

## Sommersmog

Im Rahmen des Projektes ENV 14 Sommersmog wurden Fragen der Expositionsforschung zu Luftverunreinigungen durch Sommersmog, Fragen der Modellierung des zeitlichen Verhaltens dieser Luftbestandteile und Fragen von deren Wirkung auf den kindlichen Organismus behandelt. Das Projekt ist somit in die Unterprojekte

- Expositionsforschung zum Sommersmog und
- gesundheitliche Effekte dieser Komponenten

gegliedert.

Im folgenden werden in einem ersten Teil die Ergebnisse zur Expositionsforschung und Modellierung, wobei besondere Aufmerksamkeit auf die Komponenten Stickoxide und Ozon gelegt wurde, und in einen zweiten Teil die Ergebnisse umweltepidemiologischer/umweltmedizinischer Studien vorgestellt.

## 1. Fallstudien zur Ozon-Belastung in Mendoza

SCHLINK, U., PULIAFITO, J., HERBARTH, O., PULIAFITO, E., RICHTER, M.,  
BEHLER, J. C., REHWAGEN, M., GUERREIRO, P. E., PULIAFITO, C., SCHILDE, M.

### Einleitung

Messungen zeigen, daß in Leipzig zwischen 1992 und 1994 der EU Grenzwert für Ozon von  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (1-h-Mittelwert) 40 mal überschritten wurde. Generell wird auf der Nordhalbkugel in der Sommerperiode zunehmend die Ausbildung von Sommersmog registriert und intensiv untersucht (SEINFELD 1975, RAO et al., GRAEDEL; CRUTZEN). In Argentinien gibt es im Gegensatz dazu bisher nur relativ wenige Messungen zur Luftgüte (z.B. in Tucumán, ENDLICHER, SCHULTZ). Mit dem Ziel, die Luftverschmutzung in der Region von Mendoza, Westargentinien, abzuschätzen und mit europäischen Daten zu vergleichen, wurden Fallstudien durchgeführt. Vorerst stand besonders die Frage der Ozonbelastung im Vordergrund.

Die photochemische Bildung des Ozons aus Verkehrsabgasen unter Einfluß der UV-Strahlung der Sonne läßt in Mendoza ein deutlich höheres Niveau der Ozonkonzentration als in Leipzig erwarten.

Dazu wurden an den in Abb. 1 markierten Meßpunkten der Tagesverlauf der Ozonkonzentration in Form von 30-min-Mittelwerten kontinuierlich registriert und mit Messungen in Leipzig verglichen.

Die Meßergebnisse werden diskutiert und mit Hilfe eines einfachen Modellansatzes zu erklären versucht.

## 2. Methode

Als Meßeinrichtung wurde ein nach dem Prinzip der UV Absorption arbeitender  $O_3$ -Monitor verwendet und an den bezeichneten Meßorten platziert. Um jedoch die räumliche Verteilung des Ozons und seine Entwicklung über einen längeren Zeitraum detaillierter zu analysieren, sind weitere Messungen erforderlich.

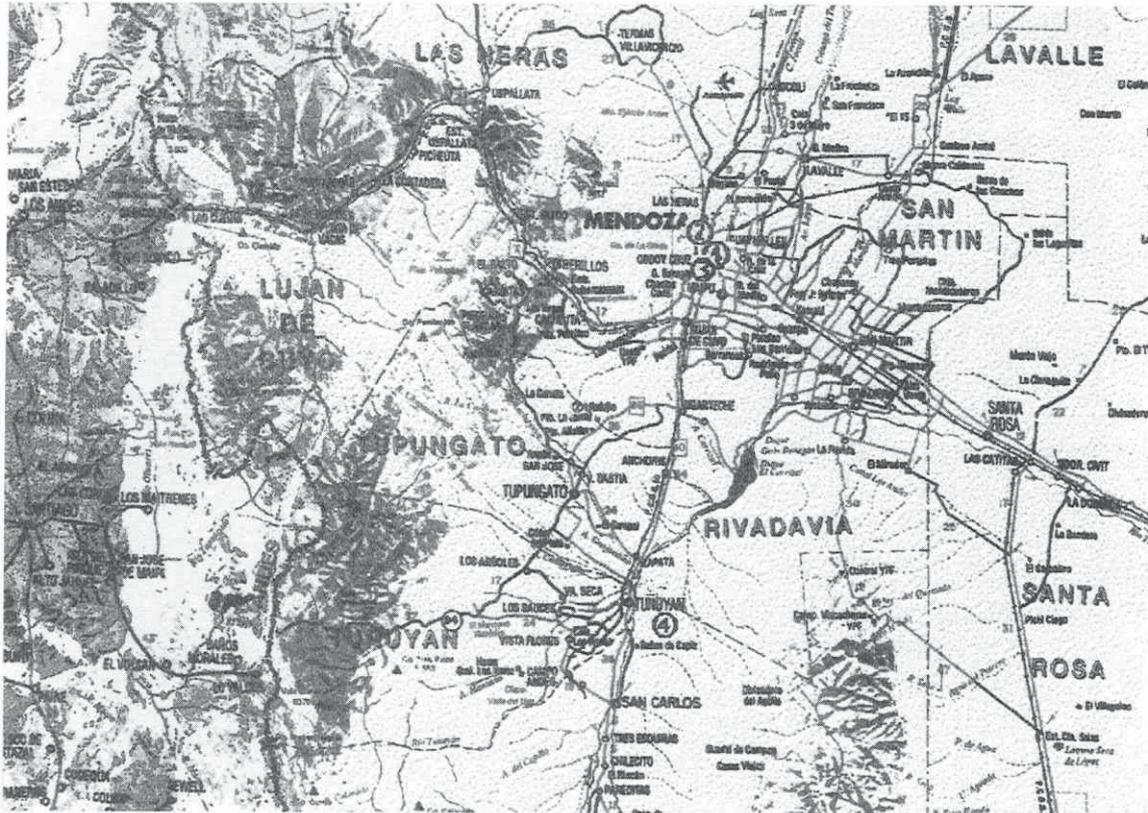


Abb. 1: Karte der Region Mendoza, die Meßorte sind mit Kreisen markiert (Meßorte: IEMA (1), Escuela Corazón de María (2), Escuela Reyes Cathólicos (3) und Escuela de Tunuyán (4))

### Lage und Besonderheiten

Die Provinz Mendoza liegt im Westen Argentiniens am Rande der Anden. Ein großer Teil des Territoriums (ca. 250.000 km<sup>2</sup>) ist arid oder semiarid. Der jährliche Niederschlag liegt bei etwa 220 mm.

Fast alle Einwohner leben in künstlich angelegten Oasen (Nord-, Zentral- und Süd-Oase). Die insgesamt bewässerte Fläche liegt dabei bei 3 % des Provinzterritoriums. Nahezu 70 % der Bevölkerung leben in der Nord-Oase. Dort befindet sich auch die Mendoza Metropolitan Area mit 815.000 Einwohnern. Ihre geographische Lage beträgt 32° 50'' südliche Breite und 68° 50'' westliche Länge. Sie hat eine mittlere Höhe von 750 m über N.N.

Die Nähe zu den Anden (mittlere Höhe 5000 m über N.N.) hat starken Einfluß auf die Luftströmungen. In den Wintermonaten entstehen häufig Subsidenzinversionen in Höhen zwischen 100 und 200 Metern. Die Sonnenstrahlung nimmt im Dezember Werte von 700 cal/m<sup>2</sup> und im Juni 250 cal/m<sup>2</sup> an. Nachts gibt es starke albedobedingte Abkühlungen.

Zwischen Mai und August sind windstille Situationen vorherrschend. Dann ist die tägliche Luftzirkulation zwischen den Bergen und der Ebene die einzige und schwache Ventilation für die Stadt.

Eine Ausnahme bilden (vorwiegend im August und September) die starken *Zonda*-Winde mit Windgeschwindigkeiten bis zu 60 km/h. Sie überqueren aus nordwestlicher Richtung die Anden, was mit einer Temperaturerhöhung und einer drastischen Verringerung der Feuchte verbunden ist.

Mendoza hat nahezu keine  $\text{NO}_3$  produzierende Schwerindustrie innerhalb des Stadtgebietes. Lediglich im Süden existiert ein petrochemischer Industriekomplex. Als Quelle für Luftverschmutzungen dominiert daher der Straßenverkehr.

Die typischen Schadstoffe des europäischen Wintersmogs fehlen.

Einige weitere meteorologische und klimatologische Aspekte zu Argentinien werden z.B. von WÖLCKEN und ENDLICHER gegeben.

### Räumliche Ozonverteilung

Abb. 2 zeigt die gemessenen Ozonwerte. Sie betreffen unterschiedliche Meßstellen, so daß die Kurve den Vergleich der Meßorte erlaubt.

Folgende Schlußfolgerungen können gezogen werden:

Morgens ist parallel zum Sonnenaufgang ein Anstieg der Ozonkonzentration zu verzeichnen. Dies steht in Übereinstimmung mit der photochemischen Ozonbildung und soll im nächsten Abschnitt modelliert werden.

Das Konzentrationsniveau des Ozon scheint auf ca.  $0,10 \text{ mg/m}^3$  begrenzt zu sein, d.h. man kann innerhalb und außerhalb der Stadt eine nahezu homogene Ozonbelastung annehmen. Dieses

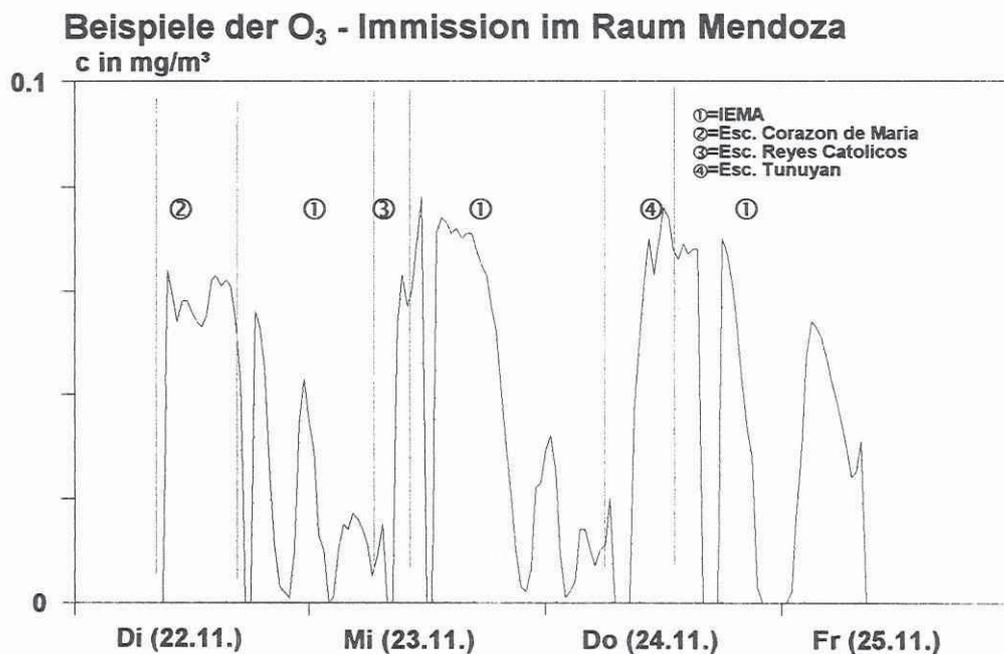


Abb. 2: Verlauf der Ozonkonzentration an verschiedenen Meßorten in der Region Mendoza während einer Meßkampagne

Ergebnis ist bemerkenswert. Es steht im Gegensatz zur eingangs diskutierten Erwartung und bedarf einer Erläuterung.

Nach Sonnenuntergang wird an manchen Tagen gegen Mitternacht ein erneuter Konzentrationspeak festgestellt.

## Modellierung

Der photochemische Prozeß der Ozonbildung ist sehr komplex. Er wurde erstmals von CHAPMAN (1930 und 1934) intensiv studiert. Seitdem konnte in vielen Arbeiten die Bedeutung der Stickoxide, des Kohlenmonoxids und der Kohlenwasserstoffe gezeigt werden. Man fand (SONNEMANN), daß die Ozonbildung in einer charakteristischen Zeit von einigen Sekunden vor sich geht. Deshalb können bei der hier angestellten Betrachtung von 30-min-Mittelwerten der Konzentration  $c(t)$  dynamische Effekte der photochemischen Bildungsreaktion vernachlässigt werden.

Damit bestimmt in dieser Zeitskala die Intensität der Sonnenstrahlung  $I$  die Ozonbildung. Es soll daher eine direkte Beziehung zwischen der Strahlung  $I$  und der Ozonkonzentration angenommen werden:

$$c(t) \propto I(t) \quad (1)$$

Dispersion und Absorption schwächen die Strahlung entsprechend dem Lambert'schen Extinktionsgesetz:

$$I = I_0 e^{-\alpha m} \quad (2)$$

$I$  ist die Solarkonstante,  $\alpha$  der Extinktionskoeffizient und  $m$  die optische Luftmasse. Der Sonnenstrahl fällt schräg durch die Atmosphäre der Dicke  $h$ . Somit hängt die optische Luftmasse  $m$  vom Zenitwinkel der Sonne und damit von der Zeit  $t$  des Helltages ( $T$ ) ab:

$$m = \frac{h}{\sin(t/T)} \quad (3)$$

Zur Zeit  $t$  ist die Ozonkonzentration

$$c^{[E]}(t) = c_0 e^{-\frac{a}{\sin(t/T)}} \quad (4)$$

zu erwarten, wobei  $c_0$  und  $a$  unbekannte Parameter sind.

Die erwartete Ozonkonzentration  $c^{[E]}(t)$  zeigt sich besonders in den An- und Abstiegsflanken des gemessenen täglichen Verlaufs. Nach Schätzung der Parameter läßt sich (4) als Kurve zeichnen. Subtrahiert man  $c^{[E]}(t)$  vom mittleren täglichen Konzentrationsverlauf  $c^{[M]}(t)$ , so erhält man eine Differenz  $\Delta c(t)$ . Diese entsteht durch Reaktionen des Ozons mit z.B. CO oder Kohlenwasserstoffen (HC). Beide sind in Autoabgasen enthalten und werden in (5) mit X bezeichnet.



Daher gibt der Tagesverlauf von  $\Delta c(t)$  den Gang der Verkehrsbelastung wieder.

## 6. Parameterbestimmung

Um die Parameter in (4) zu schätzen, wurde aus allen Tagesverläufen der Sommerperiode mit autochtoner Wetterlage (wolkenlos) ein mittlerer Tagesverlauf der Ozonkonzentration  $c^{[M]}(t)$  gebildet. Abb. 3 zeigt diesen typischen mittleren Verlauf mit einem Vertrauensbereich von einer Standardabweichung. Zusätzlich ist die nach dem angepaßten Modell (4) zu erwartende Ozonkonzentration  $c^{[E]}(t)$  eingezeichnet.

Zum Vergleich wurde für Leipzig analog verfahren (Abb. 4). In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Parameterschätzung angegeben. Der für Mendoza größere Parameter  $a$  steht im Einklang mit dem niedrigeren Ozonniveau in dieser Stadt.

Tab. 1: Parameter der angepaßten Modelle

Parameter	Mendoza	Leipzig
$c_0$	0,26 mg/m <sup>3</sup>	0,24 mg/m <sup>3</sup>
$a$	0,52	0,23

### Verkehrsbedingte Emissionen

Um die Ursachen für die geringe Ozonbelastung in Mendoza gegenüber Leipzig zu finden, wurden die Abgase von Fahrzeugmotoren untersucht (10). In Leipzig kann die Verkehrsemission insgesamt als vorwiegend durch den Katalysator beeinflußt angesehen werden. In Mendoza ist dies dagegen nicht der Fall. Der Automobilpark (etwa 300.000 Fahrzeuge) hat ein mittleres Alter von 10 Jahren und ist kaum mit Katalysatoren ausgerüstet. Erst in jüngerer Zeit (seit Ende 1992) tritt eine merkliche Erneuerung der Fahrzeuge ein.

Tab. 2: Schadstoffkonzentrationen in mg/m<sup>3</sup> bei Motoren mit und ohne Abgaskatalysator

Komponente	mit Katalysator	ohne Katalysator
Butanal	3,0	1,5
Benzol	1,8	1,9
Methylcyclohexan	0,5	0,2
Toluol	5,5	5,0
m+p-Xylol	1,7	1,3
o-Xylol	1,3	1,0
1,2,4-Trimethylbenzol	1,5	1,3

Das mittlere Verhältnis der in Tab. 2 angegebenen Abgase beträgt 1.45, d.h. Motoren ohne Katalysator emittieren 45% mehr Kohlenwasserstoffe als solche mit Abgasbehandlung. Diese Beobachtung scheint durch weitere Messungen der Schadstoffbelastung in beiden Städten gestützt zu werden. Abb. 5 vergleicht die Mittelwerte von flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen (VOC) an verkehrsbeeinflußten Orten.

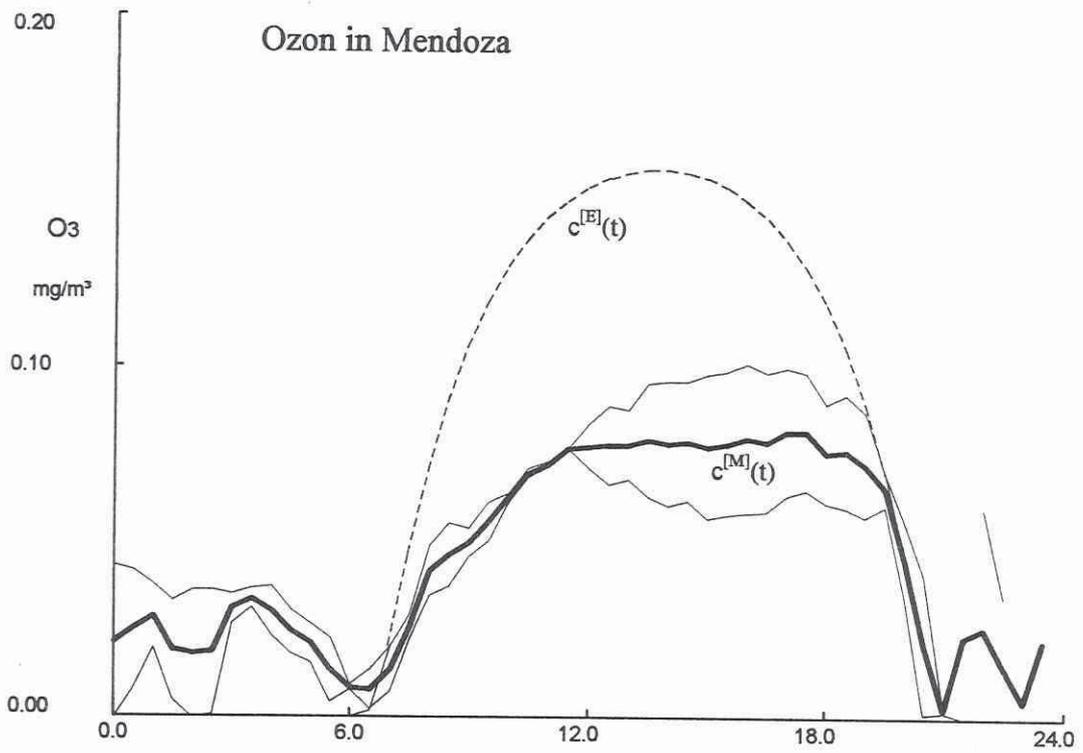


Abb. 3: Mittlerer Verlauf der Ozon- konzentration (dicke Linie) und Modellanpassung (Station IEMA - Mendoza)

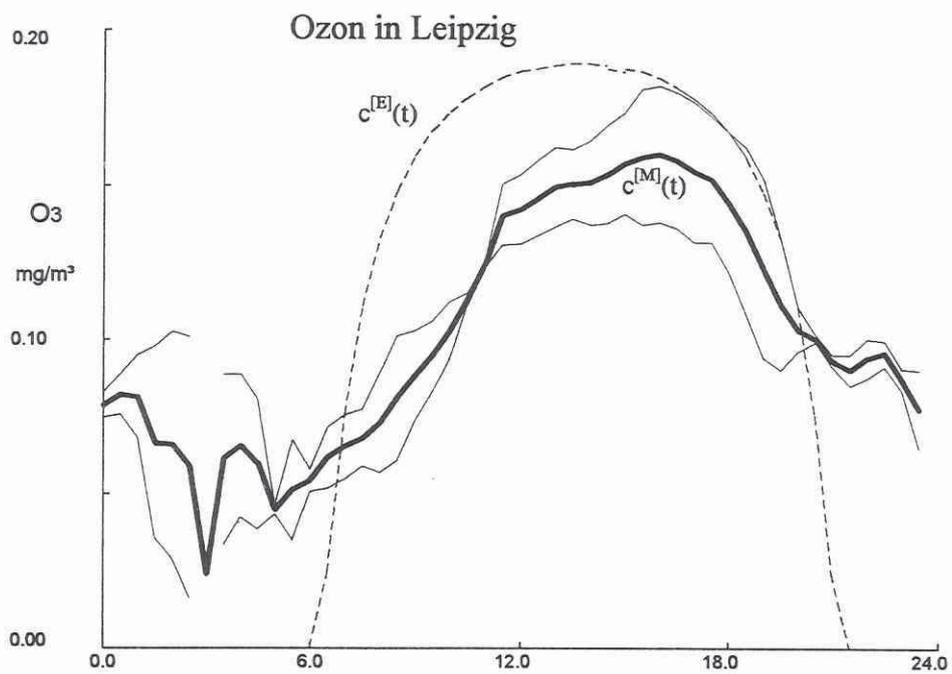


Abb. 4: Mittlerer Verlauf der Ozonkonzentration (dicke Linie) und Modellanpassung (Station UFZ - Leipzig)

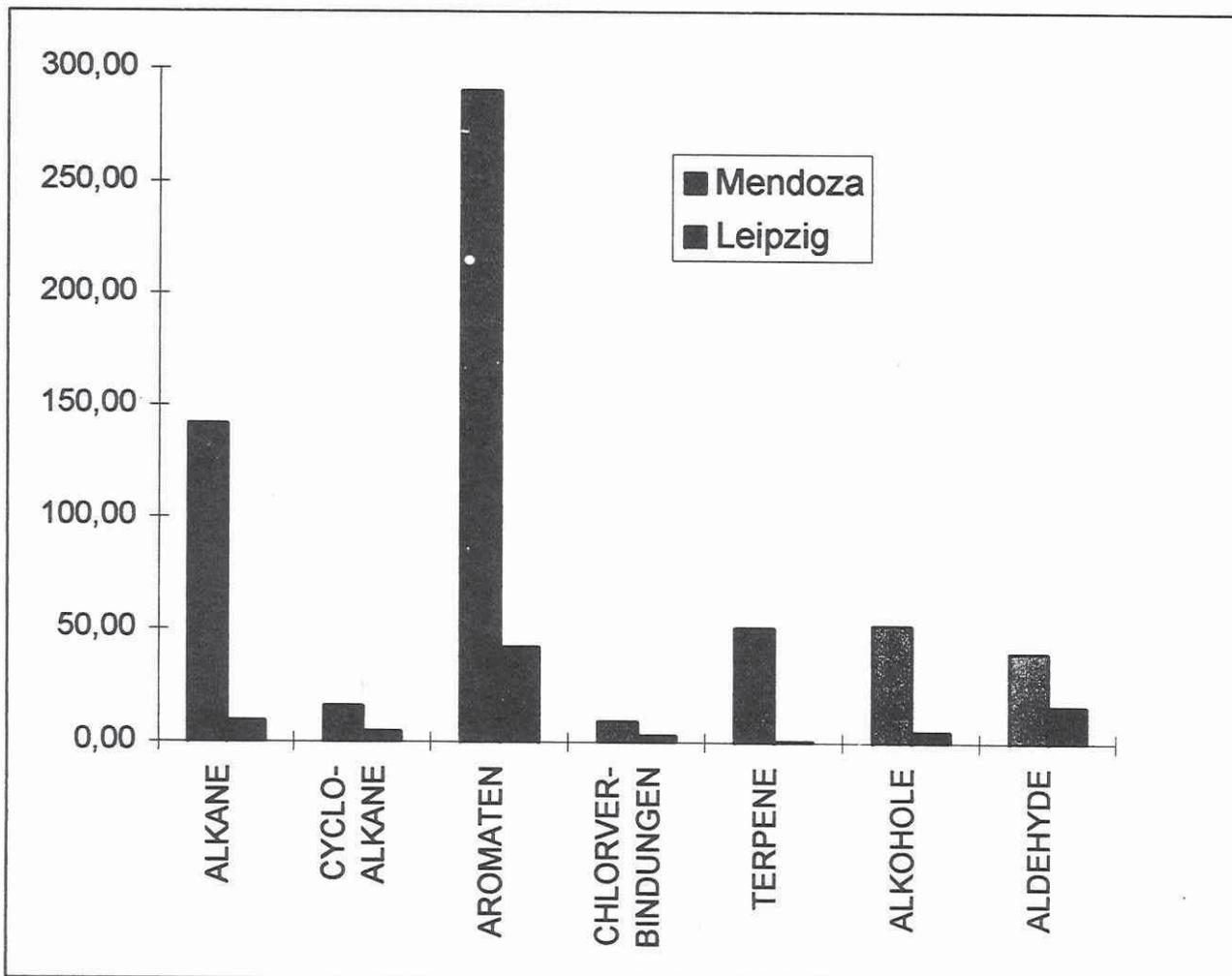


Abb. 5: Belastung durch VOC an verkehrsbeeinflussten Orten in Mendoza und Leipzig.

## Diskussion

Untersuchungen ergaben, daß in Mendoza im Vergleich zu Leipzig verkehrsbedingte Kohlenwasserstoffe (HC) stärker emittiert werden. So wurden dort in hochbelasteten Stadtteilen  $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$  HC und in Leipzig  $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$  HC im Jahre 1994 im Mittel gemessen. Andererseits lag im gleichen Jahr der Mittelwert der  $\text{NO}_2$ -Belastung bei  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für Mendoza und  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für Leipzig. Somit beträgt das HC/ $\text{NO}_2$ -Verhältnis in Mendoza 7,6 und ist höher als in Leipzig mit 2,2.

Die Gründe liegen im Fahrzeugpark, der älter und bisher kaum mit Katalysatoren ausgerüstet ist. Da bei älteren Motoren der Leistungsabfall durch Verstellung des Vergasers zu stärker angereicherten Benzin-Luft-Gemischen ausgeglichen wird, ist dies eine Ursache für das höhere HC/ $\text{NO}_x$ -Verhältnis. Nach SEINFELD (1975) bewirkt dies auch eine erhöhte Emission von CO, parallel zum Ausstoß von Kohlenwasserstoffen.

Die Unterschiede in den Verkehrsabgasen liefern eine Erklärung für die in Mendoza gefundenen Ozonwerte, die viel niedriger sind, als es aufgrund der starken Sonnenstrahlung erwartet wurde. Der einfache Ansatz für eine quantitative Modellierung des Tagesganges der Ozonkonzentration verwendet die Sonnenstrahlung als Eingangsgröße.

Das Modell (Gleichung (4)) wurde an den morgendlichen Anstieg und den abendlichen Abfall des gemessenen Ozonwertes angepaßt. Daraus kann man den zu erwartenden Wert  $c^{[E]}(t)$  ableiten. Die Annahme dabei ist, daß sich die photochemische Ozonbildung stets in einem Gleichgewichtszustand befindet, dessen Lage durch die Stärke der Bestrahlung festgelegt ist. Das Modell berücksichtigt nicht die Reaktionen des Ozons mit anderen Stoffen, die im photochemischen Gleichgewicht nicht enthalten sind.

Somit drückt die Differenz  $\Delta c(t)$  zwischen dem zu erwartenden und dem mittleren gemessenen Ozonwert die Belastung der Luft mit oxidierbaren Substanzen aus. Speziell sind dabei die Verkehrsemissionen, wie  $\text{NO}_x$ , CO, HC zu nennen.

Andere oxidierbare Substanzen, die in unveränderlicher Konzentration in der Luft enthalten sind, zeigen sich in  $\Delta c(t)$  nicht, da sie bereits im „Background“, d.h. in den Parametern des Modells (4) enthalten sind. Der zeitliche Verlauf von  $\Delta c(t)$  ist in den Abbn. 6 und 7 dargestellt. Er spiegelt den typischen täglichen Verlauf der Verkehrsbelastung wider und damit das unterschiedliche Mobilitätsverhalten der Bewohner beider Städte

Ein weiteres Ergebnis der vorliegenden Fallstudien zeigt sich in der unterschiedlichen Varianz des mittleren Ozonverlaufs von Mendoza und Leipzig (Abbn. 3 und 4). Diese Variationsmuster der Luftverschmutzung sind stark von den Wetterbedingungen beeinflusst.

Die Hochdruckwetterlagen Europas haben mehr atmosphärische Störungen und Wolken als im Gebiet von Mendoza, was in der starken Variation der Ozonkurve für Leipzig zu erkennen ist. Gegen Mitternacht treten oft Ozonpeaks auf. Das könnte seine Ursache im Zuströmen ozonreicherer Luft von der äußeren Umgebung zur City haben. Dies zu klären wäre es wert, nach solchen ozonreicheren Gebieten zu suchen.

Das Ziel der Studie war die Bestimmung des photochemischen Smogs in Mendoza. Die starke Solarstrahlung ließ hohe Ozonwerte vermuten. Die gemessenen Konzentrationen waren dagegen niedriger als in Leipzig.

Mit Hilfe eines Modellansatzes und dem Vergleich der Emissionen von Kraftfahrzeugen in beiden Städten muß die Ursache in der verkehrsinduzierten Backgroundverschmutzung der Luft gesehen werden. Gemeint sind  $\text{NO}_x$ , CO, HC. Sie treten sowohl als Vernichter als auch als Katalysator bei der Ozonbildung auf.

In Abgrenzung zu dem für hohe Ozonwerte stehenden sekundären Smog spricht man bei hoher Konzentration solcher Substanzen oft von primärem photochemischen Smog. Es ist anzunehmen, daß gesundheitliche Effekte bei der Bevölkerung in städtischen Ballungsgebieten auch von diesem primären Smog ausgelöst werden.

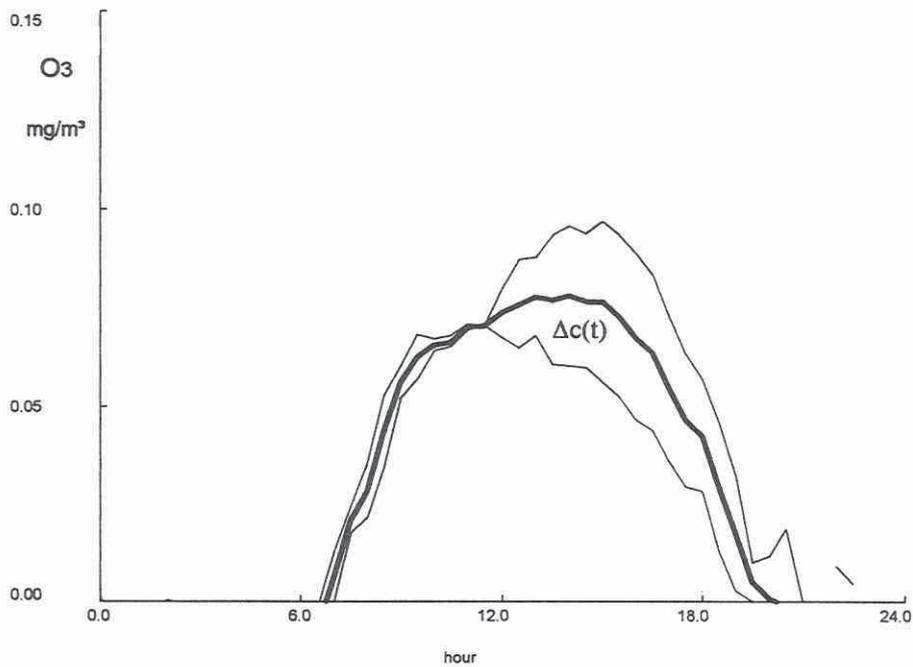


Abb. 6: Mittlerer Verlauf (dicke Linie) und Variation von  $\Delta c(t)$  für Mendoza

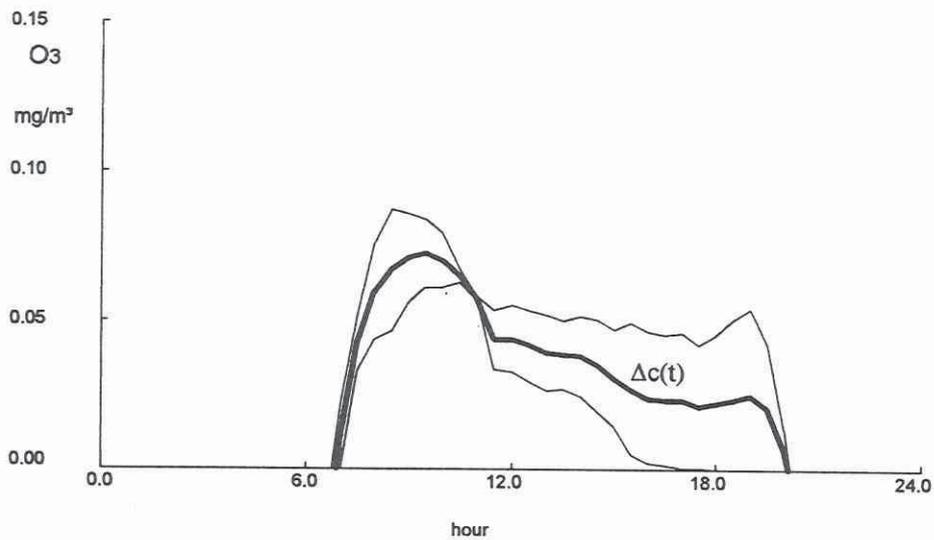


Abb. 7: Mittlerer Verlauf (dicke Linie) und Variation von  $\Delta c(t)$  für Leipzig

## **Autoren**

Uwe SCHLINK, Olf HERBARTH, Matthias RICHTER, Maik SCHILDE, Martina REHWAGEN

UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH  
Sekt. Expositions- und Epidemiologie  
PF 2, 04301 Leipzig, Germany

José Luis PULIAFITO, Enrique PULIAFITO, Pablo E. BEHLER, Juan Carlos GUERREIRO, Carlos PULIAFITO

Universidad de Mendoza  
IEMA - Instituto para el Estudio del Medio Ambiente  
Av. Boulange Sur Mer 665  
5500 Mendoza

Nr. 3/1997

---

**Regionalökologie**

Tagungsbericht und wissenschaftliche  
Beiträge des Deutsch-Argentinischen  
Workshops  
Mendoza - Argentinien

---

Brigitte Großer (Hrsg.)