

Umweltforschungsplan
des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Förderkennzeichen 297 42 848

"Analyse historischer Datenreihen und Entwicklung einer Methode zur
quasi-wetterbereinigten Trendanalyse von bodennahem Ozon"

Teilbericht 1
Trendanalyse der täglichen Ozonmaxima der Jahre 1990 bis 1997

von

Dr. Wolfgang Enke

I.D.E.A:
Immissionsdaten Erfassung und Analyse
Karin Seewöster
Wandelsweg 89
4594 Gelsenkirchen

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTES

November 1998

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Zielstellung des Vorhabens	4
2 Datenbasis	5
3 Darlegung der Methode	11
3.1 Elimination des Jahresgangs aus den Ozonmeßreihen	12
3.1.1 Berechnung stationsbezogener Monatsmittelwerte	13
3.1.2 Spline-Interpolation zur Erzeugung geglätteter Jahresgänge	14
3.1.3 Bereitstellung jahresgangbereinigter Reihen	16
3.2 Fehlwertersetzung	16
3.2.1 Zeitliche Interpolation	17
3.2.2 Räumliche Interpolation	17
3.3 Berechnung der täglichen Ozonmaxima	20
3.4 Wetterbereinigung der täglichen Ozonmaxima	21
3.4.1 Bereitstellung potentieller Einflußgrößen	22
3.4.1.1 Berechnung mittlerer Jahresgänge der Klimadaten	23
3.4.1.2 Berechnung von Stabilitätsgrößen aus Radiosondenaufstiegen	23
3.4.1.3 Bereitstellung der objektiven Wetterlagen	25
3.4.1.4 Berechnung der aus Ozonklimatologien abgeleiteten Ozonmaxima	26
3.4.1.5 Bestimmung der Pseudopersistenz	26
3.4.2 Anwendung eines erwartungstreuen, multiplen screening Regressionsverfahrens zur Selektion der stationsspezifischen Regressionsgleichungen	26
3.4.3 Berechnung der ‘wetterbereinigten’ Datenreihen	33
4 Ableitung von Trends der täglichen Ozonmaxima	36
4.1 Aufprägung der stationsspezifischen Jahresgänge	36

4.2	Normierung der Streuungen der ‘wetterbereinigten’ Reihe auf das Niveau der Originalreihen	37
5	Diskussion der Ergebnisse	38
6	Schlußbemerkungen	60
7	Literaturangaben	61
	Zusammenfassung und Thesen	64

1 Zielstellung des Vorhabens

Die Zielstellung des Forschungsvorhabens gliedert sich in zwei grundlegende Arbeitsschwerpunkte:

- I Die Validierung von Ozonmeßreihen einschließlich der Berechnung statistischer Kenngrößen
- II Trendanalyse wetterbereinigter Ozonmeßreihen

Immissionsmessungen dienen einerseits der Realisierung von Alarmfunktionen, andererseits aber auch der Erfolgskontrolle temporärer als auch langfristiger emissionsmindernder Maßnahmen. Besonderes Interesse besteht an belastbaren Aussagen zu Änderungen (Trends) der Ozonbelastung infolge von Emissionsverringerungen bei den Ozonvorläufern NO_x und VOC, wobei der Frage nach den Trends der Überschreitung von Ozonschwellenwerten (180µg/m³ bzw. 240µg/m³) für den Zeitraum von 1990 bis 1997 oberste Priorität zukommt. Dieser Tatsache Rechnung tragend untergliedert sich der zweite Teil des Vorhabens, die Trendanalysen der wetterbereinigten Ozonmeßreihen, gleichfalls in zwei Teile:

Die Trendanalyse der Sommerhalbjahre 1990 bis 1997, die auf eine Beurteilung der Entwicklung der Ozonspitzenkonzentrationen zielen.

Die umfassende Trendanalyse der von Bund und den Ländern vorliegenden langen Ozonreihen für unterschiedliche Aggregierungen (Jahres- und Monatsmittelwerte, Maxima, Überschreitungshäufigkeit vorgegebener Schwellenwerte usw.)

Der vorliegende Zwischenbericht beschäftigt sich mit dem ersten Teil der wetterbereinigten Trendanalyse von Ozonmeßreihen für den Zeitraum von 1990 bis 1997. Dieser Teil wurde auf Anregung des BMU auf die Anfangsphase des Vorhabens gelegt.

Notwendige Voraussetzung für Trendanalysen sind validierte Ozonmeßreihen. Im UBA verfügbare weitestgehend geprüfte Ozondatenreihen für den Zeitraum von 1990 bis

1997 gaben Anlaß, den Untersuchungen der langen Ozonreihen die Trendanalysen für diesen kürzeren, achtjährigen Zeitraum voranzustellen.

Im Rahmen der Arbeit, bei der eine tiefere Prüfung der Daten vorgenommen wurde, als dies bisher am UBA erfolgen konnte, zeigte sich, daß in den vorliegenden Reihen für einzelne Stationen auch im Zeitraum von 1990 bis 1997 "verdächtige Auffälligkeiten" vorhanden sind. Der für die erste Arbeitsetappe sehr eng kalkulierte Zeitfond ließ jedoch eine Abklärung dieser Sachverhalte, die nur in Verbindung mit den betroffenen Meßnetzzentralen der Länder erfolgen kann und sollte, noch nicht zu. Dies muß dem weiteren Verlauf des Vorhabens vorbehalten bleiben.

Trotz dieser Datenprobleme sind die gesteckten Ziele der ersten Arbeitsetappe in vollem Umfang erfüllt. Lediglich bei Einzelstationen können sich nach Klärung von Unstimmigkeiten in den Datenreihen andere Aussagen bezüglich des Trendverhaltens ergeben.

Erste Ergebnisse einer wetterlagenspezifischen Trenduntersuchung liegen ebenfalls vor.

2 Datenbasis

Für die Untersuchungen der ersten Etappe des Forschungsvorhabens wurden 3 Datentypen für den Zeitraum von 1990 bis 1997, April bis September, benötigt:

Stundenwerte des Bodenozons von 385 Stationen der Jahre 1990 bis 1997

Diese Daten wurden vom Umweltbundesamt und den Immissionsmeßzentralen der Länder zur Verfügung gestellt. Nach einer Qualitätskontrolle der Datensätze wurde entschieden, welche Meßreihen in die Trenduntersuchungen einbezogen werden. Zu diesem Zweck wurden für alle 385 Meßreihen die Ausfälle dokumentiert (Anlage 1). Ein Monat wird als 'geeignet' betrachtet, wenn die Messungen an mehr als 20 Tagen vorhanden waren. Diese Monate wurden mit einem '+' versehen, andernfalls mit einem '-'. Ein Block in Anlage 1. entspricht den 12 Monaten eines Jahres. Es ist leicht ersichtlich, daß sowohl ganze Jahre als auch nur einzelne Monate fehlen. In die Trenduntersuchungen einbezogen wurden nur solche Stationen, die, von einigen 'Fehlmonaten' abgesehen, vollständig vorhanden sind. Da für die neuen Bundesländer

keine Ozonreihen verfügbar sind, die diesen Kriterien genügen, wurden die oben genannten Anforderungen in der Hinsicht modifiziert, daß ein Jahr vollständig fehlen durfte. Es verblieben 167 Stationen, die für die weitere Bearbeitung zur Verfügung standen. In Anlage 2 sind diese Stationen mit zugeordnetem Stationstyp (Verkehr-, Stadt -, Land-, und Bergstationen) dokumentiert.

Klimabeobachtungen von 49 deutschen Klimastationen

Für die Jahre 1990 bis 1997 wurden vom Deutschen Wetterdienst die täglichen Beobachtungsdaten von 49 deutschen Klimastationen zur Verfügung gestellt. Die Klimabeobachtungen wurden den Beobachtungen der synoptisch- (realtime) meldenden Stationen vorgezogen, da es sich bei den Klimabeobachtungen um geprüfte Meß- und Beobachtungsreihen handelt und die Daten für längere Zeiträume zur Verfügung stehen. Dies ist besonders wichtig für die zweite Etappe des Forschungsvorhabens, in der lange Ozonmeßreihen auf ihren Trend hin untersucht werden sollen.

Für jeden Tag stehen folgende Wetterelemente zur Verfügung:

- Maximum der Lufttemperatur
- Minimum der Lufttemperatur
- Windrichtung 7° MEZ
- Windstärke 7° MEZ
- Windrichtung 14° MEZ
- Windstärke 14° MEZ
- Windrichtung 21° MEZ
- Windstärke 21° MEZ
- Tagesmittel der Gesamtbedeckung
- Tagessumme der Sonnenscheindauer
- Tagessumme der Niederschlagshöhe
- Niederschlagsart

Lage und Name der Klimastationen sind aus Anlage 3 zu entnehmen.

TEMP-Aufstiege von 16 deutschen Radiosondenstationen

Zur Bereinigung des Wettereinflusses aus den Ozonmeßreihen sind neben den **Bodenbeobachtungen** des Wetters, repräsentiert durch die Beobachtungsreihen der deutschen Klimastationen, Messungen des **vertikalen** Temperatur-, Druck-, Feuchte- und Windprofils notwendig. Die Vertikalstruktur der Atmosphäre wird durch Ballonaufstiege, sogenannte TEMP- Aufstiege sondiert. Für den 12°UTC Termin wurden diese Daten von der FU-Berlin, Bereich Meteorologie, mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Wetterdienstes bereitgestellt. Aus Tabelle 1 sind die verwendeten Stationen, deren geographische Lage und die Höhe über dem Meeresspiegel zu entnehmen

Tab. 1: Verwendete Radiosondenstationen der Jahre 1990 bis 1997

Nr.	Station	geogr. Breite	geogr. Länge	Höhe über NN [m]
1	Lindenberg	52.13	14.07	108
2	Meiningen	50.34	10.23	453
3	Hannover	52.28	9.42	55
4	Essen	51.23	6.58	159
5	Kassel	51.08	9.17	223
6	Idar-Oberstein	49.42	7.20	377
7	Stuttgart	58.50	9.12	315
8	Kümmersbrück	49.26	11.54	418
9	München	48.50	11.33	489
10	Friedrichshafen	47.59	8.54	804
11	Meppen	52.43	7.19	16
12	Berlin	52.29	13.25	46
13	Greifswald	54.06	13.24	6
14	Schleswig	54.32	9.33	48
15	Dresden	51.07	13.41	232

Objektive Wetterlagen

Im Rahmen des F&E Vorhabens 10402817 des Umweltbundesamtes ‘Erstellung einer Ozon-Kurzfristprognose für das Smog-Frühwarnsystem’ wurde eine objektive Wetterlagen-klassifikation entwickelt. Das Verfahren basiert auf Forschungsarbeiten, die im Rahmen des Verbundprojektes Klimavariabilität und Signalanalyse zum Teilthema: “Signalanalyse zur Regionalisierung von Klimamodell-Outputs mit Hilfe der Erkennung synoptischer Muster und statistischer Analysemethoden” (Enke, Spekat 1997a,b) durchgeführt, aber hier speziell für diese Untersuchungsaufgabe modifiziert und angepaßt wurden. Untersuchungen bezüglich ozon-optimierter Wetterlagen, auch unter Verwendung des Großwetterlagenkatalogs nach Hess, P. and H. Brezowsky 1969, wurden von Mayer und Schmidt (1997, 1998) durchgeführt.

Für die Jahre 1990 bis 1997 wurden für die Monate April bis September tägliche objektive Wetterlagen für das engere Mitteleuropa berechnet. Diese sind in Abb.1 (1000hPa und 500hPa Flächen) dargestellt. Die hierfür notwendigen Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst für das oben genannte Forschungsprojekt bereitgestellt.

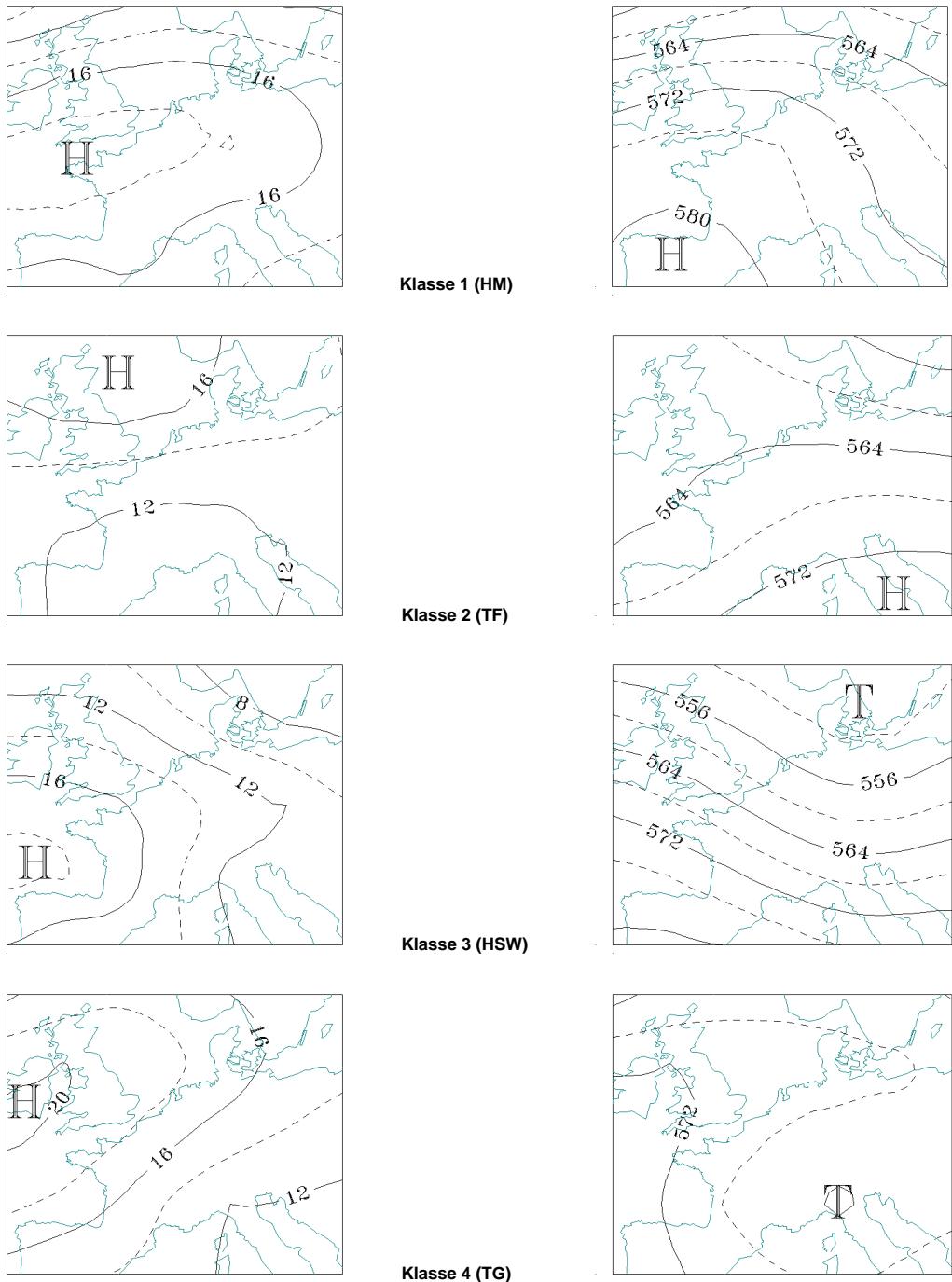


Abb. 1: Ozonwetterlagen (Teil 1)

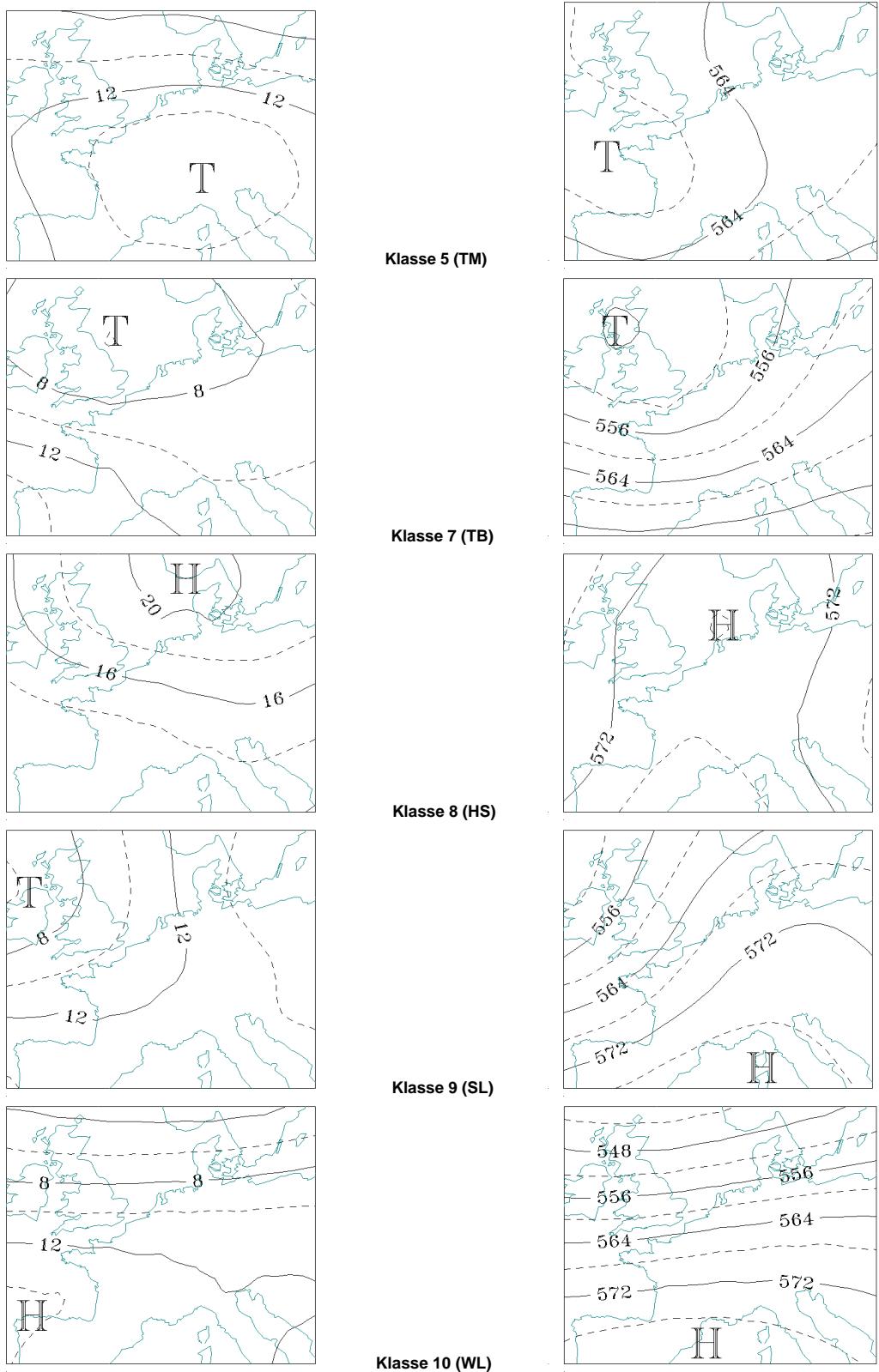


Abb. 1: Ozonwetterlagen (Teil 2)

3 Darlegung der Methode

Die Bildung und Zerstörung von Ozon ist vielfältig mit dem Wettergeschehen, also den atmosphärischen Zustandsparametern, in Raum und Zeit vernetzt. Ozon ist ein sekundärer Schadstoff, der durch photochemische Prozesse in Verbindung mit Vorläuferschadstoffen gebildet wird. Den atomaren Sauerstoff, der zusammen mit den Sauerstoffmolekülen das Ozon (O_3) bildet, liefert die photolytische Zerlegung von Stickstoffdioxid (NO_2) in NO und O (Enke 1998, Ruggaber 1994). Da dieser Prozeß eine Funktion insbesondere des Strahlungsangebotes und der Temperatur ist, wird der Zusammenhang mit dem Wettergeschehen deutlich (Beilke 1991, 1996). Über die vielfältigen chemischen Prozesse im Konzert der Bildung und der Auflösung von Bodenozon siehe (Neininger und Dommen 1996, Kirch 1997, Ruggaber 1994, Fricke 1980, Röth 1985). In den untersten ca. 500 m der Atmosphäre erfolgt der Abbau von Ozon über den Titrationseffekt ($NO + O_3 \Rightarrow NO_2 + O_2$) und die sogenannte Trockendeposition, also durch den direkten Kontakt mit Pflanzen und anderen Materialien der Erdoberfläche. Dieser Abbau ist proportional zur Ozonkonzentration und hängt wesentlich von der vertikalen Temperaturschichtung ab, also von der Höhe der vertikalen Durchmischung der Atmosphäre. Ozon selbst hat eine Lebensdauer von mehreren Tagen, so daß in der Schicht zwischen 500m und 1500m eher ein Langstreckentransport erfolgt, und somit weniger das lokale Wettergeschehen als das großräumige Wetter bedeutsam ist. Abgesehen von den anthropogenen Quellen der Vorläufersubstanzen zur Ozonbildung sind alle wesentlichen Prozesse:

- Ozonbildung
- horizontaler Ozontransport
- vertikale Durchmischung
- Trockendeposition

von den meteorologischen Bedingungen abhängig. Die Reaktion von Ozon mit Stickstoffmonoxid, die im näheren Umfeld der Quellen zu einer Abnahme von Ozon führt (Titrationseffekt), ist hingegen kaum vom Wetter beeinflußt (Filliger 1996).

Da das Wettergeschehen von Jahr zu Jahr mehr oder weniger stark variiert, kann es andere Einflüsse maskieren, so daß Änderungen der raum-zeitlichen Emissionsintensität erst bei sehr langen Beobachtungsreihen sichtbar werden. Für Trenduntersuchungen auf der Basis von 8 jährigen Zeitreihen erweist sich eine quasi Wetterbereinigung als unabdingbar.

Ein zweites Problem bei der Trenduntersuchung relativ kurzer Zeitreihen wird sofort sichtbar, wenn man die zur Verfügung stehenden Bodenozonreihen auf ihre Vollständigkeit hin überprüft (Anlage 1). Die Zahl der verwertbaren Ozonmeßreihen reduziert sich von 385 auf 167, wenn man die unter Punkt 2. erläuterten Kriterien anwendet. Die zur Trenduntersuchung verwendeten Stationen sind in Anlage 2 angegeben.

Betrachtet man die verbleibenden Zeitreihen näher, so sind auch hier noch kürzere Zeitintervalle ohne Meßwerte vorhanden, die nun fehlwertersetzt werden müssen. Eine Fehlwerterersetzung erweist sich auch aus einem anderen Grund als notwendig: Die vorgesehene Wetterbereinigung erfolgt unter Verwendung von drei weiteren Datenquellen, deren Zeitreihen gleichfalls unvollständig sind. In Kombination mit den Ausfällen in den Ozon-Datenreihen verkürzen sich die Zeitintervalle mit vollständigen Datensätzen auf ein nicht mehr vertretbares Maß. Eine Ausfallersetzung in den meteorologischen Datenreihen wird nicht vorgenommen. Hier greifen bei der Modellierung des Wettereinflusses andere Methoden (vgl. Kap.3.4).

3.1 Elimination des Jahresgangs aus den Ozonmeßreihen

Bei der Anwendung statistischer Verfahren auf Zeitreihen ist es immer notwendig, eventuell vorhandene zyklische Schwankungen a priori zu eliminieren. Unterläßt man dies, so werden Zusammenhänge modelliert, die meist trivial sind (z.B. der Jahresgang der Temperatur als Funktion des Sonnenstandes). Die **interessierenden** Zusammenhänge treten dabei häufig hinter den zyklischen Schwankungen zurück. Außerdem werden Signifikanzen vorgetäuscht, die zu großen Teilen auf diesen zyklischen Schwankungen beruhen (Taubenheim 1969, Enke 1986). Deshalb werden sowohl zum Zwecke der Wetterbereinigung als auch für die Fehlwerterersetzung mittels

multipler Regressionsanalyse der Tages- und Jahresgang aus den Ozonmeßreihen eliminiert.

Das methodische Vorgehen der Fehlwertersetzung, Wetterbereinigung und Trendanalyse wird anhand zweier ausgewählter Ozon Stationen demonstriert: Der 'verkehrsnahen' Station Viernheim (HE019) und der 'Stadt' Station Rastatt (BW020)

3.1.1 Berechnung stationsbezogener Monatsmittelwerte

Bei den vorliegenden kurzen Zeitreihen ist nicht zu erwarten, daß mit einer gleitenden Mittelbildung glatte stationsspezifische Jahresgänge erzeugt werden können. Deshalb wurden zur Berechnung des Tages- und Jahresganges Monatsmittelwerte getrennt für jede Stunde des Tages berechnet.

Abb.2 und Abb.3 zeigen die Monatsmittelwerte der Stationen Rastatt und Viernheim nach Stunden aufgeschlüsselt. Es zeigt sich der erwartete Jahres- und Tagesgang, wobei besonders der rasche Abfall der Ozonwerte von August zu September auffällt. Weiterhin fällt auf, daß die Wintermonate praktisch keinen Tagesgang haben, was auf die eingeschränkte Ozonbildung in dieser Jahreszeit zurückzuführen ist.

Abb. 2: Stündliche Monatsmittelwerte des Bodenozons
Station HE019 (Vierenheim), Stationstyp 'vk', 1990 bis 1997

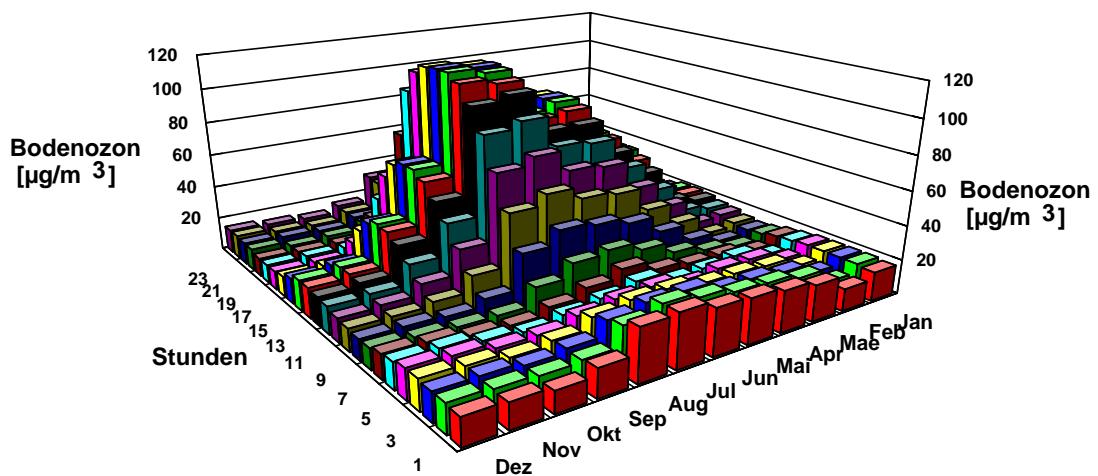
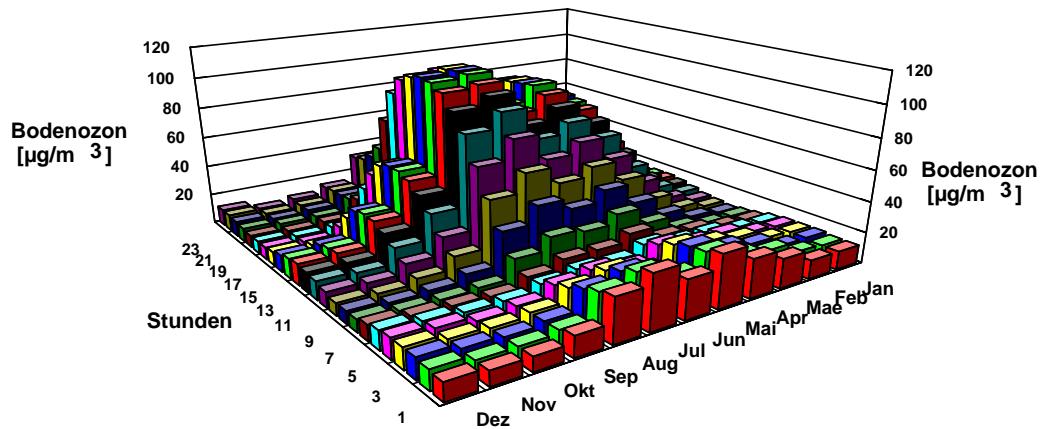


Abb. 3: Stündliche Monatsmittelwerte des Bodenozons
 Station BW020 (Rastatt), Stationstyp: 'st', 1990 bis 1997



3.1.2. Spline-Interpolation zur Erzeugung geglätteter Jahresgänge

Mittels Cubic-Spline-Interpolation werden aus den Monatsmittelwerten geglättete Jahresgänge erzeugt, so daß für jede Stunde und für jede Station ein entsprechender Jahresgang zur Verfügung steht. Für die Stationen Rastatt und Viernheim ist dies aus Abb.4 und Abb.5 ersichtlich. Besonders bei der Station Viernheim (Abb.4) ist das witterungsbedingte relative Minimum der Ozonwerte Ende Juni, Anfang Juli gut zu erkennen. Verursacht wird dies durch kühles und wechselhaftes Wetter, das auch unter dem Begriff "Siebenschläfer" bekannt ist.

Abb. 4: Splineinterpolierter Jahresgang des Bodenozons
 Station HE019 (Vierheim) , Stationstyp: 'vk', 1990 bis 1997

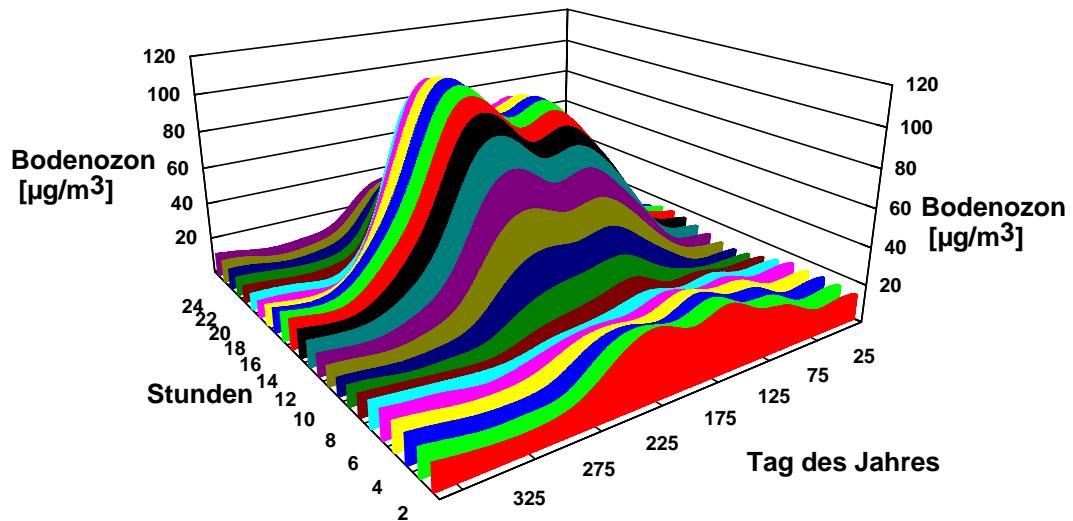
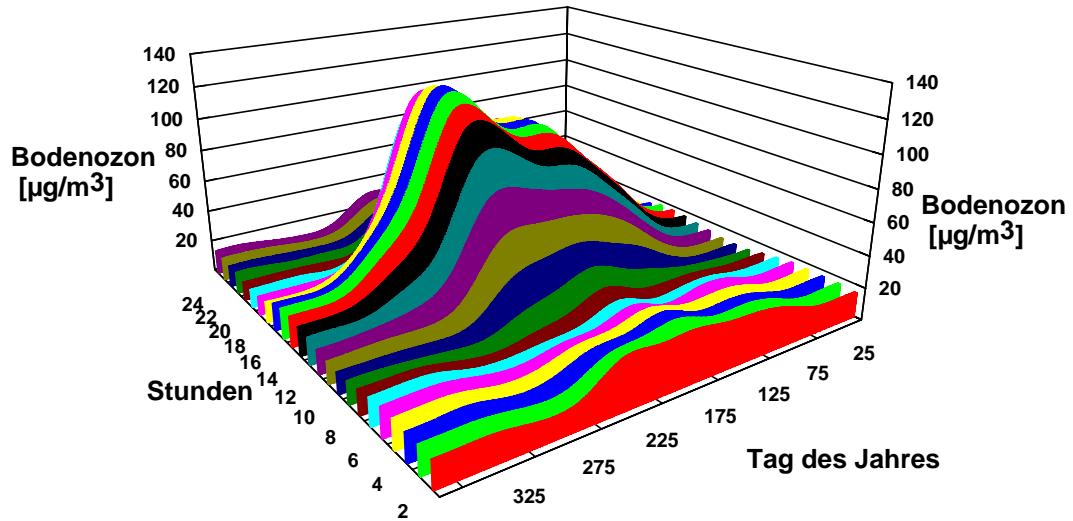


Abb. 5: Splineinterpolierter Jahresgang des Bodenozons
 Station BW020 (Rastatt) , Stationstyp: 'st', 1990 bis 1997



3.1.3. Bereitstellung jahresgangbereinigter Reihen

Die Differenzbildung zwischen der Originalreihe und den geglätteten Jahresgängen liefert die Abweichung vom mittleren Jahresgang und somit eine von den zyklischen Schwankungen bereinigte Ozonmeßreihe. Diese sind auf der mitgelieferten CD-ROM im Verzeichnis DATERG zu finden. Stundenweise sind für 325 Stationen unter dem Namen: “Matrix(Uhrzeit).dat” die jahresgangbereinigten Zeitreihen zu finden. Die fortlaufende Bezeichnung der Stationen findet man in der Datei “nr_stat”. Die Ausfälle sind für jede Stunde in den Dateien “nmat(Uhrzeit).dat” dokumentiert.

3.2 Fehlwertersetzung

Wie aus Anlage 1 ersichtlich, ist eine Fehlwertersetzung in den Zeitreihen unbedingt erforderlich. Diese wird in zwei Stufen vorgenommen und berücksichtigt nur solche Stationen, für die mindestens 50% des Zeitraumes 1990 bis 1997 Daten vorliegen. Die Stationen, die aufgrund dieser Vorgabe nicht in die Fehlwertersetzung einbezogen wurden, sind in den Dateien “fehlst(Uhrzeit).dat” dokumentiert. Zur Fehlwertersetzung sind zwei grundsätzliche Vorgehensweisen denkbar:

- Es erfolgt eine räumliche Interpolation vorhandener Meßwerte auf die zu ersetzenen Stationen. Zum Einsatz kommen hier Verfahren, die in der Meteorologie zur Erzeugung äquidistanter Felder für numerische Prognosen aus Stationsmessungen Verwendung finden z.B. Optimale Interpolation, inverse Abstands- Wichtungs-Verfahren , Triangulation oder Trendflächenanalyse (vgl. dazu Abramowski (1991), Franke (1980, 82, 85), Hoschek (1989), Wiegand (1996)). Diese Verfahren sind recht aufwendig und berücksichtigen nicht die statistischen Zusammenhänge zwischen den Meßstationen, sondern es wird eine geometrische Interpolation in der Fläche durchgeführt, die für jeden Termin neu berechnet werden muß.
- Die Anwendung statistischer Modelle (multiple Regression, Clusteranalysen, ARMAX -Modelle u.s.w.) beschreiben die typischen statistischen Zusammenhänge zwischen den Meßstationen zur Fehlwertersetzung. Deshalb wurde dieser Modelltyp,

und wegen der unterschiedlichen Zeitintervalle der zur Verfügung stehenden Reihen, speziell die multiple Regressionsanalyse verwendet.

3.2.1 Zeitliche Interpolation

Im ersten Schritt wurden alle Datenlücken, die drei Stunden nicht überschreiten, durch eine lineare Interpolation geschlossen. Diese pragmatische Herangehensweise ist aufgrund des weitgehend ‘ruhigen’ Tagesganges der Ozonkonzentration gerechtfertigt, birgt jedoch die Gefahr in sich, maximale Ozonwerte zu glätten, wenn die Ausfälle gerade dieses Zeitintervall betreffen.

3.2.2 Räumliche Interpolation

Die räumliche Interpolation verwendet die stündlichen jahresgangbereinigten Datenreihen. Mittels eines multiplen screening Regressionsverfahrens wird für jede Station und für jede Stunde eine Regressionsbeziehung entwickelt, die maximal 4 Stationen einbezieht. Das Selektionskriterium für die zu verwendenden Stationen ist dabei nicht die räumliche Nähe zu der Station, sondern die Minimierung der Reststreuung nach Fehlwertersetzung. Es werden also durchaus räumlich weiter entfernt liegende Stationen verwendet, die jedoch dem Stationstyp (Land-, Stadt-, Verkehrs- oder Bergstation) besser entsprechen. Das größte Problem bei der Ableitung der Regressionsbeziehung sind die unterschiedlichen Ausfallzeiten, so daß ein gemeinsames Ensemble, für das an allen Stationen Meßwerte vorhanden sind, kaum gegeben ist. Deshalb wird hier die Methode der partiellen Adaption (Enke 1984) angewandt. Das heißt, die Kovarianzmatrix zur Berechnung der multiplen Korrelationen beinhaltet unterschiedliche Zeiträume. Tests auf Konditionierung der Kovarianzmatrix garantieren die statistische Stabilität. Die entsprechenden Kovarianzmatrizen sind in den Dateien “covmat(Uhrzeit).dat” zu finden.

Unter Verwendung der Kovarianzmatrizen wurde nun für jede Station und jede Stunde eine multiple Regressionsgleichung entwickelt. Diese stehen in den Dateien “Regkoe(Uhrzeit).dat”.

In diesen Dateien findet man neben den verwendeten Stationen die Regressionskoeffizienten, die multiple Korrelation und die Reststreuung, also die Streuung (Standardabweichung) einer komplett fehlwertersetzen Reihe. Für die Tagesstunden liegt die erklärte Varianz bei 85%, für die Nachtstunden bei 65%. Berücksichtigt man die Tatsache, daß nur kurze Perioden ersetzt werden, so dürfte gesichert sein, daß die statistische Struktur der Meßreihen nicht verfälscht wird.

Die konkrete Fehlwertersetzung erfolgt nun auf vier Ebenen (Abb.6). Das Problem bei der Datenergänzung liegt darin, daß die in den Regressionen verwendeten Stationen an dem entsprechenden Tag möglicherweise nicht vorhanden sind. Am Beispiel der Station Thüringen 031 (Abb.6) heißt das: Zur Fehlwertersetzung werden die Stationen HE010, BY032, UB018 und BW037 verwendet. An diesem Tage meldet die Station BY032 nicht, d.h., auch sie muß fehlwertersetzt werden. Dies geschieht in der zweiten Ebene. Fehlen auch hier Meßwerte, geht die Fehlwertersetzung in die dritte Ebene. In der vierten Ebene wird dann eine Mittelung der drei nächstliegenden Stationen vorgenommen, für die an diesem Tag Meßwerte vorhanden sind.

Abb. 6: Zu ergänzende Ozonmeßstation: TH031

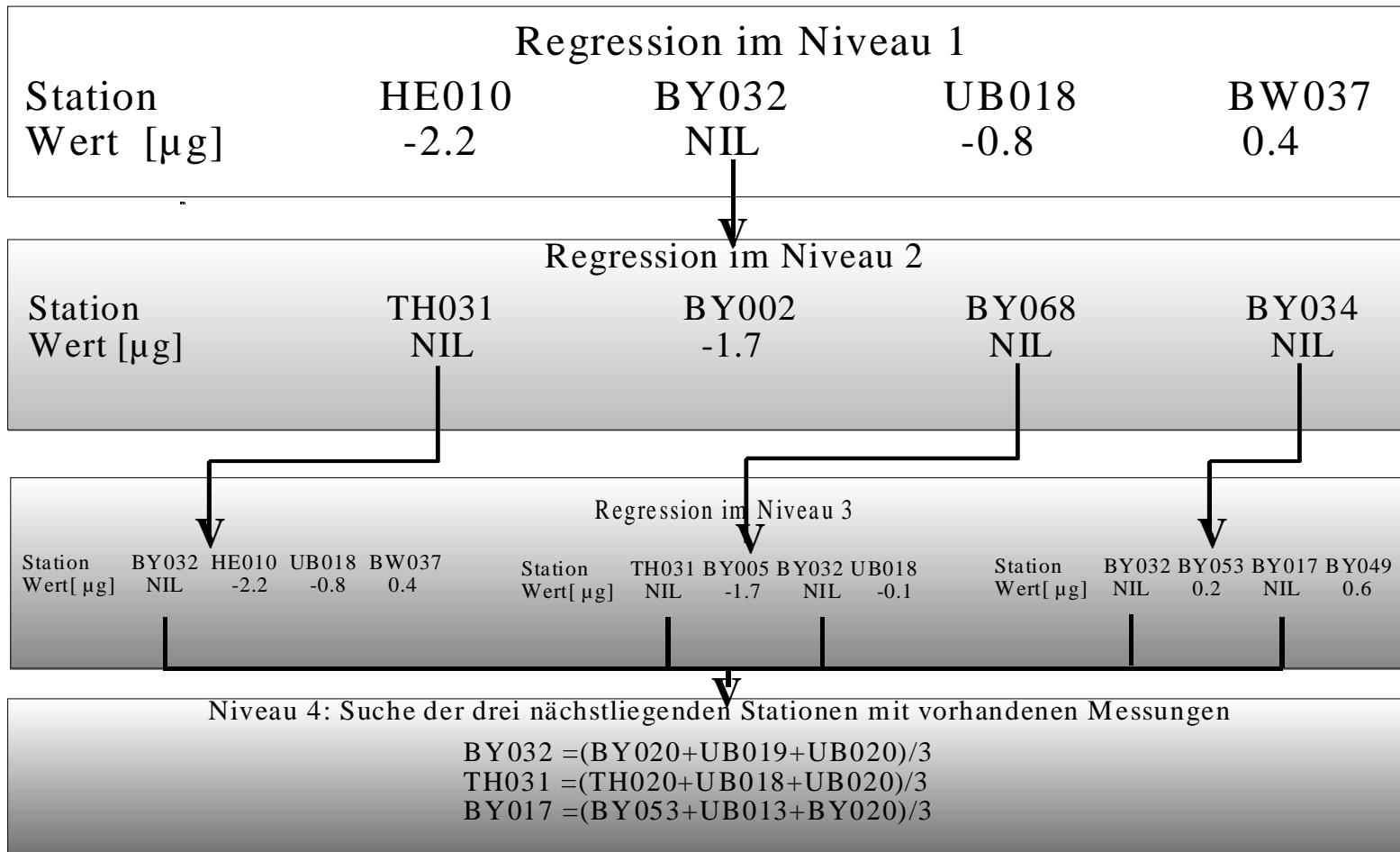
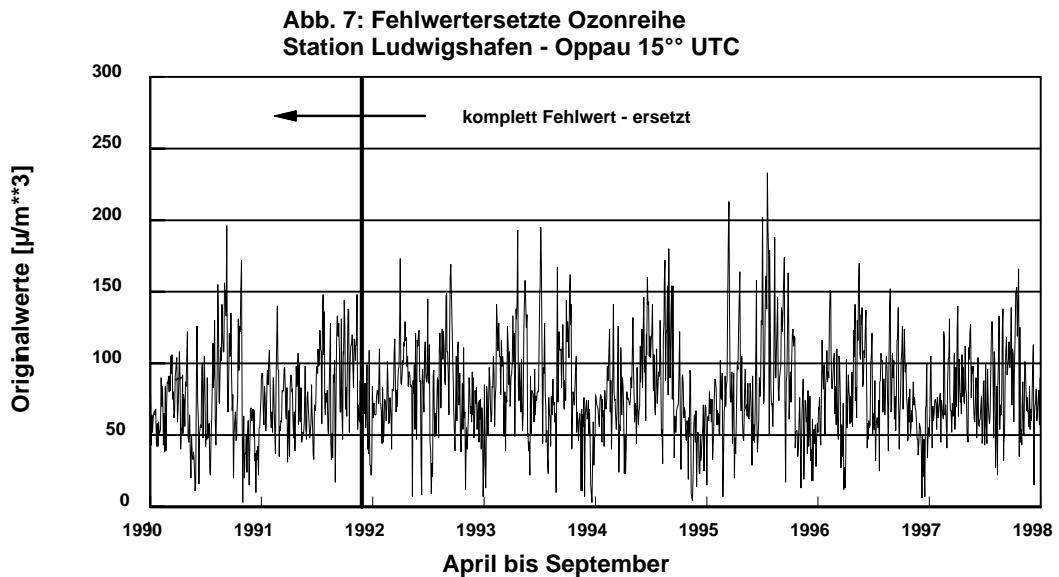


Abb.7 zeigt am Beispiel der Station Ludwigshafen-Oppau eine komplette Fehlwertersetzung der Jahre 1990 und 1991. Schon der Augenschein bestätigt, daß sich der fehlwertersetzte Zeitraum gut in die gesamte Meßreihe einfügt.



3.3 Berechnung der täglichen Ozonmaxima

Die erste Phase des Forschungsvorhabens beschränkte sich ausschließlich auf die Auswertung der täglichen Ozonmaxima. Aus den nun vorliegenden fehlwertersetzten Abweichungen von den stunden- und stationsspezifischen Jahresgängen werden die täglichen Ozonmaxima durch Addition der Jahresgänge berechnet. Aus den so erhaltenen Originalozonwerten kann nun das tägliche Ozonmaximum zwischen 00°°Uhr und 24°°Uhr bestimmt werden.

Zur Bereinigung der Ozonmaxima von den zyklischen Schwankungen wird in analoger Weise wie im Kapitel 3.1 vorgegangen:

- Berechnung von Monatsmitteln der täglichen Ozonmaxima
- Splineinterpolation zur Erzeugung geglätteter Jahresgänge
- Berechnung der jahresgangbereinigten täglichen Ozonmaxima

3.4 Wetterbereinigung der täglichen Ozonmaxima

Ozon entsteht in den bodennahen Luftschichten durch den strahlungsinduzierten Zerfall von NO₂, während in der Stratosphäre Ozon durch den strahlungsinduzierten Zerfall von molekularem Sauerstoff entsteht. In den bodennahen Luftschichten würde sich ein Gleichgewicht zwischen Ozonbildung und Ozonabbau einstellen, wenn nicht die organischen Kohlenwasserstoffe (VOC) dieses Gleichgewicht insofern stören würden, daß sie entstehendes NO ohne den Verbrauch von Ozon zu NO₂ oxidieren. Neben den natürlichen Quellen werden die VOCs anthropogen erzeugt. Auf nähere Ausführungen zu den vielschichtigen Wechselwirkungen zwischen den komplexen chemischen Prozessen und den meteorologischen Bedingungen, die zum Auf- und Abbau von bodennahen Ozon führen, wird auf entsprechende Veröffentlichungen verwiesen: (Neininger und Dommen 1996, Kirch 1997, Ruggaber 1994, Fricke 1980, Röth 1985). Wesentliche meteorologische Einflüsse sollen jedoch kurz skizziert werden:

Auf- und Abbau troposphärischen Ozons

als Funktion von Strahlungsangebot (Sonnenscheindauer, Bewölkung, Feuchte) und Temperatur (Regulativ der Geschwindigkeit chemischer Prozesse)

horizontaler Transport von Ozon und Vorläufersubstanzen

als Funktion großräumiger Windfelder (Wetterlagen) und lokal (Orographie) beeinflußter Windsysteme

vertikaler Transport von Ozon und Vorläufersubstanzen

Konvektive Durchmischung der Troposphäre als Funktion des vertikalen Temperaturprofils und der Temperatur am Erdboden (sowohl vertikale Verdünnung bodennahen Ozons als auch Einmischen von höheren Ozonkonzentrationen aus der Reservoirschicht treten auf)

Dynamische Durchmischung der Troposphäre als Funktion der großräumigen Zirkulation (Wetterlage, Frontensysteme). Sowohl Luftmassenaustausch als auch

plötzliches Einmischen von Ozon aus der Reservoirschicht vor einer Frontpassage werden hierdurch gesteuert (Förderer u.a. 1996, Beilke 1996).

Schon die kompakte Darstellung der durch meteorologische Bedingungen geprägten Prozesse zeigt die Abhängigkeit der kausalen Zusammenhänge zwischen der Emission der Vorläufersubstanzen und der Bildung bzw. Konzentration des Ozons von der zeitlichen und räumlichen Variabilität der Wetterbedingungen.

Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Emission der Vorläufersubstanzen und der Ozonkonzentration müssen daher immer und grundsätzlich unter Berücksichtigung bzw. unter weitgehender Eliminierung der meteorologischen Einflüsse erfolgen.

3.4.1 Bereitstellung potentieller Einflußgrößen

Vier Datentypen werden zur Wetterbereinigung verwendet, die die wesentlichen Einflüsse auf die Bildung und den Transport von Ozon beschreiben sollen:

Auf- und Abbau troposphärischen Ozons

Beobachtungen der nächstliegenden Klimastation

horizontaler Transport von Ozon und Vorläufersubstanzen

Wetterlagen und lokaler Wind

vertikaler Transport von Ozon und Vorläufersubstanzen

- **Konvektive Durchmischung**

Aus TEMP-Aufstiegen abgeleitete Parameter, die die vertikale Stabilität der Atmosphäre beschreiben

- **Dynamische Durchmischung**

objektive Wetterlagen

Die Trägheit des Systems

wird durch die Andauer der Wetterlagen und der Pseudopersistenz (siehe 3.4.1.5) beschrieben

Für jede Station, die für Trenduntersuchungen vorgesehen ist (vgl. Anlage 2), wurden zum Zwecke der Wetterbereinigung die Beobachtungen der nächstliegenden Klimastation und der nächstliegenden TEMP- Station in einem Datensatz zusammengestellt. Da auch im Radiosondenarchiv größere Ausfälle zu verzeichnen sind, wird gegebenenfalls auf eine andere Radiosondenstation bis zu einem Umkreis von maximal 200km ausgewichen.

3.4.1.1 Bereitstellung der Klimadaten

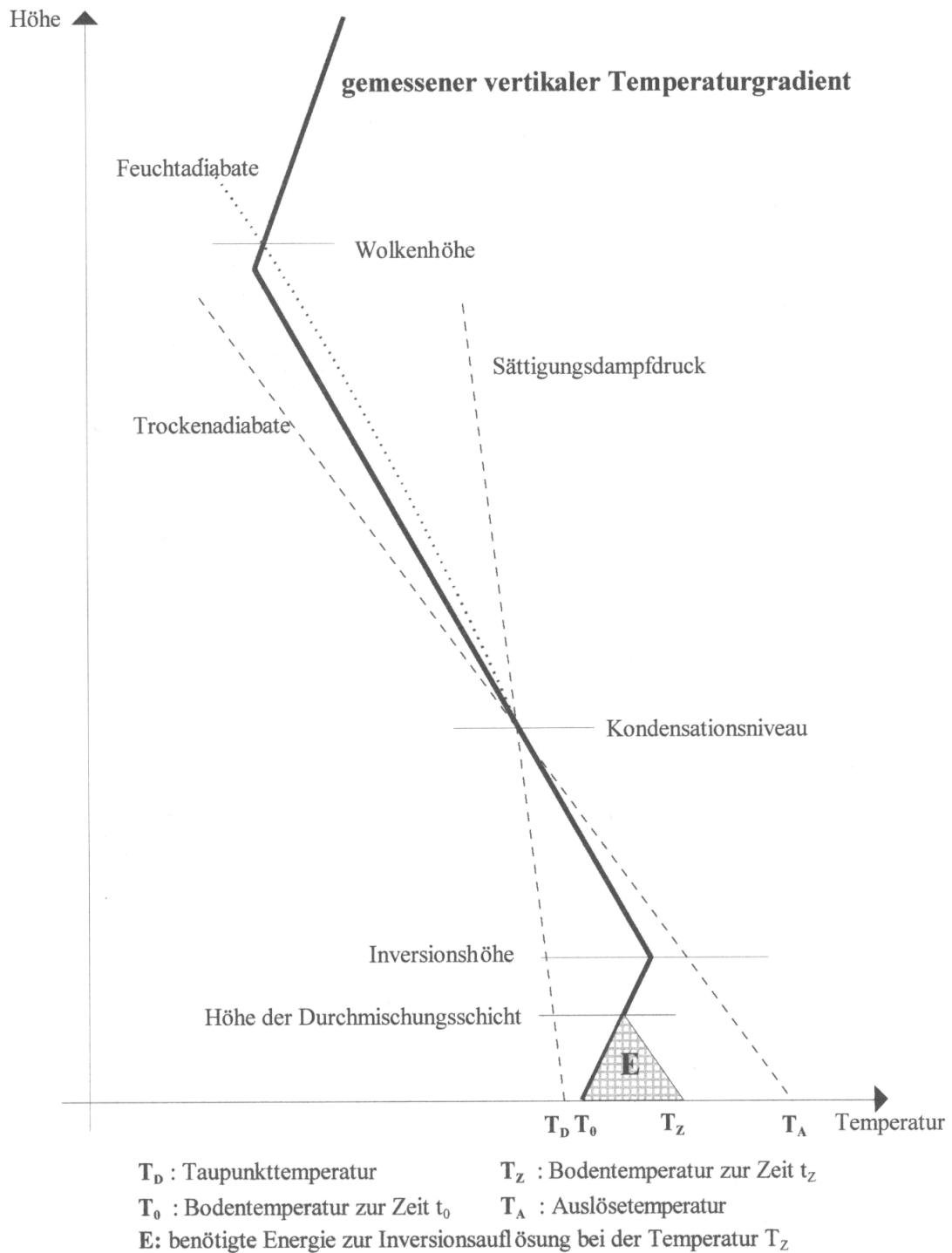
Aus dem Angebot an Klimabeobachtung (Kap. 2) wurden mit Ausnahme der Art des Niederschlages alle Beobachtungen zur Wetterbereinigung angeboten.

3.4.1.2 Berechnung von Stabilitätsgrößen aus Radiosondenaufstiegen

Die Basisinformation zur Berechnung von Stabilitätsgrößen aus TEMP-Aufstiegen, bildet das vertikale Temperatur-, Druck-, Feuchte- und Windprofil, wie es aus Radiosondenaufstiegen von 16 Stationen (Kap. 2) zur Verfügung steht. Aus diesen Grunddaten lassen sich mit Hilfe der Thermodynamik der Atmosphäre eine Reihe von abgeleiteten Größen berechnen, die die Stabilität und somit den vertikalen Austausch der Atmosphäre beschreiben (Asnani 1993, Steinacker 1995). Folgende Parameter wurden berechnet:

(Zur Erläuterung der einzelnen Größen siehe Abb.8):

Abb. 8: Prinzipskizze - thermodynamische Zustandsgrößen



Inversionshöhe

Höhe in Metern, bei der die Temperaturänderung mit der Höhe negativ wird.

Energie zur Inversionsauflösung

Energie die benötigt wird, um bei gegebener Temperatur Tz die Inversion bis zur Höhe der Durchmischungsschicht aufzulösen.

Höhe der Durchmischungsschicht

Höhe der konvektiven Durchmischung der Atmosphäre bei gegebenen Temperaturmaximum.

Auslösetemperatur

Temperatur, die notwendig ist, damit thermisch bedingte Wolkenbildung einsetzt.

Kondensationsniveau

Höhe der Untergrenze konvektiver Bewölkung.

Wolkenobergrenze bei Erreichen der Auslösetemperatur

Die Wolkenobergrenze wird erreicht, wenn der gemessene vertikale Temperaturgradient größer als der feuchtadiabatische Temperaturgradient wird.

Wolkenobergrenze bei Erreichen des realen Tagesmaximums der Temperatur

Tagesmaximumtemperatur minus Auslösetemperatur

3.4.1.3 Bereitstellung der objektiven Wetterlagen

Die im Rahmen des Projektes F&E Vorhaben 10402817 des Umweltbundesamtes ‘Erstellung einer Ozon-Kurzfristprognose für das Smog-Frühwarnsystem’ bereitgestellte objektive Wetterlagenklassifikation (Abb.1) wurde entsprechend der mittleren Ozonkonzentration ansteigend numeriert und als potentieller Prediktor zur Wetterbereinigung dem Regressionsverfahren angeboten.

3.4.1.4 Berechnung der aus Ozonklimatologien abgeleiteten Ozonmaxima

Die Einbeziehung der Wetterlagen beschreibt den Einfluß der großräumigen Dynamik auf den Transport und die Bildung sowie die Auflösung von Bodenozon. Unter Berücksichtigung der Andauer einer Wetterlage wurde deshalb für jede Wetterlagenklasse und für jedes Bundesland ein mittleres Ozonmaximum berechnet und täglich als potentieller Prediktor bereitgestellt.

3.4.1.5 Bestimmung der Pseudopersistenz

Für die Prognose des Bodenozons ist die Persistenz aufgrund der längerfristigen Gleichgewichtsprozesse zwischen Ab- und Aufbau von Ozon durchaus wichtig. Zur Wetterbereinigung darf diese jedoch nicht verwendet werden, da in der nicht wetterbereinigten Bodenozonkonzentration der vorangegangenen Episode der Einfluß der Konzentration der Vorläufersubstanzen mit verkoppelt ist. Auch in der Persistenz der Residuen bei der Berechnung der multiplen oder schrittweisen Regressionsanalyse, wie sie von Förderer u.a. 1996 vorgenommen wurde, steckt indirekt die Persistenz.. Einen Ausweg bietet die Pseudopersistenz, die aus dem wetterbedingten Anteil der Ozonkonzentration des Vortages besteht. Das Verfahren der Wetterbereinigung besteht bei der Verwendung der Pseudopersistenz aus zwei Schritten:

- Der erste Schritt ist die Wetterbereinigung mit allen potentiellen Prediktoren zur Erzeugung der Pseudopersistenz (Der wetterbedingte Anteil des Ozonmaximums des Vortages wird als Pseudopersistenz bezeichnet).
- Der zweite Schritt ist die Wetterbereinigung unter Verwendung der Pseudopersistenz.

3.4.2. Anwendung eines erwartungstreuen, multiplen screening Regressionsverfahrens zur Selektion der stationsspezifischen Regressionsgleichungen

Die quasi Wetterbereinigung der täglichen Ozonmaxima erfolgt nun mit einem stationsspezifischen Datensatz potentieller Prediktoren (Tab. 2).

Die Berechnung der einfachen Korrelationskoeffizienten zwischen den in Tab. 2 aufgelisteten potentiellen Prediktoren und der Abweichung des täglichen Ozonmaximums vom stationsspezifischen Jahresgang als Mittel über alle 167 Ozonstationen und unterteilt nach Stationstypen ist aus Abb.9 zu entnehmen. Es zeigt sich das bekannte Phänomen, daß das Teperaturregime die höchste Korrelation aufweist, aber auch die aus TEMP- Aufstiegen abgeleiteten Stabilitätsparameter einen nicht unerheblichen Beitrag zur Wetterbereinigung leisten. Die Pseudopersistenz und das aus der Wetterlagenklassifikation abgeleitete tägliche Ozonmaximum weisen signifikante Korrelationen auf. Nicht überraschend ist auch der inverse Zusammenhang zwischen Sonnenscheindauer, Niederschlag, Bewölkung und Windgeschwindigkeit. Es fällt auf, daß die verkehrsnahen Stationen eine stärkere Sensibilität gegenüber der Windrichtung haben als die übrigen Stationskategorien. Interessant ist auch Prediktor 21, Tab. 2 (Tagesmaximum der Temperatur - Auslösetemperatur), der nur bei Bergstationen von Bedeutung ist.

Abb. 9: Mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen täglichem Ozonmaximum und den potentiellen Prediktoren nach Tabelle 2

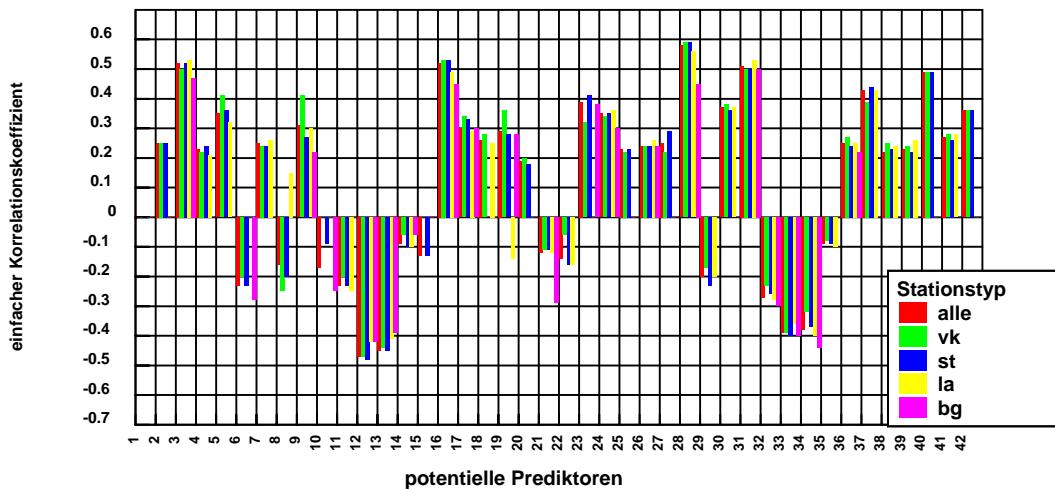


Tabelle 2: Bezeichnung der potentiellen Prediktoren, die zur Wetterbereinigung verwendet werden

Prediktor

Nr.	Bezeichnung	
1	Abweichung des täglichen Ozonmaximums vom Jahresgang	(Zielgröße)
2	Aus der Wetterlagenklassifikation abgeleitetes Ozonmaximum	(aktueller Tag)
3	Tagesmaximum der Lufttemperatur	(aktueller Tag)
4	Tagesminimum der Lufttemperatur	(aktueller Tag)
5	Windrichtung 7°°Uhr (Sinus)	(aktueller Tag)
6	Windgeschwindigkeit 7°°Uhr	(aktueller Tag)
7	Windrichtung 14°° Uhr (Sinus)	(aktueller Tag)
8	Windgeschwindigkeit 14°°Uhr	(aktueller Tag)
9	Windrichtung 21°°Uhr (Sinus)	(aktueller Tag)
10	Windgeschwindigkeit 21°°Uhr	(aktueller Tag)
11	Tagesmittel der Gesamtbedeckung	(aktueller Tag)
12	Tagessumme der Sonnenscheindauer	(aktueller Tag)
13	Niederschlagsmenge 24 Std.	(aktueller Tag)
14	Inversionshöhe	(aktueller Tag)
15	Energie zur Inversionauflösung	(aktueller Tag)
16	Kondensationsniveau	(aktueller Tag)
17	Auslösetemperatur	(aktueller Tag)
18	Wolkenobergrenze bei Erreichen der Auslösetemperatur	(aktueller Tag)
19	Höhe der Durchmischungsschicht	(aktueller Tag)
20	Wolkenobergrenze bei Erreichen des Temperaturmaximums	(aktueller Tag)
21	Tagesmaximum der Temperatur - Auslösetemperatur	(aktueller Tag)
22	Klassennummern, sortiert nach aufsteigendem Ozonmaximum	(aktueller Tag)

23	Aus Wetterlagenklassifikation abgeleitetes transf. Ozonmaxim.	(aktueller Tag)
24	Tagesmaximum der Lufttemperatur	(Vortag)
25	Tagesminimum der Lufttemperatur	(Vortag)
26	4-tägiges Mittel des Tagesmaximums der Lufttemperatur	
27	Aus der Wetterlagenklassifikation abgeleitetes Ozonmaximum	(Vortag)
28	Tagesmaximum der Lufttemperatur transformiert	(aktueller Tag)
29	Windgeschwindigkeit 14°Uhr	(Vortag)
30	Windrichtung (Sinus) 21°Uhr	(Vortag)
31	Pseudopersistenz	
32	Tagesmittel der Gesamtbedeckung	(Vortag)
33	Tagessumme der Sonnenscheindauer	(Vortag)
34	Niederschlagsmenge 24 Std..	(Vortag)
35	Inversionshöhe	(Vortag)
36	Energie zur Inversionauflösung	(Vortag)
37	Kondensationsniveau	(Vortag)
38	Auslösetemperatur	(Vortag)
39	Tagesminimum der Lufttemperatur transformiert	(aktueller Tag)
40	Auslösetemperatur transformiert	(aktueller Tag)
41	Wolkenobergrenze bei Erreichen des Temperaturmaximums transformiert	(aktueller Tag)
42	Auslösetemperatur transformiert	(Vortag)

Das zur Wetterbereinigung angewandte Verfahren der erwartungstreuen, multiplen screening Regressionsanalyse ist bei Enke (1986) und Enke (1988) beschrieben. Besonderer Wert wird auf statistische Stabilität der abgeleiteten multiplen Regressionsgleichungen gelegt:

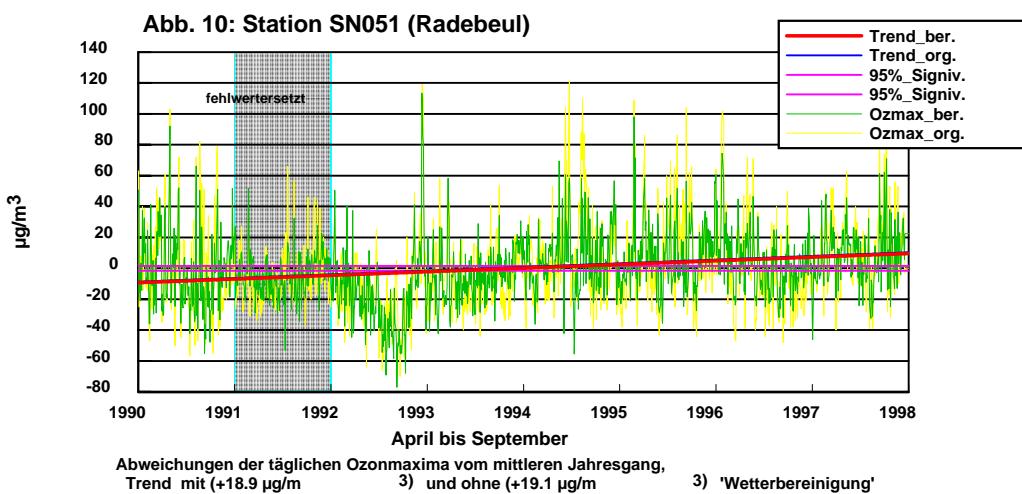
- Bereinigung der Datensätze von zyklischen Schwankungen
- Berücksichtigung der Autokorrelation zur Berechnung der effektiven Freiheitsgrade bei Signifikanzprüfungen (Taubenheim 1969)
- Begrenzung der maximalen Prediktorenzahl auf 9 Prediktoren
- Test auf Signifikanz der partiellen Korrelationskoeffizienten
- Crossvalidierung zur erwartungstreuen Varianzreduktion bei der Prediktorenselktion
- Prediktorentransformation zur optimalen Annäherung an eine Normalverteilung

Tabelle 3 zeigt anhand der Station Radebeul (SN051) die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse zur Wetterbereinigung. Das Verfahren begrenzt die verwendeten Prediktoren auf 5 Variable (Nr. 16, 28, 7, 37 und 24). Die Verwendung weiterer Prediktoren führt zu statistischer Instabilität (keine Signifikanz des partiellen Korrelationskoeffizienten oder ein Anstieg der erwartungstreuen Reststreuung). Auf jeder Selektionsstufe wird sowohl die einfache Korrelation zwischen dem täglichen Ozonmaxima und dem selektierten Prediktor als auch der partielle und multiple Korrelationskoeffizient angegeben. Aus der Streuung der Ausgangsreihe und der Reststreuung nach Wetterbereinigung lässt sich die Reduktion der Varianz (RV) als prozentuale Verbesserung gegenüber der Varianz einer Referenzreihe bestimmen. In diesem Beispiel beträgt $RV = 38,4\%$.

Bedeutsam ist die drastische Reduktion der effektiven Freiheitsgrade unter Berücksichtigung der Autokorrelation der Zeitreihe der täglichen Ozonmaxima von 1456 auf 277 Fälle.

Nach der quasi Bereinigung des Wettereinflusses wird der lineare Trend sowohl für die originale als auch für die wetterbereinigte Reihe berechnet. In Tabelle 3 findet man dazu den einfachen Korrelationskoeffizienten, die Änderung der mittleren täglichen Ozonmaxima im Zeitraum von 1990 bis 1997 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und das Signifikanzniveau des berechneten Trends.

Die Station Radebeul wurde als Beispiel ausgewählt, da hier zwei Besonderheiten deutlich werden (vgl. Abb.10). Zum einen ist in dieser Reihe das Sommerhalbjahr 1991



komplett fehlwertersetzt und zum anderen gab es 1992 eine systematische Abnahme der Ozonmaxima, die zum Ende des Sommers 1992 jedoch wieder sprunghaft das normale Niveau erreichten. Dieser Sprung wird erst deutlich, wenn man den Jahresgang aus den Ozonmeßreihen eliminiert. Ähnliche systematische Abweichungen findet man auch in den Meßreihen anderer Meßstationen. Es wird deutlich, daß die berechneten Trends durch solche systematischen Abweichungen bzw. Auffälligkeiten in den Reihen, die höchstwahrscheinlich auf zeitweise systematische Meßfehler hindeuten, verfälscht werden. Die Ergebnisse der Überprüfungen konnten in der ersten Stufe des Forschungsvorhabens jedoch nicht mehr berücksichtigt werden. Eine erneute Bewertung der Meßreihen erfolgt im weiteren Verlauf des Vorhabens, indem die zu beurteilende Station mit dem in Kap. 3.2 beschriebenen Verfahren komplett fehlwertersetzt wird und die Differenz zwischen gemessener und fehlwertersetzter Reihe zur Bewertung herangezogen wird. Stärkere Abweichungen dürften dann auf mögliche systematische Fehler hinweisen.

**Tab. 3: Abweichung der täglichen Ozonmaxima vom mittleren Jahresgang
Wetterbereinigung und Trend
Station SN051 (Radebeul)**

I. Wetterbereinigung

Alle Wetterklassen

Prediktoren zu Station SN51 :	1	16	28	7	37	24
Einfache Korrel. sel. Pred. :	1.000	.508	.476	.238	.387	.271
Partielle Korrel. sel. Pred. :		.508	.378	.213	.108	.056
Multiple Korrel. je Stufe :	.000	.508	.581	.597	.609	.620
Mittelwerte der Prediktoren :	.85989E+00	.88113E+02	.48412E+07	.60055E+01	.88238E+02	.14386E+03
Regressionskoeffizienten :	-.22487E+02	.14342E+00	.32762E -05	.57409E -01	.95449E -01	-.96746E -01
Multiple Korrelation :		.62				
Streuung :		28.51				
Reststreuung :		22.38				
Fälle :		1456				
Effektiver Freiheitsgrad :		277				

II. Trendberechnung

	Kor.	Trend	Sign.
original	0.19	19.1	99%
bereinigt	0.24	18.9	99%

Pred. Nr. Bezeichnung

7	Windrichtung 14°Uhr (Sinus)	(aktueller Tag, von der nächstliegenden Klima-Station)
16	Kondensationsniveau	(aktueller Tag, von der nächstliegenden TAMP-Station)
24	Tagesmaximum	(Vortag, von der nächstliegenden Klima-Station)
28	Tagesmaximum transformiert	(aktueller Tag, von der nächstliegenden Klima - Station)
37	Kondensationsniveau	(Vortag, von der nächstliegenden TAMP-Station)

3.4.3 Berechnung der ‘wetterbereinigten’ Datenreihen

Wie am Beispiel der Station Radebeul demonstriert, wurde für alle 167 in die Trenduntersuchung einbezogenen Meßreihen eine Wetterbereinigung vorgenommen. In Tabelle 4 sind die über alle Stationen gemittelten Ergebnisse untergliedert nach Stationstypen (vgl. Anlage 2) wiedergegeben. Die über alle Stationen gemittelte Wetterbereinigung führt zu einer Varianzreduktion bzw. zu einem auf meteorologische Einflüsse zurückzuführenden Erklärungsanteil von fast 50% gegenüber der mittleren Varianz der täglichen Ozonmaxima. Sie ist etwas höher bei verkehrsnahen Stationen (vk) und vergleichsweise niedrig bei Bergstationen (bg).

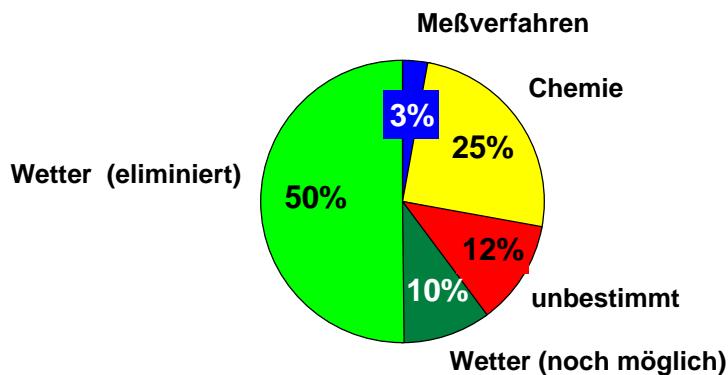
In der ersten Etappe wurde aufgrund der zur Verfügung stehenden kurzen Zeitspanne noch keine wetterlagenspezifische Wetterbereinigung vorgenommen. Erste Untersuchungen zeigen jedoch, daß eine Varianzreduktion von ca. 60% erreichbar ist.

Tabelle 4: Stationstypspezifische Ergebnisse der Wetterbereinigung

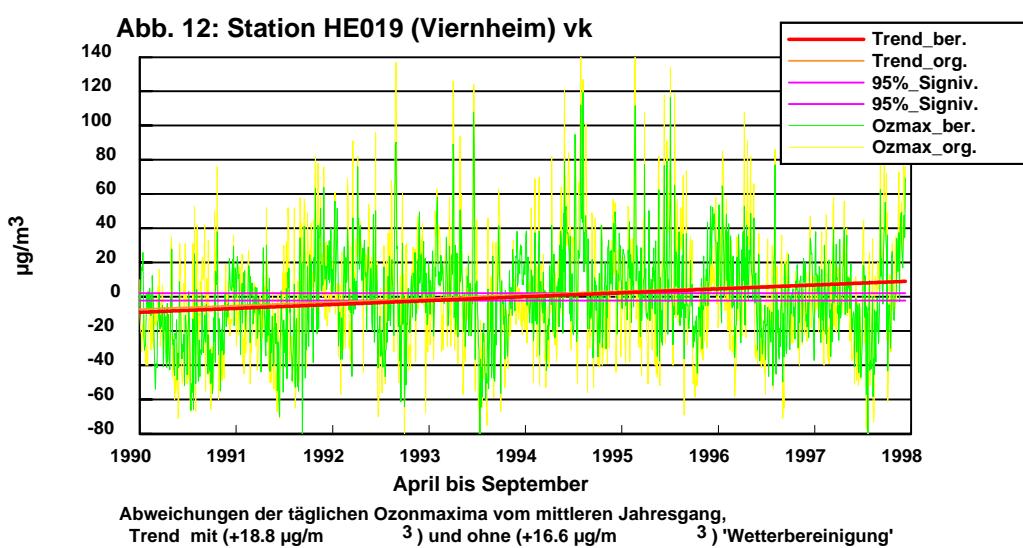
	Stationstypen				
	alle (167)	vk (40)	st (94)	la (28)	bg (5)
Varianzreduktion nach Wetterbereinigung [%]	49.5%	50.4%	49.0%	47.6%	42.3%
mittlere Streuung der Meßreihen	32 µg/m ³	33 µg/m ³	31 µg/m ³	30 µg/m ³	28 µg/m ³
Reststreuung	22 µg/m ³	23 µg/m ³	22 µg/m ³	22 µg/m ³	23 µg/m ³
vk: verkehrsnaher Station, st: Stadt-Station, la: Land-Station, bg: Berg-Station					

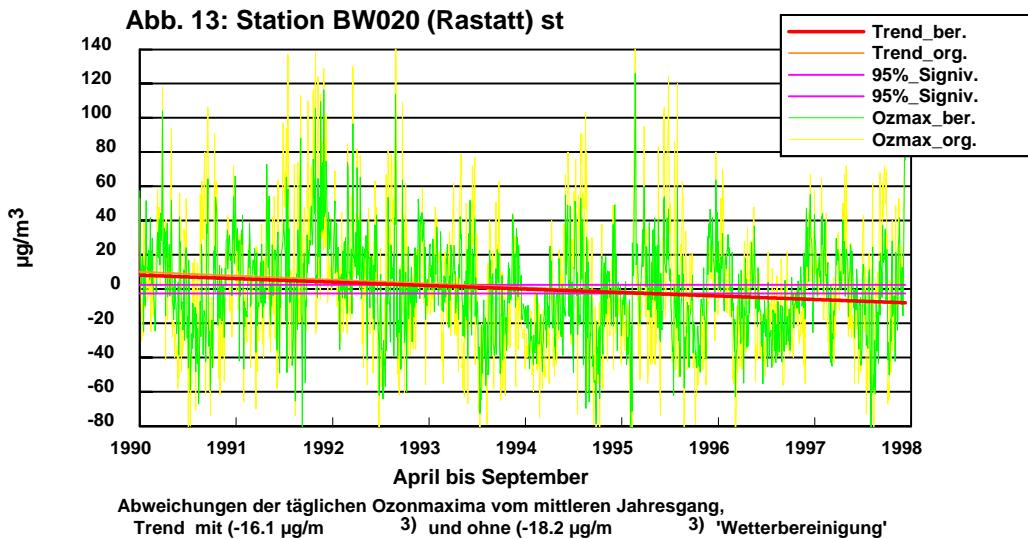
Auf den ersten Blick erscheint eine Varianzreduktion von 50% (bzw. 60% bei Einbeziehung der Wetterlagen) relativ gering. Stellt man jedoch in Rechnung, daß Meßungenauigkeiten mit mindestens 3% zu Buche schlagen und die Variabilität der Vorläufersubstanzen zur Ozonbildung bzw. - Auflösung einen Beitrag von ca. 25% leisten, so erscheint die verbleibende Unbestimmtheit durchaus vertretbar (Abb.11)

Abb. 11: Relativer Beitrag zur Variabilität der täglichen Ozonmaxima



Am Beispiel der Stationen Viernheim (HE019), Stationstyp: vk, Abb.12, und Rastatt (BW020), Stationstyp: st, Abb.13, wird die Wirkung der Wetterbereinigung auf die täglichen Ozonmaxima demonstriert. Erste lineare Trendaussagen zeigen bei der Station Viernheim eine Zunahme der mittleren täglichen Ozonmaxima von $16.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Zeitraum von 1990 bis 1997 ohne Wetterbereinigung und $18.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ nach erfolgter Wetterbereinigung. Bei der Stadtstation Rastatt ist eine Abnahme von $18.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $16.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ im gleichen Zeitraum zu beobachten.





Wie in Kapitel 3.4.2 bereits darauf hingewiesen, offenbarten die Analysen der Datenreihen an einzelnen Stationen nach der Eliminierung des Jahresgangs für größere Zeiträume „verdächtige systematische Abweichungen“, die nicht ohne Einfluß auf den Trend in diesen Reihen blieben. So zeigten sich auch in der von Viernheim dargestellten Reihe in den Jahren 1990 und 1991 über längere Zeiträume nahezu durchgängig negative Abweichungen der täglichen Ozonmaxima vom mittleren Jahresgang, was wiederum den positiven Trend dieser Reihe bewirkte.

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wird in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Meßnetzbetreibern der Versuch unternommen, eine Klärung der Ursachen dieser Auffälligkeiten in einzelnen Datenreihen herbeizuführen und soweit wie möglich Korrekturen vorzunehmen.

4 Ableitung von Trends der täglichen Ozonmaxima

4.1 Aufprägung der stationsspezifischen Jahresgänge

Die in den Abb.12 und Abb.13 aufgezeigten Trends beziehen sich auf die **Abweichungen** der täglichen Ozonmaxima vom stationsspezifischen Jahresgang. Zur Ermittlung der Trends für **Überschreitungshäufigkeiten** unterschiedlicher Schwellenwerte ist es notwendig, die stationsspezifischen Jahresgänge (Abb.4 und Abb.5) auf die wetterbereinigten Meßreihen aufzuprägen. Betrachtet man nun die neu gewonnenen Zeitreihen, so wird sofort ein Dilemma deutlich: Mit der Wetterbereinigung sind die extremen täglichen Ozonwerte als Funktion der meteorologischen Bedingungen eliminiert worden (Vergleich der gelben und grünen Zeitreihen in Abb.12 und Abb.13). Noch deutlicher wird dieser Umstand, wenn man Häufigkeitsverteilungen der originalen und wetterbereinigten Reihen gegenüberstellt.

Die Abb.14 und Abb.15 zeigen dies am Beispiel der Stationen Viernheim und Rastatt.

Abb 14: Häufigkeitsverteilung der originalen, wetterbereinigten und transformierten Ozonreihe Station HE019 (Vierneheim),
Stationstyp: vk, April bis September 1990 bis 1997

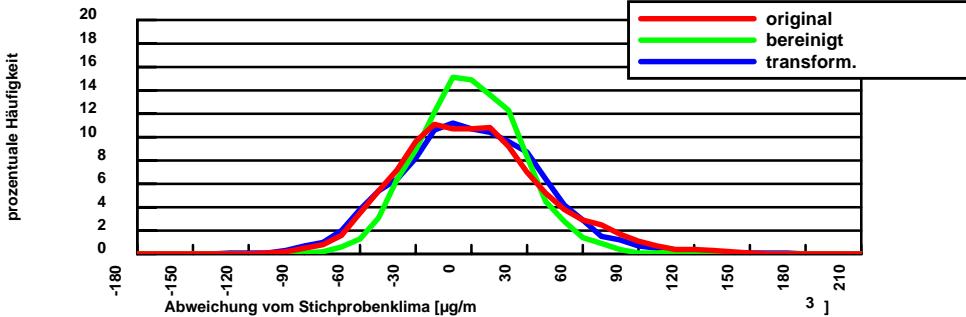
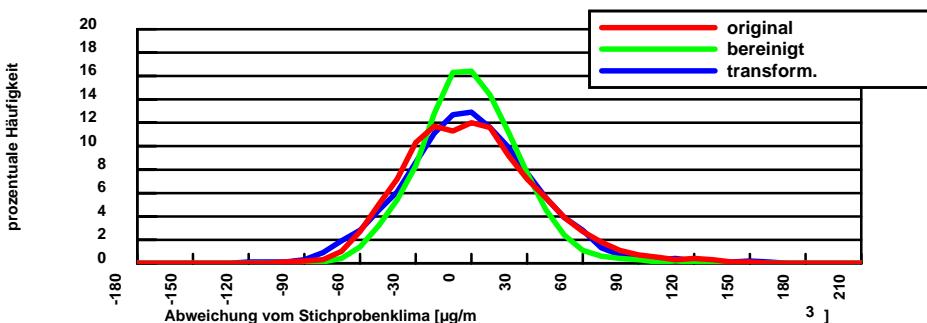


Abb 15: Häufigkeitsverteilung der originalen, wetterbereinigten und transformierten Ozonreihe Station BW020 (Rastatt),
Stationstyp: st, April bis September 1990 bis 1997



4.2 Normierung der Streuungen der ‘wetterbereinigten’ Reihe auf das Niveau der Originalreihen

Prinzipiell ist es möglich die Trenduntersuchungen an das Spektrum der wetterbereinigten Ozonschwellenwerte anzupassen. Da dies jedoch erhebliche Schwierigkeiten bei der Interpretation der Ergebnisse nach sich zieht, wurde der Weg der Anpassung der wetterbereinigten Reihen an die Häufigkeitsverteilungen der Originalreihen beschritten. Um dies zu erreichen, wurde aus dem Verhältnis der Originalstreung zur Streuung nach Wetterbereinigung ein Quotient bestimmt, der beide Verteilungen wieder annähert (Abb.14 und Abb.15, blaue Kurve). Zum exakten Vergleich der Trends für unterschiedliche Schwellenwerte wurde dieser Faktor schwellenwertspezifisch berechnet. Nach der Normierung stimmen die Verteilungen zwischen original- und wetterbereinigter Reihe auch in den Flanken der Häufigkeitsverteilungen nahezu überein. Erst durch die Übereinstimmung der Häufigkeitsverteilungen wird ein Vergleich mit nicht wetterbereinigten Reihen möglich. Im Ergebnis der Normierung verzeichnet man als Mittel über den gesamten Untersuchungszeitraum zwar eine vergleichbare Häufigkeitsverteilung, wie die der Originalreihe, die zeitliche Abfolge der Extremwerte hat sich jedoch geändert. Dies liegt natürlich in voller Absicht: Die extremen Ozonmaxima werden über das Zeitintervall 1990 bis 1997 so verteilt, als hätte in all den Jahren ein ‘Einheitswetter’ geherrscht.

Nach der Normierung der Häufigkeitsverteilungen wird eine Binarisierung für 25 Schwellen-werte von $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $280\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Schritten von $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ vorgenommen. Für alle 25 Schwellenwerte und alle 167 Stationen erfolgt im nachfolgenden Schritt die Berechnung der linearen Trends. Die Signifikanz der erhaltenen Trends wird mittels F-Test unter Berück-sichtigung der Autokorrelation der binarisierten Zeitreihen für 5% und 1% Irrtums-wahrscheinlichkeit bestimmt.

5 Diskussion der Ergebnisse

Untersucht man im ersten Schritt den linearen Trend für einen Schwellenwert von $100\mu\text{g}/\text{m}^3$, kann dies in guter Näherung mit dem Trend der mittleren täglichen Ozonmaxima gleichgesetzt werden (Überschreitungshäufigkeit als Mittel über alle 167 Stationen beträgt 51%, vgl. Tab. 5), so ergibt sich im Mittel eine Zunahme um 5% im Zeitraum von 1990 bis 1997, wobei 48% der Stationen einen signifikanten Trend mit mindestens 5% Irrtumswahrscheinlichkeit aufweisen.

Betrachtet man die Ergebnisse in Tabelle 5 aufgeschlüsselt nach Stationstypen, so fallen die Ergebnisse differenzierter aus. Den stärksten Anstieg verzeichnen die verkehrsnahen Stationen mit 9%, hingegen wird bei den Stadt- und Landstationen nur ein Anstieg um 4% erreicht. Ungefähr die Hälfte der Stationen weisen einen signifikanten Trend auf. Bei den Bergstationen hingegen ergibt sich nur bei einer Station ein signifikanter Trend.

Tabelle 5: Mittlere Trends für Überschreitungshäufigkeiten $>100\mu\text{g}/\text{m}^3$

	alle (167)	vk (40)	st (94)	la (28)	bg (5)
Überschreitungshäufigkeit [%]	51%	42%	51%	59%	81%
Mittlerer Trend [%] (1990-1997)	5%	9%	4%	4%	6%
Zahl der Stat. mit sign. Trend [%]	48%	50%	44%	64%	20%
mittlere Zahl der Fälle	1447	1452	1446	1444	1452
Mittlerer effektiver Freiheitsgrad	660	694	656	626	634
vk: Verkehrs-Station, st: Stadt-Station, la: Land-Station, bg: Berg-Station					

Im nächsten Schritt wurde die geographische Verteilung der Trends für ausgewählte Schwellenwerte näher untersucht. Tabelle 6a-d enthält die prozentualen Trends der Einzelstationen, unterteilt nach Stationstypen für Überschreitungshäufigkeiten zwischen $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ und $230\mu\text{g}/\text{m}^3$. Alle Trends, die nicht mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% oder 5% gesichert werden konnten, sind mit einem '*' markiert.

Tab. 6a: Prozentuale Trends für Überschreitungshäufigkeiten zwischen 80µg/m³ und 230 µg/m³ ‘*’: Irrtumswahrscheinlichkeit >5% (nicht signifikant)

verkehrsnahe - Stationen

	µg/m ³	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
BE14	-24*	-28*	-33*	-44	-49	-25*	-26*	25*	-82	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	0*
BW01	-10*	-24*	-30*	-39	-44	-56	-59	-64	-64	-67	-62*	-68*	-72*	-76	-84	0*	
BW02	30	36	38	39	42	44	42	44	45	42*	43*	53	50*	45*	25*	33*	
BW11	-4*	-15*	-24	-30	-34	-48	-53	-61	-64	-70	-72	-76	-73	-77	-79	-86	
BW13	10*	13*	22	13*	5*	-17*	-28*	-49	-59	-58	-49*	-55*	-70*	-79	-82*	-85	
BW14	-18	-26	-34	-37	-43	-48	-54	-58	-63	-67	-68	-69	-72	-76	-75	-78	
BW25	6*	0*	-10*	-6*	-11*	-17*	-28*	-37	-46	-47	-51	-57	-60	-67	-65	-73	
BW26	-8*	-12*	-21	-30	-39	-42	-53	-58	-62	-65	-64	-63	-71	-67	-49*	-68*	
BW36	7*	0*	-2*	-8*	-14*	-16*	-31*	-36*	-43	-53	-51	-42*	-44*	-42*	-66*	-85	
BY05	8*	9*	10*	12*	11*	5*	-16*	-28*	-39	-53	-51	-44*	-35*	-28*	-62*	-85*	
BY37	46	48	44	30*	44*	53*	36*	-24*	-82*	-82*	0*	0*	0*	0*	0*	0*	
BY53	34	39	38	38	29*	27*	26*	34*	-33*	-41*	-39*	0*	0*	0*	0*	0*	
HE01	36	41	42	41	42	35	39	38	21*	36*	50	55	54*	27*	-63*	-68*	
HE03	39	43	44	43	43	43	48	40	30*	34*	36*	36*	40*	38*	11*	-21*	
HE05	52	56	59	59	60	59	56	60	61	58	48*	42*	35*	38*	0*	-39*	
HE07	30	34	33	33	38	38	45	50	55	58	61	53*	67	66	56*	0*	
HE08	33	32	31	32	29	9*	-5*	-12*	0*	23*	8*	-15*	0*	30*	0*	-49*	
HE10	9*	3*	9*	1*	-3*	-16*	-20*	-18*	-40	-33*	-46*	-40*	-51*	-59*	-70	-66*	
HE12	29	37	43	43	43	43	41	37*	17*	14*	-7*	-37*	20*	-77*	-87	-87	
HE14	28	35	39	35	28*	15*	28*	39*	25*	0*	0*	-44*	-78	-82*	-79*	0*	
HE18	21	25	35	37	42	43	50	52	54	53	55	56	61	59	55*	44*	
HE19	34	37	42	41	44	44	43	42	43	42*	41*	29*	36*	26*	9*	-43*	
HE21	32	34	39	44	46	50	50	54	52	53	60	58	61	58*	58*	-24*	
HE22	30	34	38	37	44	47	39	39	39	45	20*	9*	30*	0*	-17*	-39*	
HE29	40	40	44	45	45	43	40*	42*	35*	45*	45*	41*	40*	-39*	-82*	0*	
HE30	32	36	41	46	48	53	49	51	55	43*	32*	-12*	-46*	-66*	-77*	-87	
HE31	29	34	36	31	26*	28*	16*	-7*	-17*	27*	-20*	-42*	-49*	-66*	-66*	0*	
NW04	8*	-5*	-10*	-25	-22*	-29*	-39	-43	-52	-60	-57	-57	-66	-77	-86	-86	
NW08	-14*	-26	-31	-40	-41	-46	-54	-59	-66	-66	-62	-67	-74	-80	-88	-79*	
NW13	1*	-6*	-8*	-16*	-18*	-32	-36	-43	-50	-62	-65	-67	-67	-69	-79	-82	
NW28	8*	2*	0*	-12*	-15*	-5*	-18*	-12*	-10*	-15*	-51	-51*	-58	-67	-57*	-57*	
NW38	-15	-16*	-21	-12*	-16*	-25*	-27*	-32*	-42	-47	-54	-59	-61	-28*	-73	-76	

NW47	5*	1*	-6*	-11*	-12*	-13*	-18*	-28*	-28*	-21*	-15*	-25*	-30*	-43*	-44*	-66*	
NW49	-20	-25	-29	-29	-32	-35	-48	-49	-49	-58	-59	-62	-67	-73	-73	-79	
NW50	-11*	-17*	-21*	-27	-36	-45	-48	-43	-49	-53	-58	-60	-61	-69	-75	-78	
NW53	-9*	-17*	-20*	-27	-34	-42	-46	-50	-50	-53	-59	-66	-71	-74	-73	-76	
NW59	-2*	-8*	-19*	-22*	-27	-24*	-26*	-12*	-23*	-34*	-40*	-57	-67	-69	-72	-68*	
RP03	11*	13*	-1*	8*	-1*	-9*	-21*	-13*	-39*	-56	-66	-58*	-71	-69*	-89	0*	
RP20	-12*	-16*	-14*	-29*	-35	-46	-51	-62	-62	-69	-75	-80	-77	-79	-87	-87	
RP21	6*	15*	16*	32	29	35	35	30*	33*	15*	-6*	-44*	0*	17*	-66*	-88	

Tab. 6b: Prozentuale Trends für Überschreitungshäufigkeiten zwischen 80µg/m³ und 230µg/m³ “*”: Irrtumswahrscheinlichkeit >5% (nicht signifikant)

Stadt - Stationen

µg/m ³	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	
TH09	-17	-17	-18*	-20*	-31*	-37*	-50*	-48*	-50	-57	-57	-71	-72	-78	-78	-79	
TH20	-3*	-1*	-14*	-22*	-24*	-38*	-44*	-59*	-64*	-68	-69	-70	-70	-71	-73	-74	
BB03	-12*	-13*	-27	-41	-44	-43	-50	-52	-65	-64	-70	-68	-68	-72	-74	-85	
BB21	-21	-31	-41	-44	-50	-54	-55	-55	-57	-61	-69	-67	-63*	-74*	-49*	-49*	
BB26	-19	-21	-37	-42	-46	-51	-50	-60	-65	-64	-46*	-79	-80	-80	-82	-82	
BE01	-11*	-19	-29	-38	-43	-47	-49	-54	-56	-55	-66	-70	-75	-77	-83	-83	
BE10	-5*	-19	-23	-28	-34	-36	-41	-48	-59	-66	-69	-70	-71	-71	-77	-79*	
BE27	-9*	-11*	-18	-21	-21*	-27	-39	-32	-25*	-28*	-35*	-45*	-42*	-66*	-72*	-74*	
BE32	-8*	-10*	-18	-24	-29	-32	-40	-50	-54	-53	-64	-66	-70	-78	-70*	-85*	
BE34	1*	-3*	-3*	-7*	-17*	-26*	-38	-52	-54	-61	-59	-64	-72	-70	-70	-80	
SL03	29	30	34	38	42	34	37*	26*	16*	-25*	-66	-68*	0*	0*	0*	0*	
SL08	-5*	6*	3*	2*	-7*	-6*	-23*	-43	-52	-60	-57*	-69*	-77*	0*	0*	0*	
SL17	45	50	51	51	54	57	55	51	50	44*	47*	0*	-24*	-49*	-82*	-82*	
SN51	38	45	53	54	52	49	48	37*	37*	36*	50*	27*	-56*	-77*	0*	0*	
BW04	-9	-15	-15*	-20	-24	-30	-34	-34	-44	-41	-43	-48	-44*	-42*	-47*	-37*	
BW05	14*	19	14*	7*	2*	-8*	-21*	-32*	-37*	-41	-47	-55	-61	-63	-64	-68	
BW06	1*	4*	0*	0*	2*	-6*	-16*	-17*	-21*	-33*	-33*	-45	-49*	-52*	-78	-78	
BW07	6*	11*	19	24	28	31	24*	23*	16*	23*	26*	-8*	20*	40*	-26*	-49*	
BW08	32	34	27	18*	4*	-21*	-31*	-40*	-50	-54	-56	-55	-60	-69	-70	-76	
BW09	17	16*	21	17*	19*	27*	25*	19*	-8*	-2*	-18*	-38*	-59*	-53*	-62*	-62*	
BW10	26	27	25	26	21*	16*	4*	-6*	-16*	-31*	-38*	-52	-55	-49*	-56*	-71	
BW12	-7*	-6*	-11*	-15*	-17*	-19*	-29*	-17*	-19*	-25*	-13*	38*	53*	64*	33*	-66*	

BW15	-9*	-7*	-8*	-4*	-8*	-6*	-14*	-18*	-25*	-40	-41*	-42*	-47*	-41*	-57*	-70	
BW16	-11*	-10*	-17*	-30	-39	-45	-57	-63	-65	-70	-72	-77	-77	-78	-79	-81	
BW19	10*	16*	12*	6*	4*	-21*	-31*	-55	-52	-58	-64	-80	-80	-87	0*	0*	
BW20	-16	-18	-23	-29	-32	-37	-41	-49	-53	-53	-55	-63	-65	-72	-74	-75	
BW21	-6*	-12*	-18	-29	-27	-26	-37	-41	-46	-48	-52	-60	-61	-65	-60	-67	
BW22	-4*	-12*	-20	-28	-32	-34	-33	-36	-34	-42	-38	-43	-37*	-56	-56*	-49*	
BW24	18	25	36	37	42	44	48	45	31*	45	58	54*	45*	-37*	17*	60*	
BW27	0*	14*	17*	18*	26*	25*	-1*	-16*	23*	-4*	-8*	-66*	-66*	-74*	0*	0*	
BW28	-10*	-13*	-23	-29	-31	-42	-51	-55	-61	-61	-67	-73	-78	-79	-84	0*	
BW29	1*	13*	20*	13*	-1*	-9*	-27*	-33*	-44*	-63	-60	-64	-69	-82	-88	-85	
BW32	27	35	33	40	42	45	46	45	47	57	33*	-39*	-42*	75*	0*	0*	
BW33	-1*	-6*	-13*	-25	-25*	-34	-46	-52	-62	-66	-69	-71	-68	-82	-82	-90	
BW34	4*	0*	-1*	-8*	-18*	-22*	-35	-44	-43	-54	-53	-46*	-41*	-26*	-39*	-39*	
BW35	-8*	-5*	-8*	-11*	-18*	-17*	-16*	-21*	-21*	-33*	-40*	-39*	-58	-65	-76	-78	
BW38	-6*	-4*	-7*	-16*	-24*	-40	-42	-51	-58	-62	-68	-75	-75	-85	-89	0*	
BW39	24	26	25	21*	20*	5*	-8*	-25*	-49*	-65	-70	-75	-79	-88	-88	0*	
BW40	22	28	32	32	38	26*	-6*	2*	9*	-30*	-59	-77	-79	-88	-85	0*	
BW41	5*	11*	11*	12*	6*	6*	7*	9*	-8*	-13*	-28*	-52*	-67	-82	-90	0*	
BW42	34	40	39	35	34*	31*	30*	22*	19*	20*	11*	-32*	-22*	-45*	-32*	-42*	
BW44	1*	1*	-6*	-19*	-29	-34	-41	-47	-53	-57	-54	-55	-61	-64*	-66*	-74*	
BW45	-8*	-8*	-16	-24	-31	-36	-44	-50	-58	-58	-67	-69	-75	-82*	-82*	-82*	
BW81	0*	2*	4*	4*	2*	-4*	-10*	-18*	-25*	-30*	-33*	-37*	-43*	-40*	-66	-55*	
BW83	3*	10*	15*	16*	11*	10*	8*	13*	20*	18*	-36*	-48*	-58*	-62*	-74*	-88	
BY02	29	33	33	37	44	41	39*	40*	-13*	-37*	-79*	0*	0*	0*	0*	0*	
BY08	1*	7*	16	20	20*	19*	24*	25*	-19*	-15*	-49*	-66*	0*	0*	0*	0*	
BY20	-7*	-10*	-15*	-20*	-25*	-38	-40	-56	-58	-61*	-74*	-74*	0*	0*	0*	0*	
BY39	30	20	20*	24*	19*	-1*	-27*	-45	-47*	-67	-79	-79*	-88	-88	-88	0*	
BY72	4*	1*	2*	2*	8*	-19*	-23*	-37	-52	-53	-59*	0*	0*	0*	0*	0*	
BY79	-9*	-3*	-7*	1*	-2*	8*	25*	13*	48*	43*	50*	0*	0*	0*	0*	0*	
BY81	5*	15	31	42	35	41	29*	34*	33*	-74*	-79*	0*	0*	0*	0*	0*	
SH01	-9*	6*	7*	7*	-2*	-16*	-28*	-39	-35*	-40*	-58	-75	-59*	-79*	0*	0*	
SH05	-2*	19*	29	37	25*	10*	7*	-31*	-47*	0*	17*	17*	-66*	-66*	-82*	0*	
SH07	-35	-44	-51	-59	-62	-64	-66	-68	-79	-82	-85	-83	-85	-85	-85	-85	
HB01	31	37	38	42	36	38	34*	42*	21*	29*	-39*	-85*	-85*	-87	0*	0*	
HB02	32	40	38	38	38	34*	27*	-21*	-44*	-60*	-80	-80	-88	-88	-88	-88	
HB03	3*	-10*	-11*	-10*	-24*	-31*	-44*	-24*	-40*	-68	-72*	-88	-88	-79*	0*	0*	
HB04	36	41	47	51	48	45	38	26*	-8*	-52*	-72	-72*	-74*	-74*	0*	0*	
HB05	30	44	47	45	38	37	7*	18*	24*	26*	-57*	-66*	-85*	-82*	-82*	0*	
HE27	-15*	1*	4*	14*	8*	4*	7*	-16*	-33*	-29*	-32*	-44*	-57	-68	-76	-78	

HE32	15*	23	29	33	35	41	44	44	29*	39*	20*	-49*	-69*	0*	0*	0*	
HE33	26	34	39	42	36	37	35	38*	42*	34*	-16*	-46*	-54*	-49*	0*	0*	
HH05	3*	21	24	30	25	23*	23*	27*	20*	-18*	-26*	-24*	-72*	-90	0*	0*	
HH06	38	51	51	54	45	44	48	56	55	41*	25*	-24*	-49*	0*	0*	0*	
HH08	44	47	40	29*	29*	28*	49*	49*	47*	0*	-32*	-49*	-49*	0*	0*	0*	
NI14	-17	-21	-23	-20*	-24	-32	-35	-47	-54	-59	-60	-69	-76	-76	-75	-87	
NI28	2*	15*	17*	18*	14*	7*	-5*	-20*	-17*	-40*	-31*	-34*	-53*	-49*	-79*	-79*	
NI29	22	35	40	40	47	52	59	62	69	71	69	60	60*	50*	75*	-49*	
NI31	-6*	1*	16*	18*	26*	30*	31*	36*	41*	36*	36*	29*	-42*	-42*	-24*	-87	
NI36	14*	23	30	39	46	51	51	38*	35*	37*	37*	20*	-37*	-59*	-59*	-87	
NI38	6*	-1*	2*	9*	10*	20*	18*	-12*	-22*	-24*	-43*	-59	-56*	-55*	-55*	-42*	
NI40	2*	6*	15*	17*	14*	11*	-7*	-23*	-23*	-24*	-63*	-80	-91	-91	-91	-87	
NI41	-31	-32	-33	-32	-29	-38	-51	-54	-58	-68	-73	-71	-70	-66	-62*	-63*	
NI42	-24	-18*	-24	-27	-16*	-17*	-24*	-39	-42	-40*	-51	-51*	-71	-74	-85	-89	
NI43	14*	23	36	45	44	51	56	54	55	57	62	61	60	50*	38*	33*	
NW10	11*	7*	9*	-11*	-11*	-7*	-35	-42	-48	-52	-60	-49*	-58*	-45*	-49*	-77*	
NW15	10*	9*	1*	11*	-3*	6*	2*	-1*	-21*	-44	-49	-52	-63	-67	-75	-77	
NW29	-27	-37	-41	-43	-44	-48	-51	-54	-60	-64	-66	-72	-76	-76	-87	-85	
NW30	0*	4*	12*	2*	0*	-1*	-13*	-11*	-31*	-36*	-50	-58	-67	-72	-71	-75	
NW34	-7*	-15*	-14*	-14*	-22*	-22*	-25*	-26*	-32*	-34*	-32*	-58	-55	-62	-68*	-61*	
NW36	-14*	-15*	-17*	-24	-29	-30	-33	-37	-49	-59	-55	-63	-67	-68	-70	-71	
NW58	-23	-22	-29	-34	-38	-41	-45	-49	-45	-44	-48	-53	-63	-71	-74	-72	
NW62	10*	12*	3*	-6*	-7*	-18*	-14*	-40	-52	-52	-61	-66	-58*	-66	-63*	-74	
NW66	-3*	-6*	-7*	-13*	-13*	-23*	-31	-27*	-31*	-40	-44	-45*	-51*	-59	-49*	-39*	
NW67	-16*	-7*	-20*	-25*	-24*	-30*	-40	-49	-53	-57	-66	-68	-61*	-61*	-76	-88	
NW71	-6*	-6*	-5*	-11*	-19*	-32	-37	-37	-31*	-26*	-42	-44*	-54	-55*	-72	-82	
RP07	-5*	-5*	4*	-5*	4*	5*	-18*	-27*	-23*	-21*	-13*	-23*	-52*	-43*	50*	-74*	
RP18	15*	14*	19*	15*	9*	-11*	-29*	-34*	-40*	-32*	-41*	-46*	-64*	-75	-76	-76	
RP19	0*	-2*	-10*	-15*	-20*	-34	-45	-59	-64	-69	-71	-73	-82	-82	-82	-85*	
RP22	-17	-19*	-22	-31	-38	-39	-43	-48	-52	-41*	-32*	-30*	-57*	-69*	-85	-85	
UB07	7*	29	31	31	16*	2*	-8*	-2*	13*	-3*	-19*	-51*	-68*	-79*	-87	0*	
UB09	29	31	33	27	21*	7*	-20*	-30*	-44	-48	-47*	-28*	-22*	-43*	-37*	-24*	
UB16	47	50	53	51	50	46	47	40*	35*	26*	34*	22*	15*	-16*	-29*	-66*	

Tab. 6c: Prozentuale Trends für Überschreitungshäufigkeiten zwischen 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ “*”: Irrtumswahrscheinlichkeit >5% (nicht signifikant)

	Land - Stationen															
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
ST11	8*	13*	14*	6*	-8*	-17*	-27*	-38*	-25*	-36*	-47*	-40*	-68*	-74*	-74*	0*
MV01	-21	-21	-6*	8*	7*	4*	-19*	-29*	-37*	-38*	-42*	-37*	25*	0*	0*	-66*
SN49	34	42	43	43	37	26*	-3*	-36*	-28*	-59	-66*	-82*	0*	0*	0*	0*
BW30	-14	-21	-26	-29	-31	-42	-46	-51	-57	-62	-64	-71	-71	-73	-75	-78
BW37	0*	1*	-3*	-14*	-23	-32	-43	-51	-54	-59	-62	-68	-72	-71	-74	-76
SH06	-9*	8*	17*	23*	4*	-22*	-33*	-17*	-7*	-34*	-32*	-70	-66*	50*	0*	0*
SH08	-7*	6*	18*	20*	15*	0*	-12*	-3*	-10*	0*	-66	-62*	-74	-74	-87	-87
HE23	-21	-22	-18	-18*	-20*	-16*	-14*	-32	-38	-33*	-32*	-40*	-64*	-68	-78	0*
HE25	26	32	37	39	35	34	33*	30*	25*	-4*	-6*	-14*	-32*	-44*	-44*	-49*
HE26	25	26	30	34	33	41	40	33*	37*	25*	-33*	-27*	-66	-72	-66*	-59*
HE28	25	33	39	41	43	40	44	45	48	45	42*	48	46*	40*	25*	25*
NL16	4*	5*	4*	0*	-13*	-26*	-36	-28*	-26*	-38*	-25*	-43*	-35*	-79	-79*	-79*
NL19	-34	-37	-39	-45	-45	-49	-51	-57	-65	-64	-64	-65	-75	-79	-81	-86
NW63	-32	-33	-36	-35	-37	-44	-48	-55	-65	-62	-65	-64	-71	-69	-66*	-68*
NW64	-16	-18	-20	-22	-17*	-16*	-23*	-31*	-33*	-38*	-38*	-38*	-32*	-49*	-52*	-59*
NW65	-7*	-18	-19*	-20*	-26	-32	-34	-38	-49	-53	-53	-57	-32*	-49*	-68*	-77*
RP13	-16	-15	-12*	-11*	2*	2*	15*	-1*	-10*	-23*	-8*	0*	8*	-57*	-85	0*
RP14	-2*	-4*	-4*	-9*	-13*	-22*	-34	-26*	-36	-48	-51	-52*	-46*	-55*	-55*	-85
RP15	-8*	-7*	-1*	6*	1*	1*	1*	-20*	-45	-48	-42*	-48*	-58	-52*	-61*	-74*
RP17	10	13	16	25	28	28	22*	13*	9*	16*	-20*	-61	-61*	-61*	-80	-91
UB01	20	37	41	44	47	51	42*	12*	-38*	27*	0*	-70*	-74*	-82	-82	0*
UB02	6*	14*	17*	25	26	16*	-3*	-17*	-10*	-20*	-49	-62	-67	-60*	-76	-79
UB05	15	19	23	23*	16*	10*	2*	-4*	-24*	-36*	-56	-63	-66*	-74*	-66*	-66*
UB06	30	36	43	32	29*	36*	26*	18*	22*	-32*	-57*	-62*	-74*	0*	0*	0*
UB12	9*	16	23	29	25	27*	27*	29*	23*	-7*	-20*	26*	-35*	-74*	-79*	-79*
UB13	27	35	38	39	39	40	40	42*	51	48*	42*	-19*	-56*	-56*	-79*	0*
UB17	-3*	-4*	1*	6*	6*	-6*	-6*	-15*	-16*	-13*	5*	-24*	-8*	0*	-19*	-49*
UB18	1*	7*	14*	21*	24*	14*	-3*	-15*	-28*	-18*	-27*	-39*	-49*	-43*	-66*	-49*

Tab. 6d: Prozentuale Trends für Überschreitungshäufigkeiten zwischen 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und 230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ‘*’: Irrtumswahrscheinlichkeit >5% (nicht signifikant)

Berg - Stationen

	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
SN53	18	27	33	38	36	33	10*	-5*	-45	-66	-73	-79	-78	-82	-87	-85	
BW31	4*	7*	12	14*	17*	19*	26	29	24*	25*	25*	27*	28*	2*	10*	-32*	
BY82	-2*	0*	14	31	39	43	44	36*	36*	14*	-54*	33*	0*	0*	0*	0*	
UB03	3*	7*	10*	7*	2*	-6*	-17*	-31*	-29*	-54	-45*	-58*	-76*	-85	0*	0*	
UB04	-7	-5*	-3*	12*	11*	15*	4*	-9*	-11*	-13*	-32*	-61	-66	-70	-77	-79	

Abb.16: Prozentualer Trend des Bodenozons
April bis September 1990–1997, 167 Stationen
Schwellenwert: 100 Mikrogramm/Kubikmeter

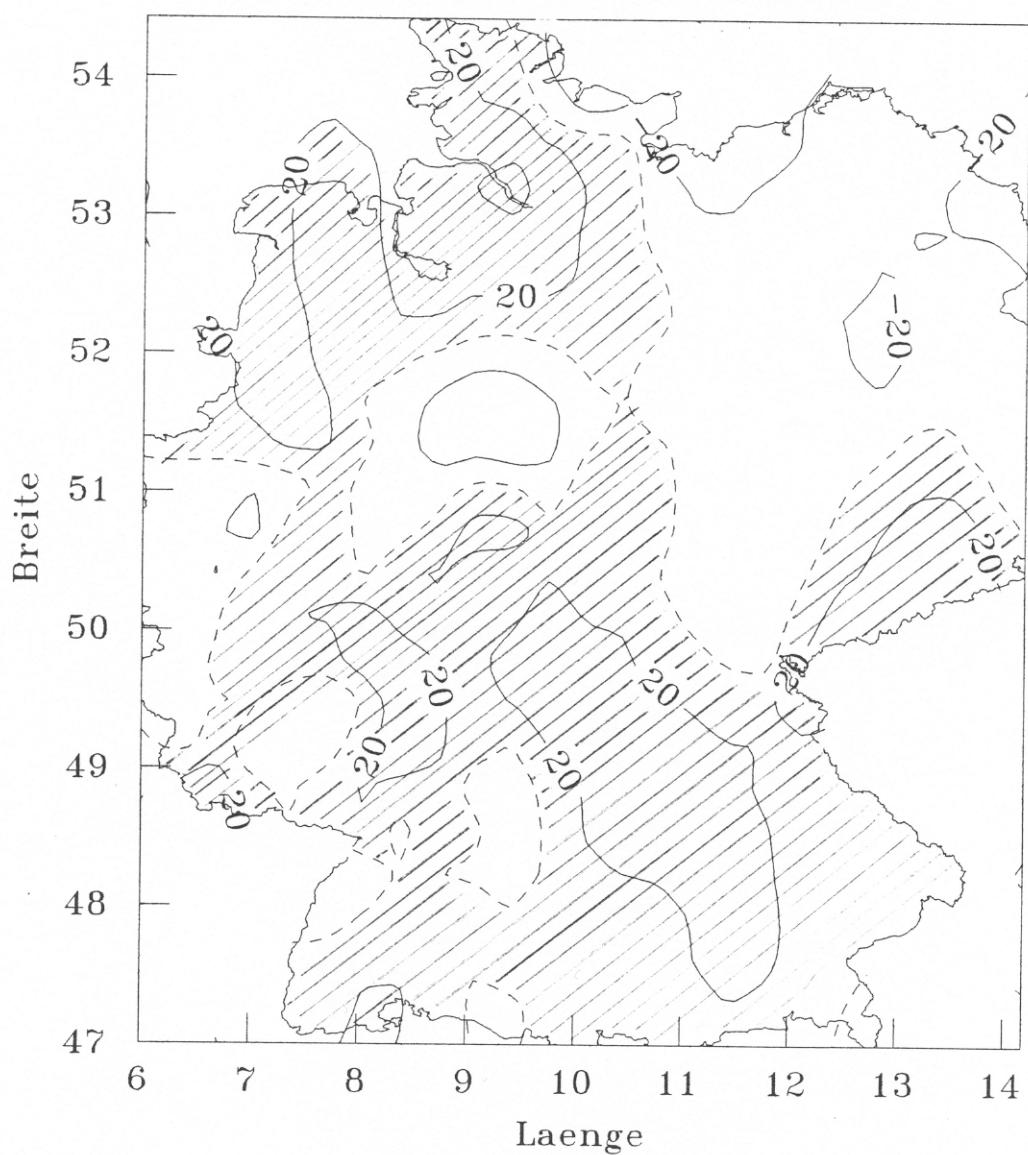


Abb.17: Prozentualer Trend des Bodenozons
April bis September 1990–1997, 167 Stationen
Schwellenwert: 180 Mikrogramm/Kubikmeter

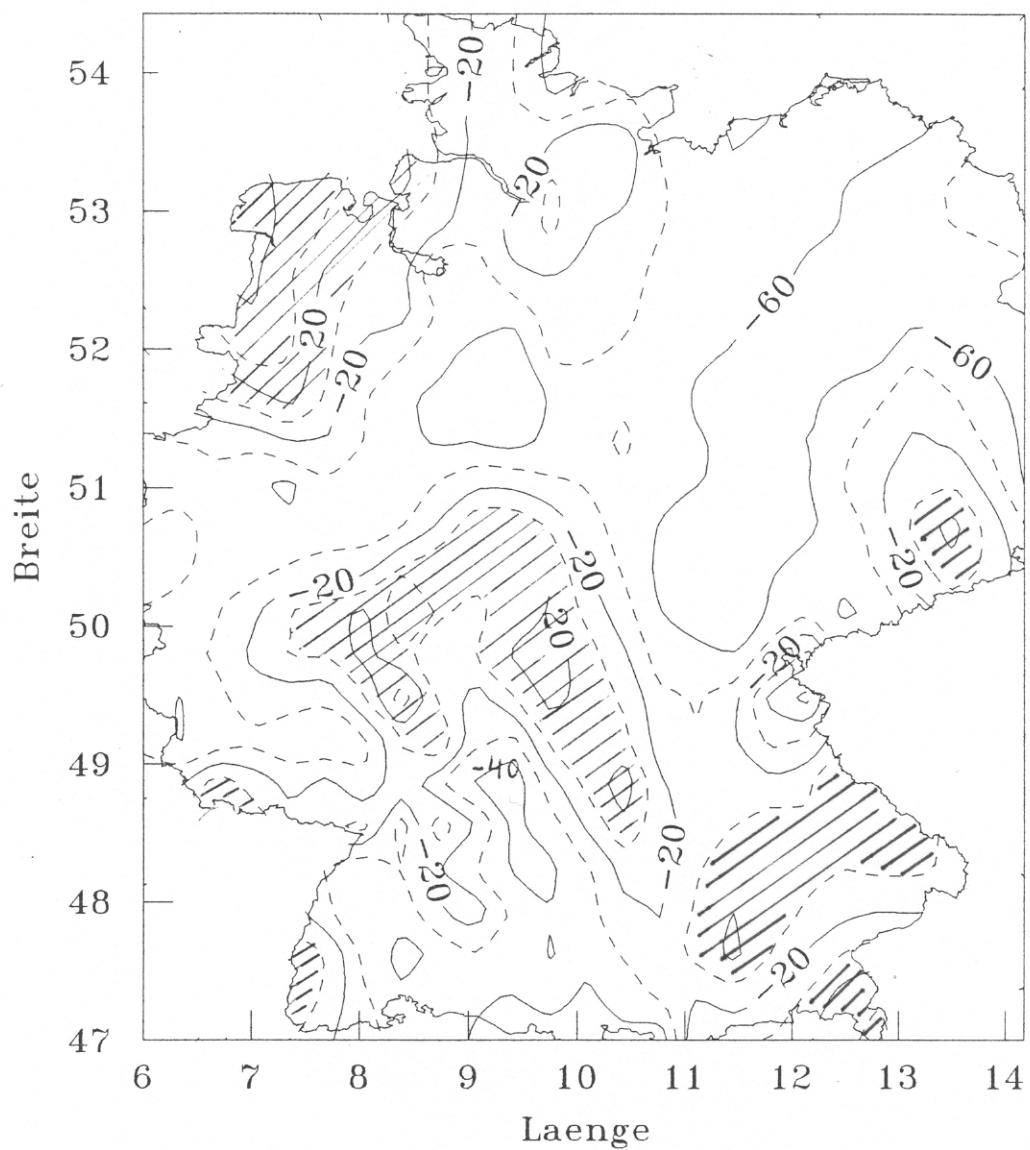


Abb. 18: Signifikanzniveau der prozentualen Trends
Schwellenwert 100µg/m³, 167 Stationen



	BW45		BY08	
	0		0	
BW83	BW39		BY39	
0	95		95	
UB04				
	0			
BW31			BY79	
	0		0	
BW41BW40		BW38	BY82	
0	99	0	0	
			BY81	
			95	

Abb. 19: Signifikanzniveau der prozentualen Trends
Schwellenwert 180µg/m³, 167 Stationen

UB01	SH06
0	0
	SH07
	99
	UB06SH08
	0 0
	SH05MV01
	0 0
	SH01
	0
NI29	NI31HB05
99	0 0
	HH08HH05
	0 0
NI36	
0	
HB04	
0	
HB03	
0	
UB07	
0	
	UB05
	0
NI43	
99	
	BE14BE10
	99 99
	BB03 BE32BE34
	99 95 99
	NI38 NI41
	0 99
UB16	NW67
0	95
	NI14
	99
	NI16ST11
	0 0
NW30	NW15
0	95
	NW63 NI19
	99 99
NW34	NW08NW10
0	99 95
	NI42NI28
	0 0
NW36NW38NW29NW13	
99 95 99 99	0
NW66	NW71
95	0
	HE14
	HE12
	0
NW53	UB09
99	95
	HE27HE33
	0 0
	UB18
	0
NW59	NW65
0	99
	HE32
	0
	TH20 TH09
	95 95
NW62	HE29
95	0
	HE30 HE23
	0 0
NW64	HE10
0	0
	HE31
	0 0
	SN51
	0
RP21	
0	
	SN49SN53
	95 99
RP15	HE25
95	0
	BY20UB17
	0 0
	RP07HE18HE08 HE26
	0 95 0 0
	BY02
	95
RP22	HE01 BY05
0	0 95
RP20	UB02
99	0
	SL08
	HE19HE28
	95 0 95
SL03RP13	RP19
0 0	RP03BW09BW44
99	95 0 99
	BY53
	0
SL17	RP17
0	RP18BW10BW16
	UB13
	0 0 0 99
	BW81 BW15
	0 95
	BW20BW33BW32BW34BW30 BW29
	99 99 95 99 99 95
	BW42BW26BW28
	0 99 99
BW22	BW36
95	95
	BW37UB12BW27 BW19
	99 0 0 95
	BW45 BY08
	95
	UB03
	95

		95		0
BW83	BW39		BY39	
0	95		95	
UB04				
0				
BW31			BY79	
0			0	
BW41BW40		BW38	BY82	
0	0	99	0	
			BY81	
			0	

Abb.16 zeigt die geographische Verteilung für den prozentualen Trend der Überschreitungshäufigkeit $100\mu\text{g}/\text{m}^3$, die dazugehörigen Signifikanzschwellen sind aus Abb.18 zu entnehmen. Ruft man sich den mittleren Trend für die Überschreitungshäufigkeit $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ von 5% (Tab.5) ins Gedächtnis, so ist die starke regionale Gliederung schon erstaunlich. Der Schwellenwert von $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ repräsentiert näherungsweise das mittlere tägliche Ozonmaximum. Seine Überschreitungshäufigkeit nimmt in den neuen Bundesländern (Ausnahme Erzgebirge) und in einem breiten Streifen über Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen ab. In den anderen Gebieten ist eine mehr oder weniger starke Zunahme zu verzeichnen. Die stationsspezifischen Trends lassen sich aus Tabelle 6 entnehmen. Betrachtet man im Vergleich dazu die geographische Verteilung der Überschreitungshäufigkeit von $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abb.17), so lassen sich drei Aussagen festhalten:

- Der Flächenanteil mit einer Abnahme der Überschreitungshäufigkeit (negativer Trend) hat sich gegenüber dem Schwellenwert von $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich erhöht.
- Die Gradienten zwischen Gebieten mit positivem Trend und Gebieten mit negativem Trend haben sich gegenüber dem Schwellenwert von $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ deutlich verstärkt, d.h. es gibt vor allem Gebiete mit einer deutlichen Abnahme der Überschreitungshäufigkeit von $180\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Die grundlegende Verteilung der Gebiete mit Zu- oder Abnahme der Überschreitungshäufigkeit bleibt im wesentlichen erhalten.

Am Beispiel der schon bisher betrachteten Stationen Viernheim und Rastatt wird eine weitere Möglichkeit der komprimierten Darstellung der Untersuchungsergebnisse erläutert. In der Abb.20 und Abb.21 sind die prozentualen Änderungen der Überschreitungshäufigkeiten zwischen den Jahren 1990 und 1997, bezeichnet als prozentualer Trend, für Schwellenwerte zwischen $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ und $280\mu\text{g}/\text{m}^3$ als fette ausgezogene Linie dargestellt. Die als ‘rel.H.’ bezeichnete Kurve gibt die Überschreitungshäufigkeit in Prozent für einen gegebenen Schwellenwert an, d.h. in wieviel Prozent der Tage dieser Schwellenwert überschritten wird. Eine Überschreitungshäufigkeit von Y% bedeutet also, daß im Mittel $183/(Y*0.01)$ Tage pro

Sommerhalbjahr tägliche Ozonmaxima $>X \mu\text{g}/\text{m}^3$, ($X = 40\mu\text{g}/\text{m}^3, 50\mu\text{g}/\text{m}^3, 280\mu\text{g}/\text{m}^3$) an der Station auftraten. Das Signifikanzniveau ist durch ‘ ’ mit 95% oder 99% angegeben. Wie ersichtlich ist, nehmen die Überschreitungshäufigkeiten mit zunehmenden Schwellenwerten rasch ab. Daraus folgt unmittelbar, daß Trendaussagen bezüglich höherer Schwellenwerte zunehmend unsicherer werden. Um die Aussagen für höhere Schwellenwerte dennoch zuverlässiger zu machen, wurden zwei lineare Ausgleichskurven, eine für den aufsteigenden Ast (Tr.extract1., Abb.20) und eine für den absteigenden Ast (Tr.extract2., Abb.20) der Trendkurve (Trend) berechnet. Im Falle der Station Rastatt (Abb.21) ist nur der absteigende Ast vorhanden. Mit dieser Ausgleichsgeraden lassen sich einerseits zufällige Schwankungen beseitigen und andererseits Aussagen auch zu höheren Schwellenwerten hin extrapolieren. Die unter den Abbildungen eingefügten Tabellen dienen zur Verdeutlichung der graphischen Präsentation. Sie zeigen für jeden Schwellenwert die Überschreitungshäufigkeit für das Sommerhalbjahr 1990 und 1997, wie sie sich aus der linearen Trendanalyse mit dem wetterbereinigten Datensatz ergibt.

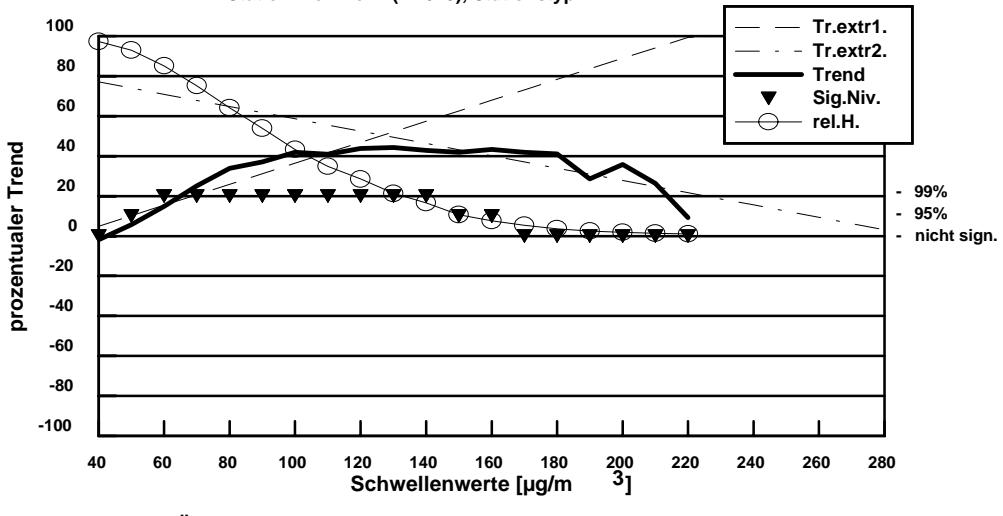
Für die beiden ausgewählten Stationen werden sofort grundsätzliche Unterschiede deutlich. Während für die Stadt - Station Rastatt (Abb.21) eine nahezu lineare Abhängigkeit in der Art zu verzeichnen ist, daß mit zunehmenden Schwellenwerten der prozentuale Trend abnimmt, findet man bei der verkehrsnahen Station Vierheim eine abgeflachte Glockenkurve, wobei im Bereich zwischen $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ und $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ hier eine 40%ige Zunahme der Überschreitungs-häufigkeit auftritt.

Der nächste Schritt der Aggregierung ist eine Mittelung der Trends über alle Stationen und nach Stationstypen unterteilt. Gleichzeitig wird eine Gegenüberstellung mit Trends vorgenommen , die aus den nicht wetterbereinigten Datensätzen gewonnen wurden.

Abb. 20: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten

(wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)

Station Viernheim (HE019), Stationstyp: vk

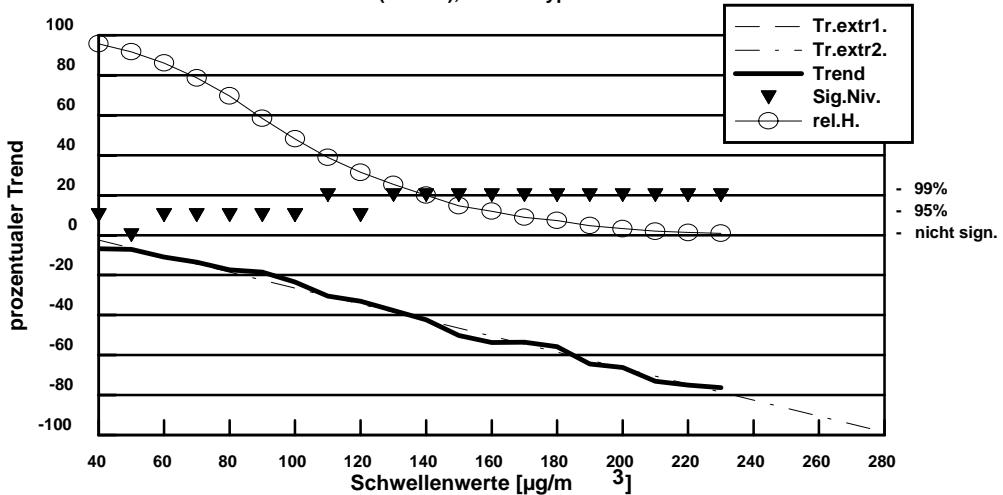
**Zahl der Überschreitungen bei vorgegebenen Ozon-Schwellenwerten**

	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
Jahr_1990	173.7	143.7	102.1	64.8	39.9	23.2	11.1	5.5	2.8	1.6	0	0	0	0
Jahr_1997	182.2	165.9	128.6	88.4	58.6	33.9	15.6	7.3	3.6	2	0	0	0	0

Abb. 21: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten

(wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)

Station Rastatt (BW020), Stationstyp: st

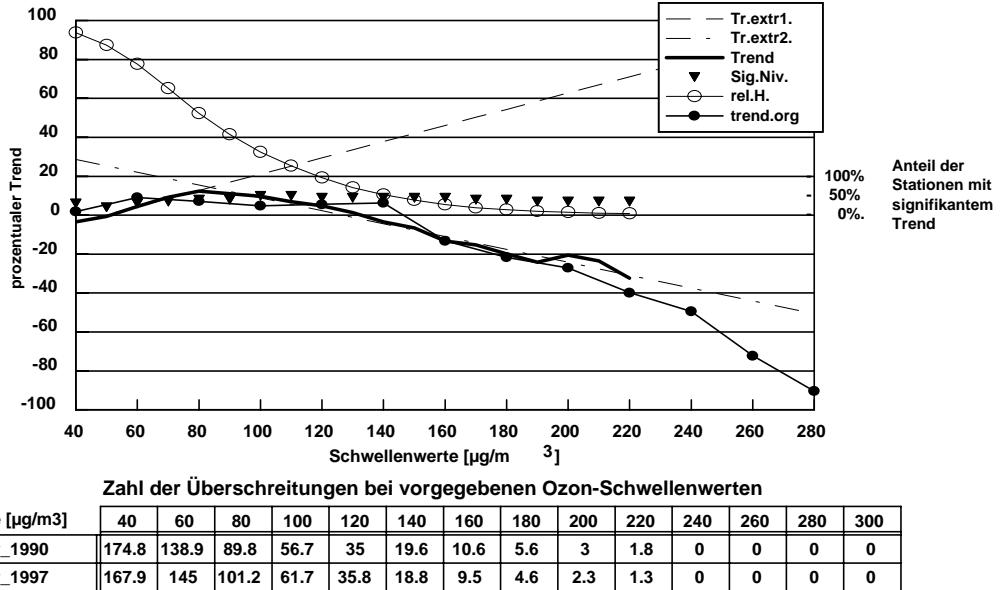
**Zahl der Überschreitungen bei vorgegebenen Ozon-Schwellenwerten**

	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
Jahr_1990	177.3	165.6	139.1	99.7	67.4	44.2	27.3	17	7.8	3.3	0	0	0	0
Jahr_1997	172.9	148.3	113.4	73.3	44.1	25.4	13.5	7.1	2.6	0.8	0	0	0	0

Abb.22 zeigt die Mittelbildung für ‘verkehrsnahe’ Stationen. Die Bedeutung der einzelnen Kurven ist dieselbe wie für die der Abb.20 und Abb.21, mit der Ausnahme, daß die Signifikanz (‘ ’) jetzt den prozentualen Anteil der Stationen mit signifikantem Trend (Irrtumswahrscheinlichkeit 1% bzw. 5%) angibt. Die mit ‘Trend org.’ bezeichnete ausgezogene Linie stellt die vergleichbare nicht wetterbereinigte Aussage, die mit (Trend ber.) bezeichnete Kurve (in Abb.20 und Abb.21) nur mit (Trend) bezeichnet die wetterbereinigte Aussage dar.

**Abb. 22: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten
(original und wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)**

Mittel über 40 verkehrsnahe Stationen



In Abb.23 ist dies für ‘Stadt’ - Stationen, in Abb.24 für ‘Land’ Stationen, und in Abb.25 für Bergstationen dargestellt. Daraus lassen sich folgende Aussagen gewinnen:

Abb. 23: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten
 (original und wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)
Mittel über 94 Stadt - Stationen

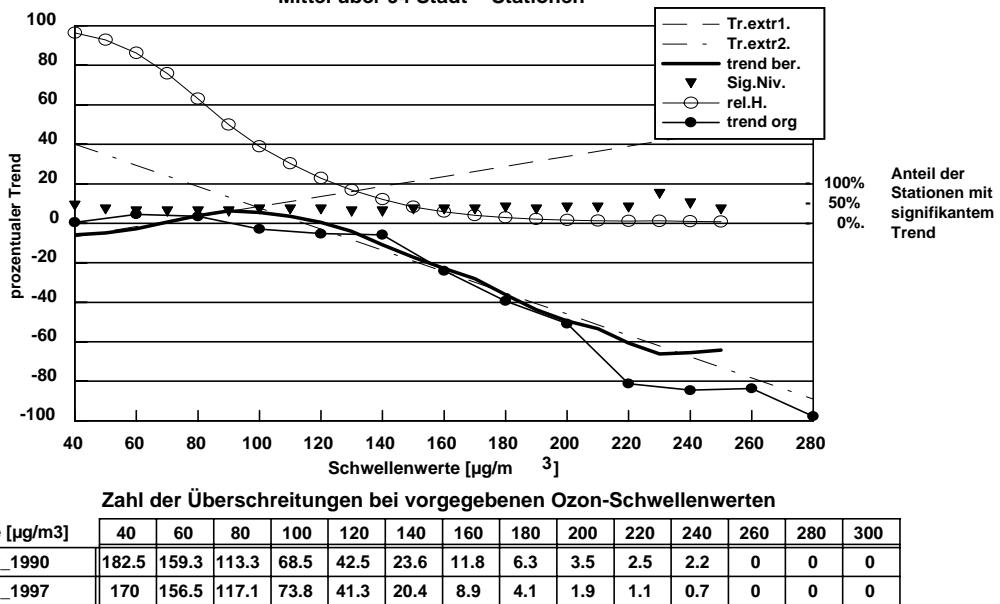


Abb. 24: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten
 (original und wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)
Mittel über 28 Land - Stationen

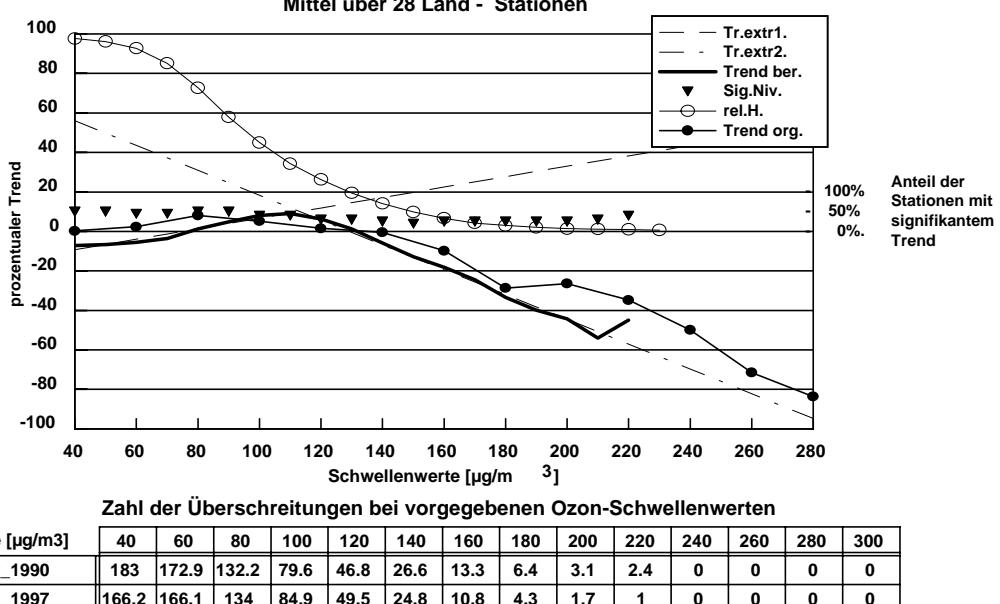
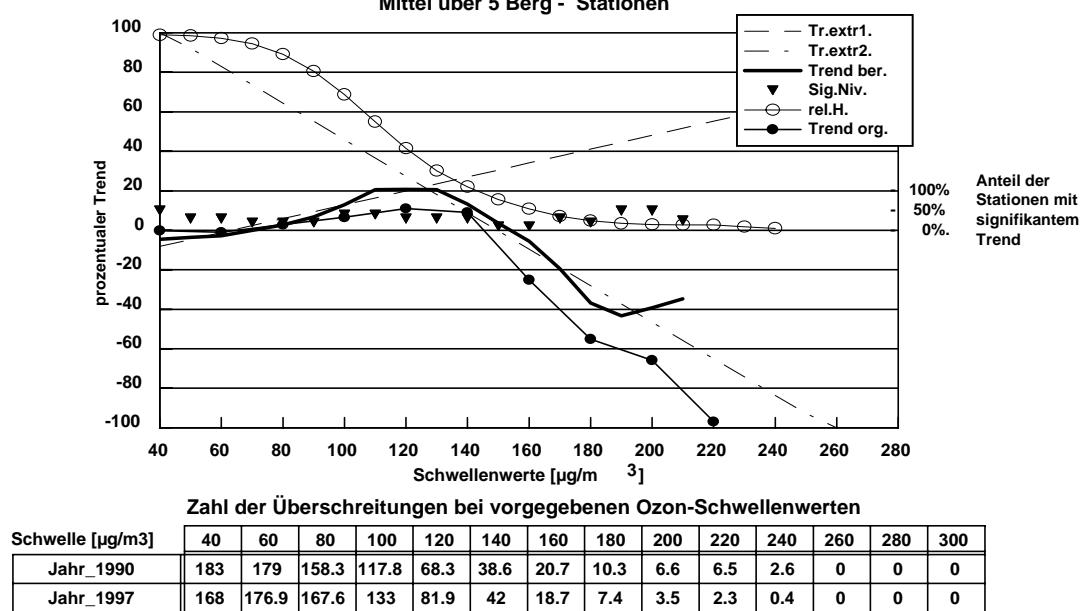
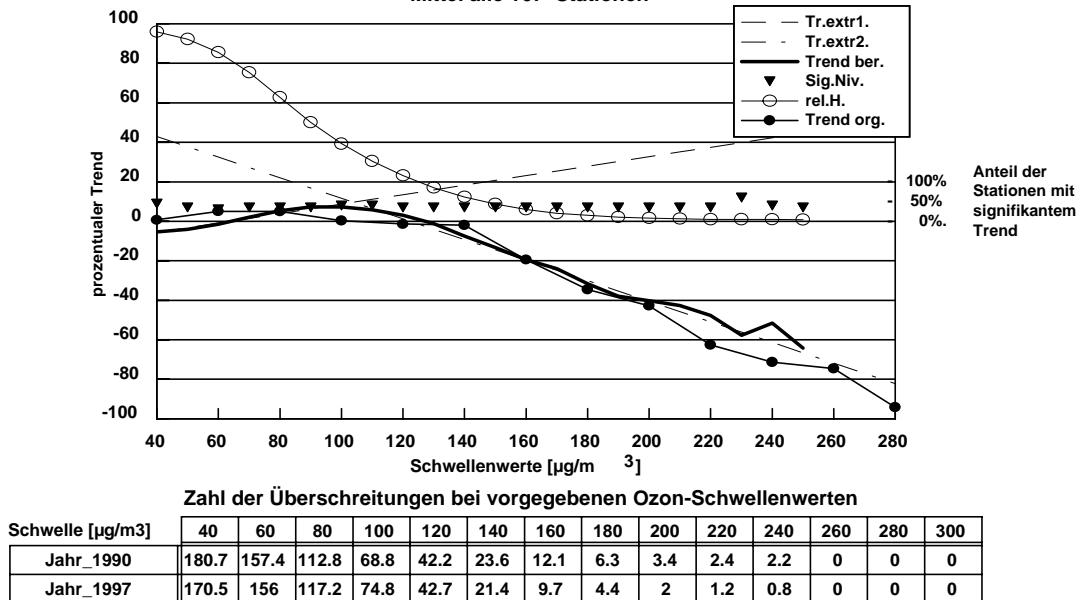


Abb. 25: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten
 (original und wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)



Mit zunehmend höheren Schwellenwerten ist eine stärker werdende Abnahme der Überschreitungshäufigkeit der Ozonmaxima zu verzeichnen. Dies bedeutet, daß sowohl im Mittel über alle Stationen (Abb.26) als auch bei der Mittelbildung über die einzelnen Stationskategorien die Häufigkeit hoher Ozonwerte deutlich abgenommen hat. Diese Aussage gilt für wetterbereinigte und nicht wetterbereinigte Meßreihen.

**Abb. 26: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten
(original und wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)
Mittel alle 167 Stationen**



Bei Bergstationen treten Ozonmaxima $> 220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ praktisch nicht auf, die Zunahme der Überschreitungshäufigkeit von Schwellenwerten zwischen $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ist hier am größten.

Bei verkehrsnahen Stationen ist die Abnahme der Überschreitungshäufigkeit zu höheren Schwellenwerten hin deutlich geringer als bei den übrigen Stationstypen.

Die Ozonbelastung, hier repräsentiert durch Schwellenwerte zwischen $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nimmt bei allen Stationstypen leicht zu, am stärksten bei Berg - Stationen, am geringsten bei Stadt - Stationen.

Der Vergleich mit der nicht wetterbereinigten Trendkurve zeigt, daß die Wetterbereinigung erst bei höheren Schwellenwerten eine größere Wirkung hat. Dies steht in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung, daß Episoden mit extremer Ozon-Belastung durch das Wetter besonders stark geprägt sind

In Mittel über alle Stationen (Abb.26) wird bei hohen Schwellen eine Abschwächung der negativen Trends durch Wetterbereinigung bewirkt. D.h. am Ende des Zeitraumes 1990 bis 1997 traten wetterbedingt verminderter Episoden mit hohen täglichen Ozonmaxima auf.

Die Wetterbereinigung führt bei Land-Stationen im Gegensatz zu allen anderen Stationstypen zu einer Verstärkung des negativen Trends. Möglicherweise sind bei Landstationen stärker großräumige Advektionsverhältnisse bedeutsam, die durch die Wetterbereinigung noch an Bedeutung gewinnen. Die bei Schönwetterperioden stärker ausgeprägten lokalen Strukturen kommen hier nicht zum Tragen.

Für den vorgegebenen Schwellenwert von **180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** ergibt sich nach der Wetterbereinigung für den Zeitraum 1990 bis 1997 eine Abnahme von

28% über alle 167 in die Untersuchungen einbezogenen **Stationen** gemittelt,
18% über 40 Verkehrs-Stationen gemittelt,
35% über 94 Stadt-Stationen gemittelt,
32% über 28 Land-Stationen gemittelt und
28% über 5 Berg-Stationen gemittelt.

Für den vorgegebenen Schwellenwert von **240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** ergibt sich nach der Wetterbereinigung für den Zeitraum 1990 bis 1997 eine Abnahme von

42% über alle 167 in die Untersuchungen einbezogenen **Stationen** gemittelt,
38% über 40 Verkehrs-Stationen gemittelt,
68% über 94 Stadt-Stationen gemittelt,
70% über 28 Land-Stationen gemittelt und
84% über 5 Berg-Stationen gemittelt.

Eine weitere Möglichkeit der Auswertung bietet eine wetterlagenspezifische Trendanalyse. D.h. für jeden Wettertyp (Abb.1) werden separate Trendanalysen durchgeführt. Versuche zur Gruppierung von Wetterlagen wurden auch von Fricke und Uhse 1994 und Spichtinger u.a. 1996 vorgenommen.

Aufgrund der extrem kurzen Zeitspanne, die für die erste Arbeitsetappe zur Verfügung stand, kann hier nur ein erstes Ergebnis vorgestellt werden.

An Hand der schon bekannten Stationen Viernheim und Rastatt werden zwei interessante Wetterlagen ausgewählt - die Westwetterlage (Abb.27 und Abb.28) als die

häufigste Wetter-situation, und die Wetterlage Tief Genua (Abb.29 und Abb.30) als eine ‘ozonträchtige’ Lage. Zum Vergleich der Wetterlagen siehe Abb.1 Klasse Nr. 10 und 4.

Es lassen sich folgende Aussagen ableiten:

Die Westwetterlagen weisen deutlich niedrigere Ozonmaxima auf als die Wetterlage Tief Genua. Die mittleren täglichen Ozonmaxima liegen für beide Stationen bei der Westlage bei $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abb.27, Abb.28) und für Tief Genua bei $130\mu\text{g}/\text{m}^3$.

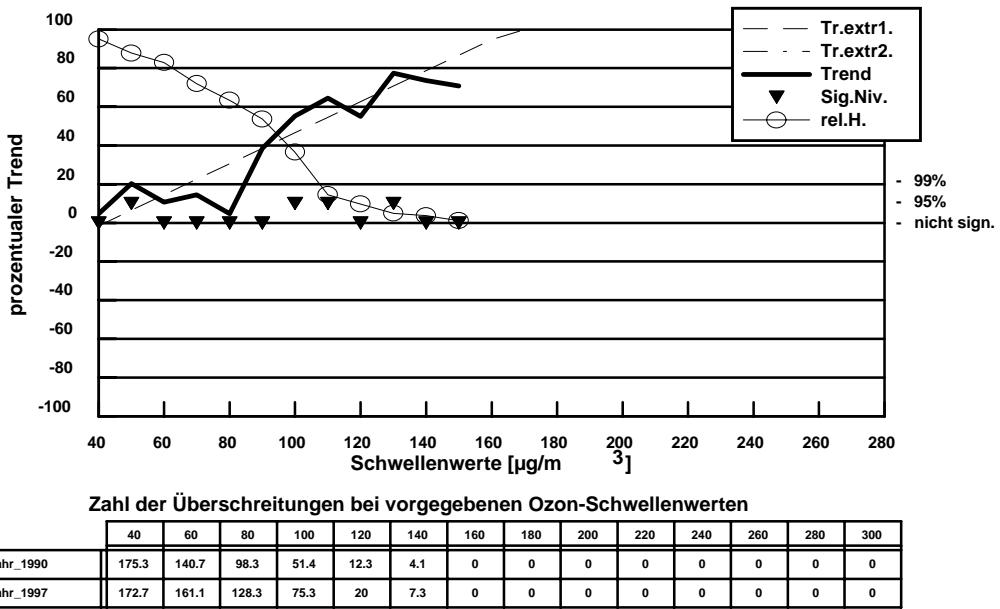
Bei der Westwetterlage, die für den Langstreckentransport von Ozon kennzeichnend ist, ist eine deutliche Zunahme der Ozonbelastung zu verzeichnen. Sie nimmt mit steigenden Schwellenwerten zu. Es ist jedoch zu beachten, daß sich die hier festgestellten höchsten Maxima auf einem relativ niedrigen Niveau von etwa $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ bewegen.

Unterschiedlich ist das Trendverhalten zwischen der Station Rastatt und Viernheim bei der Wetterlage Tief Genua. Während sich die Station Rastatt gut in das Gesamtbild einfügt (zunehmende Abnahme mit zunehmenden Schwellenwerten), ist das Bild für die Station Viernheim als verkehrsnahe Station umgekehrt. Die Wetterlage Tief Genua ist mehr durch lokale Einflüsse geprägt, was sich besonders beim Stationstyp ‘verkehrsnah’ bemerkbar macht. Verkehrsnahe Stationen reagieren empfindlich auf Änderung der Strömungsverhältnisse. Dieser Umstand kommt auch in einer verstärkten Verwendung der Windrichtung zur Wetterbereinigung zum Ausdruck.

Abb. 27: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten

(wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)

Station Viernheim (HE019), Stationstyp: vk, Westlage, rel. Häufigkeit: 24%

**Abb. 28: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten**

(wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)

Station Rastatt (BW020), Stationstyp: st, Westlage, rel. Häufigkeit: 24%

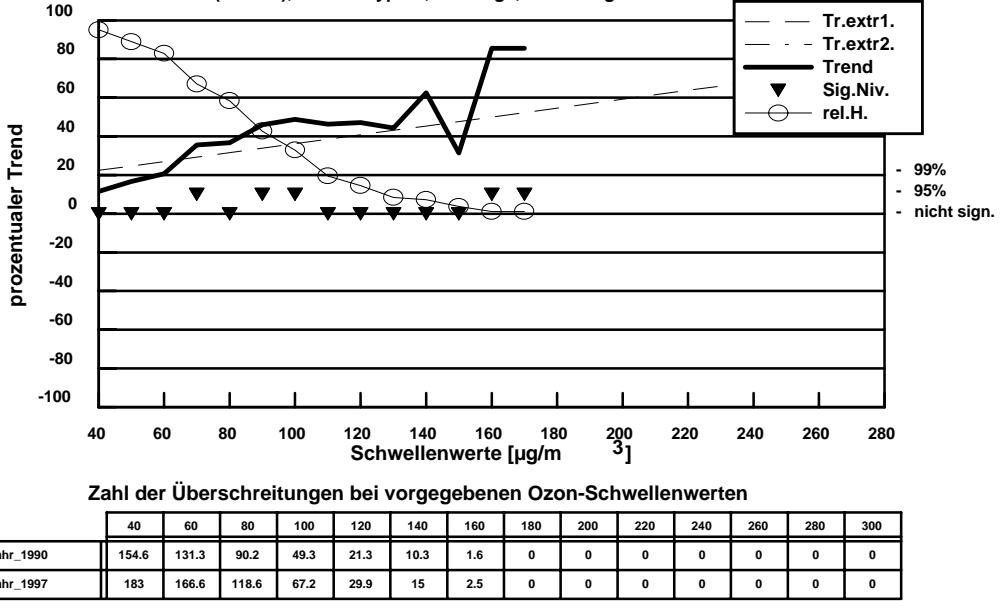
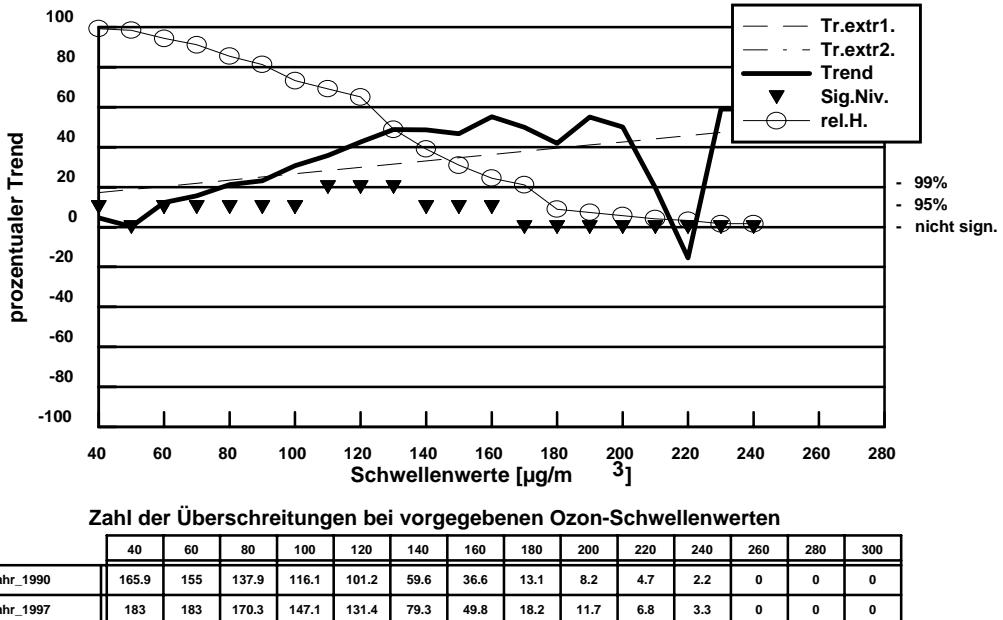


Abb. 29: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten

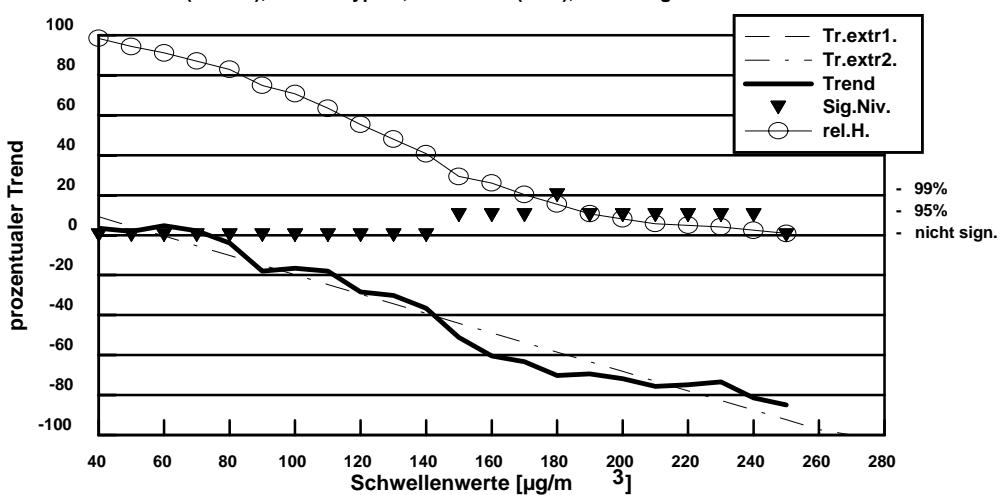
(wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)

Station Viernheim (HE019), Stationstyp: vk, Tief Genua (WL4), rel. Häufigkeit: 4%

**Abb. 30: Trend der Überschreitungshäufigkeit bei vorgegebenen Schwellenwerten**

(wetterbereinigt, April bis September 1990 bis 1997)

Station Rastatt (BW020), Stationstyp: st, Tief Genua (WL4), rel. Häufigkeit: 4%



6 Schlußbemerkungen

Die vorliegenden Resultate sind aus verschiedenen Gründen als vorläufig zu betrachten, auch wenn sich in den nachfolgenden Untersuchungen der Etappe 2 die Grundaussagen für den Zeitraum 1990 bis 1997 nicht grundlegend ändern dürften. Für die Vorläufigkeit der Aussagen sprechen folgende Gründe:

- Gleich zu Beginn der Arbeiten zeigte es sich, daß in den Datenreihen große Lücken sind, die unbedingt fehlwertersetzt werden mußten. Andernfalls hätten eine weitere nicht unerhebliche Zahl von Stationen aus den Trenduntersuchungen ausgeschlossen werden müssen.
- Die Auswertung der Datenreihen brachte nach der Bereinigung von zyklischen Schwankungen und der Wetterbereinigung Unstimmigkeiten zum Vorschein, die in der ersten Etappe des Forschungsvorhabens nicht mehr geklärt werden konnten. Die Datenreihen wurden so verwendet, wie sie zu diesem Zeitpunkt vorlagen.
- Aufgrund des sehr begrenzten Zeitfonds (6 Monate) konnte die Wetterbereinigung nicht wetterlagenspezifisch durchgeführt werden. Dies soll in der folgenden Etappe nachgeholt werden und wird voraussichtlich zu einer nicht unerheblichen Verbesserung der Wetterbereinigung führen.
- Ebenfalls aufgrund der Kürze der Zeit wurde sich ausschließlich auf die Untersuchung der täglichen Ozonmaxima und auf das Sommerhalbjahr beschränkt. Aggregierte Größen werden in der nachfolgenden Arbeitsetappe untersucht.

Abschließend möchte ich Frau Hentschel vom Deutschen Wetterdienst für die schnelle und problemlose Bereitstellung der benötigten Daten danken sowie den Herren Berndt Kahra und Rainer Lacombe vom Umweltbundesamt für die anregenden Diskussionen.

7 Literaturangaben

- Abramowski, S., Müller, H., 1991: Geometrisches Modellieren, BI Wissenschaftsverlag
- Asnani, G.C., 1993: Tropical Meteorology Indien , 1200 pp
- Beilke, S., 1991: Meteorologische Voraussetzungen für die Bildung von Ozon und Sommersmog
Proceedings Ozon-Symposium München, 2. - 4. Juli 1991, Herausgeber: TÜV Akademie Bayern/Hessen GmbH München
- Beilke, S., 1996: Räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung der Ozonbelastung in Mitteleuropa, interner Arbeitsbericht des Umweltbundesamtes
- Enke, W., 1984: Ein adaptives Regressionsmodell - lernende, lineare, multiple Regression
Z. Meteor., 34, 2, 66 - 74
- Enke, W., 1986: Ein Verfahren zur Aufstellung statistischer Prognosealgorithmen als Einheit von Cluster-, Diskriminanz- und Regressionsanalyse, Z.f. Meteorol., 36, 2, S. 117-122
- Enke, W., 1988: Ein erwartungstreues lineares Selbstorganisationsmodell,
Z.f. Meteorol., 35, 5, s. 308-314
- Enke ,W., G. Vogel und D. Spänkuch, 1996: Weather Pattern-Dependent Total Column Ozone Trends in Central Europe, 13th. Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, SanFrancisco, CA, 21-23.02
- Enke, W., 1997a: Untersuchung möglicher wetterlagenspezifischer Trends des Bodenozons
4. Deutsche Klimatagung vom 1. bis 3. Oktober 1997 in Frankfurt a.M., Annalen der Meteorologie, **34**, 85-86
- Enke, W. und A. Spekat, 1997b: Downscaling Climate Model Outputs into Local and Regional Weather Elements by Classification and Regression, Climate Research, **8**, 195-207
- Enke, W., 1998: Untersuchungen des Einflusses der Photolyseraten auf die Bildung des bodennahen Ozons, Abschlußbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens 10402817 des Umweltbundesamtes
- Fillinger, P., 1996: Troposphärisches Ozon - Aktuelle Forschungsergebnisse und ihre Konsequenzen für die Luftreinhaltung, Schriftreihe Umwelt Nr. 277 - Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 1996

- Förder, L., P. Maly, M. Wolf, T. Bitter und J. Thudium, 1996: Luftverschmutzung und Meteorologie in der Schweiz. Umweltmaterialien Nr. 53 - Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
- Franke, R., G. Nielson, 1980: Smooth interpolation of large sets of scattered data, Inter. J. for Meth. In Eng., Vol 8, No. 4
- Franke, R., 1982: Scattered data interpolation: Tests of some methods, Math. of Comp., Vol.18, No157
- Fricke, W., 1980: Die Bildung und Verteilung von anthropogenem Ozon in der unteren Troposphäre
Geoph. Univ. Frankfurt/Main Nr. 44
- Fricke, W., 1996: Bodennahes Ozon: Anstieg der Mittelwerte, aber kein Anstieg der Maxima seit 1971, Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes Nr. 34
- Fricke, W. und K. Uhse, 1994: Anteil von Witterungs und Emissionsminderung am SO₂ -Rückgang in Deutschland, Staub - Reinhaltung der Luft, 54, 7/8, 289-296
- XXX 1997: Entwicklung der Hintergrundbelastung durch Luftschaadstoffe im Land Brandenburg
unveröffentlichtes Arbeitspapier
- Förderer, L., P. Maly, M. Wolf, T. Bitter und J. Thudium, 1996: Trendanalyse schweizerischer Luftschaadstoff-Immissionsdaten, Umweltmaterialien Nr. 53 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 1996
- Hess, P. and H. Brezowsky, 1969: Katalog der Großwetterlagen Europas Ber. Dt. Wetterdienst, 133, Offenbach
- Hoschek, J., D. Lasser 1989: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung B.G. Teubner Stuttgart 1989
- Kirch, H.-D., 1997: Methoden und Prozesse der atmosphärischen Chemie PROMET, 26, 1/2, 61- 68
- Mayer, H. und J. Schmidt, 1997: Analyse von sogenannten ‘Ozon Wetterlagen’ Ann. Meteorol. 33, 81-86
- Mayer, H. und J. Schmidt, 1998: Problematik der Kennzeichnung von sogenannten ‘Ozon Wetterlagen’, Meteorol. Zeitschrift, N.F. 7, 41-48

- Neininger, B., J. Dommen u.a. 1996: Luftverschmutzung und Meteorologie in der Schweiz, Umweltmaterialien Nr. 63 - Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
- Ruggaber, A., 1994: Modellierung photolytischer Prozesse in der Troposphäre. Universität München - Meteorologisches Institut, Wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 68
- Röth, E.-P., 1985: Description of a One-Dimensional Model for Atmospheric Chemistry Berichte der Kernforschungssanlage Juelich, 2098, ISBN 0366-0885
- Spänkuch, D., Schulz, E., 1995: Diagnosis and forecasting total column ozone by statistical relations. J. Geophys Res., 100, D9, 18, 873-18, 885
- Speth P., S. Blonsky, und H. Kunz, 1996: Bestimmung des antropogenen und natürlichen Anteils am Ozon im mitteleuropäischen Raum aus meteorologischer Sicht. Jahresbericht über die wissenschaftlichen Ergebnisse 1995, BMFT Forschungsvorhaben 07EU777
- Spichtinger, N., M., Winterhalter, P. Fabian, 1996: Ozone and Grosswetterlagen, ESPR - Enviroment. Sci.& Pollut. Res. 3 (3) 145 - 152
- Steinacker, R., 1995: Synoptische Aspekte hochreichender Konvektion. Fortbildungstagung (XiM-1) Krems 5.5
- Wiegand, G. u.a. 1996: Flächenhafte Darstellung der Immissionssituation. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz H. 201, Hessische Landesanstalt für Umwelt

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens **297 42 848** des Umweltbundesamtes Berlin:

**"Analyse historischer Datenreihen und Entwicklung einer Methode
zur quasi-wetterbereinigten Trendanalyse von bodennahem Ozon"**

Trendanalyse der täglichen Ozonmaxima der Sommerhalbjahre 1990 bis 1997

Arbeitsschritte

Bereitstellung der benötigten Datensätze

Elimination des Jahresgangs aus den Ozonmeßreihen

Fehlwertersetzung in den Datenreihen

Berechnung der täglichen Ozonmaxima

Wetterbereinigung der täglichen Ozonmaxima durch Anwendung eines erwartungstreuen, multiplen screening Regressionsverfahrens zur Selektion der stationsspezifischen Regressionsgleichungen

Ableitung von Trends der Ozonmaxima durch

- Aufprägung der stationsspezifischen Jahresgänge
- Normierung der Streuungen der ‘wetterbereinigten’ Reihe auf das Niveau der Originalreihen
- Binarisierung der Reihen für 25 Schwellenwerte täglicher Ozonmaxima
- Berechnung des Schwellenwert spezifischen linearen Trends
- Berechnung der relativen Änderung der Überschreitungshäufigkeit zwischen 1990 und 1997 für alle Schwellenwerte.
- Extrapolation der relativen Änderungen der Überschreitungshäufigkeiten mittels linearer Regression.

Thesen:

Die horizontale und zeitliche Ergänzung der Daten lässt sich durch räumliche und zeitliche Interpolation gut durchführen.

Die bisher vorgenommene Wetterbereinigung beseitigt den größten Teil der durch Wettereinfluß hervorgerufenen Variabilität in den Ozonmeßreihen. Die wetterlagspezifische Wetterbereinigung lässt hier noch weitere Verbesserungen erwarten.

Mit zunehmend höheren Schwellenwerten ist eine stärker werdende Abnahme der Überschreitungshäufigkeit der Ozonmaxima zu verzeichnen. Dies bedeutet, daß sowohl im Mittel über alle Stationen (Abb.26) als auch bei der Mittelbildung über die einzelnen Stationskategorien die Häufigkeit hoher Ozonwerte deutlich abgenommen hat. Diese Aussage gilt für wetterbereinigte und nicht wetterbereinigte Meßreihen.

Bei Bergstationen treten Ozonmaxima $> 220\mu\text{g}/\text{m}^3$ praktisch nicht auf, die Zunahme der Überschreitungshäufigkeit von Schwellenwerten zwischen $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ und $140\mu\text{g}/\text{m}^3$ ist hier am größten.

Bei verkehrsnahen Stationen ist die Abnahme der Überschreitungshäufigkeit zu höheren Schwellenwerten hin deutlich geringer als bei den übrigen Stationstypen.

Die Ozonbelastung, hier repräsentiert durch Schwellenwerte zwischen $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ und $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ nimmt bei allen Stationstypen leicht zu, am stärksten bei Berg-Stationen, am geringsten bei Stadt-Stationen.

Der Vergleich mit der nicht wetterbereinigten Trendkurve zeigt, daß die Wetterbereinigung erst bei höheren Schwellenwerten eine größere Wirkung hat. Dies steht in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung, daß Episoden mit extremer Ozon-Belastung durch das Wetter besonders stark geprägt sind

In Mittel über alle Stationen (Abb.26) wird bei hohen Schwellen eine Abschwächung der negativen Trends durch Wetterbereinigung bewirkt. D.h. am

Ende des Zeitraumes 1990 bis 1997 traten wetterbedingt vermindert Episoden mit hohen täglichen Ozonmaxima auf.

Die Wetterbereinigung führt bei Land-Stationen im Gegensatz zu allen anderen Stationstypen zu einer Verstärkung des negativen Trends. Möglicherweise sind bei Landstationen stärker großräumige Advektionsverhältnisse bedeutsam, die durch die Wetterbereinigung noch an Bedeutung gewinnen. Die bei Schönwetterperioden stärker ausgeprägten lokalen Strukturen kommen hier nicht zum Tragen.

Für den vorgegebenen Schwellenwert von **180µg/m³** ergibt sich nach der Wetterbereinigung für den Zeitraum 1990 bis 1997 eine Abnahme von

28% über alle 167 in die Untersuchungen einbezogenen **Stationen** gemittelt,
18% über 40 Verkehrs-Stationen gemittelt,
35% über 94 Stadt-Stationen gemittelt,
32% über 28 Land-Stationen gemittelt und
28% über 5 Berg-Stationen gemittelt.

Für den vorgegebenen Schwellenwert von **240µg/m³** ergibt sich nach der Wetterbereinigung für den Zeitraum 1990 bis 1997 eine Abnahme von

42% über alle 167 in die Untersuchungen einbezogenen **Stationen** gemittelt,
38% über 40 Verkehrs-Stationen gemittelt,
68% über 94 Stadt-Stationen gemittelt,
70% über 28 Land-Stationen gemittelt und
84% über 5 Berg-Stationen gemittelt.

Die Westwetterlagen weisen deutlich niedrigere Ozonmaxima auf als die Wetterlage Tief Genua. Die mittleren täglichen Ozonmaxima liegen für beide Stationen bei der Westlage bei 90µg/m³ (Abb.27, Abb.28) und für Tief Genua bei 130µg/m³.

Bei der Westwetterlage, die für den Langstreckentransport von Ozon kennzeichnend ist, ist eine deutliche Zunahme der Ozonbelastung zu verzeichnen.

Sie nimmt mit steigenden Schwellenwerten zu. Es ist jedoch zu beachten, daß sich die hier festgestellten höchsten Maxima auf einem relativ niedrigen Niveau von etwa $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ bewegen.

Unterschiedlich ist das Trendverhalten zwischen der Station Rastatt und Viernheim bei der Wetterlage Tief Genua. Während sich die Station Rastatt gut in das Gesamtbild einfügt (zunehmende Abnahme mit zunehmenden Schwellenwerten), ist das Bild für die Station Viernheim als verkehrsnahe Station umgekehrt. Die Wetterlage Tief Genua ist mehr durch lokale Einflüsse geprägt, was sich besonders beim Stationstyp ‘verkehrsnah’ bemerkbar macht. Verkehrsnahe Stationen reagieren empfindlich auf Änderung der Strömungsverhältnisse. Dieser Umstand kommt auch in einer verstärkten Verwendung der Windrichtung zur Wetterbereinigung zum Ausdruck.

Bei der eingehenden Datenprüfung zeigte sich, daß in den vorliegenden Reihen für einzelne Stationen im Untersuchungszeitraum von 1990 bis 1997 “verdächtige Auffälligkeiten” vorhanden sind. Bei Einzelstationen könnten sich nach Klärung dieser Unstimmigkeiten andere Aussagen bezüglich des Trendverhaltens ergeben. Die grundlegenden Aussagen dürften davon jedoch nicht betroffen sein.