenkt werden. Aus der Sicht der Regelungstechnik gehört es zusammen mit dem Konzentrationsmeßgerät zur "Regelstrecke", das heißt zur Versuchsfläche. Bei Freilandbegasungssystemen ist es jedoch zweckmäßig, es getrennt zu betrachten.

Regelung: Der Regler ist die zentrale Baugruppe einer Begasungsanlage. Der Typ (analog, digital), die Struktur (PID) und die Parametrierung sind für das ordnungsgemäße Funktionieren einer Begasung entscheidend.

Meßtechnik: Das Konzentrationsmeßgerät bestimmt mit seinen Eigenschaften (Auflösung, Zeitkonstante) die Qualität der Konzentrationsregelung. Regelungstechnisch gehört das Konzentrationsmeßgerät, wie das Dosierventil, zur "Strecke". Es ist aber zweckmäßig, das Meßgerät wie die Dosierung getrennt zu betrachten.

Im Folgenden werden die wichtigsten Freiland-Expositionssysteme kurz vorgestellt.

3.3.2. System von GREENWOOD

GREENWOOD *et al.* (1982) beschreiben ein computergesteuertes System, bei dem die Spurengaskonzentration in der Versuchsfläche durch einen Regelkreis konstant gehalten wurde. Das System wurde im Jahre 1980 entwickelt und an der Universität von Nottingham zur Begasung von Winterweizen (*Triticum aestivum*) mit Schwefeldioxid aufgebaut und betrieben. Abb. 16 zeigt eine schematische Darstellung der Anordnung.

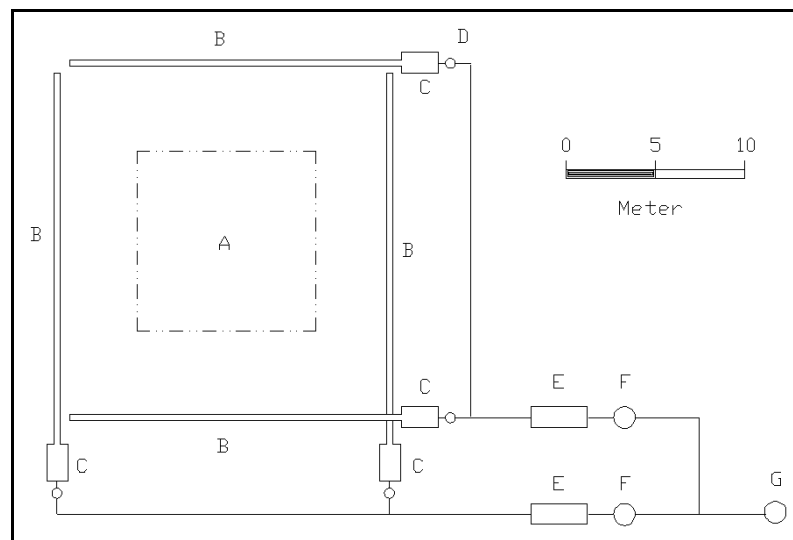


Abb. 16: Schematische Darstellung des System von GREENWOOD *et al.* (1982)

(A: Beobachtungsfläche, B: Gasauslässe, C: Mischkammer mit Ventilator, D: Magnetventil, E: Durchflußmesser, F: Motornadelventil, G: Druckminderer)

Eine quadratische Versuchsfläche von ca. 20 m Kantenlänge (400 m²) war von vier perforierten Schläuchen (B) begrenzt. Die Schläuche waren einseitig verschlossen und wurden durch Axialventilatoren (C) kontinuierlich mit Luft versorgt, um ein Verstopfen der Perforation zu verhindern. Die perforierten Gasauslässe bestanden aus Polypropylenschläuchen

von 35 mm Durchmesser. Der Lochabstand betrug 1 m, der Lochdurchmesser 2,4 mm. In Abhängigkeit von der Windrichtung wurde mit Magnetventilen (D) Schwefeldioxid in den/die luvseitigen Schlauch/Schläuche eingespeist. Der Volumenstrom wurde über ein Nadelventil (F) mit Durchflußkontrolle (E) von dem Steuercomputer verändert. Das Schwefeldioxid wurde in einer Stahlflasche mit Reduzierventil (G) bereitgestellt. Mit motorbetriebenen Nadelventilen (F) wurde die ausgebrachte Gasmenge (MFC, *mass flow controller*) windabhängig verändert. Weil gegenüberliegende Schläuche nicht gleichzeitig in Betrieb sein konnten, vereinfachte sich die Gasdosierung auf nur zwei Dosierarmaturen (EF). Aus einer grafischen Darstellung läßt sich der Betrag der Verstellsschritte zu etwa $0,5 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$ Schwefeldioxid abschätzen. Unter Zugrundelegung der von den Autoren angegebenen maximalen Flußrate ($60 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$) entspricht dies einer Schrittweite von ca. 1 Prozent. Während der Vegetationsperiode wurden die vier Begasungsleitungen mit dem wachsenden Bestand so angehoben, daß sie sich stets ca. 20 cm über dem Bestand befanden. Die Beobachtungsfläche (A) von $10 \cdot 10 \text{ m}^2$ lag in der Mitte des Schlauchquadrates.

Von COLLS *et al.* (1987, 1991) wurde diese Anlage modifiziert und u.a. dazu verwendet, um mit intermittierender Begasung von Wintergerste (*Hordeum vulgare*) die Frage zu klären, ob die Schwefeldioxiddosis oder die Schwefeldioxidkonzentration bestimmende Ursache für eine Pflanzenreaktion ist (COLLS *et al.* 1992). Feldgröße und Gasauslässe wurden nicht verändert. Die Autoren benutzten aber andere Computer und andere Software. Die Gasdosierung wurde vereinfacht, indem nur ein MFC für alle vier Gasauslässe eingesetzt wurde. BAKER *et al.* (1982) verwendeten das System zur Begasung von Weizen mit Schwefeldioxid im Winter.

3.3.3. Systeme von McLEOD

Ein bemerkenswertes System beschreiben McLEOD *et al.* (1985; Abb. 17). Es besteht aus einem statischen Düsenraster, das mit einem dynamischen Ring kombiniert ist. Die Anlage markiert damit den Übergang von den ZAPS-Typus zum FACE-Typus.

Die Behandlungsfläche ist ein kreisförmiger Bereich von etwa 250 m^2 Fläche im Zentrum des Ringes. Die beiden Teilsysteme (statisch bzw. dynamisch) werden über getrennte Leitungen mit Spurengas versorgt. Diese Kunststoffleitungen ($d = 63 \text{ mm}$) führen zu einem entfernt stehenden Ventilator. Die Länge der Leitungen beträgt dabei in Abhängigkeit von der Lage des jeweiligen Ringes bis zu 300 Meter. Das Versorgungssystem für den äußeren Ring (*Plenum*) besteht aus vier Segmenten. Die 24 Luftauslässe (VVP) sitzen in Gruppen zu sechs auf den vier Plenum-Abschnitten, sie haben keine individuellen Betätigungsventile und es werden immer zwei VVP-Gruppen aktiviert. Die verwendeten Ventilatoren stehen im Südosten des Versuchsfeldes am Rand in ca. 250 m Entfernung und haben eine Luftleistung von $680 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Der Luftstrom jedes Ventilators wird geteilt in die beiden Zweige zur Versorgung des ZAPS- (statisches Düsenraster) und des FACE-Teiles (dynamisches Düsenraster) der Anlage. Die Teilströme werden mit 400 (zum Array) und $270 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ (zum Ring) angegeben. Die Einspeisung von Spurengas erfolgt direkt am Ventilator. Der Transport erfolgt durch ein

Kunststoffrohr mit dem Durchmesser von 63 mm. Das Rohrvolumen beträgt also je nach Ring (*replicate*) pro Zweig bis zu 700 l. Daraus läßt sich die Verweilzeit des vorverdünnten Spurengases überschlagsmäßig berechnen. Sie beträgt knapp 2 min für die Leitung zum Array und knapp 3 min für den Weg zum Ring. Die Meßgasleitung aus PTFE (d=8 mm) wird mit einer Meßgaspumpe ($q = 25 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) beständig durchströmt. Ein Meßstellenwechsler (Eigenbau) schaltet die Meßgasleitungen von vier Teilanlagen (*replicates*) zyklisch auf das zentrale Konzentrationsmeßgerät (Monitor), ein Flammenphotometer (Sa285E9) der Firma *Meloy Laboratories Inc.* (Springfield, U.S.A.). Jeder Teil-Ring wird drei mal pro Stunde gemessen.

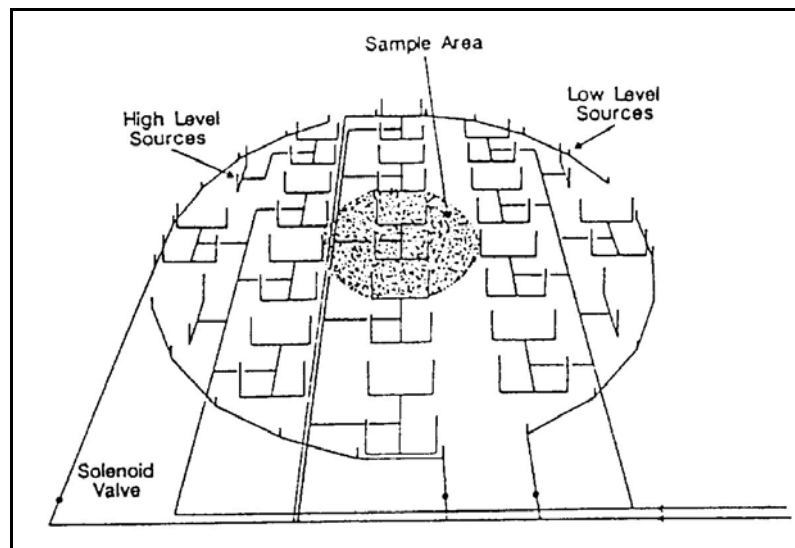


Abb. 17: Schematische Darstellung des ersten Systems von McLEOD *et al.* (1985)

Als Rechner dient ein Macsym 2 (Analog Devices Ltd., East Molesey, U.K.) mit A/D- und D/A-Wandlern. Die vom Monitor mit einem zeitlichen Abstand von 20 Minuten einlaufenden Meßwerte werden mit einem einfachen Algorithmus verarbeitet:

$$F = F + (T - O) \cdot \frac{F}{O}$$

mit F (flow) = Spurengasstrom, T (target value) = Sollwert, O (observed) = Istwert

Bei Windgeschwindigkeiten außerhalb des Arbeitsbereiches von 1,0 bis 6,0 m/s wurde die Anlage abgeschaltet.

Eine modifizierte, stark vereinfachte Form dieses dynamischen *plume*-Systems wurde während des *Liphook Forest Fumigation Project* (1985 bis 1992) in England zur Begasung von *Pinus nigra* Beständen¹²⁾ mit den Spurengasen Schwefeldioxid und Ozon sowie Gemischen

¹²⁾ Die Bestände waren 1982 gepflanzt worden.

aus beiden benutzt. McLEOD (1995) beschreibt Konstruktion und Eigenschaften dieses Systems (Abb. 18).

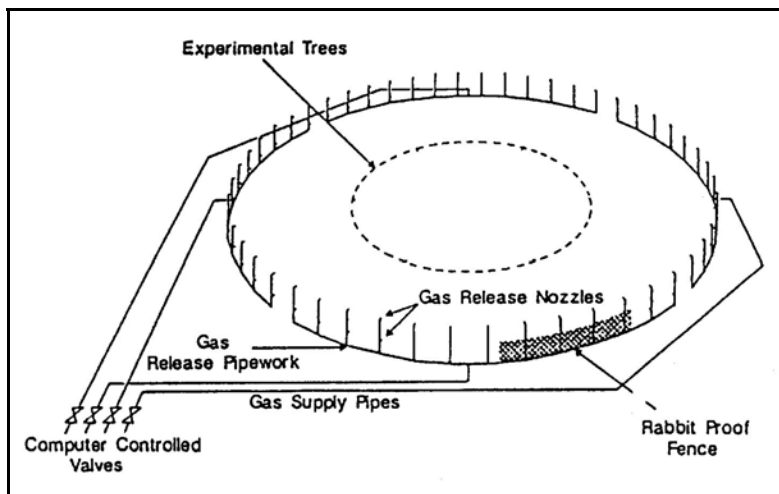


Abb. 18: Schematische Darstellung des neueren Systems von McLEOD (1995)

Als eigentliche Behandlungsfläche galt ein kreisförmiger Bereich ($d = 25\text{ m}$) mit etwa 500 m^2 Nutzfläche im Zentrum der Ringe. Der Durchmesser der Ringe betrug unverändert 50 Meter. Die Anzahl der Gasauslässe (VVP, *vertical vent pipe*) wurde von 24 auf 52 erhöht, die in vier Sektoren zu je 13 VVP zusammengefaßt waren. Das innere ZAPS-Raster wurde ganz weggelassen.

Die Ausströmdüsen waren zunächst in zwei diskreten Höhen (1 m und 3 m ü. GOK) angeordnet. Mit dem Höhenwachstum der Baumbestände wurden die Düsen ebenfalls in größere Höhen verlegt, wobei die Bezugshöhe $2/3$ der mittleren Baumhöhe betrug.

Das konzentrierte Spurengas Schwefeldioxid aus einer Gasflasche wurde mit trockener Preßluft auf Betriebskonzentrationen von $<1\%$ verdünnt. Das Ozon wurde als 1%-iges Luftgemisch über einen Preßluft-gespeisten Ozongenerator bereitgestellt. Zur Absorption der erzeugten Stickoxide war dem Generator ein Wäscher (*scrubber*) nachgeschaltet.

Mit diesem Experiment wurden fünf Begasungsflächen von je 50 m Durchmesser mit zwei verschiedenen Schwefeldioxid-Konzentrationen, einer Ozonbelastung in 1,5-facher Höhe der Umgebungskonzentration und zwei Kombinationen aus erhöhtem Schwefeldioxid und Ozon beaufschlagt.

Der Dosierungserfolg, gemessen als Abweichung von den Soll-Konzentrationen, muß allerdings als nur mäßig angesehen werden. Ein wichtiger Grund dafür liegt sicher in der verhältnismäßig groß gewählten Fläche¹³⁾ der Anlage. Aber auch die Totzeiten in den übermäßig langen Gaswegen (Meßgas und Dosierung), sowie die unzweckmäßige Abtastrate (30 Minuten) des Reglers sind als Ursache zu nennen.

¹³ Diese Ringe haben den bislang größten Durchmesser von allen Systemen dieses Typus.

Weitere Anwendungen und Ergebnisse beschreiben ALLEN (1979), HOLLAND *et al.* (1995), MCLEOD *et al.* (1992) und MCLEOD & SKEFFINGTON (1995).

3.3.4. BNL-FACE

Das Akronym FACE steht für *Free Air CO₂ Enrichment*. Weil die ersten Experimente für das FACE-Projekt am Brookhaven National Laboratory (BNL) durchgeführt wurden, wird bis heute zur eindeutigen Identifikation und Abgrenzung gegen andere FACE-Modifikationen das Akronym BNL-FACE verwendet. Der grundlegende Aufbau eines BNL-FACE-Systems ist in Abb. 19 skizziert, Abb. 20 zeigt beispielhaft ein System in Minnesota.

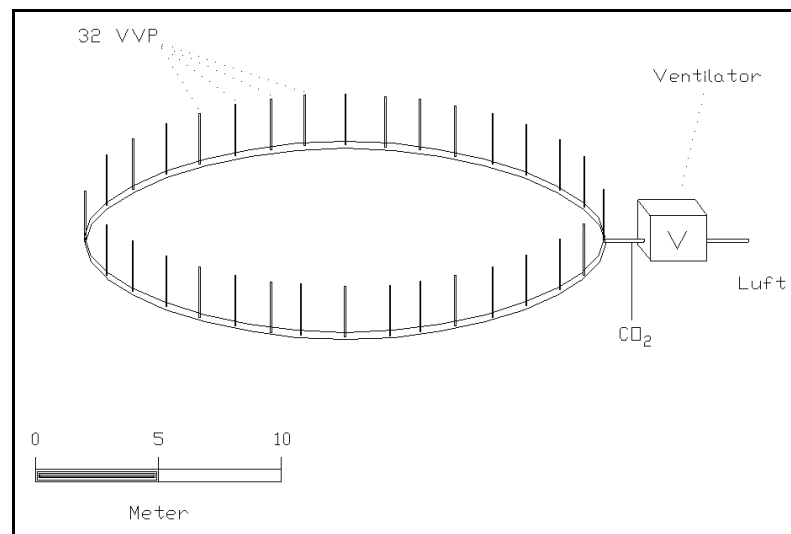


Abb. 19: Technologieschema des BNL-FACE

(VVP: vertical vent pipe, vertikaler Luftauslaß)

Eine Ringleitung (*plenum*) mit 30 cm Durchmesser umschließt die kreisförmige Versuchsfläche, die einen Durchmesser von 22 m hat. Ein zentraler Ventilator versorgt dieses Plenum mit gefilterter Luft. Die Luftleistung wird von LEWIN *et al.* (1992) mit $40 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ angegeben. Bei HENDREY *et al.* (1999) beträgt sie $102 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Auf dem Plenum sitzen 32 senkrechte Gasauslässe (VVPs, *vertical vent pipes*), die über individuelle Ventile an diese Versorgungsleitung angeschlossen sind. Die Höhe der VVPs ist 2,25 m und das Material ist PVC-Rohr mit 5 cm Durchmesser. Ein Computer (CPU 80286) steuert die VVP windabhängig. Wenn der Wind die Anlaufgeschwindigkeit (*stall speed*) des verwendeten Anemometers überschreitet, wird ein quasi Sinus-gewichtetes (*feathered*, "gerupft") Auslaßmuster vor dem Wind (luvseitig) geöffnet. Bei Winden unter $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wird ein isotropes Muster geschaltet. Siehe hierzu Abb. 21 aus LEWIN *et al.* (1992).



Abb. 20: FACE-Anlage in Minnesota (Cedar Creek Natural History Area)

(Quelle: <http://www.lter.umn.edu/biocon>)

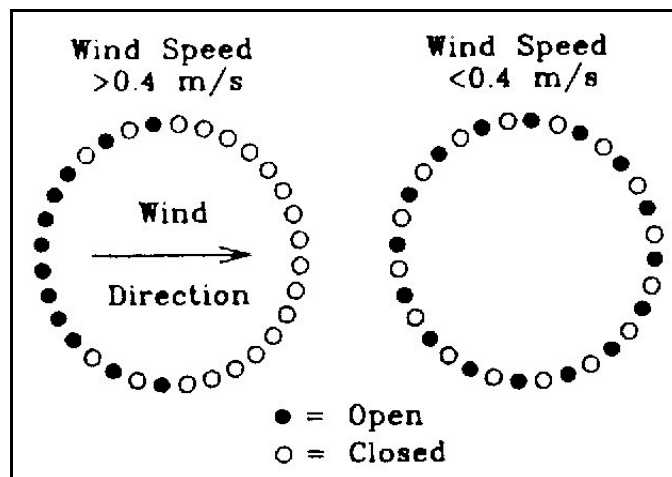


Abb. 21: VVP-Muster eines FACE-Ringes (aus LEWIN *et al.* 1992)

Das Spurengas Kohlendioxid wird direkt am Ventilator (*fan*) zudosiert. Jeder Ring hat ein individuelles Gasmessgerät. Das Meßgas wird aus der Ringmitte über eine etwa 17 m lange Leitung ($d = 4.3 \text{ mm}$) mit $2,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ gepumpt. Die Verweilzeit in der Meßgasleitung wird mit 7 bis 10 Sekunden angegeben. Zum Regeln wird der gleiche PC verwendet, der die VVPs vor den Wind dreht. Die Angaben zum Algorithmus beschränken sich auf eine allgemeine Erläuterung der drei Standardkomponenten eines PID-Reglers (proportional, integral, differentiell), ohne die gewählten Parameter zu nennen. Zusätzlich wird die Verwendung eines Tiefpaßfilters mit einer Zeitkonstanten von 45 Sekunden genannt. Die Begründung dafür lautet:

"... to prevent the control system from chasing very short term variations. (LEWIN *et al.* 1992)"

Die Windgeschwindigkeit wird ebenfalls gemittelt (über 15 min), bevor sie dem Regler (als Störgröße) aufgeschaltet wird. Eine Erklärung für diese Mittelung wird nicht gegeben.

Die ersten Experimente am BNL wurden mit einem Prototyp von 15 m Durchmesser durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde zunächst ohne Pflanzen gearbeitet. Als Spurengase kamen Schwefeldioxid und Ozon zum Einsatz. Eine größere Anordnung mit 23 m Durchmesser wurde 1987 in Yazoo City, Mississippi, gebaut. Dieser Standort wurde gewählt, weil dort preiswertes Kohlendioxid aus einer Düngemittelfabrik zur Verfügung stand¹⁴). Die Konzentrationen lagen im Bereich von 500 bis 700 ppm. Das Hauptziel der Untersuchungen war die Klärung und Optimierung der windabhängigen Konzentrationsverteilung. Neben der reinen technischen Weiterentwicklung wurde hier erstmalig auch ein Forschungsschwerpunkt auf eine botanische Fragestellung gelegt: Das Interesse galt der Reaktion von Baumwolle auf erhöhte CO₂-Konzentrationen.

Auf der Erfahrung mit den Prototypen basierend wurden vier weitere Ringe (23 m) aufgebaut und untersucht. Das Hauptaugenmerk lag auch hier noch auf den physikalisch-mikro-meteorologischen Eigenschaften der Ringe. Im Jahr 1989 wurden schließlich die Versuche nach Maricopa, Arizona, verlegt. Hier wird seitdem in 23-m-Ringen gearbeitet. Die Begasung von 10 m hohen Kiefern (*Pinus taeda*) beschreiben HENDREY *et al.* (1999). Weitere Anwendungen beschreiben z.B. HILEMAN *et al.* (1992) und LEWIN *et al.* (1994). Eine Zusammenstellung von FACE-Experimenten findet sich unter

<http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/FACE/face.html>

bzw.

<http://www.gcte-focus1.org/CO2.html>.

3.3.5. System von KROPFF

In Wageningen (Niederlande) wurde in den 80er Jahren eine kreisförmige Anlage mit 30 m Durchmesser zur Begasung von Wicken (*Vicia faba*) mit Schwefeldioxid errichtet (KROPFF *et al.* 1989; Abb. 22). Als Probenfläche diente ein Quadrat mit 8 m Kantenlänge im Zentrum des Expositionsrings. Als Besonderheit hat diese Anlage zwei Ringleitungen. Sie versorgen die VVPs mit dem vorverdünnten Spurengas, wobei eine Leitung von unten (0,6 m) und die andere von oben (2,1 m) an die VVPs führt. Die Autoren nennen als Vorteil dieser Anordnung eine bessere mechanische Stabilität der Luftauslässe. Auf dem Gesamt-Umfang waren insgesamt 96 Luftauslässe (VVP) angeordnet, die jeweils drei Düsen (Bohrungen) von $d = 1$ mm Durchmesser besaßen. Die 96 VVPs waren in 16 Sektoren zu je sechs VVP zusammengefaßt. Im Betrieb wurden immer drei Segmente luvseitig geöffnet. Diese 18 VVPs überstrichen einen Winkel von 67,5 Grad. Eine Begasung erfolgte nur oberhalb einer Windgeschwindigkeit von $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ¹⁵), wobei der digitale Konzentrationsregler (*Computer*) mit einem Abtastintervall von 6 Minuten arbeitete.

¹⁴ Ein FACE-Ring von 23 m Durchmesser verbraucht im Mittel etwa 1,2 Tonnen Kohlendioxid pro Tag.

¹⁵ Bei einer für unsere Breiten typischen Windstärkenverteilung bedeutet das, daß die Anlage bis zu 20 % der Zeit abgeschaltet war.

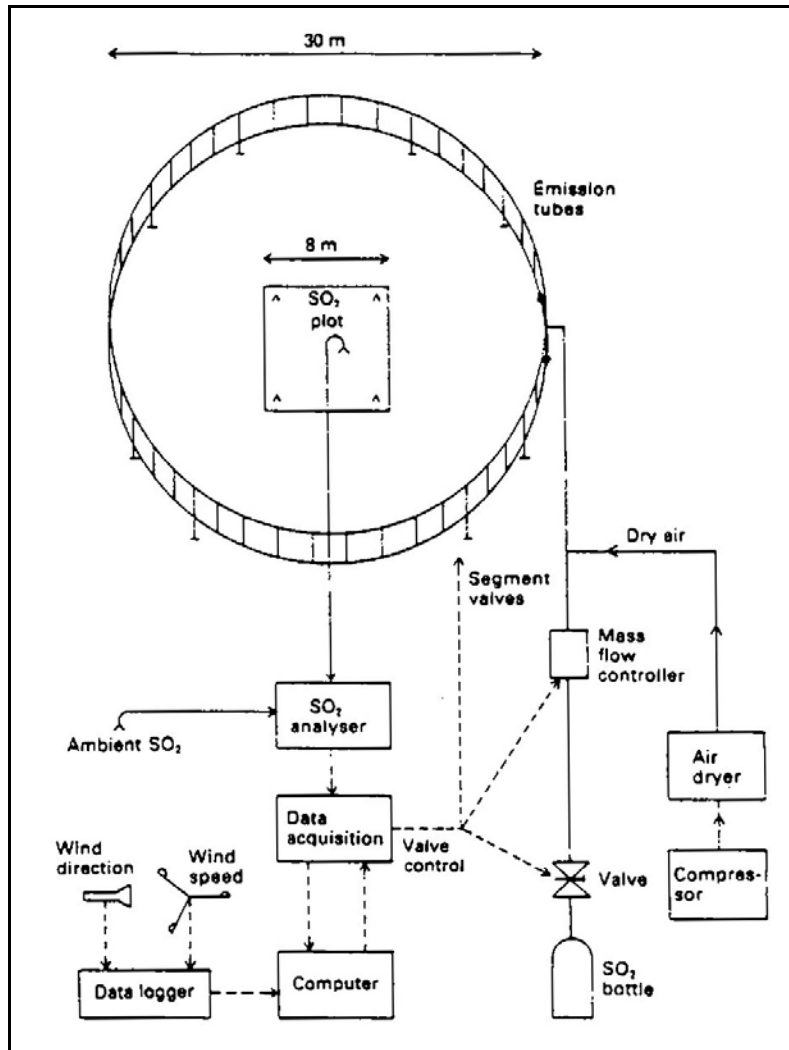


Abb. 22: Begasungsring von KROPFF *et al.* (1989)

Die zitierte Literaturstelle (KROPFF 1989) läßt einige Fragen offen. Der Sinn der zweiten, zusätzlichen Versorgungsleitung am oberen Ende der VVP bleibt verborgen. Jede VVP muß nun wegen dieser zusätzlichen Leitung mit jeweils zwei Ventilen gesteuert werden. Weiterhin erscheint der angegebene Düsendurchmesser (1 mm) in Verbindung mit der genannten Düsenanzahl (18 VVP mit je 3 Düsen) recht klein: Aus der Gesamtzahl von 54 Düsen pro Segment berechnet sich eine etwa 0.4 cm^2 große Querschnittsfläche. Bezogen auf die damit versorgte Sektorfläche von 12 m^2 wirkt diese Zahl unwirklich klein (Verdünnung: 1 : 300000). Schließlich ist der Datenfluß im Bild (Abb. 22) nicht nachvollziehbar: Vom *Data logger* über den *Computer* zur *Data acquisition*, wobei letztere dann alle Ventile steuert. Dennoch schreiben die Autoren, daß die durchschnittlichen Sollkonzentrationen für Schwefeldioxid gut eingehalten wurden. Auf kurzfristige Schwankungen der Turbulenz konnte das System aber nicht adäquat reagieren.

3.3.6. System von WULFF

Ein hexagonales System zur Ozon-Begasung wurde von WULFF *et al.* (1992) beschrieben. Abb. 23 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Anlage in Kuopio, Finnland. Der Durchmesser der freien Innenfläche beträgt 10,4 Meter. Von dieser Bruttofläche wird ein Kreis mit 7 m Durchmesser ($F \approx 40 \text{ m}^2$) für die botanischen Experimente genutzt.

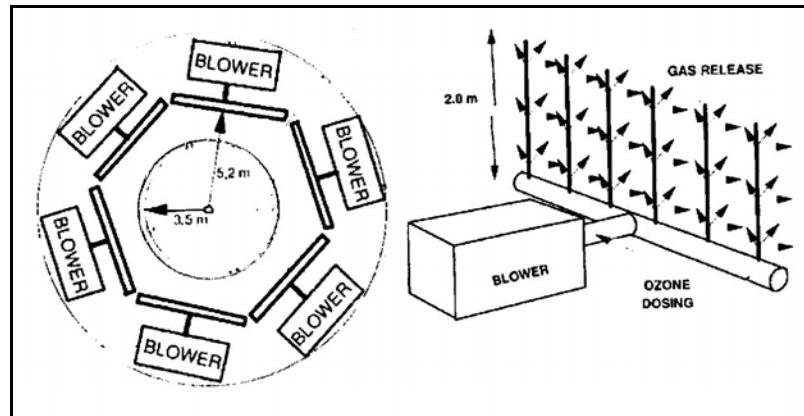


Abb. 23: Schematische Darstellung des Hexagon von WULFF *et al.* (1992)

(links: Gesamtanordnung in Draufsicht; rechts: Einzelsegment, perspektivisch)

Das System ist im Gegensatz zu den anderen Anlagen aus sechs gleichartigen unabhängigen Teilstücken aufgebaut. Im linken Teil der Abbildung ist die Gesamtanordnung skizziert: Jedes Segment besteht aus einer Ventilatoreinheit (*Blower*) und einem linearen *Plenum* ($l = 4 \text{ m}$, $d = 16 \text{ cm}$), das die Luftauslässe trägt. Es wird in der Mitte vom einem Ventilator mit Luft versorgt. In dem Verbindungsstück zwischen der Stammleitung und dem Ventilator kann das Ozon zugeführt werden. Alle ozonführenden Rohre bestehen aus PVC. Der Aufbau der VVP-Gruppe (VVP, *vertical vent pipe*) ist im rechten Bildteil wiedergegeben: Eine horizontale Stammleitung (Plenum) trägt sechs VVP von 2 m Länge und 5,7 cm Durchmesser. Die Löcher der VVPs haben 6 mm Durchmesser. Einzelne Öffnungen werden nach Bedarf mit Klebeband verschlossen. Zur Positionierung der Begasungsanlage vor dem Wind werden einzelne VVPs nicht geschaltet. Mit Magnetventilen wird lediglich die Ozonleitung auf zwei luvständige Baugruppen geschaltet.

Die Anlage ist so ausgelegt, daß sie eine Verdoppelung der Ozon-Konzentration gegenüber der Umgebungsluft ermöglicht und dabei dem natürlichen Tagesgang folgt. Für die Sollwertvorgabe stehen zwei Probenahmepunkte außerhalb des Ringes zur Verfügung, von denen der jeweils luvseitige alle 10 Minuten beprobt wird. Dieser Meßwert wird verdoppelt und als Sollwert dem Regler vorgegeben. Die Istwertmessung erfolgt jede Minute an Luftproben aus der Ringmitte.

Die Anlage läuft kontinuierlich Tag und Nacht. Nur bei Regen und bei Windgeschwindigkeiten außerhalb des Toleranzbereiches von $0,1$ bis $5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wird die Begasung abgeschaltet. Der Reglerausgang beeinflusst über ein Motorventil den Sauerstoffstrom zum Ozongenerator.

3.3.7. AMIBA

Dieses Feldbegasungssystem wurde von REECE *et al.* (1995) entwickelt und in *Sky Oaks* (CA, USA) aufgebaut. Das runde Versuchsfeld hat etwa 15 m Durchmesser. Eine Skizze des Rohrsystems der AMIBA-Anlage ist in Abb. 24 wiedergegeben.

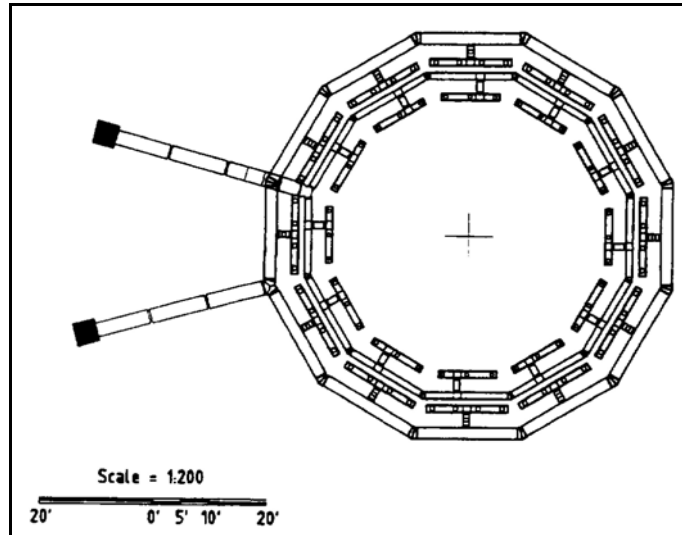


Abb. 24: Zeichnung des AMIBA-Rohrsystems (aus REECE *et al.* 1995)

Die Besonderheit dieser Anlage ist das doppelte Ringsystem. Der innere Ring dient wie bei einem normalen *Plume*-System der Zuführung von vorverdünntem Kohlendioxid. Der äußere Ring wird dagegen mit unbehandelter Umgebungsluft beschickt. Die zugehörigen Luftauslässe sind nach außen gerichtet und blasen dem anströmenden Wind entgegen. Durch diese Anordnung versprechen sich die Autoren eine Abschwächung des Windes. Dieser beabsichtigte Effekt, eine Art Luftvorhang (*air curtain*, *impedance barrier*, *momentum impedance*), führt zu dem von den Autoren gewählten Namen Akronym "AMIBA", es steht für *Atmospheric Momentum Impedance and Barrier Approach*.

Die verwendeten Luftauslässe haben eine Höhe von etwa 2,2 Meter. In ihrer Lochanordnung unterscheiden sie sich nach ihrer Aufgabe. Die OVVPs (*outer VVP*) blasen dem Wind entgegen. Sie sind nach außen gerichtet und werden in Gruppen zu 4 aktiviert. Die IVVPs (*inner VVP*) verströmen das Spurengas. Sie werden in dreier Gruppen geschaltet. Über die verwendeten Reglerstrukturen und -parameter werden keine Angaben gemacht.

Die Autoren experimentierten mit Kohlendioxid bei Konzentrationen von etwa 750 ppm. Sie berichten Abweichungen von 18,5% (Mittelwerte über eine Minute), 20% während 81% der Betriebszeit und 10% über 61% der Betriebszeit. Als Gasverbrauch nennen sie 590 Tonnen pro Jahr ($\text{Mg}\cdot\text{a}^{-1}$) und betonen eine Einsparung von 40% gegenüber dem Gasbedarf einer vergleichbaren FACE-Anlage, den die Autoren mit $980 \text{ Mg}\cdot\text{a}^{-1}$ angeben. Einschränkend schreiben REECE *et al.* (1995):

"However, these results need to be confirmed after the system has been in operation for a prolonged period."

da die Autoren sich bei ihren Angaben auf die Meßdaten aus einem Beobachtungszeitraum von nur einem einzigen Tag, dem 313. Tag des Jahres 1994 (09.November), stützen:

"... the period of the first field test (D313)."

3.3.8. Mini-FACE und Mid-FACE

Anfang der 90er Jahre beobachtet die Arbeitsgruppe um MIGLIETTA mediterrane Ökosysteme (Grasland, Wälder) sowie einzelne Arten (Soja) unter natürlichen Hochkonzentrationen in der Umgebung von starken Kohlendioxidquellen. (vgl. MIGLIETTA & RASCHI 1993, MIGLIETTA *et al.* 1993, sowie KÖRNER & MIGLIETTA 1994). Ihre ersten Experimente unter einer künstlich angehobenen Kohlendioxidkonzentration werden 1996 beschrieben. Zur Untersuchung des Einflusses vom Bodenstickstoff auf die Syntheseleistung von Weizen hatten sie eine einfache Anlage aufgebaut, die sie Mini-FACE genannt haben.

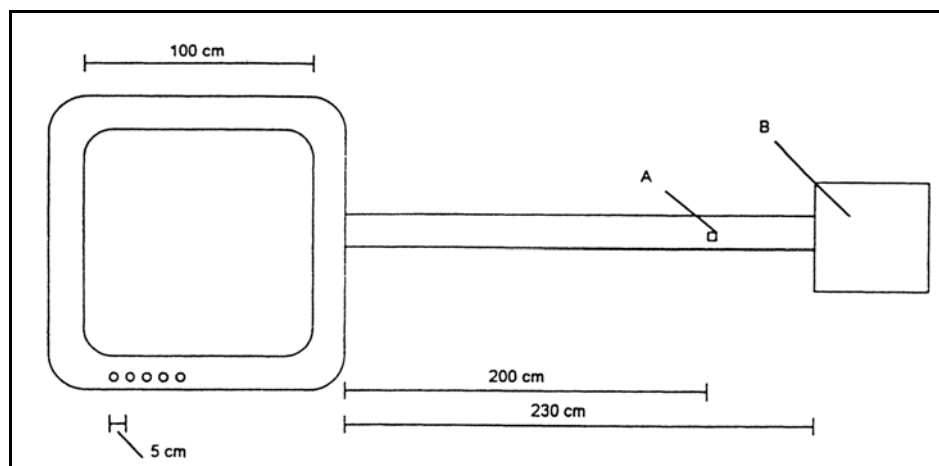


Abb. 25: Schematisierte Darstellung eines Mini-FACE-Systems (aus Miglietta *et al.* 1996)

Das Mini-FACE (vgl. Abb. 25) bestand aus vier Rohrstücken von acht Zentimeter Durchmesser, die zu einem Rechteck von ein Meter Kantenlänge verbunden waren. Das Rohrquadrat lag auf dem Boden und war auf der Oberkante perforiert. In einem Abstand von (nur) 2,30 m befand sich ein Gebläse, daß über ein glattes Rohr Luft seitlich in das Quadrat drückte. Das Spurengas Kohlendioxid wurde 30 cm hinter dem Gebläse eingespeist. Eine windrichtungsabhängige Steuerung (*upwind control*) existierte nicht. Das Spurengas wurde unabhängig von der Windrichtung aus allen Löcher in 8 cm Höhe über dem Boden abgegeben.

Vier solcher Mini-FACE wurden zyklisch im 15 Minuten-Takt von einem gemeinsamen Konzentrationsmeßgerät gemessen. Die Regelung wird als PID-Regler angegeben. Die Erläuterung, "the same as LEVIN *et al.* 1992" ist sehr fragwürdig, denn es ist evident, daß der

Regler von der Anlage von LEVIN ganz sicher nicht für das primitive Rohrquadrat von MIGLIETTA übernommen werden kann: Das BNL-FACE ist mehr als 400 mal so groß und verfügt im Gegensatz zum Mini-FACE über eine *upwind control*. In Abb. 26 sind beispielhaft 2 Mini-FACE-Systeme späterer Bauart dargestellt.

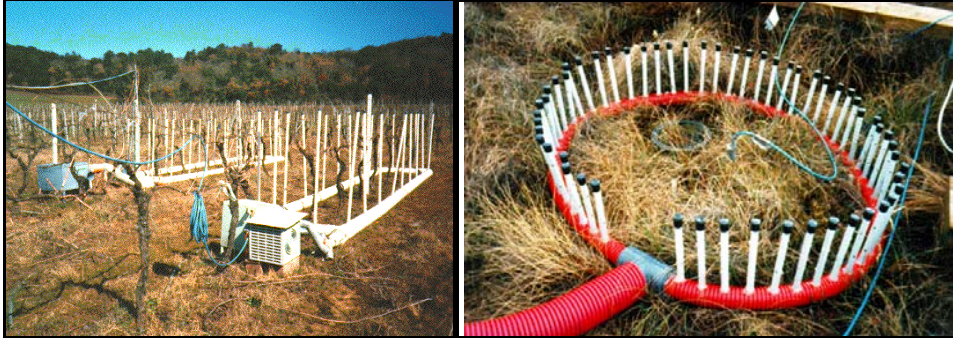


Abb. 26: Mini-FACE-Systeme

Das von MIGLIETTA *et al.* (1997) beschriebene System hat einen Durchmesser von acht Metern, es wird deshalb von den Autoren als Mid-FACE bezeichnet. Die kreisförmige Hauptversorgungsleitung (Plenum) besteht aus PVC-Rohr mit 20 cm Durchmesser. Das Plenum wird einseitig von einem Ventilator mit Umgebungsluft beschickt. Der Ventilator steht in unmittelbarer Nähe. Auf dem Umfang dieses Plenum stehen 24 senkrechte Luftauslässe (VVP) aus PVC-Rohr mit 6.5 cm Durchmesser. Die Länge der VVPs beträgt 60 cm über Geländeoberkannte (GOK). Sie werden mit pneumatischen Klappen geöffnet und geschlossen. Zum Betätigen wird Kohlendioxid anstelle von Druckluft verwendet und dadurch ein Kompressor überflüssig. Das bei jedem Arbeitstakt anfallende Arbeitsgas (Kohlendioxid) darf die Begasung nicht beeinflussen und wird mit Schläuchen in 150 Meter Entfernung abgeblasen. Es sind immer 12 VVPs in einem Halbkreis geöffnet. Ein spezielles VVP-Muster, wie bei der BNL-FACE-Anlage, kommt nicht zur Anwendung. Bei Windgeschwindigkeiten unter $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ werden alle VVPs geöffnet.

Das eingesetzte Spurengas ist Kohlendioxid aus einer örtlichen geologischen Quelle. Es wird über eine 1400 Meter lange Leitung herangeführt und direkt hinter dem Ventilator zugemischt. Als Stellglied dient ein Stellventil mit Motorantrieb. Die Probenahme für die Konzentrationsmessung der Regelung erfolgt in der Ringmitte. Über eine kurze Meßgasleitung ($l=5 \text{ m}$, $d=4 \text{ mm}$) wird mit einer kräftigen Luftpumpe ($q=15 \text{ L/min}$) das Meßgas zum Meßgerät (Monitor) gepumpt. Die Verweilzeit des Gases wird mit weniger als 3 sec angegeben. Zur Messung der räumlichen Konzentrationsverteilung im Prototyp wurden 24 Gasprüfröhrchen (Herst. Dräger) eingesetzt, die in drei Gruppen zu je acht Stück pro Ebene, in Höhen von 0, 15 und 30 cm über dem Bestand angebracht waren. Die Länge der auftretenden Verfärbung wurde als Maß der bestehenden mittleren Konzentration aufgefaßt. Die Röhrchen wurden täglich um 09:00 erneuert (geöffnet) und nachfolgend stündlich mit einem Tastzirkel (*caliper*) abgelesen.

In den Betriebsanlagen wurde die räumliche Verteilung mit einem Probenwechsler an 16 Meßstellen bestimmt. Von dem angewendeten PID-Regler werden die Struktur und die Parametrierung nicht genannt. Bezüglich des Algorithmus wird auf die Arbeit von LEWIN *et al.* (1994) verwiesen.

Ein Prototyp wurde über einen Zeitraum von 29 Tagen (Januar/Februar 1995) auf natürlichem Grasland mit einer Zielkonzentration von 560 ppm erprobt. Danach wurden fünf Betriebsanlagen gebaut und für drei Monate (Juni bis August 1995) für ein Experiment mit Kartoffeln (*Solanum tuberosum*, L.) eingesetzt. Die Zielkonzentrationen waren 460, 560 und 660 ppm.

3.4. Bewertung der Freiland-Expositionssysteme

3.4.1. Die Regelstrecke

3.4.1.1. Das Plenum

Bei *Plume*-Anlagen darf das verwendete Spurengas aus aerodynamischen Gründen nicht unmittelbar in seiner konzentrierten Form direkt über der Versuchsfläche ausgebracht werden. Es bestünde die Gefahr unzureichender Vermischung mit der Umgebungsluft und damit die Gefahr einer Exposition der Versuchspflanzen mit temporären Konzentrationen des Spurengases weit über den Soll-Konzentrationen. *Plume*-Systeme sind daher mit einer Einrichtung zur Vorverdünnung des Applikationsgases mit Umgebungsluft versehen. Diese Vorverdünnungsstufen sind auf verschiedene Arten ausgestaltet. Manchmal finden diskrete Mischkammern Verwendung (GREENWOOD *et al.* 1982, Abb. 16), aber meist sind die bauartbedingten Luftwege vom Dosierpunkt zu den Auslässen lang genug, um eine ausreichende Vermischung von Spurengas und Hilfsluft zu gewährleisten (vgl. FACE, Abb. 19 und WULFF *et al.* 1992, Abb. 23). Bei einigen Anwendungen muß die Hilfsluft aufwendig vorbehandelt werden. Um beispielsweise Schwefeldioxid anzuwenden, muß zur Vermeidung von Korrosion an Leitungen und Ventilen mit sehr trockener Luft gearbeitet werden. Hierzu dienen dann Kolbenkompressoren mit nachgeschalteter kryostatischer Trocknung (KROPFF *et al.* 1989, Abb. 22).

Die Ringleitung zur Versorgung der Luftauslässe mit vorverdünntem Spurengas wird in der Literatur mit dem Begriff *Plenum* bezeichnet, und gerade dieses scheinbar einfache Anlagenteil hat bei unbedachter Auslegung entscheidende negative Auswirkungen auf die erreichbare Regelgüte der Begasungsanlage.

Am Beispiel der FACE-Anlage wird dies besonders deutlich. Mit einem großen, zentralen Ventilator wird dort Hilfsluft zur Vorverdünnung angesaugt und in das ringförmige Plenum gedrückt. Die Zumischung von Kohlendioxid erfolgt dicht hinter dem Ventilator. Abb. 27 zeigt die schematische Darstellung einer fiktiven FACE-Anlage unter Westwind. Der Ventilator steht luvseitig und saugt frische Umgebungsluft an. Der Weg des Spurengases (hier Kohlendioxid) im Plenum ist kurz, er beträgt nur wenige Meter.

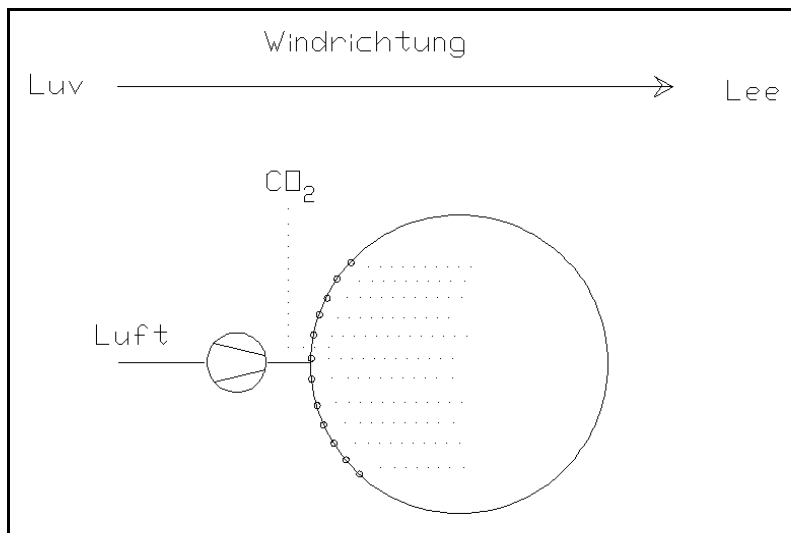


Abb. 27: Schematische Darstellung FACE unter Westwind (Fall 1)

(Es wird "normale" Umgebungsluft angesaugt; der Stofftransport im Plenum ist kurz; geringe Reibungs- und Zeitverluste im Plenum)

Wenn der Wind jetzt um 180° dreht, entsteht eine Situation, wie sie in der Abb. 28 schematisch dargestellt ist. Der Wind kommt aus Osten, und dadurch steht der Ventilator leeseitig in der aufgereicherten Abluftfahne. Er saugt deshalb angereicherte Luft an. Desweiteren hat sich die Transportstrecke des Spurengases im Plenum auf etwa 30 m verlängert. Eine Änderung der zudosierten Spurengasmenge wird sich also erst verzögert an den Luftauslässen bemerkbar machen. Diese Totzeit wird noch verstärkt durch die Tatsache, daß der Volumenstrom insgesamt durch den höheren Strömungswiderstand abgenommen hat. Bei jeder Windrichtungsänderung muß also der Regler eingreifen und die sich ändernde Grundkonzentration in der Hilfsluft ausregeln, auch wenn sich sonst nichts geändert hat.

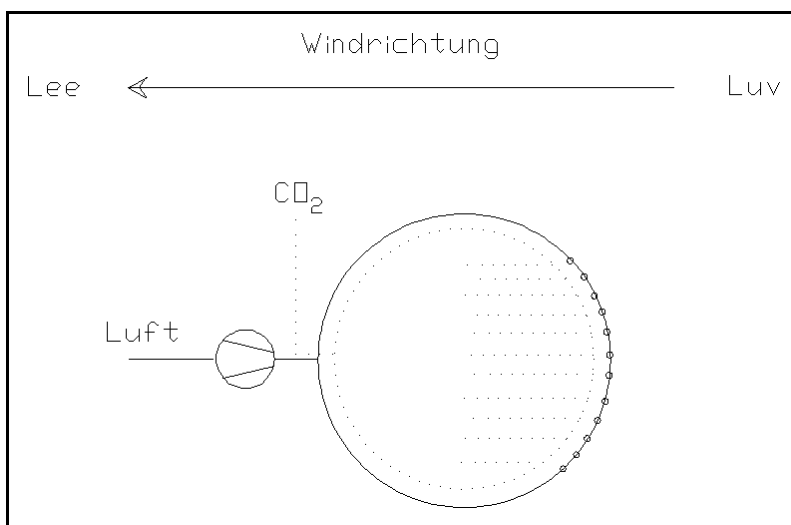


Abb. 28: Schematische Darstellung FACE unter Ostwind (Fall 2)

(Es wird angereicherte Umgebungsluft angesaugt; der Stofftransport im Plenum ist lang; die Reibungsverluste im Plenum sind groß)

Außerdem prägt ein solches Plenum durch seine variable Totzeit (Stofftransportzeit) der Regelstrecke (der Versuchsfläche) eine anisotrope Charakteristik auf, die jeden Regler durch ihre zufällige Natur unkalkulierbar belastet.

Aus den Abmessungen des *Plenum* der FACE-Anlage läßt sich die zu erwartende Stofftransportzeit grob abschätzen. Aus dem Rohrquerschnitt und dem Ringdurchmesser berechnen sich etwa 5 m^3 Plenumvolumen. Mit der geschätzten Ventilatorleistung von $Q < 30 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (freiblasend) ergeben sich Transportzeiten im Bereich von 0 bis 10 s.

Je nach Windrichtung ergibt sich durch ein FACE-Plenum eine andere Stofftransportzeit (Totzeit) und eine andere Grundkonzentration in der angesaugten Hilfsluft. Diese Anisotropie belastet den Regler unnötig und verschlechtert die erreichbare Regelgüte. Eine optimales Plenum müßte durch einen hochsymmetrischen Aufbau¹⁶⁾ diese Nachteile vermeiden und dadurch die Qualität der Regelung verbessern.

3.4.1.2. Die Gasauslässe

Das Zusammenfassen von Auslässen (VVPs) zu Gruppen (Sektoren, Segmente), die gemeinsam geschaltet werden, vereinfacht und verbilligt den Aufbau einer Begasungsanlage. Es wird dabei für jeden Luftauslaß eine Steuerklappe mit der dazugehörigen Elektronik eingespart.

Tabelle 2 stellt die beschriebenen Plume-Systeme nach diesem Gesichtspunkt geordnet nebeneinander¹⁷⁾. Die Tabelle zeigt in der Spalte 5 die Anzahl der eingesparten Auslaßsteuerungen. Bei der Anlage von KROPFF, die einen Umfang von etwa 100 m hat, sum-mieren sich allein die 80 eingesparten elektrischen Steuerleitungen auf schätzungsweise 10 km

Tab. 2: Zahl der Gasauslässe sowie Segmentwinkel verschiedener Freiland-Expositionssysteme

System	Gesamtzahl der Auslässe	Auslässe pro Segment	Segmentzahl	Einsparung	Segmentwinkel
1	2	3	4	5	6
FACE	32	1	—	0	11°
KROPFF	96	6	16	80	22°
WULFF	36	6	6	30	60°
MCLEOD (I)	24	6	4	20	90°
MCLEOD (II)	52	13	4	48	90°

¹⁶⁾ Die Anlage von WULFF *et al.* (1992) zeigt eine mögliche Lösung (vgl. Abb. 23).

¹⁷⁾ Die Anlage von GREENWOOD *et al.* (1982) ist nicht aufgeführt, sie verwendet gelochten Schlauch und keine diskreten Luftauslässe (vgl. Abb. 16).

Kabel. Dies läßt eine Gruppierung von Auslässen durchaus sinnvoll erscheinen. Als Folge der Gruppenbildung kann eine gegebene Windrichtung jetzt aber nur noch in ganzzahlige Vielfache des Segmentwinkels aufgelöst werden. Tabelle 2 gibt in der Spalte 6 den Kreisbogen an, der von einem Segment überstrichen wird. Dieser Winkel stellt die maximal mögliche Auflösung eines gegebenen Windwinkels dar.

Eine gröbere Auflösung der Windrichtung führt nun direkt zu einem signifikanten Mehrverbrauch an Spurengas. Dies liegt daran, daß bei einer geringen Änderung der Windrichtung über den Rand der aktuellen Stellung hinaus immer eine ganze Gruppe Auslässe hinzugeschaltet werden muß. Ebenso kann eine nur teilweise vom Wind überstrichene Gruppe erst dann abgeschaltet werden, wenn der Wind den Bereich ihres letzten Auslasses verlassen hat.

Ein Mehrverbrauch an Spurengas bedeutet höhere Betriebskosten. Diese Mehrkosten können, bei der üblichen Dauer von Begasungsexperimenten, eventuelle Einsparungen bei der Anschaffung der Anlage leicht überholen (KIMBALL 1992). Dies gilt in besonderem Maße für die kostspieligen Gase, wie z.B. Ozon oder das "Massengas" unter den Spurengasen Kohlendioxid¹⁸). Darüber hinaus verstärkt eine jede zusätzliche Ausbringung von Gas die Größe der Abluftfahne und bringt damit eine stärkere "schädliche" Beeinflussung von benachbarten Vergleichsflächen mit sich.

Konventionelle Feldbegasungssysteme sind mit einer weittragenden Abgasfahne umgeben, weil das luvseitig eingebrachte Gas nahezu vollständig auf der Leeseite des Systems ausgetragen wird (*single-pass*-Luftführung). Benachbarte Untersuchungsflächen - vor allem Vergleichsflächen ohne Begasung - werden dadurch störend beeinflusst, wenn sie nicht in genügendem Abstand liegen. Ein großer Abstand zwischen einer begasten Fläche und ihrer zugeordneten Vergleichsfläche ist aber, falls er aus Raumgründen überhaupt möglich ist, wiederum nachteilig, da vergleichbare Untersuchungsflächen die gleichen abiotischen Faktoren (Kleinklima, Bodenart, Grundwasserverhältnisse) erfahren und daher naturgemäß dicht beieinander liegen müssen.

Die Gasauslässe sollten daher bei Expositionen mit kostspieligen Spurengasen (Ozon) oder hohem Gasbedarf (Kohlendioxid) aus ökonomischen Gründen einzeln geschaltet werden. Ein sparsamer Umgang mit dem eingesetzten Spurengas mindert die schädliche Beeinflussung von Vergleichsflächen. Auch aus diesem Grund sollten die VVP individuell steuerbar sein.

Sind bei einem *Plume*-System alle luvseitigen VVP geöffnet, dann ist die Gaskonzentration über der Beobachtungsfläche im Randbereich deutlich höher als in der Feldmitte (HILEMAN *et al.* 1992). Dies liegt daran, daß ein Windflächenelement im Randbereich mehr Gasauslässe umschließt, als dies in der Feldmitte der Fall ist. Betrachtet man den Begasungsring in Windrichtung (Seitenansicht), so erscheinen die VVPs zum Rande hin enger stehend. Die pro

¹⁸ Ein FACE-Ring (Maricopa, 23 m) verbraucht täglich etwa 1,2 Tonnen Kohlendioxid. Der hohe Verbrauch hat dazu geführt, daß man Feldbegasungsanlagen neben Chemische Fabriken (mit CO₂ als Abgas) oder natürlichen geologischen Kohlendioxidlagerstätten errichtet hat.

Flächeneinheit ausgebrachte Gasmenge steigt daher von der Mitte ausgehend zum Rande hin an. Abb. 29 verdeutlicht diesen Effekt. Die luvseitigen VVPs sind äquidistant geöffnet.

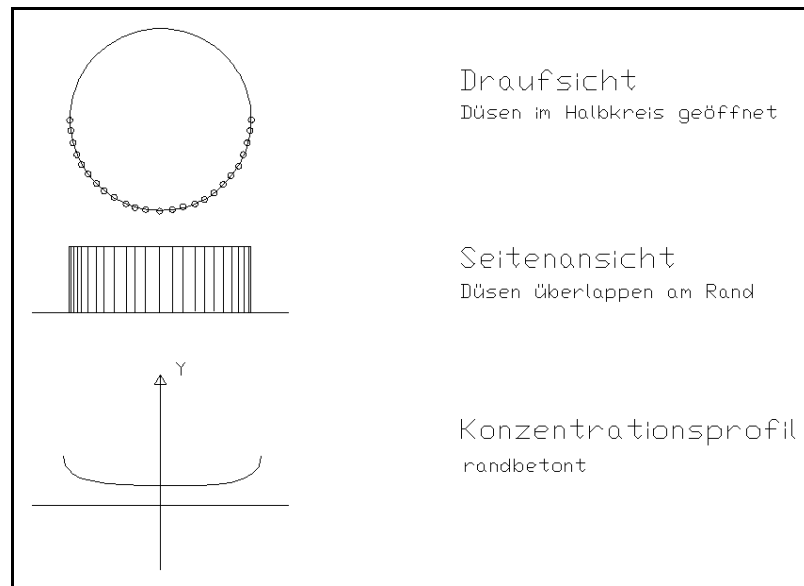


Abb. 29: Einfluß einer äquidistanten VVP-Anordnung auf das Konzentrationsprofil

Zur Vermeidung dieses horizontalen Konzentrationsgradienten müssen im Randbereich des Expositionsrings einige der VVPs geschlossen bleiben (*feathering*, "Rupfen"). Die Abfolge der ein- bzw. ausgeschalteten Röhren muß so ausgewählt sein, daß die ausgebrachte Gasmenge gleichförmig über den Querschnitt verteilt ist. Eine linearisierte Anordnung zeigt Abb. 30 in schematischer Darstellung.

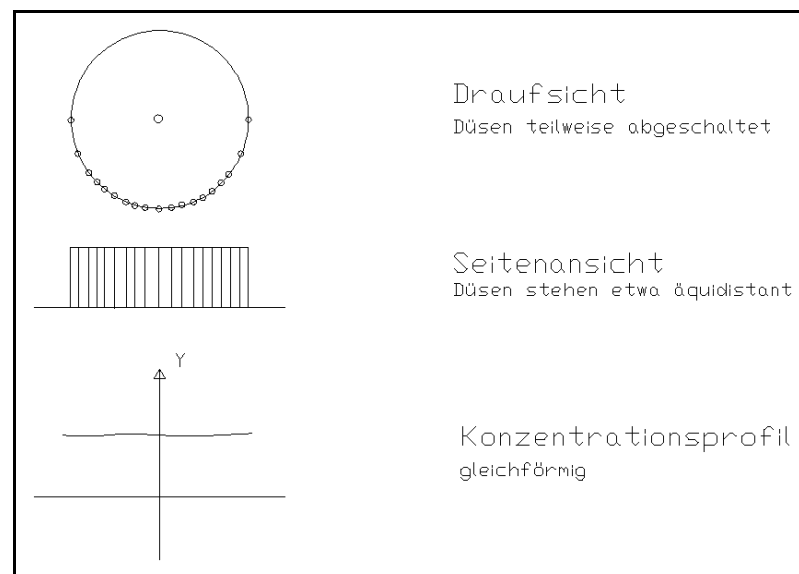


Abb. 30: Einfluß einer linearisierten VVP-Anordnung auf das Konzentrationsprofil

Von den beschriebenen Anlagen kann nur das FACE-System diesen Vorteil nutzen (LEWIN *et al.* 1994, HENDREY *et al.* 1999; Abb. 31). Alle anderen Anlagen haben mehr oder minder stark ausgeprägte Konzentrationsüberhöhungen in den Randzonen der beaufschlagten Fläche.

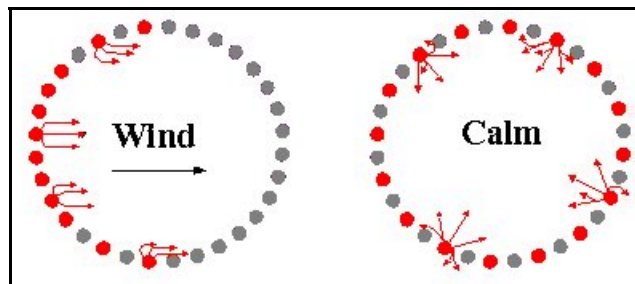


Abb. 31: CO₂-Freisetzungregime des BNL-FACE in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (nach: <http://www.lter.umn.edu/biocon/technology.htm>)

Neben den bereits dargelegten Vorteilen einer Gassparnis gibt die individuelle Steuerbarkeit der VVPs zusätzlich die Möglichkeit, das entstehende Konzentrationsprofil zu entzerren und dadurch die horizontale Spurengasverteilung zu verbessern.

3.4.2. Regler

3.4.2.1. Allgemeines

Die Prinzipien der Regelung sind weit verbreitet. So wird beispielsweise im biologischen Bereich die Körpertemperatur von Warmblütern ständig durch messende und regulierende Organe in engen Grenzen gehalten. Eine Schwankung der Körpertemperatur um ein halbes Grad ist beim Menschen im allgemeinen ein Krankheitszeichen.

Auch im sozialen Bereich werden bedeutungsvolle Regelungsvorgänge sichtbar. Als Beispiel aus der Populationsökologie können die Vorgänge genannt werden, die zum Jäger/Beute-Gleichgewicht im Zusammenleben verschiedener Lebewesen führen (LOTKA-, VOLTERRA-Beziehungen). Regelungsvorgänge sind aber nicht allein auf biologische oder soziale Vorgänge beschränkt.

Während die Regelungstheorie in der Biologie beschreibenden Charakter hat, dient sie in der Technik der Produktion. Der Biologe versucht, die im Organismus stattfindenden Vorgänge durch Modelle zu simulieren und zu erklären. Der Ingenieur dagegen ist bestrebt, Maschinen zu bauen, deren Funktionen durch die Regelungstechnik gegen Störeinflüsse in vorgegebenen Grenzen gewährleistet bleiben sollen. Die erste vollständige Theorie des Regelkreises gelang MAXWELL (1868) und WYSCHNEGRADSKI (1877).

Das Wesentliche einer Regelung besteht in einer Rückkopplung, die dazu dient, die zu regelnde Größe von Störeinflüssen unabhängig zu machen, so daß sie stets einen vorgegebenen Wert beibehält. Im vorliegenden Fall ist die zu regelnde Größe eine Gaskonzentration. In einer

Begasungsanlage im Freiland muß die Menge des zugesetzten Spurengases laufend geändert werden, um die gewünschte Konzentration aufrecht zu halten gegen die sich beständig ändernden äußeren (meteorologischen) Einflüsse. Wechselnde Windverhältnisse und die Thermik durch unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung entziehen dem System laufend nicht kalkulierbare Mengen des eingebrachten Gases.

3.4.2.2. Struktur

Die unregelmäßigen Systeme (z.B. WILBOURN *et al.* 1995) waren zur Begasung nicht geeignet, was durch bloße Anschauung klar wird: Das Gas wurde in einem unregelmäßigen Strom an die Umgebung abgegeben. Alle diese Systeme zeigten große Schwankungen im zeitlichen Verlauf der Konzentration und inhomogene Verteilung über dem Versuchsgebiet:

"..., wind speed and direction dictate the actual exposure patterns received by any plot." (RUNECKLES *et al.* 1990)

Unregelmäßige Anlagen sind nicht Stand der Technik, und verwertbare Erfahrungen für eine Geräteentwicklung waren aus den recherchierten Berichten in nennenswertem Umfang nicht gewinnbar. Aus diesem Grund sind die entsprechenden Anordnungen hier nicht wiedergegeben worden.

Aber auch bei den Anlagen mit reichlicher Rechnerausstattung entsprechen viele Ansätze nicht dem "*state of the art*". Oft gab es nur automatische Abschaltvorrichtungen, die die Gaszufuhr unterbrachen, wenn kritische Konzentrationsschwellen überschritten wurden (z.B. DECORMIS *et al.* 1975). Diese sogenannte Zweipunktreglung (*bang-bang control*) ist für ein Expositionssystem völlig ungeeignet. Zweipunktreger erzeugen bauartbedingt starke, sägezahnförmige Schwankungen um einen Mittelwert. Die damit einhergehenden periodischen Hochkonzentrationen können, vor allem bei der Anwendung von phytotoxischen Spurengasen, das zu beobachtende Pflanzenmaterial irreversibel schädigen und die Ergebnisse in Frage stellen.

Generell finden die verwendeten Reglerstrukturen und Reglerparameter in der recherchierten Literatur nur spärliche Erwähnung. In den sonst sehr detaillierten technischen Beschreibungen der entwickelten Systeme, erschöpfen sich die Angaben zur Regelung in wenigen markigen Kernsätzen:

"After each period of observing [...] concentration a decision on release rate was made and needle valves were automatically adjusted if concentration differed." (GREENWOOD *et al.* 1982)

"The SO₂ concentration was [...] regulated in relation to the measured windspeed, combined with feedback control on measured SO₂ concentration." (KROPFF *et al.* 1989)

"The pollutant concentration ... is monitored and the gas supply rate controlled to maintain a desired targeted concentration." (MCLEOD *et al.* 1992)

CO₂ concentration is fed into the computer. This allows the computer to regulate the CO₂ release through the inner array. [...] The program will appropriately consider the wind speed and direction." (REECE *et al.* 1995)

Manche Autoren verwenden kein einziges Wort auf die angewendeten Reglerstrukturen (WULFF *et al.* 1992).

Selbst bei den sehr seltenen konkreteren Angaben zum Regler, ist es offensichtlich, daß eine kunstgerechte Anwendung der Regelungstechnik nicht stattgefunden hat. Ein deutliches Beispiel ist die Arbeit von MCLEOD *et al.* (1985). Dort heißt es:

"... the observed SO₂ concentration was compared with the hourly target for that plot and adjustment made to the SO₂ injection rate. ... The adjustment to the SO₂ injection rate may be represented as follows:

$$F = F + (T - O) \cdot \frac{F}{O}$$

where F = injection rate, T = target concentration, O = observed concentration"

"This adjustment assumes a **linear relationship** between the rate of SO₂ injection and the observed SO₂ concentration."

Durch algebraische Umformung offenbart sich die Banalität des verwendeten Algorithmus. Er reduziert sich auf

$$F_{\text{neu}} = F_{\text{alt}} \cdot \frac{T}{O}$$

Weil O/T (*observed / target*) der relative Istwert I_{rel} ist, folgt weiter:

$$F_{\text{neu}} = \frac{F_{\text{alt}}}{I_{\text{rel}}}$$

Aus dieser Schreibweise ist nun erkennbar, wie sich bei jedem Reglerschritt das neue Stellsignal aus dem vorhergehendem Stellsignal berechnet. Dies ist nicht, wie vom Autor angegeben, ein *linear relationship* (P-Regler) sondern eine I-Struktur. Zudem enthält der Algorithmus zwei "gefährliche" Fehler: Erstens kann die Begasung nach dem Einschalten nicht ohne weiteres anlaufen, weil aus dem Startwert $F_{\text{alt}} = 0$ dauerhaft das Stellsignal $F_{\text{neu}} = 0$ errechnet wird, und zweitens, wird der Rechner im Betrieb bei jedem (durchaus realistischen) Meßergebnis von Null, durch die unerlaubte Rechenoperation "Division durch Null" unvorhersehbare Ergebnisse produziert.

Einen sehr ähnlichen Ansatz machten auch COLLS *et al.* (1991) sechs Jahre später mit ihrem in Abb. 32 wiedergegebenen Regelungsprogramm. Auch dieser Algorithmus ist nicht selbstanlaufend und führt ebenfalls zu Rechenfehlern bei Messwerten (*last_measured_conc*) von Null.

Aus den oben angegebenen Formulierungen ist erkennbar, daß empirische Lösungen angewendet wurden, die in ihrer Wirksamkeit wahrscheinlich deutlich neben dem erreichbaren Optimum lagen. Gerade bei Feldbegasungssystemen sind an die Regelung besonders hohe Anforderungen zu stellen, denn die auftretenden wichtigsten Störgrößen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, ändern sich im Betrieb sprunghaft über weite Bereiche. Ein leistungsfähiger Regler mit der geeigneten Struktur und einer auf die spezielle Anlage abgestimmten Einstellung (Parametrierung) ist ein unverzichtbarer Baustein einer optimalen Begasungsanlage.

```

General equation:
new flow = flow · {[(corr - 1) · f ] + 1}

1st correction, every 20 min:
corr = (target_conc + ambient_conc) /
      last_measured_conc
IF corr < 1 THEN f = 0,67 ELSE f = 0,33

2nd correction, every 5 min:
corr = 5_min_mean / 30_min_mean (wind speed)

3rd correction, every 20 min:
flow = flow · 2 (2 lines open)
flow = flow · ½ (1 line open)

```

Abb. 32: Regelalgorithmus von COLLS *et al.* (1991)

3.4.2.3. Abtastzeit

Bei der Einteilung der Regler bezüglich ihrer Arbeitsweise unterscheidet man zwei Grundprinzipien, die analoge (A) und die digitale (D) Arbeitsweise.

Bei den analogen Reglern handelt es sich um elektronische Schaltkreise, bei denen durch geeignete Beschaltung von Operationsverstärkern mit Widerständen und Kondensatoren die gewünschte Übertragungsfunktion realisiert wird. Die digitalen Regler dagegen bestehen aus einem numerischen Rechner (*Computer*), der die Übertragungsfunktion als mathematischen Algorithmus abarbeitet. Diese Regler besitzen zusätzliche elektronische Baugruppen, sogenannte Wandler, welche die elektrischen Eingangssignale in numerische Information (A/D-Wandler) übersetzen bzw. das Rechenergebnis in ein äquivalentes elektrisches Signal umformen. (D/A-Wandler).

Während die analogen Regler vergleichsweise schnell (*real time*) arbeiten, benötigen die digitalen Regler eine bestimmte Rechenzeit. Digitale Rechner müssen zuerst die anstehenden elektrischen Signale digitalisieren. In einem zweiten Schritt müssen sie diese Werte dann nach einem Algorithmus verrechnen und schließlich das Ergebnis über einen Digital/Analog-Wandler ausgeben. Digitale Regler können ihr Ausgangssignal also immer erst nach einer bestimmten Zeit erneuern. Aus diesem Grund werden sie auch Abtastregler genannt und ihre Rechenzeit mit Abtastzeit bezeichnet.

Solange im digitalen Regler Rechenoperationen ablaufen, kann er keine neuen Eingangsinformationen verarbeiten. Alle Veränderungen der Eingangssignale, die innerhalb

eines Abtastschrittes liegen, können also vom Regler nicht wahrgenommen werden. Diese Eigenschaft ist ein grundsätzlicher Nachteil der Abtastregler gegenüber den analogen Reglern.

Durch die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit von heute üblichen Kleinrechnern liegt die erreichbare Abtastzeit im Bereich von nur wenigen Millisekunden, d.h. für die Regelung einer Begasung ist sie weit mehr als ausreichend. In der Tat wurde die Regelung der Spurengaskonzentration bei allen beschriebenen Begasungsanlagen nicht mit herkömmlichen, kontinuierlichen Reglern, sondern mit einem *Computer* realisiert.

Für eine Begasungsanlage kann sich die digitale Regelung auch schon aus Kostengründen anbieten, weil die Regelung der Konzentration zusammen mit der Steuerung der Gasauslässe in einem gemeinsamen *Computer* stattfinden kann. Die Leistungsfähigkeit von Rechnern, auch von älteren, ist auch für diese zwei - quasi gleichzeitigen - Aufgaben, sicher ausreichend.

Obwohl eine schnelle, verzögerungsfreie Abarbeitung eines Regelalgorithmus also auch auf älteren Rechnern hätte verwirklicht werden können, finden sich bei dem Vergleich der veröffentlichten, tatsächlich realisierten Abtastzeiten erstaunlich lange Rechenintervalle (Tab.3).

Tab. 3: Abtastzeiten verschiedener Regler

Autor		Abtastzeit
WULFF <i>et al.</i>	(1992)	10 s
KROPFF <i>et al.</i>	(1989)	6 min
LEADLEY <i>et al.</i>	(1997)	10 min
RUNECKLES <i>et al.</i>	(1990)	15 min
COLLS <i>et al.</i>	(1991)	20 min
MCLEOD <i>et al.</i>	(1985)	20 min
MCLEOD <i>et al.</i>	(1992)	30 min

Es ist an keiner der zitierten Literaturstellen erläutert und bleibt völlig unverständlich, warum in den beschriebenen Anlagen die Abtastzeiten der Regler durch Warteschleifen in den Bereich von vielen Minuten verlängert wurden. Ein Regler wird durch diese unglücklich gewählte Abtastrate selber zu einem Totzeitglied in seinem Regelkreis.

Als Grundforderung an einen digitalen Regler muß gelten, daß seine Abtastzeit wesentlich kleiner als die Zeitkonstante des Prozesses ist. Nur wenn die Abtastzeit klein genug ist, wirkt der digitale Regler nach außen wie ein analoger Regler ohne Totzeit.

3.4.3. Spurengasdosierung

Das elektrische Dosierventil der Spurengasversorgung ist der Ort, an dem der Regler mit seinem Stellsignal zur Aufrechterhaltung der Zielkonzentration eingreift. In diesem als Stellglied (SG) bezeichneten Teil des Regelkreises findet die Umwandlung des elektrischen

Stellsignals in einen Massenstrom statt. Im idealen Fall sollte das SG ohne zeitliche Verzögerung in der Lage sein, einen dem anliegenden Signal proportionalen Stoffstrom einzustellen.

Die vom idealen Verhalten abweichenden Eigenschaften eines realen Stellgliedes gehen in die Gesamtcharakteristik der Strecke ein. Als störende Eigenschaften gelten vor allem:

- nichtlineares Verhalten
- begrenzter Verstellbereich
- Trägheit, langsamer Lauf

Diese Eigenschaften sind von unterschiedlichem Einfluß auf die Regelgüte. Am geringsten wirkt eine Nichtlinearität. Diese kann in vielen Fällen vom Regler ausgeglichen werden. Erheblich schwerwiegender wird der Einfluß eines zu engen Stellbereichs sein. Eine durch das Stellventil limitierte Gasversorgung wird die Konzentration bei extrem windigen Wetterlagen zusammenbrechen lassen. Den stärksten Einfluß hat jedoch eine eventuelle Trägheit des Stellgliedes. Diese Ansprechzeiten wirken als Totzeiten im Regelkreis, und Totzeiten können von einem Regler nicht ausgeglichen werden. Sie verschlechtern die Regelbarkeit unweigerlich.

Ein langsames Stellgerät wird aber nicht nur die Regelgüte eines Kreises verschlechtern, sondern auch die im vorigen Kapitel beschriebene Störgrößenaufschaltung unwirksam machen, weil auch hier durch Trägheit des SG eine schnelle, wirksame Reaktion auf plötzliche Veränderungen verhindert wird.

Bei den vorgestellten Begasungsanlagen wurden in der Regel elektrische Feindosierventile (MFC, *mass flow controller*) verwendet. Dies sind Nadelventile, die von einem Elektromotor über ein Getriebe verstellt werden (z.B. bei MIGLIETTA *et al.* 1997).

Diese MFC haben im Allgemeinen eine gute Linearität (HENDREY *et al.* 1999). Ihr Nachteil ist aber die meist sehr niedrige Verstellgeschwindigkeit. Die Laufzeit eines solchen Ventils aus der ZU-Position in die AUF-Stellung kann, je nach Bauart, einige Minuten dauern. Die MFC sind zudem sehr teuer und haben nur eine begrenzte Dynamik (Stellbereich). Als weiterer Nachteil ist die Störanfälligkeit und der damit verbundene hohe Wartungsaufwand zu nennen.

Um die Regelbarkeit einer Plume-Anlage zu verbessern, müssen an die verwendeten Stellgeräte zwei Forderungen gestellt werden:

- kurze Reaktionszeiten, hohe Verstellgeschwindigkeit
- weiter Verstellbereich, große Dynamik.

3.4.4. Konzentrationsmeßgerät

3.4.4.1. Allgemeines

Konzentrationsmeßgeräte für Spurengase sind kostspielige und empfindliche Geräte. Zu ihrem Schutz vor Witterungseinflüssen wurden sie bei den recherchierten Anlagen im allgemeinen in

zentralen Gebäuden (Büro- oder Meßcontainer) untergebracht. Lange Meßgasleitungen führten zu den Probenahmepunkten. Weiterhin wurde in allen Fällen nur ein einziges, zentrales Meßgerät zur Messung von allen Einzelanlagen (*replicates*) einer Gesamtinstallation eingesetzt. Dabei wurden die Gasleitungen zu den individuellen Ringen mit einem Meßstellenwechsler zyklisch auf dieses eine Meßgerät aufgeschaltet. Aus regelungstechnischer Sicht ist diese Vorgehensweise aber nicht die optimale Lösung.

3.4.4.2. Meßgasleitungen

Lange Ansaugleitungen zu der Probenahmestelle sind die unmittelbare Konsequenz einer zentralen (entfernten) Aufstellung des Konzentrationsmeßgerätes. Ansaugleitungen haben aber eine Reihe von nachteiligen Eigenschaften und ihr "schädlicher" Effekt auf das Meßergebnis wird mit wachsender Leitungslänge immer gravierender. So stellt die Möglichkeit der Kondensation von Wasser in einer langen Meßgasleitung eine potentielle Gefährdung für das Meßgerät dar und macht Schutzmaßnahmen wie eine Begleitheizung oder entsprechende Wasserabscheider notwendig.

Weiterhin beeinflussen Absorptions- und Desorptionseffekte sowie evtl. auch chemische Reaktionen an den Wandungen einer langen Meßgasleitung die Konzentration des Spurengases am Leitungsende. Ein weiterer Nachteil langer Leitungen ist die Rückvermischung der Gase während des Transportes durch die Meßgasleitung¹⁹. Durch diese Rückvermischung werden schnelle Konzentrationsänderungen zu sich langsam ändernden Meßwerten "verschleift".

Ganz besonders nachteilig für die erreichbare Regelgüte der Spurengaskonzentration sind die Transportzeiten in der Meßgasleitung. Diese Zeiten werden durch den Querschnitt und die Länge der Ansaugleitung bestimmt sowie durch das Volumen eventueller Wasserabscheider und Filter noch zusätzlich verlängert. Für die Verzögerung durch die Probenahmeleitung muß je nach Entfernung überschlagsmäßig mit Zeiten in der Größenordnung von mehreren Minuten gerechnet werden.

Als Beispiel sei die Anlage von MCLEOD (1995) im Liphook Forest, England, betrachtet: Hier saugt eine Meßgaspumpe mit einer Leistung von $q = 0,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ die Probe durch eine Meßgasleitung mit $d = 8 \text{ mm}$ Durchmesser. Die Entfernung von Ring Nr.8 zu dem zentral gelegenen Laborgebäude beträgt gut 200 m Luftlinie. Daraus ergibt sich eine rechnerische Transportzeit von mindestens 30 s. Diese vereinfachte Überschlagsrechnung berücksichtigt dabei nicht die zusätzlichen Volumina durch die Wasserabscheider und Filter in der Ansaugleitung. Ebenso vernachlässigt ist der Leistungsabfall der Pumpe unter der Strömungslast von Leitung und Ansaugfiltern. Eine realistische Abschätzung aus der Praxis ist eine Laufzeit von über drei Minuten pro 100 Meter Gasweg.

¹⁹ Die Meßgasleitung wirkt wie ein Rohrreaktor (*terminus technicus*).

Diese Stofftransportzeiten werden in der Regelungstechnik Totzeiten genannt. Sie sind durch keine wie auch immer geartete Maßnahme auszugleichen und führen direkt zu einer deutlich verschlechterten Regelgüte in der Begasungsanlage.

Durch die geeignete Anordnung eines Gasmeßgerätes kann die Regelbarkeit der Strecke signifikant verbessert werden. Das Hauptkriterium für die gute Position des Gasmeßgerätes ist eine Ansaugweglänge, die so kurz wie irgend möglich sein muß. Die Zu- und Ableitungen für Kalibriergas, elektrische Energie und Daten lassen sich, im Gegensatz zur Meßgasleitung, ohne störende Zeiteffekte nahezu beliebig verlängern. Aus dieser Sicht ist der optimale Platz für das Gasmeßgerät direkt an der Probenahmestelle ²⁰⁾.

3.4.4.3. Zeitmultiplex

Meßgeräte für Spurengase sind in der Regel mit die kostspieligsten Komponenten einer Begasungsanlage. Diese Tatsache wird in den meisten Fällen der Grund dafür gewesen sein, daß in einem System von mehreren Begasungsanlagen nur ein einziges Konzentrationsmeßgerät für die Messung an allen Teilanlagen eingesetzt wurde (Multiplex).

Um mit einem Konzentrationsmeßgerät mehrere Meßstellen beproben zu können, müssen Probenwechsler (Multiplexer) eingesetzt werden. Diese Geräte schalten das Meßgerät zyklisch auf die einzelnen Meßstellen auf. Nach jedem Wechsel einer Meßgasleitung muß der erste Teil des einlaufenden Gasstromes verworfen werden, denn der beim Umschalten auftretende Konzentrationssprung macht eine Einschwingzeit (Vorspülzeit) für das Meßgerät nötig. Um diese Vorspülzeit zu verkürzen, sind die meisten Wechsler mit einer zusätzlichen Pumpe ausgestattet, welche die jeweils nächste zu messende Leitungen ansaugt (vorspült).

Trotz der Möglichkeit Kosten zu sparen, ist der zeitliche Multiplex von einem Konzentrationsmeßgerät unter mehreren unabhängigen Regelkreisen keine geeignete Lösung. Der entscheidende Nachteil einer solchen Konstellation ist nämlich die Tatsache, daß während der Messung an einem Ring, die verbleibenden Begasungsanlagen nicht "unter Kontrolle" sind. Besteht eine Anlagengruppe beispielsweise aus vier Teilanlagen, mit zusätzlich zwei weiteren Ansaugleitungen für Kalibrationsgase, dann müssen in jedem Durchlauf des Meßstellenwechslers sechs Leitungen abgeprüft werden. Nimmt man nun für jeden Meßpunkt eine typische Vorspülzeit von drei Minuten (oder mehr) und eine Meßzeit von vier Minuten (oder mehr), dann würde ein vollständiger Umlauf etwa eine Stunde dauern. Das bedeutet, daß von jedem Ring nur ein Meßwert pro Stunde zur Verfügung steht.

Allgemein ausgedrückt ist jeder individuelle Ring einer n-fachen Installation für $w = 100 \cdot (n-1)/n$ Prozent der Zeit nicht unter Kontrolle! Mit steigendem Wert für "n" nähert sich der Term " $(n-1)/n$ " dem Wert 1, was bedeutet, daß die individuellen Ringe fast 100 % der Zeit, also praktisch nicht mehr unter Kontrolle sind. Es ist offensichtlich, daß ein Regler in

²⁰⁾ Dies ist in den allermeisten Fällen die Mitte der Begasungsfläche.

einer solchen Konstellation nicht adäquat auf die sich innerhalb einer Stunde möglicherweise mehrfach ändernden Spurengaskonzentrationen reagieren kann.

Um eine zeitnahe schnelle Reaktion des Reglers zu ermöglichen, muß dieser in möglichst enger Folge mit Meßergebnissen versorgt werden. Dies gelingt nur, wenn jeder Ring ein eigenes Gasmessgerät hat. Durch den Wegfall eines Probenwechslers entfällt zusätzlich auch die Notwendigkeit einer Spülung (Voransaugzeit) der Meßgasleitung. Mit anderen Worten: Nur wenn jeder Ring einer Installation sein eigenes Konzentrationsmeßgerät hat, dann kann der Regler über einen quasi-kontinuierlichen Ist-Zustand der Gaskonzentration verfügen.

4. Theoretisches Konzept

4.1. Entwicklungsziele

Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurde, haben die bekannten Freiland-Expositionssysteme eine Reihe von offensichtlichen Mängeln. Um die oben beschriebenen Anlagen zu verbessern, wären zunächst zwei Hauptforderungen zu erfüllen:

An erster Stelle steht die Forderung nach einem isotropen *plenum*. Die beschriebenen Anlagen saugen ihre Hilfsluft an einem fixen Punkt. Dieser Punkt liegt je nach Windrichtung, mal im Luv und mal im Lee der betreffenden Anlage. Es wurde bereits dargelegt, wie sich dadurch ständig die Grundkonzentration der angesaugten Luft ändert (vgl. Abb. 27, Abb. 28 in Kap. 3.4.1.1). Ein ideales *plenum* darf seine regelungstechnische Charakteristik nicht ständig ändern und die inneren Luftwiderstände, die Mischstrecken u.s.w. müssen möglichst konstant bleiben, denn nur bei einem wirklich isotropen (symmetrischen) Aufbau kann sich die Konzentrationsregelung auf die eigentliche Aufgabe "konzentrieren". Die Vorteile davon sind eine bessere räumliche und zeitliche Konzentrationsverteilung und ein geringerer Verbrauch von Spurengas.

Die zweite bedeutende Schwäche der beschriebenen Expositionsanlagen ist ihre teilweise sehr laienhafte Konzentrationsregelung. Die Regelung einer Spurengaskonzentration über freiem Feld zählt naturgemäß zu den anspruchsvolleren Aufgaben der Regelungstechnik. Eine Begasungsanlage kann nur dann leistungsfähig sein, wenn die angewendete Regelung dem Stand der Technik entspricht. Vor allen Dingen dürfen nicht Totzeiten absichtlich in den Regelkreis eingebaut werden, wie dies bei zahlreichen Anlagen der Fall war (vgl. Tab. 3). Beträchtliche Totzeiten entstanden bei den vorgestellten Anlagen weiterhin durch unzumutbar lange Ansaugleitungen und das zyklische Messen von mehreren Anlagen mit nur einem Monitor. Auch bei der Auswahl des Dosierventils für das Spurengas haben viele Autoren nicht genügend auf eine möglichst kleine Totzeit geachtet.

Mit der isotropen Regelstrecke (*plenum*) und einem optimalen Regler sind die wichtigsten Entwicklungsziele genannt. Zusätzlich müssen aber weitere Aspekte bei der Entwicklung einer "besseren" Begasungsanlage berücksichtigt werden.

Eine Begasungsanlage soll in der Regel nur während bestimmter Tageszeiten arbeiten. Eine entsprechende Schaltuhr darf über Monate und Jahre, auch bei eventuellem Stromausfall, keine Gangabweichung zeigen. Im vorliegenden Fall (Kohlendioxid) ist eine Begasung nur zu Tageslichtzeiten sinnvoll, d.h. die Schaltzeitpunkte müssen sich den gleitenden Auf- und Untergangszeiten der Sonne anpassen. Eine moderne Begasungsanlage muß also über eine Funkuhr verfügen, die die Auf- und Untergangszeiten der Sonne aus dem Datum berechnen kann.

Bei Begasungsexperimenten muß eine Sollkonzentration in der Regel über mehrere Vegetationsperioden von der verwendeten Anlage eingehalten werden. Betriebsunterbrechnungen für Wartungsarbeiten oder wegen technischer Defekte "schaden" den

Experimenten. Aus diesem Grund muß ein robuster Aufbau den mechanischen Verschleiß weitgehend vermindern und die Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse (Sommer, Winter) erhöhen.

Um eine einfache, kostengünstige Montage und eine effektive Wartung sowie flexible Adaptierbarkeit an unterschiedliche Beobachtungsflächen von 3 bis 30 m Durchmesser zu ermöglichen, muß das zu entwickelnde System modular aufgebaut sein (Baukastensystem). Es müßte über ein Bussystem verfügen, das bei Erfüllung der Anforderung an die individuelle Steuerbarkeit der einzelnen VVP, dennoch den Verkabelungsaufwand gegenüber den herkömmlichen Anlagen minimiert.

Nach Stromunterbrechungen muß das System "selbstanlaufend" sein, d.h. es muß eine nichtflüchtige Pufferung der wichtigen Betriebsparameter (z.B. Kalibrationsdaten) bis zur Stromwiederkehr gewährleisten sein.

4.2. Die Regelstrecke

Bei einem *plume*-System muß die Zuführung von Spurengas immer luvseitig geschehen. Zu diesem Zweck positioniert eine geeignete Steuerung (*upwind control*) die Gasauslässe windabhängig. Das freigesetzte Spurengas legt dadurch unabhängig von der Windrichtung immer die gleiche Wegstrecke über der kreisförmigen Beobachtungsfläche zurück. Die Konzentration klingt auf diesem Weg ab und die Regelung stellt den Spurengasstrom dabei so ein, daß die Gaskonzentration nach der halben Wegstrecke, über dem Mittelpunkt der Anlage, den Sollwert erreicht.

Idealerweise sollte der Konzentrationsregler bei seiner Arbeit die Richtungsänderungen des Windes gar nicht "bemerken", denn jede zusätzliche unkalkulierbare Änderung der Streckencharakteristik verschlechtert die Stabilität der Spurengaskonzentration. Von einer Ausnahme (WULFF *et al.* 1992) abgesehen, wird die Bedeutung eines isotropen *plenum* von allen Autoren unterschätzt. Der primitive Aufbau der Gasführung mit einem einzelnen, seitlichen Ventilator macht hier auch die Windrichtung zu einer sehr intensiven Störgröße.

Auf das Ziel, durch eine hohe Symmetrie im Aufbau der Anlage, ein windrichtungsunabhängiges, isotropes Verhalten der Regelstrecke zu erreichen, wurde in der vorliegenden Arbeit ein besonderes Gewicht gelegt. In dem nachfolgenden Abschnitten wird dargelegt, wie sich das neue isotrope *plenum* (CAP, *circular active plenum*) in logischer Konsequenz aus der herkömmlichen Technologie herleitet und wie es technisch realisiert werden muß.

4.2.1. Ein neues isotropes Plenum

In der Abb. 33 sind in vier Teilbildern (A .. D) die gedanklichen Entwicklungsschritte vom simplen FACE-*plenum* zum neuen isotropen *plenum* skizziert. Das Teilbild A zeigt zunächst noch einmal die klassische Anordnung eines *plenum* vom FACE-Typ. Wie an anderer Stelle bereits erläutert, verläßt das eingesetzte Gas den Ring vollständig auf der Leeseite in einer

Gasfahne mit erhöhter Konzentration (*single-pass*-Luftführung). Steht nun der Wind so, daß der zentrale Ventilator leeseitig ist, dann wird angereicherte Luft angesaugt. Bei entgegengesetzter Windrichtung wird nichtangereicherte Umgebungsluft angesaugt. Dies Verhalten verschlechtert die Regelgüte.

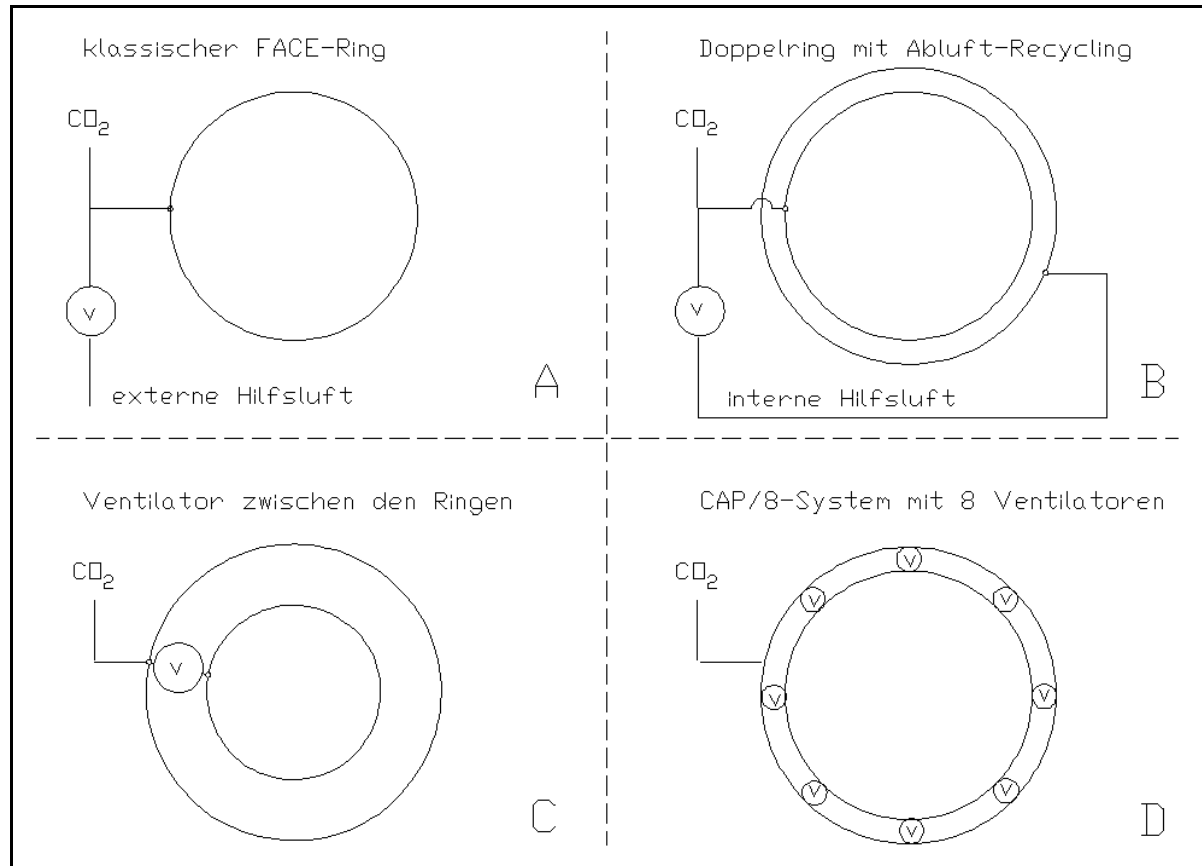


Abb. 33: Entwicklung des CAP-Konzeptes aus einem herkömmlichen FACE-System

Um diese Konzentrationsschwankungen zu vermeiden, soll nun in einem Gedankenexperiment ein weiterer Ring um die Anlage gelegt werden (Teilbild B). Dieser Ring soll an der Saugseite des Ventilators angeschlossen sein und soll steuerbare Ansaugöffnungen tragen. Diese Öffnungen sollen in Analogie zur Steuerung der Luftauslässe mit dem drehenden Wind so geschaltet werden, daß sie stets leeseitig offen sind. Mit dieser Anordnung würde jetzt unter jedem Windwinkel immer angereicherte Luft angesaugt werden. Es könnten keine windrichtungsabhängigen Konzentrationsschwankungen in der Hilfsluft auftreten. Das Teilbild C erweitert das Gedankenexperiment: Zur Vermeidung langer Luftleitungen mit entsprechenden Druckverlusten kann der Ventilator zwischen den beiden Ringleitungen platziert werden.

Mit der Anordnung nach Teilbild C wäre das Konzentrationsproblem nun gelöst: Unabhängig von der jeweiligen Windrichtung hätte die Hilfsluft immer die gleiche Konzentration. Ein

anderer Nachteil der herkömmlichen FACE-Technologie, die variablen Mischstrecken und Transportzeiten, bliebe aber noch bestehen.

Die Lösung zeigt das Teilbild D. Anstelle von einem einzigen Ventilator werden viele kleine Ventilatoren zwischen die beiden Ringleitungen gelegt. Diese Ventilatoren sind parallel geschaltet und haben zusammen die erforderliche Leistung. In dieser Anordnung sind nun auch die Längen der Mischstrecken und die Transportzeiten völlig unabhängig von der Windrichtung. An jeder Stelle des Doppel-Ringes kann nun durch entsprechende Luftklappen sowohl die Über- als auch die Unterdruckseite angezapft werden. Durch das Öffnen von einander gegenüberliegenden Aus- und Einlässen kann die ausgebrachte Gasfahne (*plume*) beliebiger Windrichtung folgen, ohne ungewünschte, anisotrope Effekte auf den Regelkreis auszuüben.

4.2.2. Die praktische Ausführung

Das neue Plenum CAP (*circular active plenum*) besteht also, wie Teilbild D zeigt, aus zwei konzentrischen Lüftungskanälen, welche durch eine Anzahl Ventilatoren verbunden sind. Diese Ventilatoren erzeugen in dem äußeren Ringkanal Unterdruck und im inneren Kanal Überdruck. Werden diese beiden Kanäle mit rechteckigem Querschnitt so ausgeführt, daß sie aneinander liegend eine gemeinsame Trennwand haben, dann können die erforderlichen Einzelventilatoren direkt in diese gemeinsame Trennwand eingebaut werden. Zerteilt man das Kanalsystem nun in Abschnitte, so daß sich in jedem Abschnitt ein Ventilator befindet, dann entstehen baugleiche Module (Segmente) wie die Abb. 34 zeigt.

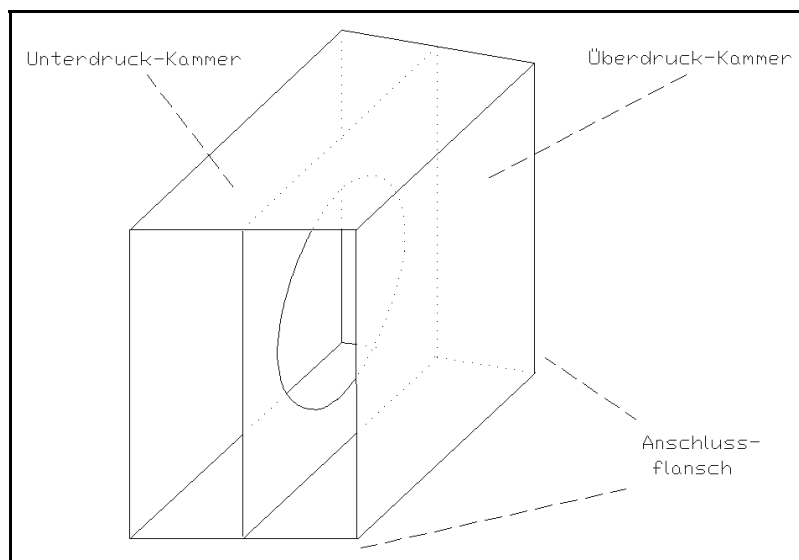


Abb. 34: Einzelnes CAP-Segment
(vereinfachte perspektivische Darstellung)

Um einen Begasungsring aufzubauen, müssen eine dem gewünschten Umfang entsprechende Anzahl Segmente zu einem Kreis verschraubt werden. Durch verkleinern der Flanschwinkel können beliebig viele Segmente zu einem großen Ringsystem zusammengestellt werden. Die Abb. 35 zeigt eine schematische Darstellung eines 6-teiligen Ringes.

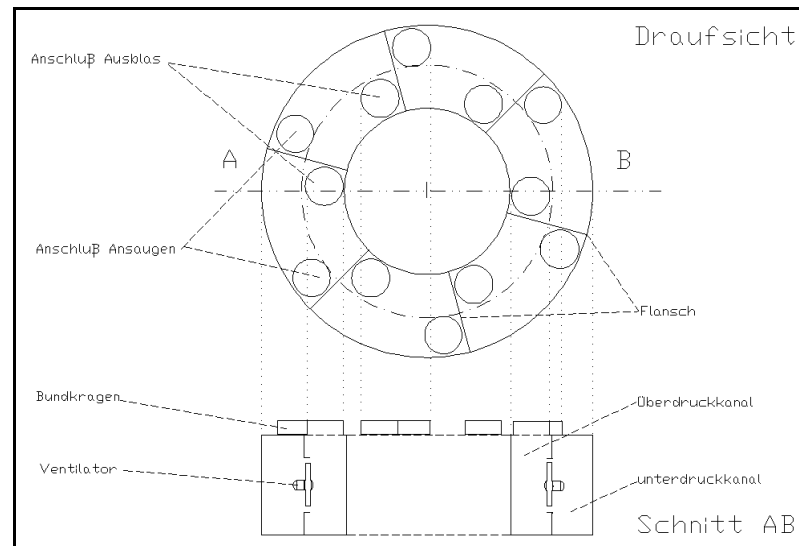


Abb. 35: Ein 6gliedriges *active plenum* (CAP/6)
(techn. Zeichnung)

Dem mit der Ringgröße wachsenden Luftbedarf wird durch die mit der Segmentzahl wachsende Ventilatoranzahl Rechnung getragen. Mit steigendem Umfang steigt die Ventilatorengesamtleistung, weil mehr Ventilatoreinheiten auf dem Umfang untergebracht werden können. Der steigende Krümmungsradius vermindert die Umlenkungsverluste.

Bei kleinen Kanalquerschnitten sind die Motoren der Ventilatoren sicher ein merkliches Hindernis für die Luftströmung. Eine Quantifizierung kann nur an einem Prototyp geschehen. Es ist aber anzunehmen, daß die Störung durch die Ventilatormotoren mit wachsender Systemgröße abnimmt, weil die Motoren gegenüber einem steigenden Kanalquerschnitt immer weniger ins Gewicht fallen.

Durch den symmetrischen Aufbau des Ringes ist die Montage einfach. Jedes Segment ist gleich gebaut und bestückt. Es trägt zwei Luftklappen für jeweils einen Ein- und Auslaß und einen Ventilator auf der Innenwand. Die erforderliche Elektronik (mit *micro controller*) ist zusammen mit den pneumatischen Komponenten auf einer "intelligenten" Ventilinsel montiert. Aufgrund der geringen Abmaße der Insel, kann diese bequem vor Witterungseinflüssen geschützt direkt in dem CAP-System untergebracht werden.

Dieser neue Begasungs-Ring prägt das äußere Bild der Anlage und wurde CAP (*Circular Active Plenum*) genannt. Der Name beschreibt die runde Struktur des zentralen Versorgungskorpus (*circular plenum*) und betont die neue bedeutende Eigenart, daß durch

direkten Einbau von Ventilatoren eine Versorgung mit Hilfsluft durch ein externes Gerät nicht erforderlich ist (*active plenum*).

4.2.3. Luftauslässe

Die Luftauslässe bilden den Übergang zwischen dem Luftverteilsystem (*plenum*) und dem behandelten Raum, der Luftschicht über der Versuchsfläche. Sie haben maßgebenden Einfluß auf die Geometrie der Raumströmung und den Energieaustausch zwischen Zuluft und Raumluft. Grundsätzlich wird bei der Luftführung zwischen Verdünnungslüftung und Verdrängungslüftung unterschieden. Ein Beispiel für die Verdrängungslüftung ist die Luftführung in einer OTC (*open-top chamber*). Verdünnungslüftung findet bei den *plume*-Systemen statt.

Es existiert sehr umfangreiche Literatur, die sich mit dem Problem der Zu- und Abluftkanäle befaßt. Leider beschäftigen sich diese Autoren mit der Klimatisierung von Wohn- und Arbeitsräumen; dadurch sind die Ergebnisse kaum auf die Freilandbedingungen zu übertragen. Exemplarisch sollen hier einige Arbeiten genannt werden: Die Arbeiten von REICHARDT *et al.* (19xx) und WINTER (1955, 1956) befassen sich mit Ausblase- und Absaugekanälen. Mit einem Ausblasekanal beschäftigen sich die Aufsätze von KOESTEL *et al.* (1951) und CAILLE (1956). Absaugekanäle werden in Arbeiten von GREF (1955, 1956) und RAWCLIFFE (1947) behandelt.

Allgemein läßt sich folgendes festhalten: Die Höhe der VVP richtet sich nach der zu überströmenden Fläche. Zur gleichmäßigen Abgabe des Gases auf der Länge hat die VVP in der Regel eine Reihe von Löchern ähnlich einer überdimensionalen Blockflöte. Aus diesen Löchern tritt das vorverdünnte Spurengas aus und vermischt sich mit der Umgebungsluft. Da die homogene Vermischung aber erst nach einer gewissen Strecke eintritt, wird in der Regel der erste Meter hinter den Luftauslässen für botanische Experimente nicht genutzt.

Um diese Strecke möglichst kurz zu halten und den für Experimente nutzbaren Raum so groß wie möglich zu gestalten, beschreiben WALKLATE *et al.* (1997) eine Anordnung, die sie als *enhanced local mixing* (ELM) bezeichnet haben. Die Gasauslässe sind dabei so gedreht, daß der Mischgasstrahl radial nach außen gerichtet ist und nach einer kurzen Strecke auf ein Hindernis (Prallblech) trifft.

Wie bereits dargelegt (Kap. 3.4.1.2), müssen die Luftauslässe einer Begasungsanlage individuell schaltbar sein. Für diesen Zweck sind besondere Klappen im Handel erhältlich. Die Durchmesser reichen von 10 mm bis 50 cm (und mehr). Der Antrieb ist entweder elektrisch oder pneumatisch. Ein elektrischer Antrieb ist aufgrund seines Aufbaues mit Motor und Getriebe empfindlicher als ein pneumatischer Antrieb. Er wird deshalb nur dort eingesetzt, wo keine Druckluft zur Verfügung steht. Für ein Expositionssystem mit Kohlendioxid bietet sich der pneumatische Antrieb an, weil das Spurengas Kohlendioxid als Arbeitsgas eingesetzt werden kann und ein Kompressor für die Druckluft dadurch entfällt.

4.2.4. Schaltmuster

Sind bei einem *Plume*-System vom FACE-Typ alle luvseitigen VVP geöffnet, so ist die Gaskonzentration im Randbereich der Beobachtungsfläche deutlich höher als in der Feldmitte. Warum dies so ist, wurde im Kapitel 3.4.1.2 verdeutlicht. Bei seitlicher Betrachtung (vgl. Abb. 29) umschließt ein Windflächenelement im Randbereich mehr Gasauslässe als in der Feldmitte. Die pro Flächeneinheit ausgebrachte Gasmenge steigt daher von der Mitte ausgehend zum Rande hin an. Zur Vermeidung eines solchen horizontalen Konzentrationsgradienten müssen quer zum Wind immer einige der VVP geschlossen bleiben (*feathering*, LEWIN *et al.* 1994, HENDREY *et al.* 1999).

Für die Entscheidung, welche der VVP im luvseitigen Halbkreis abgeschaltet werden müssen, wurde der nachfolgende Lösungsweg beschritten. Zur Berechnung der VVP-Abstände wird der Begasungsring in der Draufsicht als Einheitskreis (Radius = 1) dargestellt. Der Mittelpunkt liegt im Koordinatenursprung. Der Begasungsring ist so ausgerichtet, daß eine seiner VVP genau luvseitig (auf der x-Achse) liegt. Die luvseitige VVP trägt die Bezeichnung P_0 und die folgenden VVP sind in positivem Drehsinn mit 1 beginnend indiziert (vgl. Abb. 36).

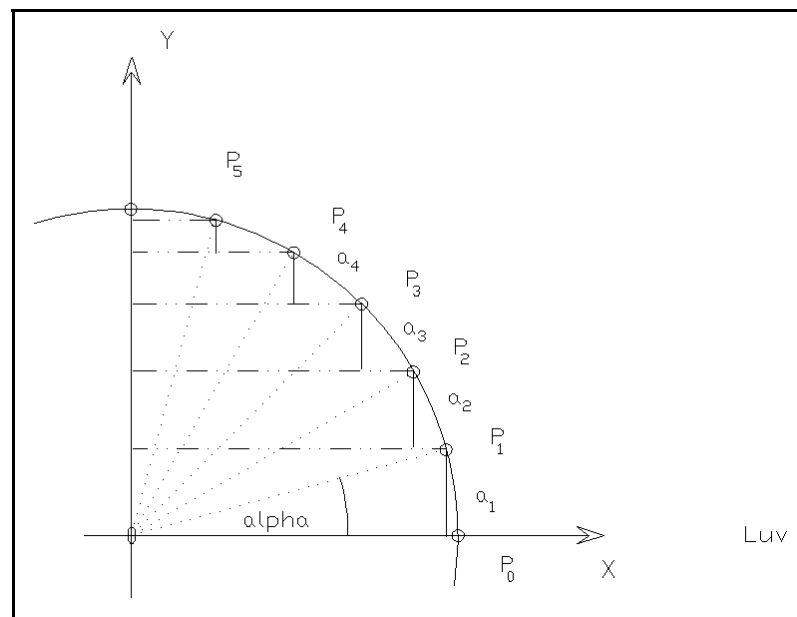


Abb. 36: Berechnung der VVP-Abstände

Die Strecken a_i werden zum Rande hin kürzer. Die Strecke a_1 hat den größten Betrag. Wenn n die Gesamtzahl der VVP im Ring ist, dann gilt für die Länge einer Strecken:

$$a_i = \sin(i \cdot \alpha) - \sin((i-1) \cdot \alpha) \quad \text{mit} \quad \alpha = 2 \cdot \pi \cdot n^{-1}$$

Zur Linearisierung der Abstandsabfolge müssen zum Rande hin einzelne VVP abgeschaltet werden. Zu dieser Entscheidung wird die Strecke a_1 als Referenzstrecke festgehalten und die Abweichungen (die Fehler) der Nachbarstrecken von diesem Wert berechnet.

Für den Punkt P_{n-1} gilt für die Entfernung zu seinem Nachbarpunkt P_n die Strecke a_n . Wird P_n nun abgeschaltet, vergrößert sich die Entfernung zum nächsten Nachbarpunkt (P_{n+1}) auf $a_n + a_{n+1}$. Der Vergleich dieser beiden Entfernungen mit der Referenzstrecke gibt das Abschaltkriterium für den Punkt P_n : Wird der Entfernungsfehler kleiner, so wird P_n deaktiviert. Das Abschalten weiterer Nachbarn wird so lange fortgesetzt, bis ein weiteres Abschalten die Abweichung wieder vergrößert.

Für die Berechnung des Zustandes der luvseitigen VVP wurde ein Programm geschrieben mit dem das optimale Muster für beliebige VVP-Gesamtzahlen berechnet werden kann. Das Programm (EQUIDIST.PAS) ist im Anhang wiedergegeben. Die Lösung ist vom Durchmesser des Expositionsringes unabhängig. Die einzige Eingangsvariable in die Berechnung ist die Gesamtzahl der VVP. Eine Probe-Berechnung für einen 32zähligen FACE-Ring führte zu dem gleichen Ergebnis, wie es HILEMAN *et al.* (1992) oder auch LEWIN *et al.* (1994) für ihre Anlagen angeben. Die Berechnung für einen 24zähligen Ring führte zu dem in Abb. 37 gezeigten VVP-Muster.

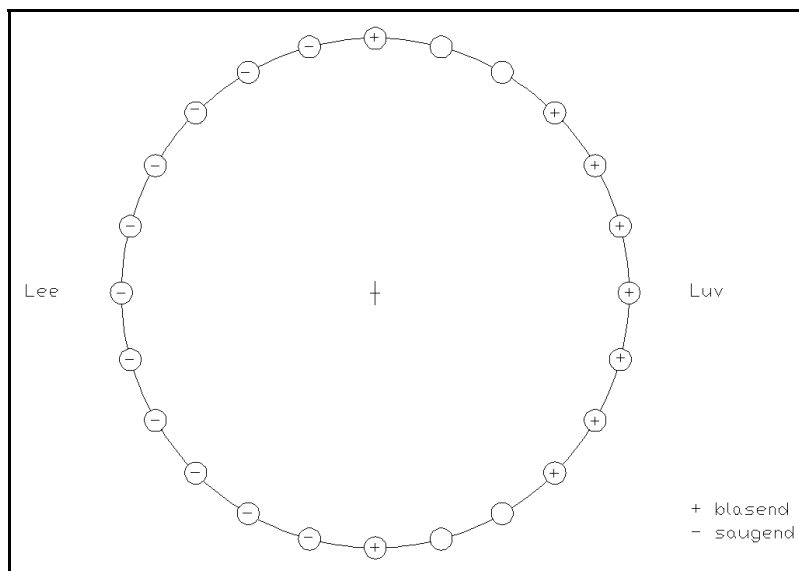


Abb. 37: Für PLUMEX/24 berechnetes VVP-Muster (schematisch)
(Die blasenden Auslässe sind mit (+), die saugenden mit (-) und die geschlossenen mit () markiert.)

Die Wirksamkeit der einzelnen Muster muß aber im Feldversuch bestätigt werden, denn der Durchmesser des Ringes, die Gestaltung der VVP-Düsen und die Art und Geometrie der Bepflanzung sind bei der Ausbildung der wirklichen Strömungsverhältnisse entscheidende Einflußfaktoren, die in der obigen Berechnung nicht berücksichtigt werden können. Unter Umständen kann eine Konzentrationsüberhöhung an beiden Seiten einer Anlage sogar wünschenswert sein, weil dadurch bei schnell drehenden Winden ein seitliches Einbrechen von Frischluft abgeschwächt werden kann.

4.2.5. Die Messung des Windes

Für eine Begasungsanlage ist der Wind naturgemäß von größter Bedeutung. Die beiden physikalischen Haupteigenschaften des Windes, Richtung und Geschwindigkeit, wirken dabei nahezu unabhängig voneinander. Die Windgeschwindigkeit bestimmt den Transport des ausgebrachten Spurengases und beeinflusst zusätzlich die für eine gegebene Sollkonzentration erforderliche Menge an Spurengas. Die Windrichtung bewirkt über die Komponenten der Azimutsteuerung (*upwind control*) eine laufende Neuausrichtung der Luftauslässe, damit das Spurengas immer "vor dem Wind" freigesetzt wird und über die Beobachtungsfläche getragen werden kann.

Weil die Geschwindigkeit des Windes direkten Einfluß auf die Regelung der Spurengaskonzentration hat, muß das Anemometer einer Begasungsanlage höchsten Ansprüchen genügen. Idealerweise sollte nur ein Ultraschallanemometer oder mindestens ein Geräte mit Magnet-Schwebelagerung zum Einsatz kommen. Das entsprechende Signal muß möglichst unverzögert an den Regler geleitet werden.

Für die Richtung des Windes sind die Anforderungen an den Sensor geringer. Durch die relativ begrenzte Anzahl von Luftauslässen auf typischen Begasungsanlagen, ist eine hohe Winkelauflösung nicht erforderlich und durch die natürliche Trägheit der mechanischen Komponenten der *upwind control* ist es sogar nötig, die schnellen Wechsel der Windrichtung sinnvoll an die Zeitkonstanten der Mechanik und Pneumatik anzupassen. Die für den Einsatz geplanten pneumatischen Luftklappen (Fa. TROX) haben eine Zeitkonstante von etwa drei Sekunden und können daher schnellen Wechseln der Windrichtung nicht folgen. Würde man solche Klappen dennoch in schneller Folge schalten, dann würden sie in undefinierten Mittelstellungen, weder auf noch zu, verharren. Weiterhin würden diese schnellen Wechsel, bei denen in rascher Folge Klappen ein- und ausgeschaltet werden, zur unnötigen Freisetzung von Antriebsgas führen. Bei dem hier geplanten Einsatz von Kohlendioxid als Antriebsgas könnte dadurch die Qualität der Regelung negativ beeinflusst werden. Eine Mittelung ist also unverzichtbar.

Zur gleitenden Mittelung von elektrischen Signalen sind in der Praxis Kondensatoren (R/C-Glieder) üblich. Diese verbreitete Art der Mittelung eines elektrischen Signales ist für den Wind aber völlig unbrauchbar. Eine arithmetische Mittelung, wie sie durch solche Komponenten geschieht, führt im Bereich des Nulldurchganges des Schleifers am Ringpotentiometer zu falschen Ergebnissen. Pendelt der Wind beispielsweise mit $\pm 5^\circ$ um Nord, dann ergibt die arithmetische Mittelung von den folgenden zwei willkürlichen Ablesungen, 355° und 005° , das unsinnige Ergebnis 180° (Süd).

Der Wind ist eine vektorielle Größe. Eine Mittelung der Windrichtung darf daher auch nur durch Vektorrechnung geschehen. Der Rechengang einer Vektoraddition wird im Folgenden kurz skizziert, um zu erläutern, welche *software*-Forderungen für die Auswahl eines geeigneten *micro controller* gestellt werden müßten.

Um die beiden analogen elektrischen Signale, Richtung und Geschwindigkeit, digital zu verarbeiten, sind zunächst zwei Digital/Analog-Wandler (ADC, *analog digital converter*) erforderlich. Zur Mittelung müssen dann die gemessenen Polarkoordinaten des Windvektors (u, α) zunächst auf ein kartesisches Koordinatensystem umgerechnet werden:

$$u_x = u \cdot \cos \alpha$$

$$u_y = u \cdot \sin \alpha$$

Die dafür erforderlichen trigonometrischen Funktionen gehören üblicherweise nicht zum Sprachumfang eines *micro controllers*. Sie ließen sich aber durch Tabellen nachbilden. Bei einer Auflösung des Winkels in 256 Schritte (8 bit, 0,5 %) wäre der erforderliche Speicherplatz für beide Tabellen nur etwa 0,5 kBytes.

Die Komponenten in x- sowie y-Richtung müssen danach getrennt arithmetisch gemittelt werden. Die erforderlichen Rechenschritte, Addition und Division, lassen sich problemlos in einer Assembler-Sprache formulieren. Durch geeignete Skalierung ließen sich die Werte im *controller* als ganze Zahlen (*integer*) abbilden, was die *software* weiter vereinfacht. Aus den erhaltenen Mittelwerten kann dann abschließend der gesuchte Winkel α des resultierenden Windvektors berechnet werden:

$$\alpha_r = \text{ARCTAN} \left(\frac{u_y}{u_x} \right)$$

Die Arcustangens-Funktion wäre im *controller* ebenfalls als Tabelle abgelegt. Weil die Tangens-Funktion π -periodisch ist, müßte die endgültige Lage des Richtungswinkels α nun nur noch aus den Vorzeichen der Komponenten ermittelt werden. Die nachfolgende Tab. 4 stellt die Vorzeichen der Komponenten und die erforderlichen Korrekturen gegenüber. Die Berechnung der Geschwindigkeit des resultierenden Vektors ($u_r = (u_x^2 + u_y^2)^{1/2}$) ist nicht erforderlich, weil für die Aufschaltung der Geschwindigkeit auf den Regler das unmittelbare, nicht gemittelte Signal des Anemometers erforderlich ist.

Tab. 4: Lage des Winkels, Vorzeichen der Komponenten

Quadrant	1	2	3	4
u_x	pos	neg	neg	pos
u_y	pos	pos	neg	neg
α	α	$\pi - \alpha$	$\pi + \alpha$	$2\pi + \alpha$

Zur Durchführung der oben beschriebenen gleitenden Mittelung der Windrichtung würde sich der *micro controller* PIC16C71 (Fa. Arizona MicroChip) gut eignen. Er verfügt über die erforderlichen ADC und hat eine ausreichende Speicherkapazität. Weiterhin ist er im Handel leicht verfügbar und sehr preiswert.

4.3. Simulation der Lichtverhältnisse

4.3.1. Allgemeines

Wird eine botanische Versuchsfläche mit den technischen Komponenten einer Begasungsanlage umbaut, so stellt dies immer einen Eingriff in das Mikroklima dieses Standorts dar. Neben der Störung des natürlichen Windes durch Wirbelbildung können besonders auch die Lichtverhältnisse durch Schattenwurf verändert werden. In Abhängigkeit vom Stand der Sonne können diese Schatten eine ganz unterschiedliche Fläche und auch Ausrichtung haben.

An Schattenkanten ist aufgrund der ausgeprägten Sonnenlichtgradienten zu erwarten, daß die Temperatur an der Bodenoberfläche eine entsprechende Inhomogenität zeigt. Das auf diese Weise veränderte Kleinklima hätte Auswirkungen auf die Evapotranspiration und die Aktivität der Bodenorganismen (Stickstoffmineralisation, Kohlendioxidabgabe u.s.w.).

Die Beurteilung dieses geräteabhängigen Einflusses auf das Sonnenlicht ist weiterhin besonders wichtig, weil bekannt ist, daß - von den tagneutralen Pflanzen einmal abgesehen - die Entwicklungserscheinungen bei zahlreichen Arten an Veränderungen der Tageslänge gebunden sind (Langtag und Kurztagpflanzen). Auch die Intensität des Lichtes bevorzugt oder benachteiligt viele Arten (Sonnen- und Schattenpflanzen) in unterschiedlichem Maße. Ein minimaler Lichtgenuß, wie er z.B. auf der Nordseite von technischen Installationen vorkommt, ist eine echte Existenzschränke für höhere Pflanzen.

Das Ausmaß des durch die apparative Umbauung der Versuchsfläche zu erwartenden Schattenwurfes ist ein wichtiges Kriterium für die geometrische Auslegung einer zu entwickelnden Begasungsanlage. Dies betrifft sowohl die Abmaße der Versorgungseinrichtungen (*Plenum*, *VVP*), als auch die Festlegung der genauen Lage der genutzten Beobachtungsfläche (Nettofläche) innerhalb der umbauten Fläche (Bruttofläche).

Durch die wohl definierte Bahn der Sonne kann der erwartete Schatten einer Anlage vorausberechnet werden, wenn die Geometrie der Apparatur bekannt ist. Dazu muß das Simulationsprogramm den Schattenwurf unter Berücksichtigung der Sonnenbahn berechnen. Bei einer solchen Berechnung braucht das diffuse Himmelslicht nicht notwendigerweise berücksichtigt werden, denn die Berechnungen des direkten Schattens allein ergibt bereits ein brauchbares Kriterium für den Vergleich von Systemen untereinander: Je geringer der Einfluß auf den ökologischen Parameter "Licht" ist, umso besser ist die Anlage.

Neben dem direkten Sonnenlicht (*erythema irradiance*, *sunburn irradiance*) fällt auch diffuse Strahlung auf die Versuchsfläche. Die diffuse Himmelsstrahlung entsteht durch Streuung des Sonnenlichtes an der Atmosphäre und der Bewölkung (Wasserdampf, Schmutzteile). Bereits aus der Anschauung heraus ist verständlich, daß Ihre Berechnung außerordentlich schwierig ist. Es hat sich auch durch Messungen an unterschiedlich geneigten Flächen bestätigt, daß sogar eine Umrechnung nur ungenau möglich ist. Dies liegt an der Tatsache, daß die Leuchtdichte des Himmels nicht homogen ist. Besonders bei bedecktem Himmel ist sie im

Zenit höher als an anderen Stellen des Himmelsgewölbes (vgl. z.B. DRUMOND 1956, LIU & JORDAN 1960, FEDERER TANNER 1965, GATES 1965, BINDI *et al.* 1992).

Beschränkt man sich in einer Betrachtung nur auf die direkt eingestrahlte Lichtkomponente, dann läßt sich die zu erwartende Abschattung eines Versuchsfeldes durch die sie umgebende Technik recht genau berechnen. Auch ohne Berücksichtigung der diffusen Strahlung ist eine Kenntnis der Schattenverteilung bedeutungsvoll, denn sie ermöglicht eine qualitative Aussage über die örtliche Lage der eigentlichen Beobachtungsfläche (Netto-Fläche) innerhalb der zur Verfügung stehenden, begasten Gesamtfläche (Brutto-Fläche).

Im Nachfolgenden wird eine Methode zur Abschätzung der Abschwächung des Lichtes auf einer mit technischen Komponenten umbauten Fläche hergeleitet und angewendet. Dabei wird von dem heute gebräuchlichen ringförmigen Typ von Begasungsanlagen ausgegangen. Es wird auch der Einfluß der natürlichen geografischen Gegebenheiten (Horizont, *Skyline*) in die Betrachtungen einbezogen.

4.3.2. Topf-Modell einer Anlage

Um den durch die Umbauung einer runden Versuchsfläche verursachten Schattenwurf zu berechnen, kann diese Umbauung als ein oben offener Zylinder mit lichtundurchlässiger Wand ("Topf") angenähert werden. Diese Annahme ist tatsächlich für den Korpus (Plenum) einer Begasungsanlage in guter Näherung erfüllt. Die vertikalen Luftauslässe (*vertical vent pipes*, VVP) können dabei vernachlässigt werden, weil sie nicht übermäßig zum Schattenwurf beitragen. Ebenso vernachlässigbar ist die Reflektion des Sonnenlichtes an der beleuchteten Innenwand; denn dieser charakteristische "Brennfleck" eines Zylinders (Katakaustik) kann für praktische Zwecke durch einen Farbanstrich in seiner Intensität genügend abgeschwächt werden.

Auf der Erdoberfläche kann der Sonnenstand, je nach geographischer Breite, Werte im Bereich von Null bis 90° annehmen. Der senkrechte Sonnenstand wird aber nur am Äquator erreicht. Für einen bestimmten Standort (auf einem gegebenen Breitengrad) berechnet sich die Amplitude des maximalen Sonnenstandes (α) aus der Schiefe der Ekliptik (23,45°) und dem Breitengrad (β) des Standortes zu:

$$\alpha = (90^\circ - \beta) \pm 23,45$$

Für einen Standort im Raum Gießen (Breitengrad $\beta \approx 50^\circ$) ergibt sich der gerundete, maximale Sonnenstand:

$$\alpha \in [17^\circ, 63^\circ] \quad (\text{bzw. } 17^\circ \leq \alpha \leq 63^\circ)$$

Aus der Abb. 38 ist sofort ersichtlich, daß eine vollständige Ausleuchtung der Fläche nur bei senkrechter Sonneneinstrahlung möglich ist. Zur Beschreibung des Schattens dient die Schattenlänge; a .

Für den Zusammenhang zwischen Sonnenhöhe und Schattenlänge gilt:

$$a = h \cdot \text{TAN}(\alpha)^{-1}$$

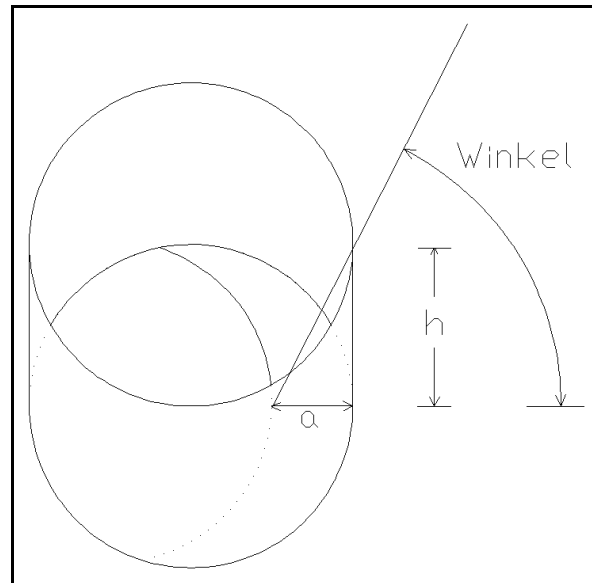


Abb. 38: Als offener Zylinder (Topf) modellierter Begasungsring im Sonnenlicht mit Schatten.

Der mathematisch sinnvolle Wertebereich der Sonnenhöhe (α) ergibt sich aus dem Wertebereich von a (im Bogenmaß). Wie die Gleichung

$$\text{ARCTAN}\left(\frac{h}{2r}\right) \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

zeigt, ist die Mindest-Sonnenhöhe nur von Höhe-Durchmesser-Verhältnis ($h/2r$) des betrachteten Ringes abhängig.

Zur Berechnung der absoluten Lichtfläche bei einem gegebenen Sonnenstand (α) wird der Begasungsring in der Draufsicht als Kreis mit dem Radius (r) dargestellt (vgl. Abb. 39).

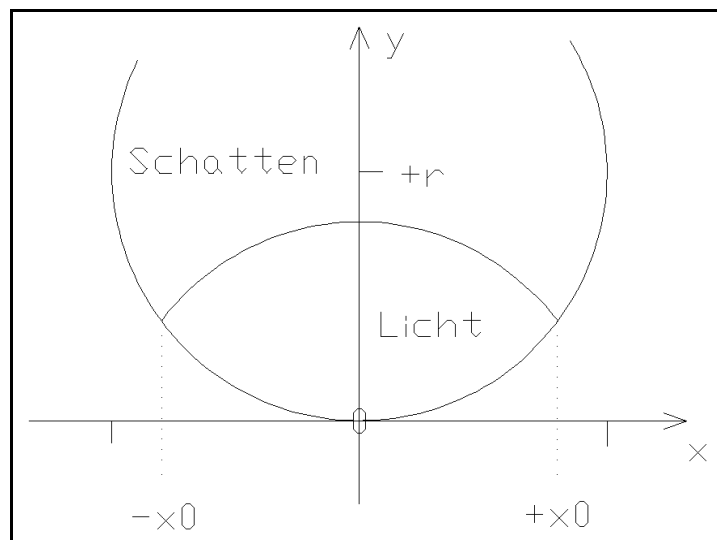


Abb. 39: Licht- und Schattenfläche in Draufsicht

Der Kreis liegt in einem rechtwinkligen Koordinatensystem so, daß sein Mittelpunkt bei $+r$ auf der positiven Y-Achse liegt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt auf dem Umfang. Die X-Achse bildet eine Tangente, die den Kreis im Koordinatenursprung berührt. Die Sonne steht über der positiven Y-Achse. Die Licht/Schatten-Linie wölbt sich über der X-Achse. Die beleuchtete Fläche ist durch die beiden Kreisbögen eingeschlossen.

Die Funktionen des Grundriß-Kreises (f_1) und der Schattenkante (f_2) lauten dann:

$$f_1(x) = r - \sqrt{r^2 - x^2} \quad (1)$$

$$f_2(x) = r - a + \sqrt{r^2 - x^2} \quad (2)$$

Die Bögen schneiden sich in zwei Punkten. Die Abszissen der Schnittpunkte (x_0) sind die Integrationsgrenzen. Aus den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich x_0 zu:

$$x_0 = \pm \sqrt{\frac{r^2 - a^2}{4}} \quad (3)$$

Mit dem Wertebereich der Schattenlänge und den Integrationsgrenzen nach (3) ergibt sich für die Lichtfläche:

$$F(a) = \int_{-x_0}^{+x_0} [f_2 - f_1] dx \quad (4)$$

Durch Einsetzen und Integrieren ergibt sich die Sonnenfläche zu:

$$F(a) = 2 r^2 \cdot \text{ARCSIN}\left(\frac{x_0}{r}\right) - a \cdot x_0 \quad (5)$$

Eine Gegenprobe mit den Extremwerten der Schattenlänge ergibt die folgenden Lichtflächen:

$$F(0) = 2 r^2 \cdot \frac{\pi}{2} = \pi \cdot r^2$$

$$F(2r) = -2 r \cdot x_0 + 2 r^2 \cdot \text{ARCSIN}\left(\frac{x_0}{r}\right) = 0$$

Mit der Gleichung (5) läßt sich nun für jede Sonnenhöhe die entsprechende Lichtfläche berechnen. Die nachfolgende Abb. 40 zeigt die Lichtfläche von zwei ausgewählten Ringgeometrien in Abhängigkeit von Winkel der Sonneneinstrahlung. Als Ordinate ist der prozentuale Anteil der besonnenen Fläche aufgetragen. Als Abszisse der Höhenwinkel der Sonne.

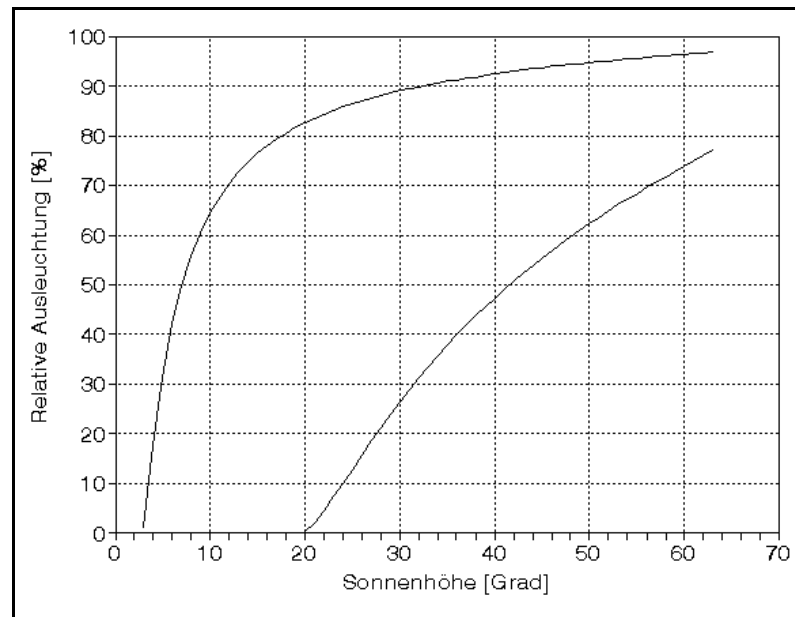


Abb. 40: Vergleich der relativen Ausleuchtung für zwei ausgewählte Begasungssysteme im Bereich Gießen
(linke Kurve: vom Autor realisiertes System, siehe Kap. 6; rechte Kurve: REECE *et al.* (1995))

4.3.3. Skyline des geplanten Standortes

Zur Abschätzung der durch die Gerätetechnik an einem konkreten Standort hervorgerufenen Abschattung muß zuerst die Lichtsituation des unveränderten Geländes bekannt sein. Eine technische Anlage kann erst dann selber einen Schatten hervorrufen, wenn der Sonnenstand höher ist als andere optische Hindernisse in der Umgebung (*Skyline*). Bei einem Gerätestandort beispielsweise in einer Talaue oder hinter Baumgruppen können die Horizontwinkel erhebliche Werte annehmen. Zur Quantifizierung dieses Horizonteinflusses muß ein Abschattungsprotokoll des Standortes angefertigt werden. Im vorliegenden Fall wurden zu diesem Zweck die Koordinaten (Richtungs- und Erhebungswinkel) von den markanten Punkten der *Skyline* bestimmt. Die beiden nachfolgenden Abbildungen 41 und 42 zeigen die Ergebnisse für zwei ausgewählte Standorte (PLUMEX-1 und PLUMEX-2; vgl. Abb. 43 und Kap. 6).

Die X-Achse ist zur Veranschaulichung der Sonnenrichtung in Uhrzeit (MESZ) skaliert. Oberhalb der *Skyline* sind zusätzlich zwei Sonnenbahnen angegeben. Die obere Bahn gilt für das Solstitium. Die untere Bahn wird von der Sonne jeweils zu Beginn und Ende der Vegetationsperiode beschrieben.

Obwohl der Abstand der beiden Standorte nur etwa 50 Meter beträgt, sind die beiden Horizontbilder jedoch deutlich unterschiedlich. Das prägnanteste optische Hindernis ist in beiden Fällen dieselbe Baumgruppe an der südwestlichen Ecke des Versuchsgeländes. Bemerkenswert ist aber, daß der individuelle Einfluß dieser Baumgruppe auf die beiden Standorte ganz offensichtlich unterschiedlich ist. Für den Standort PLUMEX-2 liegt die Störung

im Süden, also im Bereich der hohen Sonnenstände, wogegen für den Standort PLUMEX-1 die niedrige Abendsonne das ganze Jahr hindurch nach 18:00 MESZ abgeschirmt wird.

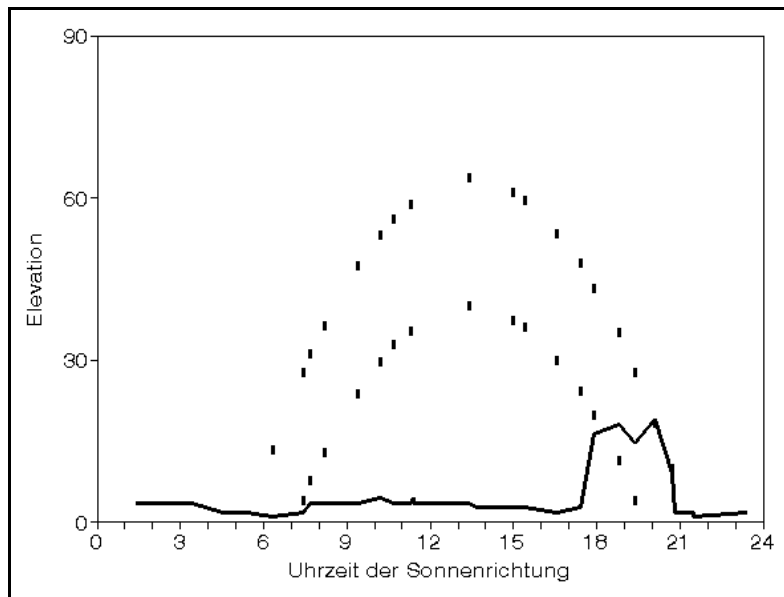


Abb. 41: Die Skyline am PlumeX-1 hat im Bereich der Abendsonne (MESZ) eine abschattende Baumgruppe.

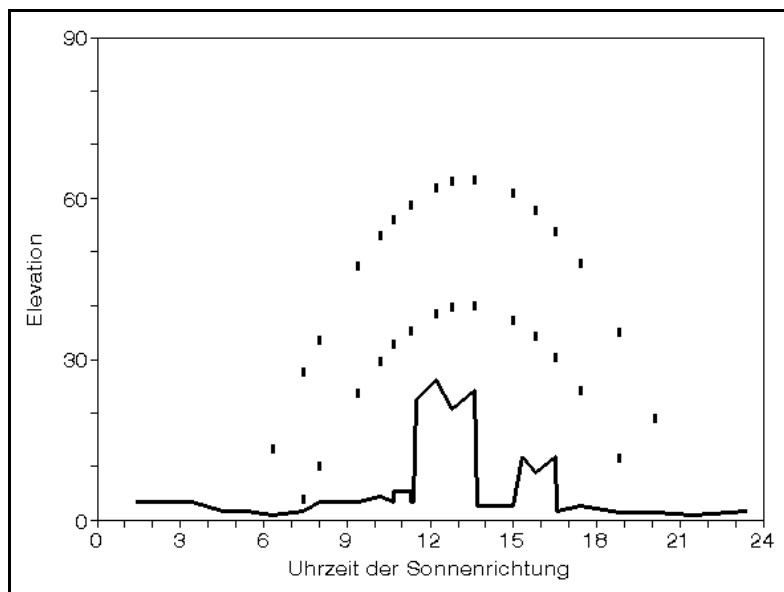


Abb. 42: Die Skyline am PlumeX-2 zeigt im Bereich der hohen Mittagssonne (MESZ) zwei Baumgruppen, die aber während der Vegetationsperiode keinen Schatten in der Anlage verursachen.

Die verbleibenden Bereiche des Horizontes unterscheiden sich in beiden Fällen nicht meßbar. Im Osten (bei 6:00 Uhr) liegt in 8 km Entfernung eine Siedlung (Watzenborn-Steinberg). Der in gleicher Richtung im Nahbereich liegende Bürocontainer, bleibt im wesentlichen unter dem Horizont. Im Norden wird das Gelände durch einen bewaldeten Hügel abgeschirmt. Die

Skyline in diesem Bereich wurde nur der Vollständigkeit halber vermessen. Für die Lichtverhältnisse auf dem Versuchsfeld ist der nördliche Horizont ohne Belang.

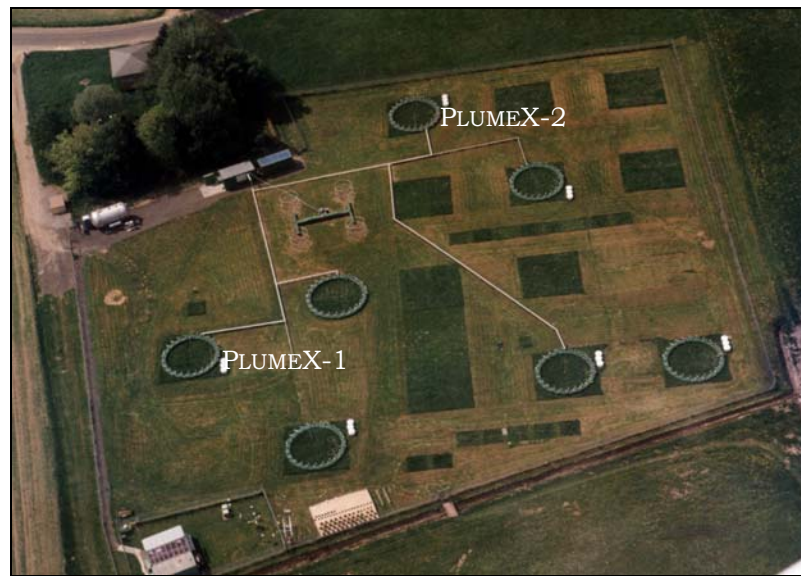


Abb. 43: Luftbildaufnahme der Versuchsfäche (vgl. Kap. 6)
(eigene Luftaufnahme)

4.3.4. Berechnung der Lichtverteilung

Zur Abschätzung sinnvoller Bauhöhen wurde für das geplante Begasungssystem der Lichteinfall eines Jahres simuliert. Grundlage der Berechnung war ein Durchmesser von $d = 10$ Metern und eine Höhe des *Plenum* von 50 Zentimetern über der Geländeoberkannte.

Das für diesen Zweck geschriebene Rechnerprogramm ist im Anhang wiedergegeben (vgl. SUNLIGHT.PAS). Die verwendete Sprache ist PASCAL (Borland, Vers. 4). Zur Berechnung sind über der Grundfläche werden 400 virtuelle Meßpunkte in einem quadratischen Raster angelegt. Für jeden dieser Punkte wird bei einem gegebenen Sonnenstand berechnet, ob er im Schatten liegt oder vom direkten Sonnenlicht getroffen wird. Als Referenz wird der Lichteinfall an einem virtuellen Punkt ohne Schatten ("außerhalb der Anlage") aufsummiert. Dabei wird der Einfluß des Horizontes (*Skyline*) berücksichtigt. Die zeitliche Auflösung des Programmes ist eine Stunde. Insgesamt werden bei einem Programmlauf etwa 14 Millionen Berechnungen gemacht²¹. Als Optionen kann das Programm die Berechnung von entweder der Tageslänge oder der Lichtdosis durchführen. Für die Lichtdosis wird der Sinus des Einfallswinkels integriert und dabei der längere Weg durch die Atmosphäre rechnerisch berücksichtigt (NEHRING 1962). Die Abbildungen 44 bis 47 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen.

²¹ Auf dem verwendeten 286er (16 Mhz) dauerte ein Programmlauf etwa einen Tag.

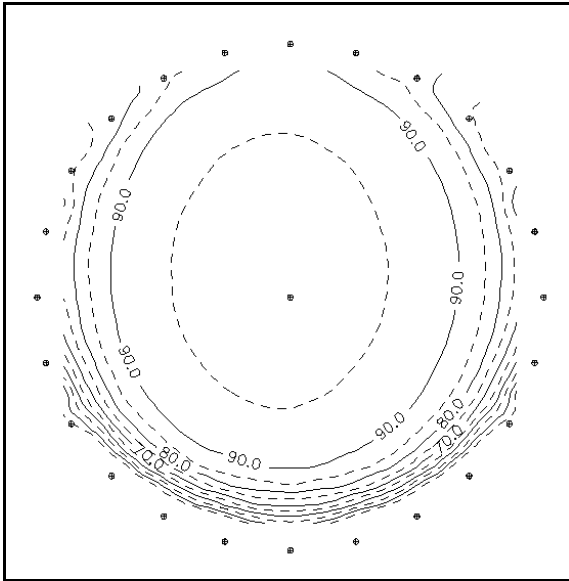


Abb. 44: Relative Tageslänge im PlumeX-1

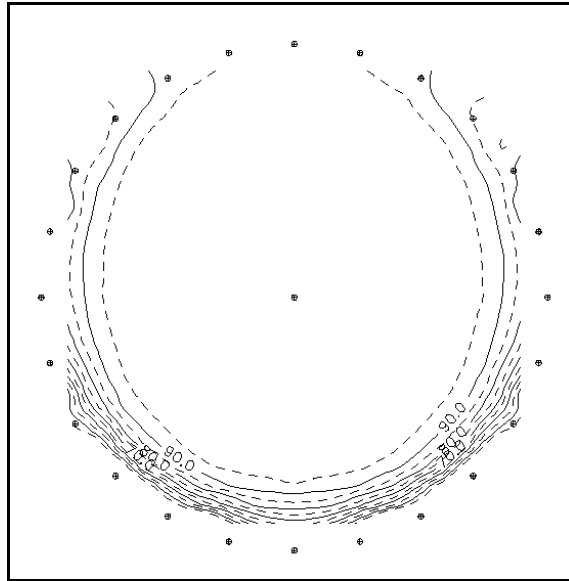


Abb. 45: Relative Lichtdosis im PlumeX-1

(Zeitraum: 1 Jahr, Geometrie: $h = 0.5\text{m}$, $d = 10\text{m}$)

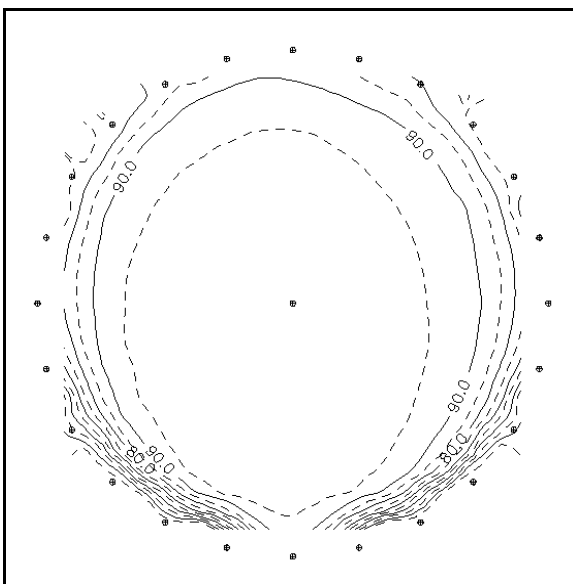


Abb. 46: Relative Tageslänge im PlumeX-1

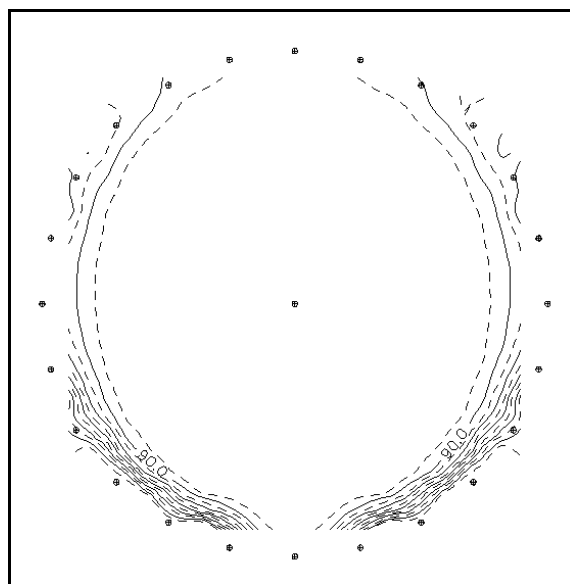


Abb. 47: Relative Lichtdosis im PlumeX-1

(Zeitraum: 20. März bis 20. September, Geometrie: $h = 0.5\text{m}$, $d = 10\text{m}$)

Ein nennenswerter Schatten tritt nur hinter dem südlichen Halbbogen des Ringes auf (Abb. 44, 45). In einem Abstand von einem Meter beträgt die Tageslänge bereits über 90 % und die Lichtdosis über 95 % einer unbeeinflussten Fläche. Der botanisch nutzbare Bereich hat somit eine Ausdehnung von etwa 80 Prozent der Bruttofläche und ist in guter Näherung kreisförmig. Sein Mittelpunkt ist gegenüber dem Ringmittelpunkt um etwa 50 Zentimeter nach Norden verschoben.

Zu der Schattenbildung im Ring tragen im wesentlichen die tiefen Sonnenbahnen des Winterhalbjahres bei. Während der Vegetationsperiode ist der zu erwartende Schatten der Anlage noch einmal deutlich geringer (Abb. 46, 47). Eine Begasungsanlage mit einem Durchmesser von zehn Metern kann also durchaus Bauhöhen von 50 Zentimetern haben, ohne daß ein übermäßiger Einfluß auf die Lichtverhältnisse zu erwarten ist.

4.4. Die Regelung

Die Regelung hat die Aufgabe, die Ausgangsgröße der Regelstrecke, die Regelgröße x (hier Spurengaskonzentration), auf einen vorbestimmten Wert, die Führungsgröße w (hier: n -fache Umgebungskonzentration) zu bringen und sie gegen den Einfluß von Störgrößen z (z.B. Windeinfluß) auf diesem Wert zu halten. In der nachfolgenden Abb. 48 ist ein Regelkreis abgebildet. Aus dem tatsächlichen Istwert der Regelgröße x wird durch Vergleich mit dem Sollwert der Führungsgröße w eine Regeldifferenz e ermittelt. Die Regeldifferenz wird mit einem Regelalgorithmus zur Stellgröße y verarbeitet und dem Stellgerät der Regelstrecke zugeführt. Aus dem tatsächlichen Istwert der Regelgröße x wird durch Vergleich mit dem Sollwert der Führungsgröße w eine Regeldifferenz e ermittelt. Die Regeldifferenz wird mit einem Regelalgorithmus zur Stellgröße y verarbeitet und dem Stellgerät der Regelstrecke zugeführt.

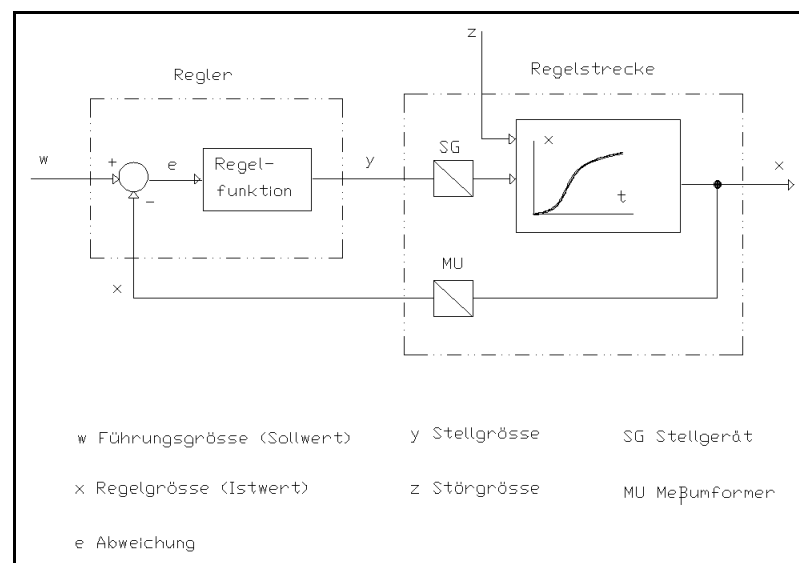


Abb. 48: Funktionsschema eines einfachen Regelkreises nach DIN 19225 und 19226.

Gemäß der Definition (DIN 19225, 19226) beginnt die Regelstrecke am Stellort, d.h. dort, wo die Stellgröße y eingreift und endet am Meßort, wo sich der Meßfühler zur Aufnahme der Regelgröße x befindet. Das Stellgerät (SG) und der Meßumformer (MU) gehören zur Strecke. Dies ist sinnvoll, weil die vom Ideal abweichenden realen Eigenschaften dieser Komponenten ebenfalls vom Regler "kompensiert" werden müssen. In der Praxis ist es jedoch häufig üblich, das Stellglied und den Meßumformer als Bestandteile des Reglers zu betrachten. So soll auch im Rahmen dieser Arbeit der Begriff "Strecke" nur für die Versuchsfläche gelten.

4.4.1. PID-Regler

Entsprechend der außerordentlich großen Vielfalt von Regelungsaufgaben gibt es sehr unterschiedliche Gesichtspunkte, unter denen man die zum Einsatz kommenden Regler in Gruppen einteilen kann. So ist es z.B. möglich, nach der Regelgröße (Temperatur-, Druck-, Stromregler), nach dem Betriebsmittel (elektrische, pneumatische, hydraulische Regler) oder nach den Systemeigenschaften (Universal-, Kompakt-, Einheitsregler) zu ordnen. Für den "Entwurf" von Reglern ist es zweckmäßig, die Regler nach ihrer Arbeitsweise und ihrem Zeitverhalten einzuteilen. Dabei werden proportionales (P), integrierendes (I) und differenzierendes (D) Verhalten unterschieden. In der angelsächsischen Literatur (vgl. ZIEGLER & NICHOLS 1942) finden sich dafür noch häufig die sehr anschaulichen Begriffe *proportional*, *automatic-reset* und *pre-act response*.

Der P-Regler (*proportional response*) reagiert sofort auf die Auswirkung einer Störung und verstellt dabei den Stellausgang proportional zu der sich an seinem Eingang zeigenden Abweichung. Er reagiert dabei ohne Überschwingen auf eine sprungförmige Störung (vgl. Abb. 49, links).

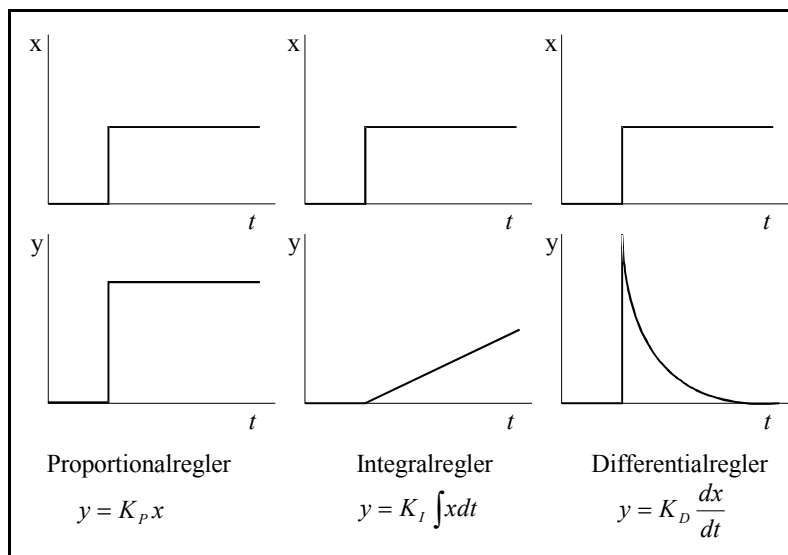


Abb. 49: Sprungantworten der drei Grundfunktionen eines PID-Reglers (DIN 19229)

Allerdings erzeugt der P-Regler an seinem Ausgang nur dann eine Stellgröße, wenn eine Regeldifferenz größer Null an seinem Eingang vorhanden ist. Diese Eigenart des reinen P-Reglers führt zu einer bleibenden Abweichung, was im Folgenden aufgezeigt werden soll.

Der Betrag dieser bleibenden Abweichung ergibt sich durch eine einfache Betrachtung des statischen Verhaltens von Regler und Strecke. Im Gleichgewicht gilt:

$$e = w - x \quad \text{mit} \quad x = K_S \cdot y + z$$

Hierin ist y das Stellsignal im Beharrungszustand des Reglers. Für y gilt:

$$y = K_P \cdot e$$

Nach e aufgelöst, ergibt sich:

$$e_{bl} = \frac{w - z}{1 + K_p \cdot K_s}$$

Die Regelgröße (x) bleibt um den Betrag der "bleibenden Regelabweichung" (e_{bl}) hinter dem Sollwert (w) zurück. Damit folgt (mit $z = 0$) für die Regelgröße:

$$x = w \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + K_p \cdot K_s} \right)$$

Wie die Gleichung erkennen läßt, ist die bleibende Regeldifferenz (e_{bl}) nur von K_p und K_s abhängig. In Abb. 50 wird diese Abhängigkeit von der Regelkreisverstärkung ($K_p \cdot K_s$) veranschaulicht. Dabei ist die Regelgröße auf den Sollwert normiert aufgetragen.

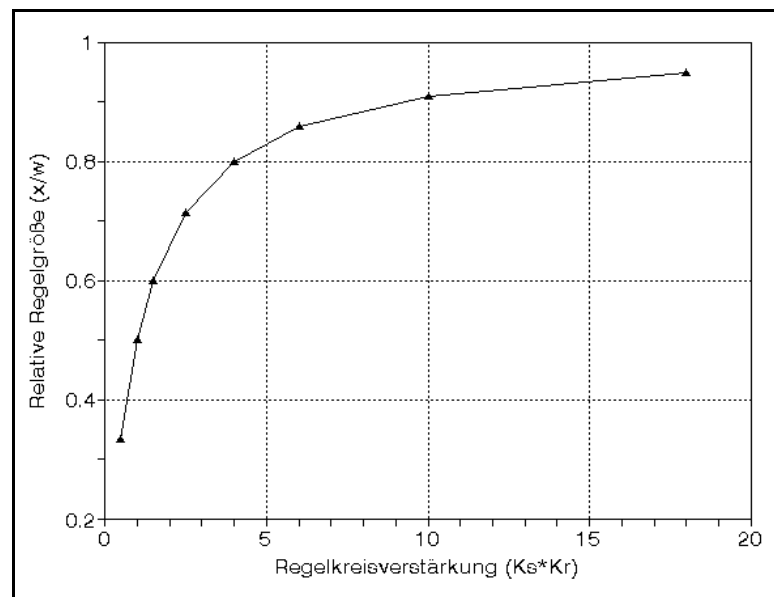


Abb. 50: Die bleibende Regelabweichung bei reiner P-Regelung als Funktion der Regelkreisverstärkung dargestellt

Wie die Abbildung zeigt, kann die bleibende Regeldifferenz, bei gegebener Streckenverstärkung (K_s), durch Vergrößern des Proportionalbeiwertes (K_p) verringert werden. Die Reglerverstärkung läßt sich aber nicht beliebig erhöhen, weil dies, vor allem bei Strecken höherer Ordnung, zur Instabilität des geschlossenen Regelkreises führt. Hierin besteht der Hauptnachteil des reinen P-Reglers.

Ein Sonderfall des P-Reglers ist die weit verbreitete Zweipunktregelung. Hier erfolgt ein einfaches Ein/Aus-Schalten beim Über- bzw. Unterschreiten eines Schwellwertes. Diese Anordnung mit der treffenden engl. Bezeichnung *bang-bang control*, stellt einen P-Regler mit einer unendlich großen Verstärkung dar. Der Regelkreis schwingt und der Istwert schwankt dabei periodisch um einen Mittelwert, den Sollwert.

Im Gegensatz zu einem P-Regler regelt ein I-Regler genau auf Null aus und eine bleibende Regeldifferenz, wie beim P-Regler, tritt nicht auf. Der Integrationsvorgang kommt erst dann zum Abschluß, wenn die Regelabweichung zu Null geworden ist (*automatic reset*). Nachteilig ist hierbei jedoch die erforderliche Zeit (Nachstellzeit). Das Ausregeln einer Regeldifferenz dauert beim I-Regler sehr viel länger als beim P-Regler, da die Ausgangsgröße kontinuierlich in Form einer Rampe ansteigt (vgl. Abb. 49, mitte).

Die dritte Komponente ist der D-Anteil, dessen Wirkung in Abb. 49 (rechts) dargestellt ist. Die amerikanischen Bezeichnungen "*pre-act*" (im voraus handelnd) oder "*anticipatory*" (vor-greifen, vorwegnehmen) sind sehr anschauliche sprachliche Übertreibungen dieses D-Effektes (ZIEGLER & NICHOLS 1942). Eine Anwendung des reinen D-Reglers ist nicht denkbar, denn auch bei einer ständig anstehenden Störung klingt sein Stelleingriff schnell ab. Die D-Wirkung ist, wie der Name andeutet, eine schnelle, spontane Antwort des Reglers um "Zeit zu gewinnen".

Wie oben dargelegt haben die drei Grundfunktionen eines PID-Reglers jeweils ihre charakteristischen Vor- und Nachteile. Von dem reinen P-Regler abgesehen, werden in der Praxis darum hauptsächlich Kombinationen angewendet. Obwohl der P-Regler in der Praxis weit verbreitet ist, kann er für eine anspruchsvolle Aufgabe nicht eingesetzt werden. Er ist immer ein Kompromiß zwischen bleibender Abweichung und Schwingneigung.

Kombiniert man den P-Regler in einer Parallelschaltung mit einem I-Regler, erhält man den PI-Regler. Die Sprungantwort des PI-Reglers entsteht durch Überlagerung von P- und I-Anteil. Der P-Anteil liefert sofort einen Anteil zur Stellgröße, der I-Anteil regelt die Regeldifferenz vollständig aus. Der PI-Regler ist damit in der Lage, einen Sollwert präzise einzustellen und zu halten.

Durch einen zusätzlichen D-Anteil kann die "Trägheit" der I-Komponente teilweise kompensiert werden. Baut man eine Parallelschaltung der drei Grundtypen auf, so ergibt sich der recht universell einsetzbare klassische PID-Regler. In diesem sind das schnelle Eingreifen des P-Anteils, die ausregelnde Eigenschaft des I-Anteils und die dämpfende Wirkung des D-Anteils miteinander vereint.

4.4.2. Reglereinstellung

Um einen PID-Regler in einem konkreten Fall an eine gegebene Strecke anzupassen, müssen die drei Regelparameter (P, I und D) gewählt und am Regler eingestellt werden (DIN 19236). Allgemein gültige optimale Werte gibt es dabei aber nicht und die Einstellung erfolgt entweder nach mathematischen oder nach empirischen (praktischen) Kriterien. Für eine mathematische Einstellung muß die zu regelnde Strecke gut bekannt sein. Hierbei sind nicht die konstruktiven Details, sondern vielmehr die physikalischen Eigenschaften gemeint.

Eine beliebig genaue Streckenbeschreibung ist naturgemäß nicht möglich, darum müssen die wesentlichen Streckeneigenschaften mit einem mathematischen Modell beschrieben werden. Für diese Modellbildung des Regelkreises und seiner Komponenten stehen mathematische

Handwerkzeuge in großer Zahl zur Verfügung. Beispielhaft sollen hier "Wurzelortskurve", "Bode-Diagramm", "Kalman-Filter" und "Beobachter" genannt werden. Die theoretische Regelungstechnik hat in dem letzten halben Jahrhundert große Fortschritte gemacht (beisp. KALMAN 1960 oder LUENBERGER 1964). Auf diese Verfahren näher einzugehen, würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Mit dem unverhältnismäßigen Aufwand der mathematischen Verfahren begründen schon ZIEGLER & NICHOLS (1942)²² die Notwendigkeit von praktischen Einstellregeln:

"Unfortunately, however, the mathematics of control involves such a bewildering assortment of exponential and trigonometric functions that the average engineer can not afford the time necessary to plow through them to a solution of his current problem." (*idem, ibid*)

In der zitierten Arbeit geben die beiden Autoren ein praktisches Verfahren zur Einstellung von PID-Reglern an, das sich bis heute bewährt hat. Die Parameter können dabei wahlweise aus den Kenndaten einer Sprungantwort (Verzugszeit, Nachstellzeit, Verstärkung) oder den Daten des schwingenden Regelkreises (Periodendauer, kritische Verstärkung) berechnet werden. Das letztere Verfahren kann natürlich nur bei schwingfähigen Systemen angewendet werden; und hier auch nur dann, wenn die Amplitude des Schwingungsvorgangs keine "Schäden" verursachen kann. Beispielsweise würde ein Regelkreis zur Dosierung von phytotoxischen Gasen, wie Ozon oder Schwefeldioxid, im schwingenden Zustand den Pflanzenbestand durch periodische Hochkonzentrationen irreversibel schädigen.

Für die Einstellung mit einem Schwingversuch wird der Regler als reiner P-Regler konfiguriert und die Verstärkung bis zum Einsetzen von Dauerschwingungen erhöht. Die Periodendauer (*period*) und die eingestellte Verstärkung (K_p , *sensitivity*) beschreiben die zu regelnde Strecke. Tab. 5 zeigt die empfohlenen Werte für die drei Regler Typen P, PI und PID in der original Terminologie der Autoren (*reset* = I-Anteil, *reset rate* = Kehrwert der Nachstellzeit, *pre-act* = D-Anteil, *pre-act time* = Vorhaltezeit T_v , $L = lag$ = Verzugszeit T_u , $R = reaction rate$ = Steigung der Wendetangente = $\Delta x/T_g$, vgl. Abb. 51).

Neben dem obigen Verfahren (kurz: ZN) finden auch die Einstellregeln nach CHIEN, HRONES, RESWICK (1952)²³ (kurz: CHR) häufige Anwendung. Sie stellen eine Weiterentwicklung und Verfeinerung da. Gegenüber den Regeln von ZN erlauben die CHR-Regeln die Wahl zwischen zwei Optimierungskriterien (Führungs- oder Störverhalten) und zwei Ausprägungen der Stellgröße (aperiodisch oder überschwingend). Für die Anwendung der CHR-Einstellregeln ist eine Bestimmung von den drei Kennwerten Streckenverstärkung, Verzugs- und Ausgleichzeit aus einer Sprungantwort erforderlich. Die Charakterisierung einer Strecke durch diese Parameter wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Tab. 6 zeigt die Einstellregeln nach CHR in einer Zusammenfassung.

²² Die Namen der Autoren sind zusammen als *terminus technicus* in die Regelungstechnik eingegangen, darum wird die übliche Schreibweise *et al.* hier nicht verwendet.

²³ Siehe Fußnote 22 zu ZIEGLER & NICHOLS.

Tab. 5: Einstellregeln nach ZIEGLER & NICHOLS (1942)
(Originalterminologie, Erläuterung im Text)

SUMMARY OF CONTROLLER ADJUSTMENTS	
Determine the ultimate sensitivity (S_u) and period (P_u), or the unit reaction rate R_1 and lag L . For the three types of controllers the optimum settings are as follows:	
Proportional	
$\text{Sensitivity} = 0.5 S_u = \frac{1}{R_1 L}$	
Proportional plus reset	
$\text{Sensitivity} = 0.45 S_u = \frac{0.9}{R_1 L}$	
$\text{Reset rate} = \frac{1.2}{P_u} = \frac{0.3}{L}$	
Proportional plus reset plus pre-act	
$\text{Sensitivity} = 0.6 S_u = \frac{1.2}{R_1 L}$	
$\text{Reset rate} = \frac{2.0}{P_u} = \frac{0.5}{L}$	
$\text{Pre-act time} = \frac{P_u}{8} = 0.5 L$	

Tab. 6: Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK (1952)

Regler		Aperiodischer Regelverlauf		Regelverlauf mit 20% Überspringen	
		Störung	Führung	Störung	Führung
P	K_R	$\frac{0,3}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,3}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$
		$\frac{0,6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,35}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,7}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$
PI	T_n	$4 T_u$	$1,2 T_g$	$2,3 T_u$	$1 T_g$
	T_v	$0,42 T_u$	$0,5 T_u$	$0,42 T_u$	$0,47 T_u$
PID	K_R	$\frac{0,95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,6}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{1,2}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0,95}{K_S} \frac{T_g}{T_u}$
	T_n	$2,4 T_u$	$1 T_g$	$2 T_u$	$1,35 T_g$

4.4.3. Charakterisierung der Regelstrecke

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde dargelegt, daß eine möglichst genaue Charakterisierung der Regelstrecke (Expositionsfläche mit *plenum*) eine wichtige Voraussetzung für die Auslegung von Regelungen ist. Ohne Kenntnis der Streckeneigenschaften ist es nicht oder zumindest schwer möglich, einen Regler auszuwählen oder die Parametrierung festzulegen.

Für die Analyse der Strecke vom vorliegenden Typus gibt es ein einfaches und bewährtes Ver-

fahren: die Beobachtung der Antwort auf einen experimentellen Sprung der zugeführten Spurengasmenge. Aus den Sprungantworten einer Regelstrecke können sowohl statische als auch dynamische Eigenschaften der Regelstrecke, das Beharrungsverhalten und das Zeitverhalten, ermittelt werden. Mit den auf diese Weise gewonnen Parametern der Regelstrecke kann ein Regelalgorithmus ausgewählt und parametrisiert werden.

Bei der Aufnahme einer Sprungantwort schaltet man auf den Stelleingang der Regelstrecke ein sprungförmiges Eingangssignal und beobachtet dann, wie sich die Regelgröße entsprechend verändert. Konkret heißt das, daß in die zu charakterisierende Begasungsfläche (Regelstrecke) zu einem Zeitpunkt $t=0$, ein konstanter Spurengasstrom eingebracht wird und das Ansteigen der Gaskonzentration über die Zeit beobachtet (aufgezeichnet) wird.

Es ist dabei wichtig, daß die Fehlerquellen bei einer Messung so klein wie möglich gehalten werden. Im Besonderen müssen Störgrößen, die während einer Messung zusätzlich zum Stellsignal auf die Regelstrecke einwirken, vermieden werden. Gerade dies ist aber bei einer Begasungsanlage im Freiland nur sehr schwer möglich, weil sich die Hauptstörgröße, die Windgeschwindigkeit, naturgemäß beständig ändert. Messungen an Systemen im Freiland liefern daher immer nur Anhaltswerte.

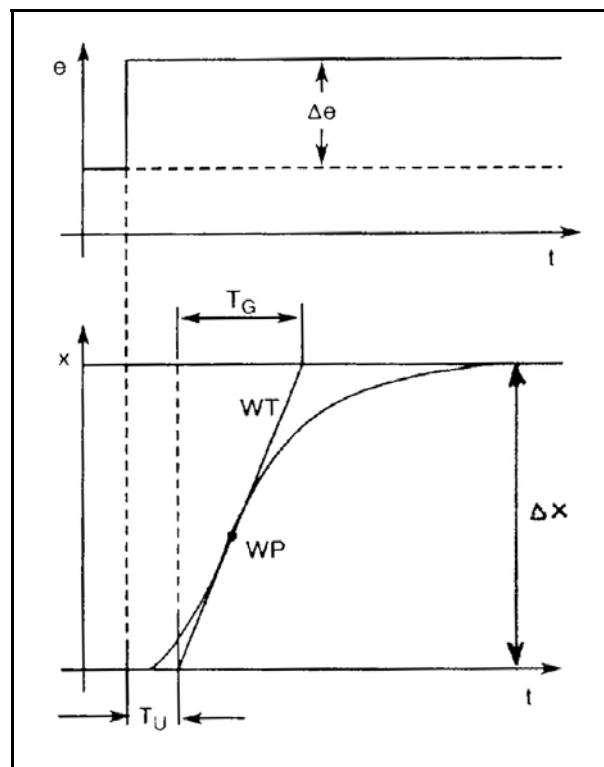


Abb. 51: Ausgleichszeit (T_g), Verzugszeit (T_u) und Verstärkung ($\Delta x/\Delta e$) einer Regelstrecke mit Verzögerung erster Ordnung (WT = Wendetangente, WP = Wendepunkt)

Ebenso wichtig ist die richtige Wahl der zeitlichen Auflösung. Die Meßzeitpunkte müssen also dicht genug beieinander liegen, um den Kurvenverlauf auch bei schnellen Änderungen erkennen zu können. Abb. 51 zeigt eine typische Sprungantwort. Durch Anlegen einer Wende-

tangente können zwei charakteristische Eigenschaften, die Verzugs- und die Ausgleichszeit, ermittelt werden. Die Streckenverstärkung ergibt sich als Quotient der Amplituden beider Kurven. In einfachen Fällen, wie PT1-Strecken, lassen sich daraus ohne Aufwand Prozeßmodelle formulieren (vgl. Abb. 69 in Kap. 5.5.1).

Selbstverständlich müssen derartige Messungen mehrfach wiederholt und die Ablesungen gemittelt werden. Besonders zur Bestimmung der Verstärkung sind mehrere Messungen mit unterschiedlichen Sprungamplituden erforderlich (vgl. Abb. 68 in Kap. 5.5.1).

4.4.4. Störgrößenaufschaltung

Die Störgrößenaufschaltung ist eine zusätzliche Maßnahme zur Verbesserung der Regelgüte. Bei einem einfachen, einschleifigen Regelkreis wird einer Störgrößeneinwirkung erst dann entgegengewirkt, wenn die aufgetretene Änderung der Regelgröße (Regeldifferenz) im Regler eine Änderung der Stellgröße hervorgerufen hat. Ein Beispiel soll das verdeutlichen: Wenn die angereicherte Luft über einer Versuchsfläche durch eine Windböe plötzlich hinweggetragen wird, dann dauert es eine gewisse Zeit, bis die nun abgesunkene Spurengaskonzentration von dem Meßgerät erfaßt und an den Regler weitergeleitet wird. Auch der Regler wird eine gewisse Zeit benötigen, um den nun erforderlichen Spurengasstrom an die neue Situation anzupassen.

Die Regelgüte kann aber deutlich verbessert werden, wenn man nicht erst die Auswirkung der Störgröße (Windböe) auf die Regelgröße (Spurengaskonzentration) abwartet, sondern die Störgrößenänderung (Windböe) erfaßt und sie direkt auf das Stellglied (Gasdosierventil) korrigierend einwirken läßt. Auf diese Weise läßt sich das Stellglied "vorsteuern".

Die Störgrößenaufschaltung ist gerade bei Freiland-Begasungsanlagen eine außerordentlich wirkungsvolle Maßnahme zur Verbesserung der Regelgüte. Zudem ist sie hier sehr einfach möglich, weil die wichtigste Störgröße, die Windgeschwindigkeit, genau lokalisierbar und meßtechnisch einfach zu erfassen ist (Anemometer). Durch die Aufschaltung der Hauptstörgröße (Wind) auf die Strecke wird die Regelung entlastet. Die Regelung wird wesentlich schneller und die Überschwingweite reduziert.

Für die Art der Aufschaltung einer Störgröße sind prinzipiell zwei Wege, starr und nachgebend, denkbar. Bei Regelkreisen mit starrer Störgrößenaufschaltung wirkt die Störgröße über ein Steuergerät mit proportionalem Verhalten unmittelbar auf das Stellglied ein. Bei erheblichen Nichtlinearitäten ist eine starre Aufschaltung nicht zweckmäßig, da eine verbleibende Störgrößenänderung dazu führen kann, daß der Regler gegen die Vorsteuerung der Störgrößenaufschaltung arbeiten muß. Ein solcher falscher Dauereingriff wird durch eine nachgebende Störgrößenaufschaltung vermieden. Bei einer sprunghaften Änderung der Störgröße wird das Störsignal zunächst zwar proportional übertragen, klingt dann aber nach einer e-Funktion ab. Dieses differenzierende Verhalten führte zu dem Begriff Stör-Tendenzaufschaltung. Ein Vorteil dieser Schaltung ist, daß nur schnelle Änderungen der Störgröße eine große Vorsteuerung verursachen. Je langsamer die Störung einwirkt, desto kleiner ist die

Vorsteuerung. Das ist sinnvoll, denn langsam verlaufende Störungen kann ein Regler meistens selbst gut ausregeln.

4.5. Konzentrationsmessung

4.5.1. Anforderungen

In einem Regelkreis sind Totzeiten immer von negativem Einfluß auf die Regelgüte. Aus diesem Grund darf der Transport des Meßgases zum Gasmeßgerät (Monitor) nicht unnötig durch eine übermäßig lange Ansaugleitung verzögert werden. Ebenso wenig darf ein Monitor mit einem Meßstellenwechsler zwischen mehreren Anlagen geteilt werden. Jeder Begasungsring sollte ein individuelles Meßgerät mit möglichst kurzer Ansaugleitung haben. Die beste Anordnung wäre, das Gerät direkt an der Meßstelle, also in der Ringmitte aufzustellen. Für eine solche Anwendung können naturgemäß nur kleine, robuste Geräte in Frage kommen.

Je nach der botanischen Fragestellung werden bei Begasungsexperimenten eine große Zahl unterschiedlicher Spurengase eingesetzt. Wegen ihrer ökologischen Relevanz finden Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Ozon und die Stickoxide besonders häufige Anwendung. Die Palette der meßtechnisch auswertbaren physikalisch-chemischen Eigenschaften dieser Spurengase ist entsprechend breit gefächert. Je nach dem verwendeten Spurengas müssen andere Meßprinzipien zur Anwendung kommen. Wichtige Verfahren sind die Photometrie oder die Messung der Wärmeleitfähigkeit. In einzelnen Fällen gibt es sogar schon spezielle Gassensoren (Halbleiter) zur Konzentrationsmessung von Spurengasen. Hierbei geben die Gasmoleküle elektrische Ladungen ab, die den Leitwert des verwendeten Halbleiters (z.B. SnO_2) erhöhen. Die Optimierung auf das jeweilige Spurengas geschieht durch Wahl der Oberflächenbeschichtung und der Arbeitstemperatur. Eine vollständige Aufzählung der heute möglichen Verfahren würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Eine Übersicht findet sich bei KOHL (2001). Die Hauptanwendung von Halbleitersensoren liegt heute bei der Detektion von komplexen Gasgemischen, wie etwa in Brandmeldern oder zur Aromaerkennung in lebensmitteltechnischen Prozessen (sog. "Künstliche Nasen").

In dem vorliegenden Falle - Kohlendioxid - bieten sich die photometrischen Verfahren als optimales Meßprinzip an. Kohlendioxid hat eine Reihe von Absorptionslinien im Infrarotbereich (IR), die zur spezifischen Auswertung verwendet werden können.

Eine interessante Modifikation, bei der die Meßküvette nur eine IR-durchlässige Wand benötigt und eine IR-empfindliche Meßzelle ganz entbehrlich ist, stellt das photoakustische Verfahren dar. Hierbei wird das Meßgas in einer Zelle mit IR-Licht (Wellenlänge $4,25\ \mu\text{m}$) durchstrahlt. Durch die absorbierte Lichtenergie erwärmt sich das Gas adiabatisch und dehnt sich aus. Da das verwendete IR-Licht moduliert (gepulst) ist, sind die Druckschwankungen in der Zelle ebenfalls periodisch und können über ein Mikrofon in ein konzentrationsproportionales elektrisches Signal umgesetzt werden. Während der Messung ist die Zelle durch zwei Magnetventile verschlossen, um die Druckerhöhung als meßbaren Effekt zu ermöglichen.

Marktübliche Geräte mit diesem Meßprinzip erreichen laut Herstellerangaben eine Reproduzierbarkeit von 0.5 % und einen Gesamtfehler (ohne Nachkalibrieren) unter ± 5 % (vom Meßbereichsendwert, pro Jahr).

4.5.2. Atmosphärisches Kohlendioxid

Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre beträgt zur Zeit etwa 370 ppm im Jahresmittel. Dieser Wert unterliegt deutlichen periodischen Schwankungen. Im Jahreszeitenrhythmus ändert sich die Konzentration auf der nördlichen Hemisphäre um 15 ppm²⁴⁾ mit einem Maximum im April und einem Minimum im Oktober. Bedeutend größer als die jahres- sind die tageszeitlichen Schwankungen des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes. Die Konzentration kann bei Windstille am Tage in dichten Pflanzenbeständen (Wälder) als Folge der Photosynthese auf Werte unter 250 ppm absinken. Bei Nacht dagegen kann die Konzentration durch die Atmungsprozesse von Vegetation und Edaphon auf Werte über 400 ppm ansteigen. Die Ausbildung von bodennahen Inversionsschichten kann diesen Effekt noch zusätzlich durch die Verhinderung eines vertikalen Gasaustausches verstärken. In Extremfällen können Kohlendioxidkonzentrationen von über 1000 ppm gemessen werden. Beispielt sind hier Konzentrationsmessungen über einem Dauergrünland angeführt (Abb. 52).

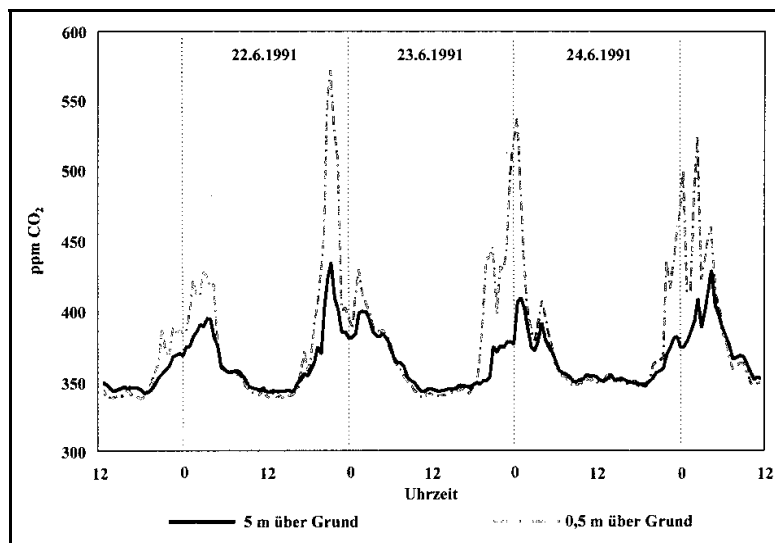


Abb. 52: Tagesgänge der CO₂-Konzentration in unterschiedlichen Höhen über einem Dauergrünland-Ökosystem (aus GRÜNHAGE *et al.* 1994)

Begasungsexperimente, die dem zu beobachtenden Pflanzenbestand lediglich eine zeitlich konstante, angehobene Spurengaskonzentration ($C_{\text{elev}} = \text{const}$) anbieten, bilden die Natur nur unvollkommen nach. In aussagekräftigen Experimenten müssen die dynamischen

²⁴ Auf der Südhalbkugel beträgt die jährliche Amplitude nur etwa 5 ppm.

Konzentrationsprofile nachgebildet werden. Hierfür ist die Addition eines festen Betrages der Aufreicherung ($C_{\text{elev}} = C_{\text{amb}} + A$) ein häufig angewendetes Verfahren.

Aber auch diese Addition eines festen Aufreicherungsbetrages ist nur ein unzureichendes Verfahren, denn es verschiebt die Konzentrationskurve lediglich um einen bestimmten Betrag nach oben, ohne die mit dem steigenden Mittelwert ebenfalls steigende Amplitude der Schwankungen zu vergrößern. In einem wirklichkeitsnahen Experiment darf eine Anhebung der Konzentrationskurve nur proportional erfolgen ($C_{\text{elev}} = n * C_{\text{amb}}$). Eine gegebene Begasungsaufgabe läßt sich dabei dann einfach durch den Proportionalitätsfaktor (n) ausdrücken: Die Zielkonzentration ist immer ein n -faches der Umgebungskonzentration.

4.5.3. Relative Konzentration

Durch Umstellung der Gleichung ist erkennbar, daß dieser Faktor (n) als eine relative Konzentration ($n = C_{\text{elev}} / C_{\text{amb}}$) betrachtet werden kann. Als Beispiel sei ein gegebenes Begasungsexperiment mit einer 30 %-igen Überhöhung der Zielkonzentration betrachtet: Die Konzentration soll zu jedem Zeitpunkt das 1.3-fache der Umgebungskonzentration sein.

Kalibriert man nun ein Konzentrationsmeßgerät direkt mit Umgebungsluft auf die Anzeige 100,0 (dimensionslos), dann wird jede folgende Konzentrationsmessung automatisch als relative (auf die Umgebungsluft bezogene) Konzentration angezeigt. Die Aufgabe des entsprechenden Regelkreises wäre also ganz einfach die Aufrechterhaltung einer relativen Konzentration ($n = \text{const}$). Der Regler müßte nicht als Folgeregler einem sich beständig ändernden Sollwert "hinterherlaufen", er würde im Gegenteil, eigentlich gar nicht "merken", daß sich die wirkliche Ringkonzentration (in absoluten Einheiten) laufend ändert.

4.5.4. Kalibration

Der übliche Weg, sowohl die Umgebungskonzentration als auch die Istkonzentration im Ring mit einem sorgfältig kalibrierten Gerät zu erfassen, ist aufwendig und unnötig. Das direkte Messen des Spurengases als relative Konzentration mit einem mit Umgebungsluft kalibrierten Gerät stellt eine sehr nützliche Vereinfachung der Meß- und Regeltechnik dar, ohne daß damit irgendwelche Nachteile verbunden wären. Neben einer vereinfachten Reglerstruktur, liegt der Hauptvorteil in der Tatsache, daß keine kostspieligen Kalibriergase benötigt werden.

Wie oben dargelegt wurde, kann zur Kalibration des Konzentrationsmeßgerätes für den oberen Kalibrationspunkt (100 %-Punkt) die aktuelle Umgebungsluft verwendet werden. Dadurch liegen die Meßergebnisse sofort in der benötigten relativen Einheit, auf die aktuelle Umgebungsluft bezogen, vor.

Zur Nullpunktkorrektur wäre zusätzlich ein weiteres Kohlendioxid-freies Kalibriergas erforderlich. Dies kann aber ohne großen Aufwand mit einer Natronkalk-Patrone (*scrubber*) aus Umgebungsluft hergestellt werden.

Eine Kalibration mit nur zwei Punkten (Nullpunkt, 100 %-Punkt) ist für die Anwendung ausreichend, denn das photoakustische Verfahren ist in dem gewünschten Meßbereich (100 % bis 150 %) hinreichend linear.

4.5.5. Autokalibrator

Das turnusmäßige Kalibrieren muß mit einem Meßstellenwechsler geschehen, der die Hauptmessung kurzfristig unterbricht und je nach Bedarf auf die beiden "Kalibrationsgase", Leerwert und Umgebungsluft, schaltet. Dabei muß die Wahl des Zeitpunktes für die beiden Kanäle möglich sein. Die Nullpunkt-Kalibration wird wegen der Stabilität des Meßgerätes höchstens einmal täglich nötig sein. Dagegen muß der Hochpunkt viel häufiger (etwa stündlich) gemessen werden, um der natürlichen Variation der Umgebungsluft mit genügender zeitlicher Auflösung zu folgen. Hierbei sind ggf. die Kalibrationspunkte vormittags und spätnachmittags etwas enger (halbstündlich) zu legen, weil zu diesen Tageszeiten die stärksten Änderungen der Umgebungskonzentration auftreten.

Wichtig ist auch, daß der Wechsler für die unterschiedlich langen Meßgaswege auch entsprechend bemessene Voransaugzeiten zuläßt. Für diese Zeiten gilt: So kurz wie möglich, so lang wie nötig. Dieser Wechsler muß zusätzlich ein elektrisches Signal zur Identifikation der aktuellen Meßstelle an den nachgeschalteten Rechner (Speicherprogrammierbare Steuerung, SPS) abgeben, damit dieser das Meßergebnis richtig zuordnen kann.

4.5.6. Referenzluft

Wenn die Umgebungsluft als Kalibriergas für die 100%-Einstellung des relativ messenden Gasmeßgerätes verwendet werden, dann müssen zu diesem Zweck Ansaugpunkte festgelegt werden, die eine für das Versuchsgelände repräsentative Luft ansaugen können. Dabei sind Punkte an Straßen ungeeignet: Durch den Straßenverkehr muß hier mit örtlich stark erhöhten Kohlendioxidwerten gerechnet werden. Ebenso ungeeignet sind Ansaugpunkte in der Nähe von Baumgruppen: Hier kann es an windstillen, sonnigen Tagen durch die heftige Photosynthese zu deutlich abgesenkten Konzentrationen kommen.

An einem Ansaugpunkt der in räumlicher Nähe zu den Begasungsanlagen steht, kann bei ungünstiger Windrichtung kontaminierte Abluft angesaugt werden. Dieses wäre für eine Begasungsanlage eine besonders kritische Situation. Eine durch leeseitige Abluft eines Ringes kontaminierte Referenzluftprobe würde nicht nur einen vorübergehenden, falschen Sollwert hervorrufen, sondern durch eine "Rückkopplung" die Begasung auf höchste Werte aufschaukeln. In einem solchen Fall würde der Regelkreis zunächst die Ringkonzentration ordnungsgemäß anheben. Die damit verbundene stärkere Abgasschleppung würde aber wiederum eine erhöhte Umgebungskonzentration vortäuschen und ein weiteres Anheben des Reglers induzieren. Dieser Vorgang der beständig steigenden Gasfreisetzung würde sich hochschaukeln bis in die Begrenzung durch das Versorgungssystem.

Die Bereitstellung von nicht kontaminierter Umgebungsluft ist also von entscheidender Bedeutung für die Funktion der Begasung. Um das Versuchsfeld herum müssen dafür mehrere Ansaugpunkte existieren, die in Abhängigkeit von der aktuellen Windrichtung auf eine Ringleitung geschaltet werden. Jeweils die luvständigen Punkte wären aktiv.

4.6. Spurengasdosierung

Zur Gasdosierung innerhalb eines Regelkreises eignen sich motorgetriebene Feindosierventile (MFC, *mass flow controller*) nur bedingt. Die MFC sind träge, ihre Laufzeit von Anschlag zu Anschlag beträgt oft mehrere Minuten. Wie bereits im Kapitel 3.4.3 dargelegt, sind diese Totzeiten aber im Interesse einer optimalen Regelung unbedingt zu vermeiden. Eine Verbesserung des Zeitverhaltens der Spurengasdosierung muß durch möglichst schnell reagierende Verfahren erreicht werden.

Das Einstellen von Gasströmen in Abhängigkeit von digitalen Informationen (Stellsignal vom Regler) ähnelt dem Verfahren, elektrische Ströme aus digitaler Information zu bilden. Für die Umwandlung von digitaler Information in elektrische Ströme verwendet man in der Elektronik sogenannte Digital/Analog-Wandler. Zwei Methoden finden hier im wesentlichen Anwendung:

- Das R/2R-Netzwerk und
- die PWM-Technik.

Die R/2R-Methode hat ihren Namen von dem hierbei verwendeten Widerstandsnetzwerk, das aus Widerständen mit nur zwei verschiedenen Werten aufgebaut ist. Zur D/A-Wandlung werden bei der R/2R-Methode binär-gewichtete Ströme von dem digitalen Eingangssignal auf den Ausgang geschaltet. Eine elektronische Anwendung dieses Wandlers im Rahmen dieser Arbeit ist in der Abb. 78 dargestellt (vgl. Kap. 6.2.2).

Bei dem PWM-Verfahren (*puls width modulation*) wird eine Folge von Impulsen gleicher Amplitude, aber verschiedener Länge gebildet und aufsummiert. Dieses Verfahren ist in der Elektronik ebenfalls weit verbreitet zur Umwandlung von digitalen in analoge Signale. Es werden deshalb hier die entsprechenden Begriffe wiedergegeben.

Die typische Wellenform des digitalen Signales über die Zeit ergab die Bezeichnung Rechteckwelle (*square wave*). Der stromführende Zustand heißt Puls (*puls*) und seine Länge Pulsbreite (*puls width*). Der stromlose Zustand heißt Pause. Das Zeitverhältnis wird Puls/Pause-Verhältnis oder auch Tastverhältnis (*duty cycle*) genannt. Die Beeinflussung des Tastverhältnisses einer Rechteckwelle mit fester Frequenz und Amplitude heißt Pulsbreitenmodulation (PWM, *pulse width modulation*). Je höher die Grundfrequenz des PWM-Signales umso leichter ist die Filterung, das heißt umso kleiner ist die Restwelligkeit (*ripple*) des analogen Stromes. Zur Umwandlung von PWM-Signalen in analoge Signale werden analoge Tiefpaßfilter verwendet.

Eine gedankliche Anleihe aus der Elektrotechnik führte zu den beiden hier beschriebenen Möglichkeiten der rechnergesteuerten Gasdosierung - sie sind in Analogie zu diesen aus der Elektronik bekannten Verfahren abgeleitet und werden nachfolgend beschrieben.

4.6.1. Geschaltete Drosselventile

Durch die Parallelschaltung von binär gestuften Drosselventilen (pneumatischen Widerständen) in verschiedenen Kombinationen lassen sich auf einfache Weise Gasströme von unterschiedlicher Stärke einstellen. Dieses Prinzip ist eine Abwandlung der oben beschriebenen R/2R-Methode. Als Bezeichnung für diese Anordnung wurde ELPNEU (ELEktro-PNEUmatischer Wandler) gewählt. Nachfolgende Abb. 53 zeigt das Technologieschema.

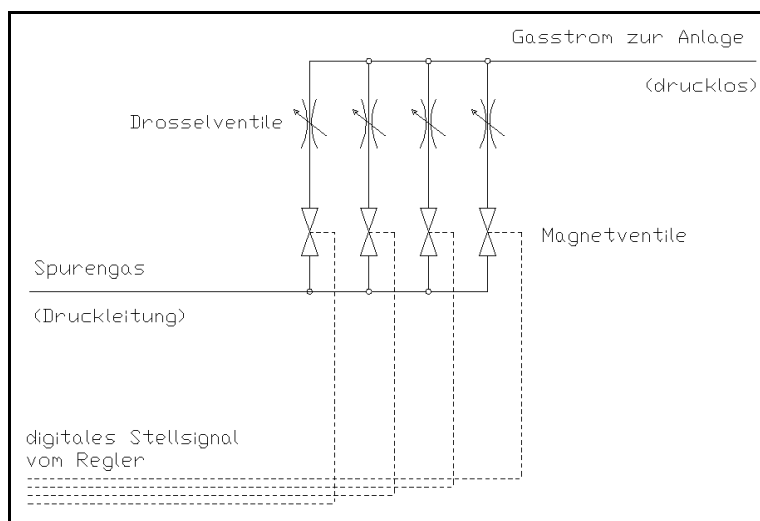


Abb. 53: Das Stellgerät ELPNEU für die Gasdosierung

Eingang zu dem Stellgerät ist der digitale Ausgang eines Reglers (Stellsignal) hier im Beispiel mit einer Breite von 4 *bit*. Mit diesen vier Leitungen werden vier Magnetventile (MV_a bis MV_d) betätigt, deren Durchfluß mit Drosselventilen (D_a bis D_d) individuell einstellbar ist. Wenn die einzelnen Volumenströme in geometrischer Folge abgestuft werden, dann gilt für den Gesamtdurchfluß:

$$y = f_e \cdot (a \cdot 2^0 + b \cdot 2^1 + c \cdot 2^2 + d \cdot 2^3)$$

Die binären Variablen (a, b, c und d) beschreiben hier den Schaltzustand ("0"=Aus, "1"=Ein) der Magnetventile. Der Kalibrationsfaktor (f_e) ist eine Systemkonstante. Sein Betrag ist von dem vorherrschenden Druckunterschied und den Strömungswiderständen abhängig. Durch geeignete Kombination von entsprechenden Drosseln kann ein Volumenstrom von 0 bis Maximum in 16 Schritten eingestellt werden. Diese Auflösung (6 %) ist für die gegebene Regelaufgabe ausreichend. Für höhere Auflösung können auf die beschriebene Weise, mit z.B. drei weiteren Ventilen, Dosierschritte von weniger als 1 Prozent realisiert werden.

Zum Abgleich müssen die Ventile nacheinander angesprochen werden und die dazugehörigen Drosseln mit der Hilfe eines Volumenstrommeßgerätes (Rotameter) eingestellt werden. Der

Gasstrom durch ein einzelnes Drosselventil ist in guter Näherung der Wurzel aus der Druckdifferenz proportional, d.h. für praktische Anforderungen relativ unabhängig von kleinen Druckschwankungen an der Ein- oder Ausgangsseite der Drossel.

Ein Vorteil ist der einfache Anschluß an Regler, die einen binären Ausgang haben. Ist dieser Ausgang niederohmig, wie bei einer SPS (OB251, S5-95U, SIEMENS), dann können die Magnetventile direkt angeschlossen werden. Ein Nachteil des Verfahrens ist die Tatsache, daß ein Abgleich einzelner Drosseln im Betrieb nur schwer möglich ist.

4.6.2. Pulsbreiten-Modulation

Eine andere Art, einen Gasstrom elektrisch zu beeinflussen, besteht in der Modulation der Einschaltdauer eines Ventiles. Ein Abgleich ist dabei nicht erforderlich. Durch periodisches Umschalten eines Ventils zwischen den beiden Grundzuständen, geöffnet und geschlossen, kann der zeitliche Mittelwert eines Stoffstroms (Q) auf einfache Art beeinflußt werden. Ist das Ventil offen, dann ist der Stoffstrom maximal ($Q = 100\%$). Bei geschlossenem Ventil ist der Stoffstrom unterbrochen ($Q = 0\%$). Das Zeitverhältnis der beiden Schaltzustände bestimmt die im Mittel ausgebrachte relative Stoffmenge in Prozent, bezogen auf den Stoffstrom bei voll geöffnetem Ventil (100 %).

Ein Nachteil ist hierbei die Welligkeit (*ripple*) des Gasstromes. In der Elektronik werden R/C-Glieder zur Glättung eingesetzt. In der vorliegenden Anwendung kann die Regelstrecke durch ihr speicherndes Verhalten die Aufgabe eines Filters ausfüllen. Die optimale Frequenz müßte in einem Versuch ermittelt werden.

Vorab läßt sich aber bereits feststellen, daß die realen Magnetventile durch ihre mechanische Trägheit kaum mehr als ein Schaltspiel pro Sekunde erlauben. Auch ihre auf eine endliche Anzahl Schaltspiele beschränkte Lebensdauer setzt der Frequenz sicher deutliche Grenzen. Die Haltbarkeit eines Magnetventils wird durch die Anzahl der möglichen Schaltspiele (Größenordnung: $2 \cdot 10^7$) beschrieben. Während der projektierten Lebensdauer der Begasungsanlage (über 10 Jahre) darf es zu keinen verschleißbedingten Ausfällen kommen. Daraus läßt sich eine maximale PWM-Frequenz abschätzen. Verteilt sich die Dosierung auf n Ventile, dann erhöht sich die Grenzfrequenz auf das n -Fache.

Weiterhin ist die Flankensteilheit eines Magnetventiles nur endlich, d.h. das Ventil benötigt für den Übergang zwischen den Grundzuständen eine gewisse Zeit (typ. 100 mSec). Während dieser Zeit ist der Strömungswiderstand ungewiß. Um den Einfluß der Übergänge gering zu halten, muß im Vergleich zu den Anstiegszeiten, die Dauer der Schaltzustände sehr groß sein.

4.6.3. Vergleich der Stellgeräte

Die beiden Verfahren haben beide ihre besonderen Vor- und Nachteile. Tabelle 7 stellt die wichtigsten Kriterien nebeneinander. Eine Entscheidung zu Gunsten des einen oder anderen Verfahrens konnte erst durch praktische Erfahrung mit beiden Varianten gewonnen werden.

Tab. 7: Vor- und Nachteile rechnergesteuerter Gasdosierungsmöglichkeiten im Vergleich

Kriterium	ELPNEU	PWM
Welligkeit Gasstrom	(++)	(—)
Verschleiß Ventile	(++)	(—)
Software-Aufwand	(++)	(—)
Auflösung	(—)	(++)
Kalibrierung	(—)	(++)
Langzeitdrift	(—)	(++)

ELPNEU: elektropneumatischer Digital/Analog-Wandler

PWM: Pulsbreiten-Modulation

4.7. Funkuhr zur Tag/Nacht-Umschaltung

Eine Begasung von Pflanzen mit dem Spurengas Kohlendioxyd ist nur zu Tageszeiten sinnvoll, weil die Pflanzen das angebotene Spurengas nur unter dem Einfluß des Tageslichts in ihrem Stoffwechsel umsetzen können. Eine Begasungsanlage für Kohlendioxid sollte also frühestens mit Sonnenaufgang (*sunrise*, SR) eingeschaltet und zum Sonnenuntergang (*sunset*, SS) wieder abgeschaltet werden. Bei bestimmten botanischen Fragestellungen kann es sogar auch sinnvoll sein, die Begasungszeit enger zu fassen und z.B. von SR+60 bis SS-60 zu begasen.

Zum Schalten der Begasungs-Anlage ist eine einfache elektrische Schaltuhr aus mehreren Gründen ungeeignet. Erstens haben konventionelle Schaltuhren den Nachteil, daß in längerem Betrieb Gangfehler auftreten, die ein regelmäßiges Überprüfen und Nachstellen der Uhr erforderlich machen. Zweitens muß das gewünschte Zeitfenster der Begasung regelmäßig von Hand an den sich über das Jahr stetig ändernden Sonnenlauf angepaßt werden. Um diese Nachteile zu umgehen, muß zur Schaltung einer Begasungsanlage eine Funkuhr eingesetzt werden. Eine Funkuhr hat praktisch keine Gangabweichung und ermöglicht die Berechnung des aktuellen Sonnenstandes aus dem zusätzlich zur Uhrzeit übermittelten Datum.

Das Funksignal für diese Funkuhren wird von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig erzeugt. Zu den Aufgaben der PTB gehört es, die Sekunde als Einheit der Zeit darzustellen und, darauf basierend, die verbindliche "Gesetzliche Zeit" zu verbreiten. Als Frequenznormal dienen bei der PTB sog. "Atomuhren", in denen das Alkalimetall Cäsium in der Gasphase zwischen zwei Anregungszuständen pendelt. Die dabei erzeugte elektromagnetische Welle²⁵⁾ wird über elektronische Teiler herabgesetzt und dient als Zeit- und als Frequenznormal.

²⁵⁾ Die Frequenz beträgt 9,1926317700 Gigahertz.

Die Verbreitung dieser Zeitinformation erfolgt drahtlos über einen Sender, der der Deutschen Bundespost gehört und in Mainflingen, ca. 75 km südöstlich von Frankfurt, steht. Dieser Sender arbeitet im Langwellenbereich auf der Frequenz²⁶⁾ 77,5 kHz und trägt die Bezeichnung DCF77. Er ist im Umkreis von 1500 bis 2000 km von Frankfurt gut zu empfangen. Der Empfang des Senders ist gebührenfrei, gemäß der allgemeinen Genehmigung zum Errichten und Betreiben von Empfangsfunkanlagen für den Empfang von Normalfrequenz- und Zeitzeichensendungen²⁷⁾.

Tab. 8: Belegung der Daten-Bit im Zeittelegramm

Nr	Bezeichnung
0	immer "0"
1..14	nicht belegt
15	Reserveantenne
16	Zeitumstellung (Ankündigung)
17	Sommerzeit "1", Winterzeit "0"
18	immer "0"
19	Schaltsekunde (Ankündigung)
20	immer "0"
21..24	Minute, Einer (BCD-codiert)
25..27	Minute, Zehner (BCD-codiert)
28	Prüfbit (<i>parity odd</i>)
29..32	Stunde, Einer (BCD-codiert)
33, 34	Stunde, Zehner (BCD-codiert)
35	Prüfbit (<i>parity odd</i>)
36..39	Kalendertag, Einer (BCD-codiert)
40, 41	Kalendertag, Zehner (BCD-codiert)
42..44	Wochentag
45..48	Monat, Einer (BCD-codiert)
49	Monat, Zehner (BCD-codiert)
50..53	Jahr, Einer (BCD-codiert)
54..57	Jahr, Zehner (BCD-codiert)
58	Prüfbit (<i>parity odd</i>)

Der Sender DCF77 sendet im Dauerbetrieb und senkt dabei im Sekundentakt kurzzeitig seine Amplitude ab. Diese kurzen Absenkungen nennt man Sekundenmarken; sie können nur zwei Längen haben: entweder 0,1 Sekunden oder 0,2 Sekunden. Diese Zustände entsprechen der digitalen Wertigkeit "0" (*low*) oder "1" (*high*). Im Verlauf einer Minute gibt es 59 solcher Sekundenmarken. Die 60-te Marke wird nicht gesendet; das ist das Synchronisationssignal für

²⁶⁾ Diese Trägerfrequenz ist auch aus dem Cäsium-Normal der PTB abgeleitet und dem entsprechend hochgenau.

den Anfang der nächsten Impulsfolge. Diese binäre Zeichenkette aus 59 Impulsen (59 *bit*) bezeichnet man als Zeitlegramm. Es enthält in BCD-kodierter²⁸⁾ Form die Uhrzeit, das Datum und weitere Informationen. Tabelle 8 zeigt die Belegung der Daten-*bit* im Zeitlegramm.

Die Aufgabe einer Funkuhr ist es, diese Daten zu empfangen, zu entschlüsseln und sie darzustellen oder auszuwerten. Das übermittelte Datum (Tag, Monat) ermöglicht dabei die Berechnung der täglichen Zeiten für Sonnenaufgang (*sunrise*, SR) und Sonnenuntergang (*sunset*, SS). Durch Vergleich der aktuellen Uhrzeit (Stunde, Minute) mit SR und SS kann das Schaltsignal (Ein/Aus) für die Begasungsanlage gebildet werden.

²⁷ Amtsverfügung Vfg 287, (1978).

²⁸ BCD (*binary coded decimal*) Ist ein veraltetes Verfahren zur Binär-Kodierung von Dezimalzahlen in 4-*bit* breite Gruppen.

5. Prototyp

Vor der Verwirklichung des geplanten Freilandsystems mußte zunächst geklärt werden, ob das erdachte aktive Versorgungssystem (CAP, *circular active plenum*) mechanisch realisierbar ist und die erwarteten aerodynamischen Eigenschaften aufweist. Desweiteren sollten die zusätzlichen Komponenten der Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR) im Betrieb erprobt werden. Würde eine Spurengasdosierung mit binär gewichteten Gasströmen oder eine Pulsbreitenmodulation bessere Ergebnisse liefern? Wie stabil arbeitet das Gasmessgerät? Zusätzlich sollten Erfahrungen mit der gewählten SPS und dem Monitor/Wechsler-System gesammelt werden. Aus diesem Grund wurde zuerst eine kleine Begasungsanlage im Technikumsmaßstab aufgebaut.

5.1. Das neue isotrope *Plenum*

5.1.1. Gesamtansicht

Die Abb. 54 zeigt ein Foto der laufenden Anlage in der Montagehalle. Die Anlage ist aus verzinktem Stahlblech hergestellt und hat eine Höhe von *circa* zwei Metern. Der Durchmesser beträgt ebenfalls zwei Meter. Diese Abmessungen entsprechen etwa denen einer klassischen *open-top*-Kammer (OTC).



Abb. 54: Gesamtansicht des Prototyps in der Montagehalle (Foto: W. BRÜCK)

Das wesentliche Merkmal des Prototypen ist der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, ringförmige Kanal der Hauptluftversorgung, dessen Erprobung im Mittelpunkt des Interesses lag. Dieses sogenannte CAP (*circular active plenum*) ist aus sechs baugleichen Modulen aufgebaut. Jedes Modul ist mit einem Ventilator bestückt und trägt einen Ansaugstutzen und einen Luftauslaß (VVP, *vertical vent pipe*). Sowohl die Ansaugstutzen als auch die VVP sind individuell über pneumatisch betriebene Luftklappen zu betätigen und sitzen versetzt, abwechselnd mit der Außen- und der Innenkante bündig. In der Abb. 55 ist ein Pärchen dieser pneumatischen Klappen abgebildet. Die hintere Klappe trägt einen Luftauslaß, die vordere ist oben offen und dient als Ansaugstutzen. Die Klappen werden individuell von der Azimutsteuerung (*upwind control*) geschaltet. Zu diesem Zweck sitzt an jeder Klappe ein Magnetventil für die Steuerluft der Arbeitsbeitszylinder. Die zum Betrieb erforderliche Druckluft stand in der Montagehalle zur Verfügung. Die Ventile sind in einer Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung direkt an den Steuerrechner (SPS) geführt. Die elektrischen und pneumatischen Leitungen liegen in einem Leerrohr auf dem ringförmigen Kanal.



Abb. 55: Detailansicht Pneumatische Klappen

Im Inneren der Begasungsanlage ist eine Platte so montiert, daß sie mit der Oberkante des Versorgungskanals abschließt. Diese Arbeitsfläche trägt im Foto zur Demonstration Pflanzgefäße mit *Triticum aestivum*. Oberhalb dieser Gefäße, bis hinauf an die Oberkante der VVP, können die Windverhältnisse in weiten Grenzen eingestellt werden.

Die sechs Segmente und die Luftauslässe wurden von einem Fachbetrieb für Lüftungstechnik (Fa. DSR GmbH, Butzbach) nach einer technischen Skizze mit Bemaßung innerhalb weniger Tage gefertigt. Auf die Innenwände der Segmente sind an einer Seite Blechlaschen aufgenietet,

so daß diese Wände beim Zusammenbau des Ringes ineinander gesteckt werden können und dadurch die beiden Halbkanäle genügend luftdicht voneinander trennen. Zum mechanischen Zusammenbau der Anlage waren etwa zehn Arbeitsstunden erforderlich und für die elektrische Verdrahtung wurden weniger als 20 Stunden aufgewendet.

5.1.2. Luftauslässe

Experimente an einem Expositionssystem mit einer für das Freiland typischen Luftführung sind in einer Montagehalle naturgemäß kaum möglich, denn in einem geschlossenen Raum fehlen die natürlichen seitlichen Winde. Eine Verdünnungslüftung, wie sie für *plume*-Systeme typisch ist, konnte also am Prototypen nicht simuliert werden. Durch die relativ hohe installierte Ventilatorleistung (etwa 2 kW²⁹) war es aber möglich, mit Verdrängungslüftung zu experimentieren und dadurch die aerodynamischen Grenzen des neuen aktiven *plenum* (CAP) qualitativ zu erkunden. Bei der Verdrängungslüftung werden größere Luftmassen pro Zeiteinheit umgesetzt, was zu höheren Drücken und Windgeschwindigkeiten führt. Für diesen Zweck wurden deshalb besondere VVP gebaut.

Im Gegensatz zur Verdünnungslüftung tritt die Luft bei der Verdrängungslüftung gleichmäßig über die Eintrittsfläche in den Raum ein, durchströmt den Raum und verläßt ihn auf der gegenüberliegenden Seite. Thermische Auftriebskräfte sind dabei durch ihren geringen Betrag vernachlässigbar (kleine Archimedes-Zahl). Die Luftauslässe (VVP, *vertical vent pipe*) sind für die Einstellung des Windprofils die wichtigsten Komponenten. Gesamthöhe und Gestalt bzw. Anzahl der Düsen bestimmen die Wurfweite, die Strahlbreite (Streuung) sowie die horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsgradienten. Die Abbildungen 56 (Foto) und 57 (Zeichnung) zeigen den Aufbau der VVP. Der Grundkörper ist ein 1,40 m langes Rohr mit 20 cm Durchmesser. Dieses Rohr ist oben durch einen Deckel verschlossen und hat auf der Längsseite einen keilförmigen 90 cm langen Schlitz. Dieser Schlitz ist am geschlossenen Ende des Rohres 7,0 cm breit und verjüngt sich bis auf 4,0 cm am anderen Ende. Auf den Luftauslaßschlitz ist ein Metallkragen von 10 cm Breite aufgesetzt, der durch 16 Bleche (Gleichrichterbleche) in 17 rechteckige Düsen eingeteilt wird.

Um die erreichbaren Windprofile abzuschätzen, wurde nur eine einzelne VVP aktiviert. Mit einem Handanemometer wurde die Windgeschwindigkeit in halber Höhe, etwa 80 cm über der Tischplatte, an 30 Positionen in einem Raster von 50 cm Abstand vermessen. Im Bereich der ersten 50 cm, dem sogenannten Kernstrahlbereich, sind keine Daten erfaßt worden, weil in diesem Bereich große Geschwindigkeitsgradienten existieren, die schwer zu vermessen sind. Aus der gemessenen Punkteschar wurden die Isolinien interpoliert. Die Abb. 58 zeigt das Ergebnis für eine mittlere Leistung der Ventilatoren. Die Leistung der Drehstrom-Ventilatoren im CAP konnte über einen Frequenzumrichter stufenlos verstellt werden und bei voller

²⁹ Das BNL-FACE hat bei 400-facher Fläche eine Ventilatorleistung ähnlicher Größenordnung.

Leistung der Ventilatoren konnten noch in zwei Meter Entfernung von der VVP Windgeschwindigkeiten von über 10 m/s beobachtet werden.

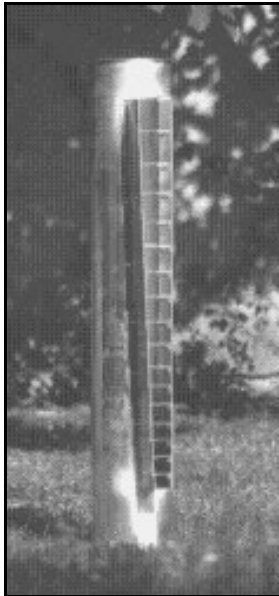


Abb. 56: Fotografie einer VVP

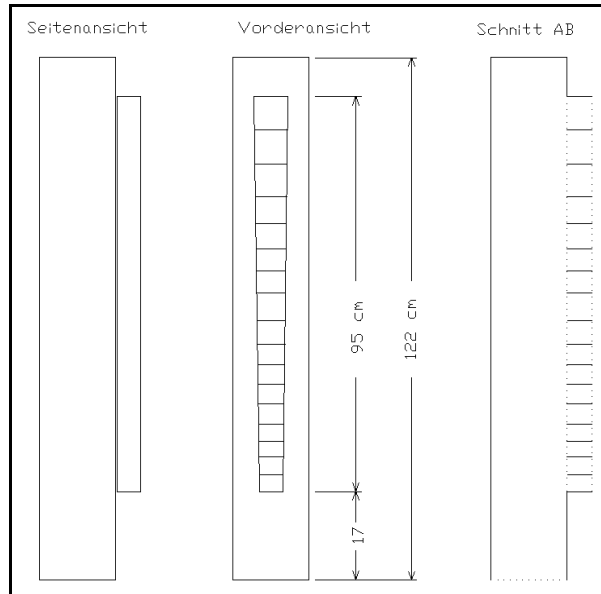


Abb. 57: Technische Zeichnung der VVP

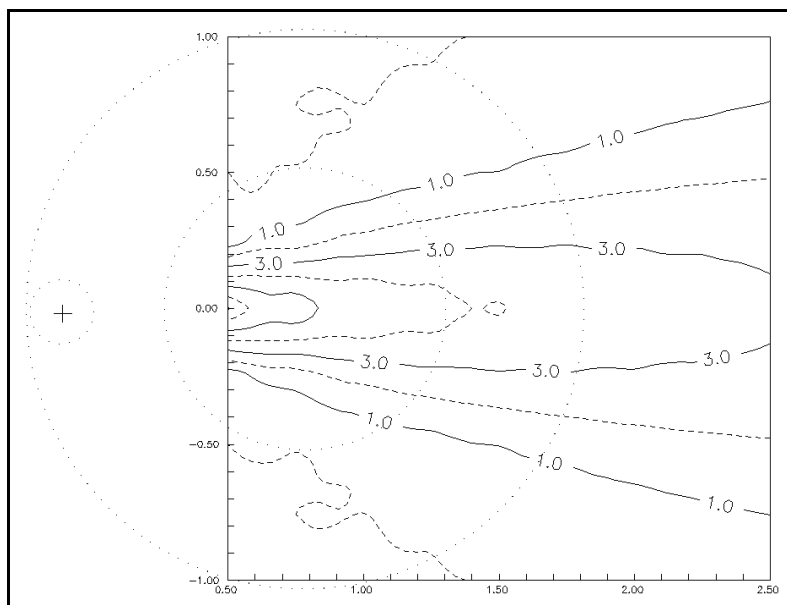


Abb. 58: Horizontales Windprofil im Prototyp

(Es sind die Umrissse der Begasungsanlage und der aktive Luftauslaß eingeblendet.
Weitere Details wurden zur besseren Übersicht weggelassen.)

Die Versuche mit der oben beschriebenen VVP wurden aber nicht weiter fortgeführt, weil das Ziel der Arbeit ein Expositionssystem mit Verdünnungs- und nicht Verdrängungslüftung war. Das wichtige Ergebnis der Versuche lag in der Bestätigung, daß das im Rahmen dieser Arbeit

entwickelte "aktive, isotrope" Versorgungssystem (CAP, *circular active plenum*) auch bei extremen Drücken und Strömungsgeschwindigkeiten zufriedenstellend arbeitet.

5.2. Speicherprogrammierbare Steuerung

Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) gelten heute als Kernstück jeder Automatisierung. Mit diesen Geräten können je nach Funktionsumfang Automatisierungsaufgaben wie Steuern, Regeln, Rechnen, Bedienen und Beobachten, Melden und Protokollieren wirtschaftlich ausgeführt werden. SPS haben die Struktur von Rechnern (CPU, RAM, I/O & Bus), jedoch ist die Peripherie auf der Ein- und Ausgabeseite sowie die bereitgestellte Programmiersprache auf die besonderen Belange der Steuerungstechnik ausgerichtet. SPS sind also anwendungsorientierte, adaptierte Systeme, mit denen sich relativ einfach Steuerungen realisieren lassen. Besondere Vorteile sind die geringe Größe und die robuste Bauart für rauhe Umgebung im Langzeitbetrieb sowie die einfache Montage.

Aus den am Markt verfügbaren SPS wurde die S5-95U der Firma SIEMENS AG gewählt (vgl. Abb. 59). Zum Anschluß der Prozeßperipherie hat die S5-95U (Grundausstattung) 32 digitale I/O-Leitungen, acht analoge Eingänge, einen analogen Ausgang, zwei Zählengänge und vier Alarmeingänge (*interrupt*). Damit ist sie für den vorliegenden Anwendungsfall bestens ausgestattet. Der besondere Vorteil der gewählten Steuerung ist jedoch der integrierte, universelle PID-Reglerbaustein.

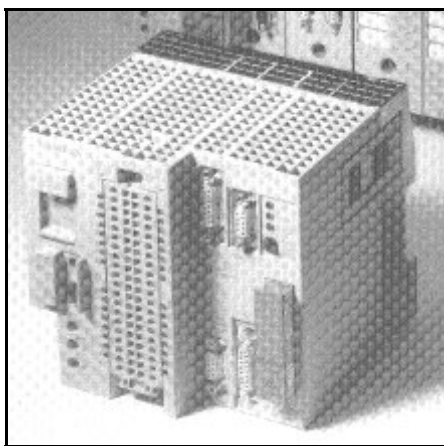


Abb. 59: Automatisierungsgerät S5-95U

Es übernimmt neben der Azimutsteuerung auch die Regelung der Spurengaskonzentration.
(Foto: SIEMENS AG)

Die Programmiersprache auf dieser SPS hat den Namen STEP5. Unterprogramme werden in STEP5 als Bausteine bezeichnet. Fünf Typen (OB, PB, FB, SB & DB) sind vom Hersteller vorgegeben und haben unterschiedliche Eigenschaften. Die Organisationsbausteine (OB) verwalten das Anwenderprogramm und werden vom Betriebssystem automatisch ausgeführt. Der Aufruf erfolgt entweder zyklisch (OB1), durch *interrupt* (OB3), durch einen *timer* (OB13)

oder nur einmalig bei Programmstart (OB21). Die Programm- und Funktionsbausteine (PB, FB) können vom Programm aufgerufen werden und unterscheiden sich durch ihren Sprachumfang. Einige Bausteine sind bereits vorgefertigt, so die Gleitkomma-Operationen Multiplikation (FB242) und Division (FB243) und der universelle PID-Regler (OB251).

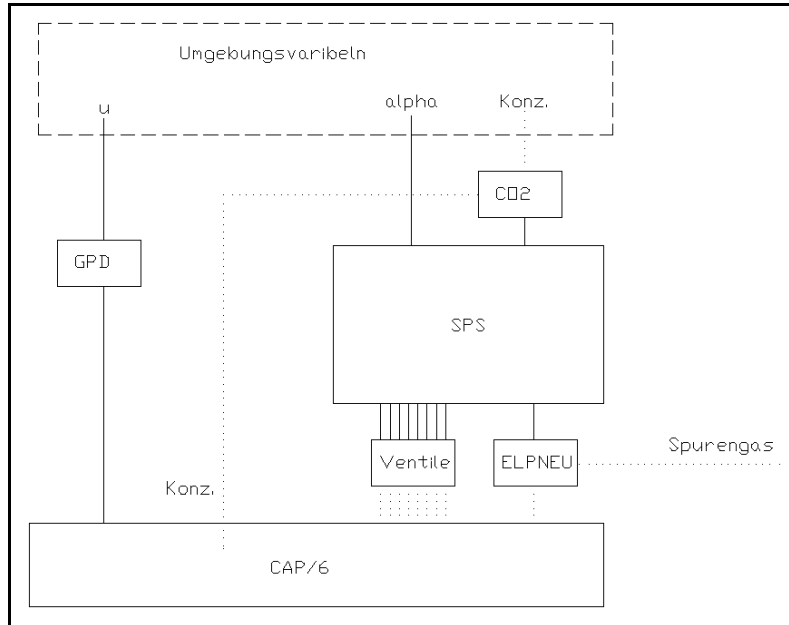


Abb. 60: Technologieschema des Prototyps (vereinfacht)
Die Azimutsteuerung und die Regelung werden gemeinsam von einer SPS ausgeführt.
(Gaswege gepunktet, Signalwege durchgezogen)

Die beiden fundamentalen Funktionen eines Expositionssystems, die Azimutsteuerung (*upwind control*) und die Konzentrationsregelung, wurden gemeinsam mit der SPS realisiert. Die Abb. 60 zeigt das Technologieschema des Prototypen. Die drei Umgebungsvariablen Windgeschwindigkeit, Spurengaskonzentration und Windrichtung steuern die Anlage. Die Windgeschwindigkeit (u) wirkt über einen separaten Frequenzumrichter (GPD) direkt auf die Ventilatoren und stellt über der Expositionsfläche die Windgeschwindigkeit ein. Die Windrichtung (α) wirkt über das Automatisierungsgerät (SPS) auf die Ventile der Luftauslässe (PB21..PB26) und steuert so die Richtung des Windvektors über der Expositionsfläche. Neben dieser Windrichtungsabhängigen Steuerung der Luftauslässe (Azimutsteuerung, *upwind control*) ist weiterhin die Übernahme der Meßergebnisse aus dem CO₂-Monitor (FB5) und ihre Umrechnung in eine relative Konzentrationseinheit, sowie die Regelung der CO₂-Konzentration (FB1, OB251) innerhalb des Begasungsringes Aufgabe des Automatisierungsgerätes. Zusätzlich zu diesen Hauptfunktionen können auch Hilfsprogramme zu Wartungs- und Testzwecken (T&M, *test and maintenance*) ausgeführt werden. Diese Programme (PB7..PB9) werden durch Drahtbrücken auf den Eingangsklemmen der SPS angewählt.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Steuerprogramm (PROTO.S5) ist im Anhang wiedergegeben. Die Abb. 61 zeigt eine Gliederung der Bausteine (Unterprogramm, *subroutine*). Nach einer Initialisierung (OB21) startet die endlose Hauptprogrammschleife (OB1), in der die Positionierung der Luftauslässe in Windrichtung (*upwind control*) bearbeitet (PB4) und die Ausgabe von internen Zwischenergebnissen (T&M) organisiert wird (PB1). Die Übernahme der Konzentrationsmeßwerte erfolgt *interrupt*-gesteuert (OB3), die dafür erforderlichen Taktimpulse werden vom Gasmeßgerät erzeugt. Weitere Einzelheiten sind in den nachfolgenden Abschnitten im Zusammenwirken mit der *hardware* beschrieben.

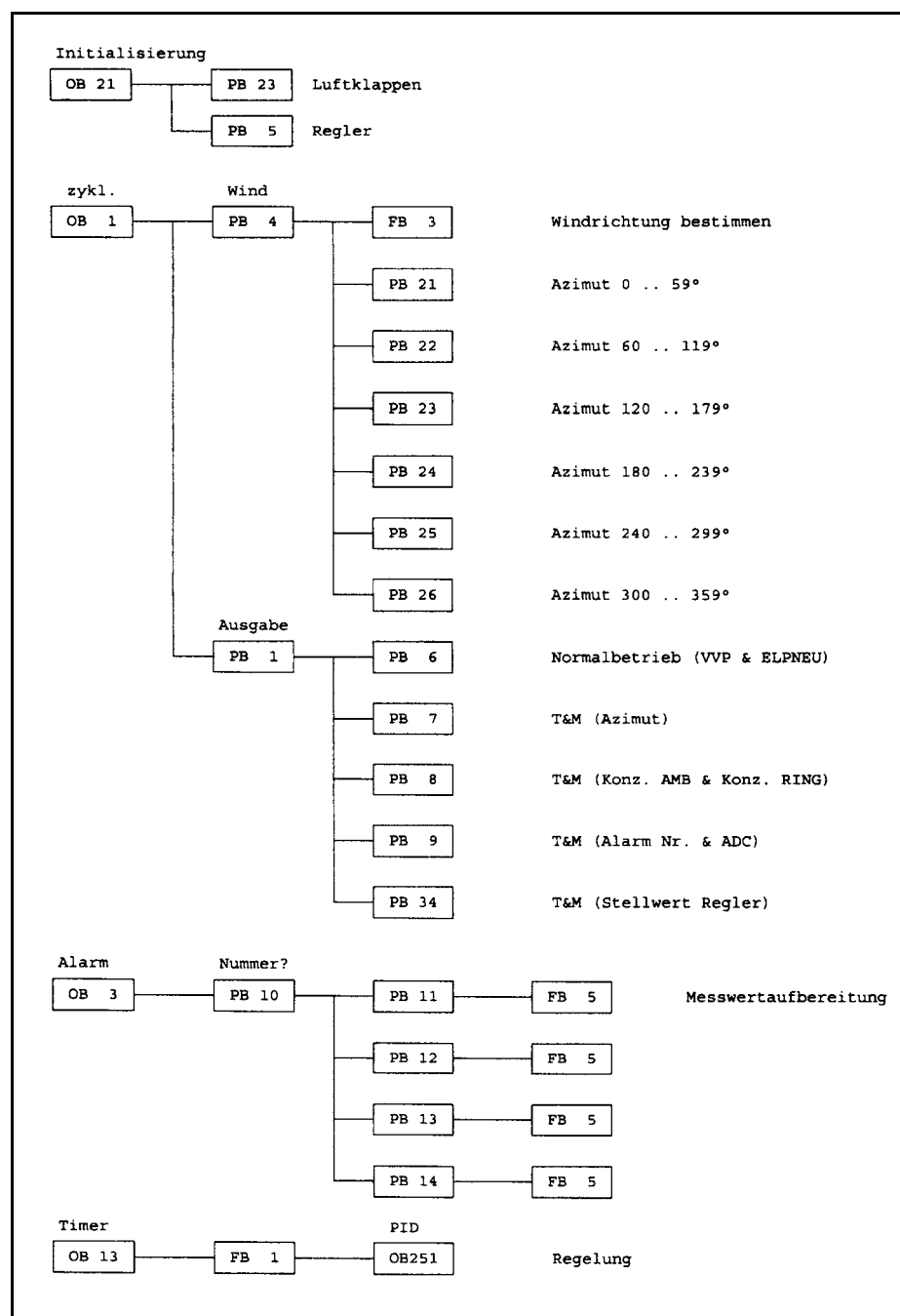


Abb. 61: Das Steuerprogramm im Automatisierungsgerät
(Erläuterungen im Text)

5.3. Konzentrationsmessung

5.3.1. Monitor und Wechsler

Der verwendete CO₂-Monitor der Firma SIEMENS (Typ 7MB1310) ist in Abb. 62 dargestellt. Er hat die Bezeichnung "Selektor", weil das Konzentrationsmeßgerät mit einem automatischen Wechsler für sechs Meßstellen in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht ist.

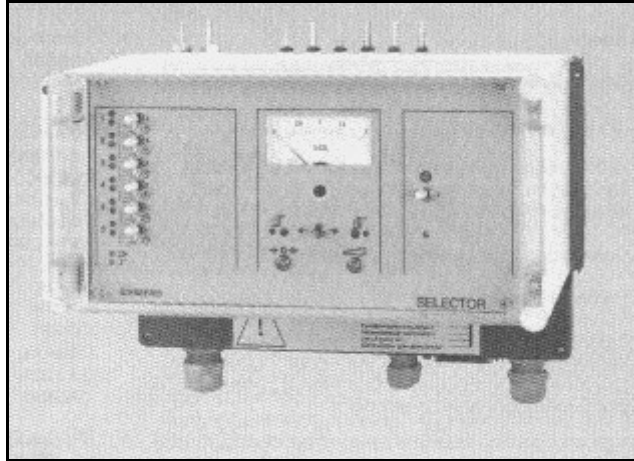


Abb. 62: Das Kombigerät "Selektor" (SIEMENS AG) tastet die Meßstellen zyklisch ab und bestimmt die CO₂-Konzentration

Die Messung der Konzentration geschieht in diesem Gerät durch ein photoakustisches Verfahren, wie es im Kapitel 4.5.1 beschrieben wurde. Dabei wird die Absorption von gepulstem Infrarot-Licht durch Messung der entstehenden Druckstöße ermittelt. Der Meßbereich des gewählten Gerätes ist 0..2000 ppm. Das Meßergebnis wird durch eine Stromschnittstelle 4..20 mA übergeben. In dem nachgeschalteten Rechner (SPS) wird dieses Signal mit einer Auflösung von 10 *bit* digitalisiert, das entspricht einer Auflösung von etwa 3 ppm·*bit*⁻¹).

Der eingebaute 6fach-Wechsler ermöglicht das Überspringen von nicht benötigten Kanälen auf einfache Weise: Durch individuelle Kippschalter auf der Frontplatte können beliebige Kanäle aus dem Meßzyklus herausgenommen werden. In der vorliegenden Applikation werden insgesamt drei Meßkanäle benötigt. Neben dem eigentlichen Meßkanal dienen zwei Kanäle zur automatischen Kalibration mit Umgebungs- und Null-Luft.

Der starre Zyklus erwies sich im Betrieb als sehr störend, weil während zwei Drittel der Zeit die beiden Kalibrationskanäle gemessen wurden und die eigentliche Istwert-Messung nur während der verbleibenden Zeit geschah. Aus diesem Grund wurde der Wechsler von Hand deaktiviert und die Ringluft kontinuierlich gemessen. Die beiden Kalibrationen wurden bei Bedarf von Hand eingeleitet, indem die entsprechenden Kanäle für einige Minuten freigeschaltet wurden. Durch die gute Langzeitstabilität des Meßgerätes wird der Leerwert in der Regel ohnehin nur etwa alle zehn Tage benötigt.

Die Identifikation des jeweilig gemessenen Kanales erfolgt durch individuelle elektrische Kontakte, die während der gesamten Periode bei dem jeweiligen Kanal geschlossen sind. Weil die Übernahme eines Wertes aber erst nach einer gewissen Einschwingzeit erfolgen darf, wird in der vorliegenden Applikation erst die abfallende Flanke des wieder öffnenden Kontaktes als Übernahme-Signal ausgewertet. Für die drei relevanten Kanäle (Ring, Umgebung, Leerwert) führen drei Leitungen auf drei Alarm-Eingänge der SPS und lösen dort mit fallender Signalfanke individuelle *interrupts* aus. Diese Routinen lesen den A/D-Wandler und legen das Resultat in eins von drei zugeordneten Merker-Worten (Speicherstellen) in der SPS ab.

5.3.2. Relative Konzentration

Das Technologieschema der Konzentrationsregelung im Prototypen ist in der Abb. 63 schematisch dargestellt. Die drei Hauptkomponenten sind das Gasmeßgerät (Selektor), die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und das Stellgerät (Elpneu). Sie bilden zusammen mit der Regelstrecke (CAP, aktives *plenum*) den Regelkreis.

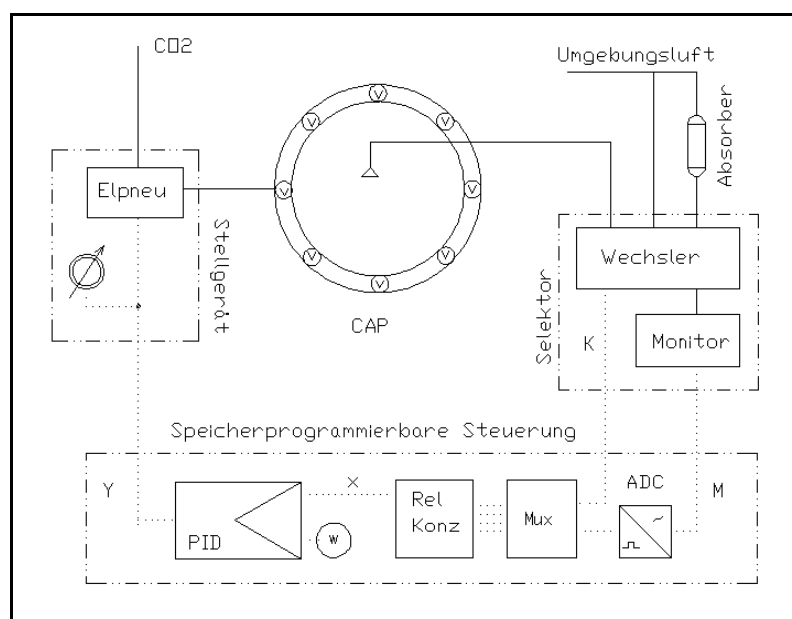


Abb. 63: Technologieschema der Konzentrationsregelung im Prototyp.

(Gasleitungen sind durchgezogen, elektrischen Signalwege sind gepunktet dargestellt. k: Kanalidentifikation, m: Meßergebnis, w: Sollwert, x: Istwert, y: Stellwert, Elpneu: Stellgerät, Mux: Multiplexer)

Das besondere an dieser Anordnung ist die Meßwertaufarbeitung zwischen dem Meßgerät und dem Regler. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept der "Relativen Konzentration" ist im Kapitel 4.5.3 beschrieben. Es hat u.a. den Vorteil, daß keine (kostspieligen) Kalibrier-gase benötigt werden und der Regler als Quasi-Festwertregler arbeiten kann, obwohl er in Wirklichkeit ein sich im Tagesgang änderndes Konzentrationsprofil einstellt.

Der Wechsler im "Selektor" beprobt zyklisch die Umgebungsluft, die aufereicherte Ringluft und den Leerwert. Zur Identifikation der aktuellen Messung wird die Kanalnummer (K) an die

Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ausgegeben. Die angesaugte Luft wird dem internen Monitor zugeführt. Das analoge Meßergebnis (M) wird ebenfalls an die SPS geführt.

In der SPS löst jeder Meßstellenwechsel einen Alarm (*interrupt*) aus. Dieser *interrupt* bewirkt die Übernahme und Verarbeitung des aktuellen Meßwertes. Dabei wird der rohe Meßwert zunächst entsprechend seiner Herkunft in einem reservierten Merkerwort abgespeichert. Als weiterer Schritt folgt die Berechnung der relativen Konzentration. Die Abb. 64 zeigt diesen Algorithmus. Die Zahlen im Kreis bezeichnen die verwendeten Merkerworte. Der Funktionsbaustein FB10 erkennt den Alarm vom Wechsler, liest den Meßwert vom A/D-Wandler (MW10) und legt das Ergebnis entsprechend der Meßstelle ab, als Leerwert (MW20), als *ambient* (MW12) oder als Konzentration im Ring (MW16). Durch Subtraktion des Leerwert von den rohen Ring- und Umgebungskonzentrationen werden die korrigierten Konzentrationen gebildet. Eine Multiplikation mit 100 und die abschließende Division bilden schließlich die mit jedem *interrupt* aktualisierte relative Konzentration (MW30). Die Zwischenergebnisse werden dabei für Testzwecke ebenfalls in Merkerworten abgelegt (MW18, MW14, MW26). Nach jedem Alarm wird der Algorithmus vollständig durchlaufen.

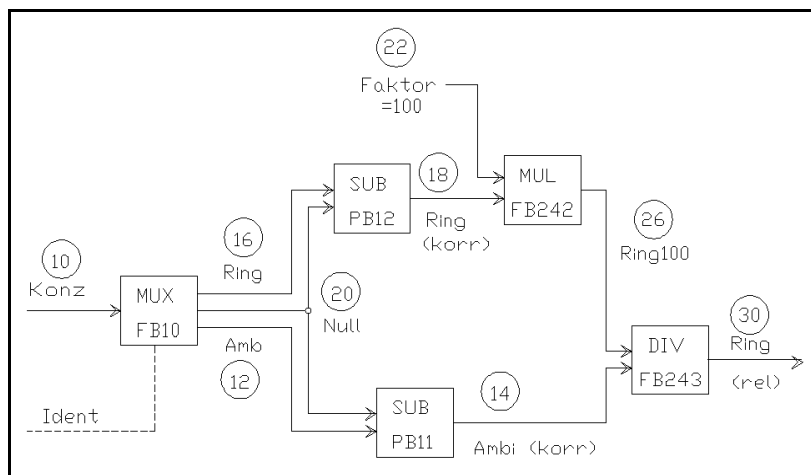


Abb. 64: Der Algorithmus für die relative Ringkonzentration
(Die Zahlen im Kreis bezeichnen die in der Realisierung des Konzeptes verwendeten Merkerworte (Adressen) in der SPS)

Der Regler (FB1, OB251) arbeitet als Abtastregler und wird durch den OB1 in einem festen Zeitraster aufgerufen. Er durchläuft sein Programm und berechnet das Stellsignal. Das vom Regler gebildete Stellsignal (y) wird als 4-stellige Binärzahl an das Stellgerät (ELPNEU) ausgegeben. Hier wird der dem Stellsignal entsprechende Gasstrom nahezu verzögerungsfrei eingestellt.

5.4. Gasdosierung ELPNEU

Das im Prototyp angewendete digitale Stellgerät zur Dosierung des Spurengases ist im Kapite 4.6.1 (ELPNEU, elektropneumatischer Wandler) beschrieben. Abbildung 65 zeigt das

Technologieschema der technischen Realisierung. Hierbei werden vier binär gestufte Volumenströme über Magnetventile addiert. Die Ansteuerung dieser Ventile erfolgt dabei direkt durch die SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung), die über entsprechend leistungsfähige Digitalausgänge verfügt.

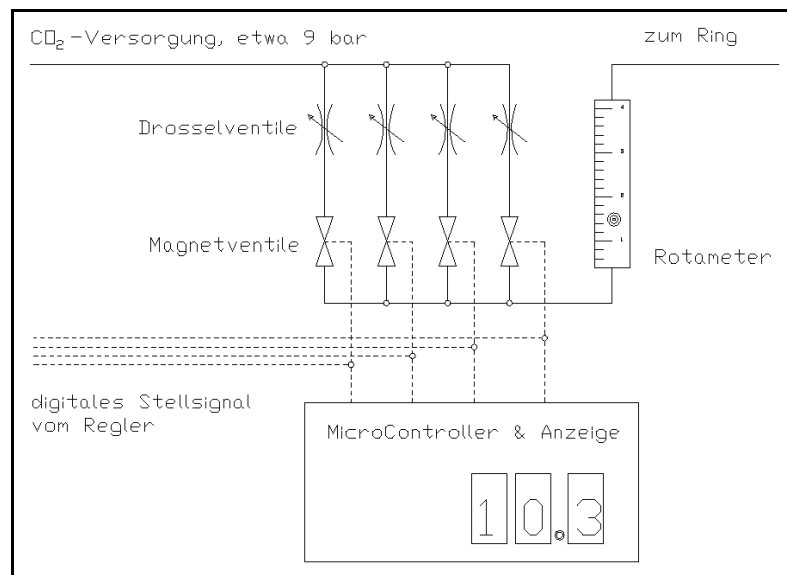


Abb. 65: Stellgerät ELPNEU für die Gasdosierung

(Das Stellgerät schaltet vier binär gewichtete Zweige und verfügt über eine Digitalanzeige zur Überwachung der Richtigkeit des eingestellten Spurengasstromes.)

Zur Einstellung der Teilströme sind in jedem Gaszweig Drosselventile vorgesehen. Für eine optimale Funktion darf sich dabei der Druck vor (und hinter) den Drosseln nicht ändern. In der Praxis ist aber eine langsame Veränderung des Vordruckes (*drift*) nicht sehr kritisch, weil der Regler einen veränderten Volumenstrom durch Veränderung (Anpassung) seines Stellwertes abfängt. Sehr viel störender wirkt die *drift* einzelner Drosselventile, denn dadurch wird die Apparatur nichtlinear, und eine solche Nichtlinearität verschlechtert die Regelgüte unweigerlich.

Für eine laufende Überwachung der Richtigkeit des Volumenstromes wurde deshalb eine spezielle elektronische Anzeige gebaut. Durch Vergleich dieses "Sollwertes" mit dem wirklichen Gasstrom auf einem Schwebekörpermeßgerät kann eine Abweichung leicht erkannt werden. Zu diesem Zweck werden die Steuersignale der Magnetventile von einem Micro controller (PIC16C57, Hersteller: MicroChip, Inc.) umgerechnet und auf einer dreistelligen Siebensegmentanzeige dargestellt. Der Kalibrationsfaktor für die Umrechnung ist auf der Platine dezimal einstellbar. Das Programm ist im Rahmen dieser Arbeit geschrieben worden. Es liest das anstehende 4-bit-Wort, multipliziert es mit dem einstellbaren Faktor und steuert die Anzeigen. Auf eine Wiedergabe der Programmquelle wird verzichtet. Die Stromversorgung der Schaltung erfolgt ohne externe Spannung über vier Dioden direkt aus den 24-Volt-Steuersignalen, die mit ausreichender elektrischer Leistung anliegen. Bei dem

Steuersignal $y = 0$ ist kein Ventil geöffnet, die Schaltung dadurch stromlos und die Anzeige erlischt.

Diese Kontrolleinrichtung hat sich als sehr zweckmäßig erwiesen, weil Abweichungen des wirklichen Gasstromes (Rotameteranzeige = Istwert) von der Stellgröße des Reglers (Digitalanzeige = Sollwert) sofort erkannt werden. Die erforderliche Nachtrimmung der Drosseln in einem solchen Fall zeigte sich hingegen als recht beschwerlich, weil dazu die vier Gaszweige einzeln von Hand abgeglichen werden müssen. Das ist bei laufender Anlage naturgemäß nicht möglich.

Der Betrieb des Prototypen war mit der gewählten 16-stufigen Dosierung ansonsten problemlos. Die Dosierung arbeitete praktisch trägeheitslos. Es ließ sich aber erkennen, daß eine große Freilandanlage mit einem entsprechend größeren Wertebereich des Spurengasbedarfes auch eine höhere Abstufung benötigen würde.

Anmerkung: Der hier beschriebene ELPNEU wurde im Frühjahr 1995 aufgebaut und erprobt. Eine ähnliche, aber vereinfachte Anordnung zur Umsetzung eines digitalen Stellsignales in einen Gasstrom wurde später auch von SPRING *et al.* (1996) und ROBERTS *et al.* (1998) beschrieben.

5.5. Regelstrecke

5.5.1. Allgemeines

Durch den Standort des Prototypen in einer Halle waren die möglichen Experimente mit Kohlendioxid auf exemplarische Arbeiten beschränkt, denn es fehlten die natürlichen meteorologischen Verhältnisse. Außerdem konnte nur kurzzeitig und mit kleinen Konzentrationen gearbeitet werden, um die Umgebungskonzentration nicht über die für Innenräume zulässigen MAK-Werte anzuheben. Zur Vermeidung von unzulässigen Kohlendioxidkonzentrationen in der Umgebungsluft war die Montagehalle mit einem leistungsfähigen Ventilator zwangsbelüftet. Durch eine elektrische Verriegelung konnte eine Dosierung von Kohlendioxid nur erfolgen, wenn der Ventilator in Betrieb war. Zusätzlich ging die Anlage beim Überschreiten einer Umgebungskonzentration von 1000 ppm mit abgeschaltetem Hauptventil auf Störung und konnte in diesem Fall nur durch eine manuelle Quittung wieder angefahren werden.

Eine endgültige Aussage zu einer geeigneten Reglerstruktur (PI, PID, mit/ohne Z-Aufschaltung) durch praktisches Experiment kann nur an einer Anlage im Freiland gefunden werden. Es war aber dennoch sinnvoll unter den freilandfernen Verhältnissen des Standortes mit einem geschlossenen Regelkreis zu experimentieren. So sollte z.B. mit dem Reglerbaustein OB 251 in der Steuerung SIEMENS S5-95U Erfahrung gesammelt werden. Könnte er in der geplanten PLUMEX eingesetzt werden? Besonders wichtig war die Frage, ob die Azimutsteuerung (*upwind control*) auf die Regelung einen Einfluß haben würde, denn genau hier haben die Expositionssysteme anderer Autoren erhebliche Mängel, wie dies im Kapitel 3.4.1 dargelegt worden ist.

Für die nachfolgend beschriebenen Experimente mit offenem und geschlossenem Regelkreis wurde der Prototyp mit einem Windschirm umgeben, der den Zutritt von Sekundärluft verhindert. Das eingeschlossene System verhält sich dadurch wie ein Rührkessel (CSTR, *continuous stirred tank reactor*). Ein Gasaustausch mit der Umgebung (Hallenluft) findet nur an der oberen Öffnung statt (vgl. Abb. 66). Ein solcher CSTR ohne chemische Reaktion ist relativ leicht zu regeln. Für die durchgeführten Vorversuche der Regelungstechnik war das eine wünschenswerte Voraussetzung.

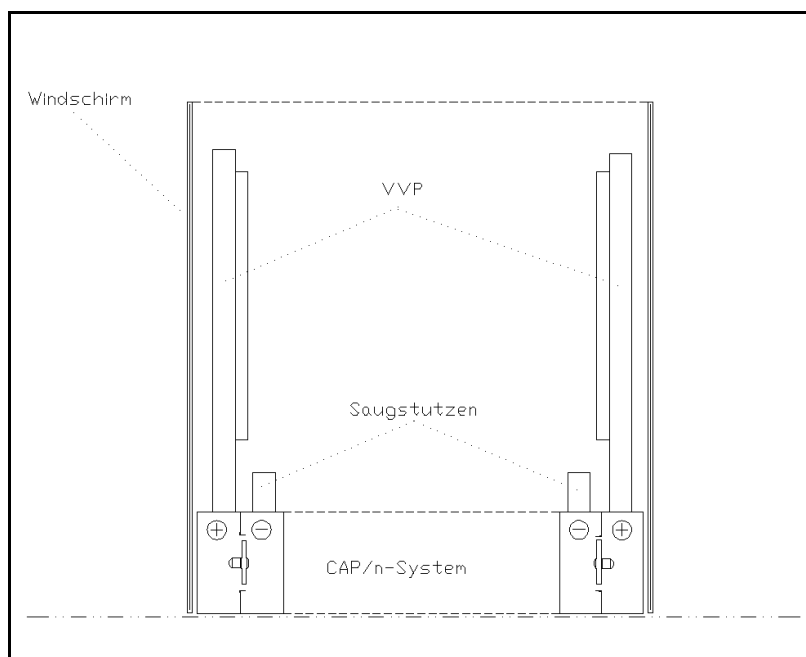


Abb. 66: Vereinfachtes Schnittbild des Prototyps in einer Kammer ohne Frustrum
(+) Druckkammer, (-) Unterdruckkammer

Innerhalb dieser Anordnung können durch die Azimutsteuerung (*upwind control*) horizontale Windvektoren simuliert werden, die in Richtung und Stärke einstellbar und natürlichen Winden sehr ähnlich sind. Für alle nachfolgend skizzierten Experimente am Regelkreis war die Windgeschwindigkeit mit dem Frequenzumrichter (GPD, vgl. Abb. 61) auf einen konstanten, mittleren Wert ($v = 1,5 \text{ m/s}$ im Zentrum) eingestellt. Um das VVP-Muster zu drehen, wurde die Bewegung der Windfahne durch einen Rampengenerator simuliert. Dieser hatte eine Frequenz von etwa $0,01 \text{ Hz}$ und war am Eingang der Azimutsteuerung anstelle der Windfahne angeschlossen. So wurde das VVP-Muster beständig mit einer Umlaufzeit von zwei Minuten gedreht.

5.5.2. Charakterisierung

Obwohl der aerodynamische Typus des Prototypen nicht dem einer *plume*-Anlage im Freiland entspricht, und dadurch grundsätzlich andere Eigenschaften der Regelstrecke zu erwarten sind, wurde dennoch eine Charakterisierung vorgenommen. Es sollten dadurch Erfahrungen mit der grundlegenden Vorgehensweise gesammelt werden.

In der Regelungstechnik hat sich die Aufnahme der Sprungantwort zur Darstellung des Verhaltens einer Strecke als günstiges Verfahren durchgesetzt. Darum wurden zuerst bei geöffnetem Regelkreis etwa 40 Sprungantworten aufgenommen mit Stellgrößensprüngen im Bereich von 0,5 bis 4,0 Ltr/min. Die beispielhafte Abb. 67 zeigt die Antwort der Strecke auf einen Sprung von $\Delta y = 3,0$ Ltr/min Kohlendioxid. Die Kurve zeigt erwartungsgemäß ein Zeitverhalten, das für eine Regelstrecke 1. Ordnung mit Ausgleich typisch ist. "Mit Ausgleich" bedeutet, daß sich die Regelstrecke nach Anregung mit einem Sprung einem neuen Beharrungszustand annähert. Im vorliegenden Fall wird der Beharrungszustand nach etwa fünf Minuten erreicht. Die Ausgleichszeit (T_g) beträgt etwa vier Minuten. Eine Verzugszeit (T_u) ist kaum erkennbar. Sie beträgt etwa 0,3 Minuten. Das Verhältnis T_g/T_u hat den Wert 13. Dieser Quotient ist ein wichtiges Maß, um die Regelbarkeit einer linearen Strecke zu beurteilen. Allgemein gilt: Zahlenwerte unter 3 charakterisieren schlecht regelbare Strecken und Werte über 10 lassen gute Regelbarkeit erwarten.

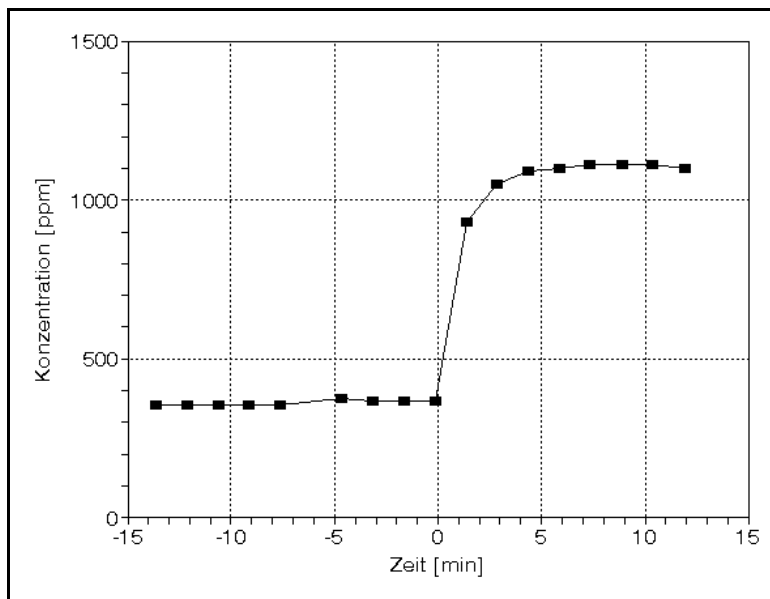


Abb. 67: Beispiel einer Sprungantwort ($\Delta y = 3,0$ l/min)

Neben dieser Analyse des dynamischen Verhaltens wurde auch das statische Verhalten untersucht. Dazu wurden die Endkonzentrationen im Beharrungszustand in einem Diagramm über der jeweils zugehörigen Sprungamplitude aufgetragen. In Abbildung 68 ist diese Kennlinie der aufgebauten Begasungsanlage wiedergegeben. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen Regelgröße (x , hier der CO_2 -Konzentration) und der Stellgröße (y , hier dem CO_2 -Strom) innerhalb des Laufbereiches beider Größen.

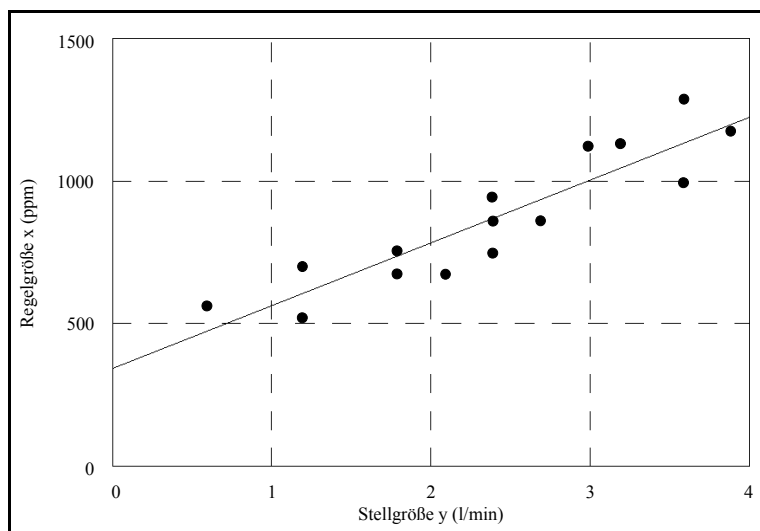


Abb. 68: Kennlinie der Regelstrecke mit Ausgleichsgerade

Aus der Punkteschar wurden durch lineare Regression die Parameter der Kennlinie berechnet. Die Regressionsgerade ist zusätzlich in die Abb. 68 eingezeichnet. Die Steigung dieser Geraden entspricht der Streckenverstärkung (K_S) und der Ordinatenabschnitt ist die konstante Störgröße (z), die Grundkonzentration der Umgebungsluft:

$$x(y) = K_S \cdot y + z$$

$$K_S = 220 \text{ ppm} \cdot \text{min} \cdot \text{l}^{-1} \quad \text{und} \quad z = 344 \text{ ppm}$$

Wie die Abb. 68 zeigt, streuen die Punkte merklich um die Regressionsgerade. Der sehr wahrscheinliche Grund für diese Streuung ist das digitale Stellgerät ELPNEU, das bezüglich der Stabilität nicht den Erwartungen entsprach und während der Messungen beständig nachkalibriert werden mußte. Von ihrem grundsätzlichen Übertragungsverhalten ist die Kennlinie aber mit hinreichender Genauigkeit linear. Regelstrecken mit einer linearen Kennlinie heißen P-Strecken (Proportionale Strecken). Reines P-Verhalten findet man nur bei sehr wenigen Regelkreisgliedern. Proportionales Verhalten tritt meist in Verbindung mit Verzögerungen auf. Dies wird in den Sprungantworten deutlich, wo die Ausgangsgröße der Eingangsgröße nicht sprunghaft folgt, sondern erst nach einer bestimmten Zeit einen neuen stabilen Wert, den Beharrungszustand erreicht (vgl. Abb. 67). Der vorliegende Streckentyp ist so einfach, daß er durch das nachstehende PT1-Modell beschrieben werden kann:

$$x(t) = z + (K_S \cdot \Delta y) \cdot (1 - \text{EXP}[-t/T_S])$$

$$x(t) = 344 + (220 \cdot \Delta y) \cdot (1 - \text{EXP}[-t/T_S])$$

Mit der Zeitkonstanten $T_S = 130 \text{ sec}$ ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Meßpunkten und dem Kurvenverlauf der theoretischen Sprungantwort. Diese Zeitkonstante kann auch graphisch aus einer Sprungantwort ermittelt werden. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder als Abszisse des Schnittpunktes der Tangente im Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ mit der Asymptote des angestrebten Beharrungswertes, oder als Abszisse des Kurvenpunktes, bei dem die Ordinate 63 % des Endwertes erreicht hat (vgl. Abb 69).

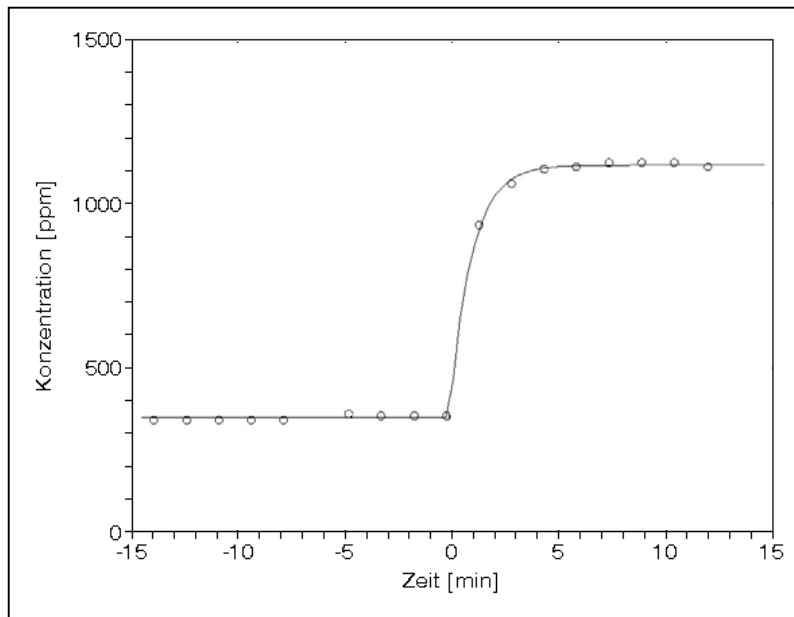


Abb. 69: Meßpunkte mit angepaßtem PT1-Prozeßmodell
 $x(t) = x_a + x_\infty \cdot (1 - \text{EXP}[-t/T_S])$ mit $x_\infty = K_S \cdot \Delta y$

Wie bereits dargelegt, kann ein Expositionssystem im Freiland natürlich nicht mit derartig einfachen Modellen beschrieben werden. Der Sinn der beschriebenen Experimente lag darin, im Umgang mit der experimentellen Regelungstechnik Erfahrungen für die spätere Charakterisierung des geplanten Freilandsystems PLUMEX zu sammeln.

5.5.3. Reglereinstellung

In dem Betriebssystem der verwendeten SPS ist ein Regelalgorithmus integriert. Er hat die Bezeichnung OB251 und arbeitet zusammen mit einem Datenbaustein. Dieser Datenbaustein (DB) enthält die Reglerparameter und die sonstigen reglerspezifischen Daten zur Konfiguration. Auch die Ein- und Ausgabedaten (Soll-, Ist- und Stellwert) werden über den DB mit der *software*-Umgebung ausgetauscht. Die Abb. 70 zeigt den Regelalgorithmus als Blockschaltbild.

Die einzelnen P-, I- und D-Anteile sind über ihre jeweiligen Parameter (R, TI und TD) abschaltbar, indem die betreffenden Datenwörter mit Null vorbesetzt werden. Damit können alle gewünschten Strukturen (z.B. PI, PD oder PID) realisiert werden. Im vorliegenden Fall wurde ein PI-Regler konfiguriert, mit dem sich eine PT1-Strecke gut regeln läßt. Eine Störgrößenaufschaltung wurde nicht angeschlossen, weil dies unter den Versuchsumständen (Rührkessel in einer Halle) nicht sinnvoll ist. Das Stellsignal wurde auf den Wertebereich 0..60 begrenzt. Das Stellgerät ELPNEU ist an die vier mittleren *bit* angeschlossen, und Stellwerte oberhalb von (binär) 00111100 würden darum durch einen Modulo-Effekt falsche Gasströme erzeugen.

(BGOG, BGUG: Begrenzung, K: Proportionalbeiwert, R: Faktor=1, STEU: Steuerwort, TD: Vorhalte-/Abtastzeit, TI: Abtast-/Nachstellzeit, W: Sollwert, XW: Regeldifferenz, X: Istwert, XZ: Ersatzgröße für XW, Y, dY: Stellgröße, -inkrement, YA, dYA: Handwert YH, dYH: Handwert, Z: Störgröße)

Die Einstellung der Parameter erfolgte nach ZIEGLER und NICHOLS (1942). Diese haben für die Bedürfnisse der Verfahrenstechnik experimentell Einstellregeln ermittelt, die sich in der Praxis gut bewährt haben. Dies gilt zumindest in den Fällen, wo ein während der Einstellung schwingender Regelkreis keinen Schaden anrichten kann, was im vorliegenden Fall, mit einem nicht-toxischen Spurengas und ohne Vegetation, der Fall ist. Zur Einstellung des Reglers in Anlehnung an die Arbeit von ZIEGLER und NICHOLS wurde im vorliegenden Fall bei deaktiviertem I-Anteil der Proportionalbeiwert (K_p) so lange erhöht, bis der Regelkreis gerade in Dauerschwingungen geriet. Der halbe Betrag dieses "kritischen K_p " wurde als Betriebswert eingestellt. Als Nachstellzeit (T_n) wurden zwei Drittel der im schwingenden Zustand ermittelten Periodendauer verwendet ($TI = \text{Abtastzeit} / \text{Nachstellzeit}$). Die verwendete Einstellung war "robust", d.h. auch bei leicht veränderten Werten von K_p und T_n arbeitete die Regelung stabil.

101

dioxid über eine Hilfsleitung zusätzlich eingeströmt und für eine plötzliche Absenkung der Konzentration wurde der Luftstrom an der oberen Öffnung der Kammer durch Einlegen von einem Holzbrett zeitweilig nach außen umgelenkt. Da diese Störungen nicht ohne Aufwand elektrisch erfaßbar waren, wurde auf eine Störgrößenaufschaltung verzichtet.

5.6. Schlußfolgerungen

5.6.1. Speicherprogrammierbare Steuerung

Als echter Nachteil der verwendeten speicherprogrammierbaren Steuerung (Siemens S5-95U) hat sich die Programmiersprache STEP5 herausgestellt. Diese Sprache besteht aus einem eigentümlichen deutsch/englischen Sprachenmix und viele eingebürgerte Begriffe der Datenverarbeitung sind verwirrend verwendet. Zum Verständnis der im Anhang abgedruckten Programmquellen ist es wichtig, diese Absonderlichkeiten vor Augen zu haben: Zum Beispiel verbirgt sich hinter SPA (Sprung absolut) kein Sprung (*jump*), sondern ein Aufruf (*call*). Weiterhin meint das Attribut "absolut" auch nicht absolut, d.h. auf eine konkrete *hardware* Adresse zielend, sondern es will sagen "unbedingt" (*unconditional*) im Gegensatz zu bedingt (*conditional*). Die Anweisung SPB (Sprung bedingt) ist zwar tatsächlich *conditional*, aber auch hier handelt es sich nicht um einen *jump*, sondern ebenfalls um einen *call*. Für wirklich "absolute" Operationen verwendet (mißbraucht) STEP5 das Gleichheitszeichen. Als Beispiel für einen "absoluten" Sprung an eine Adresse (nnnn) sei SPB = nnnn genannt. Andere, alternative Sprachen stehen auf dieser SPS leider nicht zur Verfügung.

Das Problem weiterer STEP5-Programmierung stellte sich aber für das geplante Freilandsystem (PLUMEX) ohnehin nicht, denn der Programmteil zur Azimutsteuerung (*upwind control*) ist wegen der unzureichenden Anzahl von digitalen I/O-ports an der Steuerung (SPS) nur auf kleine Segmentzahlen beschränkt und daher nicht portierbar. Er wurde gelöscht. In der späteren PLUMEX wurde die Azimutsteuerung aufgrund der vierfachen Ventilzahl mit einem Bus-System realisiert. Dies auch schon deshalb, damit der Verkabelungsaufwand in machbaren Grenzen bleibt. Dagegen konnten die *software*-Komponenten zur Berechnung der relativen Konzentration, die auch den Regler bedienen, in das Freilandsystem übernommen werden. Änderungen im Quelltext waren hier nicht erforderlich.

Trotz der Konfusion in der Programmiersprache STEP5, sind die Vorteile der SPS-*hardware* (Regler, Batteriepufferung, Zuverlässigkeit, Preis *etc.*) überzeugend und rechtfertigen die Verwendung dieser Geräte in der Freiland-Anlage. Der im System integrierte Software-Regler ist universell verwendbar. Zwar ist seine Einstellung über einen sogenannten Organisationsbaustein (OB), der mit einem primitiven Programmiergerät editiert werden muß, etwas mühevoll und fehlerträchtig, aber dies kann nur während der Einstellphase eine gewisse Beeinträchtigung darstellen. Im Betrieb ist ein Eingreifen auf dieser Ebene bestenfalls während einer Fehlersuche erforderlich.

Verbesserungswürdig im Hinblick auf das Freiland-System PLUMEX war dagegen die Abtastrate des Reglers. Im Prototyp wird der Algorithmus in einem festen Takt, etwa alle

10 sec aufgerufen. Dieser Rhythmus wird auch in der Zeit beibehalten, in der die Kalibrationsgase gemessen werden. Das ist aber unzweckmäßig, weil in dieser Zeit keine neuen (aktuellen) Ergebnisse vom Monitor anstehen und der Regler mit "alten" Werten rechnet. Das führt bei dem I-Anteil des Reglers zum "blinden" Aufsummieren der letzten Abweichung, die während dieser Phase nicht notwendiger Weise gültig bleibt. Über ein geeignetes Signal (*strobe*) vom Meßstellenwechsler sollte der Regler deshalb während der Spül- und Kalibrationszeiten gesperrt werden. Der im Prototyp verwendete Wechsler innerhalb des Selektor vermag das nicht zu leisten.

5.6.2. Monitor und Wechsler

Der Probetrieb zeigte deutlich, daß das starre Schaltmuster des Selektor (SIEMENS) für die gestellte Aufgabe nicht geeignet war. Die Dauer und der Zeitpunkt sowohl für die Kalibration als auch die Vorspülung konnten den technischen Gegebenheiten nicht angepaßt werden. Um das Konzentrationsmeßgerät optimal auszulasten, muß für jede der drei Meßstellen eine individuelle Vorspül- und Meßzeit, sowie eine individuelle Meßfrequenz eingehalten werden. Tabelle 9 zeigt die ermittelten Optimalwerte eines Wechslers.

Tab. 9: Optimale Spülzeit und Meßhäufigkeit für Wechsler

Meßstelle	Spülzeit	Häufigkeit (Dauer)
Ring	30 sec	quasi.kontinuierlich
Umgebung	200 sec	etwa stündlich (2 min)
Leerwert	100 sec	etwa alle 2 Tage (3 min)

Das Konzentrationsmeßgerät arbeitete sehr stabil und das Konzept der "relativen Konzentration" hat sich im Prototyp bewährt. Es kann unverändert in die PLUMEX übernommen werden.

5.6.3. Stellgerät ELPNEU

Wie im Kapitel 4.6 dargelegt, gibt es für das Stellgerät zur Spurengasdosierung zwei unterschiedliche technische Konzepte: Das Zusammenschalten von binär gewichteten Volumenströmen (ELPNEU) und das Verändern des Puls/Pause-Verhältnisses eines getasteten Gasstromes (PWM).

Das hier im Prototyp getestete digitale Stellgerät (ELPNEU) zeigte im Betrieb zwei Schwächen: Zum einen war die Auflösung vom 4 *bit* (16 Schritte) zu gering, zum anderen war die Langzeitstabilität mangelhaft. Die verwendeten Drosselventile hatten einen auffallenden individuellen Temperaturgang, d.h. einzelne Ventile reagierten stärker auf die Raumtemperatur als andere. Das mag sich aus der jeweiligen Einbauposition erklären – jedenfalls führte dieser

Effekt zu starken Nichtlinearitäten des ELPNEU. Trotz regelmäßiger Nachjustierung gelang es nicht, einen stabilen Betrieb über mehrere Tage zu erreichen. Die erforderlichen Einstellungen waren trotz der digitalen Hilfsanzeige nicht einfach. Auch eine Verbesserung der Auflösung durch Erweiterung des Verfahrens auf sieben oder mehr Zweige erwies sich als nicht machbar, weil die immer feinere Einstellung der binären Gewichtung mit jedem zusätzlichen Ventilzweig kritischer wurde.

Für ein höhere Auflösung und einen größeren mittleren Gasbedarf kann deshalb nur eine PWM-Lösung erfolgreich sein, wie sie im Theorieteil dieser Arbeit beschrieben ist und dem Expositionssystem PLUMEX zur Anwendung kommt.

5.6.4. Das aktive Plenum

Die wichtigste Fragestellung der Experimente am Prototyp war die Untersuchung der Eigenschaften des im Rahmen dieser Arbeit erdachten ringförmigen, aktiven Versorgungskanals CAP (*circular active plenum*). Neben der Bestätigung der aerodynamischen Eigenschaften (Isotropie) sollte weiterhin geklärt werden, ob die modulare Bauweise auch für einen großen, 24-gliedrigen Ring erfolgversprechend wäre.

Der mechanische Aufbau war, wie bereits erwähnt, problemlos. Die einzelnen Segmente hatten ein Gewicht von etwa 20 Kilogramm. Sie waren präzise gefertigt und ließen sich leicht von einer Person zusammenfügen und verschrauben. Der Innenraum der Segmente ist über Revisionsdeckel leicht erreichbar. Er bietet genügend Platz, um die erforderliche Elektronik und Pneumatik wettergeschützt zu beherbergen. Ein großer Ring, wie die geplante PlumeX mit 24 Segmenten, war also sicher realisierbar.

Die regelungstechnische Isotropie des neuartigen CAP konnte in den Experimenten bestätigt werden. Ein Schalten der VVP durch die Azimutsteuerung (*upwind control*) hatte keine erkennbaren Einflüsse auf die Kohlendioxidkonzentration. Dies wurde sowohl bei der Aufnahme der Sprungantworten als auch im Betrieb beobachtet. Selbst bei dem relativ hohen Luftdruck während der oben beschriebenen Experimente mit voller Ventilatorleistung, zeigte sich die Konstruktion als vorzüglich luftdicht und über die pneumatischen Klappen schnell schaltbar.

Der Prototyp (mit Windschirm) ließ sich aufgrund seines technologischen Typus (CSTR, Rührkessel) erwartungsgemäß leicht regeln. Die Einstellung des Reglers erfolgte nach den Regeln von ZIEGLER & NICHOLS (1942) und war robust. Für eine Anlage im Freiland bleiben bezüglich der Regelung natürlich noch Fragen offen, denn die regelungstechnischen Eigenschaften von dem Prototyp (CSTR, Rührkessel) sind im Freiland sicher nicht zu erwarten. Das Verfahren, den Regler an einem schwingenden Regelkreis einzustellen, ist auf das Freiland ebenfalls nicht anwendbar. Ein schwingender Kreis erfordert eine hohe Verstärkung von Regler und Stellgerät, also einen im Verhältnis zur Anlage, sehr starken Spurengasstrom. Die damit verbundenen großen Leitungsquerschnitte verbieten sich aber bereits aus Kostengründen.

6. Die PLUMEX-Anlage

Nach der erfolgreichen Erprobung des 6-gliedrigen Prototypen wurden von November 1996 bis Mai 1998 auf der Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation des Institutes für Pflanzenökologie in Linden-Leihgestern nacheinander vier indentische Anlagen mit 24 Segmenten aufgebaut und in Betrieb genommen. Das neue Freiland-Expositionssystem erhielt aufgrund seines funktionalen Typus (*plume*, Rauchfahne) und seiner grundsätzlich neuartigen Technologie die Bezeichnung PLUMEX. Das Akronym PLUMEX ist aus den Worten *excogitated plume [system]* abgeleitet³⁰).

6.1. Gesamtansicht

Das Erscheinungsbild der PLUMEX (vgl. Abb. 71 und 72) ist ebenso wie das Bild des Prototypen durch den neuartigen, kompakten Versorgungskanal (CAP, *circular active plenum*) geprägt: Es gibt keinen störenden, externen Großventilator und eine zusätzliche Schaltzentrale, wie bei FACE, ist ebenfalls nicht vorhanden. Die moderne Elektronik ist vollständig in das System integriert (*embedded control*), die Baugruppen liegen hinter den Revisionsklappen im CAP, vor den Umwelteinflüssen geschützt. Zum Betrieb sind lediglich Drehstrom geringer Leistung (400 VAC, 2,5 kVA) und das Spurengas (8 bar) erforderlich. Die Zuführung erfolgt seitlich über geständerte Kabelkanäle (In Abb. 71 nicht sichtbar). Pro Ring gibt es zwei externe Komponenten. Diese sind aus Sicherheitsgründen erforderlich. So hat jede PLUMEX ein individuelles, ferngeschaltetes Gashauptventil, das direkt am Vorratsbehälter montiert ist und einen individuellen Fehlerstrom-Schutzschalter (F_I-Schalter), der in der Hauptverteilung untergebracht ist. Durch dieses Konzept werden auch mögliche Fehler in den Zuleitungen, wie Rohr- oder Kabelbruch, sicher beherrscht.

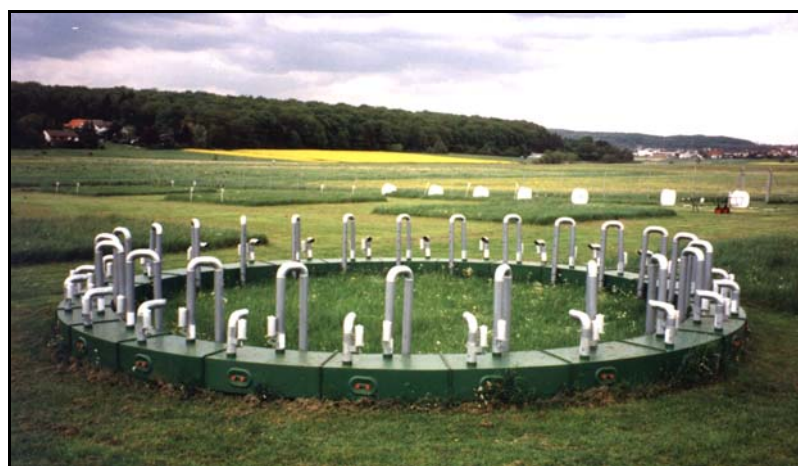


Abb. 71: Freiland-Begasungssystem PLUMEX mit VVP-Prototyp

³⁰ to excogitate, ersinnen, austüfteln



Abb. 72: Freiland-Begasungssystem PLUMEX mit Luftauslaß vom Typ TIM (*turbulent injection mixing*)

Neben diesen "inneren" Gefahren, die von einer (defekten) PLUMEX ausgehen können, gibt es auch "äußere" Gefahren, die auf das System zerstörend einwirken können. Neben hohen Windgeschwindigkeiten, die eine mechanische Beschädigung verursachen können, zählen Gewitter zu den gefährlichsten Wettererscheinungen für Expositionssysteme im Freiland. Im Jahr 2000 wurden in Deutschland mehr als zwei Millionen Blitze gezählt (vgl. Abb. 73).

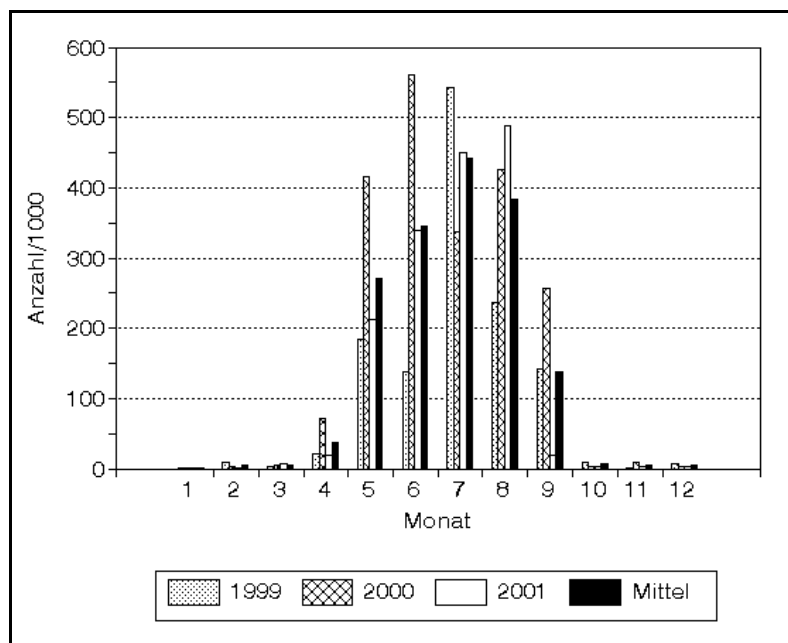


Abb. 73: Anzahl der Blitze über Deutschland
(Daten: <http://www.blids.de>)

Durch die exponierte Lage in offenem Gelände sind die PLUMEX-Systeme einer besonderen Gefahr des Blitzeinschlages ausgesetzt. Dieser Tatsache wurde konstruktiv Rechnung

getragen: Das CAP ist aus Stahlblech gefertigt und wirkt dadurch wie ein FARADAYScher Käfig. Die innenliegenden Komponenten sind somit wirksam vor elektrischen Entladungen geschützt. Zur Verhinderung (oder zumindest starker Abschwächung) von Ausgleichsströmen, die nach einem Blitzeinschlag über die Netzzuleitung abfließen könnten, sind vier Kreuzerder symmetrisch um das CAP verteilt und über kurze, kräftige Kupferkabel mit diesem verbunden. Der am Standort ganzjährig vorherrschende hohe Grundwasserspiegel gewährleistet den für einen wirksamen Blitzschutz erforderlichen geringen Erdwiderstand.

6.1.1. Das aktive Plenum

Das aktive Plenum (CAP, *circular active plenum*) besteht aus 24 baugleichen Segmenten aus verzinktem Stahlblech, die zu einem Ring mit etwa 10 m Außendurchmesser geschlossen sind. Mit einem rechteckigen Querschnitt von 30·50 cm² hat dieses aktive *plenum* die gleiche Bauhöhe wie das passive Versorgungsrohr einer konventionellen FACE-Anlage, aber einen mehr als doppelt so großen inneren Querschnitt. Diese Dimensionierung ermöglicht den Einbau der Ventilatoren auf einer Trennwand ohne übermäßige Querschnittsverengung der beiden Teilkanäle. In der Abb. 74, die einen Querschnitt durch die Anlage zeigt, ist die Position der Ventilatoren auf der inneren Trennwand erkennbar. Die 24 baugleichen Ventilatoren in den einzelnen Segmenten haben jeweils 100 VA Leistung. In ihrem parallelen Zusammenwirken erzeugen sie die erforderliche Luftleistung.

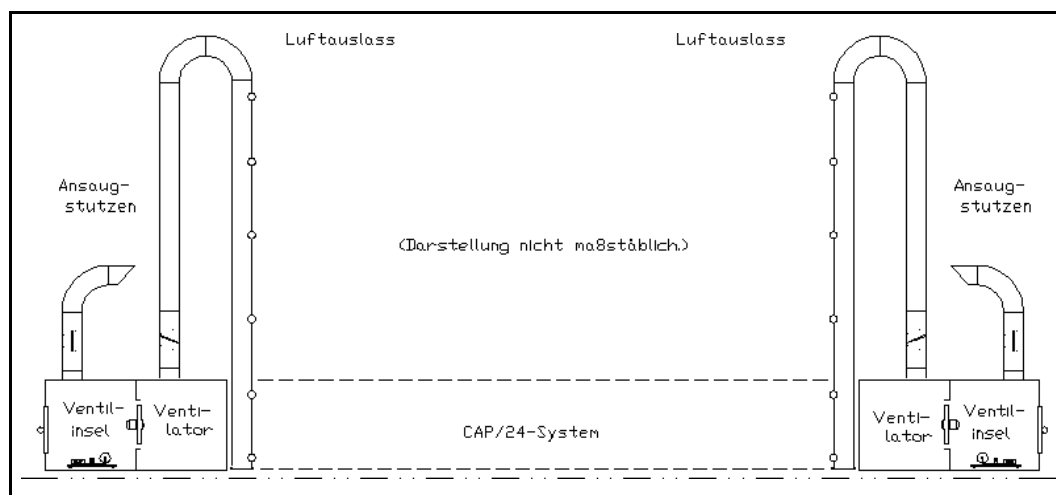


Abb. 74: Das *circular active plenum* CAP im Schnitt (VVP-Prototyp)
(Die elektronischen und pneumatischen Komponenten sind auf Ventilinseln
im Inneren des CAP vor Wiedereinfluss geschützt untergebracht.)

Zum Unterschied vom Prototyp hat jedes Segment eine Revisionklappe, hinter der die zur Steuerung erforderliche Elektronik und Pneumatik auf einer "intelligenten" Ventilinsel erreichbar ist. Außerdem tragen die Ansaugstutzen einen abgeschrägten Rohrbogen mit einem Filtersieb. Dieser Rohrbogen verhindert das direkte Eindringen von Regenwasser und luftgetragenen Partikeln, wie Laub oder größere Insekten.

6.1.2. Luftklappen

Die in der PLUMEX verwendeten Luftklappen sind vom gleichen Hersteller (Trox) wie die Klappen des Prototyp. Aufgrund des geringeren Volumenstromes haben sie jedoch einen deutlich kleineren Durchmesser (100 mm) als bei dem Prototyp (250 mm). Abbildung 75 zeigt ganz links im Bild an den Ansaugstutzen zwei von diesen Klappentypen, die durch ihre voluminösen Arbeitszylinder charakterisiert sind.



Abb. 75: Die großen Original-Zylinder (links) wurden nacheinander gegen kleine Zylinder (rechts) ausgetauscht

Diese Luftklappen sind von der Bauart "N.O." (*normaly open*, Ruhelage offen). Bei einem Ausfall des Arbeitsgases fallen die Luftklappen in ihre geöffnete Ruhelage. In einem solchen Störfall bleibt darum die Luftzirkulation bestehen, und die Ventilatoren arbeiten nicht auf einen "hydraulischen Kurzschluß". Dieser fortgesetzte Luftstrom gewährleistet somit die Kühlung aller Komponenten. Die Verwendung von N.O.-Klappen ist aber nicht zwingend erforderlich. Wenn in einem Reparaturfall einmal eine einzelne Luftklappe mit entgegengesetztem Arbeitssinn (N.C., *normally closed*, Ruhelage geschlossen) verwendet werden soll, dann kann das entsprechende Ansteuersignal in der CAPmatic individuell invertiert werden.

Als großer Nachteil hat sich die eingeschränkte Lebensdauer dieser Klappen herausgestellt. Durch die häufigen Schaltvorgänge und die Witterungseinflüsse haben die Klappen eine mittlere Lebensdauer von etwa 20 Monaten. Diese Erfahrung überraschte zunächst. Während der Evaluationsphase am Prototypen waren keine Verschleißerscheinungen zu beobachten gewesen. Rückwirkend ist dieser Befund erklärlich: Die Erprobungsphase war nur wenige Wochen lang und die Anzahl der Schaltspiele war bei den Experimenten viel geringer als bei einer Freilandanlage, die ununterbrochen den vorherrschenden Winden folgen muß. Weiterhin

stellt der Betrieb im Freiland durch den Witterungseinfluß eine zusätzliche starke Belastung für die Klappen dar. Die Lager sind nicht gekapselt und müssen regelmäßig mit Öl und Fett vor dem Wittereinfluß geschützt werden.

Abhilfe schaffte der Eigenbau. Abbildung 75 zeigt den neuen Antrieb rechts im Bild an der VVP im Vordergrund. Der Zylinder ist ein industrieller Lagertyp (Fa. Festo). Im Gegensatz zur Originalklappe (Fa. Trox) ist dieser Zylinder nicht starr, sondern mit einem Lagerbock schwenkbar montiert. Das vereinfacht die Kraftübertragung auf die Drehachse, weil eine Pleulstange, wie bei einem starren Zylinder, dadurch nicht mehr erforderlich ist. Als zusätzlicher Vorteil der neuen Konstruktion ergab sich eine erhebliche Verkürzung der Schaltzeiten von etwa zwei auf weniger als eine Sekunde. Dies ermöglicht eine sehr viel schnellere Ausrichtung der PLUMEX im Wind.

6.1.3. Inhärente Störgrößenaufschaltung

Die Steuerung der Luftauslässe (VVP, *vertical vent pipes*) erfolgt ebenso wie am Prototyp durch pneumatisch betriebene Klappen. Anders als am Prototyp wird aber zur Betätigung der Klappen nicht Druckluft, sondern das unter Druck anstehende Spurengas Kohlendioxid verwendet. Das bei Schaltwechseln der Klappen anfallende Abgas wird in den Unterdruckkanal aufgenommen und zusammen mit dem vom Regler freigesetzten Kohlendioxid über dem Feld ausgebracht. (Es geht also nicht "verloren".) Diesem Vorgehen lag die folgende Überlegung zugrunde: Erstens entfällt durch den Betrieb der Klappen mit Kohlendioxid die aufwendige Bereitstellung von wasserfreier Druckluft durch einen leistungsfähigen Kompressor mit nachgeschalteter Lufttrocknung. Neben den Anschaffungskosten entfällt damit auch der Aufwand einer regelmäßigen Wartung. Weiterhin entfällt durch die Verwendung des völlig trockenen Spurengases als Arbeitsgas das Risiko, daß während der Frostperioden Ventile durch gefrierendes Kondenswasser beschädigt oder zerstört werden können.

Der entscheidendste Vorteil aber liegt in dem, bei genauer Betrachtung erkennbaren, positiven Einfluß auf die Regelgüte. Für den Regelkreis stellt diese zusätzliche Kohlendioxidquelle nämlich keine zufällige Störgröße dar, sondern wirkt im Gegenteil kompensierend auf die Hauptstörgröße Wind. Die Erklärung dafür ist folgende: Bei stetigen (nicht drehenden) Winden ruht die *upwind control*. Es sind keine Schaltvorgänge zum Nachführen der VVP erforderlich und dadurch wird kein Arbeitsgas freigesetzt. Selbst vereinzelte Schaltspiele erzeugen nicht genügend Abgas, um die Regelung zu stören, denn sie sind gegenüber dem Hauptgasstrom vernachlässigbar klein, weil stetige Winde meist höhere Windgeschwindigkeiten haben und die Begasungsanlage während dieser Zeit einen relativ hohen Spurengasbedarf hat.

Anders ist die Situation bei stark drehenden Winden. Einem drehenden Wind kann eine Begasungsanlage durch die Trägheit ihrer mechanischen Komponenten nur mit einem gewissen zeitlichen Versatz (Schlupf) folgen. Je größer die "Drehgeschwindigkeit" des Windes

ist, umso größer ist dieser Schlupf. Bezogen auf die augenblickliche Stellung der VVP liegt die Anblasrichtung in einer solchen Situation also immer um den Schlupfwinkel versetzt, seitlich. Die weitere Folge davon ist nun der Eintrag von nicht aufgereicherter Luft, die über (noch) nicht geöffnete VVP seitlich in die Versuchsfläche einfließt.

Auf diesen Verlust an Kohlendioxid wirkt das aus den Kolben der Klappen freigesetzte Arbeitsgas nun kompensierend. Je stärker die Windrichtung wandert, um so mehr Schaltvorgänge je Zeiteinheit werden durch die *upwind control* erforderlich, um den Ring vor dem Wind zu positionieren. Die dadurch freigesetzten Gasmengen steigen im gleichen Maß, wie die Gasverluste durch den Schlupf. Die mit Spurengas geschalteten Klappen wirken damit auf den Regelkreis wie eine "inhärente" Störgrößenaufschaltung. MIGLIETTA *et al.* (1997) haben diesen Vorteil offenbar nicht erkannt. Sie betreiben ihre Anlage zwar auch mit Kohlendioxid, leiten aber unnötigerweise das Abgas der Arbeitszylinder mit langen Schläuchen etwa 150 Meter von der Anlage weg.

6.1.4. Luftauslässe

Im Verlauf der Arbeiten wurden die Luftauslässe (VVP, *vertical vent pipe*) der PLUMEX zweimal geändert. Die ersten Luftauslässe (vgl. Abbildungen 71 und 74) bestanden aus unten verschlossenen Rohren mit radial nach innen gerichteten Ausblaslöchern. An den unteren Enden waren diese VVP mit zwei Schellen am CAP befestigt. Die Einspeisung erfolgte von oben über 180°-Bögen. Diese Anordnung war vor allem aufgrund der hervorragenden mechanischen Stabilität gewählt worden. Doch schon während der Bauphase wurde durch die Arbeit von WALKLATE *et al.* (1996) deutlich, daß dies aus aerodynamischer Sicht nicht die optimale Lösung war. Der aus den Löchern austretende primäre Gasstrahl benötigt zunächst eine gewisse Mischstrecke (*jet regime*). Diese Strecke ist durch sehr ausgeprägte Konzentrations- und Geschwindigkeitsgradienten gekennzeichnet. Je nach vorherrschender Windgeschwindigkeit kann diese Zone teilweise bis in die Beobachtungsfläche im Zentrum der PLUMEX hineinreichen. Von den vergleichbaren FACE-Anlagen berichten HENDREY & KIMBALL (1990) eine Länge des *jet regime* von etwa zwei Metern.

Durch den zitierten Artikel von WALKLATE inspiriert, wurden die Gasauslässe so nach außen gedreht, daß der Mischgasstrahl dem Wind direkt entgegen gerichtet war. Zugleich wurden die Ausblaslöcher aufgebohrt, um den Volumenstrom zu vergrößern. Durch diese Anordnung trafen die Gasstrahlen nach kurzem Weg auf ein Hindernis - die senkrechte Zuleitung - an dem sie zusätzlich stark umgelenkt und verwirbelt wurden. Die Mischstrecke lag dabei im wesentlichen außerhalb der PLUMEX. Diese Anordnung entsprach dem von WALKLATE *et al.* als ELM (*enhanced local mixing*) bezeichneten Verfahren und zeigte gegenüber der alten Anordnung eine deutliche Verbesserung (Verflachung) des Konzentrationsgradienten über der Versuchsfläche. Durch den Erfolg dieser einfachen Veränderung zu weiterem Experiment ermutigt, wurde dann ein völlig neuer Weg beschritten: Die gelochten VVP wurden entfernt und der obere Rohrbogen nach hinten (radial auswärts) gedreht. Dabei kann das Mischgas jetzt völlig frei, senkrecht nach unten abblasen. Abbildung 72 zeigt diese Modifikation der VVP,

die als beste Variante auf alle PLUMEX übernommen wurde. Weil der Primärluftstrom hierbei senkrecht auf dem Windvektor steht, wurde das Verfahren TIM (*turbulent injection mixing*) getauft. Durch die fehlenden Strömungsverluste eines gelochten Ausblasrohres sind sowohl die Gasmenge als auch die Strömungsgeschwindigkeit bei TIM bedeutend höher als bei gelochten VVP und das führt zu einer weiter verbesserten Verwirbelung (Vermischung) der aufgereicherten Primärluft mit der Umgebungsluft.

Abbildung 76 stellt die drei ermittelten Konzentrationsgradienten gegenüber. Die mit OLD bezeichnete Kurve beschreibt die Ausgangssituation. Die mit ELM gekennzeichnete Kurve gibt das Meßergebnis mit der Anordnung in Anlehnung an den Artikel von WALKLATE *et al.* (1996) wieder. Der mit TIM bezeichnete Gradient beschreibt die endgültige Lösung.

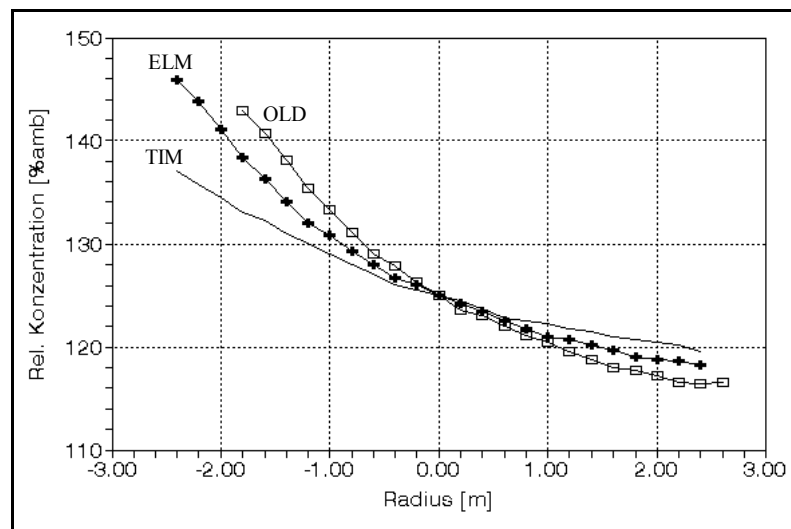


Abb. 76: Vergleich von Gasauslässen (Erläuterungen im Text)

6.2. Azimutsteuerung

6.2.1. Allgemeines

Die Komponenten der Azimutsteuerung (*upwind control*) positionieren den Ring in der Windrichtung (Azimut). Dabei wird ein bestimmtes Schaltmuster der VVP so gedreht, daß die Luftauslässe vor dem Wind (Luv) und die Ansaugstutzen windabwärts (Lee) stehen. Die Windgeschwindigkeit ist für die *upwind control* ohne Bedeutung. Das entsprechende Geschwindigkeitssignal vom Anemometer wird nur der Konzentrationsregelung als sog. Störgröße zugeführt. Die Beschreibung findet sich in dem entsprechenden Abschnitt.

Obwohl die Vergrößerung eines CAP-Systemes (*circular active plenum*) von sechs auf 24 Segmente auf den ersten Blick nicht bedeutsam erscheinen mag, so erfordert die PLUMEX im Vergleich zum Prototyp eine erheblich komplexere *upwind control*. Der Betrieb unter realen Bedingungen setzt z.B. eine präzise Messung der Windrichtung über den gesamten Winkelbereich ohne Lücke (*dead band*) voraus. Auch muß die *upwind control* jeder Änderung der Windrichtung im Idealfall trägheitslos ohne Schlupf folgen. Das CAP des Prototypen war

bei den Experimenten von einem Sägezahngenerator gedreht worden und auf die Phasenlage des Ringes gegenüber dem Signal mußte kein Gewicht gelegt werden. Neben dem Problem einer Winkelmessung muß bei der PLUMEX ein geeignetes Filter die mechanischen Zeitkonstanten an reale Windwechsel anpassen. Weiterhin führt eine Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung bei 24 Segmenten zu einem nicht mehr sinnvollen Verkabelungsaufwand. Für die insgesamt 72 Ventile wären die Kabelbäume teilweise bis zu 15 cm dick. Ein großes Expositionssystem benötigt also ein geeignetes Bussystem. Schließlich müssen auch spezielle Schaltmuster der VVP wählbar sein (vgl. Abb. 37 im Kapitel 4.2.4). Diese optimale "Gewichtung" der Abstände der VVP ist für die PLUMEX durch eine Berechnung ermittelt worden.

6.2.2. Digitales Filter

Für die Ausrichtung der Luftauslässe (VVP) in Windrichtung ist eine präzise Messung der Windrichtung besonders wichtig. Um die bestmöglichen Werte über den aktuellen Wind an jedem individuellen PLUMEX-Ring (*replicate*) zu erhalten, erfolgt die Messung der Windparameter mit eigenen Meßwertaufnehmern direkt an jedem *replicate* (Abb. 77). Eine zentrale Messung könnte keine brauchbaren Werte liefern, denn das Versuchsfeld liegt teilweise im Lee einer Baumgruppe und durch die dadurch hervorgerufene Wirbelbildung sind die Windverhältnisse an den individuellen Standorten der Ringe oft sehr unterschiedlich.



Abb. 77: Jeder PlumeX-Ring verfügt über eigene Geber für Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Für die Messung der Windrichtung wird eine Windfahne mit Ringpotentiometer ($R\ 400\ \Omega$, $\alpha\ 358^\circ$) der Fa. Adolf Thies (Göttingen) verwendet. Das Gerät ist serienmäßig mit einer Niederspannungsheizung (20 Watt, 24 Volt) ausgestattet, die eine Kondensation von Feuchtigkeit und im Winter das Einfrieren sicher verhindert.

Windfahnen mit einem Ringpoti haben gegenüber digitalen Fahnen den Vorteil eines deutlich geringeren Preises und erlauben eine sehr einfache Signalverarbeitung. Der Nachteil von einem Ringpoti ist aber ein bauartbedingter "toter Bereich" (*dead band*). In diesem Bereich läuft der Schleifer beim Durchdrehen über die beiden internen Anschlüsse der Widerstandsbahn. Der Ohm'sche Bahnwiderstand der Windfahne beschreibt also nicht eine volle Umdrehung von 360 Grad und das Spannungsteiler-Verhältnis am Schleifer ist demnach nicht dem überstrichenen Winkel proportional. Mit einem externen Vorwiderstand muß der tote Bereich kompensiert werden. Wenn der wirksame Drehwinkel (α) bekannt ist, kann der erforderliche Kompensationswiderstand (R_k) berechnet werden. Der individuelle Bahnwiderstand (R_b) einer gegebenen Fahne muß dabei unbedingt durch Messung bestimmt werden, denn die zulässigen Abweichungen des Widerstands betragen bis zu 10 Prozent des Nennwertes.

$$R_k = \frac{360 - \alpha}{\alpha} \cdot R_b$$

Für die verwendete Windfahne liegt der Wert dieses Widerstandes im Bereich von zwei bis drei Ohm. Der tote Bereich der gewählten Windfahne (2°) ist im Vergleich mit der Segmentbreite der PLUMEX (15°) sehr klein und daher ohnehin kaum von Bedeutung; die nachfolgende elektrische Mittelung des Signals in einem digitalen Filter macht die Lücke aber praktisch zu Null.

Das verwendete digitale Filter hat aber neben dieser Aufgabe eine weitere, sehr wichtige Funktion: Bei bestimmten Wetterlagen mit drehenden Winden können die Windrichtungen nämlich in so rascher Folge wechseln, daß die Mechanik und die Pneumatik der PLUMEX diesen Bewegungen nicht mehr folgen kann. Vor allem die zum Schalten der Luftauslässe (VVP) verwendeten TROX-Klappen³¹⁾ (vgl. Abb. 75) sind sehr träge. Ihr Arbeitszylinder hat ein Volumen von etwa zwei Normallitern und bei dem maximal zulässigen Betriebsdruck von 0.7 bar wird ein solcher Zylinder - trotz der Pufferbehälter auf den Ventilinseln - nur sehr langsam gefüllt bzw. geleert. Die Zeit für einen Arbeitstakt beträgt etwa zwei Sekunden. Aus diesem Grund können die TROX-Klappen schnellen Wechseln der Windrichtung nicht folgen und hängen dabei in undefinierten Mittelstellungen³²⁾. Die schnellen Wechsel zwischen "Ein" und "Aus" setzen außerdem unnötig Antriebsgas (Kohlendioxid!) frei.

Dieses Problem wird durch das digitale Filter gelöst. Hier wird die Windrichtungsinformation von hohen Frequenzen befreit und somit an die Trägheit der mechanischen Komponenten angepaßt. Das digitale Filter zur gleitenden Mittelung der Windrichtung wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut. Abbildung 78 zeigt den Schaltplan. Für das Filter wurde ein *micro controller* eingesetzt. Dieser Aufwand ist deshalb erforderlich, weil eine Mittelung des Windrichtungssignales durch einfache R/C-Glieder nicht erreicht werden kann.

³¹ Warenzeichen!

³² Diese Aussage stellt keine Bewertung der TROX-Klappen dar! Diese Klappen wurden für die Gebäude-Lüftungstechnik entwickelt und sind in der vorliegenden experimentellen Applikation nicht bestimmungsgemäß eingesetzt.

Der Grund dafür ist im Kapitel 4.2.5 dargelegt: Eine Integration durch R/C-Glieder führt im Bereich des Nulldurchganges der Potentiometer zu "Rechenfehlern".

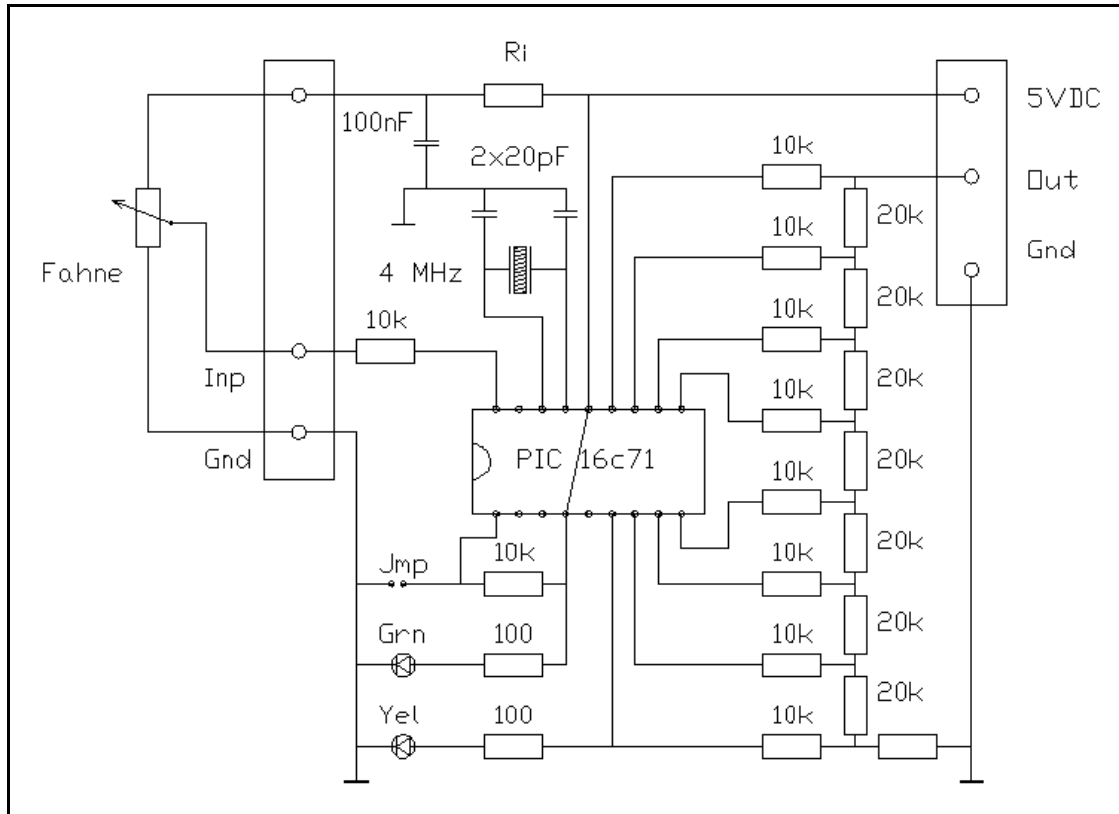


Abb. 78: Schaltplan digitales Filter für die Windrichtung

Das Kernstück des Filters ist der *micro controller* PIC16C71 (Arizona MicroChip). Er verfügt über einen integrierten A/D-Wandler (ADC) und kann das analoge Signal der Windfahne direkt verarbeiten. Dem *controller* ist ein externer D/A-Wandler (R2R) nachgeschaltet. Dadurch verhält sich der Ausgang des Filters elektrisch wie der Ausgang einer Windfahne und kann problemlos in die Leitung eingeschleift werden.

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Assembler-Programm (VICTOR.ASM) ist im Kapitel "Programmquellen" wiedergegeben. Die Funktionsweise wird nachfolgend beschrieben:

Zunächst wird das anstehende analoge Signal von dem internen ADC mit einer Auflösung von 8 *bit* digitalisiert. Unter der vereinfachenden Annahme, daß sich die Windgeschwindigkeit bei zwei aufeinanderfolgenden Messungen im Abstand von 100 mSec nicht nennenswert ändern kann, wird der Richtungswinkel mit konstantem Radius in kartesische Koordinaten umgerechnet. Die beiden Koordinaten (Komponenten) werden dann getrennt in zwei Ringspeicher (16 Zellen) geschrieben. Nach Bildung der Mittelwerte über die Ringspeicher werden diese Mittelwerte in Polarkoordinaten zurück gerechnet. (Auf die Berechnung des Radius wird dabei verzichtet, weil die Windgeschwindigkeit hier ohne Belang ist.) Die

Windrichtung liegt intern digital mit einer Breite von 8 *bit* vor und wird außerhalb des Prozessors mit einem R/2R-Netzwerk in ein analoges Signal gewandelt.

Die oben erläuterten Berechnungen erfordern die Winkelfunktionen SIN, COS und ATAN. Winkelfunktionen gehören aber nicht zum Sprachumfang eines Assemblers, deshalb wurden sie im Programm durch Tabellen nachgebildet. Der für diese Tabellen erforderliche *assembler code* wurde mit einem entsprechenden PASCAL-Programm generiert.

Die optimale Zeitkonstante der gleitenden Mittelung wurde durch Versuche optimiert. Sie kann auf der Platine durch eine Steckbrücke (*jumper*) zwischen zwei Werten umgeschaltet werden.

Damit in dem Rechenprogramm des *micro controller* keine Rundungsfehler auftreten können, wurde die Windfahne durch einen geeigneten Vorwiderstand so beschaltet, daß die Spannung am Schleifer nur von Null bis 4,67 Volt laufen kann und somit der interne 8bit-ADC für den vollen Winkelbereich Null bis 359 Grad nur Ergebnisse im Bereich von Null bis 239 liefern kann. Höhere Eingangsspannungen schaden dem *micro controller* nicht, sind aber sinnlos und werden durch Aufleuchten der gelben Leuchtdiode (LED) angezeigt. Unter Berücksichtigung dieses zusätzlichen Vorwiderstandes berechnet sich der erforderliche Gesamtvorwiderstand gemäß:

$$R_g = \frac{382,5 - \alpha}{\alpha} \cdot R_b$$

Mit den Nennwerten der verwendeten Fahne ($R \ 400 \ \Omega$, $\alpha \ 358^\circ$) ergibt sich als Richtwert 27 Ω . Dieser Widerstand ist auf der Rechnerplatine untergebracht und für die individuelle Windfahne ausgesucht. Jede Rechnerplatine gehört also zu ihrer individuellen Windfahne und darf nicht ausgetauscht werden, ohne den entsprechenden Widerstand zu überprüfen und ggf. zu wechseln.

Mit dem entwickelten digitalen Filter ist es gelungen, der *upwind control* ein Windrichtungssignal anzubieten, welches ohne einen "toten Bereich" den vollen Winkel von 0° bis 359° lückenlos überstreicht und das weiterhin in seinem Zeitverhalten an die naturgemäße Trägheit der mechanischen Komponenten der PLUMEX angepaßt ist. Die Amplitude des Ausgangssignals beträgt 4,67 Volt (bei 359°). Diese Spannung ist so gewählt, damit die A/D-Wandler der nachfolgenden Elektronik die Windrichtung im Wertebereich 0..239 digitalisieren. Das entspricht einer Winkelauflösung von 1,5 Grad. Bezogen auf die Segment-Struktur der PLUMEX ergibt sich dadurch eine Auflösung der Windrichtung von 10 Schritten pro Segment.

6.2.3. Sender (*master*)

Das von dem oben beschriebenen digitalen Filter konditionierte Windrichtungssignal wird an eine Baugruppe geführt, die den eigentlichen Kern der Azimutsteuerung (*upwind control*) darstellt. Kern der Schaltung ist ein *micro controller*. In diesem *controller* ist die Information

über das Schaltmuster (Blasmuster) der Luftauslässe festgelegt. Es wird in Abhängigkeit von der Windrichtung "gedreht" und entsprechende Schaltbefehle werden dazu an die Steuerventile der Luftklappen gesendet. Mit der Windrichtung wird auch der Dosierpunkt im CAP-Ring mitgeführt. Insgesamt werden 72 Ventile von der *upwind control* angesprochen. Die Ansteuerung dieser 72 Ventile erfolgt über einen 4-adrigen Daten-Bus.

Abbildung 79 zeigt den Schaltplan der elektronischen Schaltung. Zwei *on-board* Spannungsversorgungen (7805, 7815) erzeugen die Betriebsspannung für den Bus (15 Volt) und den *micro controller* (5 Volt). Die externe Beschaltung des *micro controller* (PIC16C71) beschränkt sich auf einen keramischen Resonator (Schwingquarz) und zwei Leuchtdioden (rot, gelb) zur Statusanzeige. Zwei Operationsverstärker am Ausgang des *micro controller* dienen zur Pegelanpassung und als Leitungstreiber für den Bus. In Abb. 80 befindet sich die Platine in der rechten oberen Ecke.

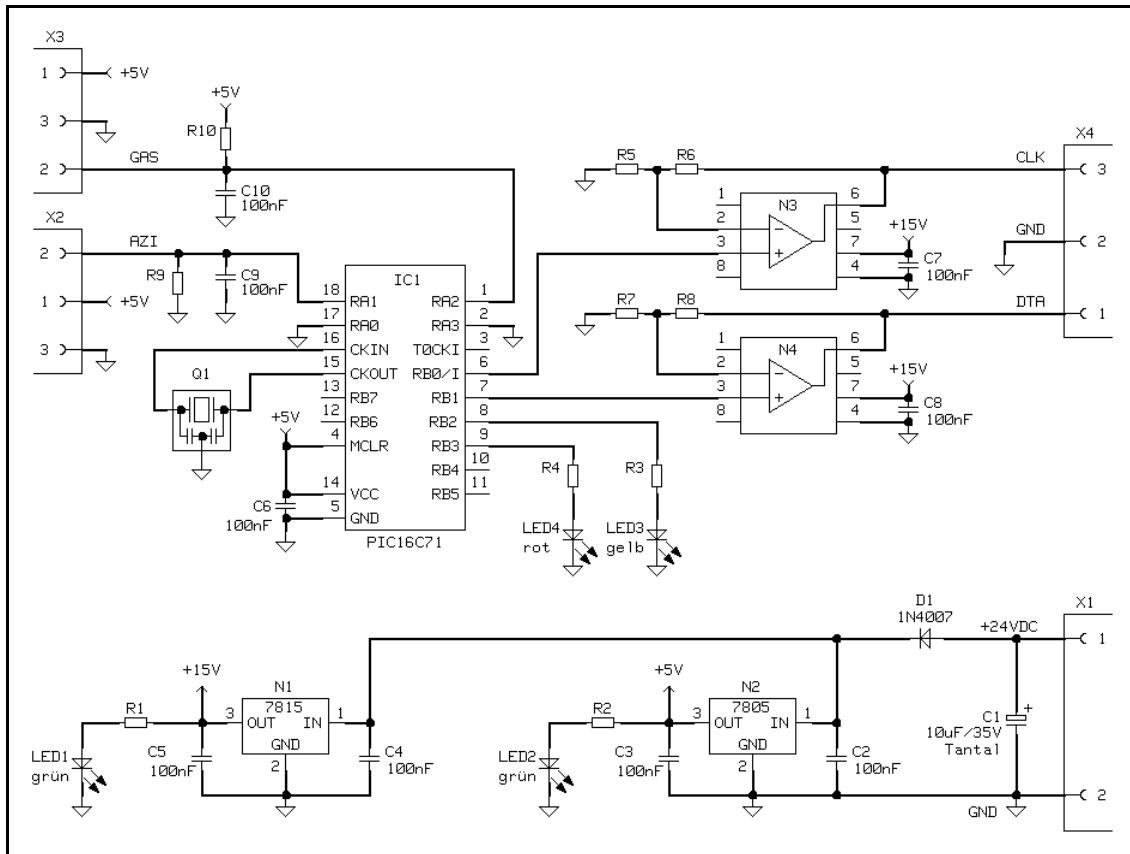


Abb. 79: Schaltplan der Azimutsteuerung (*upwind control*)

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Programm (CAPTAIN.ASM) ist im Anhang abgedruckt. In der endlosen Hauptschleife des Programms wird abwechselnd der A/D-Wandler (Windrichtung) ausgelesen und das intern abgespeicherte Schaltmuster um den Windwinkel verdreht an die Ventile ausgegeben. Dies geschieht ebenfalls zyklisch in einer Unter-Schleife, die nacheinander alle 24 Segmente anspricht. Um dabei den Bus nicht unnötig mit redundanter Information zu "verstopfen", wird vor dem Aussenden der Ventilkombination an ein Segment

zuerst geprüft, ob sich bei dem entsprechenden Segment die Ventilkombination überhaupt geändert hat. Das Programm merkt sich für diesen Zweck immer den letzten Status eines Segmentes. Im Detail geschieht folgendes: Das Ergebnis des A/D-Wandlers (die Windrichtung) wird zuerst auf plausiblen Wertebereich (0..239) geprüft. Unsinnige Werte werden ignoriert und schalten eine Signal-LED. Ein gültiger Wert wird durch 10 dividiert und dadurch auf die 24 Segmente der PLUMEX normiert. Der Quotient entspricht dem Betrag nach der Segmentnummer, über der der Wind aktuell einfällt. Diese Windrichtung wird zu dem von Null bis 23 umlaufenden Lese-Zeiger Modulo-24 addiert. Dadurch rotiert der Schreib-Zeiger mit einem Phasenversatz gegenüber dem Lesezeiger. Der Phasenversatz entspricht dem relativen Windwinkel. Das Schaltmuster, in Grundstellung des Ringes bei Nordwind, ist in einer Tabelle abgelegt. Die Tabelle hat 24 Einträge, die den 24 Segmenten der PlumeX entsprechen. Jeder Eintrag besteht aus einem Byte, in dem aber nur drei *bit* relevant sind. Diese drei *bit* entsprechen den drei Ventilen eines Segmentes: ausblasen, ansaugen, dosieren. Das Tabellenergebnis mit drei Nutz-*bit* wird mit dem Zeiger (fünf *bit*) in einer ODER-Funktion verknüpft und stellt das sendefähige Datenwort dar.

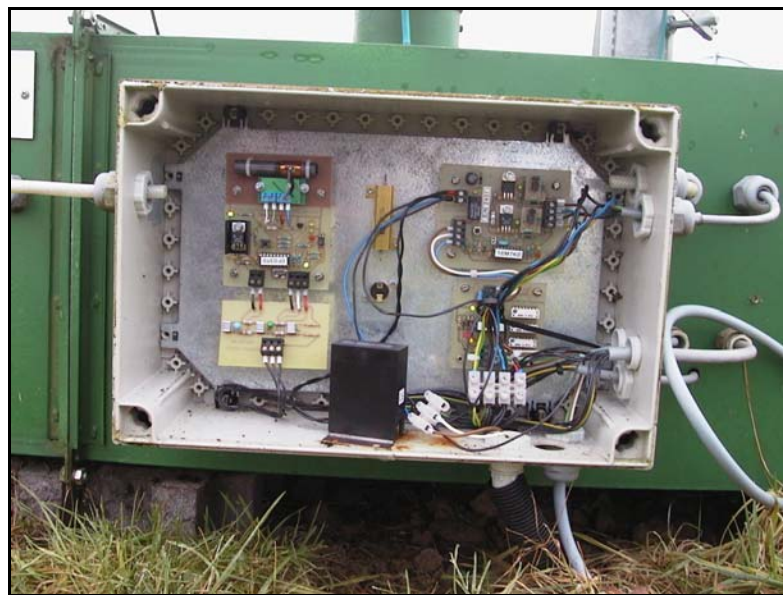


Abb. 80: Die Baugruppe der Azimutsteuerung (*upwind control*) rechts oben, darunter das digitale Filter, links im Bild die Funkuhr

Eine Besonderheit des verwendeten *controller* ist seine Architektur. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen *computer* hat der PIC16 keinen getrennten Adress- und Datenbus. Dies führt zu besonderer Programmieretechnik besonders beim Lesen von Tabellen. Eine Tabelle hat hier die formale Struktur einer Subroutine. Zum Lesen in der Tabelle wird der Lesezeiger gleich nach dem Aufruf der Subroutine zum *program counter* (PCL) addiert und dadurch "springt" das Programm mit dem nächsten Zyklus direkt an die entsprechende Stelle, an der eine Rücksprunganweisung mit dem Tabellenwert steht (*RETLW*, *return with literal in work*).

6.2.4. Bussystem

Die aufgebauten PlumeX-Systeme bestehen, wie oben beschrieben, aus je 24 baugleichen Segmenten. Jedes Segment trägt einen Luftauslaß (VVP, *vertical vent pipe*) und einen Ansaugstutzen, die über Magnetventile angesteuert werden. Zusätzlich verfügt jedes Segment über ein Dosierventil für das Spurengas (Kohlendioxid). Insgesamt sind somit 72 Ventile in jedem Ring, die je nach der vorherrschenden Windrichtung individuell geöffnet oder geschlossen werden. Bei dieser Anzahl von Ventilen ist es nicht mehr sinnvoll, jedes einzelne Ventil über eine eigene Leitung an einen zentralen Rechner (*upwind control*) zu führen, wie dies im Prototyp realisiert war. Die Verkabelung von 72 Ventilen wäre unübersichtlich und teuer, denn allein im Inneren eines jeden PLUMEX-Ringes müßten bereits etwa zwei Kilometer Leitung verlegt werden. Ebenso schwierig wäre es, 72 elektrische Steuerleitungen in ein wetterfestes Gehäuse zu führen.

Um den Verkabelungsaufwand in machbaren Grenzen zu halten, mußte für die PLUMEX-Anlagen ein Bussystem verwendet werden. Solche Systeme sind in der Industrie bekannt und bewährt. Zwei willkürlich ausgewählte Beispiele dafür sind der seit mehr als drei Jahrzehnten bewährte IEEE-Bus (*I-tripple-E bus*) oder der neuere AS-Bus (*actuator sensor bus*). Die auf dem Markt verfügbaren Systeme sind aber aufgrund ihrer Universalität sehr teuer und nicht immer für den rauen Einsatz im Felde gedacht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb ein spezielles, den besonderen Erfordernissen angepaßtes Bussystem entwickelt und mit Erfolg eingesetzt.

Zuerst wurde mit einem analogen Bus experimentiert. Auf einer Ringleitung wurde die Windrichtung als Gleichspannung an alle Segmente geführt. Jeder Busempfänger (*micro controller* PIC16C71) hatte über einen eigenen A/D-Wandler Zugriff auf diese analoge Information und handelte autark für sein Segment. Das hatte den Vorteil, daß außer einem Impedanzwandler (Operationsverstärker) ein spezieller digitaler Bustreiber nicht erforderlich war. Erst im Betrieb zeigte sich die Schwäche des Verfahrens: Durch die gemeinsame Masseleitung von Signal und Betriebsspannung addierten sich kleine Spannungsabfälle in der Ringleitung und verfälschten die Windrichtungsinformation erheblich. Weiterhin mußte bei jeder Änderung des Blas/Ansaug-Musters der gesamte Satz von 24 Busempfängern neu programmiert werden. Erst eine digitale Datenübertragung brachte unverfälschten Datentransfer und die gewünschte Flexibilität bei Änderungen im System (z.B. Schaltmuster der VVP).

Ein digitaler Bustreiber (*master*) sendet Datenpakete auf eine Ringleitung. Die Busempfänger (*slave*) empfangen die Information und reagieren entsprechend. Als Informationspakete werden Bytes (8 *bit*) übermittelt, wobei die Bytes aus einem Adressteil (5 *bit*) und einem Informationsteil (3 *bit*) bestehen. Um die drei Ventile eines Segmentes unabhängig zu steuern, sind dafür 3 *bit* erforderlich. Mit den verbleibenden 5 *bit* können bis zu 32 Segmente adressiert werden. Jeder Busempfänger hat eine interne Adresse zwischen 0 und 23, die seiner Position im Ring entspricht. Erkennt ein Empfänger "seine" Adresse, dann überträgt er die Information auf die Ventile zur Steuerung der Luftklappen und der Spurengasdosierung.

Weil in der vorliegenden Installation nur 24 Segmente angesteuert werden müssen, verbleiben acht Adressen (24 bis 31) für anderweitige Nutzung (pseudo-Adressen). Diese werden u.A. für die Datenübertragung an den Meßplatz und für die Steuerungen der Referenzluftansaugung (Aspirator) genutzt. Zur Übertragung von numerischer Information werden mehrere pseudo-Adressen belegt. Die jeweils 3 *bit* breiten Informationsteile werden dabei aneinandergehängt. Die Verwendung von drei pseudo-Adressen erlaubt die Übertragung von einem Meßwert mit einer Auflösung von 9 *bit* (2 Promille).

Die Datenübertragung auf dem Bus erfolgt "synchron": Eine Ader führt die seriellen binären Daten (*data*) und eine zweite Ader gibt den Übernahmetakt (*strobe, clock*). Gegenüber einer asynchronen Übertragung hat dieses Verfahren einige Vorteile. Durch den Wegfall von *framing bits*, wie sie bei asynchroner Übertragung erforderlich sind, wird bei gleicher Bitrate eine etwa 30 Prozent höhere Datenrate erreicht. Zusätzlich ist eine synchrone Übertragung unkritisch in Bezug auf die Taktrate der beteiligten Empfänger. Schließlich kann durch geeignetes *timing* des *strobe* auch eine schlecht angepaßte, "klingelnde" Datenleitung problemlos zur Übertragung verwendet werden. Als Busleitung wurde hier deshalb auch eine einfache, überall verfügbare 4-adrige Netzleitung (4 x 0,7 mm²) verwendet. Neben *data* und *clock* wird mit der Netzleitung zusätzlich die Systemspannung von 24 VDC an die Busempfänger geführt.

6.2.5. Empfänger (*slave*)

Der Busempfänger (CAPmatic) besteht im wesentlichen aus dem *micro controller* (IC1, PIC16C54) und einem Treiberschaltkreis (IC2, ULN2003) für die Magnetspulen der Ventile. Der Schaltplan ist in Abb. 81 wiedergegeben. Als weitere Komponenten zeigt er die *on-board*-Spannungsversorgung (7805) und zwei Leuchtdioden (LED) zur Signalisierung des Betriebszustandes. Durch die synchrone Datenübertragung ist die Taktfrequenz der *controller* nicht kritisch. Aus diesem Grund ist bei den Empfängern der ersten Generation anstelle eines (kostspieligen) Schwingquarzes ein preiswertes R/C-Glied (R₃/C₅, f=1 MHz) eingebaut worden. Ab etwa 1997 wurden nur noch keramische Resonatoren (Murata, f=4 MHz) verwendet. Probleme sind in diesem Mischbetrieb erwartungsgemäß nicht aufgetreten, die unterschiedlichen Busempfänger arbeiten zuverlässig miteinander.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Assembler-Programm (CAPMATIC.ASM) ist im Anhang wiedergegeben. Jede Version des Programm hat eine individuelle, der jeweiligen Position im CAP (0..23) entsprechende Kennung. In einer Endlosschleife werden die Bus-Daten von dem Programm gelesen. Nach einem erfolgreichen Empfang eines Paketes wird die darin enthaltene Adresse abgespalten und mit der eigenen Kennung verglichen. Fremde Pakete werden ignoriert, und nur im Falle der Übereinstimmung werden die Segmentventile entsprechend der übermittelten Information geschaltet. Ein Datenpaket (*byte*) besteht dabei aus einer 5 *bit* breiten Adresse und einem 3 *bit* Datenteil.

Zur Vermeidung von Fehlschaltungen durch Störimpulse führt das Programm an den empfangenen Daten gewisse Plausibilitätskontrollen durch. So wird die Länge des Telegramms abgeprüft und Datenpakete von mehr als acht *bit* werden verworfen. Ebenso wird die relative Länge der einzelnen *data bits* durch Vergleich der Pegel an beiden Flanken des Taktimpulses geprüft. Im Falle eines Übertragungsfehlers wird das gesamte Telegramm verworfen und der letzte Status der Ventile beibehalten.

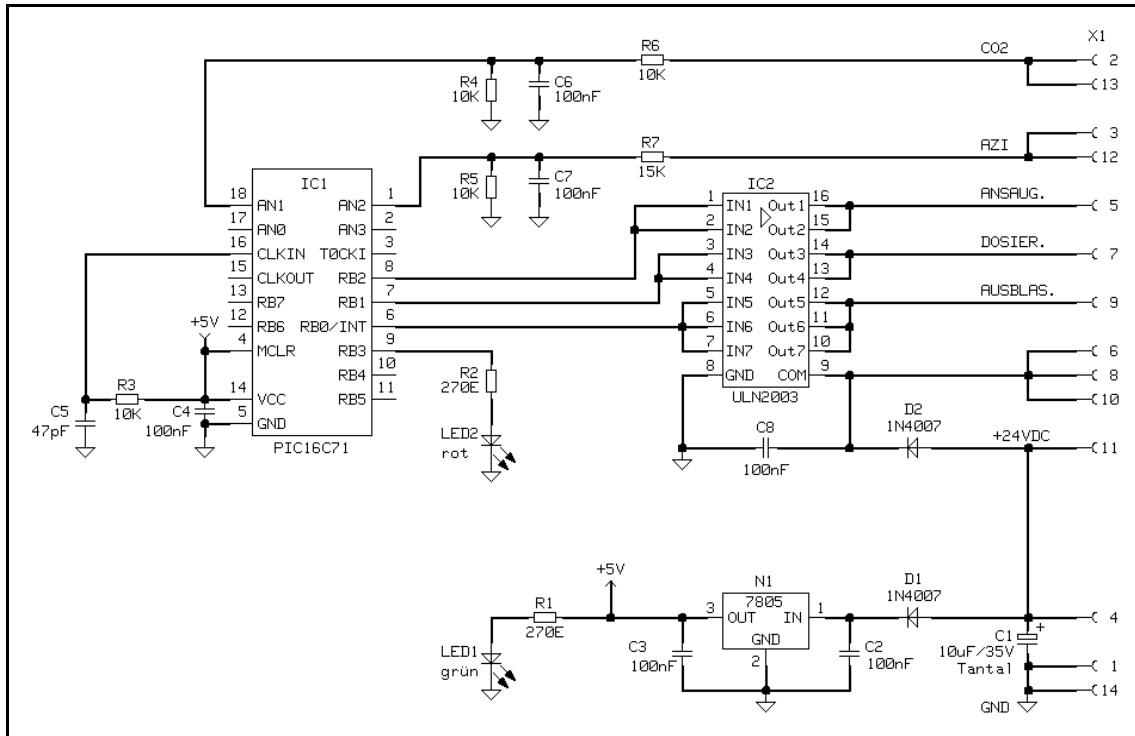


Abb. 81: Der elektrische Schaltplan des Busempfängers (CAPmatic). Ein *micro controller* (IC1) dekodiert die Daten auf dem Bus und betätigt über einen Treiber (IC2) drei Magnetventile

6.2.6. Ventilinsel

Wie bereits dargelegt, ist die PLUMEX streng modular aufgebaut. Das CAP (*circular active plenum*) besteht aus 24 identischen Gliedern (Segmenten) mit je einem Luftauslaß (VVP) und einem Ansaugstutzen (vgl. Abb. 34). In jedem Segment ist innen auf der Trennwand ein Ventilator montiert und zur Steuerung des Zusammenspiels aller Komponenten verfügt jedes Segment zudem über entsprechende Elektronik und Pneumatik. Diese Komponenten sind auf einer sogenannten "intelligenten Ventilinsel" zusammengefaßt. Abbildung 82 zeigt eine solche Ventilinsel. Die Grundplatte einer Ventilinsel besteht aus Hart-PVC. Das optisch dominierende Bauteil ist ein Stahlbehälter von 0,7 Liter Inhalt. Er dient als Pufferspeicher für das Arbeitsgas der Arbeitszylinder der Luftklappen. Diese Zylinder haben ein Hubvolumen von etwa einem Liter bei einem höchstzulässigen Betriebsdruck von nur 0,7 bar. Wenn eine solche Klappe aktiviert wird, dann kann das erforderliche Arbeitsgas über die dünnen Zuleitungen nicht schnell genug nachströmen. Durch diesen "pneumatischen Kondensator"

steht aber auf jeder Ventilinsel genügend pneumatische Energie für eine schnelle Bewegung der Zylinder zur Verfügung. Im zeitlichen Mittel ist die Gaszufuhr über die dünnen Leitungen ausreichend.

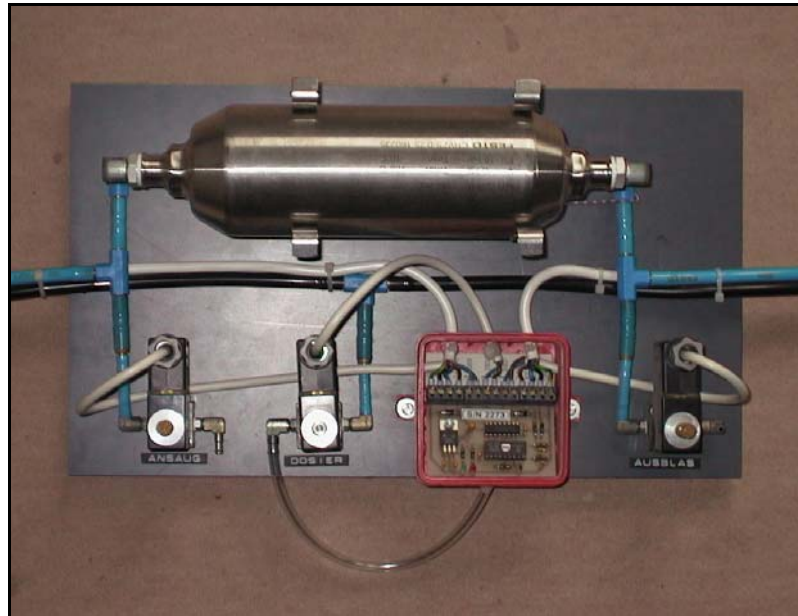


Abb. 82: Eine "intelligente" Ventil-Insel zur Steuerung eines CAP-Segmentes. Die 24 Inseln einer PLUMEX sind durch ein Bus-System verbunden
(Spurengas: schwarz, Arbeitsgas: blau, Daten: weiß)

Jedes Segment hat einen eigenen Busempfänger (CAPmatic), der die drei Ventile für Ansaugen, Ausblasen und Dosieren steuert. Er sitzt in einer vor Spritzwasser geschützten (IP65) Standard-Verteilerdose. Die Dose ist in Abb. 82 zur Demonstration geöffnet. Rechts und links am unteren Rand von Abb. 82 sind die Ventile der Arbeitsluft erkennbar. Hier sind die Zylinder der Luftklappen angeschlossen. Das mittlere Ventil öffnet die Spurengasleitung. Um eine hohe aerodynamische Symmetrie (Isotropie) der PLUMEX zu erreichen, wird auch dieser Dosierpunkt von der *upwind control* in Abhängigkeit von der Windrichtung geschaltet. Das hier abströmende Spurengas wird unter die Platine des Busempfängers geführt (heller Schlauch). Dadurch ist diese Baugruppe als Nebeneffekt beständig vor eventuell eindringender Feuchtigkeit geschützt (vgl. Kapitel 6.4.3).

Die Ventilinseln liegen geschützt im Inneren des CAP und sind über eine Revisionsklappe im Bedarfsfall bequem erreichbar. Die 24 Inseln einer PLUMEX sind untereinander über drei Ringleitungen in der Art eines Bus-Systems verbunden (vgl. Abb. 83).

1. Spurengas (7 bar)
2. Arbeitsgas (1 bar)
3. Daten und Niederspannung (24 VDC)

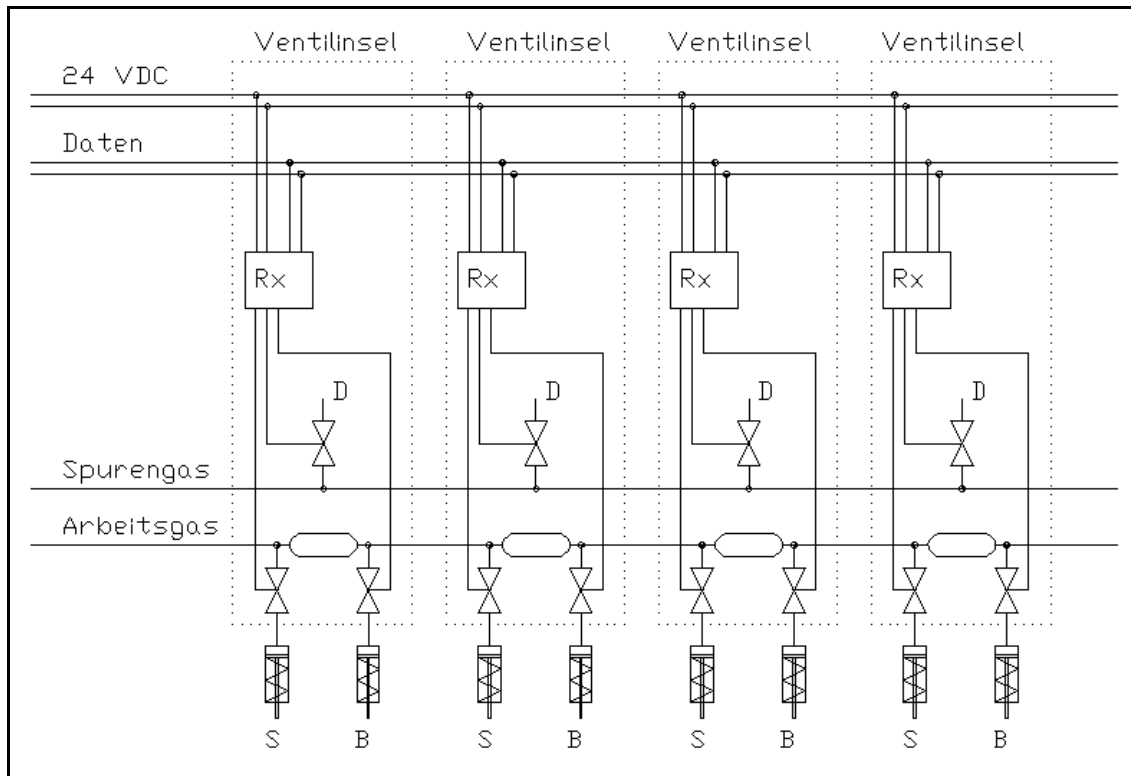


Abb. 83: Das Bussystem der Azimutsteuerung (*upwind control*)
(Ausschnitt mit 4 Ventilinseln)

6.3. Spurengaskonzentration

Die drei besonderen Komponenten der Spurengasdosierung sind das Konzentrationsmeßgerät, die Autokalibration und der Regler. Diese funktionalen Gruppen wurden im Prototyp ausgiebig getestet und sind in dem entsprechenden Kapitel beschrieben. In den nachfolgenden Abschnitten werden im wesentlichen nur die Änderungen gegenüber dem Prototyp herausgestellt.

6.3.1. Gasmeßgerät

Das im Prototyp verwendete Meßgerät der Fa. Siemens hatte sich bewährt. Es wurde darum auch hier wieder eingesetzt. Für die Verwendung im Freiland mußte es jedoch in ein geeignetes Gehäuse (Schutzklasse IP65) eingebaut werden. Auf dem Foto Abb. 84 sind die Einzelheiten zu erkennen. Die Platine, im Bild links oben, ist das eigentliche Photometer. Man erkennt die Meßzelle an den angeschlossenen Gasschläuchen. Unter dem Photometer sitzt die Meßgaspumpe. Die Abschirmung aus Lochblech (rechts oben) verbirgt eine Baugruppenheizung, die zusammen mit der Stickstoff-Schutzbegasung eine witterungsbedingte Kondensation von Feuchtigkeit sicher verhindert. Zu Einzelheiten vgl. Kapitel 6.4.3.

Als Einbauort wurde die Nordseite der PLUMEX gewählt. Dies stellt einen Kompromiß dar. Wie im theoretischen Teil dargelegt, sind kurze Gaswege entscheidend für eine schnelle

Reaktion der Spurengasregelung. Aus diesem Grund wäre der optimale Platz in der Mitte der Beobachtungsfläche gewesen. Dies ist aber aus verschiedenen Gründen nicht oportun, denn hier befindet sich die botanisch wichtige Beobachtungszone, von der kein Teil entbehrt werden kann. Selbst eine erhöhte Montage an dieser Stelle würde durch den unvermeidbaren Schatten die natürliche Strahlungsbilanz verfälschen. Außerdem würde das Gasmeßgerät an dieser Stelle den geringsten Schutz vor Witterungseinflüssen haben.

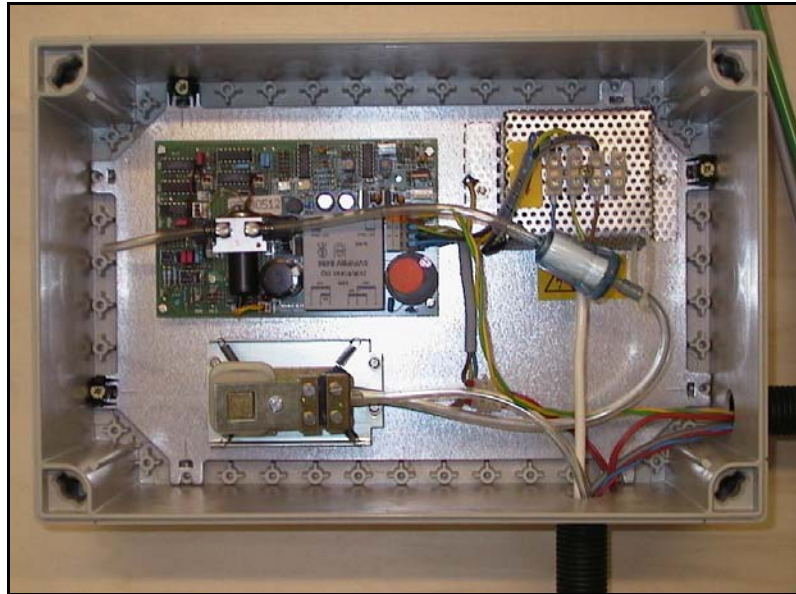


Abb. 84: Die Gasmeßbaugruppe besteht aus dem eigentlichen Meßgerät (Platine), der Meßgaspumpe und einer Baugruppenheizung (unter dem Lochblech)

Durch den an der Nordseite herrschenden Dauerschatten ist das empfindliche Gerät hier vor schroffen Änderungen der Temperatur weitgehend geschützt. Durch die Montage außerhalb der Beobachtungsfläche ist die Meßgasleitung zwar 5 m (Radius der Anlage) lang, aber die daraus resultierende Gaslaufzeit von wenigen Sekunden muß (und kann) in Kauf genommen werden.

6.3.2. Autokalibration

Die Kalibration des Konzentrationsmeßgerätes mit Umgebungsluft als 100%-Punkt und das daraus resultierende Meßergebnis als Vielfaches der aktuellen Umgebungsluftkonzentration (relative Konzentration) hatte sich im Prototyp bewährt. Dem Regler kann auf diese Weise ein fester Sollwert (z.B. 125%) vorgegeben werden und die sich einstellende Gaskonzentration folgt automatisch den Änderungen in der Umgebungsluft mit einem festen Faktor.

Als nachteilig zeigte sich bei den Vorversuchen am Prototyp lediglich das starre Zeitraster des verwendeten Wechslers (Selektor, Fa. Siemens). Die drei Ansaugpunkte wurden von dem Gerät zyklisch nacheinander für jeweils die gleiche Meßzeit aufgeschaltet. Dadurch war die eigentliche Konzentrationsmessung am Ring für zwei Drittel der Zeit zur Messung der beiden

Kalibrationsgase "Null" und "Ambient" unterbrochen. Für die Umgebungsluft reichen aber zwei bis drei Messungen pro Stunde aus und für den Leerwert ist sogar nur eine Messung pro Woche erforderlich. Bei dem verwendeten Gerät konnte weiterhin auch die Vorspülzeit nicht verändert werden. Obwohl z.B. die Zuleitung zur Absorptionspatrone (*scrubber*) nur wenige Zentimeter lang war, wurde ebenso lange vorgesaugt, wie für die Ringmessung über einen mehrere Meter langen Gasweg.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Wechsler ermöglicht eine bessere Verteilung der Zeiten auf die drei Meßstellen. So wird die laufende Konzentrationsmessung nur alle 30 Minuten für eine Kalibrationsmessung mit Umgebungsluft (100%-Punkt) unterbrochen. Etwa täglich wird zusätzlich eine Leerwertmessung (0%-Punkt) gemacht. Die Periodendauer für die Leerwertmessungen beträgt etwa sieben Stunden. Der Taktgenerator läuft ununterbrochen (auch nachts) und dadurch verschieben sich die Zeitpunkte der Kalibrationen gegenüber der Tageszeit. Dadurch kann es im Sommer vorkommen, daß zwei Kalibrationen in das Begasungsfenster eines Tages fallen. Im Winter ist es dagegen durch die kurzen täglichen Betriebszeiten möglich, daß eine Leerwertkalibration über mehrere Tage nicht stattfindet, was aufgrund der ausgezeichneten Stabilität des Meßgerätes und dem im Winter geringeren Anspruch an die Meßgenauigkeit vertretbar ist. Nach jedem Wechsel der Ansaugstelle wird die neue Leitung gespült. Die Voransaugzeit ist hierbei für jeden Kanal individuell eingestellt und auf die Leitungslängen abgestimmt.

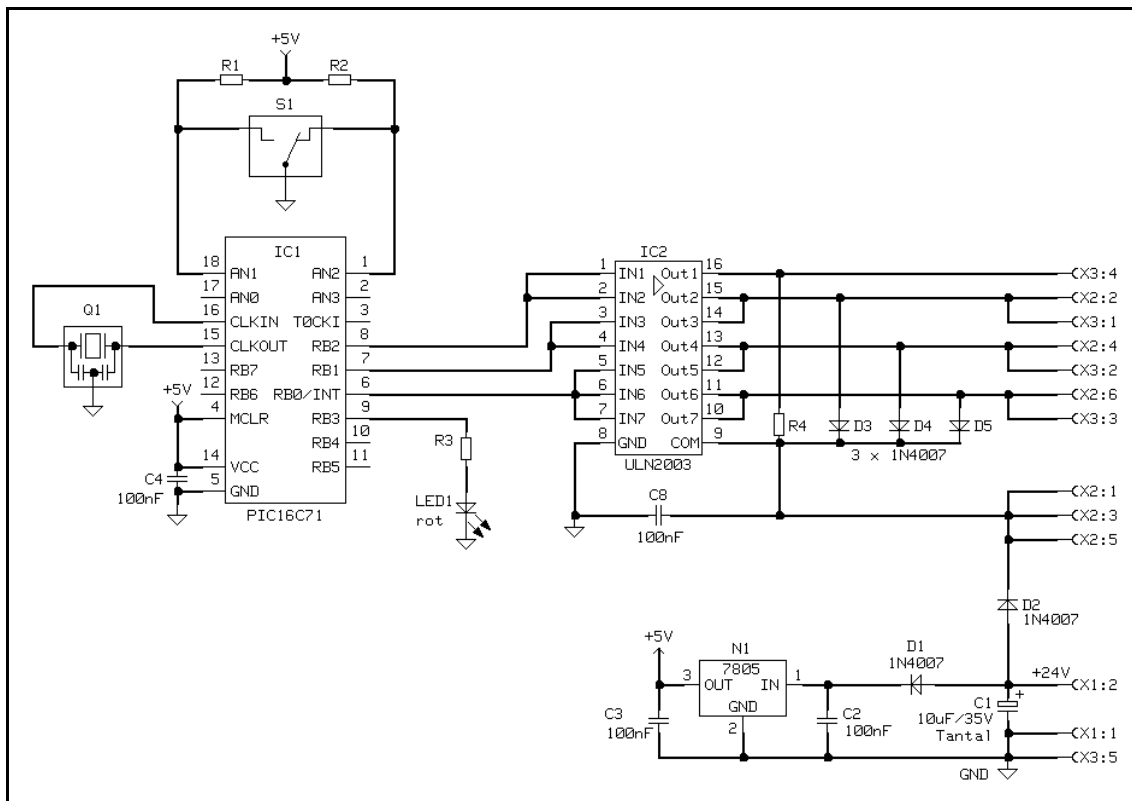


Abb. 85: Elektrischer Schaltplan der Steuerung vom Autokalibrator

Abbildung 85 zeigt den elektrischen Schaltplan. Der Kern der Steuerung ist ein *micro controller* (PIC16C54), der über einen Schaltverstärker (ULN2003) die Magnetventile ansteuert (vgl. pneumatischen Schaltplan, Abb. 86). Das Programm WEXLER.ASM ist im Anhang wiedergegeben. Neben den Schaltsignalen (Klemme x2) erzeugt der Wechsler zusätzlich eine Kennung der beprobten Meßstelle (Klemme x3) und nach Ablauf der Spül- und Meßzeit einen Übernahmetakt (*strobe*) für die Auswerteelektronik (Klemme x3, pin 4, *pullup* R4).

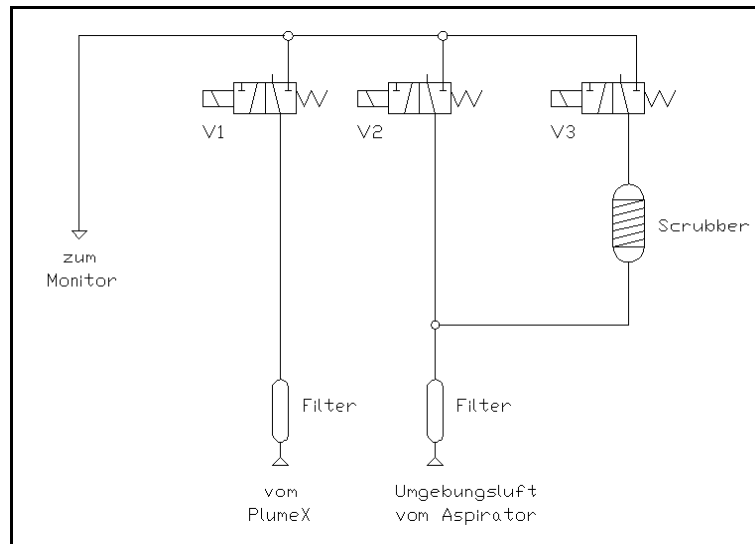


Abb. 86: Pneumatischer Schaltplan des Autokalibrators

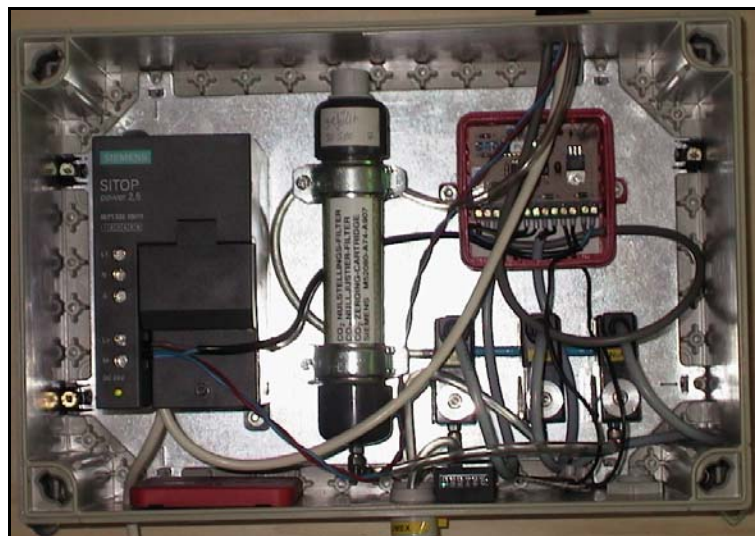


Abb. 87: Die Baugruppe Autokalibrator besteht aus der Steuerung (rechts oben) mit Stromversorgung (links), der Null-Luft-Patrone (Bildmitte) und den Ventilen (rechts unten). Ein Betriebsstundenzähler überwacht die Lebensdauer der Null-Luft-Patrone.

Das Foto Abb. 87 zeigt die Gesamtansicht der Baugruppe "Autokalibrator". Das große Netzteil (links im Bild) ist für den Betrieb einer Begleitheizung der Gaswege ausgelegt. Der kleine Betriebsstundenzähler (unter dem linken Ventil) überwacht die Standzeit der Absorptionspatrone (*scrubber*).

6.3.3. Regler

Die im Prototyp verwendete speicherprogrammierbare Steuerung mit integriertem Regler (Siemens S5-95U) wurde für die PLUMEX übernommen. Abbildung 88 zeigt ein Foto der Baugruppe. Die wesentliche Komponente ist die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) in der Bildmitte. Links daneben befindet sich das 24VDC Schaltnetzteil zur Spannungsversorgung. Die Leistung des Netzteiles ist für die Versorgung der Frostschutzheizung der Windmeßgeräte entsprechend ausgelegt.



Abb. 88: Foto der Reglerbaugruppe an der PLUMEX-1
(links: Netzteil, mittig: SPS, rechts oben: Schütz der Nachtabschaltung)

Das für den Prototyp entwickelte Programm zur Bedienung des Reglers in der Sprache STEP5 wurde dabei nur unwesentlich verändert. Neben der Streichung der Programmteile zur Azimutsteuerung (*upwind control*) wurden folgende Modifikationen der Software vorgenommen:

- (1) Für die gegenüber dem Prototyp geänderte Gasdosierung wurde der Reglerausgang um eine PWM-Routine erweitert.
- (2) Damit sich die PlumeX nach dem täglichen Anlaufen der Spurengasdosierung zunächst equilibrieren kann, wird mit einem Zeitglied die Übernahme von Kalibrationsdaten nach dem Einschalten für zehn Minuten gesperrt.
- (3) Als Hilfe bei Einstell- und Wartungsarbeiten wurden ein analoger (0 ..10 Volt) und ein digitaler (8 *bit* parallel) Ausgang formuliert. Der analoge Ausgang ermöglicht mit einem Schreiber die Langzeitdokumentation des Konzentrationsverlaufes und der Digitalausgang visualisiert die aktuelle Konzentration als Binärzahl an den vorhandenen Leuchtdioden.

- (4) Weiterhin erfolgte eine direkte Aufschaltung der Windgeschwindigkeit auf den Regler als Störgröße. Für die Windgeschwindigkeit wird ein Schalenstern-Anemometer mit magnetischer Lagerung der Fa. Siggelkow Gerätebau (Hamburg) eingesetzt (Typ "Lisa"). Durch die nahezu reibungsfreie Schwebelagerung liegt die Ansprechempfindlichkeit unter $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Herstellerangabe).

Die Struktur des Reglers (PI) wurde beibehalten. Die Parametrierung dagegen wurde an die völlig neue Streckencharakteristik angepaßt. Dabei konnte das Verfahren nach ZIEGLER & NICHOLS (ZIEGLER *et al.* 1942) nicht angewendet werden, weil der dafür erforderliche schwingende Zustand des Regelkreises an der PLUMEX nicht erreicht werden konnte. Der Grund hierfür liegt in der durch Querschnitt und Länge der Zuleitung begrenzten Gaszuführung. Bei übermäßig steigender Kreisverstärkung kann der Volumenstrom dem Stellsignal nicht mehr folgen.

Die Parameter wurden nach CHIEN, RHONES & RESWICK (CHIEN *et al.* 1952) gefunden und im laufenden Betrieb der PLUMEX empirisch korrigiert. Es zeigte sich dabei, daß eine Freilandanlage keine konstante Streckencharakteristik hat und im Idealfall nur ein adaptiver Regler eine höhere Regelgüte erzielen würde. Mögliche moderne Lösungen (*fuzzy logic*) wurden angedacht. Experimente in dieser Richtung hätten den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

6.3.4. Gasbereitstellung

Der Vorratsbehälter für Kohlendioxid ist in Abb. 89 abgebildet. Es handelt sich um einen isolierten Niederdruckbehälter mit Flüssiggas. Eine Kältemaschine (rechts im Bild unter dem Schaltschrank) hält den Inhalt sicher auf der erforderlichen tiefen Temperatur, wenn kein Gas entnommen wird und die Temperatur dadurch ansteigt. Bei starker Gasentnahme hingegen wird automatisch eine elektrische Tankheizung aktiviert, die das Einfrieren des Inhalts verhindert. Das Fassungsvermögen des Behälters ist etwa 30 Mg Flüssiggas. Zur laufenden Überwachung des Füllstandes ist der Behälter auf eine mechanische Waage montiert. Der Waagebalken befindet sich hinter der weißen Klappe in der Bildmitte. Diese Anlage wurde betriebsfertig geliefert und wird vom Gaslieferanten (Fa. Messer, Krefeld) den Vorschriften entsprechend gewartet.

Die Installation zum Anschluß an die vier PlumeX-Ringe wurde selber angefertigt. Abbildung 90 zeigt den pneumatischen Schaltplan dieser Gasverteilung. Um ein Betauen oder gar Einfrieren der Armaturen durch das kalte Kohlendioxid zu verhindern, wird das Gas zuerst über einen elektrischen Durchlauferhitzer (5 kW) geführt. Ein Druckminderventil reduziert den Gasdruck dann auf etwa 8 bar. An einer Verteilung sind die vier Hauptventile der individuellen PLUMEX-Ringe (*replicates*) montiert. Die Installation ist in Kupferrohr ausgeführt und alle *fittings* sind hartgelötet. An dieser Stelle des Gasweges ist eine besondere handwerkliche Sorgfalt erforderlich, weil durch einen unbemerkten Leitungsbruch hier große Mengen Kohlendioxid verloren gehen können. Bei Stromausfall fallen die Ventile in ihre Ruhelage und sperren den Gasstrom.



Abb. 89: Der Behälter für das flüssige Kohlendioxid ist auf einer Waage montiert. Rechts im Bild die Kältemaschine

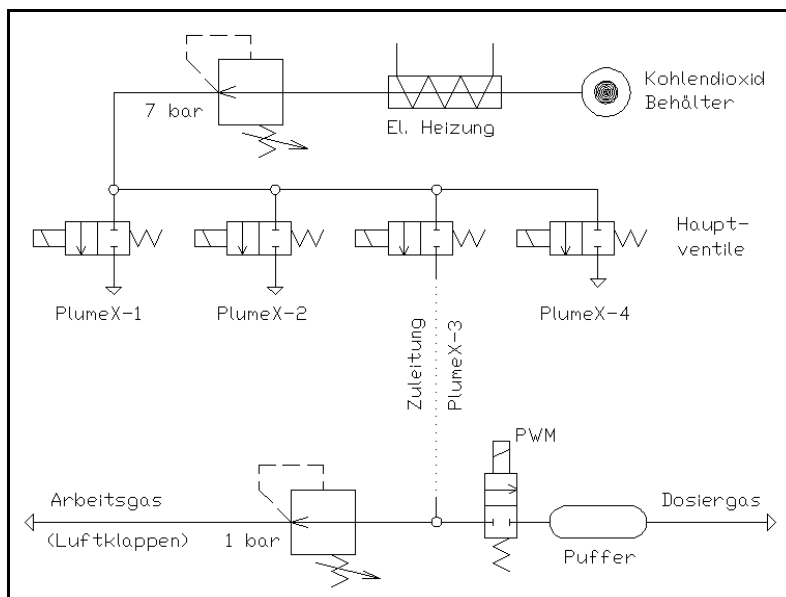


Abb. 90: Pneumatischer Schaltplan der Gasverteilung. Die individuellen Ventile sind nur für PLUMEX-3 gezeichnet

Die vier Hauptventile werden über Steuerleitungen von den *replicates* elektrisch betätigt. Parallel zu den Ventilen sind Stundenzähler geschaltet, um die individuellen Betriebszeiten zu erfassen. Diese Zeiten bilden u.a. die Grundlage für die regelmäßigen Wartungsarbeiten (Filterwechsel, Schmieren bewegter Teile).

Der Gasweg zu (und an) den individuellen PLUMEX *replicates* ist in Abbildung 90 aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für den Ring Nr.3 eingezeichnet, denn alle Ringe sind

identisch gebaut. Als Zuleitungen zu den Ringen wurden anfänglich spezielle Druckleitungen aus Kunststoff (PU, zertifiziert) verwendet. Aus ungeklärter Ursache häuften sich aber nach wenigen Betriebsmonaten die Undichtigkeiten. Um eine Kontamination der Umgebungsluft mit dem Leckgas sicher zu unterbinden, mußten die Zuleitungen dann durch Kupferrohr ($d=10\text{ mm}$) ersetzt werden. Über einen Druckminderer wird das Arbeitsgas für die Luftklappen eingestellt. Der Betriebsdruck dieser Klappen beträgt 1 bar. Das mit "PWM" gekennzeichnete Ventil wird vom Regler betätigt, es erzeugt die Gasimpulse zur Aufrechterhaltung der gewünschten Spurengaskonzentration. Ein nachgeschalteter Pufferbehälter (Inhalt: 1 Ltr) glättet die Impulse zu einem "welligen" Gasstrom. Die beiden Gasströme, Arbeitsgas und Dosiergas, werden auf zwei Ringleitungen an die 24 Ventilinseln geführt. Dieser "Gasbus" ist im Abschnitt über die Ventilinseln erläutert (vgl. Abb. 83).

6.4. Ergänzende Systeme

6.4.1. Funkuhr

Die PLUMEX-Begasungsanlage soll bestimmungsgemäß nur zu Tageszeiten laufen. Ohne Licht ruht die Photosynthese der Pflanzen und eine Zudosierung von Kohlendioxid in den Nachtstunden ist dadurch sinnlos. Weil die Zeiten des Sonnenaufganges (SR, *sun rise*) und Sonnenunterganges (SS, *sunset*) im Jahreslauf wandern, kann eine Nachtabstaltung von konventionellen Schaltuhren nicht wahrgenommen werden. Im Datentelegramm des DCF77-Senders ist außer der Uhrzeit auch das Datum enthalten, so daß daraus die erforderlichen Schaltzeitpunkte ermittelt werden können.

Weiterhin hat eine Funkuhr im Vergleich mit einer konventionellen Schaltuhr zwei zusätzliche Vorteile: Sie zeigt, erstens, praktisch keine Gangabweichung und findet, zweitens, ohne Hilfsmittel wie Pufferbatterien, nach einem Stromausfall von selbst wieder die richtige Uhrzeit. Die für die PLUMEX erforderliche Funkuhr wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut. Das serielle Binärsignal aus einem kleinen speziellen Langwellenempfänger wird dabei in einem *micro controller* dekodiert und verarbeitet.

Abbildung 91 zeigt den Schaltplan der aufgebauten Funkuhr. Über eine *on-board* Spannungsversorgung (LM'05) wird die Systemspannung der PLUMEX (24 VDC) auf die erforderliche Betriebsspannung (5 VDC) der elektronischen Komponenten herabgesetzt. Weil das Empfangsmodul (DCF77) besonders empfindlich gegen Störungen ist, wird die Versorgungsspannung dafür zusätzlich über ein L/C-Filter geführt. Weiterhin ist der Signalausgang der Platine durch einen Optokoppler potentialgetrennt und die Betriebsspannung über ein im Schaltplan nicht eingezeichnetes, externes dreistufiges Filter geführt. Dieser hohe Entstöraufwand ist erforderlich, weil die zahlreichen Schaltnetzteile der PLUMEX gerade in dem Frequenzbereich der Funkuhr besonders starke Störungen erzeugen.

Das verwendete DCF77-Modul (Fa. Conrad, Hirschau) ist eine fertige Einheit, die aus einem entsprechenden Langwellenempfänger mit Verstärkungsregelung und einer abgestimmten Ferritantenne besteht. Das Ausgangssignal, der rohe Bitstrom, wird an zwei getrennten *open-*

collector-Ausgängen herausgeführt. Zur Visualisierung des empfangenen Signales ist einer der beiden Ausgänge über einen Treibertransistor an eine gelbe LED angeschlossen. Der zweite Ausgang ist an den *micro controller* (PIC16C54) geführt. Die externe Beschaltung des *micro controller* beschränkt sich auf einen Quarz mit zwei Kondensatoren. Zwei weitere Leuchtdioden (gelb und rot) dienen der Erkennung des Betriebszustandes (gelb) und signalisieren eventuelle Fehler (rot).

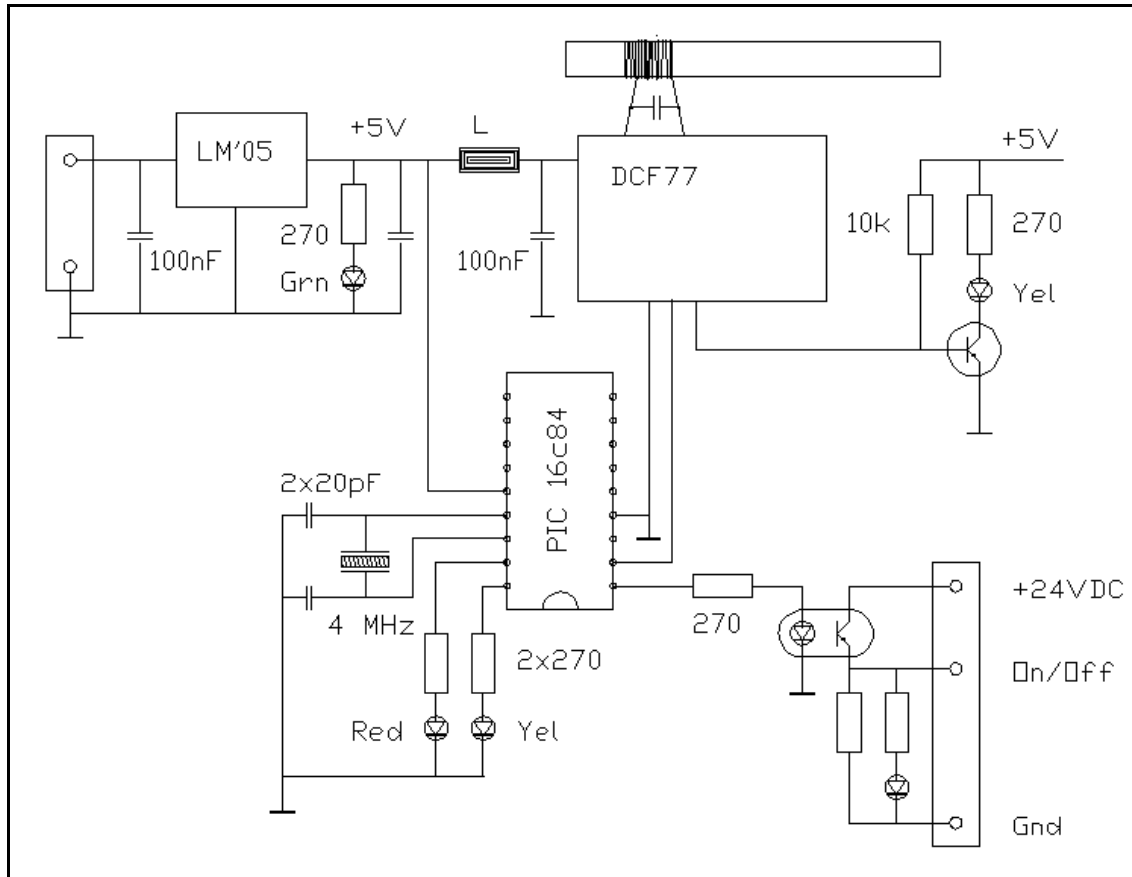


Abb. 91: Schaltplan der Funkuhr

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Assembler-Programm (DCF.ASM) ist im Teil "Programmquellen" wiedergegeben. Es decodiert das serielle Zeitlegramm, ermittelt aus dem erkannten Datum die entsprechende Sonnenaufgangs- (SR, *sun rise*) und Sonnenuntergangszeit (SS, *sun set*) und bildet schließlich das gewünschte Schaltsignal durch Vergleich von SS und SR mit der ermittelten Uhrzeit.

Die Zeitpunkte SR und SS sind im *micro controller* in zwei Tabellen abgelegt (vgl. Tab. 10). Weil eine minutengenaue Ermittlung von SS und SR nicht erforderlich ist, konnten die Zeitpunkte durch eine besondere Notation sehr platzsparend in jeweils einem Byte (8 *bit*) abgebildet werden. Dabei wird die Stunde (0..23) in den linken 5 *bit* dargestellt. Die verbleibenden drei rechten *bit* stellen die Minuten dar mit einer zeitlichen Auflösung von 7½ Minuten. Diese knappe Darstellung einer Uhrzeit hat zudem den Vorteil, daß der

Programmtext für das Handhaben dieser Tabelle sehr einfach ist: Der Betrag des Zeigers wird zum *program counter* (PCL) addiert und das Programm springt dadurch direkt zu dem passenden Wert. Dieser wird in das *work register* geladen und die Subroutine mit einem Rücksprung (RETLW) verlassen.

Tab. 10: Die Uhrzeiten der Schaltpunkte sind platzsparend binär verschlüsselt
(Ausschnitt aus dem Programm DCF.ASM)

Morgen	;		
	;		
	AddWF	PCL,F	; Sonnenaufgänge (MEZ)
	RetLW	0	
	RetLW	(08<<3)+(2*22/15)	; Jan
	RetLW	(07<<3)+(2*45/15)	; Feb
	RetLW	(06<<3)+(2*32/15)	; Mrz
	RetLW	(05<<3)+(2*29/15)	; Apr *
	RetLW	(04<<3)+(2*36/15)	; Mai *
	RetLW	(04<<3)+(2*05/15)	; Jun *
	RetLW	(04<<3)+(2*22/15)	; Jul *
	RetLW	(05<<3)+(2*03/15)	; Aug *
	RetLW	(05<<3)+(2*59/15)	; Sep *
	RetLW	(06<<3)+(2*44/15)	; Okt *
	RetLW	(07<<3)+(2*33/15)	; Nov
	RetLW	(08<<3)+(2*21/15)	; Dez
Abend	;		
	DT	0,0,0	
	;		
	;		
	;		
	AddWF	PCL,F	; Sonnenuntergänge (MEZ)
	RetLW	0	
	RetLW	(16<<3)+(2*40/15)	; Jan
	RetLW	(17<<3)+(2*28/15)	; Feb
	RetLW	(18<<3)+(2*30/15)	; Mrz
	RetLW	(19<<3)+(2*17/15)	; Apr *
	RetLW	(20<<3)+(2*02/15)	; Mai *
	RetLW	(20<<3)+(2*40/15)	; Jun *
	RetLW	(20<<3)+(2*33/15)	; Jul *
	RetLW	(19<<3)+(2*49/15)	; Aug *
	RetLW	(18<<3)+(2*34/15)	; Sep *
	RetLW	(17<<3)+(2*31/15)	; Okt *
	RetLW	(16<<3)+(2*39/15)	; Nov
	RetLW	(16<<3)+(2*14/15)	; Dez
	;		
	DT	0,0,0	
	;		
	;		
	; eot		

Das ausgesendete Zeitsignal DCF77 ist, wie erwähnt, aufgrund seiner Frequenz und seiner Modulationsart (AM, Amplitudenmodulation) naturgemäß sehr empfindlich gegen elektrische Störungen. Trotz der angewendeten aufwendigen elektrischen Filterung können Fehlimpulse

darum nie ganz ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund hat die Plausibilitätsprüfung der erkannten Daten einen besonderen Stellenwert in diesem Programm. Wenn ein unplausibler Wert erkannt wird, dann wird zunächst die rote Fehler-LED geschaltet und das entsprechende Zeitletogramm nicht verwertet. Die genaue Ursache wird vom Programm im "PortB" des *micro controller* binär verschlüsselt abgelegt. In der Regel dreht es sich dabei aber meist nur um vorübergehende Störimpulse und bereits im nächsten Telegramm ist die LED wieder aus. Bei nachhaltigen Betriebsproblemen, wenn die rote LED nicht mehr erlischt, können die unbeschalteten Ausgänge (6 bis 13, PortB) des PIC mit einer Prüfspitze abgetastet werden und liefern weitergehende Information (vgl. Tab. 11).

Tab. 11: Die Bedeutung der Fehlerbits an PortB des *micro controller* der Funkuhr

<i>bit</i>	Bedeutung
0	Impulslänge außerhalb Zeitfenster
1	<i>parity error</i>
2	Fixe <i>bits</i> falsch
3	Plausibilität Monat (1..12)
4	Plausibilität Stunde (0..23)
5	Plausibilität Tage (1..31)
6	Plausibilität Minuten (0..59)
7	Telegramm zu lang (>59 <i>bit</i>)

6.4.2. Aspirator

Mit dem entwickelten Expositionssystem soll eine proportionale Überhöhung der Umgebungskonzentration gefahren werden. Die Umgebungsluft dient hierbei als das Kalibriergas für die relativ messenden Gasmeßgeräte und die Bereitstellung von unverfälschter, für das Versuchsgelände repräsentativer Referenzluft, ist von entscheidender Bedeutung. Die Referenzluft darf auf keinen Fall durch Kohlendioxid aus anderen Quellen kontaminiert sein. Zu diesem Zweck müssen sich die Ansaugstellen an exponierten Positionen in genügendem Abstand von den Ringen befinden. In der vorliegenden Installation befinden sich diese Ansaugventile an den drei außen liegenden Ringen, wie es die Abb. 92 zeigt.

Durch die große räumliche Ausdehnung des Geländes und seine Lage im Lee einer wirbelbildenden Baumgruppe geschieht es sehr häufig, daß der Wind an allen Ringen deutlich unterschiedliche Richtungen hat. Aus diesem Grunde werden die Ansaugpunkte auch nicht zentral geschaltet, sondern jeder Ring öffnet "sein" Ventil, wenn der Wind so steht, daß der Ansaugpunkt im Luv sitzt. Eine Ringleitung führt die angesaugte Referenzluft an die Gasmeßgeräte der individuellen Ringe.

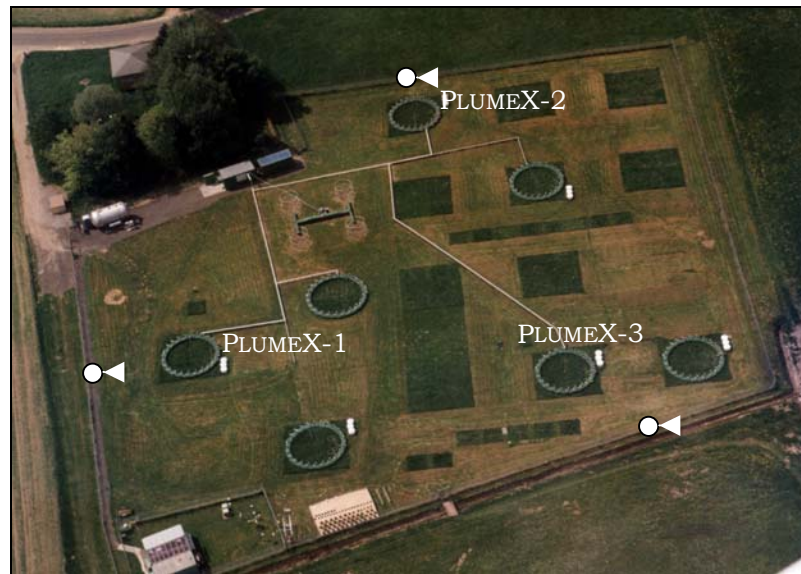


Abb. 92: Luftbild der Versuchsfläche mit Ansaugpunkten für Aspirator)
(●◀ Ansaugstelle für Umgebungsluft)

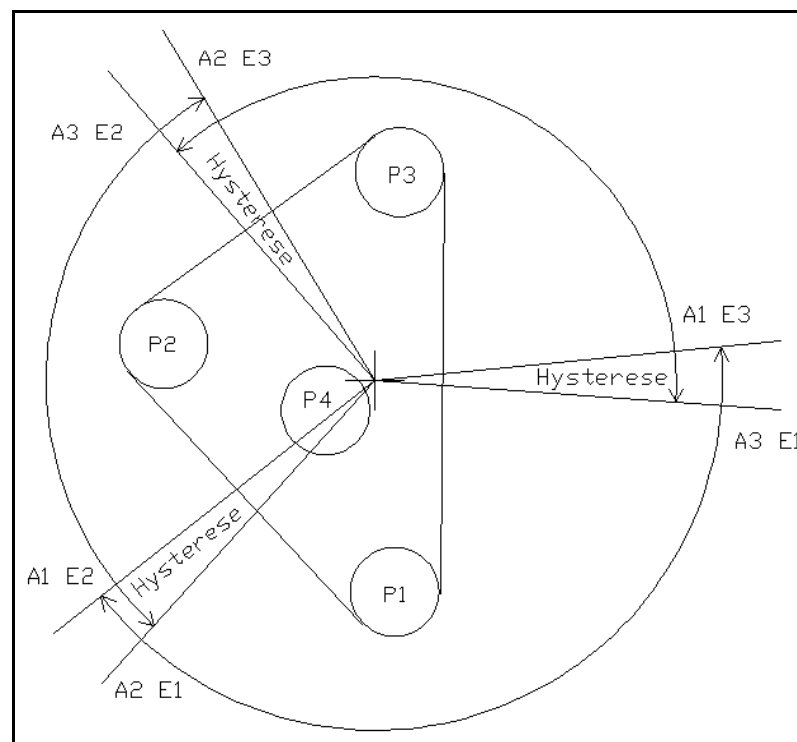


Abb. 93: Schaltzustände des Aspirators
(z.B.: "A3 E2" bedeutet "Ausschalten Ansaugpunkt 3 und Einschalten Ansaugpunkt 2")

Das Öffnen und Schließen der Ansaugventile geschieht durch eine besondere Elektronik; diese sitzt mit dem Ventil zusammen in einem Gehäuse und erhält die Windrichtungsinformation

direkt aus dem Daten-Bus des jeweiligen Ringes. Die *hardware* ist identisch mit den oben bereits beschriebenen CAPmatic-Baugruppen (vgl. Abb. 81). Der *micro controller* PIC16C54 ist auch hier das Herz der Schaltung. Das Steuerprogramm (ASPI.ASM) ist im Anhang wiedergegeben. Der PluBus wird von dem Programm mitgelesen. Die Windrichtung ergibt sich aus der Lage des Dosierpunktes im Ring. Damit aber immer mindestens ein Ventil sicher geöffnet ist, überlappen sich die Winkelbereiche der Ventile um 15 Grad. Ein "Flattern" der Ventile wird durch eine Hysterese der Schaltpunkte verhindert. Die Schaltzustände des Aspirators sind in der Abb. 93 wiedergegeben.

6.4.3. Schutzbegasung

Eine Feldbegasungsanlage ist naturgemäß starken täglichen und jahreszeitlichen Klimaschwankungen unterworfen. Durch die Wechsel von Luftdruck und -temperatur besteht immer die Gefahr der Kondensation von atmosphärischem Wasser auf den empfindlichen elektronischen Komponenten. Gebildetes Kondenswasser kann durch seine Leitfähigkeit Schaltkreise "verstimmen" und weiterhin auch durch elektrochemische Korrosionsvorgänge ganze Baugruppen unbrauchbar machen. Der Schutz der Elektronik ist also eine besondere Aufgabe bei elektrischen Anlagen, die über Jahre unterbrechungsfrei im Freiland laufen sollen.

Im vorliegenden Fall wird ein besonders effektiver Schutz durch kontinuierliches Spülen der elektronischen Baugruppen mit einem trockenen Stickstoffstrom erreicht. Dabei wird der Schutzgasstrom nacheinander durch mehrere Schaltkästen geführt, ohne seine trocknende Wirkung zu verlieren. Zu diesem Zweck sind die einzelnen Kästen untereinander durch eine Gasleitung verbunden. Der in den ersten Kasten eingespeiste Strom durchläuft nacheinander die Schaltkästen, um aus dem letzten in der Reihe in die Umgebung zu entweichen. Dabei sind die empfindlichen Komponenten (z.B. das Gasmeßgerät) am Anfang, und die weniger empfindlichen Baugruppen (z.B. Unterverteilungen) am Ende des Gasweges angeordnet.

Abbildung 94 zeigt die Gesamtansicht der entwickelten Stickstoffdosierung für alle vier Ringe. Weil die Diffusion von Wasser in die Schaltkästen hinein nur sehr langsam geschieht, ist zu einem sicheren Schutz der Anlage nur ein geringer Gasstrom von typischerweise einem Liter pro Stunde erforderlich. Das eigentliche Problem der Schutzbegasung ist die Bereitstellung eines so kleinen Gasstromes, der im Idealfall über viele Jahre konstant sein muß. Von einem Nadelventil ist eine derartige Langzeitkonstanz über Jahre nicht ohne weiteres zu erwarten; darum wurde im Rahmen dieser Arbeit eine besondere "digitale" Dosiereinheit entwickelt und aufgebaut. Abb. 95 zeigt den pneumatischen Schaltplan. Die Dosierung geschieht hierbei durch das zeitlich gesteuerte Füllen und Entleeren eines kleinen Meßbehälters aus Stahl. Der Rauminhalt ist 100 ml und der Ladedruck beträgt fünf bar. Mit jedem Arbeitstakt werden etwa 0,5 Normalliter Gas freigesetzt. Über die quartzgenaue Taktfrequenz wird auf diese Weise ein langzeitkonstanter Volumenstrom von erforderlicher Stärke eingestellt.

Der Ladedruck wird von einem konventionellen Reduzierventil gehalten. Diese Ventile haben in dem gewählten Druckbereich eine sehr gute Präzision und können durch die impulsartige

Entnahme auch mechanisch nicht "haken". Mit vier Verteilventilen werden die Gasportionen zyklisch zu den individuellen Ringen geschickt. Dabei schwächen sich die Druckstöße aus der Dosiereinrichtung in der für jeden Ring mindestens 50 m langen Zuleitung ab und sind bereits im ersten Schaltkasten nicht mehr wahrnehmbar. Der Schutzgasstrom ist quasi-kontinuierlich.

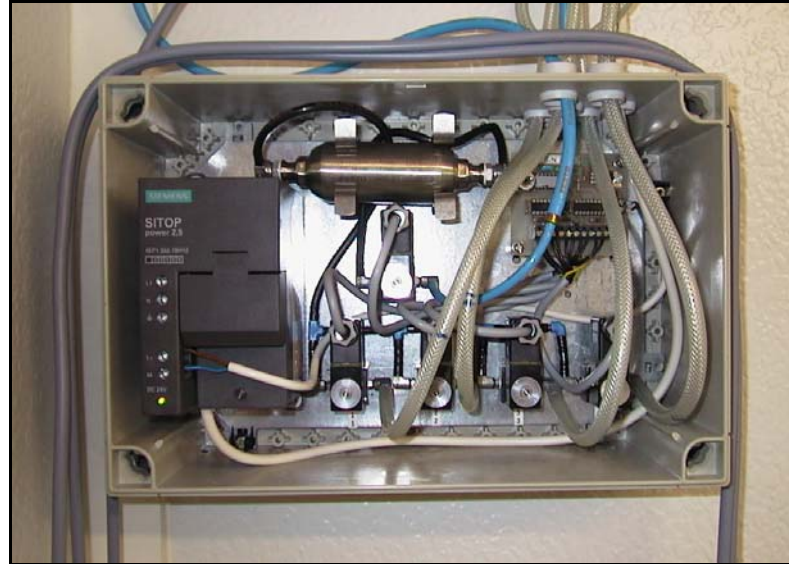


Abb. 94: Stickstoffdosierung für alle vier Ringe

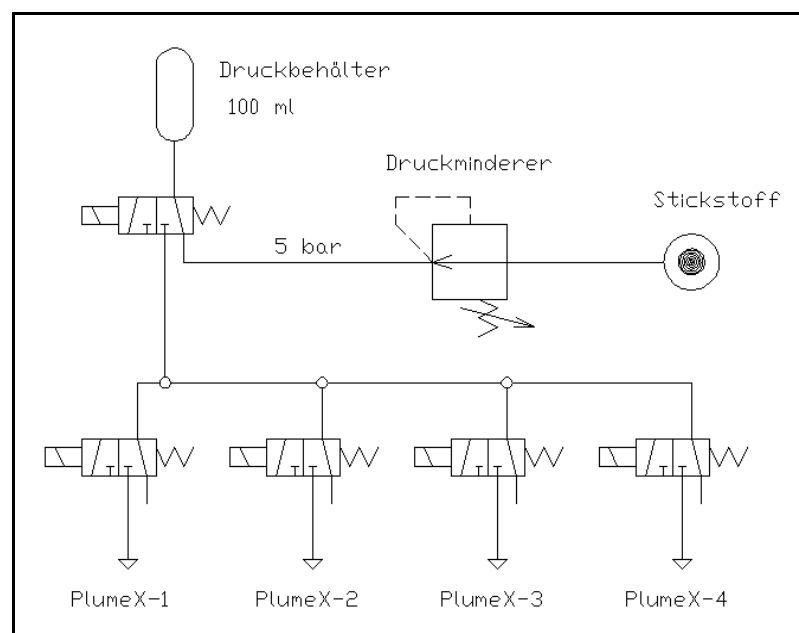


Abb. 95: Pneumatischer Schaltplan der Stickstoffdosierung

Die erforderlichen Schaltsignale werden von einer besonderen Steuerelektronik erzeugt. Der elektrische Schaltplan ist in Abb. 96 wiedergegeben. Die Hauptkomponenten sind der *micro-controller* (PIC16C84) und ein Treiber (ULN 2803). Daneben befinden sich die Bauteile der Spannungsversorgung. Das Programm (N2DOSI.ASM) ist im Anhang wiedergegeben. Mit

einem Umschalter auf der Platine kann die Taktfrequenz (der Gasstrom) umgestellt werden. Dies ist zum schnellen Befüllen der elektrischen Schaltkästen mit Schutzgas sinnvoll, wenn diese z.B. bei Wartungsarbeiten geöffnet worden waren.

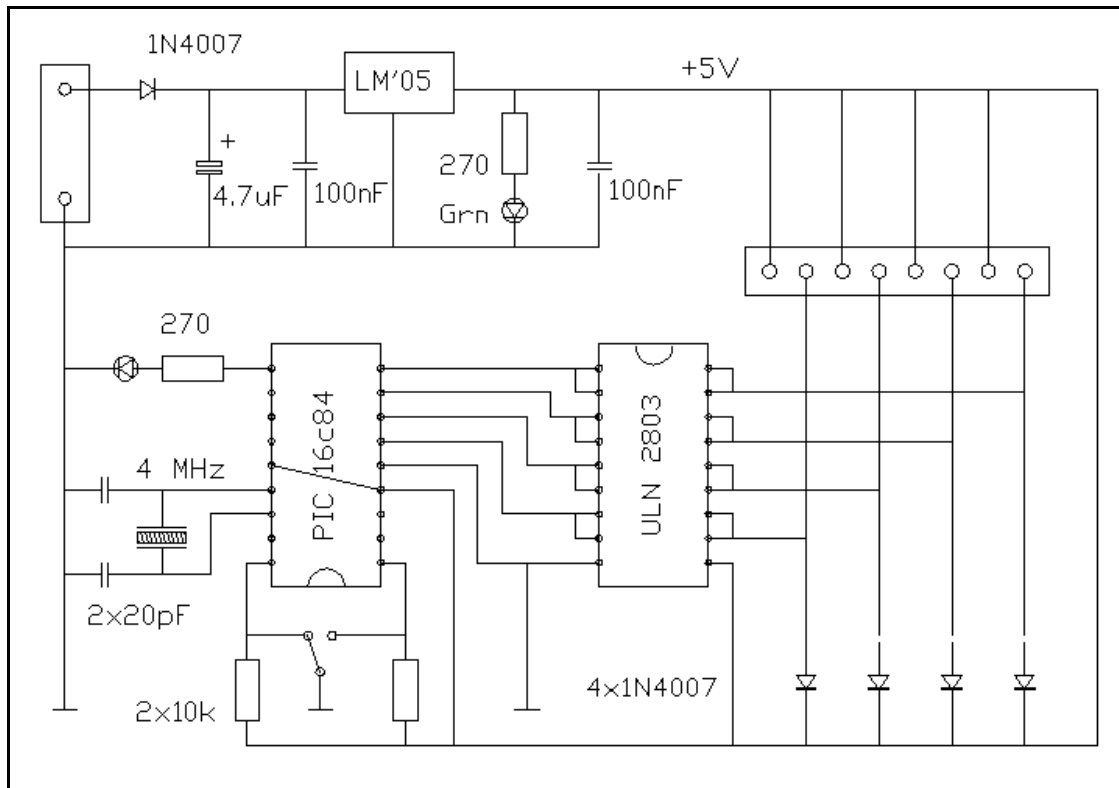


Abb. 96: Elektrischer Schaltplan der Stickstoffdosierung

6.4.4. Fehlerdiagnose mit künstlicher Intelligenz

In grober Betrachtung läßt sich die Arbeitsweise einer PLUMEX in nur zwei prinzipiell unabhängige Grundfunktionen gliedern: Das eine Subsystem, die Azimutsteuerung, positioniert die Anlage vor dem Wind und das zweite Subsystem, der Regelkreis, führt die Spurengaskonzentration in einem bestimmten zeitlichen Profil. Tatsächlich zeigt aber die Feinstruktur der realen Anlage zahlreiche komplexe elektrische Verknüpfungen zwischen den scheinbar unabhängigen beiden Grundfunktionen, denn zusätzlich arbeiten elektrische und pneumatische Hilfssysteme, wie die Schutzbegasung oder die Funkuhr, im Sinne der gestellten Aufgabe. Insgesamt wirken in jedem Ring (*replicate*) des Freiland-Expositionssystems PLUMEX mehr als 30 *micro controller* zusammen.

Wenn in einem solchen System ein Fehler auftritt, die Anlage falsche Konzentrationen einstellt oder überhaupt nicht anläuft, dann müssen die vielfältigen elektrischen, elektronischen pneumatischen und mechanischen Subsysteme in ihrer Vernetzung bedacht werden. Weil die botanische Aufgabenstellung eine längere Betriebsunterbrechung nicht erlauben kann, liegt ein beträchtlicher zeitlicher Druck auf dem Techniker, der mit der Reparatur befaßt ist. Durch die betriebliche Zuverlässigkeit der Anlage sind solche Aussetzer sehr selten, aber gerade dadurch

ist die innere Struktur der Anlage nicht immer gegenwärtig. In einem Störfall muß also eine kompetente Hilfe zur Verfügung stehen.

Ein Handbuch mit einer Liste möglicher Fehler und Abhilfen (*trouble shooting*) könnte nicht vollständig sein und wäre im Fehlerfall nur ein Notbehelf, denn bei einer neuartigen Anlage fehlt naturgemäß die Betriebserfahrung und die Kenntnis eventueller Schwachstellen. Aus diesem Grund wurde für die PLUMEX ein kleines, aber wirksames Computerprogramm geschrieben, das durch die Simulation von "Künstlicher Intelligenz" aus einer Abfolge von Ja/Nein-Fragen eine erste Diagnose anbietet. Ein typischer Dialog ist in der Abb. 97 wiedergegeben.

```

PLUMEX Fehlerdiagnose (Version 1.0)
=====

1. Laufen die Ventilatoren im Plenum (J,N)? ja
2. Reagieren die Luftklappen auf die Windfahne (J,N)? ja
3. Sind Gas-Impulse an der SPS-LED sichtbar (J,N)? ja
4. Ist die Spurengaskonz. außerhalb der Toleranz (J,N)? ja
5. Ist die Konzentration zu hoch (J,N)? nein

-----
Diagnose: Die Windfahne ist verdreht.
-----

6. Stimmt das (J,N)? _

```

Abb. 97: Dialog am Bildschirm zur Fehlerdiagnose durch Simulation von "Künstlicher Intelligenz"
(Die Eingaben sind **fett** gedruckt.)

Bei diesem Dialog ist die Abfolge der Fragen nicht starr, sondern von den jeweils gegebenen Antworten abhängig. Das Programm läuft in einem sogenannten Binärbaum an der Wurzel beginnend, entlang der Zweige, bis an das Ende eines Astes - hier steht dann die (vermutliche) Fehlerursache.

Dieser Binärbaum ist jedoch nicht statisch, d.h. fest vorgegeben, sondern das Programm kann vielmehr "dazu lernen". Wenn es sich nämlich im Verlauf einer Reparatur herausstellt, daß die von dem Programm angebotene Diagnose nicht zutreffend war, dann kann in einem besonderen Dialog die neue Erkenntnis in den Binärbaum eingebaut werden. Ein solcher Dialog wäre beispielsweise der in Abb. 98 abgedruckte. Er schließt an den Diagnosedialog an und wird durch eine negative Antwort auf die Frage "Stimmt das?" (Nr. 6) ausgelöst.

Mit diesem "Lernprozeß" in Form eines Dialoges wird die Position der alten Diagnose im Binärbaum mit der neuen Frage besetzt und die falsche Diagnose zusammen mit der neuen Diagnose an das Ende der dadurch entstandenen weiteren Ja/Nein-Verzweigung gelegt. Auf diese Weise wächst das Programm mit der Erfahrung und kann auch einem an der Anlage nicht

trainierten Techniker helfen, die Anlage im Falle einer Betriebsstörung mit guter Chance wieder in Betrieb zu setzen.

```
-----
Diagnose: Die Windfahne ist verdreht.
-----

6. Stimmt das (J,N)? nein

7. Was war der Fehler? Spurengasleitung eingeklemmt
8. Wie lautet eine J/N-Frage zur Unterscheidung der Fehler?
   Ist ein Strömungsgeräusch am Dosierventil hörbar?
9. Wie wäre die J/N-Antwort auf diese Frage? nein

-----
Danke, jetzt kenne ich 208 mögliche Fehler.
-----
```

Abb. 98: Dialog am Bildschirm zur Erweiterung der Fehlerdatenbank
(Die Eingaben sind **fett** gedruckt.)

Das Programm DIAGNOSE.PRG ist im Anhang abgedruckt. Es ist in der Sprache dBASE geschrieben. Zu dem Programm gehört eine Datei, in der der Binärbaum abgebildet ist. Jede Zeile entspricht einem Knoten und besteht aus einem Textfeld sowie zwei numerischen Feldern (Ja & Nein). Zeigen die J/N-Felder eines Knotens auf nachfolgende Knoten, dann steht in diesem Textfeld eine Frage. Sind die beiden Zeigerfelder aber gleich Null, dann enthält das Textfeld eine Diagnose. Neue Fragen und Diagnosen werden an die Datei angehängt und die betroffenen Ja/Nein-Zeiger entsprechend verändert.

6.5. Meßplatz

Zur Überwachung der PlumeX-Expositionssysteme wurde ein besonderer Meßplatz aufgebaut. Abbildung 138 zeigt eine Gesamtansicht. Neben der reinen Beobachtungsfunktion hat diese Einrichtung auch den Zweck, die anfallenden Meßdaten zu speichern (*data logger*) und einer späteren Auswertung zugänglich zu machen. Zusätzlich zur Spurengaskonzentration werden die aktuellen Windparameter, Richtung und Geschwindigkeit, aufgezeichnet. Gleichzeitig interpoliert das Programm die horizontal verteilten Konzentrationsmeßwerte und bringt die Spurengasverteilung in einer farbigen Isoliniendarstellung auf den Bildschirm.

Das Herz der Installation ist ein *personal computer* (PC AT 286, 16 MHz) mit dem Betriebssystem DOS (Ver. 3.30), auf dem ein im Rahmen dieser Arbeit geschriebenes Programm (MUX.PAS) läuft. Die verwendete Programmiersprache PASCAL (Borland, Ver. 4.0) erlaubt eine kompakte Struktur mit weniger als 20 kBytes Programmgröße. Die anfallenden Daten werden in einer kalenderartigen Verzeichnisstruktur abgelegt. Jeder Monat hat darin sein eigenes Unterverzeichnis, in dem die Daten eines Kalendertages jeweils eine Datei bilden. Durch den ökonomischen Umgang mit Speicherplatz ist eine Festplatte überflüssig. Das Steuerprogramm paßt zusammen mit dem Datenaufkommen von vier

Monaten auf eine normale 3½"-Diskette. Durch das Fehlen einer Festplatte hat der PC keine mechanischen Verschleißteile, was die Ausfallsicherheit stark erhöht. Weiterhin konnte durch den geringen Stromverbrauch auch der Lüfter im Netzteil abgeklemt werden, was die Langzeitzuverlässigkeit ebenfalls erhöht, denn ohne Lüfter ist eine Akkumulation von Staub im PC unmöglich.



Abb. 99: Der Meßplatz erlaubt die Überwachung einer PLUMEX

Das Steuerprogramm (MUX.PAS) steuert einen selbstgebauten Probenwechsler (Abb. 100), der am Ringkanal montiert ist und aus neun Meßstellen zyklisch Gasproben zieht. Über eine Sammelleitung wird das Meßgas dem Meßplatz zugeführt. Durch diese Einrichtung können horizontale Konzentrationsverteilungen ermittelt werden.

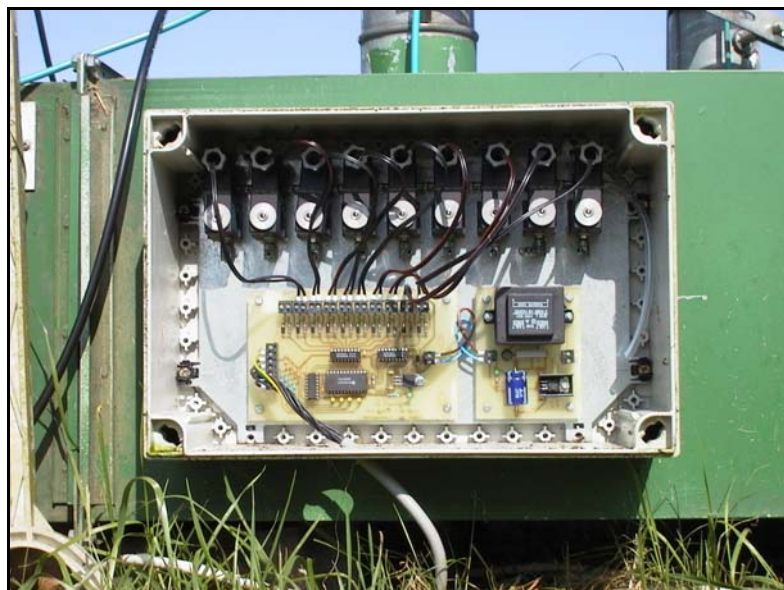


Abb. 100: Der Meßstellenwechsler dient zur Erfassung der räumlichen Spurengasverteilung. Er ist vom Meßplatz ferngesteuert und erfaßt neun Meßstellen an der PLUMEX-1

Die Messung der Spurengaskonzentration erfolgt als relative Konzentration mit genau den gleichen Baugruppen, wie sie für die Expositionssysteme PLUMEX entwickelt wurden. Im Bild (Abb. 99) sind das Gasmeßgerät (links oben), der Autokalibrator (links unten) und die Regler-Baugruppe (rechts oben) sichtbar. Die Ausgabe der aktuellen relativen Gaskonzentration erfolgt am Regler als 8-stellige Binärzahl. Diese parallele Information wird über eine 9-adrige Leitung direkt in einen PC eingelesen.

Neben der Gaskonzentration können die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung gemessen und abgespeichert werden. Diese Daten werden mit einer speziellen Elektronik aus dem Bussystem der Plumex-Anlage (PLUBUS) abgeleitet (vgl. Abb. 99, im Schaltkasten rechts unten). Das Kernstück der Auswerteschaltung sind zwei *micro controller* (PIC16C54, PIC16C84), von denen der eine die Windrichtungsinformation im PLUBUS dekodiert und der andere die erkannten Windwegimpulse zu einem analogen Geschwindigkeitssignal integriert.

Weil eine konkrete Windrichtung auf dem PluBus nicht übertragen wird, wird die Windrichtung aus der relativen Lage des "Blasmusters" ermittelt. Charakteristisch ist dabei die Lage des Dosierpunktes, der von der Azimutsteuerung immer auf der Luvseite des Expositionssystems gehalten wird. Diese primäre Richtungsinformation hat zwar zunächst nur eine Auflösung von 15° (Segmentbreite), aber durch eine nachgeschaltete gleitende Mittelung über 256 Werte im Programm MUX.PAS wird im praktischen Betrieb eine deutlich höhere Auflösung erreicht.

Ebenfalls auf dem PLUBUS primär nicht vorhanden, sind Informationen über die Windgeschwindigkeit. Um die Windgeschwindigkeit aber dennoch auch über den PLUBUS senden zu können, wurde ein besonderer Weg beschritten: Das Ausgangssignal des Anemometers wird, wie an entsprechender Stelle beschrieben ist, dem Regler als Störgröße zugeführt. Hier wird das Geschwindigkeitssignal zusätzlich durch Integration in Windwegimpulse umgewandelt und diese Impulse, mit einem Abstand von etwa 30 cm Windweg, werden dem Steuergerät der Azimutsteuerung zugeführt. Hier wird eine nicht benötigte Segmentadresse (Nr.30) verwendet und mit jedem eingehenden Impuls der Status eines *data bit* invertiert und ausgesendet. Die Auswerteschaltung am Meßplatz erkennt, wann die reservierte Segmentadresse (Nr.30) angesprochen wird und erzeugt daraus die Impulse, die von dem nachgeschalteten *micro controller* zu einem Geschwindigkeitssignal umgerechnet werden. (Der Kehrwert des zeitlichen Impulsabstandes ist der Windgeschwindigkeit proportional.)

Das Einlesen der elektrischen Signale in den PC geschieht über eine besondere *Interface*-Karte mit Binär- und Analogeingängen. Auf die Wiedergabe der Schaltpläne und Programme der Nicht-PLUMEX-Komponenten wird verzichtet.

7. Bewertung des neu entwickelten Expositionssystems

Die bei der Entwicklung des Freilandexpositionssystems PLUMEX angestrebten technischen Eigenschaften sind schon in den jeweiligen Bauphasen verifiziert worden. So konnte bereits am Prototyp die Qualität des neuartigen Versorgungsrings (CAP, *circular active plenum*) belegt werden (vgl. Kap. 5) und die weiteren Innovationen, wie z.B. das besondere Bussystem, die automatische Kalibration oder die PWM-Dosierung haben ihre Funktionalität mit der ersten fertigen PLUMEX belegt (vgl. Kap. 6). Drei Fragen aber mußten in den vorangegangenen Kapiteln offen bleiben: Das sind Fragen nach dem Verhalten der Anlage unter den wirklichen Bedingungen eines Routinebetriebes. Hier ist von besonderem Interesse, (1) die Konzentration und Homogenität der erzeugten künstlichen Atmosphäre, (2) die durch den Gasverbrauch verursachten Betriebskosten und (3) die Zuverlässigkeit der Anlage. Es werden die Daten aus dem Routinebetrieb der laufenden Installation mit vier PLUMEX *replicates* beurteilt. Zur Veranschaulichung werden dabei die dargelegten Eigenschaften und Daten, wo immer möglich, den veröffentlichten Daten vergleichbarer Anlagen gegenübergestellt.

Das nachfolgende Kapitel erläutert zunächst die Grenzen eines objektiven Vergleiches mit bestehenden Anlagen anderer Autoren.

7.1. Vergleichbarkeit von Expositionssystemen

Die betrachteten dynamischen *Plume*-Systeme sind sich in ihren Grundfunktionen sehr ähnlich. Wie der Name *Plume* (engl. Rauchfahne) bereits impliziert, wird bei diesen Systemen das Spurengas aus rechnergesteuerten Auslässen (VVP, *vertical vent pipe*) ausgebracht und, ähnlich der Rauchfahne eines Schornsteins, von der Umgebungsluft verwirbelt und über das Versuchsfeld getragen. Die dafür erforderliche Elektronik erfüllt dabei zwei prinzipiell voneinander unabhängige Aufgaben. Diese sind das Positionieren der VVP vor dem Wind und das Regeln der Spurengaskonzentration.

Trotz dieser Ähnlichkeit ist aber der direkte Vergleich von *Plume*-Systemen in bezug auf ihre Leistungsfähigkeit recht schwierig. Dies liegt an der Tatsache, daß die bekannten Anlagen sehr stark voneinander abweichende Abmessungen haben. So bedeckt die größte Anlage (MCLEOD 1985, 1995) mehr als die 25fache Fläche der Anlage von WULFF *et al.* (1992). Die Größenverhältnisse sind in Abb. 101 visualisiert. Mit der Zunahme der zu begasenden Fläche wachsen die Probleme, eine homogene Spurengasverteilung zu erreichen, überproportional. Tabelle 12 stellt die Kerndaten der ausgewählten Begasungsanlagen noch einmal nebeneinander. In der Spalte "rF" ist die relative Bruttofläche angegeben. Als willkürliche Bezugsgröße wurde die Fläche von einem typischen Ring mit 22 m Durchmesser gewählt. Der Ring von SPRING *et al.* (1996) ist die kleinste bekannte Anlage. Er hat einen Durchmesser von nur 20 cm, das ist etwa ein Zehntausendstel einer Standardanlage. Die Anlage von MCLEOD ist fünfmal so groß wie eine Standardanlage. Aus diesen Zahlen wird verständlich, daß ein direkter Vergleich von "Begasungsqualitäten" nur innerhalb von ähnlichen Anlagen sinnvoll ist.

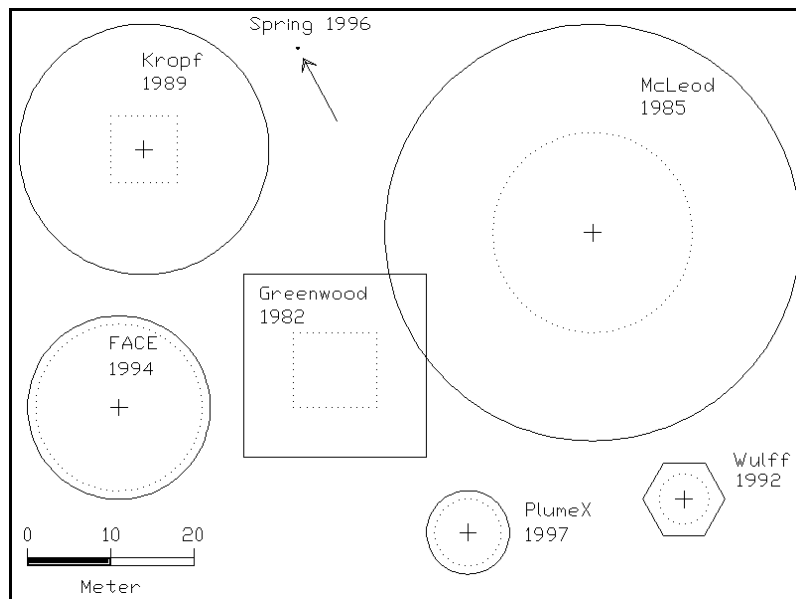


Abb. 101: Größenvergleich ausgewählter *plume*-Expositionssysteme
(Die Nutzfläche ist gestrichelt dargestellt.)

Tab. 12: Kerndaten einiger ausgewählter Expositionssysteme
(Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Anlage ist **fett** gedruckt.)

Autor (Jahr)	rF	Standort	Vegetation	Spurengas
SPRING (1996)	82 μ	England	Magerrasen	Kohlendioxid
MIGLIETTA (1997)	0,14	Italien	Kartoffel	Kohlendioxid
WULFF (1992)	0,22	Finnland	k.A.	Ozon
PLUMEX	0,32	Deutschland	Grünland	Kohlendioxid
HENDREY (1992)	0,46	USA	k.A.	Schwefeldioxid
LEWIN (1994)	1,0	USA (AZ)	Baumwolle	Kohlendioxid
KROPFF (1989)	1,86	Holland	Wicken	Schwefeldioxid
HENDREY (1999)	1,86	USA (NC)	Bäume	Kohlendioxid
MCLEOD (1985)	5,16	England	Gerste	Schwefeldioxid

rF = auf das BNL-FACE bezogene, relative Fläche

Schwierigkeiten beim Vergleich der Systeme ergeben sich auch hinsichtlich der untersuchten Vegetationseinheiten bzw. Ökosysteme: von halbnatürlichen Systemen (Grünlandökosysteme) über verschiedene Agroökosysteme (Baumwolle, Weizen, Bohnen u.v.m.) bis hin zu Forstbeständen sind die unterschiedlichen Typen vertreten. Da die Vegetation durch ihre aerodynamische Rauigkeit entscheidenden Anteil an der Verteilung der Rauchfahnen (*plume*)

über den Bestand hat, übt sie einen deutlichen Einfluß auf die regelungstechnischen Eigenschaften der Versuchsfläche (der "Regelstrecke") aus.

Die Nichtvergleichbarkeit gilt auch deswegen, weil die Eigenschaften eines gegebenen *plume*-Systemes naturgemäß nicht nur als Gerätekonstante betrachtet werden dürfen, sondern sehr stark von dem Klima ihres Standortes abhängen. Die bislang beschriebenen Anlagen sind in West-, Mittel- und Nordeuropa sowie in den Vereinigten Staaten in sehr unterschiedlichen Klimazonen etabliert. Von allen Klimafaktoren ist der Wind die stärkste Einflußgröße: Bei Windstille muß eine Begasung ruhen, weil kein Transport stattfindet und bei steigenden Windgeschwindigkeiten steigt der Spurengasbedarf, um mit den herangeführten Luftmassen Schritt zu halten. Ein objektiver Vergleich darf also nur Anlagen betrachten, die unter gleichen Windbedingungen arbeiten.

Aber auch wenn Anlagendimension, Vegetation, Spurengas, Zielkonzentration, klimatische Lage *etc.* übereinstimmen, ist ein Vergleich dennoch schwer, weil die ermittelten Betriebseigenschaften von den jeweiligen Autoren individuell aufbereitet und präsentiert werden. Dies gilt für die unterschiedlich gewählten täglichen Meßzeiten, die Meßhöhen und die Zeitkonstanten der Meßgeräte. Weiterhin sind die Daten durch die nachfolgende mathematische Aufbereitung beeinflußt, so z.B. durch die Eliminierung von Ausreißern.

7.2. Rahmenbedingungen

Wie im vorhergehenden Kapitel dargelegt wurde, ist es zur Interpretation der Betriebsdaten eines gegebenen Expositionssystems immer erforderlich, daß das individuelle Szenario bekannt ist. Das zu untersuchende Ökosystem beeinflußt die Begasung durch die Bestandeshöhe und die aerodynamische Rauigkeit seiner Vegetation ebenso, wie die individuelle geografische Lage mit ihren eigentümlichen Windverhältnissen. In den nachfolgenden Abschnitten werden darum die entsprechenden Informationen über den Vegetationstypus und den vorherrschenden Wind präsentiert.

Weiterhin ist bei der folgenden Darstellung auch ein besonderer Abschnitt dem Nachweis eines ausreichenden Anlagenabstandes und damit der Abwesenheit von Nachbareffekten gewidmet, denn bei dem Betrieb von Expositionssystemen besteht durch die Abluftfahnen prinzipiell immer die Gefahr von unerwünschter Kontamination der räumlich nahen Vergleichsflächen.

7.2.1. Versuchsgelände in Leihgestern

Die Abb. 102 zeigt das etwa 1,5 ha große Gelände aus der Vogelperspektive. Der Blick fällt, aus dem Nordosten kommend, auf einen von Bäumen umgebenen Trinkwasserbrunnen der Gemeinde Leihgestern. Im Hintergrund verläuft der Steinweg. Auf dem Gelände verteilt sind sieben PLUMEX erkennbar, die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurden. Vier Exemplare (*replicates*) sind davon aktiv und drei zusätzliche Anlagen (sog. *dummies*) dienen als

Vergleichsflächen. Die erkennbaren Kabelkanäle laufen auf kniehohen Ständern und führen das Spurengas und die elektrische Energie an die *replicates*. Bei den neben den Anlagen sichtbaren weißen Objekten (je drei) handelt es sich um mobile Meßkammern und das H-förmige Objekt in der Bildmitte ist ein Luftkanal für vier *open-top*-Kammern. Die ebenfalls erkennbaren rechteckigen und quadratischen Parzellen dienen weiteren wissenschaftlichen Zwecken. Zur Verdeutlichung der Lage siehe Abb. 103.



Abb. 102: Das Versuchsgelände aus der Vogelperspektive
Blickrichtung von NO nach SW. Vor der Baumgruppe stehen die Trafostation,
der Kohlendioxidbehälter, der Büro- und der Werkzeugcontainer (v.l.n.r)

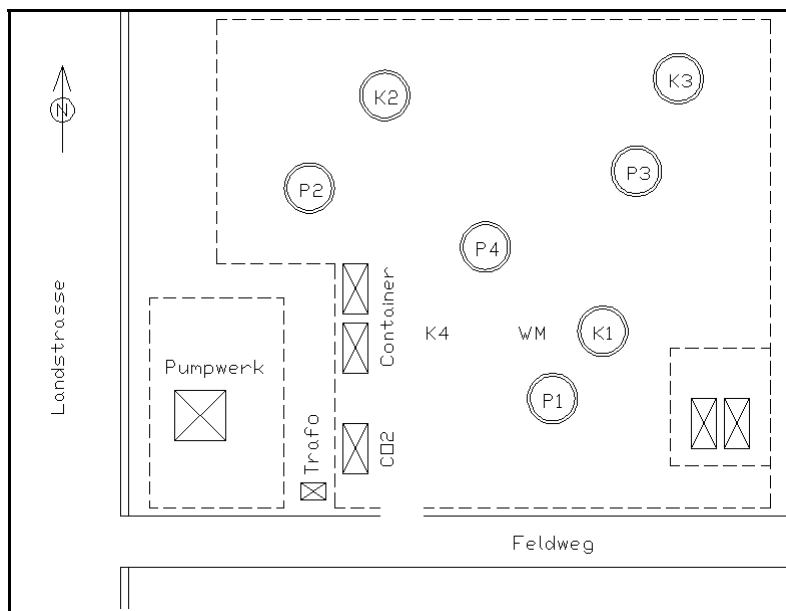


Abb. 103: Lageplan des Versuchsgeländes
(P: PlumeX, K: Kontrolle, WM: Windmeßstelle)

Vor der Baumgruppe links am Tor ist der Kohlendioxidbehälter sichtbar. Links dahinter befindet sich die Trafostation. Rechts stehen zwei *Container*. Der rechte ist ein Lager für

Material und Gartengeräte, der linke wird als Meß- und Überwachungsstation genutzt. In diesem *Container* befindet sich neben dem bereits beschriebenen Meßplatz eine weiteres Präzisionsmeßgerät mit hoher Langzeitstabilität zur kontinuierlichen Konzentrationsmessung (Licor, Typ 6252) und ein Rechner zur Speicherung aller anfallenden Daten (vgl. Abb. 99, linker Bildrand). Die Datenerfassung begann im Mai 1998 mit dem anlaufenden Routinebetrieb. Gleich nach der Fertigstellung der ersten Anlage (P1) im Dezember 1996 folgte zunächst eine Phase des Feinabgleiches. Im Sommer 1997 waren zwei weitere Anlagen fertiggestellt und der Routinebetrieb begann mit dem "Anfahren" der Anlagen. Der Anfahrvorgang von Begasungsanlagen ist für das betreffende Ökosystem ein sehr wichtiger Vorgang. Wird ein für die Physiologie der Pflanzen so wichtiger Parameter, wie das Kohlendioxid der Atmosphäre, praktisch "über Nacht" auf einen signifikant neuen Wert verändert, dann muß mit unkalkulierbaren Reaktionen des betrachteten Ökosystemes gerechnet werden. Aus der angewandten Regelungstechnik ist bekannt, daß viele Systeme mit einem heftigen und nur langsam abklingenden "Überschwingen" reagieren können. Das soll hier vermieden werden, darum wurde der Sollwert der Konzentration über einen Zeitraum von 12 Monaten langsam "hochgefahren" (vgl. Abb. 122).

Das Versuchsgelände liegt in der Talaue des Lückebackes 4 km südöstlich der Stadt Gießen direkt am nordöstlichen Ortsrand des Lindener Stadtteils Leihgestern³³. Die Geländehöhe ist im Mittel 172 m über NN. Das Relief der an einem auslaufenden Hangfuß gelegenen Fläche ist schwach geneigt. Das geologische Ausgangsmaterial der Bodenbildung besteht nach SCHOTTLER (1980) vorwiegend aus tonigen und in geringerem Maße sandigen Sedimenten des Miozän (Tertiär), die von holozänen, fluviatil abgelagerten Auensedimenten überdeckt werden. Stellenweise treten Grauwacken des Unterkarbon zutage. Der Boden ist als Auenboden-Pseudogley aus holozänen Auensedimenten über miozänen Tonen anzusprechen. Das Versuchsgelände steht seit Jahrzehnten unter extensiver bis mäßig intensiver Wiesennutzung. Der Pflanzenbestand ist als eine frische bis wechselfeuchte Glatthaferwiese anzusprechen. Zu Einzelheiten siehe GRÜNHAGE *et al.* (1996).

7.2.2. Windverhältnisse

Durch die unterschiedliche Sonneneinstrahlung in den verschiedenen geografischen Breiten der Erde und die ungleiche Erwärmung von Land- und Wasserflächen entstehen innerhalb der Troposphäre Luftmassen mit voneinander abweichenden Eigenschaften bezüglich Druck und Temperatur. Sie verlagern sich unter dem zusätzlichen Einfluß der Erdrotation großräumig in andere Regionen und führen global zur Ausprägung von typischen Zirkulationen. Als Beispiele seien in Äquatornähe, die HADLEY- und in unseren Breiten die FERREL-Zirkulation genannt. In vielen Gebieten der Erde bilden sich durch orografische Einflüsse lokale Windsysteme aus, die stark von diesen großräumigen Luftströmungen abweichen.

³³ Geographische Lage: N 50°32' E 008°41' , Locator: JN40iN

In den drei Polardiagrammen, Abb. 104, 106 und 108, ist der in den Jahren 1999, 2000 und 2001 gemessene absolute Windweg gegen die Richtung aufgetragen³⁴). Die Diagramme sind sich erwartungsgemäß recht ähnlich: In allen Jahren ist die Hauptwindrichtung westnordwest, d.h. der Wind fällt über den Segmenten 10 und 11 ein. Dieser Befund ist typisch für diesen Standort, der sich in einer Talau mit Ost-West-Ausrichtung befindet. Der kürzeste Windweg wird über den Segmenten 13 und 14 aus südwestlicher Richtung beobachtet. Hierbei handelt es sich um einen ausgeprägten Windschatten, der von der Baumgruppe am Rande des Geländes verursacht wird. Von diesem ausgeprägten Lee ist die PLUMEX Nr.1 (P1) besonders betroffen, denn ihr Abstand zu der Baumgruppe beträgt nur etwa 60 Meter. Diese, bei Westwind entstehenden Lee-Wirbel, stellen eine besonders unangenehme Störung dar, weil eine Azimutsteuerung auf vertikale Windkomponenten nicht reagieren kann und der Gastransport durch Wirbel unkalkulierbare Richtungen nimmt. Die Anlage P4 hat mit einem Abstand von über 100 m in diesem Sinne die beste Position. Für die Interpretation der im Nachfolgenden gegebenen Ergebnisse bedeutet dies, daß die Qualität der Begasung bei einer frei stehenden PLUMEX mit großer Wahrscheinlichkeit besser ist, als die hier mitgeteilten Ergebnisse aufzeigen (*worst case*-Betrachtung).

Stärker als die Windrichtungen kann die Windgeschwindigkeit eine Begasungsanlage beeinflussen. Mit steigenden Werten wird immer mehr Spurengas zur Aufreicherung erforderlich, so daß die Gaszufuhr an ihre Grenzen geraten kann. Bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten entstehen Probleme bei dem Stofftransport über die Fläche. Bei Windstille ist eine Begasung schließlich unmöglich. Zur Beurteilung der vorherrschenden Windgeschwindigkeiten werden in den Abb. 105, 107 und 109 die Geschwindigkeitsverteilungen der Jahre 1999 bis 2001 wiedergegeben. Wie aus den Abbildungen erkennbar ist, hat die häufigste Geschwindigkeit einen Betrag im Bereich von 1,5 bis 2,0 Meter pro Sekunde. In nur zehn Prozent aller Fälle fällt die Geschwindigkeit unter $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, und völlige Windstille herrscht nur während etwa drei Prozent der Zeit. Dies ist eine gute Voraussetzung für eine Aufreicherung nach dem *plume*-Prinzip, denn damit ist der Stofftransport durch den Wind während mehr als 95 % der Betriebszeit sichergestellt.

Neben der Beeinflussung der Begasungscharakteristik einer Anlage, stellt der Wind auch eine mechanische Belastung der Komponenten dar. Eine Analyse der vorherrschenden Geschwindigkeiten ist darum ebenfalls von Bedeutung. Die höchsten Geschwindigkeiten liegen knapp unterhalb von $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und stellen damit eine deutliche mechanische Belastung dar. Diese Spitzengeschwindigkeiten sind jedoch sehr selten. Die gesamten Meßwerte über $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ machen zusammen weniger als drei Prozent aller Werte aus (vgl. Abb. 105, 107, 109).

³⁴ Das eingedruckte Symbol der PLUMEX dient zur Skalierung des Diagrammes.

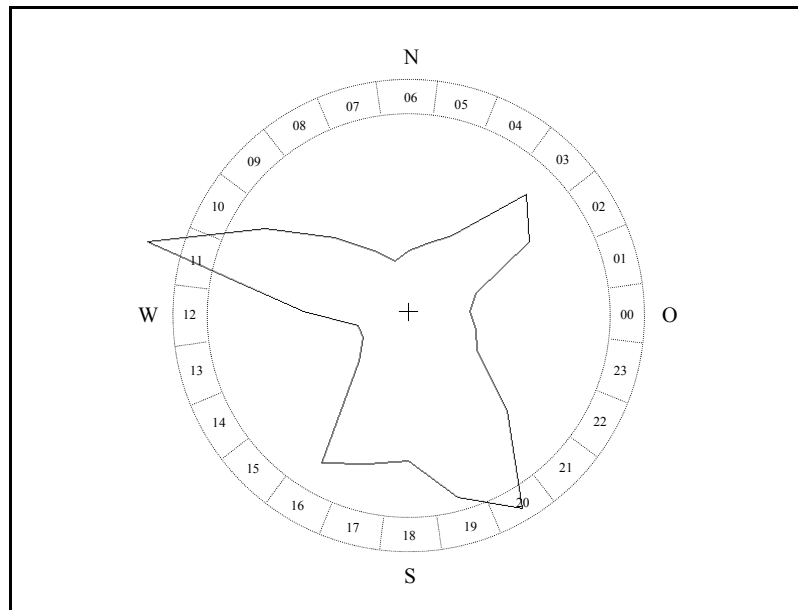


Abb. 104: Der Windweg im Jahr 1999 betrug 21252 km
(Meßhöhe: 2 m üGOK; das PLUMEX-Symbol entspricht 1670 km $\pm$ 9 %)

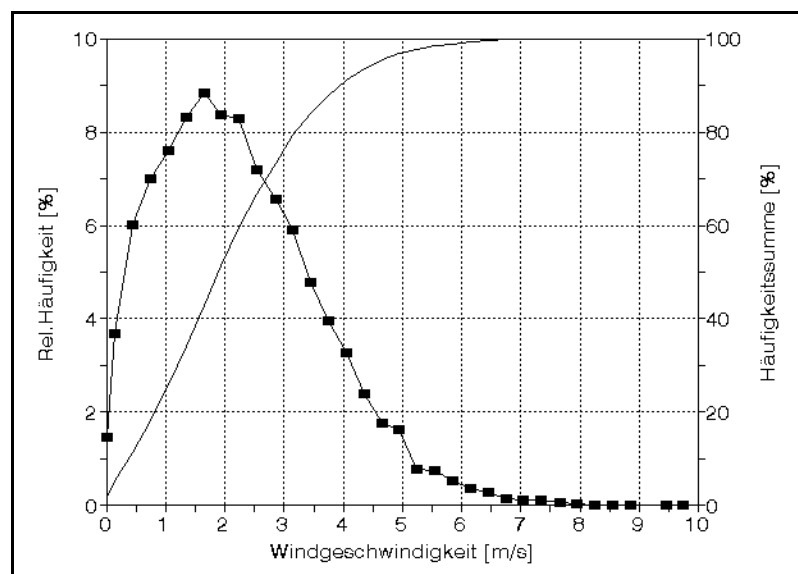


Abb. 105: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten
(Klassenbreite: 0,3 m·s⁻¹, Daten wie Abb. 104)

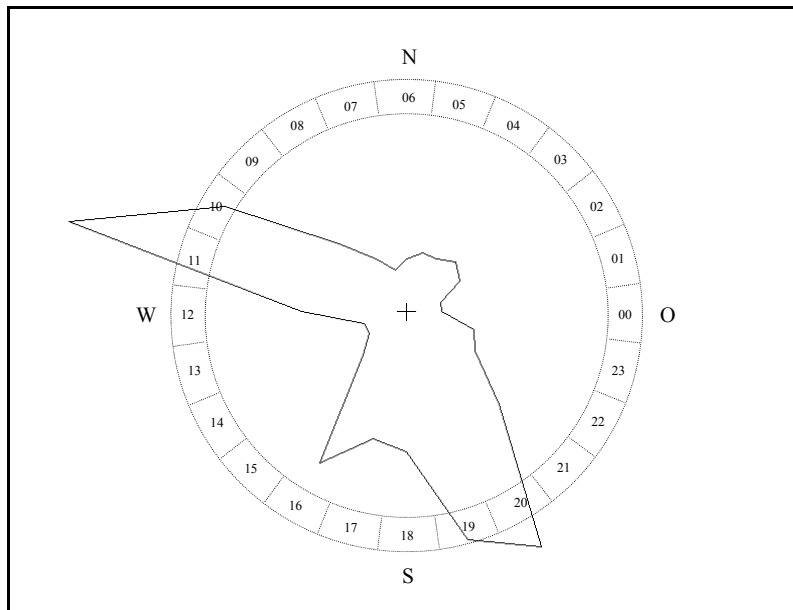


Abb. 106: Der Windweg im Jahr 2000 betrug 20001 km
(Meßhöhe: 2 m üGOK; das PLUMEX-Symbol entspricht 1670 km $\pm$ 9 %)

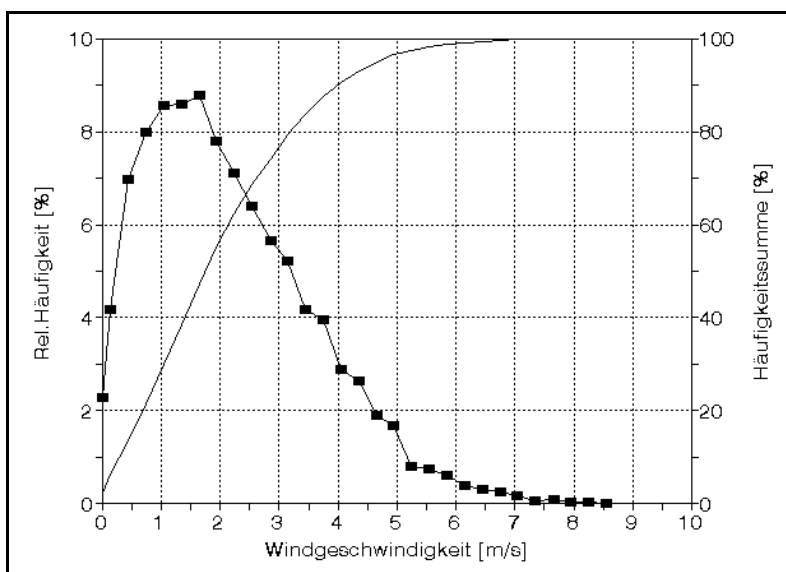


Abb. 107: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten
(Klassenbreite: $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Daten wie Abb. 106)

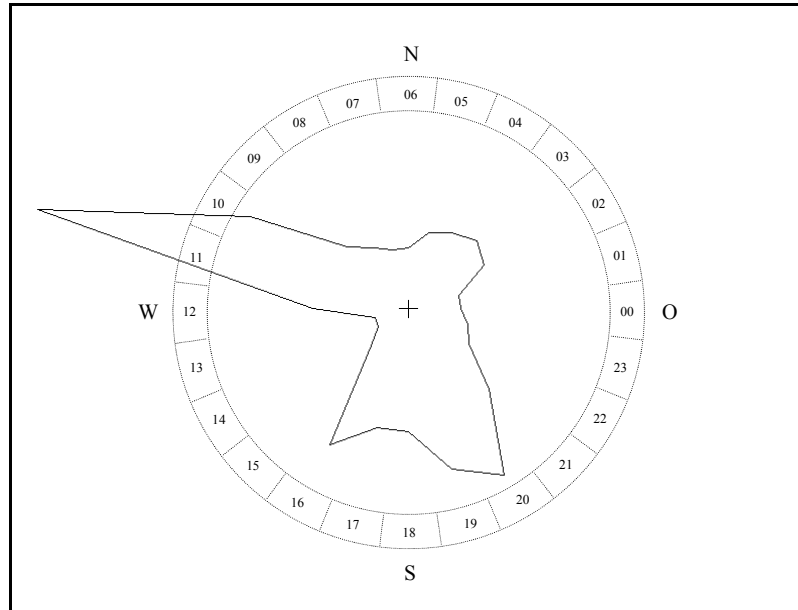


Abb. 108: Der Windweg im Jahr 2001 betrug 19209 km
(Meßhöhe: 2 m üGOK; das PLUMEX-Symbol entspricht 1670 km $\pm$ 9 %)

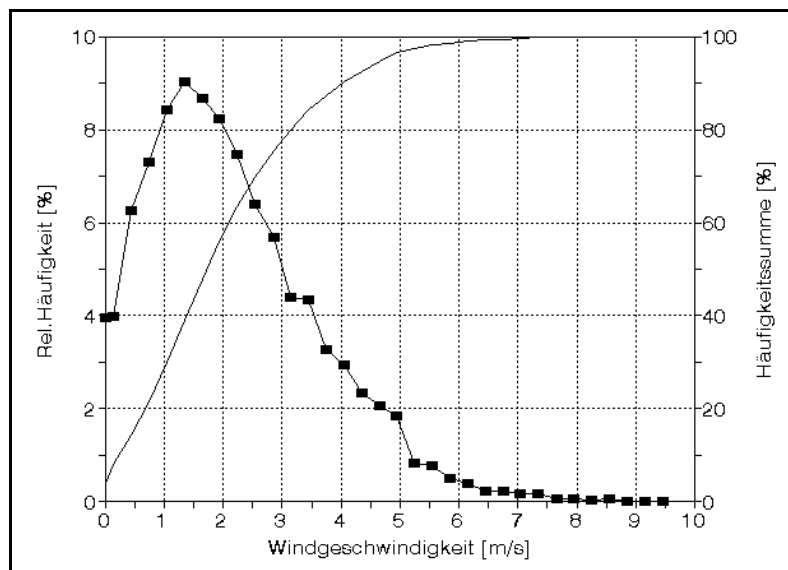


Abb. 109: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten
(Klassenbreite: 0,3 m·s⁻¹, Daten wie Abb. 108)

7.2.3. Nachbareffekte

Für die Bemessung des Abstandes zwischen einer Begasungsanlage und der dazugehörigen Vergleichsfläche gibt es zwei Forderungen, die sich aber wechselseitig ausschließen: Zum einen soll der Abstand so klein sein, daß der Boden, das Mikroklima und die Vegetation an beiden Standorten gleichartig sind. Zum anderen muß der Abstand so groß sein, daß eine Kontamination der Vergleichsfläche durch die Abluftfahne des aktiven Systems ausgeschlossen ist.

Eine jede Begasungsanlage erzeugt auf ihrer Lee-Seite eine Abgasschleppe mit aufgereicherter Luft, die vom Wind versetzt und verdünnt wird. Bei ungünstiger Windrichtung und genügender Nähe zu einer anderen Begasungsanlage oder Vergleichsfläche kann dort ein störender Effekt hervorgerufen werden. Das Gleiche gilt auch für die Abgase von im Luv liegenden Siedlungen, die vor allem in der Heizperiode eine nicht unbeträchtliche Quelle von Kohlendioxid darstellen können. Ebenso sind auch Verkehrsstraßen potentielle Kohlendioxidquellen. Im vorliegenden Falle befinden sich die ersten Häuser des Stadtteiles Linden-Leihgestern in wenigen hundert Metern Entfernung. Zusätzlich verläuft eine Landstraße nur knapp 300 m südlich des Versuchsgeländes. Es war also von besonderem Interesse, einen möglichen Effekt von Straße und Siedlung aufzudecken bzw. einen einflußfreien Betrieb durch entsprechende Abstände der PLUMEX sicher zu stellen.

Durch Konzentrationsmessungen an den aktiven PLUMEX ist ein externer Eintrag von Kohlendioxid aber nicht aufzuzeigen, weil das System auf eine zusätzliche Zufuhr von Spurengas relativ schnell reagiert und durch Absenkung der Spurengasdosierung den Sollwert aufrecht erhält. Anders verhält es sich bei den Kontrollflächen (zur Lage vgl. Abb. 102 und 103). Hier könnte ein von der Landstraße kommender Spurengaseintrag den natürlichen Tagesgang der Konzentration verändern, denn der wesentliche Eintrag von Spurengas geschieht immer zur gleichen Tageszeit während der Stoßzeiten (*rush hour*) morgens und abends. In Abb. 110 ist der tägliche Konzentrationsverlauf an den Kontrollflächen dargestellt. Die vier Kurven sind über einen Monat gemittelt. Dieser Tagesgang der Konzentration zeigt keine Anomalien in dem zu erwartenden Gang: Mit der Morgendämmerung beginnt die Photosynthese und der damit verbundene Kohlendioxidverbrauch läßt die Konzentration auf einen Tageswert abfallen. Nach Sonnenuntergang setzt die Photosynthese aus und die Konzentration steigt wieder auf die hohen Werte der Nacht. Ein Einfluß durch Kraftfahrzeuge von der nahen Landstraße ist während der *rush hour* nicht erkennbar.

Zur Untersuchung der Wirkung von stationären Quellen, wie des besagten Stadtteiles und die vier aktiven PLUMEX, ist eine besondere Darstellung der Meßdaten erforderlich: Zum Nachweis einer Richtungsabhängigkeit müssen die an den Kontrollen gemessenen Konzentrationsdaten gegen die jeweilige Windrichtung aufgetragen werden. Dabei dürfen nur die Daten aus der stabilen Phase zwischen 09:00 und 18:00 Uhr MEZ (vgl. Abb. 110) berücksichtigt werden. Die hohen nächtlichen Konzentrationen würden das Ergebnis verfälschen. Abb. 111 zeigt die umgerechneten Daten für alle vier Kontrollflächen. Die Kurven pendeln um dem Mittelwert 370 ppm mit einer Spannweite von ± 20 ppm (± 6 %).

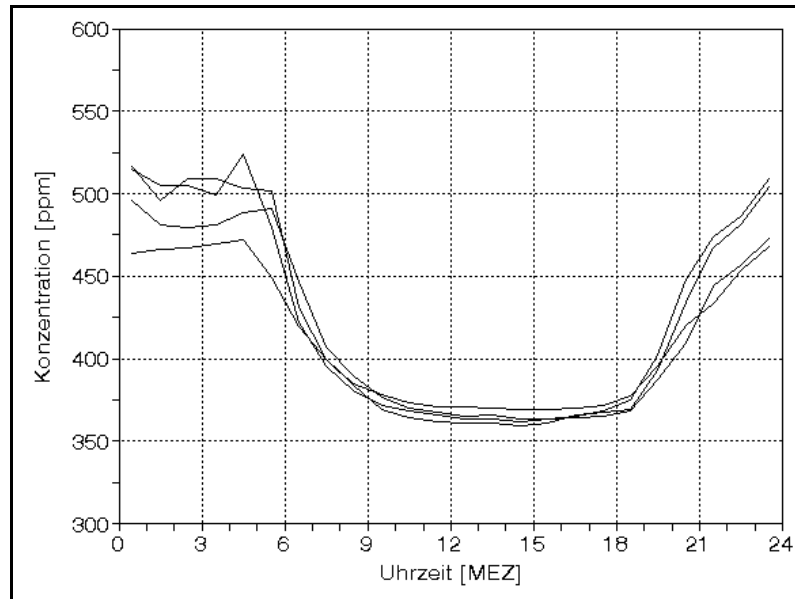


Abb. 110: Tagesgang der Konzentration über den Kontrollflächen
(Mittelwerte in 60 cm üGOK über den Monat Mai 2002)

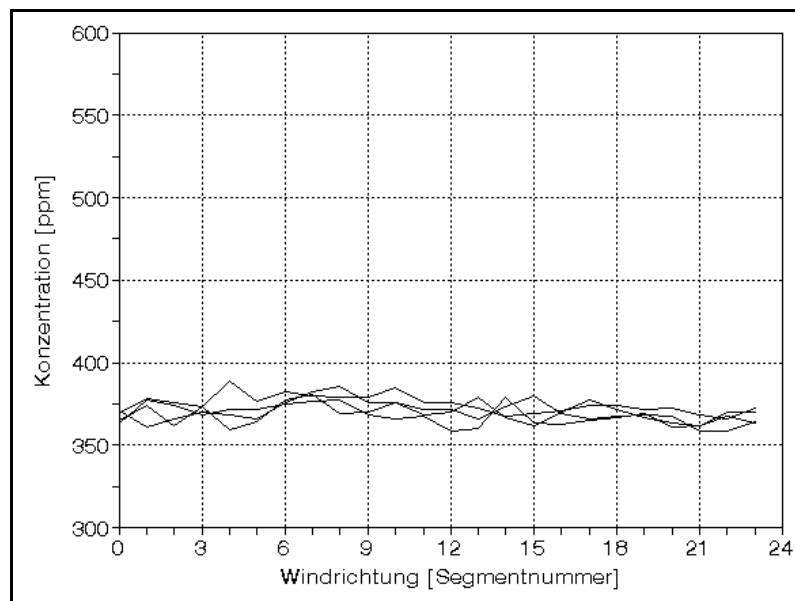


Abb. 111: Konzentration gegen die Windrichtung
(Daten wie Abb. 110, nur Zeitfenster 09:00 bis 18:00 Uhr MEZ)

Um die Schwankungen noch augenfälliger auf die Richtungen beziehen zu können, wurden die Daten aus Abb. 111 für die Kontrollringe K1, K2 und K3 in Polarkoordinaten dargestellt (Abb. 112 bis 114). Zur Veranschaulichung der Windrichtung in Bezug auf die Anlage sind die Umrissse der Kontrollflächen (*dummies*, passive PLUMEX) in das Diagramm eingezeichnet. Die zugehörige Windverteilung zeigt Abb. 115.

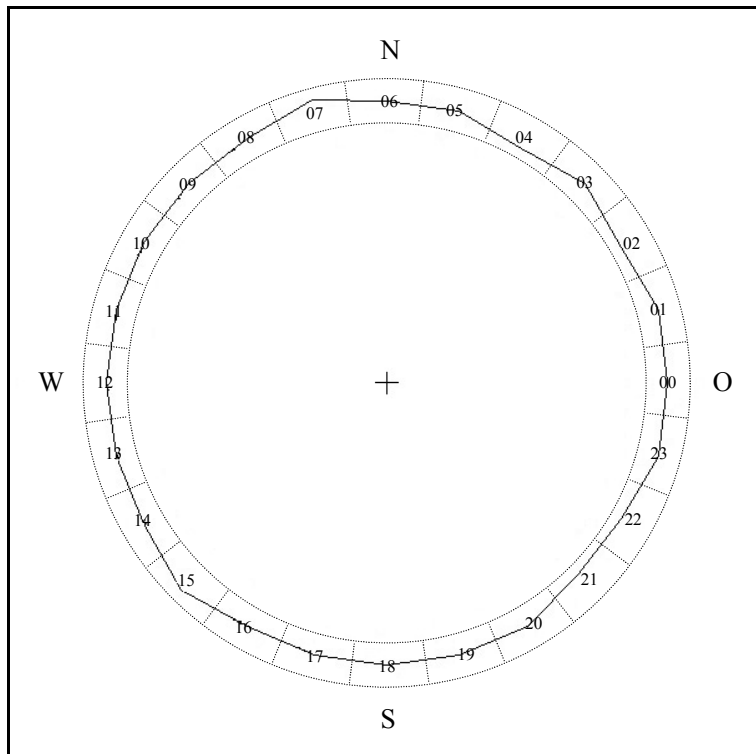


Abb. 112: Konzentration an Kontrolle K1
(Richtung der PLUMEX: P1=13, P2=10, P3=06, P4=10)
Das PlumeX-Symbol entspricht 370 ppm $\pm$ 9 %.

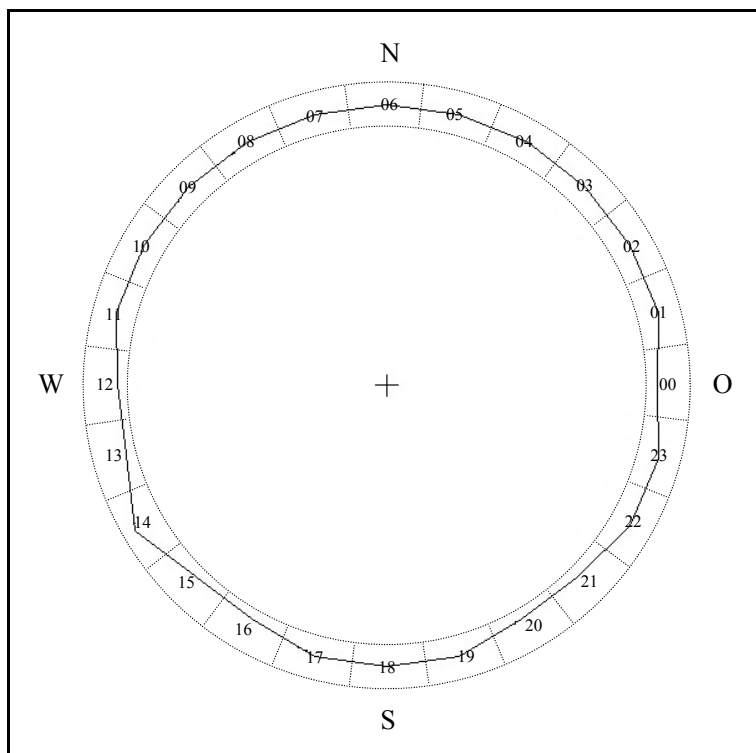


Abb. 113: Konzentration an Kontrolle K2
(Richtung der PLUMEX: P1=20, P2=14, P3=23, P4=21)
Das PlumeX-Symbol entspricht 370 ppm $\pm$ 9 %.

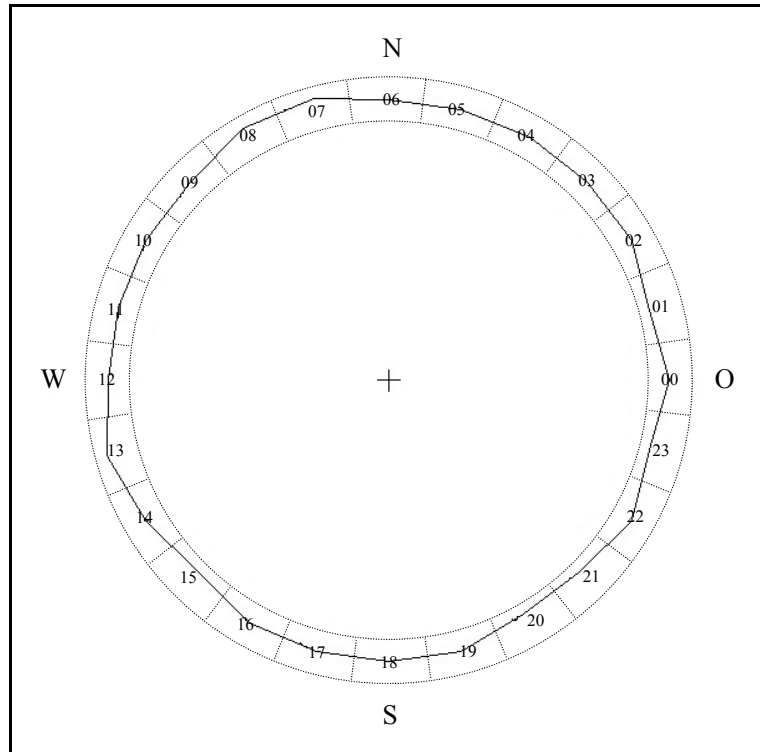


Abb. 114: Konzentration an Kontrolle K3
(Richtung der PLUMEX: P1=17, P2=14, P3=18, P4=16)
Das PlumeX-Symbol entspricht 370 ppm $\pm$ 9 %.

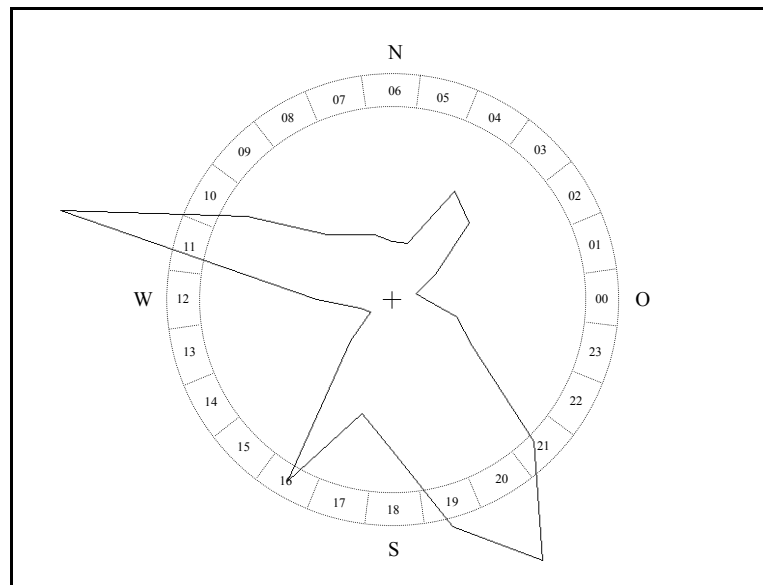


Abb. 115: Der Windweg im Monat Mai 2002 betrug 2206 km
(Meßhöhe: 2 m üGOK; das PLUMEX-Symbol entspricht 170 km $\pm$ 9 %)

Durch das PLUMEX-Symbol sind eventuelle Anomalien der Konzentrationsverteilung anschaulicher und damit leichter den räumlichen Gegebenheiten auf dem Versuchsfeld zuzuordnen. In der Legende zu jeder Abbildung ist die jeweilige Richtung zu den aktiven PlumeX angegeben. Die Polardiagramme der Konzentrationen sind nahezu rund und signifikante Abweichungen in Richtung der möglichen Störquellen sind nicht erkennbar. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Meßdaten generell keine Anzeichen für störende Abgasschleppen erkennen lassen. Die Landstraße und die Ortschaft liegen weit genug entfernt und die PlumeX haben ebenfalls einen ausreichenden Abstand untereinander.

7.3. Qualität des Anreicherungsregimes

Soll von einem Spurengasanreicherungssystem die Qualität beurteilt werden, dann lautet die erste Frage, wie gut die angestrebte Zielkonzentration erreicht und gehalten wird. Ein weiteres Qualitätsmerkmal der Begasung ist die zeitliche Varianz der Meßwerte. Bei der Beurteilung von Mittelwert und Streuung muß auch untersucht werden, wie stabil die Werte bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten sind, denn sowohl zu hohe als auch zu niedrige Geschwindigkeiten erschweren die Begasung.

Bei einer Expositionsanlage ist weiterhin die verfügbare Nutzfläche ein wichtiges Kriterium. Als Nutzfläche für botanische Experimente wird hier die Fläche verstanden, über der die Spurengaskonzentration bestimmte Grenzwerte nicht dauerhaft über- oder unterschreitet. Je größer diese Fläche einer homogenen Spurengasverteilung bei einer gegebenen Anlage ist, umso geringer sind die spezifischen (flächenbezogenen) Betriebskosten.

Zur Bewertung der PlumeX werden in den nachfolgenden Abschnitten zuerst typische Konzentrationsdaten präsentiert, und dabei besonders die Stabilität unter Windeinfluß aufgezeigt. Ein anschließender Abschnitt widmet sich der horizontalen Spurengasverteilung.

7.3.1. Stabilität der Gaskonzentration

Zur Beurteilung des Mittelwertes und der Streuung der Konzentrationswerte dient die Häufigkeitsverteilung. Für die drei zurückliegenden Betriebsjahre sind die Verteilungen in den Abbildungen 116 (1999), 118 (2000) und 120 (2001) wiedergegeben. Der Median aller Messungen, die Abszisse des häufigsten Wertes, liegt zwischen 124 und 125 Prozent. Dies entspricht recht genau der gewünschten Zielkonzentration. Eine Besonderheit ist das in der Abb. 116 erkennbare Nebenmaximum im Bereich sehr kleiner Werte. Diese Anomalie der Verteilung erklärt sich durch einen Stillstand der Anlagen zur Tageszeit. Dies war nur im Jahr 1999 der Fall; im ersten Betriebsjahr liefen die Funkuhren durch unerwartete Funkstörungen unzuverlässig (vgl. Kap.7.3.4).

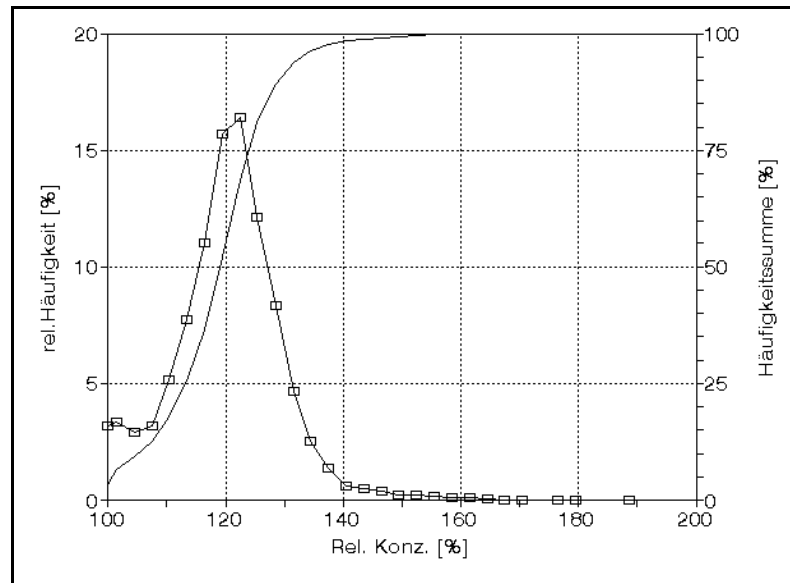


Abb. 116: Häufigkeit der Meßwerte (linke Skalierung) und Summenzug (rechte Skalierung) über die Konzentration aufgetragen
(Daten: Kalenderjahr 1999)

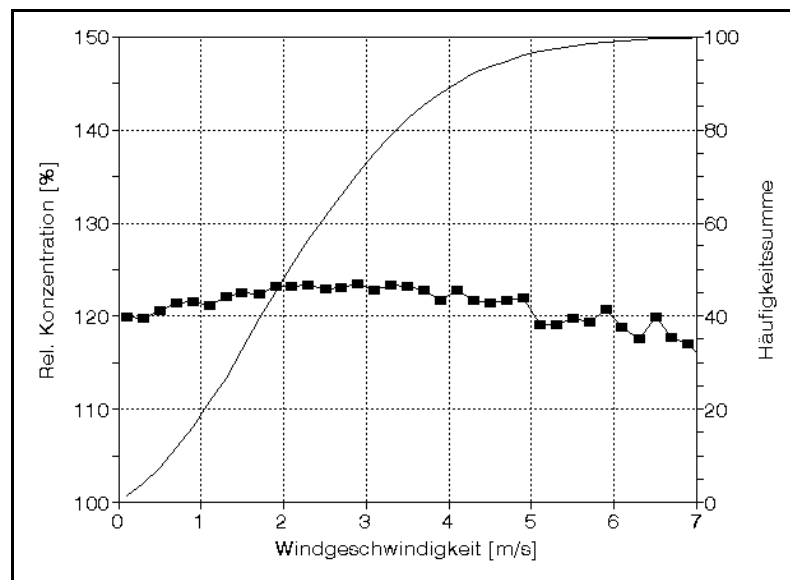


Abb. 117: Konzentration über die Windgeschwindigkeit (linke Skalierung) und Häufigkeitssumme (rechte Skalierung)
(Daten: Kalenderjahr 1999)

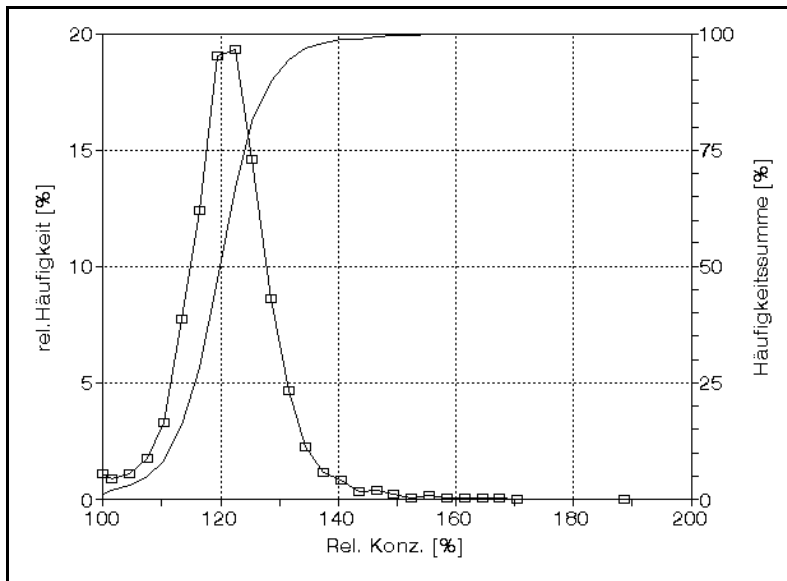


Abb. 118: Häufigkeit der Meßwerte
(Daten: Kalenderjahr 2000)

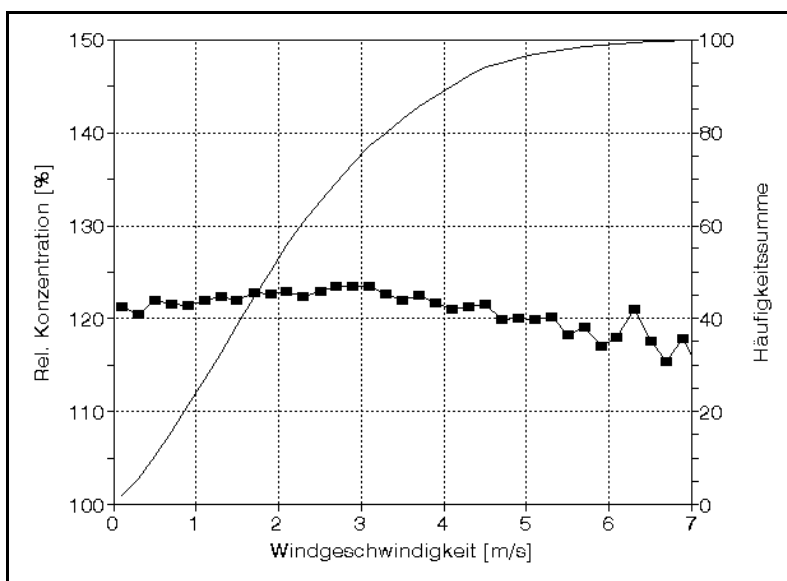


Abb. 119: Konzentration über die Windgeschwindigkeit
(Daten: Kalenderjahr 2000)

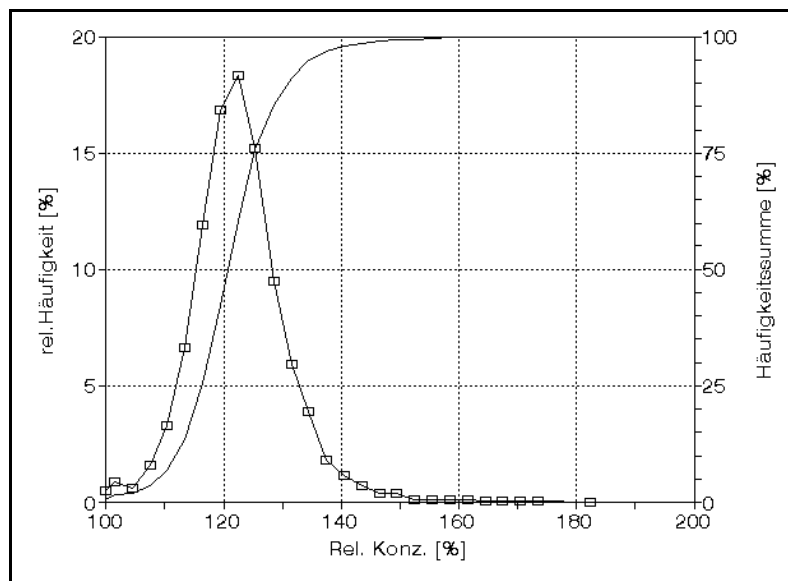


Abb. 120: Häufigkeit der Meßwerte
(Daten: Kalenderjahr 2001)

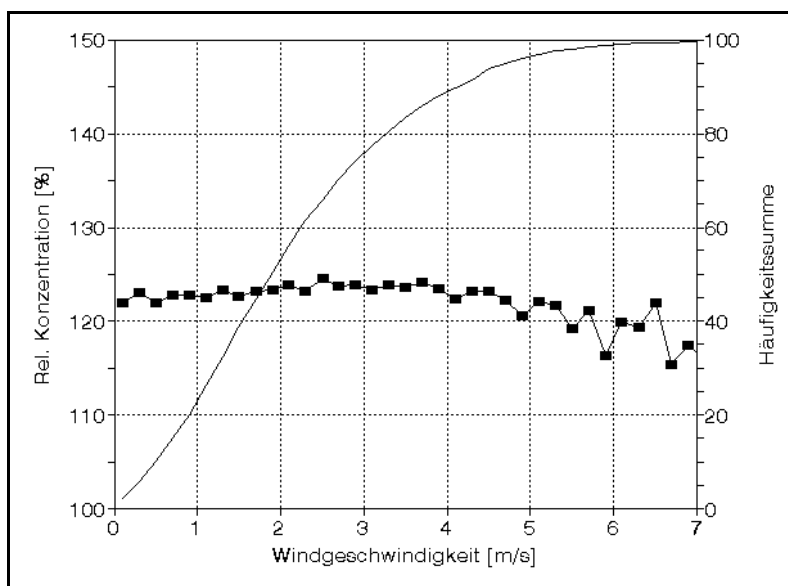


Abb. 121: Konzentration über die Windgeschwindigkeit
(Daten: Kalenderjahr 2001)

Der tatsächlich erreichte Anreicherungsfaktor seit Inbetriebnahme der Anlage ist in Abb. 122 dargestellt. Die Werte sind als gleitender Mittelwert über sechs Monate dargestellt. Eine Zusammenstellung aller mittleren monatlichen Tagesgänge findet sich im Internet unter der Adresse <http://www.uni-giessen.de/~gf1034/ENGLISH/CO2regimes.pdf>. Beispielhaft ist in Abb. 123 der Monat Mai 1999 dargestellt.

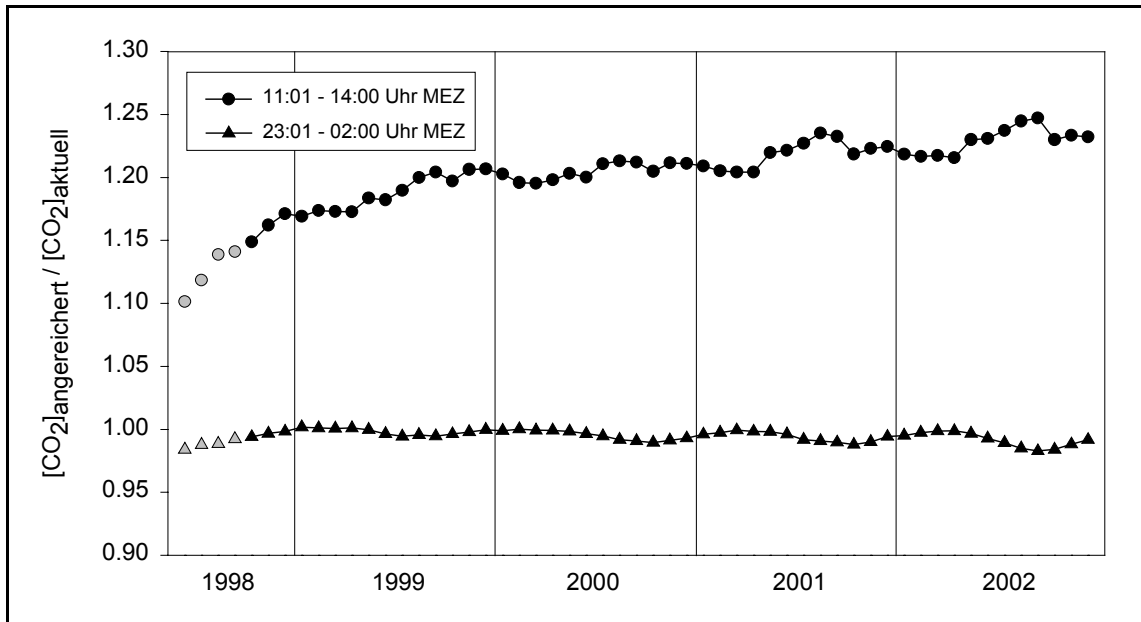


Abb. 122: Gang der Aufreicherung seit Inbetriebnahme als gleitendes Mittel über 6 Monate

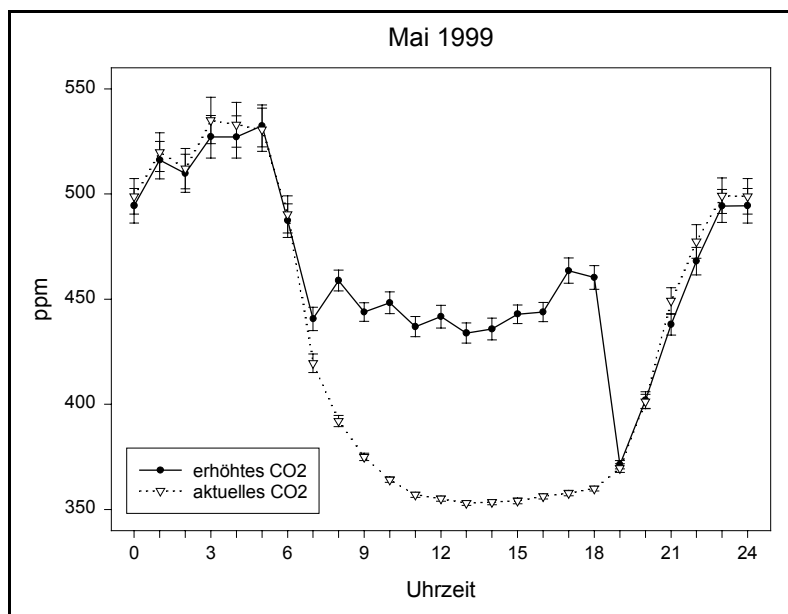


Abb. 123: Mittlerer Tagesgang der CO₂-Konzentrationen

Wie der Abb. 122 zu entnehmen ist, wurde die Zielkonzentration im ersten Anreicherungsjahr langsam auf den Sollwert angehoben. Dies erfolgte, um das zu beobachtende Ökosystem nicht

mit einem "Einschaltssprung" zu belasten. Aus der technischen Regelungstechnik ist bekannt, daß geregelte Systeme meist mit einem Einschwingvorgang auf sprungförmige Änderungen reagieren. Um den gewünschten Betriebspunkt schnell zu erreichen und dabei unerwünschte Betriebszustände zu vermeiden, werden Regelkreise langsam "angefahren". Bei einem Ökosystem liegen die Verhältnisse vergleichbar. Nach der Inbetriebnahme einer Begasungsanlage soll der neue stationäre Zustand des Ökosystems zwar schnell erreicht werden, aber eine unkalkulierbare "Sprungantwort" des Ökosystems muß dabei vermieden werden.

Eine weiteres Kriterium zur Beurteilung der Qualität einer Begasung ist die Stabilität der Konzentration gegen die Windgeschwindigkeit. Der Wind ist wohl der bedeutendste Einflußfaktor auf eine Begasungsanlage. Ist die Windgeschwindigkeit hoch, dann sind die Stofftransportzeiten kurz und eine schnelle Reaktion aller Komponenten des Regelkreises ist notwendig. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten liegen die Probleme vor allem in der für langsame Winde typischen Tendenz zum Drehen. Hier ist eine schnelle Reaktion der Azimutsteuerung (*upwind control*) erforderlich, um ohne Schlupf die Luftauslässe auszurichten. Bei Windstille ist der Stofftransport unterbrochen und die Begasung muß ruhen. Hier sind es vor allem die Momente des Wiederanlaufens, die eine Regelung sehr fordern.

Die Abbildungen 117, 119 und 121 veranschaulichen die Abhängigkeit der Spurengaskonzentration von der Windgeschwindigkeit in den zurückliegenden drei Betriebsjahren. Die Darstellungen belegen deutlich, daß der Mittelwert der Konzentration im Bereich bis zu $5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Windgeschwindigkeit keine nennenswerte Abweichung vom Sollwert zeigt. Erst bei Winden oberhalb von $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ fällt die Konzentration ab. Dies erklärt sich durch den mit der Windgeschwindigkeit stark steigenden Gasbedarf. Ab einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit sind die Versorgungsleitungen an ihrer Leistungsgrenze und begrenzen das Nachströmen von Kohlendioxid durch ihren aerodynamischen Widerstand. Dieses Nachlassen der Spurengaskonzentration bei starken Winden ist aber tolerierbar, denn hohe Windgeschwindigkeiten sind während der Vegetationsperiode nicht sehr häufig. Wie die dünne, durchgezogene Kurve in Abb. 117 zeigt, lagen etwa 97 % der Meßwerte unterhalb einer Geschwindigkeit von $5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Im Bereich der niedrigen Windgeschwindigkeiten ist ein Abfallen der Spurengaskonzentration ebenfalls sehr gering. Vor allem im Jahr 2001 (vgl. Abb. 121) ist eine Abnahme der Konzentration bei "nahezu Windstille" kaum erkennbar.

Vergleicht man diese Daten mit den Angaben anderer Anlagen, so darf man feststellen, daß der Arbeitsbereich der PLUMEX herausragend ist. Die Probleme von sehr hohen und sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten werden von anderen Anlagen nicht gemeistert. Die anderen Anlagen versagen bei hohen und niedrigen Windgeschwindigkeiten und werden nur innerhalb eines teilweise sehr begrenzten Arbeitsbereiches betrieben. Die Anlage von MCLEOD *et al.* (1985, 1992) wird z.B. schon unterhalb von $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ abgeschaltet. Die Autoren berichten 1995 von 27 Prozent Ausfallzeit durch, wie sie es formulieren, "windstille" Wetterperioden. Auch die Anlage von KROPFF *et al.* (1989) zeigt diese Schwäche, sie wird ebenfalls unterhalb von $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ abgeschaltet. Etwas besser ist das Mid-FACE von MIGLIETTA *et al.* (1997), hier öffnen unterhalb $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ alle Luftauslässe. Bei der vergleichsweise sehr jungen Anlage von OKADA

et al. (2001) wird der Wind unterhalb $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ einfach "weg definiert"³⁵. Lediglich die Anlage von WULFF *et al.* (1992) arbeitet über einen brauchbaren Geschwindigkeitsbereich von 0,1 bis $5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Der Arbeitsbereich der PLUMEX darf also im Vergleich mit den Anlagen anderer Autoren als sehr gut bezeichnet werden. Die Diagramme belegen, daß die Sollkonzentration von "fast Windstille" bis zu starken Winden gehalten wird. Der Grund liegt sicher zum Einen in der Verwendung von sehr empfindlichen Anemometern, denn die besondere Magnet-Schwebelagerung dieser Geräte ermöglicht die Erfassung von sehr geringen Windgeschwindigkeiten (unter $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$). Der Hauptgrund für den großen Arbeitsbereich der PlumeX liegt aber in der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Technik, von der zwei Aspekte besonders bedeutungsvoll sind: (1) Das isotrope *plenum* (CAP) mit der schnellen Azimutsteuerung (*upwind control*), und (2) Die besondere PWM-Methode der Spurengasdosierung (vgl. Kap. 4.4). Durch PWM ist eine trägheitslose Reaktion auf den Wind möglich, die sich zudem durch einen großen Dynamikbereich auszeichnet.

7.3.2. Horizontale Konzentrationsverteilung

Als Nutzfläche eines Expositionssystems gilt der Teil der Bruttofläche, über dem die Mittelwerte der Konzentration innerhalb bestimmter Grenzen liegen. Mit einer grafischen Darstellung der horizontalen Konzentrationsverteilung kann die Form, die Fläche und die relative Lage dieser Nutzfläche ermittelt werden. Die Linien gleicher Konzentration (Isokonzen) werden dafür durch Interpolation von Zwischenwerten aus den Messungen an wenigen diskreten Stellen ermittelt.

Bei der vorliegenden PlumeX mit einer Bruttofläche von 50 m^2 wurden für die Ermittlung der horizontalen Verteilung neun Meßpunkte eingerichtet. Die Ansaugpunkte befinden sich in 40 cm üGOK (über Geländeoberkante) im Zentrum der PLUMEX Nr.1 in einem quadratischen Raster von etwa 4 x 4 Metern. Der etwa ein Meter breite Streifen hinter dem Plenum kann als Beobachtungsfläche ohnehin nicht genutzt werden, weil in diesem Bereich durch den Korpus (CAP) das Mikroklima gegenüber der Umgebung verändert ist. In diesem Bereich entstehen optische Schatten³⁶ und Reflektionen (Katakaustik), sowie aerodynamische Wirbelfelder mit räumlich und zeitlich nicht definierten Konzentrationsgradienten.

Zur Erfassung der Meßdaten an den Ansaugpunkten innerhalb der PlumeX Nr.1 wurde der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte spezielle 9-Kanal Meßplatz (vgl. Kap. 6.5) verwendet. Mit dieser Einrichtung wurden die neun Meßstellen zyklisch abgetastet und die gemessenen Konzentrationen abgespeichert. Aus den gewonnenen Daten wurden die Isokonzen berechnet. Die Abbildungen 124, 126, 128, 130 und 132 stellen fünf ausgewählte horizontale Konzentrations-

³⁵ Wörtlich: "When readings were below $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, it was considered there was no wind."

³⁶ Das Ausmaß der optischen Abschattung ist im Kap.4.8.4 (Theorie) durch eine mathematische Simulation abgeschätzt.

verteilungen aus dem Jahr 1999 dar. Diese Topogramme sind den dazugehörigen Windweg-Diagrammen gegenübergestellt, um den Einfluß des Windes auf die sich einstellende Spurengaskonzentration zu visualisieren (Abb. 125, 127, 129, 131 und 133). Die beiden Abbildungen 124 (Februar 1999) und 126 (Dezember 1999) zeigen die Ausbildung von stabilen Gradienten entlang der Windrichtung in Monaten mit ausgeprägten Vorzugsrichtungen des Windes. Die Spannweite der gemessenen CO₂-Anreicherung ist $120 \pm 7 \%$ bzw. $122 \pm 8 \%$ der Umgebungskonzentration. Die Abb. 128 (Oktober 1999) zeigt die Situation bei drehenden Winden: Die Gradienten verlieren sich und die Konzentrationen liegen in einem deutlich engeren Bereich ($121 \pm 2 \%$). Die Topogramme Abb. 130 und 132 sind aus den Mittelwerten der Vegetationsperiode bzw. des gesamten Jahres 1999 berechnet: Sie sind nahezu horizontal planar (April – September: $122,1 \pm 2 \%$; gesamtes Jahr: $121,5 \pm 2 \%$).

7.3.3. Betriebskosten, Gasverbrauch

Verglichen mit den Anschaffungskosten einer Anlage sind bei Begasungsexperimenten mit Luftschadstoffen, wie Schwefeldioxid oder Ozon, die laufenden Kosten des eingesetzten Spurengases durch die überaus geringen erforderlichen Mengen in der Regel marginal. Anders verhält sich das bei dem Spurengas Kohlendioxid, denn unter allen Spurengasen ist das Kohlendioxid ein "Massengas" (vgl. Tab. 1, Kap.1.1). Gegenüber beispielsweise Schwefeldioxid wird für Begasungsexperimente mit Kohlendioxid eine millionenfache Konzentration benötigt. Obwohl Kohlendioxid das preiswerteste Gas überhaupt ist, führt eben dieser enorme Bedarf zu hohen Betriebskosten (KIMBALL 1992).

Noch weiter steigen die Kosten, wenn spezielle Isotopen eingesetzt werden müssen. In der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Anlagengruppe liegt ein besonderer Forschungsschwerpunkt auf der Untersuchung der Allokation der Assimilate. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Installation eine genau definierte Mischung (-25 ‰) der stabilen Kohlenstoffisotope ¹³C und ¹²C verströmt. Diese Mischung ist sehr teuer (etwa 0.25 EUR·kg⁻¹) und zwingt dadurch zu einem absolut ökonomischen Umgang. Die Frage nach dem Gasverbrauch einer Begasungsanlage ist also von großer Bedeutung, wenn "teure" Spurengase eingesetzt werden sollen.

Der Gasverbrauch des Prototypes ist einfach zu berechnen, weil dieser durch den umhüllenden Schutzschirm praktisch ein abgeschlossenes System darstellt. Wenn durch einen externen Belüftungsventilator ein bekannter Frischluftstrom zugeführt wird, dann kann dieser Luftstrom nur über die Öffnung des Frustrum entweichen. In diesem Fall ist der Spurengasverbrauch in sehr guter Näherung diesem Luftstrom proportional, weil in einer geschlossenen Kammer keine nennenswerten Gasverluste³⁷ möglich sind. Es ist üblich, den Frischluftstrom (Q_{Luft}) auf das Kammervolumen (V_C) zu normieren und als Gaswechselzahl (Z) auszudrücken.

³⁷ Auch bei dem Spurengas Kohlendioxid ist der Zugewinn (Edaphon) sowie der Verbrauch (Assimilation) vernachlässigbar klein im Vergleich mit dem Gasverlust durch den Luftwechsel in der Kammer. Leck-Messungen findet man bei TINGEY *et al.* (2000)

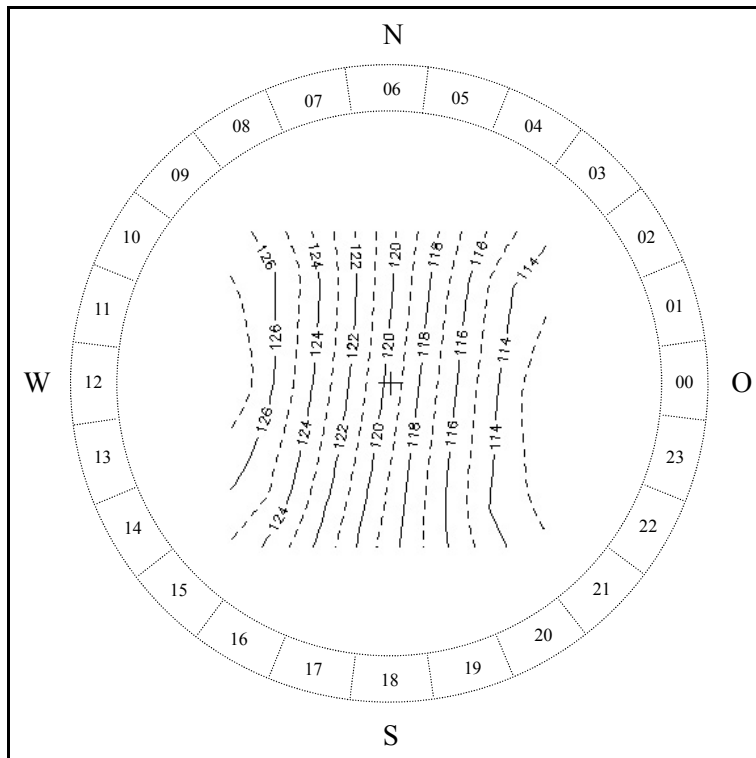


Abb. 124: Horizontale Verteilung der CO₂-Konzentration im Februar 1999

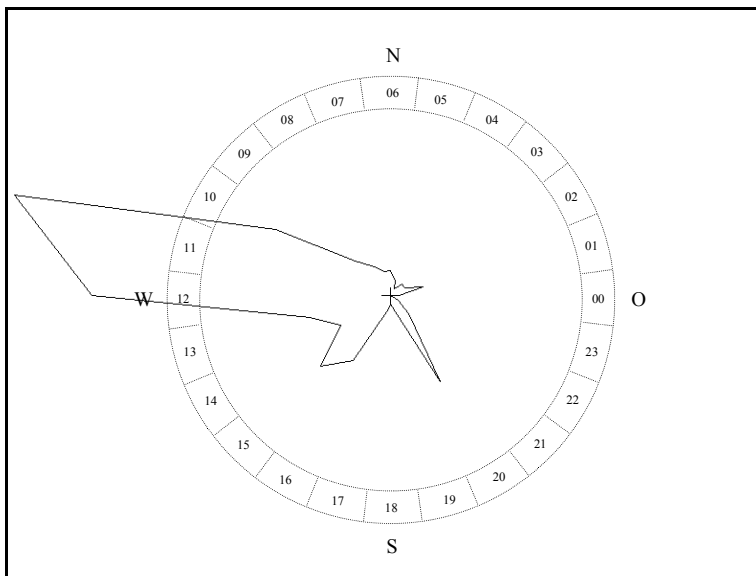


Abb. 125: Windweg im Februar 1999
(Meßhöhe: 2 m üGOK, das PLUMEX-Symbol entspricht 170 km $\pm$ 9 %)

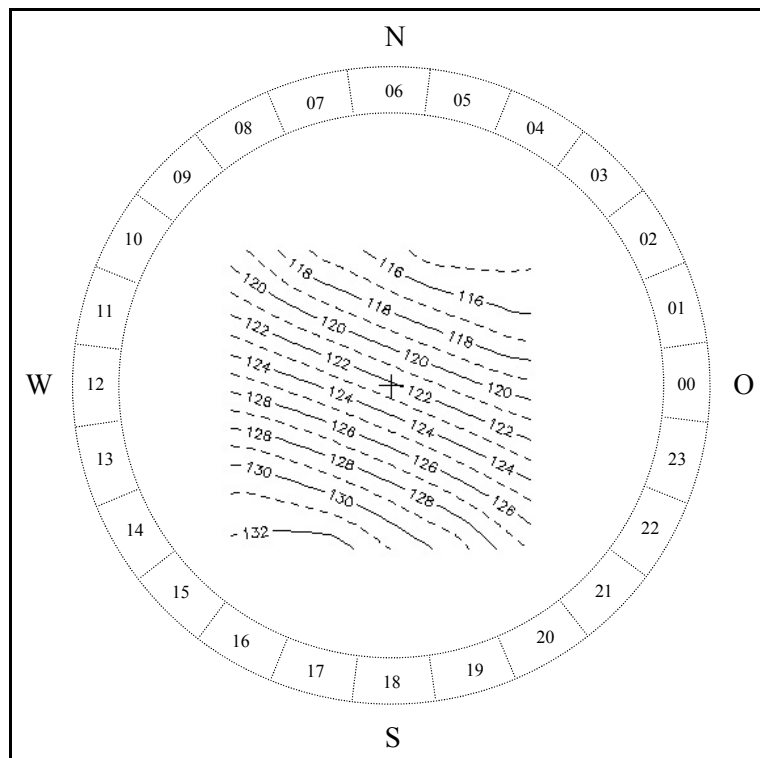


Abb. 126: Horizontale Verteilung der CO₂-Konzentration im Dezember 1999

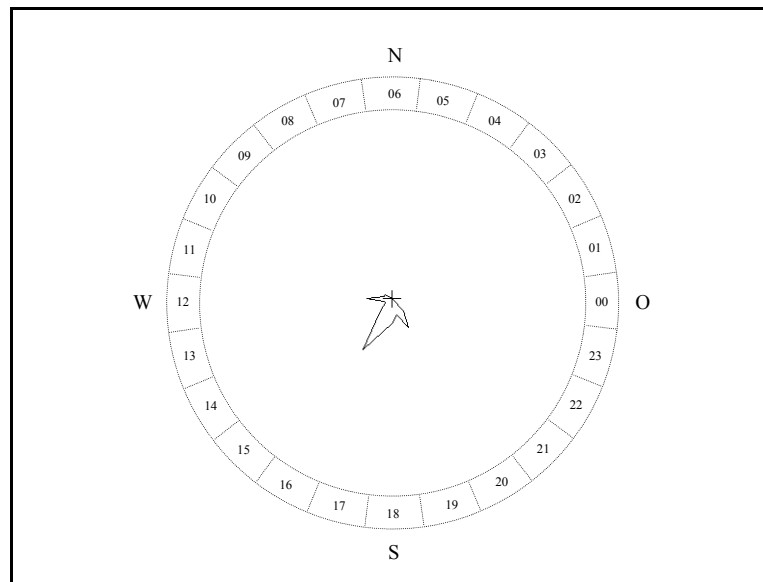


Abb. 127: Windweg im Dezember 1999
(Meßhöhe: 2 m üGOK, das PLUMEX-Symbol entspricht 170 km $\pm$ 9 %)

Anmerkung:

Auf Grund gleicher Skalierung wie in Abb. 125 und der vergleichsweise kurzen Laufzeit der Anlage im Dezember resultiert das "kleine" Polardiagramm.

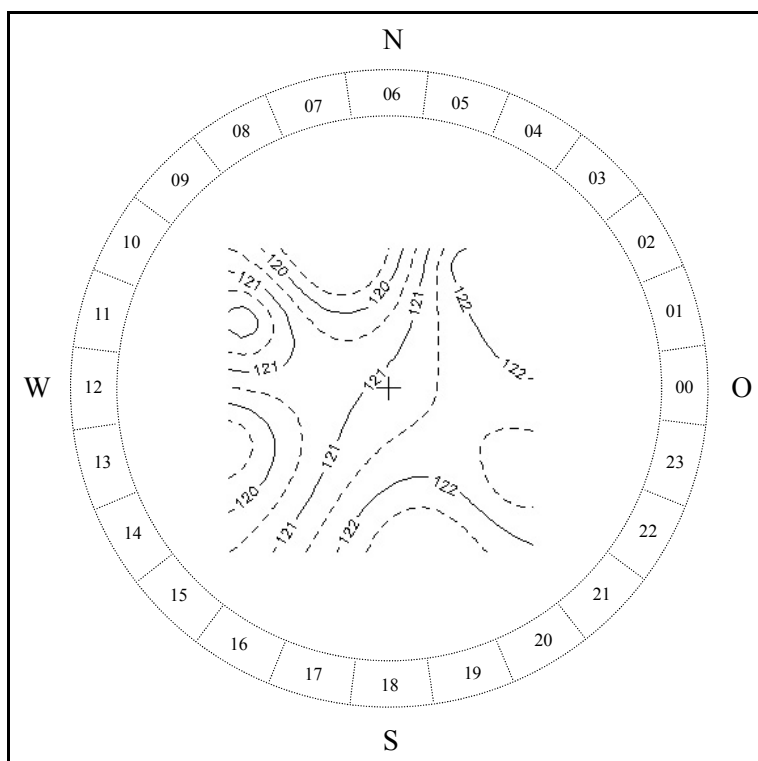


Abb. 128: Horizontale Verteilung der CO₂-Konzentration im Oktober 1999

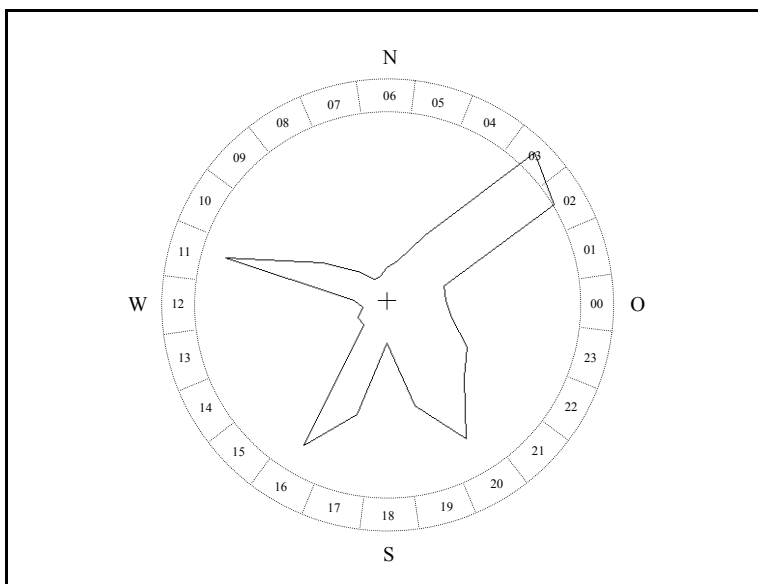


Abb. 129: Windweg im Oktober 1999
(Meßhöhe: 2 m üGOK, das PLUMEX-Symbol entspricht 170 km $\pm$ 9 %)

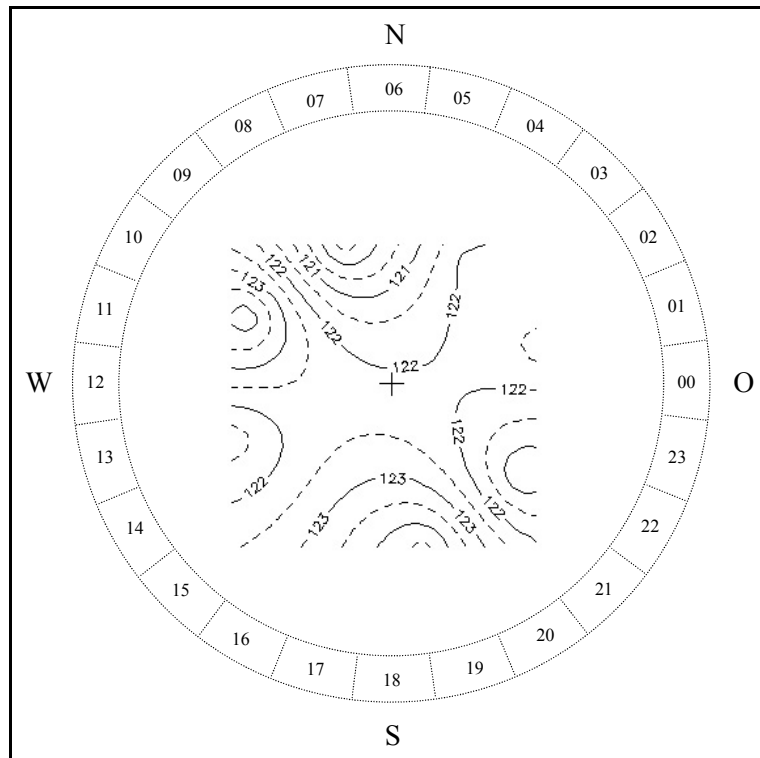


Abb. 130: Horizontale Verteilung der CO₂-Konzentration im Zeitraum April – September 1999

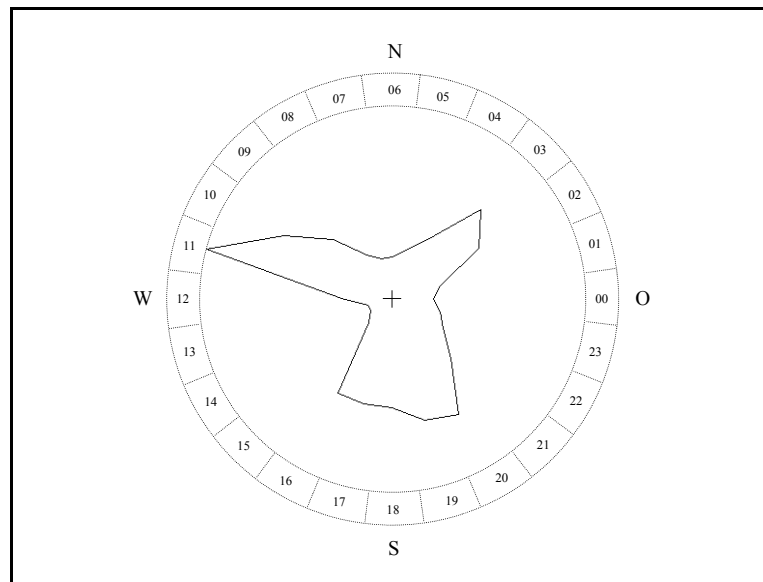


Abb. 131: Windweg im Zeitraum April – September 1999 (Meßhöhe: 2 m üGOK, das PLUMEX-Symbol entspricht 1670 km $\pm$ 9 %)

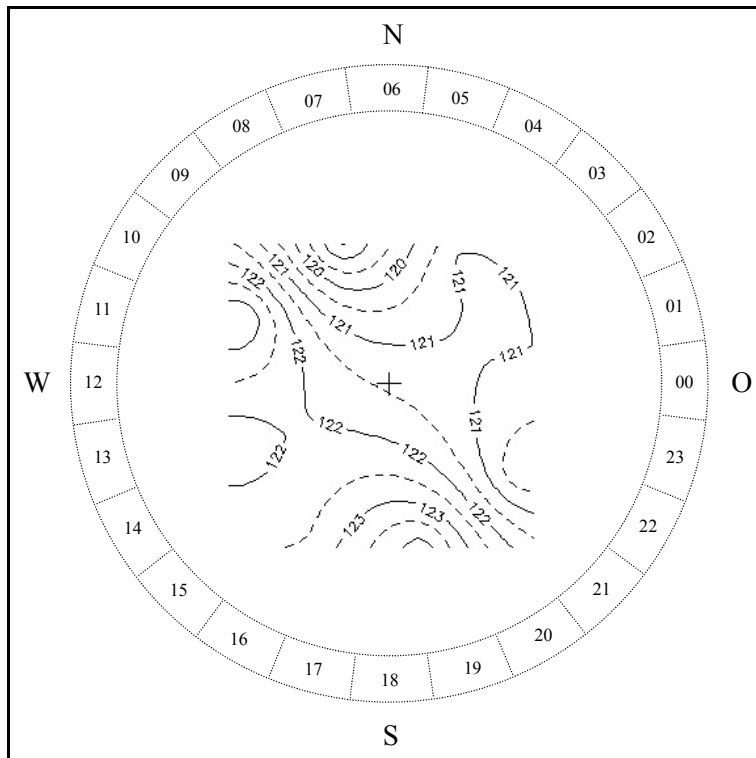


Abb. 132: Horizontale Verteilung der CO₂-Konzentration im Kalenderjahr 1999

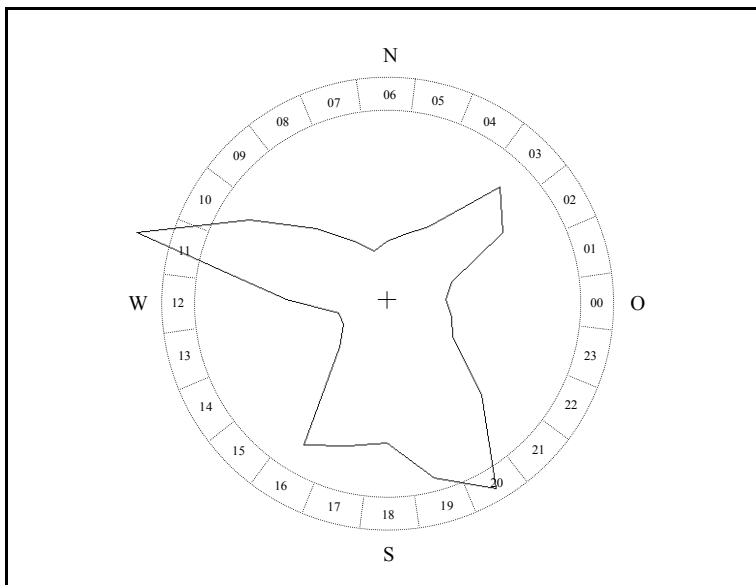


Abb. 133: Windweg im Kalenderjahr 1999
(Meßhöhe: 2 m üGOK, das PLUMEX-Symbol entspricht 1670 km $\pm$ 9 %)

Das Kammervolumen und die einzuhaltende Aufreicherung (A) sind Konstanten in einem gegebenen Experiment, damit hängt der Spurengasverbrauch nur von der Gaswechselzahl (Z) ab. Es ergibt sich ein Verbrauch gemäß der Formel:

$$Q_{\text{Gas}} = A \cdot Q_{\text{Luft}} = A \cdot V_C \cdot Z \text{ (mit } A = C_{\text{Soll}} - C_{\text{Umgebungsluft}}).$$

Im Gegensatz dazu ist der Gasverbrauch einer Freilandbegasungsanlage rechnerisch nicht zu bestimmen. Die Menge des einzusetzenden Spurengases hängt in großem Maße von dem jeweilig vorherrschenden mikrometeorologischen Szenario ab. In erster Linie ist die Windgeschwindigkeit zu nennen. Mit steigender Geschwindigkeit werden immer größere Luftmassen herangetragen, für deren Aufreicherung immer größere Gasmengen nötig werden. Weiterhin ist die vertikale Luftbewegung bei starker Sonneneinstrahlung (Thermik) eine Ursache für erhöhten Gasverbrauch.

Last-not-least sind auch bestimmte Systemeigenschaften der Anlage eine Ursache für erhöhten Gasverbrauch. So kann z.B. ein nicht optimal eingestellter Regler nach einer plötzlichen Änderung des Windes (in Richtung und Stärke) durch ein Überspringen des Stellsignales erhebliche zusätzliche Gasmengen freisetzen. Weiterhin ist die Trägheit (Zeitkonstante) von mechanischen Komponenten, wie den Luftklappen, die Ursache für zusätzlichen Gasverbrauch. Durch den Schlupf einer zu trägen Azimutsteuerung geht das Spurengas von den randständigen Luftauslässen (VVP) direkt in der Abluftfahne verloren (vgl. Kap. 6.1.3). Ein ähnlicher Effekt führt bei gemeinsamer Betätigung von VVP in Gruppen zu dem beschriebenen Mehrverbrauch an Spurengas (vgl. Kap. 3.4.1.2). Durch eine sorgfältige Auslegung des Reglers und den Einsatz von schnell schaltenden Luftklappen wurde in der vorliegenden Arbeit versucht, diese vermeidbaren Ursachen des Gasverbrauches so weit wie technisch machbar auszuschalten.

Zur Dokumentation des tatsächlichen Verbrauches sind die Gaslieferungen in der Tab. 13 mit den jeweils aufgelaufenen Betriebsstunden der vier PLUMEX *replicates* zusammengestellt. Mit nur einer Ausnahme (08. Juli 1998) ist der Gasbehälter mit jeder Anlieferung stets vollständig gefüllt worden. Dadurch kann der Verbrauch in den Zeiträumen zwischen den Betankungen genau ermittelt werden. Wie die Tab. 13 ausweist, sind in dem knapp vierjährigen Betriebszeitraum von August 1998 bis Juni 2002 insgesamt 279217 kg Kohlendioxid verbraucht worden. Die vier PLUMEX haben in dieser Zeit zusammen 45523 Stunden gearbeitet. Daraus berechnet sich der mittlere Verbrauch einer einzelnen Anlage zu:

$$V = 6,13 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

An einem typischen Sommertag mit etwa 12 Stunden Betriebszeit verbraucht eine PlumeX im Mittel also etwa 75 Kilogramm Kohlendioxid. Ein objektiver Vergleich dieser Zahl mit den Werten anderer Anlagen ist, wie bereits begründet wurde, nicht ganz einfach (vgl. Kap. 7.1). Die in der Literatur übliche Normierung des Gasverbrauches auf die exponierte Fläche ohne Berücksichtigung des vorherrschenden Windes kann nur sehr grobe Näherungswerte liefern. Für die PLUMEX mit einer Fläche von 50 m² berechnet sich der spezifische Verbrauch zu 0.12 kg·m⁻². Unter der Annahme, daß sich der Gasbedarf einer PLUMEX für eine Zielkonzen-

Tab. 13: Gaslieferungen und Betriebsstunden

(Am 08. Juli 1998 erfolgte nur eine Teilfüllung.)

Datum	CO ₂ [kg]	P1 [h]	P2 [h]	P3 [h]	P4 [h]
** Jahr: 1997					
7. Mai	20102	-	-	-	-
4. November	-	0,0	0,0	0,0	0,0
19. November	19508	135,0	355,0	310,0	0,0
** Jahr: 1998					
2. Juni	-	-	-	-	0,0
8. Juli	9223	2178,2	1965,9	1952,2	658,0
20. August	20290	2683,5	2511,0	2448,5	1168,9
17. Dezember	19973	3629,8	3494,7	3373,6	2076,4
** Jahr: 1999					
12. Mai	20703	4654,6	4547,8	4397,9	3099,9
21. Juli	20373	5508,0	5348,6	5240,0	3951,9
12. Oktober	20427	6306,5	6154,0	5999,1	4749,9
** Jahr: 2000					
1. März	19009	7018,7	6846,4	6710,7	5437,2
16. Mai	20059	7738,7	7565,1	7430,3	6157,2
13. Juli	20273	8446,9	8270,2	8138,6	6864,6
26. September	20000	9221,8	9043,8	8914,8	7641,0
** Jahr: 2001					
7. März	18919	10092,6	9921,1	9784,9	8511,7
23. Mai	20255	10839,7	10669,9	10539,6	9266,3
27. Juli	20546	11636,9	11464,6	11336,9	10063,7
24. Oktober	20290	12447,8	12270,9	12448,1	10674,8
** Jahr: 2002					
27. März	18844	13278,6	13103,1	12978,9	11705,5
12. Juni	19546	14108,3	13933,4	13808,6	12535,3
28. August	20481	15018,4	14841,2	14717,6	13444,1

tration von 550 ppm (150 % ambient) verdoppeln würde, berechnet sich ein spezifischer Verbrauch von $0,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Zum Vergleich listet Tab. 14 exemplarisch einige ausgewählte Daten.

In dieser "Rangliste" belegt die PlumeX zwar nominal den ersten Platz, aber dieser Vergleich läßt, wie gesagt, die individuellen Windverhältnisse der Standorte außer Betracht und ist darum nur als Größenordnung zu verstehen. Weiterhin liefert die Normierung des Verbrauches auf die Grundfläche bestenfalls "kaufmännische" Daten bzgl. der Kosten; ein physikalischer

Sinn kann darin nicht liegen. Eine Analogie soll das veranschaulichen: Wenn in einem Gedankenexperiment ein dahinströmender Fluß mit einem geeigneten Farbstoff eingefärbt wird, dann ist es evident, daß der Farbstoffverbrauch dabei nicht mit der überströmten Fläche korreliert.

Tab. 14: Flächenbezogener Gasverbrauch einiger Systeme
(Die rel. Aufreicherungen sind mit $C_{amb}=370$ ppm umgerechnet.)

Verbrauch	Aufreicherung	Quelle
0,25 kg·m ⁻²	550 ppm (hochgerechnet)	PLUMEX
0,28 kg·m ⁻²	600 ppm	OKADA <i>et al.</i> (2001)
0,30 kg·m ⁻²	550 ppm	NAGY <i>et al.</i> (1992)
1,30 kg·m ⁻²	k.A.	MIGLIETTA <i>et al.</i> (1997)

Auch der Versuch mancher Autoren (z.B. NAGY *et al.* 1992, OKADA *et al.* 2001), den Tagesverbrauch an Spurengas mit dem arithmetischen Mittelwert der Windgeschwindigkeiten eines ganzen Tages zu korrelieren, kann keine brauchbaren Ergebnisse bringen. Der Wind ist eine vektorielle Größe, und wenn der Betrag eines Vektors ohne Berücksichtigung seiner Richtung skalar gemittelt wird, dann entsteht eine bedeutungslose Zahl, mit der nichts sinnvoll korreliert werden kann. Diese Tatsache wird an den Daten von OKADA (2001) besonders deutlich (vgl. Fig.8, *loc. cit.*) Die Regressionsgerade durch die wiedergegebene amorphe Punktwolke wirkt schon mit bloßen Auge sehr waghalsig. Vergleicht man in diesem Diagramm den Verbrauch bei z.B. 1 m·s⁻¹ (550 kg·d⁻¹) mit dem Verbrauch bei der doppelten Geschwindigkeit (2 m·s⁻¹, 670 kg·d⁻¹), dann ergibt sich ein Mehrverbrauch von etwa 20 Prozent. Dies ist ein Wert, der nicht sehr wahrscheinlich ist, denn es ist ein Faktum, daß bei einer verdoppelten Windgeschwindigkeit in erster Näherung die doppelte Luftmenge pro Zeiteinheit an eine Begasungsanlage herangeführt wird und damit für eine gegebene Sollkonzentration die doppelte Spurengasmenge zur Aufreicherung erforderlich ist.

Gegenüber anderen Anlagen ist aber auch die besondere aerodynamische Ausgestaltung des CAP (*circular active plenum*) der PLUMEX die Ursache für den erreichten sparsamen Umgang mit Spurengas. Durch das Mitführen der Ansaugpunkte mit der Windrichtung sollte primär nur eine "isotrope" Regelstrecke realisiert werden, bei der die Windrichtung nicht als Störgröße wirksam ist (vgl. Abb. 28, Abb. 27). Als Nebeneffekt aber ergab sich dadurch auch eine auffallende Einsparung an Spurengas, denn die immer im Lee der Anlage angesaugte Hilfsluft hat einen gegenüber der Umgebungsluft angehobenen Spurengasgehalt.

Zur Quantifizierung dieser Einsparung durch die Abluftrückführung führt die Überlegung, daß die pro Zeiteinheit zurückgeführte Gasmenge dem Produkt aus Restkonzentration und Volumenstrom entspricht. Die Restkonzentration in der Abluft läßt sich aus dem Diagramm Abb. 76 ablesen. Werden die dort dargestellten Abklingkurven bis zum Rand des Ringes extrapoliert, so ergibt sich die Konzentration auf der Leeseite der PlumeX. Diese

Konzentration liegt etwa 15 Prozent über der Umgebung, und unter der Annahme einer mittleren Umgebungskonzentration von etwa 370 ppm (100 %), befinden sich in jedem Kubikmeter angesaugter Luft etwa 55 ml (2,5 mmol, 108 mg) zusätzliches Kohlendioxid. Der Volumenstrom in einem Ansaugstutzen wurde mit einer Meßdüse gemessen und beträgt ungefähr 70 ± 5 Liter pro Sekunde. Mit den 12 aktiven Saugstutzen einer PlumeX werden folglich rund $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ angereicherte Luft angesaugt. Das ergibt eine Rückgewinnung von etwa 0,32 kg Kohlendioxid pro Betriebsstunde. Auf den mittleren Verbrauch von $6,13 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ bezogen, bedeutet dies eine Einsparung von rund fünf Prozent. Für die Forschungsstation in Linden-Leihgestern summiert sich diese Einsparung auf mindestens vier Tonnen Kohlendioxid im Wert von rund eintausend Euro pro Betriebsjahr.

7.3.4. Apertur der PLUMEX

Wie in dem vorangegangenen Abschnitt aufgezeigt wurde, sind die Versuche anderer Autoren, den Gasverbrauch einer gegebenen Anlage mit der Fläche zu korrelieren, naturgemäß nicht zufriedenstellend. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen haben die naheliegende Vermutung bestätigt, daß der Gasverbrauch aber sehr gut mit dem Windweg korreliert. In Tab. 15 sind die Verbrauchswerte dem aufgelaufenen Windweg gegenüber gestellt. (Bei der Berechnung des Quotienten ist nur ein Viertel des Gasverbrauches angesetzt worden.)

Tab. 15: Gasverbrauch, Windweg und Kennzahl

Verbrauch [kg]	Windweg [km]	Quotient [$\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$]
20373	6323,6	0,81
20427	5968,5	0,85
20059	5316,3	0,94
20273	4583,8	1,10
20000	5086,0	0,98

Der Quotient aus Kohlendioxidverbrauch und Windweg entspricht der Kohlendioxidmenge, die hinzudosiert wird, wenn sich eine gedachte Windfront über der PLUMEX um einen Meter nach vorn bewegt hat. Diese empirische Dosierungskennzahl ist eine Systemkonstante der PLUMEX in der vorliegenden Installation:

$$K_{\text{Dos}} = 0,95 \pm 0,16 \text{ Gramm CO}_2 \text{ pro Meter Windweg} \\ (0,48 \pm 0,08 \text{ Liter} \cdot \text{Meter}^{-1})$$

Das pro Meter Windweg freigesetzte Quantum Kohlendioxid von rund 0,5 Liter reicht rechnerisch aus, um rund $5,2 \text{ m}^3$ Luft von 370 ppm um 25 % auf 462 ppm aufzureichern. Wenn nun aber mit jedem Meter Windweg $5,2 \text{ m}^3$ Luft aufgereichert werden, dann bedeutet

dies, daß die Fläche der "Windfront" rechnerisch $5,2 \text{ m}^2$ beträgt. Diese Fläche kann als "Wind-Einfangquerschnitt" oder Apertur der PLUMEX gedeutet werden. Aus dieser Apertur läßt sich nun weiterhin die (mittlere) Höhe bzw. Dicke der Gasschicht (*layer*) ermitteln: Dazu dividiert man die Apertur durch die Breite (8 m) der PlumeX. Dies ergibt eine Schichtdicke von $65 \pm 8 \text{ cm}$. Dieser Wert ist plausibel.

Der Versuch vieler Autoren, den Spurengasverbrauch einer Anlage einzig auf die Grundfläche zu normieren, ist also unsinnig. Der Gasverbrauch eines Expositionssystems hängt, wie dargelegt, von der Dicke der erzeugten Gasschicht (Höhe der Luftauslässe) und dem Windweg ab. Durch die niedrige Bauform der PLUMEX ist die über der Vegetation liegende "Gasdecke" nur so dick wie nötig und der Gasverbrauch der PLUMEX deshalb entsprechend gering.

7.3.5. Zuverlässigkeit

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurde die Qualität der Begasung und der geringe Gasverbrauch der PLUMEX dargestellt und erläutert. Neben diesen beiden Eigenschaften ist die Verfügbarkeit ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung einer Begasungsanlage. Grundvoraussetzung für Begasungsexperimente ist, daß das gewählte Expositions-Szenario über lange Zeiträume unterbrechungsfrei gewährleistet ist. Häufige Betriebsunterbrechungen oder gar lange Betriebspausen werden die biologische Reaktion zwangsläufig verfälschen und im Extremfall unbrauchbar machen.

Für die, mit der hier entwickelten PLUMEX geplanten Experimente an Dauergrünland, ist ein Zeitraum von mindestens 10 Jahren vorgesehen. Aus diesem Grund war die technische Zuverlässigkeit der PLUMEX ein wichtiger Konzeptpunkt, dem schon in der Entwurfsphase auf mehrfache Weise Rechnung getragen wurde. So wurde die Elektronik und Pneumatik der Azimutsteuerung innerhalb des aus Stahlblech gefertigten CAP-Ringes untergebracht. Dort ist sie vor Witterungseinflüssen, namentlich Gewitter geschützt (FARADAYScher Käfig, vgl. Kap. 6.1). Die Komponenten der Konzentrationsregelung sind in soliden Schaltkästen mit der Schutzklasse IP65 untergebracht und werden mit einem Stickstoffstrom vor Feuchtigkeit und Korrosion geschützt (vgl. Kap. 6.4.3).

Weiterhin wurde ein modularer Aufbau angestrebt, in dem die einzelnen Baugruppen mit möglichst geringem Meßaufwand "im Feld" auf ihre ordnungsgemäße Funktion geprüft werden können. Um im Störfall nicht viel Zeit zu verlieren und eine schnelle Diagnose stellen zu können, wurde ein Diagnoseprogramm entwickelt, das durch Simulation von künstlicher Intelligenz aus den äußeren Symptomen des Fehlers eine Diagnose ableitet (vgl. Kap. 6.4.4).

Mit diesen Maßnahmen ist sicher ein bedeutender Schritt zu einem zuverlässigen Betrieb getan worden, aber eine "100-prozentige" Ausfallsicherheit kann es nicht geben. Selbst der unverhältnismäßige Aufwand redundanter Systeme trägt ein Restrisiko. Die natürliche Lebensdauer realer Bauteile setzt der Zuverlässigkeit Grenzen. Im nachfolgenden Abschnitt

sollen die in der Routine vorgekommenen Betriebsstörungen der vier PLUMEX dokumentiert und bewertet werden. In Tab. 16 sind dazu diese Störungen aus den vier zurückliegenden Jah-

Tab. 16: Aufstellung der Reparaturen an den vier PLUMEX
(Routinemäßige Wartungsarbeiten und Austausch von Klappen sind nicht aufgeführt.)

28.07.1998	(P4) Dosierventil defekt (#12)	x
30.07.1998	(P2) DCF-Uhr gewechselt	
30.07.1998	(P4) DCF-Uhr gewechselt	
31.07.1998	(P3) DCF-Uhr erneuert	
07.09.1998	(P2) DCF-Antenne	
16.09.1998	(P2) DCF Probleme	
20.09.1998	(P2) DCF Probleme	
06.10.1998	(P1) DCF neu	
03.11.1998	(P2) DCF neu	
03.11.1998	(P3) DCF erneuert	
05.11.1998	(P4) DCF neu	
11.11.1998	(P4) VICTOR, CAPTAIN gewechselt	x
03.12.1998	(P2) Funkuhr mit Batteriebetrieb (6 Tage)	
04.03.1999	(P4) Reparatur	X
22.04.1999	(P4) VVP gekürzt	X
26.05.1999	(P2) Funkuhr	
01.06.1999	(P2) Funkuhr	
14.06.1999	(P?) Druckleitung CO2	
28.06.1999	(P1) Windfahne erneuert	
28.06.1999	(P2) Windfahne erneuert	
28.06.1999	(P3) Windfahne erneuert	
28.06.1999	(P4) Windfahne erneuert	
29.06.1999	(P3) VICTOR defekt	x
23.07.1999	(P2) teilw. Stillstand wg. Funkuhr	
06.10.1999	(P2) Totalausfall wg. Funkuhr	
07.10.1999	(P2) Totalausfall wg. Funkuhr	
08.10.1999	(P2) Totalausfall wg. Funkuhr	
03.04.2000	(P3) Schlauch geflickt	
17.05.2000	(P4) Schlauch geflickt	
21.08.2000	(P4) Magnetspule Hauptventil defekt	x
24.08.2000	(P1) Schlauch erneuert	
24.08.2000	(P2) Schlauch erneuert	
24.08.2000	(P3) Schlauch erneuert	
24.08.2000	(P4) Schlauch erneuert	
15.09.2000	(P2) undichte Hauptleitung	
04.10.2000	(P1) undichte Hauptleitung	
04.10.2000	(P3) undichte Hauptleitung	
04.10.2000	(P4) undichte Hauptleitung	
18.10.2000	(P2) undichte Hauptleitung	
23.03.2001	(P1) FI-Schalter löst aus	x
23.03.2001	(P2) FI-Schalter löst aus	
03.07.2002	(P2) Netzteil defekt	x

ren zusammengestellt. Diese Tabelle offenbart im wesentlichen drei Problemgruppen: Die Funkuhren, die Luftklappen und die Druckleitungen. Im Folgenden werden die Ursachen dafür erläutert.

Die Funkuhr ist als Langwellenempfänger bekanntermaßen sehr empfindlich gegen Funkstörungen, aber durch die geringe Entfernung des Standortes zum Zeitzeichensender (DCF77) in Mainflingen bei Frankfurt von etwa 100 km fällt das Signal mit so großer Feldstärke ein, daß besondere Schwierigkeiten beim Empfang deshalb nicht erwartet werden konnten. Dennoch war schon bei der ersten Uhren-Version ein bedeutender Aufwand zur Entstörung getrieben worden und die Ferrit-Antennen waren sorgfältig auf den Sender ausgerichtet. Erstaunlicherweise ließ sich aber ein stabiler Betrieb nicht erreichen. Vor allem am Standort der PlumeX Nr.2 lief die Funkuhr oft nur wenige Tage hintereinander zufriedenstellend. Vermutete externe Störfelder konnten aus Mangel an geeigneten Meßmitteln nicht identifiziert werden. Weil die betreffenden Uhren an anderer Stelle auf dem Gelände tadellos funktionierten, ist es sehr wahrscheinlich, daß unterirdische elektrische Versorgungsleitungen im Bereich von PLUMEX Nr.2 die Ursache der Funkstörungen sind. Durch die ständig steigende Zahl von Frequenzumrichtern in der Starkstromtechnik und die zunehmende Verbreitung von PLC (*power line communication*) werden Stromleitungen immer häufiger zu Quellen von Funkstörungen im gesamten Spektrum von VLF bis VHF. Über einen Zeitraum von fast einem Jahr wurden daraufhin die elektrischen Filter schrittweise verbessert und die *Software* der Uhr durch Plausibilitätskontrollen verfeinert. Im Winter 1999 konnten die Funkstörungen schließlich beherrscht werden. Seit dieser Zeit ist es zu keinem Ausfall der Uhren mehr gekommen.

Ebenso wie die Funkuhren, standen auch die Luftklappen bezüglich ihrer Zuverlässigkeit zunächst außerhalb jeder Sorge um Funktionalität. Erst im Routinebetrieb zeigten sich die Schwächen: Die Klappen waren den vielen Schaltspielen auf Dauer nicht gewachsen. Durch die drei Vorzugsrichtungen des vorherrschenden Windes (Süd, NordOst, NordWest; vgl. Abb. 104) häufen sich die Schaltspiele zusätzlich auf wenigen Klappen³⁸. Nach drei Betriebsjahren waren mehr als 25 Prozent der Klappen ausgefallen. In allen Fällen blieb der eigentliche Schließmechanismus intakt und nur die Antriebszylinder versagten. Durch Undichtigkeiten an den Kolben verloren sie Hubkraft und konnten die Luftklappen nicht mehr vollständig schließen. Zusätzlich störte das aus den Leckstellen freigesetzte Arbeitsgas Kohlendioxid die Konzentrationsregelung. Vor allem bei defekten Ansaugklappen, die immer luvseitig aktiviert sind, entstand eine starke Kontamination der Beobachtungsfläche. Eine Gegenreaktion des Reglers kam in diesen Fällen meist zu spät und führte aufgrund der hohen Spurengaskonzentration zu heftigem Überspringen. Solche Defekte lassen sich leicht erkennen, wenn man die Spurengaskonzentration über der Windrichtung aufträgt. Abb. 135 aus Mai 2002 zeigt deutlich überhöhte Konzentrationen im Bereich der defekten Klappen 20, 21 und 22. Zum Vergleich dient Abb. 134 (Mai 1999).

³⁸ Die Schaltvorgänge häufen sich querab der Windrichtung. Die Schalthäufigkeit ist hier rechnerisch etwa siebenmal so groß wie im Luv oder Lee.

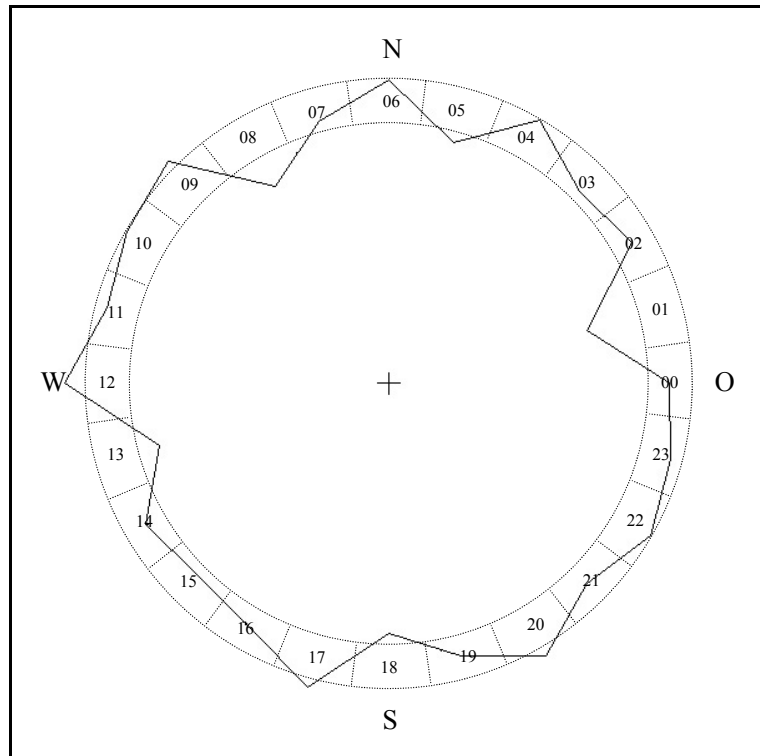


Abb. 134: Typische Konzentrationsverteilung einer intakten PLUMEX (Mai 1999)
Das PlumeX-Symbol entspricht $125 \pm 8\%$ der Umgebungsluft.

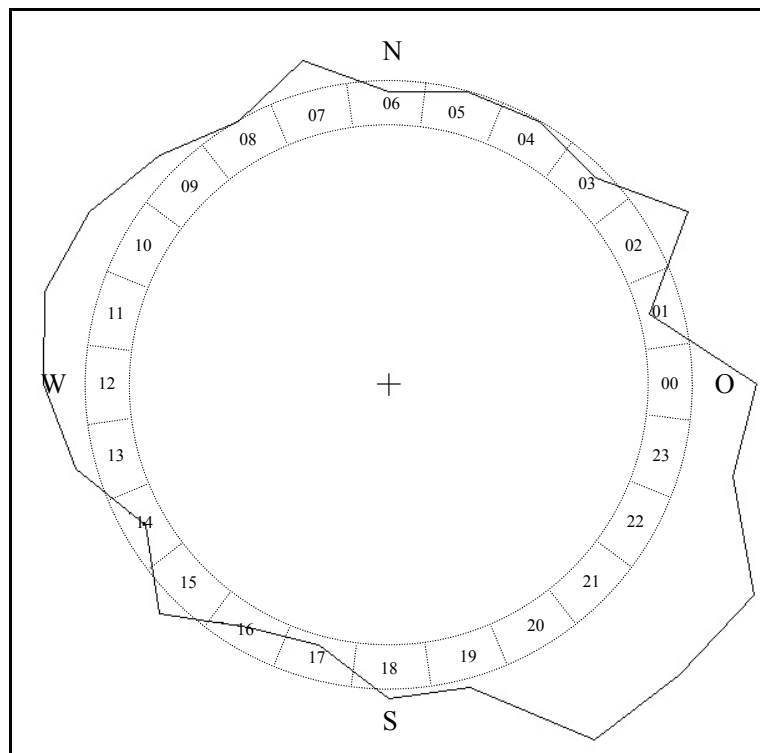


Abb. 135: Bei Undichtigkeiten ist die Konzentration im Bereich der defekten Segmente (20, 21, 22) überhöht (Mai 2002)

Das PlumeX-Symbol entspricht 125 ± 8 % der Umgebungsluft.

Als Lösung wurden andere Zylinder verwendet und der Antrieb geändert (vgl. Abb. 75): An der Originalklappe erzeugt eine Pleulstange ein verschleißförderndes Kippmoment am Kolben. Die neuen Kolben sind dagegen drehbar gelagert und eine Pleulstange ist überflüssig. Durch den Wegfall der Pleulstange wirken keine Kippkräfte auf den Kolben, was die Lebensdauer deutlich verlängert. Die Klappen werden Stück für Stück ausgetauscht, sobald sie defekt sind. Danach wird der Antrieb umgebaut. Dieser Umbau ist mit vorgefertigten Teilen in weniger als einer Stunde möglich.

Als drittes unerwartetes Problemfeld zeigten sich die sekundären Druckleitungen vom Kohlendioxidbehälter zu den PLUMEX. Die primäre Installation am Behälter ist in Kupfer ausgeführt. Nach Druckminderung auf etwa 8 bar läuft das Spurengas an vier elektrische Ventile. Von hier wird es dann über Strecken von 60 m (P1,P4) bis 100 m (P3) an die vier Ringe geführt. Diese Leitungen bestanden anfänglich aus einem speziellen Pneumatikschlauch (PU, $d = 6$ mm) der Fa. FESTO. Mit einem Versagen war nicht zu rechnen, denn diese PU-Leitungen waren in den geständerten Kabelkanälen vor Licht geschützt und ein Betriebsdruck von acht bar ist ein typischer Wert für diese Leitungen, die für bis zu 10 bar Dauerlast spezifiziert sind. Nach etwas mehr als zwei Jahren platzten die ersten Leitungen an unterschiedlichen Stellen. Diese Defekte häuften sich in den folgenden zwölf Monaten derart, daß schließlich alle Hauptleitungen gegen Kupferrohr ($d = 10$ mm) ausgetauscht wurden.

Es kann davon ausgegangen werden, daß die Probleme mit den Funkuhren, den Luftklappen und den Druckleitungen nunmehr dauerhaft behoben sind. Die wenigen verbleibenden Betriebsstörungen können praktisch vernachlässigt werden. Wie die Tab. 13 zeigt, sind in den letzten vier Jahren etwa fünfzigtausend Betriebsstunden aufgelaufen und in dieser Zeitspanne sind zwei von mehr als 300 Ventilen (Fa. FESTO) und zwei von zwanzig Schaltnetzteilen (Fa. SIEMENS) ausgefallen.

Die individuellen Betriebsstunden sind in Tab. 17 zusammen mit den Abweichungen von der Soll-Laufzeit angegeben. Durch die Schaltzeiten der Funkuhren ergibt sich für jede PLUMEX eine rechnerische jährliche Laufzeit von 2803 Stunden. Für den betrachteten Zeitraum von Juli 1998 bis Juli 2002 ergibt das ein Soll von 11212 Stunden. Die positiven Abweichungen (Überstunden) erklären sich hauptsächlich durch Fehlfunktion der Funkuhren aus der Zeit vor Oktober 1999.

Tab. 17: Akkumulierte Betriebsstunden der PLUMEX

Datum	Zählerstände			
	P1	P2	P3	P4
08. Juli 2002	14437	14260	14136	12863
08. Juli 1998	2178	1965	1952	658
Laufzeit (h)	12259	12295	12184	12205

Zusammenfassend darf gesagt werden, daß die vier PlumeX einen stabilen Betrieb ohne nennenswerte Ausfälle gewährleisten können. Ein direkter Vergleich mit den Anlagen anderer Autoren ist nicht möglich, weil in der recherchierten Literatur keine Angaben zur betrieblichen Zuverlässigkeit gefunden wurden. Die meisten Anlagen waren zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nur wenige Monate in Betrieb. REECE *et al.* (1995) berichten die Erfahrungen von sogar nur einem einzigen Betriebstag.

7.4. Mögliche Weiterentwicklungen

Bei dem vorliegenden Expositionssystem PLUMEX sollten als oberstes Ziel die technischen Eigenschaften bestehender Anlagen übertroffen werden. Mit einem aufwendigen Prototypen im Technikumsmaßstab wurde das Konzept sorgfältig evaluiert und weiter verbessert. Schließlich wurde dann stufenweise in vier nacheinander gebauten Feldanlagen die mit jeder Anlage gemachte Erkenntnis umgesetzt.

Die im vorigen Kapitel wiedergegebenen Ergebnisse belegen den mit PLUMEX erzielten Fortschritt in der Begasungstechnologie. Trotz des hohen Standards bleiben aber technische Aspekte, die Raum zu weiteren Entwicklungen lassen. Diese Experimente hätten den Rahmen der vorliegenden Arbeit gesprengt und werden darum in den folgenden Abschnitten nur skizziert.

7.4.1. Erweiterte Regenfestigkeit

Die PLUMEX ist zwar mit besonderem Blick auf Wetterfestigkeit geplant und gebaut worden, doch konnte beobachtet werden, daß bei starken Regenfällen der Unterdruck im CAP das angesaugte Wasser ansammelt und zurückhält. Im Normalfall reicht die nächtliche Ruhepause aus, um das akkumulierte Wasser wieder ablaufen zu lassen, aber in Zeiten mit übermäßiger Niederschlagstätigkeit könnte angesaugtes Regenwasser zu einem Problem werden, weil es die im CAP befindliche Elektronik erreichen könnte.

Zur Lösung des Problems wäre ein kurzzeitiges Umschalten der Laufrichtung der Ventilatoren denkbar. Dadurch werden die Druckverhältnisse in den beiden Teilkanälen des CAP getauscht und das eingedrungene Wasser wird herausgedrückt. Die erforderliche Umkehrung der Laufrichtung der Ventilatoren ist durch Vertauschung von zwei Phasen einfache Weise möglich. Ein Leitfähigkeitssensor im Kanal könnte das für die Umschaltung erforderliche Steuersignal liefern. Die Begasung wäre zwar für die Zeit der Druckumkehr unterbrochen, aber es darf angenommen werden, daß dies aufgrund der Kürze der Zeit keine übermäßige Rolle spielt.

7.4.2. Schnellere Luftklappen

Ein weiterer Punkt der Verbesserung könnten die Luftklappen sein. Zwar wurden diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit gegenüber den Klappen der ersten Generation (Fa. TROX)

deutlich verbessert, aber hier ließe sich durch entsprechenden finanziellen Aufwand noch weiter optimieren. Aus Kostengründen wurden nämlich in den selbstgebauten, verbesserten Klappen der PLUMEX nur einfach-wirkende Zylinder eingesetzt. Diese preiswerteren Zylinder haben zwei Nachteile gegenüber doppelt-wirkenden Zylindern: Erstens arbeiten diese durch eine Rückholfeder langsamer und zweitens besteht die Möglichkeit, daß durch ein nach außen führendes Luftloch zum Druckausgleich evtl. Partikel (Insekten) angesaugt werden können, und dadurch der Zylinder blockiert.

Weil für die doppelt-wirkenden Zylinder zusätzlich noch spezielle 2/4-Wege-Ventile erforderlich sind, ist eine Umrüstung besonders kostenträchtig. Durch den entsprechenden finanziellen Einsatz würde sich aber sicherlich eine weitere Verkürzung der Schaltzeiten bei gleichzeitiger Erhöhung der Zuverlässigkeit erreichen lassen.

7.4.3. Energieeinsparung

Die elektrische Anschlußleistung einer PLUMEX beträgt etwa 2,5 kW. Mit einer jährlichen Laufzeit von 2803 h berechnet sich daraus ein Stromverbrauch von rund 7000 kWh pro Jahr und Anlage. Dieser Energiebedarf wird im Wesentlichen von den Ventilatoren verursacht, denn diese laufen kontinuierlich und haben einzeln eine Leistung von 120 Watt. Der Stromverbrauch der Elektronik ist dagegen minimal. Er ändert sich zwar in Abhängigkeit vom Schaltzustand der Magnetventile (Windverhältnisse), aber er kann mit guter Näherung auf 150 Watt geschätzt werden. Am Gesamtverbrauch hat die Elektronik also nur einen Anteil von etwa sechs Prozent.

Im CAP der PlumeX laufen die Ventilatoren stets mit voller Leistung. Der Primärluftstrom hat dadurch unabhängig vom Spurengasstrom immer die gleiche Stärke. Dies ist jedoch nicht erforderlich. Bei einem geringeren Spurengasaustrag hätte ein entsprechend verminderter Primärluftstrom sogar den Vorteil einer (annähernd) konstanten Vorkonzentration. Bei Windstille wird gar keine Hilfsluft benötigt und die Ventilatoren dürften dann sogar ganz still stehen.

Würde die Ventilatorleistung nun mit einem Frequenzumrichter im obigen Sinne, windabhängig variiert werden, dann könnte dadurch ein signifikanter Teil der elektrischen Energie gespart werden. Bei einer mittleren Ventilatorleistung von beispielsweise 50 Watt würde sich der Stromverbrauch einer PLUMEX halbieren. Mit den vier Anlagen könnten so jährlich 14000 kWh eingespart werden. Unter Anwendung der aktuellen Preise von Strom und Kohlendioxid, hat der jährlich eingesparte Strom den Gegenwert von mehr als drei Tonnen Kohlendioxid. Diese Gasmenge entspricht vier Prozent des Jahresverbrauches an Spurengas.

Zusätzlich würde eine Absenkung der Leistung der Ventilatoren die Lebensdauer verlängern, und durch den geringeren mittleren Luftstrom würden weiterhin auch weniger Partikel (Regen!) angesaugt. Schließlich könnte diese Modifikation auch eine Verbesserung der Regelgüte bewirken, denn durch die Modulation des Umluftstromes mit der Windgeschwindigkeit

bliebe die Primärkonzentration der Hilfsluft annähernd konstant, was eine weitere Linearisierung der Streckencharakteristik zur Folge hätte.

7.4.4. Regelung mit *Fuzzy Logic*

Die in der vorliegenden Arbeit angewendete klassische Regelungstechnik mit PID-Algorithmus ist, wie auch die unzähligen industriellen Anwendungen der PID-Regelung zeigen, ein erfolgreiches Konzept. Es liegt aber in der Natur des PID-Algorithmus, daß er bei stark nichtlinearen oder bei zeitvarianten Prozessen, d.h. bei denen sich die Streckeneigenschaften während des Betriebes verändern, an seine Grenzen kommt.

Es ist durch Anschauung klar und hat sich im Betrieb der PLUMEX bestätigt, daß die Zeitkonstante der Regelstrecke (das freie Feld) in weiten Grenzen wandern kann, denn der Stofftransport über dem Feld (der "Strecke") ist in erster Linie vom dem sich ständig ändernden Wind abhängig. Die PID-Regelung der PLUMEX ist hier also an einer Grenze und bietet damit Gelegenheit zur Verbesserung.

Als ein möglicher Weg bietet sich die *fuzzy logic* an. Der Begriff *fuzzy* bedeutet im Englischen soviel wie fusselig, wirr, unscharf und meint das Regeln mit unscharfen Mengen. *Fuzzy logic* ist das Antinom zu *crisp logic*, womit zur Unterscheidung das Regeln mit gewöhnlichen, BOOLEschen (scharfen) Mengen gemeint wird. Entwickelt wurde die *fuzzy* Theorie von ZADEH (1965) an der *University of Berkeley*, USA. Sie stellt eine Erweiterung der klassischen Mengenlehre dar. Vorschnell belächelt, geriet die Theorie zunächst wieder in Vergessenheit, um seit den 80er Jahren zunehmend an Bedeutung zu gewinnen (WOLF, 1991). Als Pionier der *fuzzy*-Regelung gilt MAMDANI (1975).

Die Basis der *fuzzy logic* ist die Verwendung von unscharfen Mengen, die durch linguistische Werte wie "groß", "mittel" oder "zu hoch" bezeichnet werden. Die Beurteilung einer konkreten Situation erfolgt nicht, wie in der konventionellen *crisp* Technik, auf der Basis der absoluten Werte der zu betrachtenden Größe, sondern auf der Basis der Zugehörigkeit der Momentanwerte zu einem oder mehreren linguistischen Werten. Dadurch wird es möglich, den Zustand eines Prozesses und die für diesen Zustand gewünschten Eingriffe linguistisch, d.h. in fast umgangssprachlicher Form zu beschreiben:

IF ((Wind = **mittel**).and.(Gradient = **positiv groß**)).or.(Konzentration = **zu tief**)
THEN (Gas=**stark**)

Die Menge aller *fuzzy*-Regeln stellt die Regelbasis dar und bestimmt die Gesamtfunktion der *fuzzy*-Struktur. Die Ausgangsgröße dieses Algorithmus ist ebenfalls unscharf und muß in ein geeignetes Stellsignal umgesetzt werden, weil ein Stellglied eine Zugehörigkeitsfunktion nicht verarbeiten kann. Dieser Schritt heißt *defuzzyfication* (neudeutsch: Defuzzifizierung). Einzelheiten beschreiben z.B. HELLENDORN & THOMAS (1993).

Fuzzy-Regler realisieren statische nichtlineare Übertragungsfunktionen. Sie haben also keine dynamischen Glieder und können deshalb, wie reine P-Regler, z.B. eine bleibende Regelabweichung nicht ausregeln. Die dynamischen Glieder müssen zusätzlich vorgesehen werden. *Fuzzy control* ist in diesem Zusammenhang als sinnvolle Ergänzung zum PID-Regler zu verstehen. Das *fuzzy*-Konzept bietet, wie kaum ein anderes Reglerkonzept, die Möglichkeit, empirisches Prozeßwissen und verbal beschreibbare Steuerungsstrategien in die Prozeßautomatisierung einzubringen. Dieses Potential läßt *fuzzy*-Regler für die PLUMEX prädestiniert erscheinen.

7.4.5. Kennfeldsteuerung

Um die zeitliche Konstanz der Spurengaskonzentration gegenüber dem Erreichten noch weiter zu verbessern, ist der primäre Gedanke immer eine Verbesserung der Regelung. Aber auch ein scheinbar entgegengesetzter Weg, der völlige Verzicht auf einen Regler hätte beträchtliche Chancen auf Erfolg.

Weil der zur Aufreicherung erforderliche Gasbedarf einer Expositionsanlage im Freiland, einfach ausgedrückt, nur von der Menge des an die Anlage herangeführten Windes abhängig ist, könnte eine windabhängig **gesteuerte** Zudosierung von Spurengas den gewünschten Konzentrationspegel einstellen und **ohne Regler** aufrechterhalten. Dem Grundsatz nach ist das einfach, weil der Windmassenstrom als Produkt aus der Geschwindigkeit und dem "Wind-Einfangquerschnitt" (Apertur) einer Anlage betrachtet werden kann (vgl. Kap.7.3). Einzige Vorbedingung dafür wäre es, diese Windmassen genau zu erfassen. In der Praxis ist eine derartige Ermittlung der herangeführten Windmassen aber aus zwei Gründen nur sehr unvollkommen möglich: Erstens ist die Strömung des Windes nur selten laminar und die vielfältigen Wirbel erlauben keine "globale" Geschwindigkeitsmessung, und zweitens ist die Apertur einer Begasungsanlage nicht scharf zu definieren, weil sie vom aktuellen Zustand der Windströmung, laminar oder turbulent, abhängt.

Möglich wäre aber immerhin eine empirische Gewichtung des gemessenen Windweges mit weiteren mikrometeorologischen Parametern, wie dem Strömungszustand, der bodennahen Schichtung der Atmosphäre oder der durch starke Besonnung hervorgerufenen Thermik. Die von geeigneten Sensoren erfaßten Werte würden als Zeiger in eine Matrix (Kennfeld), den für den jeweiligen Betriebszustand erforderlichen Gasstrom ermitteln. Derartige Systeme (Kennfeldsteuerung) sind u.A. in der Kfz-Technik verbreitet. Hier steuern sie beispielsweise den Zündwinkel eines Ottomotors mit einem empirischen, zweidimensionalen Kennfeld, in das die Werte von Drehzahl und Last zeigen.

Eine Kennfeldsteuerung für die vorliegende PLUMEX könnte aber erst dann gelingen, wenn nach sehr vielen Betriebsstunden ein ausreichendes Datenmaterial zum Entwurf des Kennfeldes vorliegt. Eine solche Steuerung wäre aber nicht nur wegen der eventuell verbesserten Konzentrationsstabilität interessant, sondern auch deshalb, weil eine Kennfeld-

steuerung (im Nebeneffekt) das kostspielige und empfindliche Konzentrationsmeßgerät völlig überflüssig machen würde.

8. Zusammenfassung

Die Begasung von Pflanzen und Pflanzengesellschaften mit Spurengasen im Freiland ist ein wichtiges Hilfsmittel der experimentellen Botanik. Dies gilt besonders dann, wenn sich Kammern und Gewächshäuser für die Untersuchung deshalb verbieten, weil die gewonnenen Ergebnisse auf die Umwelt extrapoliert werden sollen. Freilandbegasungssysteme müssen, entgegen den Einflüssen von Wind und Wetter, oft über Jahre eine vorgegebene Gaskonzentration in engen Grenzen aufrechterhalten. Örtliche und zeitliche Schwankungen der Gaskonzentration ("Ausreißer") können das zu beobachtende biologische System irreversibel beeinflussen und damit die Ergebnisse in Frage stellen. Dies alles stellt besondere Anforderungen an Feldbegasungsanlagen.

Obwohl die Anfänge der Begasung im Freiland bis in die 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts zurückreichen, sind bis heute, trotz aufwendiger Forschung in der jüngsten Vergangenheit, nicht alle Probleme zufriedenstellend gelöst worden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Feldbegasungssystem entwickelt, aufgebaut und charakterisiert. Als Name für diese Anlage wurde PLUMEX gewählt. Dieses Akronym nennt das dem System zugrunde liegende Prinzip des Gastransportes (*plume*), der einer Rauchfahne ähnlich ist. Das angehängte "X" steht für *excogitated* (ersinnen, austüfteln) und soll die Neuartigkeit des technologischen Konzeptes ausdrücken.

Die aufgebauten vier baugleichen Exemplare der PLUMEX (vgl. Abb. 104) haben zusammen rund 200 Quadratmeter Nutzfläche. Das eingesetzte Spurengas ist Kohlendioxid. Unter realen Routine-Bedingungen konnte eine signifikante Betriebserfahrung gesammelt werden: In einem Zeitraum von mehr als drei Jahren wurde bestätigt, daß das angestrebte Ziel einer verbesserten Expositionsanlage erreicht worden ist. Der Fortschritt gegenüber bekannten Anlagen zeigt sich konkret in

- einer verbesserten Gasverteilung über Raum und Zeit,
- einem verringerten Gasverbrauch,
- einer erhöhten Zuverlässigkeit, verbunden mit
- einer Adaptierbarkeit an andere Begasungsaufgaben.

8.1. Spurengaskonzentration

Die entwickelte *PlumeX* zeigt eine gleichmäßige Gasverteilung über Raum und Zeit und ihr Arbeitsbereich bezüglich der Windgeschwindigkeiten ist deutlich größer als bei vergleichbaren Anlagen. Dies wurde durch einen besonderen, hochsymmetrischen Aufbau, eine neuartige Gasdosierung und eine leistungsfähige, moderne Meß- und Regelungstechnik erreicht. Im Gegensatz zu den relativ primitiven Luft- und Gasverteilsystemen vergleichbarer Anlagen, hat die PLUMEX ein ringförmiges aktives *plenum* (CAP, *circular active plenum*) aus Stahlblech, daß mit einem internen System aus 26 Kleinstrechnern (Azimutsteuerung) vom Wind ohne Schlupf ausgerichtet wird. Durch den streng symmetrischen Aufbau des CAP und den Algorithmus der Azimutsteuerung sind die regelungstechnischen Eigenschaften des Versuchsfeldes nicht

mehr von der Richtung des Windes abhängig, was zu einer Verbesserung der Regelgüte führt ("isotrope Regelstrecke"). Eine weitere Verbesserung der Konzentrationsregelung ergab sich aus der konsequenten Anwendung moderner Regelungstechnik (PID) und einer besonderen Art der Spurengasdosierung mit einem getasteten Ventil (PWM). Anders als die sonst üblichen motorgetriebenen Stellventile ist die PWM-Methode trägheitslos.

8.2. Gasverbrauch

Wie bei vergleichbaren Anlagen wird auch bei der PLUMEX das Spurengas nicht in seiner konzentrierten Form direkt ausgebracht, sondern zunächst im *plenum* mit Hilfsluft vorverdünnt. Neu bei der PLUMEX ist aber, daß diese Hilfsluft nicht an einer diskreten Stelle, sondern durch das erwähnte aktive *plenum* (CAP) immer leeseitig angesaugt wird. Dies geschieht zwar primär, um die Charakteristik der Regelstrecke von der Windrichtung zu entkoppeln, führt aber im Nebeneffekt zu einer merklichen (meßbaren) Einsparung von Spurengas. Denn mit der im Lee angesaugten Luft, wird immer ein Teil des eingesetzten Spurengases zurückgeführt. Weiterhin begründet sich der ökonomische Spurengasverbrauch der PLUMEX natürlich auch durch die schnelle, schlupffreie Azimutsteuerung im CAP und die Tatsache, daß bei der PLUMEX die Luftauslässe nicht gruppenweise, sondern individuell geschaltet werden.

8.3. Zuverlässigkeit

Um einen störungsfreien Begasungsbetrieb in der freien Natur auch über Jahre zu gewährleisten, ist die PLUMEX besonders vorbereitet. Zum Schutz vor Witterungseinflüssen sind die wesentlichen elektronischen und pneumatischen Komponenten in das aus Stahlblech gefertigte CAP eingebaut. Zusätzlich verhindert eine Schutzbegasung mit Stickstoff die Kondensation von Feuchtigkeit auf empfindlichen Komponenten. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind mehr als 56000 zusammenhängende Betriebsstunden aufgelaufen, ohne daß es zu nennenswerten Störungen gekommen wäre.

8.4. Flexibilität

Das Expositionssystem PLUMEX wird z.Zt. mit dem Spurengas Kohlendioxid in einem Dauergrünland eingesetzt. Die Bruttofläche ist dabei etwa 50 Quadratmeter je System. Dieser Einsatz stellt aber nicht die einzig denkbare Anwendung dar. Durch den modularen Aufbau der PLUMEX aus identischen, über ein Bussystem verbundenen Segmenten, können Expositionssysteme mit 3 bis 30 Meter Durchmesser realisiert werden. Somit sind botanische Nutzflächen von bis zu 600 Quadratmetern je Anlage möglich. Durch den Austausch der Luftauslässe (VVP, *vertical vent pipe*) ist auch eine Anpassung an andere Bestandeshöhen (Baumwolle, Mais) einfach zu realisieren; dabei ist sogar die Begasung von adulten Baumbeständen denkbar. Sollen andere Spurengase als Kohlendioxid eingesetzt werden, dann wird ggf. lediglich ein Austausch der spurengasführenden Leitungen und Ventile durch korrosionsfeste Komponenten erforderlich.

9. Literatur

- Allen, L.H. (1979): Potentials for carbon dioxide enrichment. in: Barfield, B.J. & Gerber, J.F. (Hrsg.): *Modification of the aerial environment of plants*. ASAE monograph no. 2. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 500-519.
- Allen, L.H., Drake, B.G., Rogers, H.H. & Shinn, J.H. (1992): Field techniques for exposure of plants and ecosystems to elevated CO₂ and other trace gases. *Critical Reviews in Plant Sciences* **11**, 85-119.
- Arp, W.J. (1991): Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. *Plant, Cell and Environment* **14**, 869-875.
- Baker, C.K., Unsworth, M.H. & Greenwood, P. (1982): Leaf injury on wheat plants exposed in the field in winter to SO₂. *Nature* **299**, 149-151.
- Bindi, M., Miglietta, F. & Zipoli, G. (1992): Different methods for separating diffuse and direct components of solar radiation and their application in crop growth models. *Climate Research* **2**, 47-54.
- Braune, C. (1884): Verfahren zum Züchten von Samen für große zuckerreiche Rüben. *Kaiserliches Patentamt, Patentschrift Nr. 32194*.
- Butler, G.D. (1985): Populations of several insects on cotton in open-top carbon dioxide enrichment chambers. *The Southwestern Entomologist* **10**, 264-267.
- Butler, G.D., Kimball, B.A. & Mauney, J.R. (1986): Population of Bemisia tabaci on cotton grown in open-top field chambers with enriched CO₂. *Environmental Entomology* **15**, 61-63.
- Chien, K.L., Hrones, J.A. & Reswick, J.B. (1952): On the automatic control of generalized passive systems. *Transactions of the ASME* **74**, 175-185.
- Colls, J.J., Baker, C.K. & Seaton, G. (1987): Computer control of sulphur dioxide fumigation in a study of crop response to pollution. in: Clark, J.A., Gregson, K. & Saffell, R.A. (Hrsg.): *Computer applications in agricultural environments*. London: Butterworths, 143-158.
- Colls, J.J., Geissler, P.A. & Baker, C.K. (1991): Long-term performance of a field-release system for the intermittent exposure of agricultural crops to sulphur dioxide. *Atmospheric Environment* **25**, 2895-2901.
- Colls, J.J., Geissler, P.A. & Baker, C.K. (1992): Use of a field release system to distinguish the effects of dose and concentration of sulphur dioxide on winter barley. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **38**, 3-10.
- Cummings, M.B. & Jones, C.H. (1918): The aerial fertilization of plants with carbon dioxide. Vermont Agricultural Experiment Station, Bulletin 211. Burlington: Free Press Printing Co.
- Dean, T.J. & Johnson, J.D. (1991): Proportional-plus-integral control of experimental ozone concentrations in a large open-top chamber. *Atmospheric Environment* **25A**, 1123-1126.
- de Cormis, L., Bonte, J. & Tisne, A. (1975): Technique expérimentale permettant l'étude de l'incidence sur la végétation d'une pollution par le dioxyde de soufre appliquée en permanence et à dose subnécrotique. *Pollution Atmosphérique* **17**, 103-107.
- de Saussure, T. (1804): *Recherches chimiques sur la végétation*. Paris: V. Nyon.
- DIN (1994): Übertragungsverhalten dynamischer Systeme. *DIN 19229*. Berlin: Beuth.
- DIN (1996): Regelungs- und Steuerungstechnik, Begriffe. *DIN 19226*. Berlin: Beuth.
- DIN (1997): Benennung und Einteilung von Reglern. *DIN 19225*. Berlin: Beuth.
- DIN (1997): Optimierung von Reglern, Begriffe. *DIN 19236*. Berlin: Beuth.

- Downs, R.J. (1980): Phytotrons. *The Botanical Review* **46**, 447-489.
- Drake, B.G., Leadley, P.W., Arp, W.J., Nassiry, D. & Curtis, P.S. (1989): An open top chamber for field studies of elevated atmospheric CO₂ concentrations on saltmarsh vegetation. *Functional Ecology* **3**, 363-371.
- Drumond, A.J. (1956): On the measurement of sky radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie* **B7**, 413-436.
- Fangmeier, A., Stein, W. & Jäger, H.-J. (1992): Advantages of an open-top chamber plant exposure system to assess the impact of atmospheric trace gases on vegetation. *Angewandte Botanik* **66**, 97-105.
- Fangmeier, A., Hadwiger-Fangmeier, A., van der Eerden, L.J.M. & Jäger, H.-J. (1994): Effects of atmospheric ammonia on vegetation – a review. *Environmental Pollution* **86**, 43-82.
- Fangmeier, A. & Jäger, H.-J. (2001): Ammoniak. in: Guderian, R. (Hrsg.): *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Band 2b: Terrestrische Ökosysteme: Wirkungen auf Pflanzen - Diagnose und Überwachung - Wirkungen auf Tiere*. Berlin: Springer, 27-40.
- Federer, C.A. & Tanner, C.B. (1965): A simple integrating pyranometer for measuring daily solar radiation. *Journal of Geophysical Research* **70**, 2301-2306.
- Gates, D.M. (1965): Radiant energy, its receipt and disposal. *Meteorological Monographs* **6**, 1-26.
- Greenwood, P., Greenhalgh, A., Baker, C.K. & Unsworth, M.H. (1982): A computer controlled system for exposing field crops to gaseous air pollutants. *Atmospheric Environment* **16**, 2261-2266.
- Griffin, K.L., Ross, P.D., Sims, D.A., Luo, Y., Seeman, J.R., Fox, C.A. & Ball, J.T. (1996): Eco-CELLS: tools for mesocosm scale measurements of gas exchange. *Plant, Cell and Environment* **19**, 1210-1221.
- Grünhage, L., Dämmgen, U., Hertstein, U. & Jäger, H.-J. (1993): Response of grassland ecosystem to air pollutants: I - Experimental concept and site of the Braunschweig Grassland Investigation Program. *Environmental Pollution* **81**, 163-171.
- Grünhage, L., Hanewald, K., Jäger, H.-J. & Ott, W. (1994): Auswirkungen dynamischer Veränderungen der Luftzusammensetzung und des Klimas auf terrestrische Ökosysteme in Hessen. I. Wirkungen ausgewählter Kohlenwasserstoffe und ihrer Folgeprodukte (insbesondere Ozon) auf Pflanzen. *Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz (Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt)* **179**.
- Grünhage, L., Schmitt, J., Hertstein, U., Janze, S., Peter, M. & Jäger, H.-J. (1996): Beschreibung der Versuchsfläche. in: Grünhage, L., Hanewald, K., Jäger, H.-J. & Ott, W. (Hrsg.): Auswirkungen dynamischer Veränderungen der Luftzusammensetzung und des Klimas auf terrestrische Ökosysteme in Hessen. II. Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden: Jahresbericht 1995. *Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz (Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt)* **220**, 49-71.
- Guderian, R. & Tingey, D.T. (1987): Notwendigkeit und Ableitung von Grenzwerten für Stickstoffoxide. Umweltbundesamt - Berichte 1/87. Berlin: Schmidt.
- Harper, L.A., Baker, D.N., Box, J.E. & Hesketh, J.D. (1973a): Carbon dioxide and the photosynthesis of field crops: A metered carbon dioxide release in cotton under field conditions. *Agronomy Journal* **65**, 7-11.
- Harper, L.A., Box, J.E., Baker, D.N. & Hesketh, J.D. (1973b): Carbon dioxide and the photosynthesis of field crops. A tracer examination of turbulent transfer theory. *Agronomy Journal* **65**, 574-578.
- Heagle, A.S., Body, D.E. & Heck, W.W. (1973): An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants. *Journal of Environmental Quality* **2**, 365-368.

- Heagle, A.S., Philbeck, R.B., Ferrell, R.E. & Heck, W.W. (1989): Design and performance of a large, field exposure chamber to measure effects of air quality on plants. *Journal of Environmental Quality* **18**, 361-368.
- Heck, W.W., Philbeck, R.B. & Dunning, J.A. (1978): A continuous stirred tank reactor (CSTR) system for exposing plants to gaseous air contaminants. Principles, specifications, construction, and operation. ARS-S-181. New Orleans: Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.
- Hellendorn, H. & Thomas, C. (1993): Defuzzification in fuzzy controllers. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* **1**, 109-123.
- Hendrey, G.R. & Kimball, B.A. (1990): *FACE: Free-Air Carbon Dioxide Enrichment: Application to field-grown cotton*. BNL 46155 Informal Report. Springfield: National Technical Information Service.
- Hendrey, G.R. & Kimball, B.A. (1994): The FACE program. *Agricultural and Forest Meteorology* **70**, 3-14.
- Hendrey, G.R., Ellsworth, D.S., Lewin, K.F. & Nagy, J. (1999): A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology* **5**, 293-309.
- Hileman, D.R., Bhattacharya, N.C., Ghosh, P.P., Biswas, P.K., Allen, L.H., Lewin, K.F. & Hendrey, G.R. (1992): Distribution of carbon dioxide within and above a cotton canopy growing in the FACE system. *Critical Reviews in Plant Sciences* **11**, 187-194.
- Holland, M.R., Mueller, P.W., Rutter, A.J. & Shaw, P.J.A. (1995): Growth of coniferous trees exposed to SO₂ and O₃ using an open-air fumigation system. *Plant, Cell and Environment* **18**, 227-236.
- Hungate, B.A., Holland, E.A., Jackson, R.B., Chapin, F.S., Mooney, H.A. & Field, C.B. (1997): The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment. *Nature* **388**, 576-579.
- Ingenhousz, J. (1785): *Verzameling van verhandelingen over verschillende natuurkundige onderwerpen*. 's-Gravenhage: Vert.d.J. van Breda.
- Jäger, H.-J., Hertstein, U.G. & Fangmeier, A. (1999): The European Stress Physiology and Climate Experiment - Project 1: wheat. *European Journal of Agronomy* **10**, 153-264.
- Jäger, H.-J., Guderian, R. & Fangmeier, A. (2001): Schwefeldioxid. in: Guderian, R. (Hrsg.): *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Band 2a: Terrestrische Ökosysteme: Immissionsökologische Grundlagen - Wirkungen auf Boden - Wirkungen auf Pflanzen*. Berlin: Springer, 433-458.
- Jones, P., Jones, J.W., Allen, L.H. & Mishoe, J.W. (1984): Dynamic computer control of closed environmental plant growth chambers. Design and verification. *Transactions of the ASAE* **27**, 879-888.
- Kalman, R.E. (1960): Contributions to the theory of optimal control. *Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana* **5**, 102-119.
- Keeling, C.D., Bacastow, R.B. & Whorf, T.P. (1982): Measurements of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii. in: Clark, W.C. (Hrsg.): *Carbon dioxide review 1982*. Oxford: Clarendon Press.
- Kimball, B.A. (1992): Cost comparisons among free-air CO₂ enrichment, open-top chamber, and sunlit controlled-environment chamber methods of CO₂ exposure. *Critical Reviews in Plant Sciences* **11**, 265-270.
- Kohl, D. (2001): Function and applications of gas sensors. *Journal of Physics D: Applied Physics* **34**, R125-R149.
- Körner, C. & Miglietta, F. (1994): Long term effects of naturally elevated CO₂ on mediterranean grassland and forest trees. *Oecologia* **99**, 343-351.

- Kropff, M.J., Mooi, J., Goudriaan, J., Smeets, W., Leemans, A., Kliffen, C. & van der Zalm, A.J.A. (1989): The effects of long-term open-air fumigation with SO₂ on a field crop of broad bean (*Vicia faba* L.). I. Depression of growth and yield. *New Phytologist* **113**, 337-344.
- Laurence, J.A., MacLean, D.C., Mandl, R.H., Schneider, R.E. & Hansen, K.S. (1982): Field tests of a linear gradient system for exposure of row crops to SO₂ and HF. *Water, Air, and Soil Pollut.* **17**, 399-407.
- Leadley, P.W. & Drake, B.G. (1993): Open top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas exchange. *Vegetatio* **104/105**, 3-15.
- Leadley, P.W., Niklaus, P., Stocker, R. & Körner, Ch. (1997): Screen-aided CO₂ control (SACC): a middle ground between FACE and open-top chambers. *Acta Oecologia* **18**, 207-219.
- Lee, J.J. & Lewis, R.A. (1975): Field experimental component. in: Lewis, R.A. & Lefohn, A.S. (Hrsg.): *The Bioenvironmental impact of a coal-fired plant. First interim report. EPA-600/3-76-002*. Washington: U.S. Environmental Protection Agency. Available from NTIS, Springfield, Virginia, 95-101.
- Lee, J.J. & Lewis, R.A. (1978): Zonal air pollution system: design and performance. in: Preston, E.M. & Lewis, R.A. (Hrsg.): *The bioenvironmental impact of a coal-fired power plant. Third interim report. EPA-600/3-78-021*. Corvallis, Oregon: U.S. Environmental Protection Agency, 332-344.
- Lee, J.J., Preston, E.M. & Lewis, R.A. (1978): A system for the experimental evaluation of the ecological effects of sulphur dioxide. in: *Proceedings of the 4th Joint Conference on Sensing Environmental Pollutants*. Washington, DC: American Chemical Society, 40-53.
- Lewin, K.F., Hendrey, G.R. & Kolber, Z. (1992): Brookhaven National Laboratory free-air carbon dioxide enrichment facility. *Critical Reviews in Plant Sciences* **11**, 135-141.
- Lewin, K.F., Hendrey, G.R., Nagy, J. & LaMorte, R.L. (1994): Design and application of a free-air carbon dioxide enrichment facility. *Agricultural and Forest Meteorology* **70**, 15-29.
- Liu, B.Y.H. & Jordan, R.C. (1960): The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* **4**, 1-19.
- Luenberger, D.G. (1964): Observing the state of a linear system. *IEEE Transaction on Military Electronics* **MIL-8**, 74-80.
- Lundegårdh, H. (1927): Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil Science* **23**, 417-453.
- Mamdani, E.H. & Baaklini, N. (1975): Prescriptive method for deriving control policy in a fuzzy-logic controller. *Electronics Letters* **11**, 625-626.
- Mandl, R.H., Weinstein, L.H., McCune, D.C. & Keveny, M. (1973): A cylindrical, open-top chamber for the exposure of plants to air pollutants in the field. *Journal of Environmental Quality* **2**, 371-376.
- Marshall, J.D. & Ferman, M.A. (1988): An exposure facility for examining the physiological basis of air pollutant effects on plant growth. *Atmospheric Environment* **22**, 2525-2533.
- McLeod, A.R., Fackrell, J.E. & Alexander, K. (1985): Open-air fumigation of field crops: criteria and design for a new experimental system. *Atmospheric Environment* **19**, 1639-1649.
- McLeod, A.R., Shaw, P.J.A. & Holland, M.R. (1992): The Liphook Forest Fumigation Project: studies of sulphur dioxide and ozone effects on coniferous trees. *Forest Ecology and Management* **51**, 121-127.
- McLeod, A.R. (1995): An open-air system for exposure of young forest trees to sulphur dioxide and ozone. *Plant, Cell and Environment* **18**, 215-225.
- McLeod, A.R. & Skeffington, R.A. (1995): The Liphook Forest Fumigation Project: an overview. *Plant, Cell and Environment* **18**, 327-335.

- Miglietta, F. & Raschi, A. (1993): Studying the effect of elevated CO₂ in the open in a naturally enriched environment in Central Italy. *Vegetatio* **104/105**, 391-400.
- Miglietta, F., Raschi, A., Resti, R. & Badiani, M. (1993): Growth and onto-morphogenesis of soybean (*Glycine max* Merrill) in an open, naturally CO₂-enriched environment. *Plant, Cell and Environment* **16**, 909-918.
- Miglietta, F., Giuntoli, A. & Bindi, M. (1996): The effect of free air carbon dioxide enrichment (FACE) and soil nitrogen availability on the photosynthetic capacity of wheat. *Photosynthesis Research* **47**, 281-290.
- Miglietta, F., Lanini, M., Bindi, M. & Magliulo, V. (1997): Free Air CO₂ Enrichment of potato (*Solanum tuberosum*, L.): design and performance of the CO₂-fumigation system. *Global Change Biology* **3**, 417-427.
- Miller, J.E., Sprugel, D.G., Muller, R.N., Smith, H.J. & Xerikos, P.B. (1980): Open-air fumigation system for investigating sulphur dioxide effects on crops. *Phytopathology* **70**, 1124-1128.
- Moser, T.J., Nash, T.H. & Clark, W.D. (1980): Effects of a long-term field sulfur dioxide fumigation of Arctic caribou forage lichens. *Canadian Journal of Botany* **58**, 2235-2240.
- Nagy, J., Lewin, K.F., Hendrey, G.R., Lipfert, F.W. & Daum, M.L. (1992): FACE facility engineering and performance in 1989. *Critical Reviews in Plant Sciences* **11**, 165-185.
- Nehring, G. (1962): Über den Wärmefluß durch Außenwände und Dächer in klimatisierten Räumen infolge der periodischen Tagesgänge der bestimmenden meteorologischen Elemente. *Gesundheits-Ingenieur* **83**, 185-216.
- Norris, T., Wilkinson, D., Lockwood, A., Belay, A., Colls, J.J. & Bailey, B.J. (1996): Performance of a controlled-ventilation open-top chamber for climate change research. *Agricultural and Forest Meteorology* **78**, 239-257.
- Norris, T.S. & Bailey, B.J. (1996): Use of simulation analysis to improve the design of open-top chambers. *Agricultural and Forest Meteorology* **78**, 259-275.
- Nystrom, S.D., Hendrickson, R.C., Pratt, G.C. & Krupa, S.V. (1982): A computerized open-top field chamber system for exposing plants to air pollutants. *Agriculture and Environment* **7**, 213-221.
- Oechel, W.C., Riechers, G., Lawrence, W.T., Prudhomme, T.I., Grulke, N. & Hastings, S.J. (1991): 'CO₂LT' an automated, null-balance system for studying the effects of elevated CO₂ and global climate change on unmanaged systems. *Functional Ecology* **6**, 86-100.
- Okada, M., Lieffering, H., Nakamura, H., Yoshimoto, M., Kim, H.Y. & Kobayashi, K. (2001): Free-air CO₂ enrichment (FACE) using pure CO₂ injection: system description. *New Phytologist* **150**, 251-260.
- Olszyk, D.M., Tibbits, T.W. & Hertzberg, W.M. (1980): Environment in open-top field chambers utilized for air pollution studies. *Journal of Environmental Quality* **9**, 610-615.
- Olszyk, D.M., Bytnerowicz, A., Kats, G., Dawson, P.J., Wolf, J. & Thompson, C.R. (1986a): Effects of sulfur dioxide and ambient ozone on winter wheat and lettuce. *Journal of Environmental Quality* **15**, 363-369.
- Olszyk, D.M., Bytnerowicz, A., Kats, G., Dawson, P.J., Wolf, J. & Thompson, C.R. (1986b): Crop effects from air pollutants in air exclusion systems vs. field chambers. *Journal of Environmental Quality* **15**, 417-422.
- Olszyk, D.M., Kats, G., Dawson, P.J., Bytnerowicz, A., Wolf, J. & Thompson, C.R. (1986c): Characteristics of air exclusion systems vs. chambers for field air pollution studies. *Journal of Environmental Quality* **15**, 326-334.

- Payer, H.D., Blank, L.W., Bosch, C., Gnat, G., Schmolke, W. & Schramel, P. (1985): Waldschadensforschung in den neuen Expositionskammern der GSF: Untersuchungen zum Einfluß von Klima und Luftschadstoffen. *VDI Berichte* **560**, 805-824.
- Payer, H.-D., Blodow, P., Köfferlein, M., Lippert, M., Schmolke, W., Seckmeyer, G., Seidlitz, H., Strube, D. & Thiel, S. (1993): Controlled environment chambers for experimental studies on plant responses to CO₂ and interactions with pollutants. in: Schulze, E.D. & Mooney, H.A. (Hrsg.): *Design and execution of experiments on CO₂ enrichment. Ecosystem Research Report* 6. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 127-145.
- Phene, C.J., Baker, D.N., Lambert, J.R., Parson, J.E. & McKinion, J.M. (1978): SPAR - A Soil-Plant-Atmosphere Research System. *Transactions of the ASAE* **21**, 924-930.
- Reece, C.F., Krupa, S.V., Jäger, H.-J., Roberts, S.W., Hastings, S.J. & Oechel, W.C. (1995): Evaluating the effects of elevated levels of atmospheric trace gases on herbs and shrubs: a prototype dual array field exposure system. *Environmental Pollution* **90**, 25-31.
- Reich, P.B., Amundson, R.G. & Lassoie, J.P. (1982): Reduction in soybean yield after exposure to ozone and sulfur dioxide using a linear gradient exposure technique. *Water, Air, and Soil Pollution* **17**, 29-36.
- Rettstadt, G. (1845): Ueber die Einwirkung des Rauches der Silberhütten auf die Waldbäume und den Forstbetrieb. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **11**, 132-140.
- Roberts, S.W., Oechel, W.C., Bryant, P.J., Hastings, S.J., Major, J. & Nosov, V. (1998): A field fumigation system for elevated carbon dioxide exposure in chaparral shrubs. *Functional Ecology* **12**, 708-719.
- Roberts, T.M., Brown, K.A. & Blank, L.W. (1988): Methodological aspects of the fumigation of forest trees with gaseous pollutants using closed chambers. in: Mathy, P. (Hrsg.): *Air pollution and ecosystems. Proceedings of an International Symposium held in Grenoble, France, 18-22 May 1987*. Dordrecht: Reidel, 338-360.
- Rogers, H.H., Jeffries, H.E., Stahel, E.P., Heck, W.W., Ripperton, L.A. & Whitterspoon, A.M. (1977): Measuring air pollutant uptake by plants: a direct kinetic approach. *Journal of the Air Pollution Control Association* **27**, 1192-1197.
- Runeckles, V.C., Staley, L.M., Bulley, N.R. & Black, T.A. (1978): A downdraft field chamber for studying the effects of air pollutants on plants. *Canadian Journal of Botany* **56**, 768-778.
- Runeckles, V.C., Palmer, K.T. & Trabelsi, H. (1981): Effects of field exposures to SO₂ on Douglas fir, *Agropyron spicatum* and *Lolium perenne*. *Silva Fennica* **15**, 405-415.
- Runeckles, V.C., Wright, E.F. & White, D. (1990): A chamberless field exposure system for determining the effects of gaseous pollutants on crop growth and yield. *Environmental Pollution* **63**, 61-77.
- Schlesinger, W.H. (1991): *Biogeochemistry: an analysis of global change*. San Diego: Academic Press.
- Schottler, W. (1980): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen im Maßstab 1:25000, Blatt 5418 Gießen*. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Bodenforschung.
- Seckmeyer, G. & Payer, H.-D. (1993): A new sunlight simulator for ecological research on plants. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* **21**, 175-181.
- Skye, E. (1968): Lichens and air pollution. *Acta Phytogeographica Suecica* **52**, 1-123.
- Spring, G.M., Priestman, G.H. & Grime, J.P. (1996): A new field technique for elevating carbon dioxide levels in climate change experiments. *Functional Ecology* **10**, 541-545.
- Steubing, L. & Buchwald, K. (1989): Analyse der Artenverschiebung in der Sand-Ginsterheide des Naturschutzgebietes Lüneburger Heide. *Natur und Landschaft* **64**, 100-105.

- Stöckhardt, A. (1850): Ueber einige durch den Bergbau und Hüttenbetrieb für die Landescultur entstehende Benachtheiligungen. *Zeitschrift fuer deutsche Landwirthe* **NF1**, 33-38, 68-74, 129-137.
- Stöckhardt, A. (1871): Untersuchungen über die schädliche Einwirkung des Hütten- und Steinkohlenrauches auf das Wachsthum der Pflanzen, insbesondere der Fichte und Tanne. *Tharandter forstliches Jahrbuch* **21**, 218-254.
- Tingey, D.T. & Taylor, G.E. (1982): Variation in plant response to ozone: A conceptual model of physiological events. in: Unsworth, M.H. & Ormrod, D.P. (Hrsg.): *Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture*. London: Butterworth Scientific, 113-138.
- Tingey, D.T., Waschmann, R.S., Phillips, D.L. & Olszyk, D.M. (2000): The carbon dioxide leakage from chambers measured using sulfur hexafluoride. *Environmental and Experimental Botany* **43**, 101-110.
- Ulrich, B. (1983): Soil acidity and its relation to acid deposition. in: Ulrich, B. & Pankrath, J. (Hrsg.): *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. Dordrecht: Reidel, 127-146.
- Unsworth, M.H. & Mansfield, T.A. (1980): Critical aspects of chamber design for fumigation experiments on grasses. *Environmental Pollution (Series A)* **23**, 115-120.
- van Oijen, M., Schapendonk, A.H.C.M., Jansen, M.J.H., Pot, C.S. & Maciorowski, R. (1999): Do open-top chambers overestimate the effects of rising CO₂ on plants? An analysis using spring wheat. *Global Change Biology* **5**, 411-421.
- Walklate, P.J., Xu, Z.G. & McLeod, A.R. (1996): A new gas injection method to enhance spatial utilization within a Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) system. *Global Change Biology* **2**, 75-78.
- Weigel, H.-J., Mejer, G.-J. & Jäger, H.-J. (1992): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft: Open-top Kammern zur Untersuchung von Langzeitwirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf landwirtschaftliche Pflanzen. *Angewandte Botanik* **66**, 135-142.
- Went, F.W. (1948/49): The Earhart Plant Research Laboratory. *Chronica Botanica* **12**, 90-108.
- Wheeler, R.M. (1992): Gas-exchange measurements using a large, closed plant growth chamber. *HortScience* **27**, 777-780.
- Wilbourn, S., Davison, A.W. & Ollerenshaw, J.H. (1995): The use of an unenclosed field fumigation system to determine the effects of elevated ozone on a grass-clover mixture. *New Phytologist* **129**, 23-32.
- Wolf, T. (1991): Fuzzy, die Revolution aus japanischen High-Tec-Tempeln. *mc* **3**, 44-49.
- Wulff, A., Hänninen, O., Tuomainen, A. & Kärenlampi, L. (1992): A method for open-air exposure of plants to ozone. *Annales Botanici Fennici* **29**, 253-262.
- Zadeh, L.A. (1965): Fuzzy Sets. *Information and Control* **8**, 338-353.
- Ziegler, J.G. & Nichols, N.B. (1942): Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME* **64**, 759-768.

Danksagung

Allen wissenschaftlichen Kollegen, technischen Assistenten und Mitarbeitern des Institutes für Pflanzenökologie, die mich bei meinen Arbeiten unterstützt haben, sei herzlich gedankt.

Besonderen Dank schulde ich Herrn PD Dr. LUDGER GRÜNHAGE. Er hat mit großer Geduld mein Manuskript korrigiert und wertvolle Hinweise für seine Gestaltung gegeben. Dabei hat er mir, trotz seines übervollen Terminkalenders, immer großzügig von seiner Zeit geschenkt und wann immer ich kam, seine Arbeit für meine Fragen und Wünsche unterbrochen.

Herrn Dr. JÜRGEN GNITKE († 1999) danke ich für seine Hilfestellungen bei den administrativen Dingen meines universitären Lebens. Seine unzähligen wertvollen fachlichen und persönlichen Hinweise haben mir viele Mühen erspart. Er hat meine Arbeit von Anfang an engagiert begleitet und es macht mich traurig, daß er den Abschluß nun nicht mehr erleben durfte.

Teile der vorliegenden Arbeit wurden durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) finanziell unterstützt, wofür ebenfalls gedankt sei.

Mein allergrößter Dank gilt aber meinem Doktorvater!

Herr Prof. Dr. Dr. h.c. HANS-JÜRGEN JÄGER hat mit dieser fachgebietsübergreifenden Themenstellung, wie nie zuvor in meinem Leben, alle meine Neigungen und meine Fähigkeiten auf einen Punkt fokussiert. Noch nie zuvor waren bei mir Hobby und Beruf über so viele Jahre so eng vereint.

Ich möchte Herrn JÄGER auch dafür danken, daß er mir, dem fachfremdem Ingenieur, mit der spontanen Übertragung dieser Aufgabe und der freien Hand, die er mir bei der gesamten Ausgestaltung gelassen hat, ein sehr großes Vertrauen ausgedrückt hat. Ein Vertrauen, das mir beständig die Kraft gegeben hat, diese für mich gewaltige Aufgabe durchzuhalten.

Selbstverständlich war er wie kein anderer, der stetige und großzügige Förderer dieser Arbeit. Auch dafür danke ich ihm aufrichtig.

Gießen, im Februar 2003

Siegfried W. Schmidt

Anhang

Abkürzungen und Akronyme

ADC	<i>analog-digital converter</i> - Analog/Digital-Wandler
AG	Automatisierungsgerät
ARS	<i>Agricultural Research Service</i>
B&B	Bedienen und Beobachten
BCD	<i>binary coded decimal</i> Ein veraltetes Verfahren zur Binär-Kodierung von Dezimalzahlen in 4-bit breite Gruppen.
BDE	Betriebsdatenerfassung
BFD	<i>binary flow divider</i> (vgl. ELPNEU) (Ventilkombination zum binären Verstellen eines Gasstromes) (ROBERTS 1998)
BNL	<i>Brookhaven National Laboratory</i> (US-Amerikanische Forschungseinrichtung)
CAP/n	<i>Circular Aktive Plenum</i> (Eigene Wortschöpfung im Rahmen dieser Arbeit)
CHR	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES & RESWICK (1952; vgl. ZN)
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reaktor</i> - Rührkessel (ROGERS <i>et al.</i> 1977, HECK <i>et al.</i> 1978)
CVOTC	<i>Controlled Ventilation OTC</i> (NORRIS 1996)
DAC	<i>digital-(to)-analog converter</i> - Digital/Analog-Wandler
DCF77	Zeitzeichen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
ELM	<i>Enhanced Local Mixing</i> (vgl. TIM) (WALKLATE 1997)
ELPNEU	Elektropneumatischer Wandler (Eigene Wortschöpfung im Rahmen dieser Arbeit)
ESPACE	<i>European Stress Physiology and Climate Experiment Project</i>
FACE	<i>Free Air Carbon dioxide Enrichment</i> – Freiland-CO ₂ -Anreicherungssystem
GOK	Geländeoberkante, Bezugshöhe
GPD	<i>General purpose drive</i> - Frequenzumrichter
HVP	<i>Horizontal vent pipe</i> - Horizontaler Gasauslaß (vgl. VVP)
LED	<i>light emitting diode</i> - Leuchtdiode
MEZ, MESZ	Mitteleuropäische Zeit, Mitteleuropäische Sommerzeit (vgl. MOZ, UTC)
MFC	<i>Mass flow controller</i> - Massendurchflußstellgerät (Stellgerät (Ventil) zur Dosierung von Fluiden (hier: Spurengas)) (COLLS 1991)
MOZ	Mittlere Ortszeit (vgl. MEZ, MESZ, UTC)
MSR	Messen - Steuern - Regeln, Sammelbegriff der Prozeßsteuer- und -leittechnik für die erforderliche Elektronik und Software

MTBF	<i>Mean time between failures</i> – statistische Maßzahl zur Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines technischen Gerätes
Mux	Multiplexer
N.C.	<i>Normally closed</i> - in Ruhelage geschlossen (vgl. N.O.) (Bauart von Luftklappen und Schaltern)
N.O.	<i>Normally opened</i> - in Ruhelage geöffnet (vgl. N.C.) (Bauart von Luftklappen und Schaltern)
NTIS	<i>National Technical Information Service</i>
OTC	<i>Open-top Chamber</i> (Begasungsanlage)
PID	Proportional, integral und differentiell wirkender Regler
PluBus	Bus-System der PlumeX (Eigene Wortschöpfung im Rahmen dieser Arbeit)
PLUMEX	PLUME system, Excogitated (Begasungsanlage) (Eigene Wortschöpfung im Rahmen dieser Arbeit)
PMMA	Polymethacrylmethacrylat - Acrylglas
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
PTFE	(Teflon TM)
RAM	<i>Random access memory</i> - Flüchtiger Datenspeicher
R/C-Glied	Widerstands/Kondensator-Kombination (Tiefpaß) zur Integration (Glättung) von elektrischen Signalen
ROM	<i>Read only memory</i> - Nicht flüchtiger Datenspeicher
SACE	<i>Screen-aided CO₂ enrichment</i> (Kammertyp) (KÖRNER 1995)
SPAR	<i>Soil plant air research</i>
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SR	<i>sunrise</i> , Sonnenaufgang
SS	<i>sunset</i> , Sonnenuntergang
TIM	<i>Turbulent injection mixing</i> (vgl. ELM)
USDA	<i>United States Department (of) Agriculture</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> - Weltnormalzeit (vgl. MOZ, MEZ)
VVP	<i>Vertical vent pipe</i> - senkrechter Luftauslaß (vgl. HVP)
ZAPS	<i>Zonal Air Pollution System</i> (Ein statisches Begasungssystem aus rasterförmig angeordneten Begasungsdüsen.) (LEE <i>et al.</i> 1975)
ZN	Einstellregeln nach ZIEGLER & NICHOLS (1942; vgl. CHR)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Schemazeichnung einer CSTR-Kammer (aus STEUBING & FANGMEIER 1992)	6
Abb. 2	CSTR-Kammeranlage des Institutes für Pflanzenökologie	7
Abb. 3	<i>Down-Draft</i> -Kammer von RONECKLES <i>et al.</i> (1978)	8
Abb. 4	Das mobile CO ₂ LT-Kammersystem von OECHEL <i>et al.</i> (1992)	9
Abb. 5	Schematisierte Darstellung einer OTC (aus ALLAN <i>et al.</i> 1992)	10
Abb. 6	OTC-Anlage im Dauergrünland ohne <i>rain exclusion cap</i>	11
Abb. 7	OTC-Anlage des Institutes für Pflanzenökologie mit <i>rain exclusion cap</i>	11
Abb. 8	SACC-System von LEADLEY <i>et al.</i> (1997)	12
Abb. 9	<i>Open-top</i> -Kammer von DRAKE <i>et al.</i> (1989)	13
Abb. 10	<i>Controlled-Ventilation</i> OTC von NORRIS <i>et al.</i> (1996)	14
Abb. 11	Schematische Darstellung der Begasungsanlage nach LAURENCE <i>et al.</i> (1982)	15
Abb. 12	Rohrnetz von Lundegård (1927)	19
Abb. 13	Rohrnetz von LEE <i>et al.</i> (1975)	20
Abb. 14	Rohrnetz von DeCormis (1975) in Draufsicht mit den Positionen der Bäume	21
Abb. 15	Rohrnetz von DeCormis (1975) in Seitenansicht	21
Abb. 16	Schematische Darstellung des Systems von GREENWOOD <i>et al.</i> (1982)	23
Abb. 17	Schematische Darstellung des ersten Systems von MCLEOD (1985)	25
Abb. 18	Schematische Darstellung des neueren Systems von MCLEOD (1995)	26
Abb. 19	Technologieschema des BNL-FACE	27
Abb. 20	FACE-Anlage in Minnesota (Cedar Creek Natural History Area)	28
Abb. 21	VVP-Muster eines FACE-Ringes (LEWIN <i>et al.</i> 1992)	28
Abb. 22	Begasungsring von KROPFF <i>et al.</i> (1989)	30
Abb. 23	Schematische Darstellung des Hexagon von WULFF <i>et al.</i> (1992)	31
Abb. 24	Zeichnung des AMIBA-Rohrsystems (REECE <i>et al.</i> 1995)	32
Abb. 25	Schematisierte Darstellung eines Mini-FACE-Systems (MIGLIETTA <i>et al.</i> 1996)	33
Abb. 26	Zwei Mini-FACE-Systeme neuerer Bauart	34
Abb. 27	Schematische Darstellung FACE unter Westwind (Fall 1)	36
Abb. 28	Schematische Darstellung FACE unter Ostwind (Fall 2)	37
Abb. 29	Einfluß einer äquidistanten VVP-Anordnung auf das Konzentrationsprofil	39
Abb. 30	Einfluß einer linearisierten VVP-Anordnung auf das Konzentrationsprofil	39
Abb. 31	Freisetzungsregime des BNL-FACE unter Wind und bei Windstille	40
Abb. 32	Regelalgorithmus von COLLS <i>et al.</i> (1991)	43
Abb. 33	Entwicklung des CAP-Konzeptes aus einem herkömmlichen FACE-System	51
Abb. 34	Einzelnes CAP-Segment in vereinfachter perspektivischer Darstellung	52

Abb. 35 Technische Zeichnung eines 6gliedrigen <i>active plenum</i> (CAP/6)	53
Abb. 36 Berechnung der VVP-Abstände	55
Abb. 37 Für eine PlumeX/24 berechnetes VVP-Muster	56
Abb. 38 Als offener Zylinder (Topf) modellierter Begasungsring im Sonnenlicht	61
Abb. 39 Licht- und Schattenfläche in Draufsicht	61
Abb. 40 Vergleich der relativen Ausleuchtung für zwei ausgewählte Systeme	63
Abb. 41 Die <i>Skyline</i> am PlumeX-1, Baumgruppe im Bereich der Abendsonne	64
Abb. 42 Die <i>Skyline</i> am PlumeX-2, Baumgruppe im Bereich der Mittagssonne	64
Abb. 43 Luftbild der Versuchsfläche	65
Abb. 44 Relative Tageslänge im PlumeX-1 (Zeitraum: 1 Jahr)	66
Abb. 45 Relative Lichtdosis im PlumeX-1 (Zeitraum: 1 Jahr)	66
Abb. 46 Relative Tageslänge im PlumeX-1 (Vegetationsperiode)	66
Abb. 47 Relative Lichtdosis im PlumeX-1 (Vegetationsperiode)	66
Abb. 48 Funktionsschema eines einfachen Regelkreises nach DIN 19225	67
Abb. 49 Sprungantworten der drei Grundfunktionen eines PID-Reglers	68
Abb. 50 Die bleibende Regelabweichung eines reinen P-Reglers	69
Abb. 51 Ausgleichszeit, Verzugszeit und Verstärkung einer PT1-Regelstrecke	73
Abb. 52 Tagesgänge der CO ₂ -Konzentration über einem Dauergrünland	76
Abb. 53 Das Stellgerät ELPNEU für die Gasdosierung	80
Abb. 54 Gesamtansicht des Prototyps in der Montagehalle	85
Abb. 55 Detailansicht Pneumatische Klappen	86
Abb. 56 Fotografie einer VVP	88
Abb. 57 Technische Zeichnung der VVP	88
Abb. 58 Horizontales Windprofil im Prototyp	88
Abb. 59 Automatisierungsgerät S5-95U (Fa. Siemens AG)	89
Abb. 60 Vereinfachtes Technologieschema des Prototyps	90
Abb. 61 Das Steuerprogramm im Automatisierungsgerät (Blockbild)	91
Abb. 62 Das Kombigerät "Selektor" (Siemens AG)	92
Abb. 63 Technologieschema der Konzentrationsregelung im Prototyp	93
Abb. 64 Der Algorithmus für die relative Ringkonzentration	94
Abb. 65 Das Stellgerät ELPNEU für die Spurengasdosierung	95
Abb. 66 Vereinfachtes Schnittbild des Prototyps	97
Abb. 67 Beispiel einer Sprungantwort	98
Abb. 68 Kennlinie der Regelstrecke mit Ausgleichsgerade	99
Abb. 69 Meßpunkte mit angepaßtem PT1-Prozeßmodell	100

Abb. 70 Der Regler OB251 (Siemens AG) als Blockschaltbild	101
Abb. 71 Freiland-Expositionssystem PlumeX mit VVP-Prototyp	105
Abb. 72 Freiland-Begasungssystem PlumeX mit Luftauslaß Typ TIM	106
Abb. 73 Anzahl der Blitze über Deutschland	106
Abb. 74 Das <i>circular active plenum</i> im Schnitt	107
Abb. 75 Die Luftklappen (Originale und Umbautypen)	108
Abb. 76 Vergleich von Gasauslässen, Konzentrationsprofile	111
Abb. 77 Die Geber für Windrichtung und –geschwindigkeit	112
Abb. 78 Digitales Filter für die Windrichtung, elektrischer Schaltplan	114
Abb. 79 Azimutsteuerung, elektrischer Schaltplan	116
Abb. 80 Baugruppe der Azimutsteuerung	117
Abb. 81 Busempfänger, elektrischer Schaltplan	120
Abb. 82 Eine "intelligente" Ventilinsel zur Steuerung eines Segmentes	121
Abb. 83 Das Bussystem der Azimutsteuerung	122
Abb. 84 Foto der Gasmeßbaugruppe	123
Abb. 85 Autokalibrator, Elektrischer Schaltplan	124
Abb. 86 Autokalibrator, Pneumatischer Schaltplan	125
Abb. 87 Foto der Autokalibrator-Baugruppe	125
Abb. 88 Foto der Regler-Baugruppe	126
Abb. 89 Der Behälter für das flüssige Kohlendioxid mit der Kältemaschine	128
Abb. 90 Pneumatischer Schaltplan der Gasverteilung	128
Abb. 91 Elektrischer Schaltplan der Funkuhr	130
Abb. 92 Luftbild der Versuchsfläche mit Ansaugpunkten für Aspirator	133
Abb. 93 Schaltzustände des Aspirators	133
Abb. 94 Foto der Stickstoffdosierung für alle vier Ringe	135
Abb. 95 Pneumatischer Schaltplan der Stickstoffdosierung (Schutzbegasung)	135
Abb. 96 Elektrischer Schaltplan der Stickstoffdosierung (Schutzbegasung)	136
Abb. 97 Dialog am Bildschirm zur Fehlerdiagnose durch simulation von KI	137
Abb. 98 Dialog am Bildschirm zur Erweiterung der Fehler-Datenbank	138
Abb. 99 Der Meßplatz zur Überwachung und Meßwerterfassung	130
Abb. 100 Der Meßstellenwechsler zur Erfassung der räumlichen Gasverteilung	139
Abb. 101 Größenvergleich ausgewählter <i>plume</i> -Expositionssysteme	142
Abb. 102 Das Versuchsgelände aus der Vogelperspektive	144
Abb. 103 Lageplan des Versuchsgeländes	144
Abb. 104 Der Windweg im Jahr 1999	147

Abb. 105	Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit (1999)	147
Abb. 106	Der Windweg im Jahr 2000	148
Abb. 107	Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit (2000)	148
Abb. 108	Der Windweg im Jahr 2001	149
Abb. 109	Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit (2001)	149
Abb. 110	Tagesgang der Konzentration (alle Kontrollen, Mai 2002)	151
Abb. 111	Konzentration vs. Richtung (alle Kontrollen, Mai 2002)	151
Abb. 112	Polardiagramm: Konzentration vs. Richtung (K1, Mai 2002)	152
Abb. 113	Polardiagramm: Konzentration vs. Richtung (K2, Mai 2002)	152
Abb. 114	Polardiagramm: Konzentration vs. Richtung (K3, Mai 2002)	153
Abb. 115	Windweg im Mai 2002	153
Abb. 116	Häufigkeit der Meßwerte vs. Konzentration (Kalenderjahr 1999)	155
Abb. 117	Konzentration vs. Windgeschwindigkeit (1999)	155
Abb. 118	Häufigkeit der Meßwerte vs. Konzentration (Kalenderjahr 2000)	156
Abb. 119	Konzentration vs. Windgeschwindigkeit (2000)	156
Abb. 120	Häufigkeit der Meßwerte vs. Konzentration (Kalenderjahr 2001)	157
Abb. 121	Konzentration vs. Windgeschwindigkeit (2001)	157
Abb. 122	Aufreicherung seit Inbetriebnahme als gleitender Mittelwert	158
Abb. 123	Mittlerer Tagesgang der CO ₂ -Konzentrationen im Mai 1999	158
Abb. 124	Horizontale Verteilung	162
Abb. 125	Windweg	162
Abb. 126	Horizontale Verteilung	163
Abb. 127	Windweg	163
Abb. 128	Horizontale Verteilung	164
Abb. 129	Windweg	164
Abb. 130	Horizontale Verteilung	165
Abb. 131	Windweg	165
Abb. 132	Horizontale Verteilung der Konzentration im Kalenderjahr 1999	166
Abb. 133	Windweg im Kalenderjahr 1999	166
Abb. 134	Typische Konzentrationsverteilung einer intakten PlumeX	174
Abb. 135	Bei Undichtigkeiten ist die Konzentration überhöht	174

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Spurengase in der Umgebungsluft	1
Tab. 2	Zahl der Gasauslässe sowie Segmentwinkel	37
Tab. 3	Abtastzeiten verschiedener Regler	44
Tab. 4	Lage des Winkels, Vorzeichen der Komponenten	58
Tab. 5	Einstellregeln nach ZIEGLER & NICHOLS (1942)	72
Tab. 6	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES & RESWICK (1952)	72
Tab. 7	Vergleich rechnergesteuerter Gasdosierungen	82
Tab. 8	Belegung der Datenbit im Zeitlegramm	83
Tab. 9	Optimale Spülzeit und Meßhäufigkeit für Wechsler	103
Tab. 10	Die Schaltzeitpunkte der Funkuhr	131
Tab. 11	Bedeutung der Fehlerbits der Funkuhr	132
Tab. 12	Kerndaten ausgewählter Expositionssysteme	142
Tab. 13	Gaslieferungen und Betriebsstunden	168
Tab. 14	Flächenbezogener Gasverbrauch einiger Systeme	169
Tab. 15	Gasverbrauch, Windweg und Kennzahl	170
Tab. 16	Aufstellung der Reparaturen an den vier PlumeX	172
Tab. 17	Akkumulierte Betriebsstunden der PlumeX	175

Programmquellen

ASPI.ASM

```

        TITLE Siegfried W. Schmidt   (April 1998) Refluft-Ansaugung
;
LIST          t=ON, n=63, c=95
RADIX         dec
PROCESSOR     16C54
__FUSES       B'10101'
              ;Cp=OFF, PuT=ON, WDT=ON, Osc=XT
;
;
;Const
rev EQU      4      ;Program revision (für CHIP-ID, see below)
W EQU       0      ;Destination WORK
F EQU       1      ;Destination FILE
;
;Bit Positionen
CLK EQU      1      ;Clock          im Eingangsport (ex-CO2)
DTA EQU      2      ;Data           im Eingangsport (ex-AZI)
LED EQU      3      ;LED            im Ausgangsport
Gas EQU      6      ;Dosierventil im Datentelegramm
;
;reserved PIC file map
PCL EQU      02H
PortA EQU     05H    ;Port wo die Daten reinkommen
PortB EQU     06H    ;Ventile (3out), LED & Board-ID (4in)
;
;user PIC file map
bitcnt EQU    16     ;Anzahl der Empfangenen Bits
RxBuf EQU     17     ;Empfangenes Datenbyte
tmpfil EQU    18
;
;
;
ORG      08H        ;Program name (max. 8 chars)
DATA 'A','s','p','i','r','a','t','o'
;
;
ORG      10H
Init     ; Hauptprogramm
;
MovLW   B'11110000' ;lo-nibble=Ausgang, hi-nibble=Eingang
tris    PortB
;
Goto    MLoop
;
;
PAGE     ;***** Subroutinen & Tabelle *****
;
P1 EQU   B'00000001'
P2 EQU   B'00000010'
P3 EQU   B'00000100'
dead EQU B'10000000' ;dead_band der Hysterese
orange EQU B'11111111' ;over range (überflüssig!)
;
Tabelle AddWF PCL,F
;
RetLW   P3+dead
RetLW   P3
RetLW   P3
RetLW   P3 ;Luv=3
RetLW   P3 ;Luv=4
RetLW   P3
RetLW   P3
RetLW   P3+dead
;
RetLW   P2+dead
RetLW   P2
RetLW   P2
RetLW   P2 ;Luv=11
RetLW   P2 ;Luv=12
RetLW   P2
RetLW   P2
RetLW   P2+dead
;
RetLW   P1+dead
RetLW   P1
RetLW   P1
RetLW   P1 ;Luv=19
RetLW   P1 ;Luv=20
RetLW   P1

```

```

RetLW    Pl
RetLW    Pl+dead
;
DT        orange,orange,orange
DT        orange,orange,orange
DT        orange,orange,orange
;
PAGE
MLoop    ;***** Hauptschleife beginnt mit Empfang *****
movLW    8
movwF    bitcnt        ;lade den bit-Zähler
ClrF     RxBuf          ;Datenbyte löschen

Rx        ClrWDT
BTFSS    PortA,CLK      ;warte auf CLOCK-Impuls
B         Rx
BSF       PortB,LED
;
RLF       RxBuf,F        ;RxBuf um 1 bit schieben
BCF       RxBuf,0        ;bit platt machen (Dreck vom Carry)
DecF     bitcnt,F        ;bit-Nummer zählen
;
BTFSC    PortA,DTA      ;IF DTA=1 THEN Datenbit setzen
BSF       RxBuf,0
;
Coff      ClrWDT
BTFSC    PortA,CLK      ;warte auf CLOCK-Ende
B         Coff
Bcf       PortB,LED
;
ClrF     tmpfil         ;prüfe ob Synch-Signal
BTFSC    PortA,DTA
IncF     tmpfil,F
BTFSC    RxBuf,0
IncF     tmpfil,F
;
BTFSC    tmpfil,0        ;wenn nur 1 Bit gefunden wurde, ....
B         MLoop          ; ... dann war's ein Synch
;
TstF     bitcnt          ; wenn nicht BITCNT>0, dann ...
BNZ      Rx              ; ... ist noch was zu tun
;
;
Fertig    BTFSS    RxBuf,Gas      ;Ist GAS gesetzt??
B         MLoop          ;Nein, also keine Richtungsinformation
;
MovFW    RxBuf          ;Adress-Bits isolieren
AndLW    1Fh             ;5bit-Maske (3 data bits ausblenden)
Call     Tabelle         ;Tabelle lesen
MovWF    RxBuf
BTFSS    RxBuf,7         ;dead_band ???
MovWF    PortB          ;Nein, also Ausgabe
;
;
goto     MLoop          ;nächstes Byte empfangen
;
;
PAGE
ORG      01FFH           ;reset vector 16C54
goto     Init
;
;
ORG      200H            ; Chip-ID for 16C54
data     0,0,0,rev      ; Program Revision
;
;
; Kurzbeschreibung
; -----
;
; Zur Versorgung mit "frischer" Referenzluft wird an den drei
; exponierten PLUMEX-Ringen ein LUV-ständiges Ansaugventil
; windrichtungsabhängig geschaltet.
;
; Die aktuelle Winrichtung wird aus der Lage des Dosierpunktes im
; lokalen Datenbus ermittelt. (Für Details zur synchronen Daten-
; übertragung siehe das Programm CAPmatic.ASM)
;
; Die 3 Ausgänge der CAPmatic sind um 120° gegeneinander versetzt.
; Das Ansaugventil wird je nach Einbauort entsprechend aufgeklemt.
;
;
; Hardware:

```

```

; CAPmatic III (Prototyp) mit Keramik-Resonator (4 MHz) und 4 Pullups.
;
;
; History of Revisions
; -----
; Rev.1: (Di 28.APR.98) Baubeginn ...
; Rev.3: (So 03.Mai.98) Die Empfangsroutine geändert ....
; Rev.4: (Mi 07.Mai.98) neue Prüfung auf Synch-Impuls:
;       Jeder der beiden Wechselmöglichkeiten der DTA-Leitung
;       innerhalb der CLK-Impulses wird als SYNCH-Signal erkannt.
;       Bei CLK-Anfang wird das Bit nach RXBUF kopiert - am
;       CLK-Ende wird es noch einmal mit dem DTA-Zustand verglichen.
;       Der Vergleich erfolgt durch "Zählung" der Bits.
;
END

```

CAPmatic.ASM

```

TITLE                                (c) 1997,1998 by Dipl.-Ing. Siegfried W. Schmidt
;
RADIX                                dec
PROCESSOR 16C54
;
;Const
rev EQU 0CH ;Program revision (für CHIP-ID, see below)
seg EQU 22 ;individuelle CHIP-Adresse
;Trox EQU B'00000S0B' ;B=blasen, S=saugen (1=n.o., 0=n.c.)
;Trox EQU B'00000101' ;TROX = n.o. (normally opened)
Trox EQU B'00000000' ;Leuchtdioden "R.N.V." & TROX n.c.
;Trox EQU B'00000001' ;PLUMEX-1, CAP8-saugen (n.c.) siehe: J_1227
;
W EQU 0 ;Destination WORK
F EQU 1 ;Destination FILE
;
;Bit Positionen
CLK EQU 1 ;Clock im Eingangport (ex-CO2)
DTA EQU 2 ;Data im Eingangport (ex-AZI)
LED EQU 3 ;LED im Ausgangsport
;
;reserved PIC file map
PortA EQU 05H ;Port wo die Daten reinkommen
PortB EQU 06H ;Port wo die Ventile dranhängen
;
;user PIC file map
bitcnt EQU 10H ;Anzahl der Empfangenen Bits
RxBuf EQU 11H ;Empfangenes Datenbyte
mybyte EQU 12H ;Zum schieben und verknüpfen des Empfangenen Bytes
tmpfil EQU 13H
;
;
;
ORG 08H ;Program name (max. 8 chars)
DATA 'C','A','P','m','a','t','i','c'
;
;
ORG 10H
MAIN ; Hauptprogramm
;
ClrW ;Konfiguration PORTB
tris PortB
;
Clrf PortB ;Ventile alle aus
;
PAGE ;***** Hauptschleife beginnt mit Empfang *****
MLoop MovLW 8
MovwF bitcnt ;lade den bit-Zähler
Clrf RxBuf ;Empfangsbyte löschen
;
Rx ClrWDT
btfss PortA,CLK ;warte auf CLOCK-Impuls
B Rx
BSF PortB,LED
;
RLF RxBuf,F ;RxBuf um 1 bit schieben
BCF RxBuf,0 ;Dreck von Carry wegputzen
decf bitcnt,F ;bit-Nummer zählen
;
btfsc PortA,DTA ;IF DTA=1 THEN Datenbit setzen
bsf RxBuf,0
;
Coff ClrWDT
btfsc PortA,CLK ;warte auf CLOCK-Ende
B Coff
bcf PortB,LED
;
ClrF tmpfil ;prüfe, ob SYNCH-Signal
BTFSC PortA,DTA
IncF tmpfil,F
BTFSC RxBuf,0
IncF tmpfil,F
;
BTFSC tmpfil,0 ;wenn nur 1 Bit gefunden wurde, ...
B MLoop ; ... dann war's ein SYNCH
;
TstF bitcnt
BNZ Rx
;

```

```
;***** Erfolgreicher Empfang
;
MovfW    RxBuf          ;Adresse mit seg# vergleichen ...
andlw    01FH           ;Ventilmuster ausblenden
MovwF    mybyte
MovLW    seg            ;individuelle CHIP-Nummer laden
subwf    mybyte,W
skpz
b         MLoop         ;Ja, paßt! Also hops ....
;                       ;nicht gleich! Also nächstes Byte abwarten
;
RRF      RxBuf,F        ;Ventilmuster isolieren
RRF      RxBuf,F
RRF      RxBuf,F
RRF      RxBuf,F
RRF      RxBuf,W        ;Ergebnis --> Work
;
XOrLW    Trox           ;Ruhelage der TROX-Klappen (Rev.8)
MovWf    PortB          ; ... Ventile setzen
;
goto     MLoop          ;nächstes Byte empfangen
;
PAGE
ORG      01FFH          ;reset vector 16C54
goto     MAIN
;
;
ORG      200H           ; Chip-ID for 16C54
data     0,rev,seg/10,seg%10 ; Program Revision
;
;
; Kurzbeschreibung
; -----
; Universal-Empfänger für die CAPmatic.
;
; Dies Programm empfängt 1 Byte. In dem empfangenen Byte
; befinden sich eine 5bit-Adresse und 3bit Daten.
;
; Die Adresse wird mit der individuellen Segmentnummer
; verglichen. Wenn die Adresse richtig ist, werden die
; 3 Datenbits auf das Ausgabe-Port übertragen.
;
;
; Die Datenübertragung ist synchron.
;
;
; History of Revisions
; -----
; Rev.3: Der Watchdogtimer wird eingebaut. (So 09.Mrz.97)
; Rev.4: Die Chip-ID enthält nicht mehr "Ringgröße"
; Rev.5: Wird nur noch für 16C54 gebrannt (C71-code entfernt)
; Rev.7: reset vector ORG 01FF, goto Main
; Rev.8: Sinnrichtung der TROX-Klappen wird hier festgelegt
;
; Rev.9: (25.JUL.1997) Leichte syntaktische Änderungen im Code
; Rev.A: (22.SPT.1997) Segmentnummer in Subroutine erleichtert
;           das Brennen (kein Edit im Source-file)
;
; Rev.B: (03.MAI.1998) Die LED flimmert bei Empfang
; Rev.C: (08.Mai.1998) Die Empfangsroutine geändert. Beide SYNCH
;           werden abgefragt, bevor der das Bit als gültig übernommen
;           wird.
END
```

CAPtain.ASM

```

TITLE                (c) 1997,1998 by Dipl.-Ing. Siegfried W. Schmidt
;
LIST                 t=ON, n=63, c=95
RADIX                dec
PROCESSOR 16c71

;program constants
rev EQU 16H          ;Program revision number
;
GoDone EQU 2         ;A/D start bit
W EQU 0              ;Destination Work
F EQU 1              ;Destination File
;
CLK EQU 0            ;bit# Clock-line
DTA EQU 1            ;bit# Data-line
YEL EQU 2            ;bit# on-board LED (Sendetakt CLK)
RED EQU 3            ;bit# on-board LED (Fehlerindikator)
PIEP EQU 4           ;bit# Flanken-Merker Windwegimpuls
;
GAS EQU 2            ;bit# (pin 1, PortA)
chl EQU B'11101001'  ;pin 18 (Azimut) RA1 (analog)
;
size EQU 24          ;Ringgröße (Anzahl der Segmente)
;
;register file map (reserved area) (see page 2-536)
OldBuf EQU 00H       ;this is not a physical register!
PCL EQU 02H          ;(bank 0)
STATUS EQU 03H
FSR EQU 04H          ;File Select for indirect addressing
PortA EQU 05H
PortB EQU 06H
ADCON0 EQU 08H
ADRES EQU 09H
PCLATH EQU 0AH
;
ADCON1 EQU ADCON0     ;(bank 1)
;
;
;register file map (user area)
Azimut EQU 12         ;Windrichtung (0..23)
Segment EQU 13        ;Segmentnummer (0..23)
Zeiger EQU 14         ;Zeiger in Mustertabelle (= Azimut+Segment)
;
Bits EQU 15           ;Bit count (Senderoutine)
TxBuf EQU 16          ;Sendebuffer (Senderoutine)
Cnt EQU 17            ;Delay counter (Senderoutine & A/D-Converter)
;
Array EQU 18          ;alter Segmentstatus (24 Zellen)
;
;
PAGE
;
ORG 00               ;reset vector 16C71
Goto Init            ;skip interrupt vector location
;
;
ORG 04H              ;interrupt vector
;no interrupts are anabeled, so if the program ever
;reaches here, it should be returned with the global
;interrupt disabled
Return
;
;
ORG 08H              ;Program name (max 8 chars!!)
DATA 'C','A','P','t','a','i','n',' '
;
;
ORG 10H
Init MovLW B'11011111' ;load OPTION register
OPTION
MovLW B'00001111'
TRIS PortA           ;configure PORTA (all input)
MovLW B'00000000'
TRIS PortB           ;configure PORTB (all output)
;
ClrF PortB
ClrF PCLATH
;
BSF STATUS,5 ;select bank 1

```

```

MovLW    B'00000010'    ;RA1 analog, RA2 digital & internal Vref
MovWF    ADCON1          ;(see page 2-615)
;
bcf       STATUS,5       ;select bank 0
MovLW    ch1             ;select RC,ch0 turn on A/D
MovWF    ADCON0
;
;*****
;alten Segmentstatus initialisieren
;size          ;number of RAM-locations to be cleared
;Segment
clr      ClrWDT
DecF     Segment,F       ;Segment läuft von 23 bis 0
;
MovFW    Segment
AddLW    Array
MovWF    FSR             ;pointer to array-element (OldBuf)
;
ClrF     OldBuf          ;clear "Segmentstatus"
TstF     Segment
BNZ      clr
;
Goto     PLUMEX
;
;
PAGE     ;***** Subroutine: Sende 1 Byte  "TxBuf" *****
;
Wolfi    Call    D_Hi      ;Data=Hi
Call     C_Hi      ;Clock=Hi
Call     D_Lo      ;Data=Lo während Clock=Hi ist "Synch-Impuls"
Call     C_Lo      ;Clock=Lo
;
MovLW    8
MovWF    Bits       ;8 Bits senden
;
xmt      BTFSC    TxBuf,7 ;Bit kopieren: TXBUF.7 --> PORTB.DTA
Call     D_Hi
BTFSS    TxBuf,7
Call     D_Lo
;
Call     C_Hi       ;Clock-Impuls
Call     C_Lo
;
RLF      TxBuf,F     ;zu sendendes Byte schieben
DecFSZ   Bits,F      ;Noch Bit's zu senden ?
B        xmt         ;Ja!
;
Call     D_Lo       ;Verlustleistung im OpAmp herabsetzen
Return
;
;
C_Hi     BSF      PortB,CLK ;Clock=High
BSF      PortB,YEL
Goto     Delay
;
;
C_Lo     BCF      PortB,CLK ;Clock=Low
BCF      PortB,YEL
Goto     Delay
;
;
D_Hi     BSF      PortB,DTA ;Data=High
Goto     Delay
;
;
D_Lo     BCF      PortB,DTA ;Data=Low
Goto     Delay
;
;
Delay    MovLW    255      ;Datenrate wird hier eingestellt
MovWF    Cnt           ;Abgleich: siehe J_1117 (Band 5)
ClrWdt
nop      ;wichtige Bremsklötze!
nop      ;2
nop      ;3
DecFSZ   Cnt,F
B        dl
RETURN
;
;
PAGE     ;***** Main Program: Positioniere PLUMEX *****
;
PLUMEX   BTFSS    PortA,GAS ;Windweg-Impuls?
Call     GasLo         ;Ja, aussenden!

```

```

BTFSC    PortA,GAS
BCF      PortB,PIEP      ; OFF (LED ist Flankenmerker!)
;
MovLW    ch1
MovWF    ADCON0          ;select channel
;
MovLW    size            ;Ring size
MovWF    Segment        ;Segmentzeiger auf Ringgröße setzen
DecF     Segment,F      ;alle Segmente durchlaufen
MovFW    Segment
AddLW    Array
MovWF    FSR            ;Pointer to array-element (OldBuf)
;
ClrWDT
Call     Wind            ;Windrichtung (0..23) --> Azimut
;
MovFW    Segment
MovWF    TxBuf          ;Adresse im Sendepuffer ablegen
AddWF    Azimut,W      ;work=Segment+Azimut
MovWF    Zeiger         ;Zeiger in Mustertabelle
MovLW    size
SubWF    Zeiger,W      ;(W=Zeiger-W) "Quasimodulo"
SkpC     ;IF zero.or.positive THEN skip
MovFW    Zeiger         ;ELSE restore value (W=Zeiger)
MovWF    Zeiger
;
MovLW    HIGH Muster
MovWF    PCLATH
MovFW    Zeiger
Call     Muster         ;read table (Ventilmuster ist in WORK)
ClrF     PCLATH
;
IorWF    TxBuf,F        ;Ventilmuster einblenden, fertig!
;
;TxBuf ist fertig, aber wirklich neu???
;
MovFW    TxBuf          ;aktuelles Byte mit ...
XorWF    OldBuf,W      ;... altem Byte vergleichen.
BZ       NoTx          ;no change, so next please
;
MovFW    TxBuf          ;save new value ...
MovWF    OldBuf        ;... for next compare
Call     Wolfi          ;transmit
;
NoTx     TstF           Segment      ;Sind alle Segmente gesendet?
BNZ      NxtSeg         ;Nein!
Goto     PLUMEX         ;Ja!
;
;
PAGE      ;***** Subroutines *****
;
Wind
poll      BSF          ADCON0,GoDone  ;start A/D-conversion
          BTFSC        ADCON0,GoDone  ;result ready?
          B             poll          ;no, try again
;
;***** over range (>239) abprüfen
MovLW    240
SubWF    ADRES,W        ;W = ADRES-240
SkpNC    ;IF (W<0) THEN SKIP
B        orange         ;over_range!
BCF      PortB,RED      ;Fehler-Indikator OFF
;
;***** Quotient berechnen (Nenner=10)
divi      ClrF          Cnt          ;Ergebnis
          ClrWDT
          IncF          Cnt,F
          MovLW         10          ;Nenner
          SubWF         ADRES,F      ;Zähler = Zähler - Nenner
          BC            divi         ;C=0, wenn negativ
          DecF          Cnt,F        ;Ergebnis (0..23) fertig
          ;
          MovFW         Cnt
          MovWF         Azimut
          ;
          Return
          ;
orange    BSF          PortB,RED      ;Fehler-Indikator ON
          Return
          ;
GasLo     MovLW         B'01011111'   ;Segment 31 (mit Gas-Bit)
          MovWF         TxBuf

```

```

BTFSS      PortB,PIEP      ;bereits gesendet??
Call       Wolfi           ;Nein.
BSF        PortB,PIEP      ;LED ist Flankenmerker!
Return
;
;
PAGE       ;***** Table & misc. *****
ruhe      EQU      B'000'<<5
blas      EQU      B'001'<<5
dosier     EQU      B'010'<<5
saug       EQU      B'100'<<5
Muster    AddWF      PCL,F      ;computed Goto
          INCLUDE    "VVP24_7.ASM"
;
;
PAGE
org        2000H           ;ID location (page 2-642)
data       size,rev ;ring size, prog rev,
data       mus,0           ;Muster & Kalibration
;
;
;Beschreibung
;=====
;
;History
;=====
;
;Rev.8: (07.JUN.1997)
;Dosierventiel an GAS-Eingang koppeln (YEL bleibt)
;Senderate (Stopuhr): 44 Umläufe pro Minute (141 Baud)
;
;Rev.9 (08.JUN.1997)
;Senderate erhöht (Subroutine Delay). (1NOP, 53 Upm)
;
;Rev.10 (08.JUN.1997)
;Es werden nur noch geänderte Segmente gesendet. Alte Zustände
;werden durch "indirect adressing" in einem Array gespeichert.
;
;
;
;Rev.0F (12.DEZ.1997)
;Abschaltung der Azimutverwaltung bei Windstille!! (gelbe LED)
;
;Rev.10 (16.MRZ.1998)
;Datei in CAPmaste(r) umgetauft. Mittelung entfernt und
;Hysterese eingebaut.
;
;Rev.11 (06.APR.1998)
;Struktur umgestellt. Keine Bewegung während eines Gasimpulses.
;
;Rev.12 (27.APR.1998)
;Zurückgetauft in CAPtain. Doppelmessung am ADC
;
;Rev.13 (01.MAI.1998)
;Hysterese ausgebaut
;RAM-reset (damit bei STARTUP alle Segmente angesprochen werden)
;
;Rev.14 (04.MAI.98) Calib-Tabelle durch Division ersetzt
;"Abschaltung bei Windstille" wurde ausgebaut. Bewegungen sind durch
;die Mittelung (VICTOR.ASM) sehr beruhigt. Das plötzliche Positionieren
;bei Wiederanlauf erzeugt eine unerwünschte CO2-Spitze.
;
;
;Rev.15 (31.JUL.98) ZENTRALES PWM-Dosierventil mit Integrations-Topf.
;
;Der Begasungspunkt wechselt (wie bislang) entsprechend der
;Windrichtung seine Position im Ring.
;Das entsprechende Ventil bleibt aber dann solange geöffnet, bis der
;Begasungspunkt an eine andere Stelle wandert und ein anderes
;Ventil geöffnet wird.
;
;Rev.16 (06.NOV.98) Die Leuchtdioden werden vertauscht:
;Die gelbe YEL zeigt jetzt den CLK. Die rote RED zeigt Over Range Error
;Das Bit PIEP (PortB) ist der Flankenmerker vom Windweg-Takt-Impuls
;
;
END
;end-of-file

```

DCF.ASM

```

TITLE                (c) 1997,1998 by Dipl.-Ing. Siegfried W. Schmidt
;
RADIX                dec
PROCESSOR 16C84
Rev EQU 0FH          ;Program Revision (für CHIP-ID, see below)
;
;Bit Positionen (Port A)
RED EQU 0            ;Leuchtdiode
YEL EQU 1            ;Leuchtdiode
Relais EQU 2         ;Schaltausgang
DCF EQU 3            ;Eingang vom DCF-Empfänger
Config EQU B'1000'   ;1 Input, 3 Output
;
;Constants
W EQU 0              ;Destination WORK
F EQU 1              ;Destination FILE
;
;reserved PIC file map
INDF EQU 00H         ;not a physical register
PCL EQU 02H          ;Program Counter (Low Byte)
FSR EQU 04H          ;file select
PortA EQU 05H        ;Ein-/Ausgang (DCF, Schaltkontakt & LED)
PortB EQU 06H        ;Ausgang (Anzeige)
PCLATH EQU 0AH
;
;user PIC file map
;Die oberen 3 Bit müssen frei sein bei den nachfolgenden files
Mon EQU 0CH          ;BCD-Notation
Tag EQU 0DH
Std EQU 0EH
Min EQU 0FH
Aux EQU 10H          ;supplementary bits
;
Cnt EQU 11H          ;empirische Zeitschleife
Puls EQU 12H         ;Impulslänge (Bitlänge)
Pause EQU 13H        ;Pausenlänge (zwischen 2 Bits)
Presc EQU 14H        ;Prescaler für Pause
LfdNr EQU 15H        ;Bit-Nummer im DCF-Telegramm
BitPos EQU 16H       ;Bit-Position
DCFBit EQU 17H       ;Bitnummer & Bit-Wert
Uhr EQU 18H          ;aktuelle Uhrzeit (8-bit-codiert)
;
Mybyte EQU 19H       ;Parity-Prüfling
Bitanz EQU 20H       ;Anzahl der Bits
;
Sunrise EQU 21H
Sunset EQU 22H
;
Mist EQU 23H         ;Error-Flag (ab Rev.8)

ORG 00               ;reset vector 16C84
Goto Init            ;skip interrupt vector location
;
;
ORG 04H              ;interrupt vector
Return
;
;
ORG 08H              ;Program name (max. 8 chars)
DATA 'D','C','F','7','7',' ',' ',' '
;
;
ORG 10H

PAGE                ;***** Subroutines *****
;
Auswert ; Zuerst eine Plausibilitätsprüfung
MovLW 60             ;Mindestlänge abprüfen
SubWF Puls,W         ;W = Puls - 60
SkpC ;IF pos.or.zero THEN skip
BSF Mist,0           ;Bit im Error-Flag setzen
;
MovLW 59             ;Anzahl der Telegrambits prüfen
SubWF LfdNr,W        ;W = LfdNr - 59
SkpNC ;IF neg THEN skip
BSF Mist,7
;

```

```

; jetzt die Auswertung
MovFW    LfdNr
MovWF    DCFBit
MovLW    144          ;Mittelwert aus 194 (Hi) und 96 (Lo)
SubWF    Puls,W       ;W = Puls - 144
SkpNC    ;IF negative THEN skip
BSF      DCFBit,7
IncF     LfdNr,F       ;Bit-Nummer hochzählen
; -----
; Das DCF-Bit ist fertig - nun an der richtigen Stelle ablegen
; -----
MovLW    HIGH Dest
MovWF    PCLATH
MovFW    DCFBit        ;laufende Bit-Nummer holen
AndLW    B'00111111'
Call     Dest          ;Lagerplatz aus Tabelle lesen
ClrF     PCLATH
MovWF    BitPos
AndLW    B'00011111'    ;Bit-Position platt machen
MovWF    FSR           ;zeige auf Destination-Byte
RRF      BitPos,F
RRF      BitPos,F
RRF      BitPos,F
RRF      BitPos,F
RRF      BitPos,W
AndLW    B'00000111'
AddWF    PCL,F         ;computed GOTO
B        B0
B        B1
B        B2
B        B3
B        B4
B        B5
B        B6
B        B7
PAGE
;
B0      BCF      INDF,0
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,0
      Return
;
;
B1      BCF      INDF,1
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,1
      Return
;
;
B2      BCF      INDF,2
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,2
      Return
;
;
B3      BCF      INDF,3
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,3
      Return
;
;
B4      BCF      INDF,4
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,4
      Return
;
;
B5      BCF      INDF,5
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,5
      Return
;
;
B6      BCF      INDF,6
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,6
      Return
;
;
B7      BCF      INDF,7
      BTFSC     DCFBit,7
      BSF      INDF,7
      Return

```

```

PAGE
;
Delay    ClrF      Cnt
dl        ClrWDT
          DecFSZ   Cnt,F
          B        dl
          Return
;
Parity    MovWF     Mybyte           ;Prüfling kommt in W-register
          ClrF      Bitanz           ;Anzahl der gefundenen Bits
          MovLW     8
          MovWF     BitPos           ;lfd. Bitnummer der Prüfung
ploop     BTFSC     Mybyte,0
          IncF      Bitanz,F
          RRF       Mybyte,F
          DecFSZ   BitPos,F
          B        ploop
          Return
;
;
BcdBin    MovWF     Mybyte
          AndLW     0FH              ;Einer-Stelle im "Work" halten
          BTFSC     Mybyte,4
          AddLW     10
          BTFSC     Mybyte,5
          AddLW     20
          BTFSC     Mybyte,6
          AddLW     40              ;Ergebnis im "Work" zurückgeben
          ;
          Return
;
;
Plausi    MovWF     Mybyte           ;Plausibilitätsprüfung
          MovLW     HIGH Range
          MovWF     PCLATH
          MovFW     Mybyte
          AndLW     B'01111111'     ;Parity platt machen (falls vorhanden)
          Call      Range
          ClrF      PCLATH
          MovWF     Mybyte
          Return
;
;
WtBit     ClrWDT           ;Warte auf nächstes Bit
          BTFSC     PortA,DCF
          B        WtBit
          Return

Init      PAGE          ;***** Hauptprogramm *****
          ClrW          ;Konfiguration
          tris         PortB      ;all Ouput
          MovLW        Config
          tris         PortA
          ;
          ClrF         PCLATH
          BCF          PortA,Relais ;Plumex=OFF
          ;
Fehler    BSF          PortA,RED    ;Fehler-Indikator=ON (!! )

NoErr     ClrF         Mon          ;Telegramm-Beginn
          ClrF         Tag
          ClrF         Std
          ClrF         Min
          ClrF         Aux
          ClrF         LfdNr        ;laufende Bit-Nummer im Telegramm
          ClrF         Mist         ;Error-Flag
          Call         WtBit        ;wait for next Bit
          ;
          ;
Tic       BSF          PortA,YEL    ;Impuls-LED = ON
          IncF         Puls,F       ;Impulslänge messen
          ;
          ClrF         Pause       ;fehlende Sekundenmarke
          ClrF         Presc
          ;
Loop      Call         Delay
          ;
          BTFSS        PortA,DCF    ;DCF-Impuls??
          B        Tic             ;Ja! Länge messen
          BCF          PortA,YEL    ;Impuls-LED = OFF
          ;
          ; -----
          ; Impulslängen sind:      Hi=194 & Lo=96 (ausprobiert)

```

```
;
TstF      Puls          ;Auswertung erfolgt (oder Bit zu kurz)?
SkpZ      ;Ja, überspringe die Auswertung!
Call      Auswert
ClrF      Puls          ;nur einmal ausführen pro Bit
;
;
DecFSZ    Presc,F        ;Fehlende Sekunde finden
B         Loop
IncF      Pause,F
;
; -----
; Wenn <Pause> größer als 1 Sekunde, dann <LfdNr> hier zurücksetzen
; Pause=3 & Pause=7 (ausprobiert)
;
MovLW     5              ;Mittelwert aus 3 und 7
SubWF     Pause,W        ;W = Pause-5
BNC       Loop          ;IF positive THEN <Loop>

PAGE      ; Telegramm-Ende, Plausibilitätskontrollen
; -----
MovFW     Min            ;Prüfe Minuten-Byte-Parity
Call      Parity
BTFSC     Bitanz,0
BSF       Mist,1
;
MovFW     Std            ;Prüfe Stunden-Byte-Parity
Call      Parity
BTFSC     Bitanz,0
BSF       Mist,1
;
;
BTFSC     Aux,3          ;#00 Minutenbegin (Lo)
BSF       Mist,2
BTFSS     Aux,5          ;#20 Telegrammbegin (Hi)
BSF       Mist,2
;
;
MovFW     Mon
Call      BcdBin
MovWF     Mon
Call      Plausi         ;Prüfe Wertebereich 1..12
BTFSS     Mybyte,3
BSF       Mist,3         ;Fehler!
;
MovFW     Std
Call      BcdBin
MovWF     Std
Call      Plausi         ;Prüfe Wertebereich 0..23
BTFSS     Mybyte,2
BSF       Mist,4         ;Fehler!
;
MovFW     Tag
Call      BcdBin
MovWF     Tag
Call      Plausi         ;Prüfe Wertebereich 1..31
BTFSS     Mybyte,1
BSF       Mist,5         ;Fehler!
;
MovFW     Min
Call      BcdBin
MovWF     Min
Call      Plausi         ;Prüfe Wertebereich 0..59
BTFSS     Mybyte,0
BSF       Mist,6         ;Fehler!
;
TstF      Mist
BNZ       Fehler         ;Springe zur Fehlerbehandlung
BCF       PortA,RED       ;Fehler-Indikator (OFF=kein Fehler)

PAGE      ;***** Tabellen lesen und schalten
;
MovLW     HIGH Morgen
MovWF     PCLATH
MovFW     Mon
Call      Morgen         ;Tabelle lesen
MovWF     Sunrise        ;Sonnenaufgang
;
MovLW     HIGH Abend
MovWF     PCLATH
MovFW     Mon
Call      Abend          ;Tabelle lesen
MovWF     Sunset         ;Sonnenuntergang
```

```

;
ClrF      PCLATH
;
; Zeitliche Verschiebung der Schaltzeiten gegenüber den
; Auf- und Untergangszeiten der Sonne
shift     EQU      (2<<3)      ;Zeitliche Verschiebung (Std)
MovLW     shift
AddWF     Sunrise,F
SubWF     Sunset,F
;
;
; -----
; Schaltzeitpunkte sind abgelegt, Tageszeit "UHR" berechnen
; -----
;
;
; Umrechnung der Minuten in 1/8-Stunden
Rlf       Min,F      ;Umrechnung der Minuten in 1/8-Stunden
Bcf       Min,0      ;Min := 2 * Min
;
; Division durch 15
ClrF      Uhr        ;Division durch 15
d15       ClrWDT
IncF      Uhr,F
MovLW     15          ;Nenner
SubWF     Min,F      ;Zähler := Zähler - 15
BC        d15        ;C=0, wenn negativ
DecF      Uhr,F      ;Uhr := (2 * Min) DIV 15
;
;
; Sommerzeit??
BTFSC     Aux,7      ;Sommerzeit??
DecF      Std,F      ;Ja, Stunde korrigieren
;
; Std := 8 * Std
Rlf       Std,F
Rlf       Std,F
Rlf       Std,W
AndLW     B'11111000' ;Carry platt machen
;
;
; Uhr := 8*Std + Min/7.5
AddWF     Uhr,F      ;Uhr := 8*Std + Min/7.5

PAGE
; -----
; UHR mit SUNRISE & SUNSET vergleichen
; -----
;
; Sunrise (Einschaltzeitpunkt)
MovFW     Sunrise
SubWF     Uhr,W
SkpC
B         aus
;
; Sunset (Abschaltzeitpunkt)
MovFW     Sunset
SubWF     Uhr,W
SkpNC
B         aus
;
; PLUMEX=ON
BSF       PortA,Relais
Goto      NoErr
;
;
; PLUMEX=OFF
aus       BCF       PortA,Relais
Goto      NoErr

PAGE      ;***** Tabelle der Byteadressen *****
ORG       100H
;
; Mit dieser Tabelle werden die Bits des DCF-Telegramms umsortiert.
; Jedes DCF-Bit bekommt eine RAM-Zelle (file) zugewiesen.
; Die Position innerhalb der Zelle wird in die 3 freien MSB geschrieben
;
Dest      AddWF     PCL,F      ;computed Goto
;
RetLW     Aux+(3<<5)      ;00 (Lo)
;
DT        Aux,Aux,Aux
DT        Aux,Aux,Aux
DT        Aux,Aux,Aux
DT        Aux,Aux,Aux
DT        Aux,Aux
;
RetLW     Aux+(6<<5)      ;15 Reserveantenne
RetLW     Aux             ;16
RetLW     Aux+(7<<5)      ;17 Sommerzeit
RetLW     Aux+(4<<5)      ;18 (Lo)
RetLW     Aux             ;19

```

```

;
RetLW    Aux+(5<<5)      ;20 (Hi)
;
DT        Min+(0<<5),Min+(1<<5),Min+(2<<5),Min+(3<<5)
DT        Min+(4<<5),Min+(5<<5),Min+(6<<5)
RetLW     Min+(7<<5)      ;Parity
;
DT        Std+(0<<5),Std+(1<<5),Std+(2<<5)
DT        Std+(3<<5),Std+(4<<5),Std+(5<<5)
RetLW     Std+(7<<5)      ;Parity
;
DT        Tag+(0<<5),Tag+(1<<5),Tag+(2<<5)
DT        Tag+(3<<5),Tag+(4<<5),Tag+(5<<5)
;
DT        Aux,Aux,Aux     ;Wochentag [42,43,44]
;
DT        Mon+(0<<5),Mon+(1<<5),Mon+(2<<5)
DT        Mon+(3<<5),Mon+(4<<5)
;
DT        Aux,Aux,Aux
DT        Aux,Aux,Aux
DT        Aux,Aux,Aux
DT        Aux,Aux,Aux     ; (Angst)

PAGE      ;***** Astronomische Tabellen *****
INCLUDE   dcf_t3.asm
PAGE      ;***** Plausibilitätskontrolle *****
ORG       200H
Range     AddWF          PCL,F
RetLW     B'0101'        ; 0
RetLW     B'1111'        ; 1
RetLW     B'1111'        ; 2
RetLW     B'1111'        ; 3
RetLW     B'1111'        ; 4
RetLW     B'1111'        ; 5
RetLW     B'1111'        ; 6
RetLW     B'1111'        ; 7
RetLW     B'1111'        ; 8
RetLW     B'1111'        ; 9
RetLW     B'1111'        ;10
RetLW     B'1111'        ;11
RetLW     B'1111'        ;12 Monat: 1..12

RetLW     B'0111'        ;13
RetLW     B'0111'        ;14
RetLW     B'0111'        ;15
RetLW     B'0111'        ;16
RetLW     B'0111'        ;17
RetLW     B'0111'        ;18
RetLW     B'0111'        ;19
RetLW     B'0111'        ;20
RetLW     B'0111'        ;21
RetLW     B'0111'        ;22
RetLW     B'0111'        ;23 Stunde: 0..23

RetLW     B'0011'        ;24
RetLW     B'0011'        ;25
RetLW     B'0011'        ;26
RetLW     B'0011'        ;27
RetLW     B'0011'        ;28
RetLW     B'0011'        ;29
RetLW     B'0011'        ;30
RetLW     B'0011'        ;31 Tag: 1..31
;
PAGE
;
RetLW     B'0001'        ;32
RetLW     B'0001'        ;33
RetLW     B'0001'        ;34
RetLW     B'0001'        ;35
RetLW     B'0001'        ;36
RetLW     B'0001'        ;37
RetLW     B'0001'        ;38
RetLW     B'0001'        ;39
RetLW     B'0001'        ;40
RetLW     B'0001'        ;41
RetLW     B'0001'        ;42
RetLW     B'0001'        ;43
RetLW     B'0001'        ;44
RetLW     B'0001'        ;45
RetLW     B'0001'        ;46
RetLW     B'0001'        ;47
RetLW     B'0001'        ;48

```

```

RETLW    B'0001'      ;49
RETLW    B'0001'      ;50
RETLW    B'0001'      ;51
RETLW    B'0001'      ;52
RETLW    B'0001'      ;53
RETLW    B'0001'      ;54
RETLW    B'0001'      ;55
RETLW    B'0001'      ;56
RETLW    B'0001'      ;57
RETLW    B'0001'      ;58
RETLW    B'0001'      ;59 Minute: 0..59

DT        0,0,0
DT        0,0,0,0,0,0,0,0,0
DT        0,0,0,0,0,0,0,0,0
DT        0,0,0,0,0,0,0,0,0
DT        0,0,0,0,0,0,0,0,0

PAGE      ;***** Misc *****
;
;
;
ORG        2000H      ; ID location
data      0,Rev,Tab,shift
;
;
;
;Kurzbeschreibung
;-----
;DCF-77
;
;Nachtabuschaltung für PLUMEX (Sonnenuntergang bis -aufgang)
;
;Die Sonnenparameter werden wochenweise aus zwei Tabellen gelesen.
;
;Außerhalb der Vegetationsperiode wird auf Winterbetrieb umgeschaltet.
;
;History of Revisions
;-----
;Rev.1:    (Sa 13.JUN 98)  Baubeginn ...
;Rev.2:    (So 14.JUN 98)  Umstellung auf 16C84
;Rev.3:    (Sa 20.JUN 98)  Neue Hardware von R.N.V.
;Rev.4:    (Sa 04.JUL 98)  Parity-Bits abgeprüft
;Rev.5:    (So 05.JUL 98)  SUNRISE/SUNSET (Auflösung: 1 Stunde)
;Rev.7:    (Fr 24.JUL 98)  Zusätzliche Bit-Längen-Prüfung
;Rev.8:    (Mo 28.JUL 98)  Verbesserte Plausibilitätsprüfung "Mist"
;Rev.9:    (Di 29.SPT.98)  Sommerzeit-Bit abfragen (Zeit nur in MEZ)
;Rev.A:    BCD-Codierung aus PLAUSI entfernt
;Rev.C:    (Fr 02.SPT.98)  Uhrzeit, Auflösung 1/8 Stunde
;Rev.D:    (So 04.OKT.98)  Verschiebung der Schaltzeitpunkte (SHIFT)
;Rev.E:    (Mo 05.OKT.98)  Plausibilität: Prüfe fixe Bits in AUX
;Rev.F:    (So 24.OKT.98)  Plausibilität: #18 ist nicht "fix"
;
; Bit      Bedeutung
; -----
; 0        Bitzeit zu kurz
; 1        Parity   Min & Std
; 2        Fixe Bits
; 3        Range    Mon
; 4        -"-      Std
; 5        -"-      Tag
; 6        -"-      Min
; 7        Telegramm zu lang
;
END

```

N2DOSI.ASM

```

        TITLE Siegfried W. Schmidt (Okt.1997)
        ;
        LIST          t=ON, n=63, c=95
        RADIX          dec
        PROCESSOR      16C54
        _FUSES         B'11101'
                      ; Cp=OFF, PuT=ON, WDT=ON, Osc=XT
        ;
        ;
        ;Parameter
Rev      EQU          3          ;Program Revision (für CHIP-ID, see below)
        ;
        ;Constants
W        EQU          0          ;Destination WORK
F        EQU          1          ;Destination FILE
        ;
        ;Bit Positionen (Port A & B)
StdBy    EQU          1          ;Standby (sytem halted)
Turbo    EQU          2          ;Test mode
LED       EQU          5          ;On-Board-LED (PortB)
V0       EQU          4          ;Tank Valve
V1       EQU          3
V2       EQU          2
V3       EQU          1
V4       EQU          0
        ;
        ;reserved PIC file map
PCL       EQU          02H        ;Program Counter (Low Byte)
PortA     EQU          05H        ;Eingang (Schalter)
PortB     EQU          06H        ;Ausgang (Magnetventile)
        ;
        ;user PIC file map
cnt       EQU          10H        ;general purpose counter
tic       EQU          11H        ;timer
tac       EQU          12H        ;timer
toe       EQU          13H        ;timer
        ;
        ;
        ORG           08H        ;Program name (max. 8 chars)
        DATA 'N','2','D','o','s','i','e','r'
        ;
        ;
        ORG           10H
        PAGE          ; ***** Subroutinen *****
        ;
Tank      BSF          PortB,V0
          Call         Pulse
          BCF          PortB,V0
          Return
        ;
        ;
P1        BSF          PortB,V1
          Call         Pulse
          BCF          PortB,V1
          Return
        ;
        ;
P2        BSF          PortB,V2
          Call         Pulse
          BCF          PortB,V2
          Return
        ;
        ;
P3        BSF          PortB,V3
          Call         Pulse
          BCF          PortB,V3
          Return
        ;
        ;
P4        BSF          PortB,V4
          Call         Pulse
          BCF          PortB,V4
          Return
        ;
        ;
Pulse     ClrWDT                ;1/2 Impulslänge
          DecFSZ        tac,F
          B              Pulse
          DecFSZ        toe,F

```

```

        B      Pulse
        BSF    PortB,LED
;
Lp      ClrWDT          ;1/2 Impulslänge
        DecFSZ   tac,F
        B      Lp
        DecFSZ   toe,F
        B      Lp
        BCF     PortB,LED
;
        Return
;
;
Wait    MovLW    2          ;fast
        BTFSC   PortA,Turbo ;Turbo actuated???
        MovLW    200        ;slow
        MovWF    tic
Lw      Call     Pulse
        DecFSZ   tic,F
        B      Lw
;
        Return
;
Main    PAGE      ; ***** Hauptprogramm *****
;
;
        ClrW
        tris     PortB
        ClrF     PortB      ;Alle Peripherie OFF
;
;
Standby BSF      PortB,LED
        ClrF     cnt        ;wait for standby-key to open
L2      ClrWDT
        BTFSS   PortA,StdBy
        B      Standby
;
        DecFSZ   cnt,F      ;Entprellung
        GoTo    L2
;
;
Loop    ClrWDT
;
        Call     Tank        ;Tank füllen
        Call     P1          ;abblasen
        BTFSS   PortA,StdBy  ;Standby actuated??
        B      Main
        Call     Wait
;
        Call     Tank        ;Tank füllen
        Call     P2          ;abblasen
        BTFSS   PortA,StdBy  ;Standby actuated??
        B      Main
        Call     Wait
;
        Call     Tank        ;Tank füllen
        Call     P3          ;abblasen
        BTFSS   PortA,StdBy  ;Standby actuated??
        B      Main
        Call     Wait
;
        Call     Tank        ;Tank füllen
        Call     P4          ;abblasen
        BTFSS   PortA,StdBy  ;Standby actuated??
        B      Main
        Call     Wait
;
        GoTo     Loop        ;Hier rast das Programm wie verrückt ùùù
;
;
;
PAGE
;***** Misc *****
ORG     01FFH          ;reset vector 16C54
goto    Main
;
;
ORG     200H           ; Chip-ID for 16C54
data    0,0
data    Rev/10,Rev%10 ; Prog Rev
;
;
;

```

```
;Kurzbeschreibung
;-----
;Dosierung von Stickstoff zum Schutz der Plumex-Baugruppen
;
;
;History of Revisions
;-----
;Rev 1:(13.OKT.1997) Baubeginn R.N.V.
;Rev 2:(14.NOV.1997) Tankventil (nur 1 Tank)
;Rev 3:(14.MRZ.1998)
;Neue Hardware mit Ausgang für PLUMEX-4 (ATB)
;
END
```

VICTOR.ASM

```

TITLE                (c) 1997,1998 by Dipl.-Ing. Siegfried W. Schmidt
;
RADIX                dec
PROCESSOR 16c71
;
;constants
rev EQU 0BH          ;Program revision number
;
LED EQU 3            ;bit# on-board LED
Turbo EQU 2          ;Turbo-Jumper (PortA)
;
W EQU 0              ;Destination Work
F EQU 1              ;Destination File
GoDone EQU 2         ;A/D start bit
sign EQU 7
;
chl EQU B'11101001'  ;pin 18 (Azimut)   RA1 (analog)
;
;register file map (reserved area) (see page 2-536)
Zelle EQU 00H        ;this is not a physical register!
PCL EQU 02H          ;(bank 0)
STATUS EQU 03H
FSR EQU 04H          ;File Select for indirect addressing
PortA EQU 05H
PortB EQU 06H
ADCON0 EQU 08H
ADRES EQU 09H
PCLATH EQU 0AH
;
ADCON1 EQU ADCON0     ;(bank 1)
;
;
;register file map (user area: 0CH thru 2FH)
RingX EQU 0CH        ;X-Ring (16 Zellen)
RingY EQU 1CH        ;Y-Ring (16 Zellen)
LfdNr EQU 2CH        ;laufende Nummer der Messung
;
;doppelt belegte files
Zeiger EQU 2DH        ;Zeiger in den Speicher-Ring
HiSum EQU 2EH        ;Summe der Meßwerte
LoSum EQU 2FH        ;Summe der Meßwerte
;
tmpfil EQU ADRES      ;Ausgabe
Sektor EQU Zeiger     ;Quadrant (andere Nummerierung: 0,1,3,2)
Potenz EQU Zeiger     ;Zähler bei der Division durch 2_
C1 EQU HiSum          ;Delay counter
C2 EQU LoSum          ;Delay counter
KoX EQU HiSum
KoY EQU LoSum

PAGE
;
ORG 00                ;reset vector 16C71
Goto Init             ;skip interrupt vector location
;
;
ORG 04H               ;interrupt vector
;no interrupts are anabeled, so if the program ever
;reaches here, it should be returned with the global
;interrupt disabeled
return
;
;
ORG 08H               ;Program name (max 8 chars!!)
DATA 'V','i','c','t','o','r',' ',' '
;
;
ORG 10H

Init
ClrF PortA           ;Angst-Statements
ClrF PortB           ;siehe Nigel Gardener
ClrF PCLATH          ;PCLATH is undefined on POR (page 2-549)
;
MovLW B'11011111'
OPTION               ;load OPTION register
MovLW B'00000111'
TRIS PortA           ;configure PortA
MovLW B'00000000'
TRIS PortB           ;configure PortB (all output)

```

```

;
BSF      STATUS,5          ;select bank 1
MovLW    B'00000010'       ;RA0,RA1 analog & RA2,RA3 digital & int. Vref
MovWF    ADCON1            ;(see page 2-615)
;
bcf      STATUS,5          ;select bank 0
MovLW    ch1               ;select RC, ch1 & turn on A/D
MovWF    ADCON0
;
Goto     MLoop

delay    PAGE              ;***** Subroutinen *****
MovLW    476/4             ; C1 = 476/(Abtastrate in Hertz)
MovWF    C1               ;(ausprobiert für 4.0 MHz CPU-Quarz)
dl       ClrWdt
DecFSZ   C1,F
B        dl
RETURN
;
;
wait     MovLW    255       ;lange Wartezeit          (f=4.0 Hz)
BTFSS    PortA,Turbo      ;Turbo-Jumper??
MovLW    64              ;Ja! kurze Wartezeit      xxxxxxxx
MovWF    C2
wt       Call     delay
DecFSZ   C2,F
B        wt
RETURN
;
;
ClrSum   ClrF    HiSum     ;Aufsummierung vorbereiten
ClrF     LoSum
MovLW    16        ;Anzahl der Summanden
MovWF    Zeiger
Return
;
;
Div16    ;Division durch (2_)
MovLW    4          ;Exponent (n)
MovWF    Potenz
dv       ClrWDT
ClrC     ;dividiere durch 2
RRF      HiSum,F    ;schiebe durch Carry
RRF      LoSum,F
DecFSZ   Potenz,F
B        dv
Return
;
;
Abs      MovWF    tmpfil    ;Argument kommt im W-Register
BTFSS    tmpfil,sign      ;negativ?
B        pos              ;No!
NegF     tmpfil,F         ;Yes! negate File (pseudo-OP, cant skip this)
pos      MovFW    tmpfil    ;W := ABS(W)
Return

PAGE     ;***** Haupt-Programmschleife *****
;
MLoop    ;***** warten und LED blinzeln (ON bei over_range)
Call     wait
BSF      PortA,LED        ;Blinker ON
Call     wait
;
;***** Windrichtung einlesen
MovLW    ch1
MovWF    ADCON0          ;select channel
Call     delay           ;delay (ADC setup time!)
BSF      ADCON0,GoDone    ;start conversion
retry    BTFSC    ADCON0,GoDone ;result ready?
B        retry           ;no, try again
;
;***** over range (>239) abprüfen
MovLW    240
SubWF    ADRES,W         ;W = ADRES-240
SkpNC    ;IF (W<0) THEN SKIP
B        MLoop           ;over_range!
BCF      PortA,LED        ;Blinker OFF (bleibt ON bei over_range)
;
;***** allgemeinen Schreibzeiger hochzählen
IncF     LfdNr,W
AndLW    B'00001111'     ;Zählbereich 0..15
MovWF    LfdNr
;

```

```

;***** X-Komponente in Tabelle nachschlagen und im Ring ablegen
MovFW LfdNr      ;allgemeinen Schreibzeiger holen
AddLW RingX      ;verbiegen
MovWF FSR
;
MovLW HIGH Cosinus
MovWF PCLATH
MovFW ADRES      ;ADC-Ablesung holen
Call Cosinus
MovWF Zelle      ;X-Komponente in den Ring setzen
ClrF PCLATH
;
;***** Y-Komponente in Tabelle nachschlagen und im Ring ablegen
MovFW LfdNr      ;allgemeinen Schreibzeiger holen
AddLW RingY      ;verbiegen
MovWF FSR
;
MovLW HIGH Sinus
MovWF PCLATH
MovFW ADRES      ;ADC-Ablesung holen
Call Sinus
MovWF Zelle      ;Y-Komponente in den Ring setzen
ClrF PCLATH

PAGE
;
;***** Mittelwert der X-Komponenten bilden
SumX Call ClrSum      ;Summe aus 16 Werten
      ClrWDT
      MovFW Zeiger      ;W := Zeiger
      AddLW RingX-1      ;W := W + ring - 1
      MovWF FSR          ;FSR läuft von RING+0 bis RING+15
      MovFW Zelle        ;W: = value
      AddWF LoSum,F      ;LoSum:=LoSum+W
      AddCF HiSum,F      ;Übertrag zu HiSum addieren
      DecFSZ Zeiger,F    ;Lesezeiger herabzählen
      B SumX
      Call Div16         ;LoSum := (HiSum,LoSum) DIV 16
      ;
      MovFW LoSum        ;X-Komponente aufbewahren
      MovWF tmpfil
      ;
      ;
      ;***** Mittelwert der Y-Komponenten bilden
SumY Call ClrSum      ;Aufsummierung vorbereiten
      ClrWDT
      MovFW Zeiger      ;W := Zeiger
      AddLW RingY-1      ;W := W + ring - 1
      MovWF FSR          ;FSR läuft von RING+0 bis RING+15
      MovFW Zelle        ;W: = value
      AddWF LoSum,F      ;LoSum:=LoSum+W
      AddCF HiSum,F      ;Übertrag zu HiSum addieren
      DecFSZ Zeiger,F    ;Lesezeiger herabzählen
      B SumY
      Call Div16         ;LoSum := (HiSum,LoSum) DIV 16
      ;
      ;***** X-Komponente umtopfen
      MovFW tmpfil
      MovWF HiSum
      ;
      ; Variablen:      LoSum = KoY = Komponente Y-Richtung
      ;                  HiSum = KoX = Komponente X-Richtung
      ;
      ;
      ;***** Einheitskreis auf 0,0 schieben
      MovLW 125          ;Radius (laut COSINUS-Tabelle)
      SubWF KoX,F        ;f = f - W
      ;
      MovLW 125          ;Radius (laut SINUS-Tabelle)
      SubWF KoY,F        ;f = f - W
      ;
PAGE
;***** Quadranten-Erkennung (Vorzeichen retten!)
ClrF Sektor
;
BTFSC KoX,sign ;KoX negativ?
BSF Sektor,0 ;Ja, Bit setzen!
;
BTFSC KoY,sign ;KoY negativ?
BSF Sektor,1 ;Ja, Bit setzen!
;

```

```

;***** Absolutbeträge bilden
MovFW KoX
Call Abs ;W := ABS(W) (uses tmpfil)
MovWF KoX
;
MovFW KoY
Call Abs ;W := ABS(W) (uses tmpfil)
MovWF KoY
;
;***** Werte (KoX, KoY) für die Division skalieren
;Der optimale Faktor (n=16) wurde durch ausprobieren ermittelt!!
ClrC
RLF KoY,F ;KoY = KoY * 2
;
ClrC
RRF KoX,F
ClrC
RRF KoX,F
ClrC
RRF KoX,F ;KoX = KoX / 8 (Skalierung: n=16)
;
;***** KoX auf x=0 prüfen (div-by-zero error)
TstF KoX
SkpNZ
B MLoop ;liegt außerdem sowieso im dead_band
;
;***** Quotient berechnen (Steigung m=n·Y/X, n=Skalierung)
more ClrF tmpfil ;Ergebnis (Quotient, Steigung)
ClrWDT
IncF tmpfil,F
MovFW KoX ;Nenner
SubWF KoY,F ;Zähler = Zähler - Nenner
BC more ;C=0, wenn negativ
DecF tmpfil,F ;Ergebnis fertig
;
;***** Tabelle lesen
MovLW HIGH Atan
MovWF PCLATH
MovFW tmpfil
Call Atan
MovWF tmpfil
ClrF PCLATH
;
;***** Hysterese abprüfen
BTFSF tmpfil,7 ;dead band???
Goto MLoop ;ja, keine neue Ausgabe

PAGE
;***** Winkel für die Quadranten korrigieren
;
TstF Sektor
SkpNZ
B S0Q1
;
DecF Sektor,F
SkpNZ
B S1Q2
;
DecF Sektor,F
SkpNZ
B S2Q4
;
Goto S3Q3
;
;
S0Q1 MovFW tmpfil ;W := Â
Goto Ausgabe
;
;
S1Q2 MovFW tmpfil ;W := Â
SubLW 120 ;W:= Ð-Â
Goto Ausgabe
;
;
S2Q4 MovFW tmpfil ;W := Â
SubLW 240 ;W:= 2Ð-Â
Goto Ausgabe
;
;
S3Q3 MovFW tmpfil ;W := Â
AddLW 120 ;W := Â + Ð
Goto Ausgabe
;

```

```

Ausgabe    ;
           MovWF    PortB          ;der Winkel ist im W-Register
           Goto     MLoop

           PAGE      ;***** Arcus-Tangens *****
           ;
           org       100H
Atan        AddWF    PCL,F          ;Berechne Winkel aus Steigung
           INCLUDE   .\plumex\victor\Atan.asm
           ;
           PAGE      ;***** SINUS *****
           ;
           org       200H
Sinus       AddWF    PCL,F          ;Berechne die Y-Komponente
           INCLUDE   .\plumex\victor\sinus.asm
           ;
           ;
           PAGE      ;***** COSINUS *****
           ;
           org       300H
Cosinus     AddWF    PCL,F          ;berechne X-Komponente aus Winkel
           INCLUDE   .\plumex\victor\cosinus.asm
           ;
           PAGE      ;***** Sonstiges *****
           ;
           org       2000H          ;ID location (page 2-642)
           data      0,0,0,rev
           ;
           ;
           ;
           ;Rev.1 (14.APR.98) Baubegin der Tabellen mit PASCAL-Programm.
           ;Rev.2 (15.APR.98) Die Mittelung (2*8 Zellen) läuft ... Hurra!
           ;Rev.3 (16.APR.98) Mittelung über 2*16 Werte! ACOS-Tabelle optimiert.
           ;Rev.4 (17.APR.98) Verschiebung in Y-Richtung um 2 Schritte.
           ;      "Einheitskreis" hat d=250 damit Tabellenlänge L<255 !
           ;      Sampling Rate auf ganze Zahlen korrigiert (4Hz, 8Hz)
           ;
           ; Programm "schnickt" bei Quadratenwechsel Q2/Q3 ...
           ; Quotienten-Tabelle funktioniert nicht ....
           ;
           ;Rev.7 (20.APR.98) Es geht!!! (mit Division & ArcTan-Tabelle)
           ;Rev.9 (25.APR.98) Hysterese eingebaut. (Ausgabe gequantelt.)
           ;Rev.A (08.MAI.98) Over_range (ADRES>239) wird abgeprüft
           ;Rev.B (06.NOV.98) Blink-LED blinkt nicht bei Over_range
           ;
           ;
END          ;end-of-file
    
```

WEXLER.ASM

```

TITLE                (c) 1997,1998 by Dipl.-Ing. Siegfried W. Schmidt
;
RADIX                dec
PROCESSOR 16C84
Rev EQU 03H          ;Program Revision (für CHIP-ID, see below)
;
;Bit Positionen
RUN EQU 1            ;Run/Stop-Jumper
TURB EQU 2           ;Turbo-Jumper (Test)
;
RING EQU 0           ;Schaltausgang
AMBI EQU 1           ;Schaltausgang
NULL EQU 2           ;Schaltausgang
STRO EQU 3           ;Übernahme-Takt
;
;Constants
W EQU 0              ;Destination WORK
F EQU 1              ;Destination FILE
;
;reserved PIC file map
PortA EQU 05H        ;Eingang (Run/Stop & Turbo)
PortB EQU 06H        ;Ausgang (Magnetventile & Strobe)
PCLATH EQU 0AH
;
;user PIC file map
C1 EQU 0CH           ;Counter
C2 EQU 0DH
C3 EQU 0EH
tic EQU 0FH
tac EQU 10H
;
;
;
ORG 00               ;reset vector 16C84
Goto Init            ;skip interrupt vector location
;
;
ORG 04H              ;interrupt vector
Return
;
;
ORG 08H              ;Program name (max. 8 chars)
DATA 'W','e','x','l','e','r',' ',' '
;
;
ORG 10H

PAGE                ;***** Subroutines *****
;
Plumex ClrF PortB      ;Plumex-Messung
BSF PortB,RING
MovLW 80             ;Spülzeit in Sekunden
Call flush
MovLW 255            ;Anzahl der Messungen (255!)
Call strobe
Return
;
;
Umluft ClrF PortB      ;Ambient-Messung (100%-Punkt)
BSF PortB,AMBI
MovLW 80             ;Spülzeit in Sekunden
Call flush
MovLW 3              ;Anzahl der Messungen
Call strobe
Return
;
;
Filter ClrF PortB      ;Null-Messung (0%-Punkt)
BSF PortB,NULL
MovLW 100            ;Spülzeit in Sekunden
Call flush
MovLW 3              ;Anzahl der Messungen
Call strobe
Return
;
;
flush MovWF C1
L2 Call W1            ;delay 1 sec
DecFSZ C1,F

```

```

        B      L2
Return
;
;
strobe  MovWF   C1
L3      Call    W6          ;delay 6 sec
        BSF     PortB,STRO
        Call    W1          ;delay 1 sec
        BCF     PortB,STRO
        Call    W1          ;delay 1 sec
        DecFSZ  C1,F
        B       L3
Return
;
;

PAGE    ; ***** Zeitschleifen *****
;
cf      EQU     4          ;Wertebereich: 1 .. 42 (MAX! siehe W6)
;
;
W1      MovLW   1*cf        ;aprox. 1 sec
        Goto    Wait
;
;
W6      MovLW   6*cf        ;aprox. 6 sec
        ;Goto   Wait
;
;
Wait    MovWF   C2
L4      Call    Delay
        DecFSZ  C2,F
        B       L4
Return
;
;
Delay   ClrWDT
        DecFSZ  tic,F
        B       Delay
        DecFSZ  tac,F
        B       Delay
;
;
L5      BTFSS   PortA,RUN    ;IF "run" THEN skip
        Goto    L5          ;hier macht der WDT einen reset
;
Return
;
;

PAGE    ;***** Hauptprogramm *****
Init    ClrW          ;Konfiguration
        tris     PortB      ;all Ouput
;
        MovLW    B'00001111'
        tris     PortA      ;all Input
;
        ClrF      PCLATH
;
;
        ClrF      PortB
        BSF       PortB,AMBI ;Ventil auf
        BSF       PortB,RING ;Ventil auf
L1      ClrWDT
        BTFSS     PortA,RUN  ;wait for Run/Stop-Jumper
        B         L1
;
        MovLW     10          ;10 Sekunden ...
        Call      flush      ;... Zeit geben
;
Loop    Call      Filter
;
        Call      Umluft      ;1
        Call      Plumex
;
        Call      Umluft      ;2
        Call      Plumex
;
        Call      Umluft      ;3
        Call      Plumex
;
        Call      Umluft      ;4
        Call      Plumex
;

```

```

Call      Umluft          ;5
Call      Plumex
;
Call      Umluft          ;6
Call      Plumex
;
Goto      Loop
;
;

PAGE      ;***** Misc *****
;
;
ORG        2000H          ; ID location
data      0,0,0,Rev
;
;
;
;Kurzbeschreibung
;-----
;
;Autokalibrator für Feldbegasungssysteme.
;
;Unterbricht die Konzentrationsmessung zyklisch zur Messung
;der Kalibrationspunkte: AMBI = 100%-Punkt, Null = 0%-Punkt
;
;Nachfolger von RAF's "Pulsi" mit
; - individueller Vorsaugphase und
; - Mehrfachmessung
;
;
;History of Revisions
;-----
;Rev.1:   (So 01.NOV 98)   Baubeginn ...
;Rev.2:   (Di 03.NOV 98)   Run/Stop-Jumper via WDT-timeout
;Rev.3:   (Mo 12.FEB.00)   minor changes in code
;
END

```

DIAGNOSE . PRG

```
* Fehler-Diagnose durch Simulation von "Künstlicher Intelligenz" Datum: 16.JUN.1998
*
DO \fox\s_set
CLEA
*
STOR "?? " TO ans    && declare global
STOR 0    TO lfdnr   && Zählung der Fragen
*
SELE A
USE plumex
GO TOP
? Frage
? REPLICATE("=",LEN(TRIM(Frage)))
?
SKIP
DO WHILE .not.(Ja*Nein=0)
    STOR lfdnr+1 TO lfdnr
    STOR RECNO() TO l_frag && Satznummer der letzten Frage
    *
    DO s_ask WITH STR(lfdnr,2)+". "+TRIM(Frage)+" (J,N)?"
    DO CASE
        CASE ans="J"
            STOR Ja    TO nxt
        CASE ans="N"
            STOR Nein TO nxt
    ENDC
    GOTO nxt
ENDD
* Der neue Satz ist positioniert
STOR RECNO() TO l_diag
?
? REPLICATE("-",LEN(TRIM(Frage)))
? TRIM(Frage) && unterhalb "min" sind es keine Fragen
? REPLICATE("-",LEN(TRIM(Frage)))
?
DO s_ask WITH "Stimmt das? "
IF ans="J"
    ? "Das ist fein!"
    CLOSE ALL
    RETU
ENDI
*
DO s_ask WITH "Datei erweitern? "
IF ans="N"
    ? "Danke für die Benutzung der Diagnose-Software"
    CLOSE ALL
    RETU
ENDI
*
* *****
?
ACCE "Was war der Fehler? " TO fehler
APPE BLAN
REPL Frage WITH fehler
*
ACCE "Welche Ja-Nein-Frage zur Unterscheidung? " TO answer
APPE BLAN
REPL Frage WITH answer
*
DO s_ask WITH "Wie lautet die Antwort für <"+fehler+"> (Ja/Nein)? "
IF ans="J"
    REPL Ja    WITH RECNO()-1
    REPL Nein WITH l_diag
ELSE
    REPL Nein WITH RECNO()-1
    REPL Ja    WITH l_diag
ENDI
*
GOTO l_frag && Auf die neue Frage zeigen
IF Nein=l_diag
    REPL Nein WITH RECCOUNT()
ELSE
    REPL Ja WITH RECCOUNT()
ENDI
*
RETU
* eof
```

EQUIDIST.PAS

```

PROGRAM equi; USES crt; {Siegfried W. Schmidt im August 1996}

VAR anz,ii,nn,p1,p2:BYTE;
VAR alfa,dist,old:REAL;
VAR abstand :ARRAY [1..33] OF REAL;

FUNCTION distance(von,bis:BYTE):REAL; {finde den Abstand zwischen p1 und p2}
VAR summe:REAL;
VAR i:BYTE;
BEGIN
    summe:=0;
    FOR i:=von TO bis-1 DO summe:=summe+abstand[i+1];
    distance:=summe
END;

BEGIN
    clrscr;
    write('Gesamtzahl? ');readln(anz);
    alfa:=2*Pi/anz;
    writeln('Segmentwinkel à=',180*alfa/Pi:5:1,'°'); {Winkel pro Segment}

    writeln;
    ii:=0;
    REPEAT
        INC(ii);
        abstand[ii]:=sin(alfa*ii)-sin(alfa*(ii-1));

    UNTIL 2*alfa*ii>Pi;    {nur Viertelkreis abfahren}
    nn:=ii-1;

    {Werte anzeigen}
    FOR ii:=1 TO nn DO writeln(ii:2,alfa*ii*180/Pi:8:1,abstand[ii]:10:4);
    writeln;

    p1:=1;p2:=2;
    REPEAT
        {berechne den Abstand zwischen p1-p2 }
        write(p1:5,p2:5,' >> ');
        old:=1.1;
        ii:=P2;
        REPEAT
            dist:=distance(p1,ii);
            write(abs(dist-abstand[1]):8:4);
            IF dist<old THEN old:=dist;
            INC(ii)
        UNTIL (ii=nn)or(dist>old);
        p1:=ii-1;
        p2:=p1+1;

        {
        finde optimum durch verschieben von p2
        beste p2-Position wird nach p1 übernommen;
        }
        writeln;delay(999);

    UNTIL (p1>nn)or(p2>nn);
    writeln;write('hit RET ...');readln
END.

```

MUX . PAS

```
TITLE                      (c) 1997,1998 by Dipl.-Ing. Siegfried W. Schmidt
;
PROGRAM mux; {CO2-messen an 9 Stellen, SWS im Mrz.98}

USES crt,dos,u_plumex,u_mux,u_daten;

{
History of revisions
-----
V5.1  17.Jul.98  Satzbreite in der Ausgabedatei deutlich verkleinert
V5.2  17.JUL.98  Unterverzeichnisse fuer die monatlichen Daten
}
CONST rev='V5.5'; {Programmversion}
CONST klotz=140;  {Periode ist etwa 100 Sekunden}

CONST base=$200;  {on board jumper parallel-board}
CONST zeit='MEZ'; {Zeibasis der Computeruhr}

VAR datei:TEXT;
VAR heute,Uhr:STRING;

VAR bu:CHAR;
VAR valv,tic:BYTE; {Ventilnummer, timing}
VAR cyc :WORD;
VAR hh:WORD;                      {Stunde des Tages}
VAR filnam:STRING;

(*****)
PROCEDURE platz(v:BYTE); BEGIN gotoxy(x2co(x[v])-3,y2ro(y[v])) END;

FUNCTION monat(m:WORD):STRING;
BEGIN
CASE m OF
  1:monat:='Jan';
  2:monat:='Feb';
  3:monat:='Mrz';
  4:monat:='Apr';
  5:monat:='Mai';
  6:monat:='Jun';
  7:monat:='Jul';
  8:monat:='Aug';
  9:monat:='Spt';
 10:monat:='Okt';
 11:monat:='Nov';
 12:monat:='Dez'
ELSE
  monat:='xxx'
END
END;

FUNCTION Tag(t:WORD):STRING;
BEGIN
CASE t OF
0:Tag:='So';1:Tag:='Mo';2:Tag:='Di';
3:Tag:='Mi';4:Tag:='Do';5:Tag:='Fr';6:Tag:='Sa';
END;
END;

PROCEDURE Kopf;
BEGIN
append(datei);writeln(datei);
writeln(datei,'',heute,'Prog-':12,rev,'Klotz':9,klotz,'Wait':9,wait,'');
writeln(datei,"Uhrzeit","Zyk","Vent","CO2","Sigma","Winkel","Speed","Temp");
writeln(datei);close(datei)
END;

FUNCTION get_it:STRING;          {Hole das aktuelle Datum mit Uhrzeit}
VAR mm,ss,s100,mon,day,yea,dow:WORD;      {Stunde muß global sein}
VAR buf,datum:STRING;
VAR julian,gestern:LONGINT;              {Tag des Jahres, für Dateinamen}

BEGIN
GetDate(yea,mon,day,dow);GetTime(hh,mm,ss,s100);
julian:=31*mon+day;                  {Tag des Jahres als Do/Done-Flag}
IF not (julian=gestern) THEN BEGIN
  gestern:=julian;
  STR(100+day:3,filnam);filnam:=COPY(filnam,2,2);
  filnam:='\daten\' +monat(mon)+'98\' +monat(mon)+filnam+'.v1';
END;
```

```

    Assign(datei,filnam)
END;
yea:=yea MOD 100;
STR(day:2,buf);datum:=Tag(dow)+' '+buf+'.';
STR(mon:2,buf);datum:=datum+buf+'.';
STR(yea:2,buf);datum:=datum+buf;

STR(hh:2,buf);Uhr:=buf+'.';
STR(mm:2,buf);Uhr:=Uhr+buf;

get_it:=datum+' '+uhr+' '+zeit
END;

PROCEDURE status(txt:STRING); {Programmstatus ausgeben}
BEGIN gotoxy(52,25);write(txt,' (' ,tic,') ');ClrEOL END;

FUNCTION nxt(v:BYTE):BYTE;           {die nächste Ventilnummer berechnen}
BEGIN v:=v+1;IF v>9 THEN v:=1; nxt:=v END;

PROCEDURE haupt;
VAR jj:BYTE;
VAR elap,azim,segment:WORD;
BEGIN
    Textcolor(White);platz(valv);write(valv:1,#8);
    delay(klotz); IF keypressed THEN bu:=UPCASE(readkey);

    {das naechste Ventil vorausseilend anschalten}
    IF tic=3 THEN PORT[base+1]:=nxt(valv);

    {Werte einlesen}
    co2_e[tic]:=Port[base] xor $ff;           {Konzentration einlesen}
    cel_e[tic]:=adc(2);                       {Temperatur einlesen}

    elap:=adc(0); IF elap=0 THEN elap:=1;      {1/speed einlesen}
    IF elap=0 THEN elap:=1 ELSE IF elap>2000 THEN elap:=64000;
    azim:=adc(1);                             {Richtung einlesen}

    speed:=403.4/elap;                         {Geschwindigkeit ++Kalibration++}
    Alfa:=1.0*azim/365.632;                     {Bogenmaß: 0..2π ++KALIBRATION++}

    {
    Wichtiger Hinweis:
    =====
    Die Kalibration des Winkels ist von zentraler Bedeutung fuer die Zerlegung
    des Windvektors in Komponenten!

    Die Kalibration der Geschwindigkeit kann nachtraeglich angepaßt werden.
    }

    Kox[tic]:=speed*cos(Alfa);
    Koy[tic]:=speed*sin(Alfa);

    {Anzeige}
    Textbackground(LightGray);

    gotoxy(2,11);write('Konz.:',co2_e[tic]:5,' [%amb]');
    Winkel:=ROUND(180.0*Alfa/Pi); {Kontrolle der aktuellen Werte am Bildschirm}
    gotoxy(2,12);write('Alfa :',Winkel:5,' [deg] ');
    Segment:=Winkel DIV 15; {Kontrolle auf dem Bildschirm}
    gotoxy(2,13);write('Segm.:',Segment:5,' [-] ');
    gotoxy(2,14);write('Speed:',speed:6:2,' [m/s] ');
    gotoxy(2,15);write('Xtra :',cel_e[tic]:6,' [-] ');

    gotoxy(1,25);write(heute);
    write('Cycle: ':10,cyc,'Valve: ':10,valv,bu:4);ClrEOL;
    IF tic>wait THEN status('calculating...') ELSE status('waiting...');
    Textbackground(Black);

    IF bu='W' THEN FOR jj:=1 TO 9 DO BEGIN platz(jj);wrk(w[jj]);bu:=' ' END;

END;

PROCEDURE diskette;
CONST k='.';
BEGIN
    status(filnam);append(datei);
    writeln(datei,

```

```
'"',uhr,'"',k,cyc:3,k,valu:2,k,co2:4,k,co2_s:7:4,k,winkel:4,k,speed:5:2,k,celsius:5);
close(datei)
END;

(*****)
BEGIN
Textbackground(Black);clrscr;
Textcolor(White);TextBackground(LightGray);
write('CO2-Konzentration im PLUMEX-1 (Siegfried W. Schmidt) Rev.: ',rev);
ClrEOL;
Textbackground(Black);

heute:=get_it; {Hole Datum/Uhrzeit & öffne Ausgabedatei}
Status(filnam);
Kopf; {Kopfzeile in Datei schreiben}

Port[base+3]:=$90; {PortA ist Eingang (Meßwert), PortB ist Ausgang (Ventile)}

cyc:=0;
REPEAT
  FOR valu:=1 TO 9 DO BEGIN
    Plumex;
    FOR tic:=0 TO 255 DO haupt;
    berechnung; {alle Mittelwerte & Streumaße bilden}
    w[valu]:=co2; {Mittelwert fuer Schirmbild aufbewahren}
    heute:=get_it; {Datum/Uhrzeit holen & ggf. neue Tagesdatei anlegen}
    IF hh IN [8..18] THEN diskette {nur Tageswerte auf Platte schreiben}
  END{FOR};
  INC(cyc)
UNTIL false
END.
```

POLAR.PAS

```

PROGRAM polar; {mache HPGL-Datei für PLUMEX-Daten, SWS im August 1998}

CONST rev='2.7';
CONST arrow=false; {Pfeile zu Nachbarn abschaltbar}
CONST sc=110;      {Maßstab, je höher die Zahl, desto größer das Bild}
CONST test=false;

{
History of Revisions
12.AUG.98  (1.7)  Umgetauft von ROSE.PAS in POLAR.PAS
20.SPT.00  (2.0)  Pfeile für Nachbar-Einfluß durch P2,P3,P4
10.OKT.01  (2.2)  SP (select pen) must use a pen!!!
10.OKT.01  (2.3)  Bilddiagonale für HP2XX belegen
28.AUG.02  (2.4)  Pfeile abschaltbar
04.SPT.02  (2.6)  Bild vergrößert
04.SPT.02  (2.7)  Segmentnummern eingefügt
}
(*****)

CONST etx=#3; {default label terminator}

VAR dat          :TEXT;
VAR filnam       :STRING[8];
CONST x0=5000;y0=3800; {Mittelpunkt vom PLOT}

PROCEDURE semiko;BEGIN writeln(dat,')') END;

PROCEDURE PU(x,y:WORD);
BEGIN write(dat,'PU ');IF not(x+y=0) THEN write(dat,x,',',y);semiko END;

PROCEDURE PD(x,y:WORD);
BEGIN write(dat,'PD ');IF not(x+y=0) THEN write(dat,x,',',y);semiko END;

PROCEDURE LT(x:BYTE);
BEGIN write(dat,'LT ');IF not(x=0) THEN write(dat,x);semiko END;

PROCEDURE SP(x:BYTE); {select pen}
BEGIN write(dat,'SP ');IF not(x=0) THEN write(dat,x);semiko END;

PROCEDURE LB(txt:STRING);
BEGIN
writeln(dat,'LB '+txt+ETX);semiko
END;

(*****)

VAR sp1,sp2      :STRING[6];
VAR signal       :ARRAY[0..23] OF INTEGER;
VAR segment      :WORD;
VAR wert         :REAL;
VAR vc           :INTEGER;

VAR alfa         :REAL;

VAR x,y          :WORD;
VAR xi,yi:ARRAY[0..23,0..2] OF WORD; {kartesische Koordinaten}

PROCEDURE kreuz(x,y:WORD);
BEGIN
LT(0);
PU(x,y+sc);PD(x,y-sc);
PU(x+sc,y);PD(x-sc,y);
END;

PROCEDURE pfeil(alfa,dist:REAL;bu:CHAR);
CONST radi=500.0;      {Entfernung der Pfeilspitze vom Bildmittelpunkt}
VAR intens:REAL;      {Intensität}
VAR Ax,Ay,Bx,By:INTEGER; {Koordinaten von Anfangs- & Endpunkt}
BEGIN
intens:=2.0*10e5*SQR(1.0/dist); {empirische Gewichtung und skalierung der Distanz}
write('P'+bu,intens:10:2);

```

```
alfa:=Pi*Alfa/180; {Umrechnung ins Bogenmaß}

Ax:=x0+ROUND(radi*      Cos(alfa));
Bx:=x0+ROUND((radi+intens)*Cos(alfa));

Ay:=y0+ROUND(radi*      Sin(alfa));
By:=y0+ROUND((radi+intens)*Sin(alfa));

writeln('A':6,ax:8,ay:8,'B':6,bx:8,by:8);
PU(Ax,Ay);PD(Bx,By);LB(' P'+bu)

END;

PROCEDURE Wirkung;
CONST A2=145.6; D2=69.6; {Winkel und Abstand von PlumeX-2}
CONST A3= 77.5; D3=59.5; {Winkel und Abstand von PlumeX-3}
CONST A4=112.8; D4=26.6; {Winkel und Abstand von PlumeX-4}
BEGIN pfeil(a2,d2,'2');pfeil(a3,d3,'3');pfeil(a4,d4,'4') END;

VAR faktor,offset:STRING[10];
VAR mm,bb:REAL;          {scalierung der Meßwerte}
VAR lbl:STRING[3];

BEGIN (*****)

IF paramcount>0 THEN filnam:=paramstr(1) ELSE filnam:='polar';
IF paramcount>1 THEN faktor:=paramstr(2) ELSE faktor:='1.00';
IF paramcount>2 THEN offset:=paramstr(3) ELSE offset:='0.00';
VAL(faktor,mm,vc);VAL(offset,bb,vc);

writeln('m=',mm:8:2,'b=':6,bb:8:2);

writeln(filnam+'.DAT einlesen ... ');
Assign(dat,filnam+'.DAT');reset(dat);
WHILE not EOF(dat) DO BEGIN
  readln(dat,sp1,sp2);
  VAL(sp1,segment,vc);VAL(sp2,wert,vc);

  IF segment+wert>0 THEN BEGIN
    signal[segment]:=ROUND(wert*mm+bb);
    IF signal[segment]<0 THEN signal[segment]:=0;
    IF test THEN BEGIN writeln(segment:3,wert:5);readln END;
  END

END;

Close(dat);

writeln('Berechne Ahornblatt ...');
FOR segment:=0 TO 23 DO BEGIN
  alfa:=15.0*segment;      {Gradmaß}
  alfa:=Pi*alfa/180; {Bogenmaß}
  xi[segment,0]:=ROUND(cos(alfa)*sc*signal[segment])+x0;
  yi[segment,0]:=ROUND(sin(alfa)*sc*signal[segment])+y0;
END;

writeln('Berechne PLUMEX Koordinaten ...');
FOR segment:=0 TO 23 DO BEGIN
  alfa:=15.0*segment-7.5;  {Gradmaß}
  IF alfa<0 THEN alfa:=360+alfa;
  alfa:=Pi*alfa/180;      {Bogenmaß}
  xi[segment,1]:=ROUND(cos(alfa)*23*sc)+x0; {Innenkreis}
  yi[segment,1]:=ROUND(sin(alfa)*23*sc)+y0;
  xi[segment,2]:=ROUND(cos(alfa)*27*sc)+x0; {Außenkreis}
  yi[segment,2]:=ROUND(sin(alfa)*27*sc)+y0;
END;

{.....}
writeln(filnam+'.PLT schreiben ...');
Assign(dat,filnam+'.PLT');rewrite(dat);

SP(1); {pen devices must use a pen!!! 10.OKT.2001}

PU(1,1);PD(2,2);PU(10000,7600);PD(9999,7599); {Bilddiagonale für HP2XX}

{Ahornblatt}
LT(0);
PU(xi[23,0],yi[23,0]);
```

```

FOR segment:=0 TO 23 DO PD(xi[segment,0],yi[segment,0]);
PU(0,0);

{Doppelkreis}
LT(1);
PU(xi[23,1],yi[23,1]);FOR segment:=0 TO 23 DO PD(xi[segment,1],yi[segment,1]);
PU(xi[23,2],yi[23,2]);FOR segment:=0 TO 23 DO PD(xi[segment,2],yi[segment,2]);
PU(0,0);

{Flansche}
FOR segment:=0 TO 23 DO BEGIN
    PU(xi[segment,1],yi[segment,1]);PD(xi[segment,2],yi[segment,2]);
END;

{Mittelpunkt}
kreuz(x0,y0);
PU(0,0);

{Himmelsrichtung}
LT(0);
x:=x0-3*sc;
y:=y0-sc*33+170 ;PU(x,y);LB('Süd');
y:=y0+sc*30- 40 ;PU(x,y);LB('Nord');

y:=y0-(sc DIV 2);
x:=x0-sc*34- 50 ;PU(x,y);LB('West');
x:=x0+sc*28+ 50 ;PU(x,y);LB('Ost');

{Segmentnummern}
FOR segment:=0 TO 23 DO BEGIN
    alfa:=15.0*segment;
    alfa:=Pi*Alfa/180; {Umrechnung ins Bogenmaß}
    x:=x0+ROUND(25*sc*cos(alfa))-350; {350 ist halbe Label-Länge}
    y:=y0+ROUND(25*sc*sin(alfa))- 70; {70 ist halbe Label-Höhe}
    STR(100+segment:3,lbl);
    lbl[1]:=' '; {leading zero}
    PU(x,y);LB(lbl)
END;

{die verwendeten Umrechnungsfaktoren darstellen}
LT(0);
PU(8500,450);LB('m= '+faktor);
PU(8500,250);LB('b= '+offset);
PU(8500, 50);LB('f= '+filnam);

{Einfluß der Nachbarn}
IF arrow THEN Wirkung;

{Copyright}
LT(0);
PU(25,250);LB('POLAR.PAS V'+rev);
PU(25, 50);LB('Siegfried W. Schmidt');

Close(dat);writeln('Fertig!')
END

```

SUNLIGHT . PAS

```
PROGRAM sunlight;  USES crt,printer,u_mathe,u_astro;

CONST version='V3.1';
{
01.APR.94 V1.0

16.APR.01 V2.1 PlumeX-Anlage (r=4.9, hoehe=0.4, 6x6 Punkte)
17.APR.01 V2.2 Sonnenstand in geografischer Winkelzählung
17.APR.01 V2.3 Zusätzliche Ausgabe der Punkte-Datei
19.APR.01 V2.4 Umgetauft: GITTER.PAS --> SUNLIGHT.PAS
19.APR.01 V3.0 Horizont wird berücksichtigt
21.OKT.01 V3.1 wählbarer Anfangstag der Berechnung
}

CONST radius= 4.90; {Geometrie der Anlage}
CONST hoehe = 0.45; {Höhe der Anlage, VVP=Vertical Vent Pipe}
CONST punkte=20;    {Anzahl der Gitterpunkte entlang einer Gitterkante}

{
-----
Hinweise:

1) Mit der Booleschen-Variablen DOSIS kann eingestellt werden, ob
   relative Sonnenscheindauer oder relative Leistung berechnet
   werden soll.

2) Es werden folgende Dateien erzeugt:
   AUSGABE.GRD  Daten im SURFER-Format zur Verarbeitung durch TOPO
   AUSGABE.DAT  Rohdaten (X,Y,Z) zur Verarbeitung durch GRID
   read.me     Informationen über die aktuelle Berechnung
   PLENUM.DOT   Posting file für den Umriß der Anlage

3) Das Programm durchläuft 182 Tage und zeigt auf dem Bildschirm
   für jeden Tag eine neue Zeile. In diese Zeilen werden dann die
   jeweils berechnete Stunde eingetragen. Die Nachtstunden werden
   merklich schneller abgearbeitet.

4) Der "Kopf" in der Datei AUSGABE.GRD wird vollständig und richtig
   erstellt. Das bedeutet, daß auch die Wertebereiche ermittelt
   werden.

5) Im TOPO-Output-Modul folgende Parameter einstellen: f=0.5, x=2.8
   und y=1.5 wenn die Isolinien in Bildmitte erscheinen sollen.
   In Verbindung mit dem Hilfsumkreis ABB_5489 sind folgende Werte
   einzustellen: f=0.5, x=2.1 und y=1.5 (x wird 1/2 Zoll verschoben)

-----

Weil der Sonnenlauf symmetrisch um die Sonnersonnenwende ist,
wird das Jahr nur bis zum 21. Juni (Tag-Nr. 182) durchlaufen.
Der Start-Tag wird eingefragt.

Zu jeder vollen Stunde werden ausgewählte Punkte abgeprüft ob sie
in der Sonne liegen, bzw unter welchen Winkel sie beleuchtet werden.

Im Gegensatz zum Vorläufer schreibt dies Programm direkt die Datei
AUSGABE.GRD. Der Prozeß GRID.EXE ist dadurch überflüssig.
Die Ausgabedatei kann direkt von TOPO.EXE abgebildet werden.

Radius und Höhe der VVP (Düsen) sind veränderbar für Simulationen.

Der runden Anlage wird ein quadratische Gitter einbeschrieben.
Die Punktzahl ist wählbar. Sie darf nur geradzählung sein, damit
niemals ein Gitterpunkt auf dem Mittelpunkt des Kreises liegt.
Ursprung Polarvektor!

-----
}

CONST lm='      ';

VAR
  xi,yi :BYTE;                                {Koordinaten der Gitterpunkte}

  alfa,beta,      {Sonnenstand}
  alfamax,        {höchster Sonnenstand eines Tages}

  x,y,            {kartesische Koordinaten}
  pura,puwi,      {Polarkoordinaten}
```

```

    ecke,           {Koordinaten der Eckpunkte}
    abstand,        {Abstand in Metern zwischen zwei Gitterpunkten}

    z,zmin,zmax,
    schatten,        {Schattenlänge}
    hoch            {Funktionswert oberhalb Punkt}
    :REAL;

VAR dosis:BOOLEAN; {Berechne Tageslänge oder Lichtdosis}

    kan :TEXT;      {file handle für Ausgabedatei}

VAR
    grid :ARRAY [1..punkte,1..punkte] OF REAL;      {Prüfpunkte}
    bezug:REAL;   {Bezugspunkt außerhalb zur Berechnung der relativen Werte}

FUNCTION kreis(x:REAL):REAL;           BEGIN kreis:=SQRT(SQR(radius)-SQR(x)) END;
FUNCTION f2(x,a:REAL):REAL; {Licht}     BEGIN f2:=kreis(x)-a END;

FUNCTION sonne:REAL;
BEGIN
    IF dosis THEN sonne:=SIN(rad(alfa))      {addiere Strahlungsleistung}
    ELSE sonne:=1                            {addiere Sonnenstunden}
END;

PROCEDURE scan;
BEGIN
    FOR xi:=1 TO punkte DO FOR yi:=1 TO punkte DO BEGIN

        x:=abstand*(xi-1)-ecke;
        y:=abstand*(yi-1)-ecke;

        {Umrechnung in Polarkoordinaten}
        puwi:=arctan(y/x);                    {Quadrant korrigieren !!!!}
        IF (x<0)or(y<0) THEN
            IF y>0 then puwi:=puwi+Pi          {2. Quadrant geprüft}
        else IF x>0 THEN puwi:=puwi+2*Pi      {4. Quadrant}
        ELSE
            puwi:=puwi+Pi;                    {3. Quadrant}

        pura:=SQRT(SQR(x)+SQR(y));

        IF not(pura>radius) THEN BEGIN        {Gitterpunkt liegt innerhalb}
            puwi:=puwi-rad(beta);             {Drehung des Koordinatensystems}

            {Rückrechnung in kartesische Koordinaten}
            x:=pura*COS(puwi); y:=pura*SIN(puwi);

            hoch:=f2(x,schatten);              {Prüfe die Beleuchtung}
            IF not(y>hoch) THEN grid[xi,yi]:=grid[xi,yi]+sonne

        END

    END

END

END;

PROCEDURE stunde(uhr:BYTE);
BEGIN

    beta:=decli(uhr);           {Richtung der Sonne}
    alfa:=incll(uhr,alfamax);   {Höhe der Sonne}
    Textcolor(Lightgray);      {Nacht}

    IF alfa>horizont(beta) THEN BEGIN {Sonne muß über dem Horizont stehen}
        Textcolor(Yellow); {Tag}

        bezug:=bezug+sonne;      {Bezugspunkt außerhalb immer im Licht}

        schatten:=hoehe/tan(rad(alfa)); {Länge des Schattens}
        IF schatten<2*radius THEN scan {IF Schatten<Durchmesser THEN rechnen}

    END{if};

```

```

write(uhr:3);                                     {time of day}

END;

PROCEDURE tag(jul:BYTE);
VAR moz:BYTE;
BEGIN
  writeln;write(jul:3,':  ');
  alfamax:=zenit(jul);                           {höchster Sonnenstand des Tages}

  FOR moz:=0 TO 23 DO stunde(moz)
END;

(*****
*****)

VAR julian:BYTE; {Tagesnummer 1..182 }
VAR antwort:BYTE; {Antwort}
VAR von:BYTE;    {Start-Tag der Berechnung}

BEGIN
  Clrscr;Highvideo;
  writeln(paramstr(0),'      '+version+'      S.W.S. ');writeln;
  von:=0;
  REPEAT
    write('Von welchem Tag die Berechnung beginnen (1..180) ? ');
    readln(von)
  UNTIL von IN [1..180];

  write('Lichtdosis (1) oder Tageslänge (0) berechnen? '); readln(antwort);
  dosis:=(antwort=1);
  write('Berechnet wird die relative ');
  IF dosis THEN writeln('Licht-Dosis') ELSE writeln('Tageslänge');
  writeln;
  writeln('Ringgeometrie:   Radius=',radius:6:2,'      Höhe=',hoehe:6:2);

  GotoXY(1,8);FOR xi:=1 TO 79 DO write('-'); Normvideo; window(1,9,80,20);

  {Plausibilität}
  IF not(2*(punkte DIV 2)=punkte) THEN BEGIN
    write('Die Anzahl muß geradzahlig sein, ');
    writeln('damit kein Punkt im Ursprung liegt!');
    write('HIT RET ...');readln
  END;

  {Initialisierung des Punkte-Feldes, alles ganz dunkel}
  FOR xi:=1 TO punkte DO FOR yi:=1 TO punkte DO grid[xi,yi]:=0;
  bezug:=0;

  {Ordinate und Abszisse der Eckpunkte des Meßpunkt-Gitters}
  ecke:=Radius/SQRT(2); {Gitter liegt innerhalb der Anlage}
  ecke:=Radius;         {Anlage liegt im Gitter}
  abstand:=2*ecke/(Punkte-1); {Abstand zwischen zwei Gitterpunkten}

  FOR julian:=von TO 182 DO tag(julian); {Durchlaufe bis Jahresmitte}

  {Suche Wertebereich des Lichtgenusses}

  zmin:=100;zmax:=0;
  FOR yi:=1 TO punkte DO FOR xi:=1 TO punkte DO BEGIN
    z:=100.0*grid[xi,yi]/bezug;
    IF z>zmax THEN zmax:=z ELSE IF z<zmin THEN zmin:=z
  END;

  {----- schreibe Ausgabe-Datei -----}

  assign(kan,'AUSGABE.grd');rewrite(kan);
  writeln(kan,'DSAA');                                     {file header}
  writeln(kan,lm,punkte:6,punkte:6);                     {grid size x*y}
  Writeln(kan,lm,-ecke:6:2,ecke:6:2);                     {X Extremwerte}
  Writeln(kan,lm,-ecke:6:2,ecke:6:2);                     {Y Extremwerte}
  Writeln(kan,lm, zmin:6:2, zmax:6:2);                     {Z Extremwerte}

  FOR yi:=1 TO punkte DO BEGIN
    writeln(kan);write(kan,lm);
    FOR xi:=1 TO punkte DO BEGIN {das Bild ist Seitenverkehrt!}
      z:=100.0*grid[xi,yi]/bezug;
      write(kan,z:6:1)
    
```

```

END
END; writeln(kan); writeln(kan);CLOSE(kan);

{----- Hinweise -----}

assign(kan,'read.me');rewrite(kan);
writeln(kan);
writeln(kan,lm+paramstr(0),' '+version+' S.W.S.');
```

writeln(kan);

write(kan, lm+'Berechnet wurde: relative ');

IF dosis THEN writeln(kan,'Dosis') ELSE writeln(kan,'Tageslänge');

writeln(kan,lm+'für die Tage von Nr.','von,' bis Nr.182');writeln(kan);

writeln(kan,lm+'Intensität am Bezugspunkt (Summe): ',bezug:7:1);

writeln(kan);

writeln(kan,lm+'Ringgeometrie: Radius=',radius:6:2,' Höhe=',hoehe:6:2);

writeln(kan);writeln(kan,lm+'End-Of-File');

CLOSE(kan);

{-----}

assign(kan,'PLENUM.DOT');rewrite(kan); {schreibe die posting-Datei}

writeln(kan,' 0, 0'); {Mittelpunkt der Anlage}

FOR xi:=0 TO 23 DO BEGIN

 alfa:=rad(15.0*xi);

 writeln(kan,radius*cos(alfa):6:2,radius*sin(alfa):6:2)

END;

close(kan);

{----- schreibe die Meßpunkte-Datei -----}

{Die Ausgabe erfolgt nur für Punkte, die innerhalb der Anlage liegen}

assign(kan,'AUSGABE.DAT');rewrite(kan);

FOR xi:=1 TO punkte DO FOR yi:=1 TO punkte DO BEGIN

 x:=abstand*(xi-1)-ecke; {Bild ist Seitenverkehrt}

 x:=-x; {OST und WEST vertauschen}

 y:=abstand*(yi-1)-ecke;

 pura:=SQRT(SQR(x)+SQR(y)); {Entfernung vom Mittelpunkt}

 z:=100.0*grid[xi,yi]/bezug;

 IF radius>pura THEN writeln(kan,x:6:2,', ',y:6:2,', ',z:6:2)

END;

close(kan);

Textcolor(Lightgray); {Nacht}

gotoxy(1,23);writeln

END

TABELLEN . PAS

```

TITLE                (c) 1997,1998 by Dipl.-Ing. Siegfried W. Schmidt
;
PROGRAM Tabellen; USES crt; {SWS im APR.98}
{Tabellen für das Wind-Mittelungs-Programm im PIC-Assembler.}

CONST radius=125;
CONST HT=#9;

FUNCTION a2y(adres:BYTE):INTEGER;      {Komponente in Y-Richtung}
VAR alfa:REAL;
BEGIN
    alfa:=Pi*adres/120;                {Wertebereich ADRES ist 0..239}
    a2y:=ROUND(sin(alfa)*radius+radius);
END;

FUNCTION a2x(adres:BYTE):INTEGER;      {Komponente in X-Richtung}
VAR alfa:REAL;
BEGIN
    alfa:=Pi*adres/120;                {Wertebereich ADRES ist 0..239}
    a2x:=ROUND(cos(alfa)*radius+radius);
END;

VAR datei:TEXT;
VAR alfa:BYTE;

BEGIN

writeln;
Assign(datei,'SINUS.asm');rewrite(datei);
writeln(datei,HT,';quasi-Sinus-Tabelle für Nordkomponente');
writeln(datei,HT,';');
FOR alfa:=0 TO 240 DO BEGIN
    writeln(datei,HT,'RetLW',a2y(alfa):5,HT,';Â=',alfa:3);
    write('s');
END;
writeln(datei,HT,';');
writeln(datei,HT,'; EOT');
CLOSE(datei);

writeln;
Assign(datei,'COSINUS.asm');rewrite(datei);
writeln(datei,HT,';quasi-Cosinus-Tabelle');
writeln(datei,HT,';');
FOR alfa:=0 TO 240 DO BEGIN
    writeln(datei,HT,'RetLW',a2x(alfa):5,HT,';Â=',alfa:3);
    write('c');
END;
writeln(datei,HT,';');
writeln(datei,HT,'; EOT');
CLOSE(datei);

END.

```

PROTO.S5

```

OB 1      :      zyklische Bearbeitung
          :
          :SPA PB 4      Windrichtung bearbeiten
          :
          :SPA PB 1      Digitale Ausgabe
          :BE

OB 3      :      Alarmgesteuert (aus DB1)
          :
          :SPA PB 10     CO2-Meßwert übernehmen
          :BE

OB 13     :      Zeitgesteuert (aus DB1)
          :
          :SPA FB 1      CO2-Aufreicherung
          :BE

OB 21     :      Initialisierung
          :
          :SPA PB 23     Luftklappen in Grundstellung
          :
          :L   KB 32     E-Stand
          :T   MB 7
          :
          :SPA PB 5      Regler initialisieren und sperren
          :
          :
          :BE

PB 1      :      Anzeige der Ergebnisse je nach Drahtbrücke
          :U   E 32.0
          :SPB PB 6      normaler Betrieb (VVP & Gasdosierung)
          :U   E 32.1
          :SPB PB 7      Windrichtung
          :U   E 32.2
          :SPB PB 8      CO2-Konzentrationen
          :U   E 32.3
          :SPB PB 9      Letzter CO2-Meßwert mit Kanalnummer
          :U   E 32.4
          :SPB PB 34     Reglerausgang (Stellwert)
          :BE

PB 4      :      Windrichtung bearbeiten
          :
          :SPA FB 3      Erregerspannung für Ringpoti ausgeben, ...
Name      :RICHTUNG      Spannung einlesen und normieren
          :
          :L   MB 3      Ventilmuster berechnen
          :L   KH 0001
          :!=F
          :SPB PB 21
          :L   MB 3
          :L   KH 0003
          :!=F
          :SPB PB 22
          :L   MB 3
          :L   KH 0005
          :!=F
          :SPB PB 23
          :L   MB 3
          :L   KH 0007
          :!=F
          :SPB PB 24
          :L   MB 3
          :L   KH 0009
          :!=F
          :SPB PB 25
          :L   MB 3
          :L   KH 000B
          :!=F

```

```

:SPB PB 26
:BE

PB 5      :A  DB  30      Regler Initialisierung
          :L  KB  37      AUS-Schalten
          :T  DR  11      Steuerbyte
          :SPA OB 251
          :
          :L  KF +500
          :T  DW  1        K
          :
          :L  KF+1000
          :T  DW  3        R
          :
          :L  KF +100
          :T  DW  5        TI
          :
          :L  KF  +0
          :T  DW  7        TD
          :
          :L  KH 000F
          :T  DW 14        BGUG
          :
          :L  KH 0000
          :T  DW 16        BGOG
          :T  MB  5        Ausgabebyte
          :
          :BE

PB 6      :
          :
          :L  MB  1        Luftklappen (4 VVP) und
          :L  MB  5        Reglerausgang (4 bit)
          :+F              überlagern ...
          :T  AB 32        und ausgeben.
          :
          :L  MB  2        Luftklappen (8 VVP) ...
          :T  AB 33        ausgeben.
          :BE

PB 7      :
          :
          :L  MB  3
          :T  AB 32
          :T  AB 33
          :BE

PB 8      :
          :
          :L  MB 20        ... in der Umgebungsluft (Kanal #2)
          :T  AB 32
          :L  MB 21        ... im Ring (Kanal #3)
          :T  AB 33
          :BE

PB 9      :
          :
          :L  MB  9        ... Interrupt und ...
          :T  AB 32
          :L  MB 10        ... Meßwert (roh)
          :T  AB 33
          :BE

PB 10     :
          :
          :U  E 35.4        Kanal 1 (pin #6)
          :R  E 35.4        rücksetzen
          :SPB PB 11        bearbeiten
          :
          :U  E 35.5        Kanal 2 (pin #7)
          :R  E 35.5        rücksetzen
          :SPB PB 12        bearbeiten
          :
          :U  E 35.6        Kanal 3 (pin #8)

```

```

:R  E 35.6      rücksetzen
:SPB PB 13      bearbeiten
:
:U  E 35.7      Kanal 4 (pin #9)
:R  E 35.7      rücksetzen
:SPB PB 14      bearbeiten
:
:              Nullwert-Korrektur
:
:L  MB 12      Referenz
:L  MB 11      - Nullwert
:-F
:T  MB 20
:
:L  MB 13      Ring
:L  MB 11      - Nullwert
:-F
:T  MB 21
:
:L  MB 14      spare channel
:L  MB 11      - Nullwert
:-F
:T  MB 22
:
:A  DB 30      Reglerfreigabe
:L  KB 33
:T  DR 11      ins Steuerbyte schreiben
:
:BE

PB 11      :      Interrupt #1 bearbeiten
:
:SPA FB 5      Meßwert einlesen (in MB 10)
Name      :CO2WERT
:
:L  MB 10      Wert holen und umbetten
:T  MB 11
:
:L  KB 1      Interrupt (1) merken
:T  MB 9
:BE

PB 12      :      Interrupt #2 bearbeiten
:
:SPA FB 5      Meßwert einlesen (in MB 10)
Name      :CO2WERT
:
:L  MB 10      Wert holen und umbetten
:T  MB 12
:
:L  KB 2      Interrupt merken
:T  MB 9
:BE

PB 13      :      Interrupt #3 bearbeiten
:
:SPA FB 5      Meßwert einlesen (in MB 10)
Name      :CO2WERT
:
:L  MB 10      Wert holen und umbetten
:T  MB 13
:
:L  KB 3      Interrupt merken
:T  MB 9
:BE

PB 14      :      Interrupt #4 bearbeiten
:
:SPA FB 5      Meßwert einlesen (in MB 10)
Name      :CO2WERT
:
:L  MB 10      Wert holen und umbetten
:T  MB 14
:
:L  KB 4      Interrupt merken
:T  MB 9

```

```

:BE

PB 21      :      Azimut 0°
           :L    KH 1038
           :T    MW  1
           :BE

PB 22      :      Azimut 60°
           :L    KH 2070
           :T    MW  1
           :BE

PB 23      :      Azimut 120°
           :L    KH 40E0
           :T    MW  1
           :BE

PB 24      :      Azimut 180°
           :L    KH 80C4
           :T    MW  1
           :BE

PB 25      :      Azimut 240°
           :L    KH 008D
           :T    MW  1
           :BE

PB 26      :      Azimut 300°
           :L    KH 001E
           :T    MW  1
           :BE

PB 34      :      Ausgabe Regler (T&M)
           :A    DB 30      Regler-DB aufschlagen
           :
           :L    DW  48      Stellwert holen ...
           :T    AB  32      ... und ausgeben.
           :
           :L    MB  21      Istwert
           :T    AW  33
           :
           :BE

FB 1
Name      :      Regler aufrufen (Aufreicherung)
           :AUFREICH
           :
           :A    DB 30      Regler-DB aufschlagen
           :L    MB 20      Referenzwert holen, ...
           :SLW   1        verdoppeln und ...
           :T    DW  9        als Sollwert vorgeben.
           :L    MB 21      Ringkonzentration holen und ...
           :T    DW 22      als Istwert ablegen.
           :SPA   OB 251    Regler aufrufen
           :
           :L    DW 44      y vor BGOG (T&M)
           :L    DW 38      e (T&M)
           :
           :L    DW 48      Stellwert (4 bit) holen, ...
           :T    MB  5        und ablegen.
           :
           :BE

FB 3
Name      :      Windrichtung bestimmen
           :RICHTUNG
           :
           :L    KH 0245    Kalibrationskonstante (Ausgangsspannung)
           :SLW  4          Status bits einfügen
           :T    PW 40      zum D/A-Wandler schreiben
           :
           :L    PW 40      A/D-Wandler auslesen

```

	:SRW 4	Statusbits entfernen
	:SRW 5	Division (durch 32)
	:T MB 3	Wert ablegen
	:BE	
FB 5	:	Meßwert vom CO ₂ -Monitor holen
Name	:CO2WERT	
	:L PW 42	A/D-Wandler lesen
	:SRW 4	Statusbits eliminieren
	:SRW 3	Skalierung (7 data bit + 1 Overflow)
	:T MB 10	im Zwischenmerker ablegen
	:BE	