

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
Institut für Technischen Umweltschutz
Fachgebiet Luftreinhaltung

Analyse der räumlichen Struktur von Brandenburger Ozonmeßdaten

**Hauptstudiumsprojekt Luftreinhaltung
im Studiengang Technischer Umweltschutz**

von

cand. Ing. Renate Eberts

Matr.-Nr. 160 353

unter der wissenschaftlichen Leitung von
Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Israël

wissenschaftliche Betreuung:
Dipl. Ing. Renate Treffeisen

Berlin, im Januar 1998

Vorwort

Die Forschung zum Schutz der Umwelt ist eine der dringenden, aber noch immer häufig unterschätzte Forderung der heutigen Zeit. Nicht nur die gesellschaftspolitischen, sondern vor allem auch die technischen und naturwissenschaftlichen Fragestellungen können oft nur unbefriedigend beantwortet werden. Ich hoffe, mit der vorliegenden Studienarbeit über die räumliche Struktur von Brandenburger Ozonmeßdaten einen Beitrag zum Verständnis der Zusammenhänge zu leisten, der in weiterführenden Arbeiten als Grundlage für die Entwicklung und Optimierung von Schutzmaßnahmen dient.

Ich danke Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Israel vom Fachgebiet Luftreinhaltung am Institut für Technischen Umweltschutz der TU Berlin für die Überlassung dieses bedeutungsvollen Studienthemas und den Mitarbeitern, insbesondere Dipl. Ing. Renate Treffeisen, für die inhaltliche Diskussion und wissenschaftliche Beratung.

Die rechnergestützte Bearbeitung des Themas wäre ohne die Nutzungserlaubnis der Computeranlage und Software sowie die umfangreiche Hilfestellung bei der systemspezifischen Problembehebung vor allem durch Dr. Jutta Gampe vom Fachgebiet Quantitative Methoden am Fachbereich Informatik in dieser Form nicht zu verwirklichen gewesen.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
SYMBOLVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	X
1 EINLEITUNG	1
1.1 EINORDNUNG DER PROBLEMSTELLUNG: DIE BEDEUTUNG DES OZONS	1
1.2 ABGRENZUNG UND GANG DER UNTERSUCHUNG.....	1
2 DATENBASIS	3
2.1 DIE BRANDENBURGER MESSSTATIONEN.....	3
2.2 DIE RANGMATRIX DER STANDORTEIGENSCHAFTEN ZUR GRUPPIERUNG DER MESSSTATIONEN.....	6
2.3 DIE ERSTELLUNG DER DATENBANK UND AUSWAHL IHRER PARAMETER	9
3 VORBETRACHTUNGEN ZUR VERGLEICHBARKEIT VON MESSREIHEN	11
3.1 VERGLEICHBARKEIT VON ZEITVERSETZTEN HALBSTUNDENWERTEN	11
3.2 VERGLEICHBARKEIT VON OXIDANTIENPOTENTIAL UND OZON	14
3.3 ERGEBNISSE DER VORBETRACHTUNGEN	15
4 EINFLUSS VON ZEITVERLÄUFEN AUF DIE OZONKONZENTRATION	15
4.1 ZEITLICHER VERLAUF RELEVANTER PARAMETER	15
4.2 OZONENTWICKLUNG IM WOCHENVERLAUF	18
4.3 ERGEBNISSE DER ANALYSE VON ZEITVERLÄUFEN	21

5 EINFLUß DES STICKSTOFFHAUSHALTS	
AUF DIE OZONKONZENTRATION	22
5.1 STICKSTOFFDIOXID	22
5.2 STICKSTOFFMONOXID	23
5.3 GESAMTSTICKSTOFF	25
5.4 WEITERE PARAMETER ZUR CHARAKTERISIERUNG DES STICKSTOFFETATS	25
5.4.1 Das photostationäre Gleichgewicht	25
5.4.2 Extremwertbetrachtungen.....	25
5.5 ERGEBNISSE DER ANALYSE DES STICKSTOFFHAUSHALTS	26
6 EINFLUß DER METEOROLOGIE AUF DIE OZONKONZENTRATION.....	28
6.1 REGIONALE EFFEKTE	28
6.1.1 Die nächtliche Ausbildung einer Reservoirschicht.....	28
6.1.2 Die Eignung des Datenmaterials für Reservoirschichtbetrachtungen.....	29
6.1.3 Die Korrelationen zum Reservoirschichtparameter	30
6.1.4 Die jahreszeitlichen Abhängigkeiten	33
6.1.5 Die Abhängigkeiten von der Windgeschwindigkeit.....	36
6.1.6 Die Abhängigkeiten von der Windrichtung.....	39
6.1.7 Die Vergleichbarkeit mit dem Berliner Modell	42
6.2 LOKALE EFFEKTE.....	43
6.2.1 Die Globalstrahlung.....	43
6.2.2 Der gemessene Temperaturverlauf	44
6.2.3 Das Temperaturmaximum	45
6.3 ERGEBNISSE DER ANALYSE DER METEOROLOGIE	46
7 INTERSTATIONÄRE ZUSAMMENHÄNGE DER BRANDENBURGER	
OZONMEßDATEN.....	48
LITERATURNACHWEIS.....	55

ANHANG..... 59

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 3-1: KORRELATION ZEITVERSETZTER OZONWERTE AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT BEI EINER VERSCHIEBUNG UM A) 30 MINUTEN UND B) 1 STUNDE.....	12
ABBILDUNG 3-2: KORRELATION ZEITVERSETZTER OZONWERTE AN DER STATION NEUGLOBSOW BEI EINER VERSCHIEBUNG UM A) 30 MINUTEN UND B) 1 STUNDE.....	13
ABBILDUNG 4-1: TAGESGANG FÜR OZON UND STICKSTOFFMONOXID DES MONATS APRIL 1994 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	16
ABBILDUNG 4-2: TAGESGANG FÜR OZON, TEMPERATUR UND RELATIVE FEUCHTE DES MONATS APRIL 1994 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT.....	17
ABBILDUNG 4-3: MONATSGANG FÜR OZON, TEMPERATUR UND RELATIVE FEUCHTE DES MONATS APRIL 1994 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT.....	17
ABBILDUNG 4-4: INTERQUARTILSABSTÄNDE DER OZONMEßDATEN NACH WOCHENTAGEN A) AN DEN LÄNDLICHEN STATIONEN (SOWIE AN DER HÖHENMEßSTATION) B) AN DEN EMITTENTENBEEINFLUßTEN STATIONEN	20
ABBILDUNG 5-1: OZON-STICKSTOFFMONOXID-PLOTS FÜR DIE STATION EISENHÜTTENSTADT A) LINEARE DARSTELLUNG B) LOGARITHMISCHE DARSTELLUNG	24
ABBILDUNG 6-1: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER FÜR DIE JAHRE 1993 BIS 1995 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	31
ABBILDUNG 6-2: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER FÜR DIE JAHRE 1993 BIS 1995 AN DER STATION NEUGLOBSOW.....	31
ABBILDUNG 6-3: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER FÜR DIE MONATE A) AUGUST UND B) SEPTEMBER DER JAHRE 1993 BIS 1995 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	34
ABBILDUNG 6-4: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER FÜR DIE MONATE A) AUGUST UND B) SEPTEMBER DER JAHRE 1993 BIS 1995 AN DER STATION NEUGLOBSOW	35
ABBILDUNG 6-5: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER BEI WINDGESCHWINDIGKEITEN ÜBER 2 M/S FÜR DIE JAHRE 1993 BIS 1995 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	38
ABBILDUNG 6-6: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER BEI WINDGESCHWINDIGKEITEN ÜBER 2 M/S FÜR DIE JAHRE 1993 BIS 1995 AN DER STATION NEUGLOBSOW	38
ABBILDUNG 6-7: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER FÜR DIE JAHRE 1993 BIS 1995 BEI WIND AUS DEM 60 O - WINDRICHTUNGSSEKTOR 6 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	42

ABBILDUNG 6-8: ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VOM RESERVOIRSCHICHTPARAMETER FÜR DIE JAHRE 1993 BIS 1995 BEI WIND AUS DEM 60 O - WINDRICHTUNGSSEKTOR 4 AN DER STATION NEUGLOBSOW	42
ABBILDUNG 7-1: MITTLERE OZONKONZENTRATIONEN ÜBER IHRER GEOGRAPHISCHEN LAGE.....	49
ABBILDUNG 7-2: PAARWEISE KORRELATIONEN DER OZONMEßREIHEN 1993 BIS 1995 ÜBER DER ENTFERNUNG ZWISCHEN DEN BEIDEN IMMISSIONSORTEN BEI KOMBINATIONEN EMITTENTENBEEINFLUßTER STATIONEN (EISH, KWH, WITT, PRZ, PREM, KY, PDMW)	51
ABBILDUNG 7-3: PAARWEISE KORRELATIONEN DER OZONMEßREIHEN 1993 BIS 1995 ÜBER DER ENTFERNUNG ZWISCHEN DEN BEIDEN IMMISSIONSORTEN BEI KOMBINATIONEN LÄNDLICHER STATIONEN (N, BURG, DL, WI, LI, AN)	51
ABBILDUNG A3-1: TAGESGANG FÜR OZON UND STICKSTOFFMONOXID DER MONATE A) JULI 1994 UND B) APRIL 1995 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	62
ABBILDUNG A3-2: TAGESGANG FÜR OZON, TEMPERATUR UND RELATIVE FEUCHTE DER MONATE A) JULI 1994 UND B) APRIL 1995 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	63
ABBILDUNG A3-3: MONATSGANG FÜR OZON, TEMPERATUR UND RELATIVE FEUCHTE DER MONATE A) JULI 1994 UND B) APRIL 1995 AN DER STATION EISENHÜTTENSTADT	64
ABBILDUNG A3-4: TAGESGANG FÜR OZON UND STICKSTOFFMONOXID DER MONATE A) JULI 1994 UND B) APRIL 1995 AN DER STATION NEUGLOBSOW	65
ABBILDUNG A3-5: TAGESGANG FÜR OZON UND TEMPERATUR DER MONATE A) JULI 1994 UND B) APRIL 1995 AN DER STATION NEUGLOBSOW	66
ABBILDUNG A3-6: MONATSGANG FÜR OZON UND TEMPERATUR DER MONATE A) JULI 1994 UND B) APRIL 1995 AN DER STATION NEUGLOBSOW	67

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: RANGMATRIX DER STATIONSCHARAKTERISTIKA	8
TABELLE 6-1: DEFINITION DER TAGESZEITEN	29

Symbolverzeichnis

a .. f	Rangfolge innerhalb einer Klasse
AN	Angermünde
BURG	Burg
DL	Doberlug-Kirchhain
EISH	Eisenhüttenstadt
KWH	Königs Wusterhausen
KY	Kyritz
LI	Lindenberg
M	Molmasse
N	Neuglobsow
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Gesamtstickstoff
O ₃	Ozon
PDMW	Potsdam-Hermannswerder
PREM	Premnitz
PRZ	Prenzlau
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
t	Zeitvariable
WI	Wiesenburg
WITT	Wittenberge
WR	Windrichtung
WV	Windgeschwindigkeit
[]	Konzentration

<	kleiner
≤	kleiner oder gleich
∨	oder

Abkürzungsverzeichnis

BAB	Bundesautobahn
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BLUME	Berliner Luftgüte-Meßnetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Bern)
StMLU	Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen
bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
evtl.	eventuell
Fn.	Fußnote
ggf.	gegebenenfalls
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
Kap.	Kapitel
km	Kilometer
LUA	Landesumweltamt Brandenburg
m.E.	meines Erachtens
min	Minuten

m/s	Meter pro Sekunde
n. v.	nicht veröffentlicht
o. g.	oben genannt
o. J.	ohne Jahresangabe
o. Verlag	ohne Verlagsangabe
S.	Seite
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mikrogramm pro Kubikmeter
°	Grad

1 Einleitung

1.1 Einordnung der Problemstellung: Die Bedeutung des Ozons

Einhergehend mit dem Wachstum von Industrie und Verkehr, hat sich die Hintergrundkonzentration von Ozon seit der Jahrhundertwende verdoppelt.¹ Heute ist das Ozon in der sommerlichen Troposphäre mit bis zu 90 % des Oxidantienanteils quantitativ zu einem bedeutenden Luftschadstoff geworden.

Aufgrund seiner qualitativen Eigenschaften wird die hygienische Relevanz des Ozons jedoch weit größer eingeschätzt: Das Schädigungspotential ist insbesondere in seiner Reaktivität begründet - Ozon ist eines der stärksten Oxidationsmittel. Als gesundheitliches Risiko kommt hinzu, daß Ozon zum einen kaum wasserlöslich ist, so daß es in den Atemwegen wenig gebunden wird, sondern auch in die Lungenperipherie eindringt. Zum anderen deckt sich das zeitliche Auftreten erhöhter Ozonkonzentrationen mit den Phasen erhöhter (Lungen-)Aktivität des menschlichen Biorhythmus'.

1.2 Abgrenzung und Gang der Untersuchung

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde am Fachgebiet Luftreinhalte des Instituts für Technischen Umweltschutz, TU Berlin, für das Berliner Ozonmeßnetz ein Modell entwickelt, um Ozonspitzenkonzentrationen (als Stundenmittelwerte) regressionsanalytisch zu prognostizieren.² Solche Peaks größer $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Meß- oder Prognosewerte sind nach § 40a BImSchG rechtliche Grundlage für Schutzmaßnahmen in Form von Verkehrsbeschränkungen. Dabei ist ihr Auftreten in Berlin oder angrenzenden Landkreisen gleichgesetzt.

Darüber hinaus sind in § 1a der 22. BImSchV Schwellenwerte für länger andauernde Belastungsfälle zum Schutz des Menschen sowie der Vegetation festgelegt, da insbesondere mit Gesundheitsschäden schon bei geringeren Konzentrationen gerechnet

¹ Wagner, 1991, gestützt auf Jahresmittelwerte seit 1971.

² Lichtenvort, 1997.

werden muß.³ Eine alleinige Betrachtung von Spitzenwerten ist damit nicht mehr ausreichend.

Ziel dieser Studienarbeit ist daher zum einen, Ansätze des Berliner Prognosemodells für Brandenburger Meßstationen zu verifizieren und geeignete Parameter zu bestimmen, die mit dem Ozonverlauf korrelieren. Hierdurch soll auch der Einflußbereich des Großraums Berlin auf die Ozonentwicklung räumlich definierbar werden.

Des weiteren müssen zur Analyse der räumlichen Struktur der Brandenburger Ozonmeßdaten Transmissions- und Advektionsvorgänge erfaßt werden.

Umwandlungsprozesse werden im Rahmen der Theorie des Stickstoffoxid-Ozon-Zyklus³ untersucht; andere Stoffe als Stickstoffverbindungen, die durchaus katalytisch wirken können - wie z.B. Kohlenwasserstoffe - bleiben unberücksichtigt, da nicht die Reaktionsvorgänge an der einzelnen Meßstelle im Vordergrund der Betrachtungen stehen sollen, sondern der Vergleich der Verhältnisse an den verschiedenen Brandenburger Stationen.

Transportvorgänge werden im wesentlichen durch die vorherrschende Wetterlage bestimmt. Deshalb sind meteorologische Untersuchungen ein Hauptbestandteil dieser Arbeit.

Anschließend an die Untersuchung von Einflußfaktoren auf die Ozonkonzentration werden die Ozonmeßreihen der betrachteten dreizehn Brandenburger Meßstationen jeweils paarweise verglichen und geprüft, inwieweit sich aus ihrer Ähnlichkeit flächendeckende Aussagen ableiten lassen.

³ Schlipkötter / Goettert, 1978.

2 Datenbasis

2.1 Die Brandenburger Meßstationen

Nach juristischem Vollzug der Deutschen Einheit wurde 1991 begonnen, im Land Brandenburg Luftgüte-Meßstationen einzurichten und seitens des Landesumweltamtes Brandenburg sowie des Umweltbundesamtes unabhängig voneinander kontinuierlich zu betreiben. An zwanzig Meßorten sind für die Untersuchungen in geeignetem Umfang Daten erfaßt und verfügbar.

Hiervon werden im Rahmen dieser Arbeit dreizehn Stationen ausgewählt, die nach Vorbetrachtungen geeignet erscheinen, einerseits die Luftqualität im Land Brandenburg mit seiner typischen Nutzungsstruktur zu repräsentieren, andererseits aber auch die räumliche Datenstruktur bezüglich des Berliner Stadtgebietes wiederzugeben. Das heißt, daß bei nahe beieinander liegenden Standorten in ähnlichem Emittentenumfeld eine stellvertretende Meßreihe analysiert wird. Die Auswahl orientiert sich neben den Landesgrenzen zusätzlich an der wirtschaftlich bedingten räumlichen Struktur des Berliner Umlandes, so daß die südlichen Meßstandorte im Einzugsgebiet Halle - Leipzig - Dresden kein Schwerpunkt dieser Arbeit sind.

Aufgrund dieser Kriterien werden die Meßdaten folgender Stationen analysiert:

- *Neuglobsow*

Neuglobsow ist eine Gemeinde im Kreis Oberhavel, 71 km nordnordwestlich von Berlin, mit weniger als 500 Einwohnern. Die Meßstation des Umweltbundesamtes liegt in einer quasi industrie- und verkehrsfreien Umgebung. Die nächsten Fernstraßen sind die B 96 in

7 km Entfernung bzw. die A 24, die 32 km weit weg verläuft.

- *Prenzlau*

In Prenzlau, Kreis Uckermark, 92 km nördlich Berlins, betreibt das Landesumweltamt Brandenburg Luftgütemessungen. Die 20.000-Einwohner-Stadt verfügt über Heizwerke, Bauschuttzubereitungsanlagen und ähnliche Emittentengruppen; die Station selbst liegt

im Stadtrandgebiet. Die Verkehrsanbindung erfolgt über die B 109 bzw. die 13 km entfernt vorbeiführende A 11.

- *Angermünde*

Angermünde, Kreis Uckermark, liegt 66 km im Nordnordosten Berlins. Die Kleinstadt mit 10.000 Einwohnern, UBA-Meßstandort, befindet sich in relativ natürlicher Umgebung und ist über die B 2 bzw. die Autobahnlinie A 11 in einer Distanz von elf Kilometer zu erreichen.

- *Eisenhüttenstadt*

Eisenhüttenstadt ist eine kreisfreie 50.000-Stadt an der deutsch-polnischen Grenze, 91 km ost-südöstlich von Berlin im Kreis Oder-Spree gelegen. Die LUA-Station liegt im Industriegebiet im Stadtinnern. Zusätzliche Emissionen gehen vom Transitverkehr aus: Die B 112 durchquert die Stadt; die 20 km entfernte A 12 führt zum Grenzübergang Frankfurt/Oder.

- *Lindenberg*

Lindenberg Kreis Oder-Spree befindet sich 59 km im Ost-südosten von Berlin. Der Ort mit 1000 Einwohnern ist ein emittentenferner UBA-Meßpunkt, der über die acht Kilometer entfernte B 87 oder über die A 12 in fünfzehn Kilometer Distanz erschlossen wird.

- *Burg*

Burg im Spreewald ist eine Gemeinde im Kreis Spree-Neiße 89 km südöstlich Berlins mit 3500 Einwohnern. Die LUA-Meßstation liegt am Stadtrand im Landschaftsschutzgebiet. Die B 115 verläuft acht Kilometer entfernt; ein Autobahnanschluß ist in neun Kilometern Luftlinie zur A 15 vorhanden.

- *Königs Wusterhausen*

Königs Wusterhausen ist eine Stadt mit annähernd 20.000 Einwohnern im Kreis Dahme-Spreewald. Der LUA-Standort liegt 28 km südsüdöstlich von Berlin in der Stadtmitte an einer Hauptstraße. Die Umgebung ist durch Brenn- und Baustoffindustrie geprägt.

Der Verkehr fließt über die B 96a elf Kilometer vorbei und über die zwei Kilometer nahe A 12.

- *Doberlug-Kirchhain*

In Doberlug-Kirchhain, eine 8.000 Einwohner zählende Kleinstadt im Kreis Elbe-Elster 98 km südlich Berlins, betreibt das UBA eine Stadtrandstation in emissionsarmer Umgebung. Die Landstraße B 96 ist sieben Kilometer, die Autobahn A 13: 24 Kilometer entfernt.

- *Wiesenburg*

Wiesenburg ist eine Gemeinde mit 1500 Einwohnern im Kreis Potsdam-Mittelmark, 78 km südwestlich von Berlin. Die Meßstelle des UBA nahe dem Naturschutzgebiet Hoher Fläming liegt verkehrsfertig an der B 107, die zur 59 km entfernten A 9 führt.

- *Potsdam-Hermannswerder*

Die LUA-Meßstation Potsdam-Hermannswerder liegt am südlichen Stadtrand Potsdams 30 km westsüdwestlich Berlins. In unmittelbarer Nähe befinden sich größere Freiflächen. Nahe Emissionen sind weitgehend verkehrsbedingt durch die B 2 und die A 115 in einem Abstand von sechs Kilometern.

- *Premnitz*

Premnitz, eine Stadt mit 10.000 Einwohnern im Kreis Havelland 74 km westlich Berlins, ist Meßstandort des LUA. Das Umfeld wird durch Emissionen von Industrie, Kraftwerk und Stadtverkehr bestimmt. In der weiteren Umgebung finden sich aber auch größere landwirtschaftlich genutzte Flächen. Fernverkehr beschränkt sich auf die B 102; die Autobahn A 2 ist 24 km entfernt.

- *Wittenberge*

Die Stadt Wittenberge im Kreis Prignitz, 124 km westnordwestlich von Berlin gelegen, zählt über 25.000 Einwohner. Inmitten des Industriestandorts betreibt das Landesumweltamt Brandenburg Luftgütemessungen. Das Verkehrsnetz erschließt den Ort über die B 189 bzw. über die 35 km entfernte A 24.

- *Kyritz*

Kyritz, Kreis Ostprignitz-Ruppin, liegt 84 km im Westnordwesten von Berlin. In der 10.000-Einwohner-Stadt befindet sich eine weitere UBA-Meßstation. Emissionsrelevante Faktoren in der Umgebung entsprechen etwa dem Brandenburger Durchschnitt. Die B 5 und die 14 km entfernte A 24 sind die wichtigsten Verkehrswege.

2.2 Die Rangmatrix der Standorteigenschaften zur Gruppierung der Meßstationen

Die Aufgabe, die räumliche Struktur von Brandenburger Ozonmeßdaten zu analysieren, das heißt den Einfluß des Emittentengroßraums Berlin auf die Ozonverteilung in Brandenburg zu beschreiben, erfordert Kenntnisse über die Meßstationen bezüglich ihrer Lage, die für Transportvorgänge relevant ist, und den lokalen Emittentefeldern.

Die oben beschriebenen Eigenschaften werden durch ordinal skalierte Merkmale abgeschätzt und in einer Rangmatrix (Tabelle 2-1) zusammengefaßt.⁴ So sollen Gemeinsamkeiten der Meßumgebungen deutlich werden.

Entfernung und Richtung geben die räumliche Lage zu Berlin wieder.

Die Klassierung der Abstände erfolgt in 25 km - Ringen:

Distanzen	bis 50 km entsprechen	Klasse 1,
	50 bis 75 km	Klasse 2,
	75 bis 100 km	Klasse 3 und
	100 bis 125 km	Klasse 4.

Die Richtungseinteilung orientiert sich an der VDI-Richtlinie 3786 Blatt 2. Sie ist vor allem für die Untersuchung von Windeinflüssen notwendig. Um bei der Betrachtung vorherrschender Windrichtungen eines Tages einen auswertbaren Stichprobenumfang zu erhalten, wird jedoch die Sektorenbreite verdoppelt:

Die Bereiche bis 30^o bzw. ab 330^o bilden Sektor 1,
30^o bis 90^o Sektor 2,

⁴ Vgl. Kockelkorn, 1995.

90° bis 150°	Sektor 3,
150° bis 210°	Sektor 4,
210° bis 270°	Sektor 5 und
270° bis 330°	Sektor 6.

Zur Beschreibung der Emissionssituation in der Umgebung der Meßstationen dienen die Parameter Industrie, Stadtverkehr und Umgebungsverkehr. Gemäß den erwarteten Emissionen werden die einzelnen Stationen dabei jeweils den Kategorien 1 für geringe Emissionsbelastung bis 4 für emittentenreiche Umgebung zugeordnet.

Die Standortbeurteilung im Hinblick auf Industrie und Stadtverkehr erfolgt anhand von Topographischen Karten, Stadtplänen und Informationsmaterial von den Betreibern der Meßstationen nach der Skala

1	-	quasi nicht vorhanden
2	-	kaum bis durchschnittlich vorhanden
3	-	durchschnittlich bis überdurchschnittlich vorhanden
4	-	deutlich überdurchschnittlich vorhanden.

In die Gruppierung des Umgebungsverkehrs gehen naheliegende Landstraßen und Autobahnen ein: Liegt die Station

ab 20 km zur BAB	und von der Landstr. entfernt,	fällt sie	in Rubrik 1,
ab 20 km zur BAB entfernt,	aber direkt an der Landstr.		in Rubrik 2,
bis 20 km zur BAB	aber von der Landstr. entfernt,		in Rubrik 3 und
bis 20 km zur BAB entfernt,	und direkt an der Landstr.		in Rubrik 4.

Um bei späteren Auswertungen Randbereiche der Klassen zu verdeutlichen, wird zusätzlich die Rangfolge a bis f eingeführt. Der Einfluß jedes Parameters sollte jedoch innerhalb seiner Klasse jeweils ähnlich sein, soweit er nicht in einer Darstellung durch andere Effekte überlagert wird.

Tabelle 2-1: Rangmatrix der Stationscharakteristika

Station	Entfernung	Richtung	Industrie	Stadtverkehr	Umgebungs- v
N	2 c	1 a	1	1	1 a
PRZ	3 e	1 b	3	4	4 c
AN	2 b	1 c	2	2	4 d
EISH	3 d	3 a	4	4	4 a
LI	2 a	3 b	2	2	3 a
BURG	3 c	3 c	1	2	3 b
KWH	1 a	4 a	4	4	3 c
DL	3 f	4 b	2	2	1 b
WI	3 a	5 a	2	2	2 a
PDMW	1 b	5 b	2	3	4 e
PREM	2 d	6 a	3	4	2 c
WITT	4	6 b	4	3	2 b
KY	3 b	6 c	3	3	4 b

Rangmatrizen werden bei statistischen Untersuchungen zum Vergleich von Elementen eingesetzt. Hier werden die Meßumgebungen nach festgelegten Regeln beurteilt und festgeschrieben, so daß bei späteren Auswertungen gewährleistet ist, daß die Zuordnung eines Standortes zu einem Umfeld unabhängig von der Immissionsituation erfolgt. Dies

ist notwendig, da ja gerade die Immissionsstruktur Gegenstand der Analyse ist, das heißt beobachtet werden soll und deshalb nicht propagiert werden darf.

Die Rangmatrix der Stationscharakteristika wird deshalb stets zur Interpretation der Untersuchungen herangezogen, ohne daß dies im folgenden einzeln dargelegt werden muß.

2.3 Die Erstellung der Datenbank und Auswahl ihrer Parameter

Bisher ist der Ozonhaushalt der Region Brandenburg kaum quantitativ untersucht. Um die räumliche Struktur der Ozonimmissionen zu erfassen, müssen lokale Emissionen der Vorläuferverbindungen gemessen und Parameter zur Beschreibung von Advektionsströmen erfaßt werden.

Das Berliner Stadtgebiet beeinflusst vermutlich maßgeblich das luftchemische Gleichgewicht im betrachteten Gebiet. Die Analyse der umliegenden Meßstationen läßt deshalb strukturelle Gemeinsamkeiten erwarten.

Mit Hilfe der Statistiksoftware SAS werden die Meßwerte aufbereitet und ausgewertet. Betrachtet werden Halbstundenwerte im Zeitraum 1993 bis 1995. Da nennenswerte Ozonkonzentrationen nur in den Sommermonaten auftreten, kann die Datenbank auf die Monate April bis September reduziert und so die gegebenen Rechenkapazitäten mit einem möglichst großen Stichprobenumfang optimal genutzt werden.

Zur Auswertung der Ozonmeßreihen werden Stickstoffdi- und -monoxidimmissionen an den Brandenburger Meßorten herangezogen. Außerdem liegen für die Stationen Neuglobsow, Eisenhüttenstadt, Königs Wusterhausen, Potsdam-Hermannswerder und Wittenberge Temperatur- sowie Windgeschwindigkeits- und -richtungsmessungen vor.

Zusätzlich Parameter folgender Berliner Meßstellen aufgenommen:

- *Höhenmeßstation Berlin-Frohnau*

Das Berliner Luftgütemeßnetz BLUME betreibt in Frohnau am Stadtrand Berlins eine Höhenmeßstation, an der die Konzentration lufthygienisch relevanter Komponenten in 324 Meter Höhe ermittelt wird. Die hier aufgezeichnete Ozonmeßreihe gibt Auskunft über Luftverunreinigungen in höheren Luftschichten und läßt Aussagen über nächtliche

Reservoirschichten, die Ozonbelastung morgendlicher Mischungsschichten und den Ferntransport zu. Daher ist die Meßreihe nicht unmittelbar mit den Immissions-situationen an den dreizehn Untersuchungsorten vergleichbar, sondern wird als Hilfsvariable mit regionaler Bedeutung zu deren Analyse herangezogen.

- *Meteorologische Daten Berlin-Grunewald*

BLUME erfaßt außerdem meteorologische Daten im Grunewald (Berlin). Da diese Faktoren an vielen Luftgütemeßstationen nicht ermittelt werden, den Ozonhaushalt aber maßgeblich beeinflussen können, werden die Berliner Temperatur- und Windrichtungsmeßwerte auf die Brandenburger Region übertragen, um zusammen mit den wenigen vorhandenen Daten an den betrachteten Immissionspunkten die meteorologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet zu beschreiben.⁵

Vorbetrachtungen und Untersuchungen von Pan, 1997, zeigen, daß die Meßmethoden der Betreiber für die verschiedenen Stationen vergleichbar sind beziehungsweise in quantitativem Zusammenhang stehen.⁶

⁵ Pan, 1997, führt umfangreiche Vergleiche für die Meßstationen durch, die Meteorologiedaten aufzeichnen. Demnach ist dieses Vorgehen hinreichend genau.

⁶ Zum Beispiel ist in Absprache mit dem Landesumweltamt Brandenburg für einige Ozondaten ein Korrekturfaktor festgelegt, um verschiedene Kalibrierverfahren zu vergleichen. Näheres siehe Pan, 1997.

3 Vorbetrachtungen zur Vergleichbarkeit von Meßreihen

3.1 Vergleichbarkeit von zeitversetzten Halbstundenwerten

Luftschadstoffe und meteorologische Daten liegen zunächst als Halbstundenmeßwerte vor. Sollen längere Zeiträume betrachtet werden, ist daher die zu untersuchende Datenbasis sehr umfangreich und rechentechnisch z.T. nur schwer zu bewältigen. Es ist daher naheliegend, Möglichkeiten zu prüfen, um den Datenumfang zu reduzieren, aber gleichzeitig den Informationsgehalt weitgehend zu erhalten.

Die Frage, ob Datensätze über eine oder mehrere Stunden gemittelt werden dürfen, hängt von der Änderung der Halbstundenwerte im betrachteten Zeitbereich bzw. der betreffenden Werte (wenn nur die Randwerte gemittelt werden sollen) ab. Da weitere Untersuchungen folgen sollen, ist die Streuung möglichst eng einzugrenzen - sonst ist zu befürchten, daß aufgrund der Fehlerfortpflanzung Korrelationen nicht mehr erkennbar werden.^{7, 8}

Zunächst werden die Ozonwerte einer Station gegen die um jeweils 30 Minuten zeitversetzten Halbstundenwerte geplottet. Anschließend wird der Zeitabstand schrittweise auf mehrere Stunden vergrößert. Die Abbildungen 3-1 und 3-2 zeigen dies exemplarisch für 30 Minuten und eine Stunde mit den Ozonmeßreihen Eisenhüttenstadt und Neuglobsow.

Für alle Stationen übersteigt der Korrelationskoeffizient⁹ bei einer Zeitverschiebung um 30 Minuten noch 97 %. Bei einer Verschiebung um eine Stunde sinkt er jedoch z.T. schon unter 93 %; bei 90 Minuten Versetzung werden bei einigen Stationen nicht einmal mehr

⁷ Rochat, 1980, hier Chapitre VIII Modèles de programmation en nombres entiers, zieht neben der Summenbildung auch (ggf. gewichtete) Produkte heran. Numerische Fehlerbetrachtungen bleiben jedoch offen.

⁸ Dreesmann, 1996, gibt folgende Richtwerte: Für technische Zusammenhänge können Korrelationen zwischen 0,8 - 0,9 gefordert werden, während z.B. in sozialen Fragen Korrelationen zwischen 0,2 bis 0,3 schon als positiv betrachtet werden. Diese zu erwartenden Korrelationen müssen aus den o.g. Gründen wesentlich übertroffen werden, da hier vorab Werte quasi als „gleich“ definiert werden sollen. An späterer Stelle genügen dann kleinere Korrelationskoeffizienten.

⁹ In dieser Arbeit wird die Definition des Korrelationskoeffizienten r nach Pearson verwendet. Vgl. Kockelkorn, 1995, zu verschiedenen Definitionsvorschriften; sowie Bunge / Schreiber, 1993, hier S. 82, über alternative Berechnungen mit SAS.

90 % Korrelation erreicht. Äquivalente Ergebnisse liefern Stickstoff- und Temperaturdaten. Anhang 1 zeigt typische Gegenüberstellungen der Daten für alle analysierten Standorte.

Abbildung 3-1: Korrelation zeitversetzter Ozonwerte an der Station Eisenhüttenstadt bei einer Verschiebung um a) 30 Minuten und b) 1 Stunde

Abbildung 3-2: Korrelation zeitversetzter Ozonwerte an der Station Neuglobsow bei einer Verschiebung um a) 30 Minuten und b) 1 Stunde

Auf dieser Grundlage wird von einer weiteren Einschränkung des Datensatzes durch Reduzierung auf eine Stundenbasis abgesehen. Bei einer Verschiebung der Meßwerte um jeweils eine Stunde korrelieren die Daten jedoch noch dahingehend ausreichend, um Betrachtungen nach Lichtenvort, 1997, zumindest tendenziell auf Halbstundendaten zu übertragen. Andere Arbeiten am Fachgebiet Luftreinhaltung basieren auf Stundenwerten, da die Daten dort vorrangig im Hinblick auf immissionsschutzrechtliche Bestimmungen, die Schwellenwerte in der Regel als Stundenmittelwerte festsetzen, untersucht und für erhöhte Ozonwerte beurteilt werden.

Dagegen ist Thema dieser Studienarbeit, allgemeine Zusammenhänge zu analysieren und auf ihre räumliche Ausdehnung im Brandenburger Meßgebiet zu prüfen. Dazu reicht die Betrachtung von Spitzenwerten nicht aus, weil die Struktur der Ozonquellen und -senken, vor allem abhängig von der Meteorologie, unter Umständen zu einem gleichzeitigen Auftreten von maximalem Ozonwert an einer Station und normaler oder gar niedriger Konzentration an einer anderen Station führen könnte.

3.2 Vergleichbarkeit von Oxidantienpotential und Ozon

Statt des Ozons wird in der Literatur oft das Oxidantienpotential als abhängige Größe angeführt. Es wird als Summe von Ozon und Stickstoffdioxid berechnet.

Für die betrachteten Stationen liegt der Korrelationskoeffizient aus den Variablen Ozon und Oxidantienpotential zwischen 90 % in emissionsbeeinflussten Gebieten wie Eisenhüttenstadt bis über 99 % in ländlichen Gegenden wie Neuglobsow. Die Werte sind im einzelnen Anhang 2 zu entnehmen. Diese Korrelation ist so hoch, daß die Einführung des Oxidantienpotentials in die Betrachtung gegenüber dem Ozon keine Vorteile verspricht.

Die hohe Übereinstimmung von Oxidantienpotential und Ozon ist zu verstehen, da die Ozonkonzentrationen durchschnittlich etwa sechsmal so hoch sind wie die Stickstoffdioxidwerte. Zudem treten die Peaks antizyklisch auf, d.h. die Addition der beiden Meßreihen führt nicht zu einem ausgeprägteren Tagesgang, da der Wertebereich des Oxidantienpotentials gegenüber dem Ozon kaum erweitert wird.

Dennoch werden die folgenden Untersuchungen zur Kontrolle jeweils für beide Parameter durchgeführt. Da die Abweichungen in allen Fällen gering sind, ist die Darstellung der Ergebnisse für Ozon jedoch aus oben genannten Gründen ausreichend.

3.3 Ergebnisse der Vorbetrachtungen

Die weiteren Untersuchungen werden auf der Grundlage von Halbstundenwerten durchgeführt,¹⁰ da die Korrelationen von in 90minütigem Abstand gemessenen Konzentrationen bereits deutliche Schwankungen in den Meßreihen aufzeigen. Die Darstellung von vier aufeinanderfolgenden Halbstundenwerten als Stundenmittel-Datenpaar ließe deshalb bereits einen Informationsverlust erwarten, der die Analyse räumlicher Strukturen erschwert.

Das Oxidantienpotential, das im Zusammenhang mit der Auswertung von Ozondaten in der Literatur häufig herangezogen wird, ist zur Analyse des Ozonverlaufs nicht notwendig. Es korreliert sehr gut mit den Ozonmeßdaten und führt daher gegenüber der separaten Ozonmeßreihe zu keinen zusätzlichen Informationen.

4 Einfluß von Zeitverläufen auf die Ozonkonzentration

4.1 Zeitlicher Verlauf relevanter Parameter

Einen Überblick über mögliche Einflußgrößen auf die Ozonkonzentration liefern Tages- und Monatsgänge. In beiden Fällen werden monatsweise separate Diagramme angefertigt, so daß sich für die Sommermonate 1993 bis 1995 jeweils achtzehn Abbildungen für jede Meßstation ergeben.

Im Tagesgang werden Konzentrationen über der Tageszeit von 0 bis 24 Uhr halbstündig abgetragen. Für jeden Meßzeitpunkt wird aus den Meßwerten des Monatsersten bis -letzten ein Boxplot erstellt, aus dem Median, Quartile und Extrema hervorgehen. Die Mediane

¹⁰ Sofern theoretische Überlegungen dies erfordern, werden in den jeweiligen Kapiteln Parameter eingeführt, die als repräsentativ über einen längeren Zeitraum angenommen werden. Dieses Vorgehen ist vor allem zur Analyse meteorologischer Einflüsse notwendig.

werden zu einem durchschnittlichen Tagesverlauf verbunden, während durch Extrema oder Quartile Streuungen sichtbar werden.

Entsprechend zeigt der Monatsgang den mittleren Konzentrationsverlauf über der Datums-Zeitachse und die Streuung während jeweils eines Tages.¹¹

**Abbildung 4-1: Tagesgang für Ozon und Stickstoffmonoxid
des Monats April 1994 an der Station Eisenhüttenstadt**

o : Ozon

Δ: Stickstoffmonoxid

¹¹ Hier werden exemplarisch Zeitverläufe für den Monat April 1994 dargestellt, um Tendenzen für den Einfluß von aufeinanderfolgenden Feiertagen wie Karfreitag (01/04/94) bis Ostermontag (04/04/94) aufzuzeigen. Feiertage können analytisch den Wochenenden zugeordnet werden. Offenbar wird durch solche zusätzlichen Tage mit verändertem Emittentenumfeld aber auch der Streuungsverlauf der Ozonwerte für die folgenden Wochentage geglättet. Diese Aussagen können wegen der wenigen Fälle jedoch nicht statistisch gesichert werden, vor allem da die Feiertage nicht gleichmäßig über den betrachteten Zeitraum verteilt sind. So sind die Osterwochen zwar die längsten Feiertagszeiträume, weisen aber aufgrund der noch mäßigen Temperaturen nur mittlere Ozonkonzentrationen auf.

**Abbildung 4-2: Tagesgang für Ozon, Temperatur und relative Feuchte
des Monats April 1994 an der Station Eisenhüttenstadt**

o : Ozon

Δ: Temperatur

* : Relative Feuchte

**Abbildung 4-3: Monatsgang für Ozon, Temperatur und relative Feuchte
des Monats April 1994 an der Station Eisenhüttenstadt**

o : Ozon

Δ: Temperatur

* : Relative Feuchte

Abbildung 4-1 verdeutlicht am Beispiel von Eisenhüttenstadt, daß sich Konzentrationseinbrüche des Ozons mit Stickstoffmonoxidpeaks decken. Diese Täler können anhand der Diagramme quantifiziert werden und betragen kurzzeitig etwa 3 - 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; kleinere Einbrüche um bis zu 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ haben ihre Ursache teilweise in Meßwertausfällen.

Dieser antizyklische Zusammenhang resultiert aus dem Ozonbildungsprozeß nach dem Stickstoff-Ozon-Zyklus.¹²

Aufgrund der geringen Stickstoffmonoxidkonzentrationen an ländlichen Meßstationen ist dieser Effekt dort weniger ausgeprägt.

Der Ozonverlauf geht im großen und ganzen mit dem Temperaturverlauf oder geringer relativer Feuchte einher, wie aus den Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 hervorgeht. Dies ist zu erwarten, da Ozon nach einer Spaltung der Primärschadstoffe in Radikale gebildet wird, zu der Sonnenenergie genutzt wird. Die Einstrahlung wird durch einfache meteorologische Daten abgeschätzt.¹³

Für die Rolle von Windeinflüssen kann an dieser Stelle keine Aussage getroffen werden.

Weitere Tages- und Monatsgänge sind in Anhang 3 abgebildet. Gegenübergestellt werden der Hochsommermonat Juli 1994 und der Frühjahrszeitraum April 1995. Exemplarisch für eine ländliche Meßstation sind dort auch Plots der Neuglobsower Datenreihen zu finden. (Meßwerte für die relative Feuchte liegen leider nicht vor.)

4.2 Ozonentwicklung im Wochenverlauf

Die Monatsgänge zeigen lokale Ozonmaxima an Wochenenden und Feiertagen. Daher werden die Betrachtungen in die Rubriken Werktags und Wochenende untergliedert sowie nach den Wochentagen (Montag bis Freitag) getrennt durchgeführt. Um einen ausreichenden Stichprobenumfang zu gewährleisten, werden hierzu sämtliche Ozondaten der Sommerhalbjahre 1993 bis 1995 herangezogen.

¹² Näheres siehe Kapitel 5: Einfluß des Stickstoffhaushalts auf die Ozonkonzentration.

¹³ Näheres siehe Kapitel 6: Einfluß der Meteorologie auf die Ozonkonzentration.

Für die untersuchten Stationen können zwei typische Streuungsverläufe herausgearbeitet werden, die in Abbildung 4-4 dargestellt sind. Als Maß für die Streuung dient der Interquartilsabstand, d.h. die Differenz zwischen oberem und unterem Quartil:

Unter den ersten Typ fallen die ländlichen Stationen Angermünde, Lindenberg, Wiesenburg und Neuglobsow sowie die Station Kyritz in gering bis mittelmäßig belasteter Umgebung. Sie zeigen ein Minimum in der Wochenmitte - Donnerstag bzw. bei Lindenberg Mittwoch - und ein Maximum zum Wochenende hin - Freitag bzw. bei Kyritz Samstag. Dazwischen ist der Streuungsverlauf glatt. Ein ähnliches Verhalten weisen die Höhendaten von Frohnau mit Minimum am Dienstag und Maximum am Freitag auf.

In die zweite Kategorie fallen die Stationen Prenzlau, Eisenhüttenstadt, Königs Wusterhausen, Potsdam-Hermannswerder, Premnitz und Wittenberge, in deren Nähe Emittenten das Ozongleichgewicht beeinflussen, haben zusätzlich ein zweites Minimum am Dienstag. Außer bei Eisenhüttenstadt liegt Mittwochs ein ausgeprägtes lokales Maximum in der Streuungsbreite vor. Vergleichbar sind die beiden südlichsten Stationen Doberlug-Kirchhain und Burg, in letzterem Fall jedoch nur schwach ausgeprägt. Im Hinblick auf die Nähe zum Industriegroßraum Halle / Leipzig ist auch hier die Eingruppierung „emittentenbeeinflußt“ gerechtfertigt.

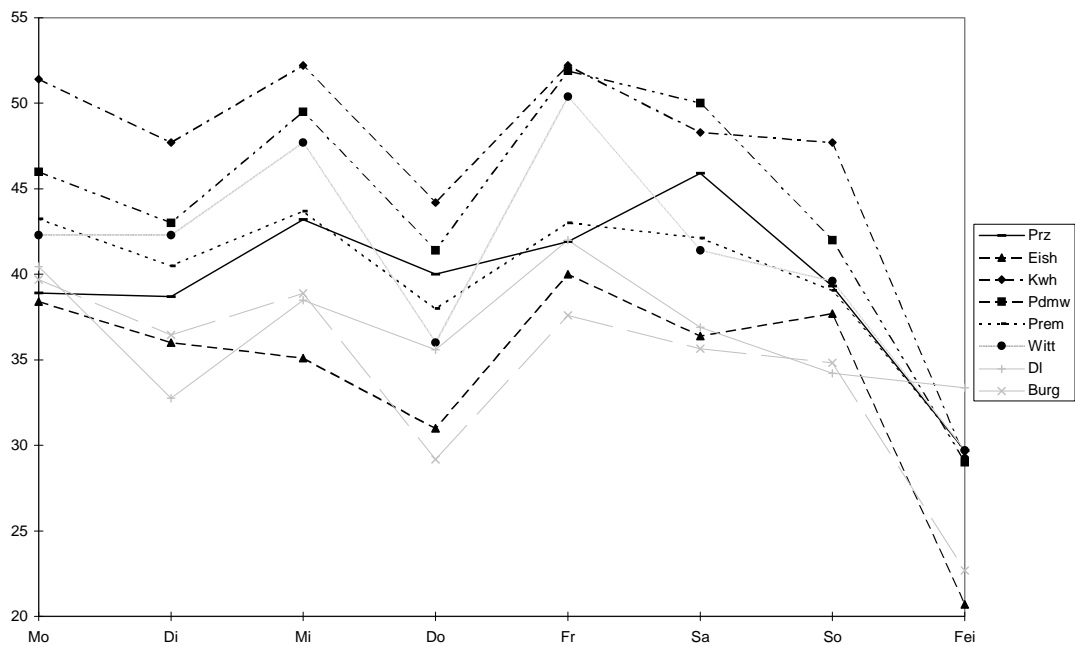
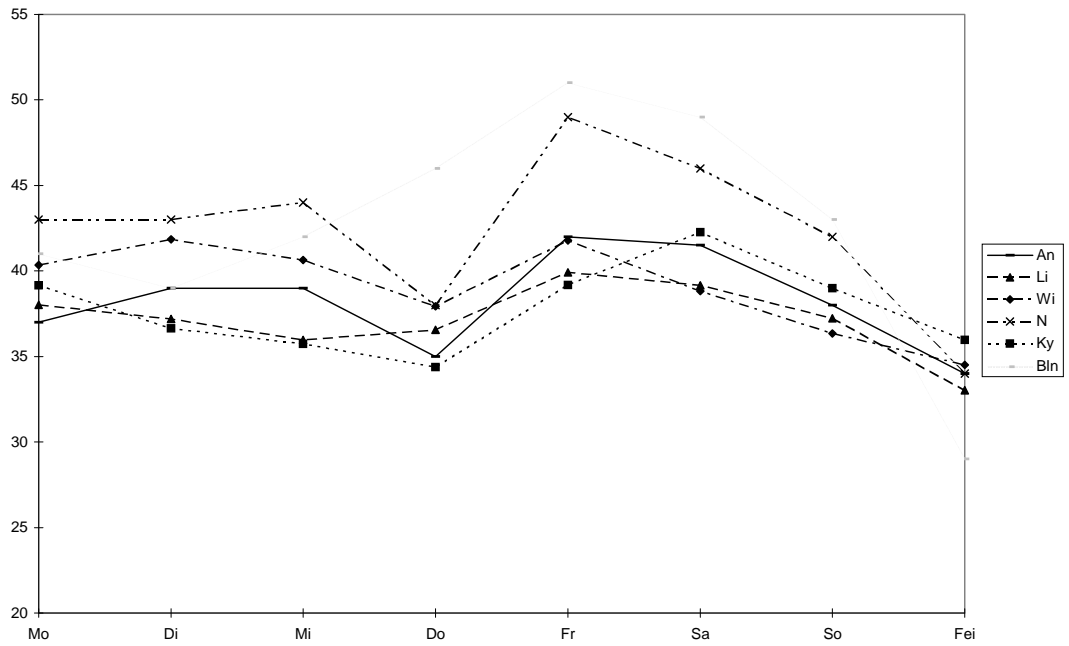


Abbildung 4-4: Interquartilsabstände der Ozonmeßdaten nach Wochentagen
a) an den ländlichen Stationen (sowie an der Höhenmeßstation)
b) an den emittentenbeeinflußten Stationen

4.3 Ergebnisse der Analyse von Zeitverläufen

Die Ozonkonzentrationen verlaufen antizyklisch mit den Stickstoffmonoxidkonzentrationen und annähernd parallel zu den meteorologischen Daten Temperatur und relative Feuchte. Diese Zusammenhänge bestätigen die theoretischen Betrachtungen, die Grundlage der folgenden Kapitel zum Einfluß des Stickstoffhaushalts auf die Ozonkonzentration und zum Einfluß der Meteorologie auf die Ozonkonzentration sind und dort näher erläutert werden.

Zusätzlich kann aus der detaillierten Analyse der Zeitverläufe von Brandenburger Ozonmeßdaten ein Parameter zur Einschätzung einer regionalen Meßumgebung postuliert werden: Der Wochenverlauf des Interquartilsabstandes weist als Maß für die Streuung der Ozonkonzentrationen eine unterschiedliche Charakteristik für ländliche bzw. für emittentenbeeinflusste Stationen auf.

Dieses gemeinsame Merkmal ähnlicher Meßstationen verifiziert die Gruppierung der Standorte nach Tabelle 2-1: Rangmatrix der Stationscharakteristika und stützt damit nachfolgende Betrachtungen sowie gegebenenfalls die Zuordnung weiterer Meßorte wie die innerstädtischen Standorte Schwedt, Frankfurt / Oder, Cottbus, Spremberg, Senftenberg, Potsdam (Zentrum) oder Brandenburg.

Festzuhalten ist, daß dabei Ergebnisse für den Süden des Landes Brandenburgs aufgrund von Auffälligkeiten an der Station Doberlug-Kirchhain statistisch nicht eindeutig sind. Insbesondere für die Station Senftenberg, auf die im Rahmen dieser Arbeit entsprechend der in Kapitel 2.1: Die Brandenburger Meßstationen dargelegten Zielsetzung nicht näher eingegangen wird, ist nicht auszuschließen, daß sich durch Überlagerung der Einflüsse der Emittentengroßräume Berlin und Leipzig ein anderes Bild ergäbe. Allerdings zeigen die Auswertung von Meßdaten der Station in Burg und parallele Untersuchungen am Fachgebiet Luftreinhaltung der TU Berlin keine allgemeinen Unterschiede dieser südlichen Meßstationen im Vergleich zu den nördlicheren; Besonderheiten können ausschließlich für die Station Doberlug-Kirchhain festgestellt werden. Aus diesen Gründen und wegen der Festlegung des Untersuchungsgebietes als Umland Berlins wird im Rahmen dieser Arbeit auf nähere Ausführungen zu diesem Thema verzichtet.

5 Einfluß des Stickstoffhaushalts auf die Ozonkonzentration

5.1 Stickstoffdioxid

Troposphärisches Ozon ist ein Sekundärschadstoff. Neben der Transmission¹⁴ bestimmen seine Konzentration deshalb vor allem Vorläuferverbindungen.

Die Ozonbildung erfordert Sauerstoffradikale, die bei Sonneneinstrahlung aus Stickstoffdioxid entstehen.

Im Korrelationskoeffizient nach Pearson aus den Stickstoffdioxidkonzentrationen und den Ozonwerten zeigt sich dieser Zusammenhang kaum.¹⁵ Die höchsten Werte liegen zwischen -0,3 und -0,5; ermittelt an den emissionsbeeinflussten Stationen Königs Wusterhausen, Prenzlau, Premnitz, Eisenhüttenstadt, Potsdam-Hermannswerder und Kyritz.

Noch niedrigere Linearkorrelationen ergeben sich für Doberlug-Kirchhain, Lindenberg und Burg; Wittenberge weist mit -0,26 einen Koeffizienten auf, bei dem eine Abhängigkeit gerade noch angenommen werden kann.

Während erstgenannte Stationen nur von wenigen lokalen Emittenten umgeben sind, kann Wittenberge zwar als Industriestandort charakterisiert werden, verfügt aber über eine deutlich schlechtere Verkehrsanbindung als Burg und Lindenberg. Insbesondere die weiter entfernt verlaufende Autobahn scheint hier ausschlaggebend zu sein.

Einen ähnlich schwachen Zusammenhang zeigen die Daten des ländlich, aber „verkehrsgünstig“ gelegenen Angermünde. An den ruhigen, abgelegenen Stationen Neuglobsow und Wiesenburg ist keine Regression mehr möglich.

¹⁴ Nach Steisslinger, 1994, wird nur in Einzelfällen Ozon aus der Stratosphäre bis in bodennahe Luftschichten eingetragen. Vertikale Transportvorgänge können daher vernachlässigt werden.

¹⁵ In Anhang 4 sind die Korrelationen der Ozonmeßreihen mit den im folgenden beschriebenen Parametern zur Charakterisierung des Stickstoffhaushalts zusammengefaßt.

5.2 Stickstoffmonoxid

Stickstoffmonoxid ist eine wichtige Primäremission insbesondere des Kraftverkehrs. Es reagiert relativ schnell zu Stickstoffdioxid und konkurriert dabei um die zur Ozonbildung benötigten Sauerstoffradikale.

Entsprechend sind für alle Stationen die Ozon-Stickstoffmonoxid-Korrelationen gegenüber den auf Stickstoffdioxid bezogenen Untersuchungen weniger ausgeprägt. Die beschriebene Rangfolge zwischen den Stationen bleibt dabei weitgehend unverändert.

Die graphische Auswertung der Plots - Abbildung 5-1 zeigt Beispiele aus den Meßdaten von Eisenhüttenstadt - läßt eine negativ exponentielle Hüllkurve vermuten.¹⁶ Dieser Zusammenhang entspricht der Theorie der Konkurrenzreaktionen, die für Antiproportionalitäten spricht. Deshalb werden nicht nur lineare, sondern auch logarithmische und (negativ) exponentielle Korrelationen betrachtet.

Die Regressionsgüte verbessert sich bei logarithmischer Darstellung. Näherungsweise kann auch der Kehrwert herangezogen werden, der aber z.T. niedrigere Korrelationskoeffizienten liefert.

Dagegen wirken sich Logarithmus und Kehrwert bei der Betrachtung der Stickstoffdioxid-Ozon-Plots nur für die Station Potsdam-Hermannswerder deutlich positiv aus.

¹⁶ Für die ländlichen Stationen ist eine Abbildung hier nicht sinnvoll, da die Stickstoffkonzentrationen insgesamt zu gering sind, um eine mögliche Korrelation zu belegen.

Abbildung 5-1: Ozon-Stickstoffmonoxid-Plots für die Station Eisenhüttenstadt

a) lineare Darstellung

b) logarithmische Darstellung

5.3 Gesamtstickstoff

Wird der Gesamtstickstoff als NO₂-äquivalente Summe von Stickstoffdi- und -monoxid abgeschätzt, erhält man einen Parameter, der die Zusammenhänge des Stickstoff-Ozon-Zyklus' besser beschreiben kann:

$$[\text{NO}_x] = [\text{NO}] \cdot \frac{M(\text{NO}_2)}{M(\text{NO})} + [\text{NO}_2] \quad \text{mit } M(\text{NO}) \approx 30 \text{ g/mol};$$
$$M(\text{NO}_2) \approx 46 \text{ g/mol}.$$

Bei doppelt logarithmischer Skalierung steigt der Korrelationskoeffizient für alle beeinflussten Stationen und erreicht an den Verkehrsmeßstellen Königs Wusterhausen, Eisenhüttenstadt und Prenzlau den Wert 0,6. Selbst für Angermünde wird hier ein Wert von 0,3 ermittelt.

Nur die beiden unbeeinflussten Stationen Neuglobsow und Wiesenburg lassen - wie schon in den Einzelbetrachtungen - keine Abhängigkeiten erkennen.

5.4 Weitere Parameter zur Charakterisierung des Stickstoffetats

5.4.1 Das photostationäre Gleichgewicht

Im photostationären Gleichgewicht ist die Ozonkonzentration proportional zum Verhältnis Stickstoffdioxid zu Stickstoffmonoxid.¹⁷

Für die betrachteten Stationen eignet sich dieser Quotient jedoch nicht zur Beschreibung der Ozonwerte: Der Plot von Ozon gegen dieses Stickstoffverhältnis zeigt annähernd eine Normalverteilung. Regressionen sind mit Hilfe dieses Parameters nicht möglich.

5.4.2 Extremwertbetrachtungen

Ein großer Teil der Stickstoffmeßwerte liegt unterhalb der Meßgrenze. Dann wird der Ozonhaushalt weitgehend durch andere (insbesondere meteorologische) Faktoren

¹⁷ Vgl. z.B. Israel, 1994; Lichtenvort, 1997.

bestimmt. Deshalb sollen nur Stickstoffpeaks und die entsprechenden Ozonminima gegenübergestellt werden.

Die Tagesgänge zeigen in den frühen Morgenstunden und / oder am Abend erhöhte Stickstoffwerte, so daß sich als Zeitbereiche für die Extremwertbestimmung Tages- bzw. 12-Stunden-Intervalle (0 bis 12 Uhr und 12 bis 24 Uhr) anbieten. Die Abgrenzung beeinflußt das Ergebnis stark, ohne daß eines der Intervalle regelmäßig höhere Korrelationen liefert. Beide Intervalle erweisen sich für etwa gleich viele Stationen als vorteilhaft, wobei diese Meßortgruppen keine gemeinsamen Merkmale erkennen lassen.

Für die vorher nicht oder nur schwach korrelierten Stationen Doberlug-Kirchhain, Wittenberge, Burg Lindenberg, Wiesenburg und Neuglobsow kann auf diese Weise ein Korrelationskoeffizient um -0,5 bis -0,4 ermittelt werden. Durch Logarithmenbildung werden sogar Werte über 0,85 erreicht.

Umgekehrt verschlechtert sich jedoch die Regression bei Betrachtung der Extrema gegenüber den Halbstundenwerten oder ist mit Korrelationskoeffizienten bis null an den stärker emissionsbeeinflußten Meßpunkten Kyritz, Potsdam-Hermannswerder, Königs Wusterhausen, Premnitz und Eisenhüttenstadt mit Ausnahme von Prenzlau.

Das heißt, Extremwertbetrachtungen ermöglichen eine Abschätzung von Stickstoff-Ozon-Abhängigkeiten, wenn der Originaldatensatz aufgrund vieler Meßwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze keine sinnvolle Korrelation zuläßt. Bei tendenziell höheren Meßwerten führt dieses Verfahren aber zu einem unnötigen Informationsverlust, der eine Verschlechterung der Regression bedingt.

5.5 Ergebnisse der Analyse des Stickstoffhaushalts

Der Stickstoffhaushalt bestimmt maßgeblich die Ozonbildungsprozesse. Stickstoffmonoxidemissionen reagieren sehr schnell zu der Ozon-Vorläuferverbindung Stickstoffdioxid, so daß die Ozonbildung schon in Bodennähe einsetzt und an emittentenbeeinflußten Meßstandorten erfaßt werden kann.

Lineare Regressionsmodelle sind jedoch kaum geeignet, um diese Zusammenhänge zu beschreiben. Wie aus den graphischen Darstellungen hervorgeht, äußern sich die

Abhängigkeiten in Form einer Hüllkurve, so daß aufgrund des nach unten offenen Streubereichs nur mittlere Korrelationskoeffizienten erreicht werden können.

Aus den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit geht als sinnvollste Darstellungsform der Stickstoff-Ozon-Plot in logarithmischer Skalierung für Daten verkehrsnaher Meßstationen hervor.

Zur Analyse von räumlichen Strukturen im interstationären Vergleich ist es nahezu unerheblich, ob der Stickstoffhaushalt als Stickstoffdioxid, Stickstoffmonoxid oder als Gesamtstickstoff parametrisiert wird, da jede dieser Kenngrößen zur gleichen Gruppierung der Meßstandorte führt.

Für ländliche Stationen spielt der Stickstoffhaushalt für die Ozonkonzentrationen quasi keine Rolle, da hier Transmissionsvorgänge deutlich dominieren. Durch Extremwertbetrachtungen in Zeitintervallen von 12 oder 24 Stunden können zwar höhere Korrelationskoeffizienten ermittelt werden; dieses Verfahren erscheint jedoch für die Praxis weniger geeignet, da es nur für relativ unbeeinflusste Standorte geeignet ist.

6 Einfluß der Meteorologie auf die Ozonkonzentration

6.1 Regionale Effekte

6.1.1 Die nächtliche Ausbildung einer Reservoirschicht

Der Wärmehaushalt der Erdoberfläche wird in städtischen Gebieten durch Bebauung und Oberflächenversiegelung beeinflusst. So wird die nächtliche Bodenabkühlung verringert, Kaltluftströmungen aus dem Umland werden durch die Bebauung abgeschirmt. Zudem wird die atmosphärische Gegenstrahlung durch erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen verstärkt.¹⁸

Die erhöhte Nachttemperatur in Bodennähe begünstigt die Ausbildung einer Inversionsschicht, deren Einfluß sich keineswegs auf das Stadtgebiet beschränkt. Luftverunreinigungen sammeln sich in der Reservoirschicht und können über einige hundert Kilometer transportiert werden. Insbesondere im Zusammenhang mit Ozonepisoden werden solche Distanzen beschrieben.¹⁹

Die Auflösung der Sperrschicht bedingt turbulente Strömungen, die diesen Advektionsstrom in die unteren Luftschichten tragen, so daß diese Kontaminationen gemeinsam mit den verbliebenen lokalen Emissionen als Immission gemessen werden. Innerhalb des Stadtgebietes Berlin zeigt sich dieser Effekt als Korrelation zwischen morgendlichen Ozondaten der Höhenmeßstation Frohnau und Immissionswerten zur Mittagszeit, wenn sich eine Mischungsschicht aufgebaut hat, in der abwärtsgerichtete turbulente Diffusion vorherrscht.²⁰

¹⁸ Vgl. hierzu Horbert sowie Stull, 1988, hier Chapter 14.3.

¹⁹ Gyr / Rys, 1995, Chapter 7.2.5; Stull, 1988, hier Chapter 14.3.

²⁰ Lichtenvort, 1997.

6.1.2 Die Eignung des Datenmaterials für Reservoirschichtbetrachtungen

Die Varianz von Einflußgröße und Realisation eines Merkmals ist skalierungsabhängig.²¹ Wenn Abhängigkeiten von einer vermuteten Ursache mit täglichem Turnus betrachtet werden sollen, empfiehlt sich daher, wirkungsseitig die zeitliche Auflösung anzupassen, indem Mittelwerte der Halbstundenmeßdaten über die in Tabelle 6-1 dargestellten Zeitbereiche gebildet werden. Die Bereichsgrenzen orientieren sich dabei optisch an den beobachteten Tagesgängen. Da Schädigungen oder Beeinträchtigungen sich i.d.R. aus zwei bis vier Stunden andauernden Spitzenbelastungen ergeben,²² weicht die Einteilung bewußt von den Achtstundenblöcken nach § 1a 22. BImSchV ab.

Tabelle 6-1: Definition der Tageszeiten

Zeitbereich	Meßwertbereich	Tageszeit
23 bis 4 Uhr	$23^{30} \leq t \vee t < 4^{30}$	0. Nacht
4 bis 8 Uhr	$4^{30} \leq t < 8^{30}$	1. Morgen
8 bis 12 Uhr	$8^{30} \leq t < 12^{30}$	2. Vormittag
12 bis 15 Uhr	$12^{30} \leq t < 15^{30}$	3. Mittag
15 bis 18 Uhr	$15^{30} \leq t < 18^{30}$	4. Nachmittag
18 bis 23 Uhr	$18^{30} \leq t < 23^{30}$	5. Abend

²¹ Siehe z.B. Kockelkorn, 1995, S. 42.

²² Vgl. auch Steisslinger, 1994, hier Kap. 3.4.3.3.

6.1.3 Die Korrelationen zum Reservoirschichtparameter

Werden die Ozonimmissionen an den verschiedenen Stationen über die Ozonkonzentrationen der Frohnauer Höhenmeßstation geplottet, sind die Korrelationen für alle Standorte am ausgeprägtesten, wenn die Immissionsbelastung mittags zwischen zwölf und fünfzehn Uhr dem Ersatzparameter für die Reservoirschichtung in den frühen Morgenstunden von vier bis acht Uhr gegenübergestellt wird.²³ Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen für Berliner Meßpunkte.

Besonders gut korreliert sind mit Korrelationskoeffizienten über 0,75 die Werte der Stationen Potsdam-Hermannswerder, Prenzlau, Angermünde und Wittenberge.²⁴ Auch die Stationen Königs Wusterhausen, Eisenhüttenstadt, Neuglobsow und Premnitz lassen optisch eine Abhängigkeit erkennen. Ihr Korrelationskoeffizient ist noch größer als 0,73.²⁵

Die Kenngrößen für Doberlug, Wiesenburg und Lindenberg korrelieren dagegen kaum. Die Korrelationskoeffizienten liegen weit unter 0,65. Kyritz und Burg weisen ebenfalls Korrelationen unter 0,7 auf.

²³ Gleiches gilt für die folgenden Fragestellungen mit Zusatzbedingungen.

²⁴ Zur Abgrenzung der Korrelationsgüte (für den Betrag des Korrelationskoeffizienten) -

gute Korrelation: > 0,75;
Übergangsbereich: 0,65 - 0,75;
keine bis geringe Korrelation: < 0,65;

- vgl. Fn. 8.

²⁵ Die berechneten Korrelationskoeffizienten stimmen recht gut mit graphisch abgeschätzten Werten nach Kockelkorn, 1995, Kap. 1.4.4, einer Faustregel zur Abschätzung des Korrelationskoeffizienten aus dem Streubereich der Meßwerte überein.

Da in diesem Kapitel echte Punktwolken ermittelt werden, ist damit ein direkter Zusammenhang zwischen Korrelation und Streuung gegeben.

Abbildung 6-1: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter für die Jahre 1993 bis 1995 an der Station Eisenhüttenstadt

Abbildung 6-2: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter für die Jahre 1993 bis 1995 an der Station Neuglobsow

Die Korrelationsgeraden haben an allen Stationen eine Steigung um 1,3; das heißt, die Konzentrationen an den Immissionsorten liegen leicht über den in der Höhe bei Berlin gemessenen Ozonwerten. Zwei Beispiele sind den Abbildungen 6-1 und 6-2 zu entnehmen.

Zur Auswertung dieser Ergebnisse wird die Rangmatrix der Stationscharakteristika herangezogen.

Die beiden Stationen in unmittelbarer Nähe Berlins Königs Wusterhausen und Potsdam-Hermannswerder weisen sehr hohe Korrelationskoeffizienten auf. Aber auch für die Stationen Prenzlau, Angermünde und Wittenberge, die alle in einer Halbkugel nördlich Berlins gelegen sind, korrelierten die Meßreihen sehr gut.

Umgekehrt liegen die drei sehr schlecht korrelierten Meßpunkte Doberlug-Kirchhain, Wiesenburg und Lindenberg südlich. Für die beiden erstgenannten Orte kann eine entsprechende Beeinflussung durch den Industriegroßraum Halle / Leipzig und für Lindenberg ein Einfluß von Eisenhüttenstadt angenommen werden, die den Korrelationseinbruch erklären könnten. „Ausreißer“ fallen überwiegend in den Bereich erhöhter Ozonkonzentrationen über Berlin-Frohnau bei durchschnittlicher Immissionsbelastung am jeweiligen Meßort, d.h. die Einflüsse des zweiten Stadtbereichs begünstigen anscheinend den Ozonabbau. Daß die Rolle Berlins gänzlich überlagert wird, ist unwahrscheinlich, da die Plots insgesamt eine sehr ähnliche Struktur aufweisen.

Weiterhin fällt auf, daß es sich bei den Meßpunkten Potsdam-Hermannswerder, Prenzlau, Angermünde, Wittenberge und Königswusterhausen mit sehr guter Korrelation um Standorte mit eigenem Emittentenfeld handelt, während die drei Stationen Doberlug-Kirchhain, Wiesenburg und Lindenberg, für die geringe Korrelationen beobachtet werden, in eher unbelasteten Gebieten liegen.

Die Meßstationen Eisenhüttenstadt, Neuglobsow, Premnitz, Burg und Kyritz, deren Korrelationskoeffizienten in den Übergangsbereich eingruppiert werden, lassen bei dieser Betrachtung keine Gemeinsamkeiten erkennen.

Um hierzu genauere Informationen zu erhalten, werden in die Betrachtung weitere meteorologischen Parameter aufgenommen.

6.1.4 Die jahreszeitlichen Abhängigkeiten

Die Ozonkonzentration unterliegt im Jahresgang ähnlichen Schwankungen wie der Temperaturverlauf sowie die Strahlungsintensität. Advektion spielt erst bei höheren Konzentrationen eine Rolle, auch wenn Verdünnungseffekte innerhalb der Reservoirschicht nur begrenzt auftreten. Um dies zu zeigen, werden die Ozonwerte in der Höhe monatsweise gegen die Meßwerte der verschiedenen Stationen geplottet. Die Abbildungen 6-3 und 6-4 zeigen typische Diagramme.

Tatsächlich läßt sich für die Monate April, Mai und September - wenn hohe Ozonpeaks seltener auftreten - ein Zusammenhang jeweils kaum feststellen; nur im April korrelieren noch die Werte der Meßstationen Neuglobsow, Wittenberge und Potsdam-Hermannswerder. Fünf Stationen fallen dagegen in die Rubrik „nicht korreliert“, im Mai sind dies zwölf, im September elf.

In den Sommermonaten sind dagegen höhere und häufigere Korrelationen zu beobachten, so im Juni an den vier Stationen Potsdam-Hermannswerder, Wiesenburg, Prenzlau und Premnitz gegenüber fünf Ausprägungen mit geringer linearer Abhängigkeit von Doberlug-Kirchhain, Neuglobsow, Königs Wusterhausen, Burg und Kyritz, im Juli ist das Verhältnis drei zu zwei. Zusätzlich können in diesen Monaten einige Plots optisch als korreliert eingestuft werden. Im August zeigt sich an allen Meßorten Korrelation, davon an zwölf eine sehr gute.

Allerdings muß man berücksichtigen, daß die Höhenmeßdaten der Monate Juni bis September 1993 fehlen. Die Jahre 1994 und 1995 unterscheiden sich jedoch stark voneinander - so treten 1994 sogar Korrelationskoeffizienten über 0,9 auf, während der Wert z.B. im Juli 1995 nur für Potsdam-Hermannswerder 0,75 überschreitet. Deshalb können an dieser Stelle genauere Aussagen über den Jahresgang nicht getroffen, für weiterführende Betrachtungen muß ein größerer Stichprobenumfang herangezogen werden.²⁶

²⁶ Um für einen Ort bzw. eine Region charakteristische Klimafaktoren - in Abgrenzung zu kurzfristigem Wettergeschehen - zu bestimmen, sollte nach Georgii, 1978, die Mittelung von Elementen mit großer Varianz mindestens 30 Jahre umfassen.

Abbildung 6-3: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter an der Station Eisenhüttenstadt

***: Monate a) August und b) September der Jahre 1993 bis 1995**

o : gesamte Sommerhalbjahre 1993 bis 1995

Abbildung 6-4: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter an der Station Neuglobsow

***: Monate a) August und b) September der Jahre 1993 bis 1995**

o : gesamte Sommerhalbjahre 1993 bis 1995

6.1.5 Die Abhängigkeiten von der Windgeschwindigkeit

Gerichteter Transport von Molekülen im Luftstrom überwiegt gegenüber der turbulenten Diffusion erst bei höheren Windgeschwindigkeiten ab ca. 2 m/s.²⁷

Führt man diesen Richtwert als zusätzliches Auswahlkriterium in die Untersuchung ein, wird der Stichprobenumfang z.T. erheblich herabgesetzt. Um zumindest etwa fünfzig Ereignisse einfließen zu lassen, wird die Korrelationsbetrachtung außerdem für die 1,5 m/s -Grenze durchgeführt. Die Ergebnisse zu beiden Untersuchungskriterien sind in Anhang 5 dokumentiert.²⁸

Messungen der Windgeschwindigkeit liegen von den LUA-Stationen Potsdam-Hermannswerder, Königs Wusterhausen, Eisenhüttenstadt und Wittenberge sowie von der Meßstation Neuglobsow des UBA vor.

Die Plotserien zeigen für beide Mindestwindgeschwindigkeiten die gleiche Struktur: Die Ausprägungen höherer Windgeschwindigkeiten sind in der Gesamtrealisation weitgehend gleichmäßig im Streuungsgürtel verteilt. Nur im oberen Konzentrationsbereich und Spitzenwerte an den Immissionsorten wie auch in der Höhe sind seltener.

Gegenüber den Vorbetrachtungen ändern sich die Korrelationskoeffizienten für Königs Wusterhausen, Eisenhüttenstadt (dargestellt in Abbildung 6-5) und Wittenberge kaum; die Abweichung bezogen auf die Gesamtkorrelation ist kleiner als fünf Prozent.

Für Potsdam-Hermannswerder und Neuglobsow sind dagegen Schwankungen zu verzeichnen. An diesen Stationen wird der Stichprobenumfang deutlich eingeschränkt. Die Plots für Geschwindigkeiten größer 1,5 m/s enthalten weniger als 30 % der Daten; 2 m/s werden gerade noch von 10 % der Ereignisse überschritten. (Zum Vergleich: Fast 70 % der

²⁷ Die Literatur zeigt hierzu verschiedene Richtwerte auf. 2 m/s geben z.B. Lacaze, 1972, und BMU / StMLU (Hrsg.), 1991, an. Pan, 1997, stellt in diesem Geschwindigkeitsbereich außerdem eine übereinstimmende Windrichtung in Berlin und Brandenburg fest, nimmt aber als Grenze für gerichteten Transport 1,5 m/s an. TÜV Energie und Umwelt GmbH geht eher von höheren Werten aus, aber bezogen auf geringere Transporthöhen, die bebauungsbeeinflusst sind, d.h. noch abgebremst werden.

²⁸ Aus einem weiteren Grund müssen die Ausführungen durch einen zweiten Vergleichswert geprüft werden: Nach Moussiopoulos, 1989, Kap. 9.3, sind Boxmodelle, die Schadstoffkonzentrationen über die gesamte Höhe der Mischungsschicht annehmen, nur für nicht allzu hohe Windgeschwindigkeiten anzuwenden.

Meßwerte von Königs Wusterhausen und Eisenhüttenstadt liegen über 1,5 m/s bzw. zwischen 40 und 50 % über 2 m/s.)

Dadurch weist einerseits Potsdam-Hermannswerder einen deutlich geringeren Streubereich auf, was zu wesentlich verbesserten Regressionen führt.

Andererseits zeigt der Plot der Neuglobsower Daten über 2 m/s (Abbildung 6-6) gegenüber den anderen Stationen einen wesentlich eingeschränkten Wertebereich. Nur noch sieben Ausprägungen von ursprünglich etwa jeder dritten liegen oberhalb $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dadurch verringert sich der Korrelationskoeffizient an der UBA-Meßstation erheblich.

Insgesamt sind die untersuchten Windgeschwindigkeits-Kriterien aufgrund dieser Beobachtungen nicht zur Beschreibung der Transmissionsvorgänge in der räumlichen Struktur Brandenburger Ozonmeßdaten geeignet. Höhere Windgeschwindigkeiten begünstigen zwar den gerichteten Transport; unter diesen Umständen kann aber die Ausbildung der modellierten Reservoirschicht behindert werden, weil Wind gleichzeitig den Wärmeaustausch in Bodennähe sowie zwischen den Luftschichten fördert.²⁹

²⁹ Steisslinger, 1994, prüft als zusätzliche Bedingung zur Annahme einer nächtlichen Reservoirschicht Temperaturdaten der jeweils vorhergehenden und folgenden Nacht. Damit kann im Tagesverlauf eine relativ unveränderte Wetterlage angenommen werden. Andere meteorologische Einflußgrößen beschreibt er in seiner Arbeit nicht. In weiterführenden Betrachtungen könnte untersucht werden, ob in die von ihm beobachteten Korrelationen nur (quasi) windstille Tage - als latente Variable - eingehen. Dies würde bedeuten, daß Steisslingers (leider nur qualitativ beschriebenen) Auswahlkriterium mit niedrigen Windgeschwindigkeiten korreliert.

Im Rahmen dieser Studienarbeit wird jedoch weiterhin das Reservoirschichtmodell in Anlehnung an Lichtenvort, 1997, verwendet, da insbesondere im Hinblick auf die Einbindung weiterer Einflußgrößen der Stichprobenumfang nicht weiter eingeschränkt werden kann.

Abbildung 6-5: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter für die Jahre 1993 bis 1995 an der Station Eisenhüttenstadt

***: Windgeschwindigkeiten über 2 m/s**
o : alle Windverhältnisse

Abbildung 6-6: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter für die Jahre 1993 bis 1995 an der Station Neuglobsow

***: Windgeschwindigkeiten über 2 m/s**
o : alle Windverhältnisse

6.1.6 Die Abhängigkeiten von der Windrichtung

Insbesondere wenn gerichtete Transportvorgänge dominieren, spielt die vorherrschende Windrichtung für den advektiven Anteil der Immissionsbelastung eine große Rolle. Der Emittentengroßraum Berlin ist nur dann als eine die Ozonentwicklung eines Tages maßgeblich bestimmende Komponente zu erwarten, wenn der Wind, von Berlin ausgehend, im relevanten Zeitbereich vorwiegend zum Immissionsort hin weht.

Zur Bestimmung der vorherrschenden Windrichtung schlägt die VDI 3786 Blatt 2 verschiedene Verfahren vor. Als Kennwert für maximal 24 Stunden kommen die häufigste Windrichtung, ermittelt als 30^o-Sektor, oder das arithmetische Mittel in Frage. Bei Schwankungen der Windrichtung um 100^o und mehr sollten Gewichtungsfaktoren in Erwägung gezogen werden.

Die mathematischen Mittelwerte erscheinen gegenüber den statistisch ermittelten Kennwerten nachteilig, weil die resultierende Windrichtung nicht unbedingt die tatsächlich dominierende ist, sondern auch ein zur Repräsentation der Verhältnisse ungeeigneter Rechenwert sein kann.³⁰

Jede in Berlin-Grünwald gemessene Windrichtung wird daher zunächst einem Sektor zugewiesen. Der Windbereich, in den die meisten Realisationen eines Tages fallen, wird als repräsentative Windrichtung dieses Tages angesehen.³¹

Anschließend wird eine Reservoirschichtbetrachtung, wie oben beschrieben, durchgeführt. An dieser Stelle werden jedoch nur noch die Wertepaare von Zeiträumen berücksichtigt, in

³⁰ Vgl. dazu Kockelkorn, 1995, Lage-Parameter - Modus, Median und arithmetisches Mittel - sowie Anmerkungen zu mehrgipfligen Verteilungen.

Stichprobenartig ausgewählte Tagesverläufe der Windrichtungen, Häufigkeitsverteilungen der verwendeten Werte und Windrosenbetrachtungen von Pan, 1997, anhand derselben Quelldaten lassen vermuten, daß das arithmetische Mittel im vorliegenden Fall zu Fehleinschätzungen führen kann.

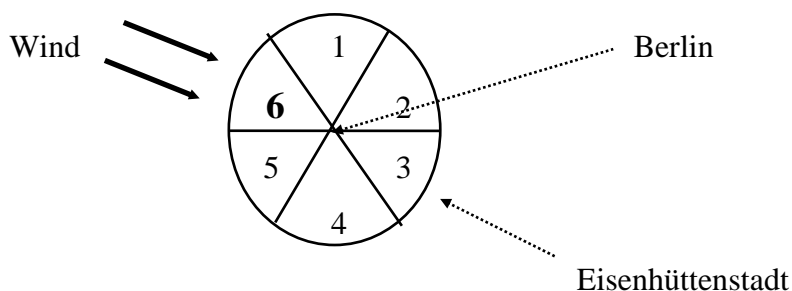
³¹ Für den Transportvorgang sind nur die Windrichtungsmessungen zeitlich vor den Immissionsmessungen relevant. Die abendlichen Meßwerte kommen deshalb nicht in Betracht. Allerdings reicht es auch nicht aus, nur eine wenige Tageszeiten einzubeziehen, weil dann der Modus (d.h. die häufigste Ausprägung) nicht mehr definiert ist.

Probeweise werden die Untersuchungen z.T. auf wenige Stunden begrenzt. In diesen Fällen wird die Windrichtung als arithmetisches Mittel bestimmt.

Soweit an den Immissionsorten auch Winddaten registriert werden, zeigen Stichproben keine systematischen Unterschiede in den Ergebnissen. Vgl. dazu auch Pan, 1997.

denen eine Windrichtung aus dem Kreissegment mit Zentrum Berlin vorherrscht, welches der Verbindungsachse Berlin - Meßort gegenüberliegt.

Dieses Vorgehen bedingt einen direkten Zusammenhang zwischen der Sektorenbreite und dem Stichprobenumfang der Auswahl. Da bei einer Einteilung in 30° -Sektoren nach VDI 3786 Blatt 2, Klassen Nummern eins bis zwölf, z.T. weniger als zehn Realisationen vorliegen, werden außerdem 60° umfassende Kreissegmente geprüft.³² Dadurch werden nur noch an sechs Stationen unter fünfzig, aber wenigstens zweiundzwanzig Ausprägungen beobachtet. Die Ergebnisse sind in Anhang 5 zusammengefaßt.



An den Stationen Königs Wusterhausen, Potsdam-Hermannswerder und Wittenberge sind die Korrelationen sehr gut und im Vergleich zur Gesamtverteilung noch erhöht.

Der nächsthöchste Korrelationskoeffizient ergibt sich aus den Premnitzer Daten, aber ohne eine Verbesserung durch die Windrichtungseinschränkung im 60° -Sektor. Dies hängt jedoch wahrscheinlich mit der Definition der Sektoren zusammen, da Premnitz im Randbereich liegt. In den 30° -Sektor fällt Premnitz zwar mittig; diese Plotreihen scheinen aber insgesamt nicht übertragbar, da die Stichproben hier für eine repräsentative Auswahl zu klein sind: Für die Meßreihen mit besonders wenigen entsprechenden Fällen werden so entweder sehr niedrige oder sehr große Korrelationskoeffizienten berechnet. Bei Bedarf ist weiterführenden Arbeiten zu empfehlen, die Sektoren jeweils überlappend festzulegen oder spezifisch an jede einzelne Meßstation anzupassen.

Ähnlich sieht der Plot für Kyritz aus, der eine deutliche lineare Abhängigkeit bei nicht ganz so guter Ausgangskorrelation zeigt.

Diese fünf Stationen mit den höchsten Korrelationen fallen in die Sektoren vier bis sechs, d.h. in die südwestliche Halbkugel über Berlin, für die nordöstliche Windrichtungen ausgewählt werden.

Auch Lindenberg erreicht einen Korrelationskoeffizienten von 0,7, während die Gesamtdaten dieser Meßstation kaum Korrelation zeigen. Damit weist die Meßstelle mit den meisten Realisationen eine Charakteristik auf wie Kyritz, die Station mit dem drittgrößten Stichprobenumfang.

An allen anderen Meßorten sinkt die Regressionsgüte.

Angermünde, Eisenhüttenstadt, Prenzlau, Burg und Neuglobsow, die sich in der Gesamtbetrachtung durch gute bis sehr gute Korrelationen auszeichnen, verhalten sich auch hier sehr ähnlich. Sie sind geographisch nördlich bzw. südöstlich von Berlin zu finden. Die Abbildungen 6-7 und 6-8 zeigen dies für die emittentenbeeinflusste Station Eisenhüttenstadt und den ländlichen Meßstandort Neuglobsow.

Wiesenburg und Doberlug-Kirchhain zeigen schon in der Vorbetrachtung kaum Korrelation. Ein Einfluß des Gebietes um Halle und Leipzig ist anzunehmen. Besonders für Doberlug-Kirchhain fällt die Korrelation auf 0,25 ab.

Dieses Ergebnis ist ein wichtiger Hinweis, daß das Land Brandenburg aufgrund der räumlichen Struktur seiner Ozonmeßdaten in mindestens zwei Regionen untergliedert werden muß: Die Ozonentwicklung im nördlichen Teil des Landes wird wesentlich durch Ozonbelastungen über dem Berliner Stadtgebiet beeinflusst. Dagegen nimmt dieser Einfluß auf Meßreihen von südlicher gelegenen Stationen deutlich ab oder wird überlagert durch Kombinationseffekte regionaler (aus südwestlichen Industrie- und Stadtgebieten Halle, Leipzig und evtl. Dresden) oder lokaler Bedeutung (für Doberlug-Kirchhain).

³² Die Bereichsgrenzen sind in Kap. 2.2 festgelegt.

Abbildung 6-7: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter für die Jahre 1993 bis 1995 an der Station Eisenhüttenstadt
*: 60⁰ - Windrichtungssektor 6
o : alle Windverhältnisse

Abbildung 6-8: Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Reservoirschichtparameter für die Jahre 1993 bis 1995 an der Station Neuglobsow
*: 60⁰ - Windrichtungssektor 4
o : alle Windverhältnisse

6.1.7 Die Vergleichbarkeit mit dem Berliner Modell

Lichtenvort, 1997, versucht, ein Modell zur Prognose von Grenzwertüberschreitungen zu entwickeln. Im Hinblick auf diese Fragestellung interessieren vor allem Maximalkonzentrationen. Da diese stets in den Tagstunden auftreten, reicht außerdem die Betrachtung des Intervalls 10 bis 21 Uhr aus.

Ziel dieser Studienarbeit ist dagegen, allgemeine räumliche Strukturen zu analysieren. Um die nächtlichen Reservoirschicht durch einen für den Verlauf der Halbstundenmeßwerte möglichst repräsentativen Parameter zu beschreiben, soll nicht ein einzelner Meßwert ausgewählt werden, sondern alle Messungen eines Tages eingehen. Hierzu wird jeweils der Mittelwert im Bezugszeitraum gebildet.

Um Aussagen aus Lichtenvorts Arbeit zur Analyse von Brandenburger Ozonmeßdaten vergleichend heranziehen zu können, werden in Voruntersuchungen Korrelationskoeffizienten für die Brandenburger Meßreihen nach den beiden beschriebenen Methoden - Mittelwert bzw. Maximum - sowie für verschiedene Zeiträume ermittelt. Beide Ansätze zur Charakterisierung der Reservoirschicht zeigen einen hohen Einfluß auf die Ausprägungen der Ozonkonzentrationen an den betrachteten Stationen auf.³³ Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten unterscheiden sich höchstens in der zweiten Nachkommastelle.

6.2 Lokale Effekte

6.2.1 Die Globalstrahlung

Ozonbildungs-, z.T. aber auch -abbauprozesse benötigen zur Radikalbildung energiereiches Sonnenlicht.³⁴ Das sich einstellende Konzentrationsgleichgewicht hängt

³³ Je nach Intention bilden andere Autoren Parameter für Inversionseinflüsse auf unterschiedliche Weise. Steisslinger, 1994, betrachtet z.B. die Nachtstunden des vorhergehenden und des folgenden Tages, um so ganztägige Inversionswetterlagen zu erfassen. Dieses Vorgehen ist für Prognosezwecke nicht möglich und beschränkt sich außerdem zu sehr auf Extremwerte, ohne daß auf „mittlere“ Belastungsfälle rückgeschlossen werden kann.

Zudem beruht diese Darstellung, hier Kap. 6, auf Neunstundenmitteln. Über diesen Mittelungszeitraum gehen Informationen über kurzzeitige Spitzenkonzentrationen m.E. jedoch fast vollständig verloren.

³⁴ Vgl. z.B. Israel, 1993; Steisslinger, 1994.

daher von der am Reaktionsort verfügbaren Globalstrahlung ab, d.h. Absorptionsverluste bei Bewölkung und ähnliches müssen berücksichtigt werden. Als Parameter für diese Globalstrahlung ist die Differenz zwischen Temperaturmaximum und -minimum eines Tages geeignet.

Tatsächlich ist dieser Parameter am Immissionsort mit den vormittag- bzw. mittäglichen³⁵ Ozonkonzentrationen korreliert. An allen Stationen, für die Temperaturmeßergebnisse vorliegen, das sind Königs Wusterhausen, Potsdam-Hermannswerder, Eisenhüttenstadt, Neuglobsow und Wittenberge, kann ein Korrelationskoeffizient über 0,7 ermittelt werden, und zwar für die Vormittagsstunden ein geringfügig - um maximal 3 % - höherer Wert.

Allerdings ist der Parameter nicht für die gesamte Region gültig. So zeigen die in Berlin-Grünwald gemessenen Werte nur für die in der Nähe liegenden Meßorte Königs Wusterhausen und Potsdam-Hermannswerder diese Abhängigkeit. Für andere Stationen sinkt der Korrelationskoeffizient bis unter 0,5.

6.2.2 Der gemessene Temperaturverlauf

Temperaturschwankungen können chemische Reaktionen katalysieren und Gleichgewichtseinstellungen verschieben, indem sie Gasdrücke verändern. Bezüglich der Ozonkonzentrationen bedeutet dies, daß die Lufttemperatur Luftströmungen induziert, aber auch Auskunft über Ozonbildungsprozesse geben kann, da Temperatur und Sonneneinstrahlung abhängige Größen sind.

Im Tagesgang verhalten sich die Ozonkonzentrationen quasi analog zu den Temperaturschwankungen. Durch die Erwärmung des Erdbodens am Vormittag entstehen Turbulenzen, die Ozon aus der Reservoirschicht heruntermischen. Außerdem wirkt sich die Sonneneinstrahlung auf die Ozonbildung aus, die in der zweiten Tageshälfte dominiert.³⁶

Das Zusammenspiel dieser beiden Effekte führt zu einem breiten Streubereich im Temperatur-Ozon-Diagramm. Die Korrelationskoeffizienten der Stationen, für die am

³⁵ Zur Abgrenzung der Tageszeiten siehe Tabelle 6-1.

³⁶ Vgl. BUWAL, 1996 a, hier Kap. 3, sowie BUWAL, 1996 b.

Immissionsort Temperaturdaten erfaßt werden, liegen zwischen 0,65 und 0,7. Wird stattdessen die Berliner Temperaturmeßreihe zur Hilfe genommen, sinkt der Wert bis 0,5. Lineare Regression ist nicht mehr sinnvoll, da sich eine Regressionsgerade nicht eindeutig festlegen läßt, d.h. die statistisch ermittelte Regressionskoeffizienten stimmen nicht in jedem Fall mit dem optischen Eindruck überein.

Eine Temperaturänderung wirkt sich recht schnell aus. Wird die Temperaturmeßreihe einer Station gegen die um jeweils 30 min später gemessenen Ozonkonzentrationen geplottet, zeigt sich, daß schon der nachfolgende Halbstunden-Ozonwert schlechter mit den Temperaturdaten korreliert.

Die Vorläuferverbindungen zeigen erwartungsgemäß keine Temperaturabhängigkeiten. Temperatur-Stickstoff-Korrelationskoeffizienten sind quasi null.

6.2.3 Das Temperaturmaximum

Für Prognosezwecke führt Lichtenvort, 1997, das Temperaturmaximum des Vortages ein. Dieser Parameter erreicht für keine der untersuchten Meßstationen mit den mittäglichen Ozondaten (Zeiteinteilung siehe Tabelle 6-1) einen Korrelationskoeffizienten von 0,6.

Die Idee, Informationen über die Wetterlage des Vortages in die Analyse von Ozonmeßdaten einzubringen, könnte zur Unterscheidung der in verschiedenen Tageszeiten jeweils dominierenden Einflußgrößen auf die Ozonkonzentrationen beitragen. Für den Versuch, die oben beschriebenen Effekte der Advektion und Transmission zeitlich abzugrenzen, ist diese Darstellung nicht geeignet. Die Trennung in Zeitbereiche ergibt gegenüber den Gesamtdaten eine deutlich erhöhte Korrelation. Die deutliche Abgrenzung der Vormittagsstunden, die nach BUWAL, 1996 a, durch die in nächtlichen Reservoirschichten gesammelten Schadstoffbelastungen beeinflusst werden sollen, kann damit jedoch nicht bestätigt werden.³⁷

³⁷ Der Ergebnisbericht des BUWAL, 1996 a, hier Kap. 3 und 8, geht leider nicht auf die exakte Durchführung der Studien ein. Obgleich die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit die Heruntermischung aus der Reservoirschicht eher später ansiedeln, und zwar in den Mittagsstunden, sind zur Widerlegung der These für die Brandenburger Verhältnisse weiterführende Untersuchungen notwendig. Insbesondere die angegebenen Verhältnisse von Stickstoff- und flüchtigen organischen Verbindungen als Ozonbildungsparameter werden hier nicht überprüft.

Das Tagesmaximum der Temperatur am gleichen Tag zeigt eine geringfügig bessere Korrelation als das Vortagesmaximum. Allerdings ist dieser Wert für Prognosefragen nicht verfügbar.

6.3 Ergebnisse der Analyse der Meteorologie

In nächtlichen Reservoirschichten, die sich infolge des Tagesgangs der Temperatur über Stadtgebieten ausbilden, sammeln sich Schadstoffkonzentrationen, die während des folgenden Tages durch abwärtsgerichtete Strömungen wieder in bodennahe Luftschichten transportiert werden.

Das Reservoirschichtmodell ist grundsätzlich auch für die Brandenburger Ozonmeßdaten geeignet, diesen Zusammenhang zwischen nächtlichen Höhenmeßwerten, erfaßt in 324 m Höhe in Berlin-Frohnau, und den bodennahen Ozonkonzentrationen an den Brandenburger Meßstationen aufzuzeigen.

Damit zeigt sich, daß der in der Literatur beschriebene Einfluß von Großstädten auf die Ozonkonzentrationen in ihrem Umland auch für die geographischen Bedingungen in Brandenburg ein wesentlicher Parameter zur Analyse der räumlichen Struktur von Ozonverteilungen ist.

Die gemessenen Korrelationskoeffizienten belegen in Verbindung mit dem anhand der Diagramme visuell erfaßten linearen Regressionen eine deutliche Abhängigkeit, obwohl sich bei der Betrachtung einzelner Monate Schwankungen der Regressionsgüte ergeben.

Besonders hohe Korrelationen mit den Höhendaten weisen die Ozonmeßdaten der am Rande Berlins gelegenen Brandenburger Meßstationen Königs Wusterhausen und Potsdam sowie die der nördlichen Meßorte auf.

Diese Charakteristik der nördlichen Stationen zeigt sich noch deutlicher, wenn in die Untersuchung nur Tage mit vorherrschender Windrichtung von Berlin zum Immissionsort im 60° - Sektor eingehen.

Eine Einschränkung der Daten bezüglich verschiedener Windstärken begünstigt die Analyse dagegen nicht.

Der Einfluß der Berliner Höhendaten auf die südlichen Stationen ist grundsätzlich geringer. Dies ist sehr wahrscheinlich auf überlagerte Transmissionen aus den Industrie- und Stadtgebieten Halle, Leipzig und evtl. Dresden zurückzuführen, die den Immissionsmeßorten zum Teil näher liegen als Berlin.

Temperatur- und Strahlungseinflüsse auf den Tagesgang von Ozonimmissionen sind dagegen lokal sehr unterschiedlich. Für solche Betrachtungen ergeben sich große Fehler, wenn die örtlichen meteorologischen Meßdaten durch Meßreihen zentraler Stationen wie Berlin-Grunewald ersetzt werden.

Zur Analyse der räumlichen Struktur von Brandenburger Ozonmeßdaten tragen diese letztgenannten Untersuchungen deshalb kaum bei, weil meteorologische Parameter nur an wenigen Luftgüte-Meßstationen erfaßt werden. Insbesondere im Nordosten, im Süden und im Westen des Landes sind die nächsten meteorologischen Meßstandorte weiter entfernt.

7 Interstationäre Zusammenhänge der Brandenburger Ozonmeßdaten

7.1 Paarweise Korrelationen der Brandenburger Ozonmeßdaten

Die vorangegangenen Kapitel beschreiben Faktoren, die die Ozonkonzentrationen an den Meßpunkten bestimmen. Großstädte haben einen weiträumigen Einfluß auf ihre Umgebung. Dennoch reicht die geographische Lage zur Charakterisierung eines Immissionsortes nicht aus. Eine Interpolation für Standorte zwischen den Meßstationen ist nicht möglich.

Abbildung 7-1 stellt die Ozonmittelwerte im Untersuchungsgebiet, unterteilt in Planquadrate mit einer Seitenlänge von zehn Kilometern, dar. Werden die Ozonmeßreihen außerdem jeweils paarweise gegenübergestellt und hierzu die geographische Lage der Meßstationen in Verbindung gebracht, wird deutlich, wie sehr sich der Ozonhaushalt selbst nahe beieinanderliegender Meßorte unterscheiden kann, sich aber umgekehrt auch Stationen mit ähnlicher Emissionsstruktur gänzlich anders verhalten. (Nicht direkt vergleichbar sind die Werte der Berliner Höhenmeßstation; sie dienen hier der räumlichen Orientierung.)

Unter den dreizehn ausgewählten Meßorten finden sich fünfundzwanzig Paarungen, die einen Korrelationskoeffizienten über 0,8 ergeben. Alle diese Paare, zusammengefaßt in Anhang 6, liegen weniger als 150 Kilometer auseinander.

In absteigender Reihenfolge nach der Regressionsgüte sortiert, tritt erst an vierzehnter Stelle eine Kombination von Immissionsorten auf, die völlig verschieden charakterisiert werden (vgl. Rangmatrix der Stationscharakteristika): die Kombination aus Eisenhüttenstadt und Burg, zwei Stationen, die etwa fünfzig Kilometer voneinander entfernt sind. Die höher korrelierten Paarungen bestehen jeweils aus einem Meßpunkt und seinen nächstliegenden Standorten.

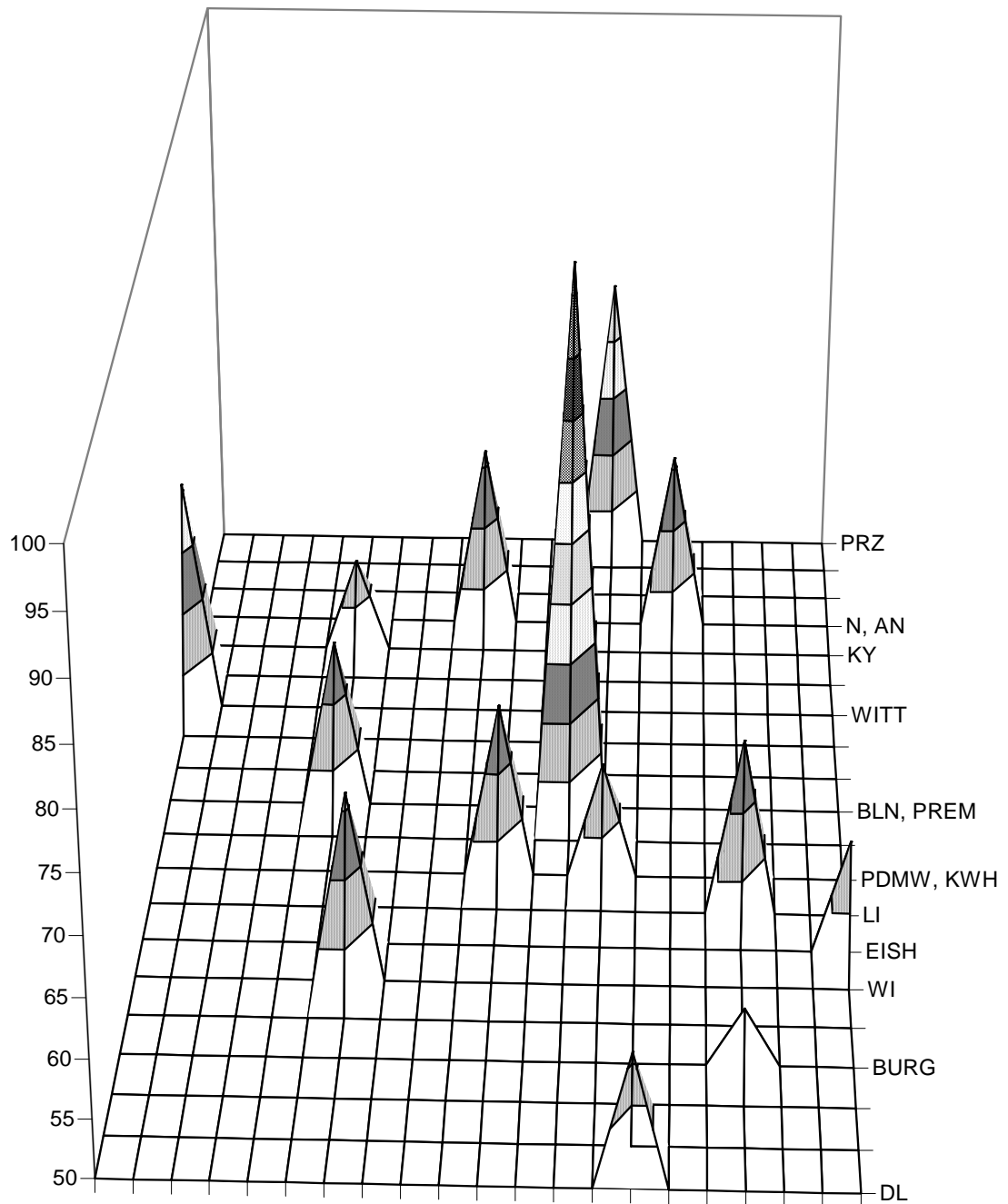


Abbildung 7-1: Mittlere Ozonkonzentrationen über ihrer geographischen Lage

Für die südlichen Stationen Doberlug-Kirchhain, Wiesenburg und Lindenberg ergeben sich dabei keine Paarungen. Dies kann auf unterschiedlich ausgeprägte Einflüsse südlicher Industriestandorte zurückzuführen sein. Entsprechendes kann für Burg gelten, für das nur zwei Meßreihen anderer Standpunkte mit linear korrelierten Ozonverteilungen vorliegen.

Auffällig ist, daß vor allem an den emittentenbeeinflußten Stationen Eisenhüttenstadt, Königs Wusterhausen, Wittenberge, Prenzlau, Premnitz, Kyritz und Potsdam-Hermannswerder gut miteinander korrelierende Ozonreihen gemessen wurden, obwohl hier eine lokale Schadstoffstruktur erwartet werden könnte. Da industrielle Produktionszeiten sowie Emissionen aus Verkehr und Haushalten für alle Meßorte ähnlich sind, das heißt zum Beispiel bedingt durch Feiertage, kann gerade für diese Stationen mit höherer Luftbelastung ein weitgehend übereinstimmender Verlauf der Ozonkonzentrationen ermittelt werden.

Werden die paarweisen Korrelationen über die Entfernung der beiden Standorte geplottet, wie in Abbildung 7-2 geschehen, zeigt sich für diese emittentenbeeinflußten Meßorte ein linearer Verlauf. Hierbei wird ein Korrelationskoeffizient von $-0,84$ ermittelt.

Dabei weisen die Daten von Eisenhüttenstadt tendenziell geringfügig niedrigere Korrelationen mit den anderen Meßreihen auf. Als Ursache ist eine besondere Charakteristik der Verkehrsemissionen an der deutsch-polnischen Grenze denkbar.

Für die Korrelationen aus den Paarungen der ländlichen Meßstationen Neuglobsow, Burg, Doberlug-Kirchhain, Wiesenburg, Lindenberg und Angermünde ist die Distanz zwischen den jeweiligen Standorten dagegen kein dominierendes Merkmal: Dies zeigt Abbildung 7-3 deutlich. Zwar ergeben sich auch hier zum Teil gute Korrelationen mit den Daten des nächstgelegenen Standortes. Es ist aber nicht gelungen, diese Abhängigkeiten zu prognostizieren. Deshalb kann angenommen werden, daß die Luftbelastung dieser Orte so gering ist, daß sie das Umfeld quasi nicht beeinflusst. Das heißt, die Stationen scheinen nicht geeignet, um den Ozonverlauf für beliebige Punkte durch Interpolation zwischen zwei Meßstandorten zu prognostizieren.

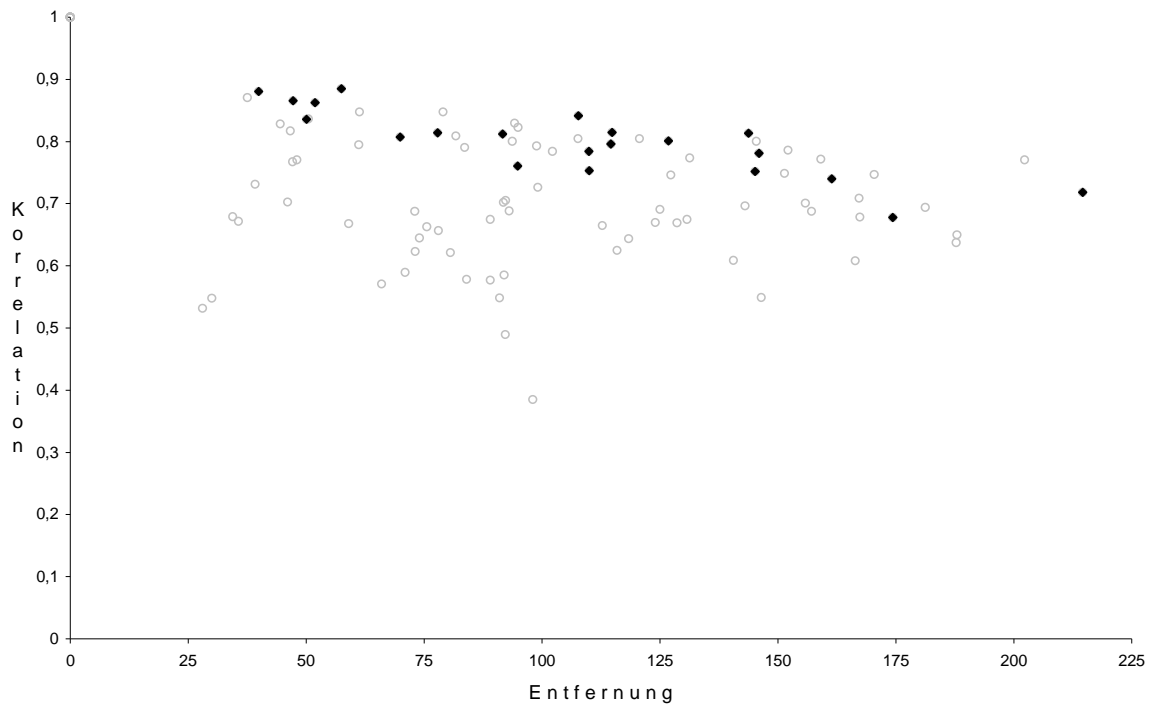


Abbildung 7-2: Paarweise Korrelationen der Ozonmeßreihen 1993 bis 1995 über der Entfernung zwischen den beiden Immissionsorten

◆ : Kombinationen emittentenbeeinflußter Stationen (EISH, KWH, WITT, PRZ, PREM, KY, PDMW)
○ : Grundgesamtheit aus allen paarweisen Kombinationen

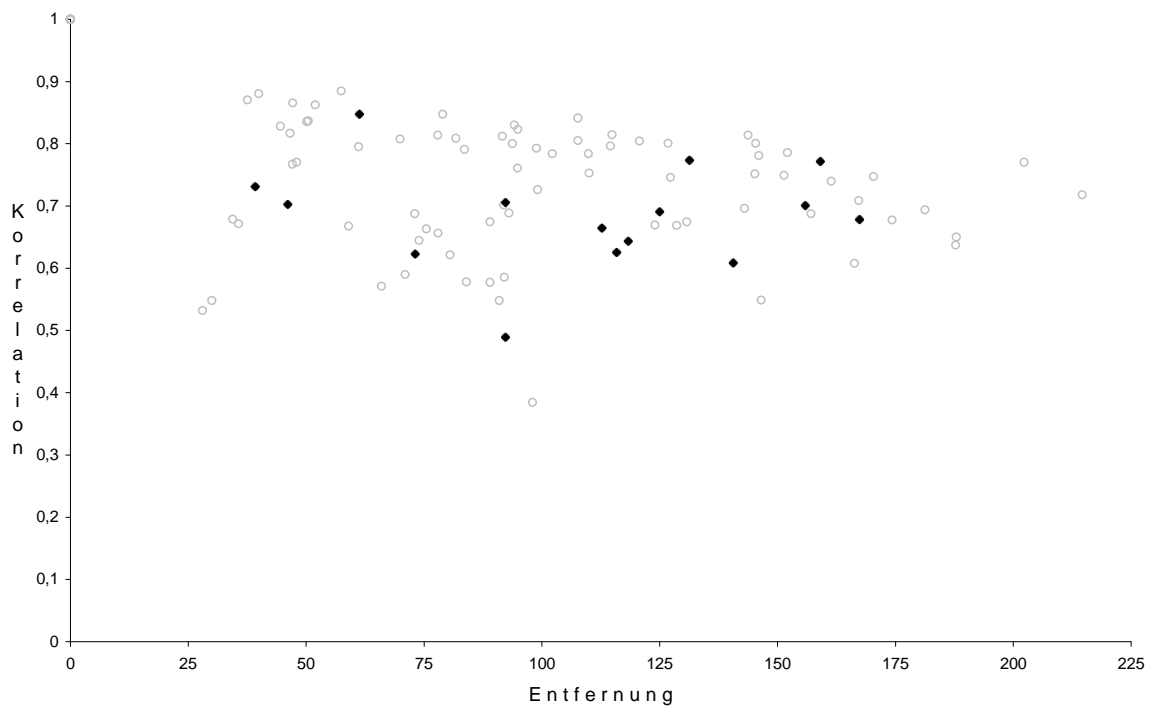


Abbildung 7-3: Paarweise Korrelationen der Ozonmeßreihen 1993 bis 1995 über der Entfernung zwischen den beiden Immissionsorten

◆ : Kombinationen ländlicher Stationen (N, BURG, DL, WI, LI, AN)
○ : Grundgesamtheit aus allen paarweisen Kombinationen

7.2 Ergebnisse der Analyse interstationärer Zusammenhänge

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß sich großflächige Effekte weniger in der absoluten Ozonkonzentration eines Immissionsortes äußern als in seiner Ozonverteilung.

Auch Standorte mit sehr verschiedenen Emissionskatastern zeigen hohe Korrelationen. Vor allem die nördlich Berlins aufgenommenen Ozonmeßreihen sind sehr ähnlich. Für das südliche Brandenburger Untersuchungsgebiet müßten zu Prognosezwecken Ozonmeßreihen der angrenzenden Bundesländer herangezogen werden, da hier eine starke Beeinflussung durch das Gebiet Halle - Leipzig - Dresden zu erwarten ist.

Besonders gut und über das gesamte Untersuchungsgebiet korrelieren die Ozonmeßreihen der emittentenbeeinflußten Stationen. Damit sind Interpolationsmodelle zumindest für Stadtgebiete grundsätzlich geeignet, so daß auch an solchen Standorten, an denen keine Meßstationen betrieben werden, die Ozonbelastung abgeschätzt werden kann.

8 Zusammenfassung

Vorliegende Arbeit untersucht die sommerlichen Ozonkonzentrationen der Jahre 1993 bis 1995 von dreizehn Brandenburger Meßstationen³⁸ vor allem hinsichtlich räumlicher Zusammenhänge.

Der Ozonhaushalt wird durch Reaktions- und Transportprozesse bestimmt. Aus diesem Grund beinhaltet die Analyse der räumlichen Struktur von Brandenburger Ozonmeßdaten neben der Untersuchung von Ozon-Zeitverläufen die Betrachtung des Stickstoffhaushalts, regionaler und örtlicher meteorologischer Einflußgrößen genauso wie interstationäre Regressionen der Ozondaten. Mittels partieller Korrelation werden folgende maßgebende Faktoren bestimmt:

Die Emissionssituation an einem Standort ist ausschlaggebend für die ermittelten Ozonmittelwerte. Neben der angesiedelten Industrie scheinen vor allem auch nahe Autobahnstrecken einen großen Einfluß auszuüben.

³⁸ vgl. Kap. 2.1.

Dabei stimmt die Gruppierung der Standorte nach Kapitel 2 nach quantifizierten Merkmalen mit statistisch bestimmten Gruppen überein. Eine solche Voraussagbarkeit der Charakteristik eines Immissionspunktes ist Voraussetzung für die spätere Entwicklung eines (flächendeckenden) Prognosemodells in weiterführenden Arbeiten.

Für Ozonregressionsmodelle eignet sich zur Charakterisierung des Stickstoffgleichgewichts die Summe aus Stickstoffdi- und -monoxid in logarithmischer Darstellung. Die Beschreibung von Reaktionsprozessen ist jedoch stets von Transportvorgängen überlagert, so daß hier Korrelationen um 0,6 bereits als hoch zu werten sind.

Meteorologische Effekte prägen sowohl die lokale Ozonbildung als auch Transportvorgänge. Während Strahlungsparameter nur von örtlicher Bedeutung sind, bestimmen Temperaturgradienten großflächig die Wetterlage, so daß sich Abhängigkeiten über mehrere hundert Kilometer hinweg einstellen können.

Diesen Zusammenhang beschreibt ein Reservoirschichtparameter, der in Anlehnung an die Untersuchungen des Fachgebietes Luftreinhaltung für das Berliner Stadtgebiet definiert ist. Der Ozonverlauf ist in der Region weitgehend einheitlich und durch Advektionsprozesse dominiert. Ein großer Zusammenhang mit den morgendlichen, über dem Berliner Stadtgebiet gemessenen Ozonwerten kann nachgewiesen werden. Nur im südlichen Untersuchungsgebiet weisen Meßreihen eine andere Struktur auf, die einen maßgeblichen Einfluß durch den Industriegroßraum Halle, Leipzig sowie das Stadtgebiet Dresden vermuten lassen.

Besonders die emittentenbeeinflussten Stationen weisen sehr hohe paarweise Korrelationen der Ozonmeßreihen über das gesamte Untersuchungsgebiet auf. Für ländliche Immissionspunkte ist dagegen fraglich, ob Interpolationen hinreichend genaue Aussagen erlauben. Insofern werden Berechnungsmodelle auch mittel- bis langfristig kaum eine Einschränkung des Meßaufwandes in diesem Bereich rechtfertigen können, wenn Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Ozonkonzentrationen getroffen werden sollen.

Literaturnachweis

Bailey, Trevor / Gatrell, Anthony: Interactive spatial data analysis. Harlow. Longman Group Limited, 1995.

Buchwald, Konrad / Engelhardt, Wolfgang (Hrsg.): Handbuch für Planung Gestaltung und Schutz der Umwelt. Band 2, Die Belastung der Umwelt. München. BLV, 1978.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.): Troposphärisches Ozon. Aktuelle Forschungsergebnisse und ihre Konsequenzen für die Luftreinhaltung. Schriftenreihe Umwelt: Luft Nr. 277. Bern. BUWAL, 1996 a.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.): Luftbelastung 1995. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Schriftenreihe Umwelt: Luft Nr. 267. Bern. BUWAL, 1996 b.

Bundesminister der Justiz (Hrsg.): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG. BGBl. I, 1995.

Bundesminister der Justiz (Hrsg.): Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Verordnung über Immissionswerte - 22. BImSchV. BGBl. I, 1994.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit / Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.): Ozon-Symposium in München 2. - 4. Juli 1991. Handbuch mit zusammenfassenden Berichten zum gleichnamigen Symposium. München. 1991.

Bunge, Achim / Schreiber, Wolfgang: SAS - Benutzerhandbuch. Berlin. Technische Universität Berlin, 1993.

Bürk, S.: Kleine Einführung in UNIX. 3. Auflage, Berlin. Technische Universität Berlin, 1993.

-
- Dreesmann, Johannes:* Statistik für Umwelttechniker. Ergänzungen zu Kockelkorn, 1995.
N.v. 1996.
- Georgii, Hans-Walter:* Grundzüge des Klimas und seine nutzungsbedingte Änderung. In:
Buchwald, Konrad / Engelhardt, Wolfgang (Hrsg.): Handbuch für Planung
Gestaltung und Schutz der Umwelt. Band 2, Die Belastung der Umwelt. München.
BLV, 1978.
- Gyr, Albert / Rys, Franz-S.:* Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric
Mesoscale Flow Fields. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- Haining, Robert:* Spatial data analysis in the social and environmental sciences.
Cambridge. University Press, 1990.
- Horbert, M.:* Einführung in die Ökologie I. Teilbereich: Bioklimatologie. Berlin.
Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie - Fachgebiet Bioklimatologie.
- Israël, Gerhard:* Skript zur Übung Luftreinhaltung. 5. Auflage, Berlin. Technische
Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz - Fachgebiet
Luftreinhaltung, 1994.
- Israël, Gerhard:* Skript zur Vorlesung Luftreinhaltung. 2. Auflage, Berlin. Technische
Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz - Fachgebiet
Luftreinhaltung, 1993.
- Kockelkorn, U.:* Einführung in die Statistik. 5. Auflage, Berlin. Technische Universität
Berlin, 1995.
- Lacaze, J.:* Météorologie et aérodynamique de la Pollution atmosphérique. Paris. Jacques
Fréal, 1972.
- Landesumweltamt Brandenburg / Umweltbundesamt:* Informationen zur Nutzungsstruktur
in der Umgebung der Meßstationen. N. v.
- Landesvermessungsamt Brandenburg (Hrsg.):* Topographische Karte 1 : 50 000.
1. Auflage, Potsdam. 1992.

- Lichtenvort, Kerstin*: Entwicklung eines regressionsanalytischen Ozonprognosemodells für Berlin. Diplomarbeit. Technische Universität Berlin, 1997.
- Marco Polo Verlag* (Hrsg.): Die Generalkarte. Maßstab 1 : 200 000 1 cm = 2 km. Karten 30 - 33, 35. Marco Polo, 1997.
- Ministerium des Innern, Verwaltung Vermessungs- und Kartenwesen* (Hrsg.): Topographische Karten der DDR 1 : 50 000. Kart. 29622, N-33. Berlin. 1980 (Einzelblätter: 1985 / 1987 / 1988 / 1989).
- Moussiopoulos, Nicolas*: Mathematische Modellierung mesoskaliger Ausbreitung in der Atmosphäre. Fortschrittberichte Reihe 15: Umwelttechnik Nr. 64. Düsseldorf. VDI, 1989.
- Müller, Friedrich / Müller, Joachim* (Hrsg.): Müllers großes deutsches Ortsbuch. 26. Auflage, Wuppertal. Post- und Ortsbuchverlag, 1996.
- Pan, Hao*: Statistische Beschreibung der räumlichen Ozonverteilung in Brandenburg. Diplomarbeit. Technische Universität Berlin, 1997.
- Rochat, Jean-Claude*: Mathématiques pour la gestion de l' environnement. Basel. Birkhäuser, 1980.
- SAS Institute Inc.*: SAS User 's Guide. Version 5 Edition, USA. SAS Institute Inc., 1985.
- Schlipkötter, Hans-Werner / Goettert, Liesel*: Einflüsse von Luftverunreinigungen auf die Gesundheit des Menschen. In: Buchwald, Konrad / Engelhardt, Wolfgang (Hrsg.): Handbuch für Planung Gestaltung und Schutz der Umwelt. Band 2, Die Belastung der Umwelt. München. BLV, 1978.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz*: Das Luftgüte-Meßnetz (BLUME). Informationsreihe zur Luftreinhaltung in Berlin, Band 5. Berlin. Verwaltungsdruckerei Berlin, 1995.

- Steisslinger, Bernd*: Einfluß von Temperaturinversionen auf Konzentration und Verteilung von Luftverunreinigungen. Fortschrittberichte Reihe 15: Umwelttechnik Nr. 122. Düsseldorf. VDI, 1994.
- Storm, Peter-Christoph* (Hrsg.): UmwR - Umweltrecht. 9. Auflage, München. C. H. Beck, 1995.
- Stull, Roland B.*: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Reprint (1991) der 1. Auflage, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Theisen, Manuel René*: Wissenschaftliches Arbeiten. 7. Auflage, München. Vahlen, 1993.
- TÜV Energie und Umwelt GmbH*: Ozon und andere Photooxidantien. Gutachten zur räumlichen Verteilung klimabedingter umweltrelevanter Schadstoffe im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Mannheim. O. Verlag, o.J.
- Verein Deutscher Ingenieure* (Hrsg.): Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung. Wind. VDI- Richtlinie 3786 Blatt 2.
- Viertl, Reinhard* (Hrsg.): Beiträge zur Umweltstatistik. Wien. Technische Universität Wien, 1992.
- Wagner, Michael*: Anthropogenes Ozon („Sommersmog“) - Entstehen, Vorkommen und gesundheitliches Risiko. München. Bundesgesundheitsamt Berlin / GSF - Forschungszentrum, 1991.