

Nr.12

Verhalten
atmosphärischer
Sperrschichten

LIS - B E R I C H T Nr. 12

Herausgeber:
Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6
D-4300 Essen 1

1981

ISSN 0720-8499

Verhalten und Eigenschaften
atmosphärischer Sperrschichten

Lauf
J. Giebel

VERHALTEN UND EIGENSCHAFTEN ATMOSPHERISCHER SPERRSCHICHTEN

J. Giebel

Z u s a m m e n f a s s u n g

Mit einem Rubinlaser wurden Sondierungen der unteren Schichten der Atmosphäre vorgenommen, um Informationen über das Verhalten von Sperrschichten zu erhalten. Aufgrund der Meßdaten von 73 Tagen mit vorwiegend halbstündlichen Messungen zwischen 8.00 Uhr und 15.30 Uhr wurden der Jahres- und der Tagesverlauf der Höhe von Sperrschichten während des Winter- und Sommerhalbjahres ermittelt.

Die Hauptsperrschicht - das ist die Sperrschicht, die in etwa der Obergrenze der Mischungsschicht entspricht - stieg im Sommerhalbjahr von etwa 550 m über NN um 9.00 Uhr auf ca. 1400 m über NN um 15.00 Uhr an (Werte bei mittleren Wetterverhältnissen). Im Winterhalbjahr lagen die entsprechenden Werte bei 400 bzw. 600 m.

Für das Sommerhalbjahr zeigten Regressionsanalysen eine deutliche Abhängigkeit der Sperrschichthöhen vom Bewölkungsgrad. Die Sperrschichten lagen umso höher, je niedriger der Bewölkungsgrad war, der an dem betreffenden Tag im Mittel über den Zeitraum zwischen einer Stunde nach Sonnenaufgang und dem Zeitpunkt der Lidarsondierung gemessen wurde. Der Einfluß der Bewölkung bzw. der Sonneneinstrahlung nahm im Laufe des Tages zu. Wenn man das Maß für den Anstieg der Sperrschichten aufgrund der Bewölkung, wie es sich aus den Regressionsgleichungen ergibt, in Abhängigkeit von der Tageszeit darstellt, so erhält man in halblogarithmischer Darstellung eine Gerade. Aus der Regressionsgleichung für 15.00 Uhr ergibt sich, daß die Hauptsperrschicht zu diesem Zeitpunkt im Sommerhalbjahr bei wolkenlosem Himmel im Mittel um etwa 1000 m höher lag als bei völlig bedecktem Himmel. Die entsprechenden Werte für 9.00 bzw. 12.00 Uhr waren 100 bzw. 300 m. Der Einfluß der Bewöl-

kung auf die Höhe der Sperrschichten war darüber hinaus vom Bewölkungsgrad abhängig. Bei einer Abnahme der Bewölkung von 90 auf 70% stiegen die Sperrschichten z.B. wesentlich stärker an als bei einer Abnahme der Bewölkung von 60 auf 40 %.

Im Winterhalbjahr spielte die Bewölkung nur eine geringe Rolle. Die Sperrschichthöhen wurden in dieser Zeit erst bei einem Bewölkungsgrad von mehr als 70 % durch die Sonneneinstrahlung stärker beeinflusst.

In der kalten Jahreszeit hatte jedoch die Windgeschwindigkeit einen größeren Einfluß auf die Sperrschichthöhen. Die Sperrschichthöhen stiegen mit zunehmender Windgeschwindigkeit an. Die Wirkung nahm vom Morgen zum Mittag hin zu und ging dann wieder zurück.

Für 13.00 Uhr mittags galt im Winterhalbjahr folgendes:
Wenn die Windgeschwindigkeit am Boden in den 3 Stunden vorher im Mittel um 1 m/s höher lag, so erreichte die Hauptsperrschicht durchschnittlich eine um etwa 80 m größere Höhe.

Eine Zuordnung der bis Sonnenauf- und Sonnenuntergang extrapolierten Hauptsperrschichthöhen zu den Ausbreitungsklassen nach TURNER ergab für Ausbreitungsklasse 2 (labile Temperaturschichtung) eine Hauptsperrschichthöhe von etwa 100 m über NN und für Ausbreitungsklasse 3 eine Hauptsperrschichthöhe von etwa 800 m über NN. Im Mittel über das Jahr lag die Höhe der Hauptsperrschicht tagsüber bei etwa 850 m über NN.

S u m m a r y

The lower layers of the atmosphere were probed with a ruby laser to gain information on the behavior of inversion layers. The annual and diurnal variations of the height of the inversion layers during the summer months April to September and the winter months October to March were determined from predominantly half hourly measurements taken between 8 a.m. and 3.30 p.m. over a period of 73 days.

The main inversion layer - i.e. the inversion layer corresponding to the upper limit of the mixing layer - rose during the summer months from approximately 550 m above sea level at 9 a.m. to approximately 1400 m above sea level at 3 p.m. (values at average weather conditions). During the winter months from October to March the corresponding values were 400 and 600 m.

For the summer months regression analyses yielded a significant relationship of the height of the inversion layer with the degree of cloud cover. The heights of the inversion layers were inversely related to the degree of cloud cover which is the mean value measured on that day between one hour after sunrise to the begin of the lidar probing. The influence of cloudiness or of solar radiation, respectively, rose as the day progressed. Plotting the extent of the rise induced by cloudiness of the inversion layer obtained by regression analysis as function of the time of the day on semi-logarithmic graph paper yields a straight line. For 3 p.m. the regression equation estimates the location of the main inversion layer during the summer months at cloudless sky to be on the average about 1000 m higher than at fully clouded sky. The respective values for 9 a.m. and noon were 100 and 300 m. The influence of the cloud cover on the height of the inversion layer moreover was dependend on its extent. A decrease of cloudiness from 90 to 70 % caused a considerably larger rise of the inversion layer than a decrease of cloudiness from 60 to 40 %.

During the winter months cloudiness played a minor role. Only

when the clouds covered more than 70 % of the sky did solar radiation influence the altitude of the inversion layer to any significant degree during these months. However, during the cold season the wind velocity exerted greater influence on the altitude of the inversion layers which rose with increasing wind velocity. This effect grew stronger from morning to noon after which it began to subside again.

For 1.p.m. during the winter months the following was found: An average increase of 1 m/s of the ground level wind velocity during the preceding three hours raised the location of the main inversion layer on the average by about 80 m.

The assignment of the heights of the main inversion layer, extrapolated until sun-rise and sun-set, to the stability classes by Turner yielded for stability class 2 (unstable temperature gradient) an altitude of the main inversion layer of about 1000 m above sea level and for stability class 3 an altitude of the main inversion layer of about 800 m above sea level. Throughout the year the main inversion layer was located during the day on the average at about 850 m above sea level.

1. Einleitung

1.1. Die Bedeutung von Sperrschichten für Immissionsprognosen

Für Immissionsprognosen werden Informationen über das Verhalten von Sperrschichten in der unteren Troposphäre benötigt. Dabei geht es in erster Linie um die Sperrschicht, die identisch ist mit der Obergrenze der auf der Erde aufliegenden Mischungsschicht, in der sich die Luftmassen in der Vertikalen aufgrund von mechanischer und thermischer Turbulenz relativ stark mischen.

Informationen über die Höhe der Mischungsschicht werden benötigt:

- für Prognosen der Andauer von Smoglagen, da eine der Voraussetzungen für Smoglagen ist, daß die Obergrenze der Mischungsschicht relativ niedrig liegt.
- bei der Simulation von Jahresmittelwerten und Häufigkeitsverteilungen der Immissionsbelastung mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen.

Da sich die Schadstoffe, nachdem sie in die Atmosphäre freigesetzt wurden, zunächst gewöhnlich nur innerhalb der Mischungsschicht ausbreiten, wird die Mischungsschichthöhe hier benötigt, um die Diffusionsparameter $\sigma_z(x)$ (x = Quellentfernung) zu begrenzen, welche in den Gaußmodellen die Ausbreitung von Schadstoffen in der Vertikalen beschreiben. Diese Begrenzung von $\sigma_z(x)$ ist insbesondere bei Immissionssimulationen für größere Quellentfernungen (einige 10 km) erforderlich.

- bei der Prognose von Abgasfahnenüberhöhungen

Der hauptsächlich durch den thermischen Auftrieb bewirkte Anstieg von Abgasfahnen wird nämlich vielfach an der Obergrenze der Mischungsschicht ein Ende finden, insbesondere dann, wenn die Obergrenze eine Inversion darstellt oder sich der Anstieg der Abgasfahne schon abgeschwächt hat.

Angaben über die Höhe der Mischungsschicht enthalten über die ge-

nannten Punkte hinaus wesentliche Informationen über den Turbulenzgrad der Atmosphäre:

Unterhalb der Mischungsschichtobergrenze ist die Temperaturschichtung nämlich überwiegend labil oder neutral, während sie oberhalb der Mischungsschicht nach stabil hin tendiert.

1.2. Faktoren, welche die Mischungsschicht beeinflussen

Wie bereits erwähnt, ist die Mischungsschicht die auf der Erdoberfläche aufliegende Luftschicht, in der sich die Luftmassen in der Vertikalen aufgrund von mechanischer und thermischer Turbulenz relativ stark mischen.

Die Charakteristika dieser Schicht werden hauptsächlich von der Erdoberfläche her beeinflusst, die ja die Heizfläche für die Atmosphäre darstellt:

Sonneneinstrahlung heizt den Boden auf, der erwärmte Boden die unmittelbar darüber lagernde Luftschicht, aus der dann Luftkörper unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlichem thermischen Auftrieb in die Atmosphäre emporsteigen. Mit zunehmender Erwärmung des Bodens schieben diese die Obergrenze der Mischungsschicht immer mehr in die Höhe.

Des weiteren wird die Mischungsschicht durch die mechanische Turbulenz geformt und erhalten. Diese entsteht durch die Abbremsung und Ablenkung des Windes am Boden. Kommt bei fehlender oder schwacher konvektiver Turbulenz hauptsächlich die mechanische Turbulenz zum Tragen, so ist die Höhe der Mischungsschicht von der Windgeschwindigkeit abhängig [1]. Dabei spielt auch die Bodenrauigkeit eine Rolle.

Neben Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit bestimmen darüber hinaus Luftmassen, die aus anderen Gebieten herantransportiert werden, die Höhe der Mischungsschicht.

Man kann gewöhnlich zwischen zwei Arten von Mischungsschichten unterscheiden, nämlich den Mischungsschichten, die hauptsächlich durch konvektive Turbulenz gebildet werden und denjenigen, die in erster Linie aufgrund von mechanischer Turbulenz entstehen.

Mechanische Turbulenz formt die Mischungsschicht hauptsächlich:

- nachts
- an wolkigen Tagen oder
- an windigen Tagen [2].

Der Einfluß der konvektiven Turbulenz wächst mit zunehmender Sonneneinstrahlung und abnehmender Windgeschwindigkeit.

Die Vertikalbewegungen in der Mischungsschicht bewirken, daß die Temperaturschichtung nach einem trocken-adiabatischen Temperaturgradienten hin tendiert, d.h. zu einer Temperaturabnahme von etwa 1°C pro 100 m.

Überwiegt der Einfluß der konvektiven Turbulenz, so befindet sich die Mischungsschicht gewöhnlich in einem Entwicklungszustand, d.h., die Mischungsschicht wächst mit zunehmender Bodentemperatur in die Höhe. Die maximale Höhe wird etwa zu der Zeit erreicht, zu der auch die Bodentemperatur ein Maximum annimmt. Häufig gibt es bei der auf diese Weise geformten Mischungsschicht eine deutliche Obergrenze, d.h., die Mischungsschicht-Obergrenze ist die Untergrenze einer Höheninversion [1]. In den übrigen Fällen ist die Obergrenze der Mischungsschicht gewöhnlich durch eine Änderung des Temperaturgradienten nach stabil hin gekennzeichnet, ohne daß eine Inversion vorliegt.

1.3. Durchführung der Messungen der Sperrschichthöhen mit Hilfe des optischen Laser-Radars Lidar

1.3.1. Meßprinzip

Um Informationen über das Verhalten der Mischungsschicht zu erhalten, wurden mit einem Rubinlaser Sondierungen der unteren Schichten der Troposphäre vorgenommen. Das Meßprinzip beruht auf der Rückstreuung des Lidarsignals an den in der Atmosphäre vorhandenen Aerosolen (Mie-Streuung). Es werden vor allem relative Maxima und markante Änderungen der Aerosolkonzentration registriert.

Sperrschichten in der Atmosphäre, wie die Obergrenze der Mischungsschicht, führen gewöhnlich zu einer Anreicherung der Aerosolkonzentration zwischen Erdboden und Sperrschicht oder auch im Bereich

der Sperrschicht. An der Untergrenze der Sperrschicht, in der Sperrschicht selber oder auch an ihrer Obergrenze nimmt dann die Aerosolkonzentration meist abrupt ab. Der sprunghafte Rückgang der Aerosolkonzentration führt in der Laufzeitkurve der rückgestreuten Laser-Energie zu einem Knick, so daß durch Multiplikation der Laufzeit mit der Geschwindigkeit des Lidarsignals die Höhenlage der Sperrschicht ermittelt werden kann.

Der Lidarstrahl wurde bei einer Bewölkung von weniger als etwa 80 % auf Stellen am Himmel gerichtet, die wolkenlos waren. Da die Wolkenuntergrenze gewöhnlich oberhalb der Mischungsschicht lag, konnte jedoch auch dann in der Regel die Obergrenze der Mischungsschicht bestimmt werden, wenn die Bewölkungsdichte größer als 80 % war. Die Fälle, in denen die Wolkenuntergrenze im Bereich der Obergrenze der Mischungsschicht lag, wurden gesondert betrachtet.

1.3.2. Zeit und Ort der Messungen

Die Messungen wurden auf dem Gelände der LIS durchgeführt. Diese liegt am Südwestrand des Ruhrgebietes in ca. 150 m Höhe. Gemessen wurde gewöhnlich zwischen 8.30 und 15.30 Uhr, im Abstand von einer halben Stunde. Den Auswertungen liegen 73 Meßtage zugrunde. In Tabelle 2 ist angegeben, wie sie sich auf die einzelnen Monate des Jahres verteilen.

2. M e ß e r g e b n i s s e

2.1. Lidarmessungen und vertikales Temperaturprofil

Abbildung 1 zeigt, daß eine deutliche Beziehung zwischen den durch Lidarmessungen ermittelten sprunghaften Änderungen der Aerosolkonzentration und dem vertikalen Temperaturprofil besteht, wie es durch Radiosondenaufstieg des Wetteramtes Essen um 12.00 mittags gemessen wurde.

Abbildung 1 enthält das Temperaturprofil vom 2.11.78, 12.00 Uhr sowie die Höhe der zwischen 9.00 und 15.00 Uhr gemessenen Luftschichten, in denen die Aerosolkonzentration abrupt zurückging. Eine Bewölkung war an diesem Tag nicht vorhanden. Die Windgeschwindigkeit betrug bis zu einer Höhe von 600 m etwa 5 bis 6 m/s.

Darüber lag sie höher. Bis zu einer Höhe von 800 m entsprach jeder Änderung des Temperaturgradienten auch ein sprunghafter Rückgang der Aerosolkonzentration. Allerdings wurde nicht bei jeder stärkeren Abnahme der Aerosolkonzentration auch eine Änderung des Temperaturgradienten beobachtet. Mitunter wurde in solchen Fällen jedoch in der Nacht zuvor an dieser Stelle eine Änderung des Temperaturgradienten registriert. Es könnte sein, daß in diesen Fällen die Änderungen des Temperaturgradienten von der Radiosonde nicht erfaßt wurden, weil diese nur etwa alle 20 m eine Messung durchführt. Oberhalb von 800 m entsprach nicht jeder Änderung des Temperaturgradienten auch ein mit dem Lidargerät gemessener Konzentrationsrückgang.

In einem Falle trat hier in der relativ niedrigen Aerosolkonzentration entweder kein sprunghafter Konzentrationsrückgang mehr auf oder aber der Konzentrationsrückgang war so gering, daß er durch die Lidarmessung nicht erfaßt wurde. In dem anderen Fall lag an der Untergrenze einer Inversion ein Konzentrationsanstieg vor.

2.1.1. Die Sperrschicht mit dem kleinsten Transmissionswert im Vergleich mit dem vertikalen Temperaturprofil

Der größte Teil der in dieser Arbeit durchgeführten Auswertungen bezieht sich auf die Luftschicht mit der stärksten sprunghaften Abnahme der Aerosolkonzentration. Man kann diese Luftschicht auch als die Sperrschicht mit dem kleinsten Transmissionswert bezeichnen. Der Transmissionswert T ergibt sich als Quotient aus der Laserenergie I , die von den Punkten P_2 und P_1 in den Empfangsteil der Lidarapparatur rückgestreut wird. Der Punkt P_1 liegt dabei näher zum Lidargerät.

Der Transmissionswert ist ein Maß für die Änderung der Aerosolkonzentration mit der Entfernung, im vorliegenden Fall mit der Höhe:

$$T = \frac{I(P_2)}{I(P_1)}$$

mit

T : Transmissionswert

$I(P_2)$, $I(P_1)$: Die Laserenergie $I(P_1)$ wird von der höheren, die Laserenergie $I(P_2)$ von der niedrigeren Aerosolkonzentra-

tion in den Empfangsteil der Lidar-
apparatur zurückgestreut.

Wie ein Vergleich mit den Temperaturdaten der Radiosondenaufstiege um 12.00 Uhr mittags zeigt, ist die Sperrschicht mit dem kleinsten Transmissionswert um diese Zeit meist identisch mit der Obergrenze der Mischungsschicht. In Fällen, in denen sie nicht die Obergrenze der Mischungsschicht darstellt, ist sie immer noch die Obergrenze einer auf dem Boden aufliegenden Luftschicht, in der eine hohe Aerosolkonzentration vorliegt. Sie ist deshalb vor allem gegen Mittag und Nachmittag in der überwiegenden Zahl der Fälle identisch mit der Luftschicht, in welcher die Hauptmasse der Luftverunreinigungen transportiert wird. Das ist die Luftschicht, die auch als Ausbreitungsschicht bezeichnet werden kann.

Die Sperrschicht mit dem kleinsten Transmissionswert wird im folgenden als Hauptsperrschicht bezeichnet.

In Abbildung 2 ist für 12.00 Uhr mittags die mit Lidar ermittelte Höhe der Hauptsperrschicht gegen die Höhe der am nächsten gelegenen Schicht mit einer Änderung des Temperaturgradienten aufgetragen. Der Darstellung liegen insgesamt 69 Wertepaare zugrunde. Als Korrelationskoeffizient ergibt sich 0,96. In Bezug auf die Temperaturschichtung wurden 6 Fälle unterschieden (siehe nachfolgende Aufstellung).

Art der Temperaturschichtung	Anzahl der Fälle
Unterkante einer Inversion	34
Unterkante einer Luftschicht mit stabiler Temperaturschichtung (ohne daß eine Inversion vorliegt) (Temperaturgradient $> - 0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)	18
Unterkante einer Inversion oder Luftschicht mit stabiler Temperaturschichtung in der Nacht zuvor	6
Oberkante einer Inversion	6
Oberkante einer Luftschicht mit stabiler Temperaturschichtung (ohne daß eine Inversion vorliegt)	2
Unterkante einer Luftschicht mit labiler Temperaturschichtung (Temperaturgradient $< - 0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)	3
	<hr/> 69

In 75 % der Fälle entsprach die Höhe der mit Lidar ermittelten

Hauptsperrschicht in etwa der Höhe der Untergrenze einer Inversion (50 % der Fälle) oder der Unterkante einer Luftschicht mit stabiler Temperaturschichtung (26 % der Fälle).

In 9 % der Fälle lag in der Nacht zuvor in der Nähe der Hauptsperrschicht die Untergrenze einer Inversion oder stabilen Luftschicht.

In den restlichen 16 % der Fälle aber war die Hauptsperrschicht die Obergrenze einer Inversion oder stabilen Schicht oder die Untergrenze einer Luftschicht mit labiler Temperaturschichtung (4 %). Die Hauptsperrschicht wirkte in diesen Fällen als Sperrschicht nach unten: Rauchfahnen, die sich oberhalb der Sperrschicht ausbreiteten, wurden durch die Sperrschicht vom Boden abgehalten. Die Hauptsperrschicht wich im Mittel von der am nächsten gelegenen Luftschicht mit einer Änderung des Temperaturgradienten um 88 m ab. Eine der Ursachen für diese Abweichungen dürfte darin liegen, daß die Lidarmessungen weder zeitlich noch örtlich genau mit den Radiosondenmessungen des vertikalen Temperaturprofils übereinstimmen. Wie die Lidarmessungen zeigen, kann die Höhe von Sperrschichten nämlich innerhalb weniger Minuten um 100 m und mehr schwanken. Des weiteren werden die Unterschiede damit zusammenhängen, daß innerhalb von Inversionen zur Obergrenze hin gewöhnlich eine Zone hoher Windgeschwindigkeit auftritt, an deren Untergrenze die Aerosolkonzentration ebenfalls abrupt abnehmen dürfte.

2.2. Charakterisierung der verschiedenen Arten von Sperrschichten aufgrund ihres Verhaltens während des Tages

2.2.1. Einleitung

Wie Abbildung 1 zeigt, wird mit dem Lidarsystem zwischen 200 und 2000 m über NN gewöhnlich eine ganze Reihe von Sperrschichten gemessen. Ihre Anzahl verringert sich mit der Höhe und die schwächeren befinden sich hauptsächlich in Bodennähe.

Man kann diese Sperrschichten nach ihrem Verhalten im Laufe des Tages drei verschiedenen Gruppen zuordnen.

2.2.2. Sperrschichten oberhalb der Mischungsschicht

In größeren Höhen liegen Schichten, deren Merkmal es ist, daß sie von der vom Boden ausgehenden mechanischen und konvektiven Turbulenz nicht beeinflußt werden. Ihre Höhe ist infolgedessen während des ganzen Tages konstant oder sinkt sogar ab.

Da diese Schichten nicht von der vom Boden ausgehenden Turbulenz beeinflußt werden, liegen sie gewöhnlich oberhalb der Obergrenze der Mischungsschicht. Im Winter kann die unterste dieser Schichten aber auch die Obergrenze der Mischungsschicht bilden. Die Höhe dieser Schichten beträgt im Winter gewöhnlich mehr als ungefähr 300 bis 500 m und im Sommer mehr als etwa 1000 bis 2000 m.

2.2.3. Sperrschichten innerhalb oder an der Obergrenze der Mischungsschicht

2.2.3.1. Sich rasch auflösende schwächere Sperrschichten in Bodennähe

In Bodennähe liegen häufig schwächere Sperrschichten, die sich im Laufe des Vormittags auflösen und sich am Nachmittag und gegen Abend und wahrscheinlich auch während der Nacht neu bilden. Die Auflösung dieser Schichten erfolgt vom Boden her; die allmählich in die Höhe wachsende Schicht turbulenter Durchmischung läßt eine nach der anderen verschwinden.

Wenn im Verlaufe des Nachmittags die konvektive Turbulenz mit abnehmender Sonneneinstrahlung wieder schwächer wird, so können sie sich erneut bilden.

Die Lidarmessungen zeigten diese Gruppe von Sperrschichten vor allem im Sommer, wo sie bis zu einer Höhe von etwa 1000 m auftraten sowie in den Übergangsmonaten, seltener dagegen im Winter.

2.2.3.2. Durchgehende Sperrschichten

Die dritte Gruppe von Sperrschichten liegt zwischen den sich auflösenden schwächeren Sperrschichten in Bodennähe und den Sperrschichten in größeren Höhen, die von der vom Boden ausgehenden Turbulenz nicht beeinflußt werden.

Es können mehrere dieser Schichten übereinander liegen. Die oberste ist meist die Obergrenze der Mischungsschicht.

Diese Schichten unterliegen einem Tages- und Jahresgang. Sie lösen sich im Laufe des Tages gewöhnlich nicht auf, sondern werden von der zunehmenden Turbulenz allmählich in die Höhe geschoben. Das hängt damit zusammen, daß sie in der Regel die Untergrenze einer stabilen Luftschicht darstellen. Durch die vom Boden aufsteigenden mechanischen und konvektiven Turbulenzwirbel wird der untere Teil dieser stabilen Luftschicht im Laufe des Tages nach und nach von unten her aufgelöst, so daß sich die Untergrenze der stabilen Schicht allmählich in größere Höhen verlagert. Falls sie sich ganz auflöst, so übernimmt gewöhnlich eine höher liegende Sperrschicht ihre Funktion. Die von der Erdoberfläche beeinflussten Sperrschichten können übereinander existieren, weil vermutlich Luftpörper mit stärkerem thermischen Auftrieb die unteren stabilen Luftschichten durchdringen, ohne sie dabei aufzulösen. Die weiteren Untersuchungen betreffen die Sperrschichten dieser dritten Gruppe. Im Vordergrund steht dabei die in Abschnitt 2.1.1. definierte Hauptsperrschicht, die im Mittel in etwa identisch ist mit der obersten gewöhnlich durchgehenden noch vom Erdboden her beeinflussten Sperrschicht. Sie entspricht infolgedessen auch in etwa der Obergrenze der Mischungsschicht, da diese gewöhnlich als die Schicht angesehen wird, bis zu der die vom Erdboden ausgehende mechanische und konvektive Turbulenz gerade noch wirksam ist.

2.3. Tages- und Jahresgänge der Sperrschichten

2.3.1. Tages- und Jahresgang der Hauptsperrschicht

In Abbildung 3 ist die mittlere Höhe der Hauptsperrschicht für die Monate mit gleichem Abstand vom Sontentiefststand in Abhängigkeit von der Tageszeit dargestellt. Da jeweils zwei Monate den gleichen Abstand vom Sontentiefststand haben, handelt es sich insgesamt um 6 Kurven. Die mittlere quadratische Abweichung der Einzelwerte beträgt auf den Mittelwert bezogen im Durchschnitt etwa 30 %.

Die Tagesgänge der zusammengehörenden Monate bilden zwei verschiedene Gruppen, die ein stark voneinander abweichendes Verhalten zeigen. Zu der einen Gruppe gehören die Monate im Winterhalbjahr, zu der anderen die Monate im Sommerhalbjahr. Im Sommerhalbjahr begann gegen 9,00 Uhr ein steiler Anstieg, der gegen 13,30 Uhr abflachte. Die 9,00 Uhr-Werte lagen bei 550 m über NN, die Maximal-

werte um 15.00 Uhr zwischen 1300 und 1650 m. Im Sommerhalbjahr waren die Schwankungen der Hauptsperrschicht so groß, daß sich die Tagesgänge der einzelnen Monate kreuzten. Im Winterhalbjahr liefen die Tagesgänge dagegen getrennt, abgesehen von den Mittelwerten um 8.30 Uhr, die sich aus einer kleineren Anzahl von Einzelwerten zusammensetzen.

Am tiefsten verlief der Tagesgang in den beiden Monaten mit dem geringsten Abstand vom Sonnenstands-Minimum. Um 9.00 Uhr lag hier die Höhe bei 400 m, um 15.00 Uhr bei 530 m über NN. Zwei bis drei Monate vom Sonnentiefststand entfernt lagen die Werte um 9.00 Uhr bei 450 m und um 15.00 Uhr schon bei 700 m über NN.

2.3.2. Tages- und Jahresgang der unteren Sperrschicht

In Abbildung 4 ist der Tages- und Jahresgang der Höhe der unteren Sperrschicht dargestellt, also der durchgehenden Sperrschicht in größter Bodennähe, wie sie durch Lidar gemessen wurde. Die Schicht zwischen unterer Sperrschicht und Erdboden ist der besser durchmischte untere Teil der Mischungsschicht, der auch als "eigentliche" Mischungsschicht bezeichnet wurde [2]. Im Winterhalbjahr stieg die mittlere Höhe dieser Schicht von etwa 300 m über NN um 9.00 Uhr auf etwa 400 m um 15.00 Uhr an. Sie lag damit um etwa 100 m niedriger als die Hauptsperrschicht bzw. die Obergrenze der Mischungsschicht. 3 bis 5 Monate vom Sonnenstands-Minimum entfernt stieg die untere Sperrschicht von ca. 350 m um 9.00 Uhr auf ca. 1250 m um 15.00 Uhr an. Ihr Abstand zur Hauptsperrschicht betrug in diesen Monaten ca. 200 bis 300 m. 5 bis 6 Monate vom 21.12. entfernt stieg die untere Sperrschicht von etwa 350 m um 9.00 Uhr auf ca. 1800 m um 15.00 Uhr an. Sie lag in diesen Monaten zwischen 8.00 Uhr und 13.30 Uhr um ca. 100 bis 200 m niedriger als die Hauptsperrschicht, um dann aber ab 14.00 Uhr auf etwa gleicher Höhe wie die Hauptsperrschicht zu verlaufen.

Das Zusammenfallen der unteren Sperrschicht mit der Hauptsperrschicht bzw. der Obergrenze der Mischungsschicht ist ein Zeichen für die gute Durchmischung der Atmosphäre an den Nachmittagen der beiden Monate mit der höchsten Sonneneinstrahlung.

Die konvektive Turbulenz aufgrund der starken Sonneneinstrahlung bewirkt offenbar, daß sich bis zum Nachmittag alle Sperrschichten innerhalb der Mischungsschicht auflösen.

2.4. Der Einfluß meteorologischer Parameter auf die Höhe der mit Lidar ermittelten Sperrschichten

2.4.1. Der Einfluß der Temperatur auf die Sperrschichthöhen

Wenn man die Höhe der einzelnen Sperrschichten zu den verschiedenen Tageszeiten im Sommerhalbjahr gegen die Bodentemperatur zum Zeitpunkt der Messung oder gegen die Temperaturdifferenz zwischen 9.00 Uhr und dem Zeitpunkt der Messung aufträgt, so ergibt sich eine positive Korrelation, d.h., die Sperrschichthöhen stiegen mit zunehmender Temperatur bzw. Temperaturdifferenz an. Der Zusammenhang war straffer, wenn statt der Temperatur der Bewölkungsgrad als unabhängige Variable fungierte. Bei den im folgenden durchgeführten multiplen Regressionsanalysen wurde deshalb als Maß für die konvektive Turbulenz der Bewölkungsgrad verwendet, und zwar die mittlere Bewölkung zwischen einer Stunde nach Sonnenaufgang und dem Meßzeitpunkt. Die Abhängigkeit der Sperrschichthöhen von der Wolkenbedeckung ist auch deswegen von Interesse, weil die für die Ausbreitungsrechnung benötigten Stabilitätsklassen sich u.a. aufgrund des Bewölkungsgrades ergeben. Neben der Bewölkung wurde als weitere unabhängige Variable in den Regressionsanalysen die Windgeschwindigkeit als Maß für die mechanische Turbulenz verwendet. Es wurde die mittlere Bodenwindgeschwindigkeit in den drei Stunden vor dem Zeitpunkt der Lidarmessung eingesetzt.

2.4.2. Der Einfluß von Bewölkungsgrad und Bodenwindgeschwindigkeit auf die Sperrschichthöhen

2.4.2.1. Sommerhalbjahr

2.4.2.1.1. Hauptsperrschicht

Tabelle 1 enthält Regressionsgleichungen für jede Stunde im Sommerhalbjahr zwischen 9.00 und 15.00 Uhr. Unabhängige Variablen sind Bewölkungsgrad und Windgeschwindigkeit, abhängige Variable ist die Höhe der Hauptsperrschicht. Die Sperrschichten lagen um so höher, je niedriger der Bewölkungsgrad war, der an dem betreffenden Tag im Mittel über den Zeitraum zwischen einer Stunde nach Sonnenaufgang und dem Zeitpunkt der Lidarsondierung gemessen wurde. Der Bewölkungsgrad gewann dabei im Laufe des Tages immer mehr

Einfluß auf die Sperrschichthöhen. Die Regressionsgleichung für 15.00 Uhr zeigt z.B., daß die Hauptsperrschicht zu diesem Zeitpunkt bei einem um 10 % niedrigeren Bewölkungsgrad im Mittel um etwa 100 m höher lag. Um 9.00 Uhr betrug die Differenz im Mittel dagegen nur etwa 10 m. Mit Hilfe der Regressionsgleichung für 15.00 Uhr läßt sich berechnen, daß die Höhe der Hauptsperrschicht um 15.00 Uhr bei einer Bewölkung von 70 % und einer Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s, wie sie im langjährigen Mittel im Sommerhalbjahr am Flughafen Essen-Mülheim gemessen wurden, bei 1370 m lag. Der Maximalwert von 2100 m ergibt sich bei einem Bewölkungsgrad von 0 % und einer Windgeschwindigkeit von 0 m/s.

In Abbildung 5 ist das mit 100 multiplizierte Steigungsmaß für die Hauptsperrschicht aufgrund der Bewölkung für jede Stunde halblogarithmisch in Abhängigkeit von der Uhrzeit dargestellt. Das Ergebnis ist eine Gerade.

Aus der Abbildung ergibt sich, um wieviel Meter die Hauptsperrschicht im Sommerhalbjahr zu den verschiedenen Tageszeiten bei wolkenlosem Himmel im Mittel höher lag als bei völlig bedecktem Himmel. Um 9.00 Uhr waren es etwa 100 m, um 12.00 Uhr ca. 300 m und um 15.00 Uhr etwa 1000 m.

Der Einfluß der Bewölkung auf die Höhe der Hauptsperrschicht war nicht bei jedem Bewölkungsgrad gleich. Bei einer Abnahme der Bewölkung von 90 auf 80 % stieg die Hauptsperrschicht wesentlich stärker an als bei einer Abnahme der Bewölkung von 50 auf 40 %. Die hier vorliegenden Beziehungen gehen aus Abb. 6 hervor. Dort ist das Steigungsmaß für die Hauptsperrschicht aufgrund der Bewölkung in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad dargestellt, und zwar getrennt für Sommer- und Winterhalbjahr, jedoch nicht mehr nach Uhrzeiten unterschieden. Es wurden Regressionsanalysen für Bewölkungsgrade größer 10, 20, 40, 60, 70, 80 und 90 % durchgeführt. Das mit dem Faktor 10 multiplizierte Steigungsmaß stellt die durchschnittliche Höhe dar, um welche die Hauptsperrschicht bei einem um 10 % geringeren Bewölkungsgrad im Mittel über den Zeitraum zwischen 9.00 und 15.00 Uhr höher lag.

Bei einem Bewölkungsgrad von mehr als 60 anstelle 70 % machte dieser Höhenunterschied im Sommerhalbjahr etwa 100 m und bei einem Bewölkungsgrad von mehr als 80 anstelle von 90 % etwa 300 m aus.

Der unterschiedliche Einfluß der Sonneneinstrahlung auf die Sperrschichthöhe bei verschiedenen Bewölkungsgraden dürfte damit zusammenhängen, daß sich bei geringer Bewölkung des Nachts aufgrund der größeren Wärmeausstrahlung der Erdoberfläche Bodeninversionen ausbilden und außerdem gewöhnlich Absinkinversionen vorhanden sind. Diese Inversionen verhindern, daß sich der Einfluß abnehmender Bewölkung bzw. zunehmender Sonneneinstrahlung bei geringer Bewölkung in stärkerem Maße auf die Sperrschichthöhe auswirkt.

Die beträchtliche Zunahme des Einflusses der Sonneneinstrahlung auf das Anwachsen der Mischungsschicht mit zunehmender Bewölkung dürfte darüber hinaus auch noch folgende Ursache haben:

Bei höheren Bewölkungsgraden nimmt die relative Luftfeuchte im Bereich der Obergrenze der Mischungsschicht höhere Werte an. Das durch die Sonneneinstrahlung am Erdboden verdunstende Wasser gelangt als Wasserdampf in den Bereich der Mischungsobergrenze und kondensiert hier eher. Die dabei frei werdende Wärme führt zu zusätzlicher Konvektion, welche das Anwachsen der Mischungsschicht beschleunigt.

Die Windgeschwindigkeit hatte im Sommerhalbjahr einen geringeren Einfluß auf die Höhe der Hauptsperrschicht als die Bewölkung. Zwischen 9.00 Uhr und 11.00 Uhr stieg die Hauptsperrschicht mit zunehmender Windgeschwindigkeit noch an, zwischen 12.00 Uhr und 15.00 Uhr sank sie dagegen mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab. (siehe die Regressionsgleichungen in Tabelle 1). Die Windgeschwindigkeit hatte hier wahrscheinlich einen gegenläufigen Effekt, weil sich die konvektive Turbulenz, aufgrund derer die Mischungsschicht im Sommerhalbjahr um die Mittagszeit hauptsächlich ansteigt, bei höheren Windgeschwindigkeiten weniger stark entwickeln dürfte. Bei Bewölkungsgraden von mehr als 70 % hatte die Windgeschwindigkeit allerdings auch im Sommerhalbjahr einen größeren Einfluß auf die Sperrschichthöhen (siehe Abb. 7).

2.4.2.1.2. Sommerhalbjahr - Untere Sperrschicht

Wie bei der Hauptsperrschicht, so gewann die Bewölkung im Laufe des Tages auch auf die Höhe der unteren Sperrschicht zunehmenden Einfluß. Die Höhenzunahmen bei abnehmender Bewölkung waren ab Mittag allerdings etwas geringer (siehe Tabelle 1).

Ähnlich wie bei der Hauptsperrschicht war der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Höhe der unteren Sperrschicht gering.

2.4.2.2. Winterhalbjahr

2.4.2.2.1. Hauptsperrschicht

Der Einfluß der Bewölkung auf die Höhe der Hauptsperrschicht war im Winterhalbjahr wesentlich kleiner als im Sommerhalbjahr und wirkte sich am Morgen und Nachmittag entgegengesetzt zu der erwarteten Richtung aus. Um 12.00 und 13.00 Uhr stieg die Hauptsperrschicht mit abnehmender Bewölkung an, zu den übrigen Zeiten sank sie dagegen mit abnehmender Bewölkung ab. Dann galt also: Je größer die Sonneneinstrahlung, umso niedriger die Sperrschichthöhe (siehe Tabelle 1). Der geringe Einfluß der Bewölkung sowie der entgegengesetzte Effekt am Morgen und Nachmittag dürften - wie bereits erwähnt - damit zusammenhängen, daß bei unbedecktem Himmel zwei gegenläufige Kräfte wirksam sind, nämlich sowohl die zur Konvektion führende Sonneneinstrahlung als auch die bei unbedecktem oder wenig bedecktem Himmel stärkere Wärmeausstrahlung der Erdoberfläche in den Weltraum, aufgrund derer sich die nächtlichen Inversionen ausbilden. Außerdem dürften die an Hochdruckwetterlagen geknüpften Absinkinversionen eine Rolle spielen. Die aufgrund der Sonneneinstrahlung einsetzende Konvektion hat offenbar im Winterhalbjahr bei unbedecktem oder wenig bedecktem Himmel nicht die Kraft, diese Inversionen aufzulösen. Die Sperrschichten stiegen infolgedessen trotz relativ großer Sonneneinstrahlung kaum an oder sanken sogar ab.

Der Einfluß der Bewölkung auf die Höhe der Hauptsperrschicht in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad, wie er aus Abbildung 6 hervorgeht, bestätigt diese Annahme. Bis zu einem Bewölkungsgrad von 70 % war der Einfluß der Bewölkung auf die Höhe der Hauptsperrschicht (Mittel zwischen 9.00 Uhr und 15.00 Uhr) nur gering. Mit weiter zunehmender Bewölkung ergab sich jedoch dann auch im Winterhalbjahr rasch noch ein relativ starker Einfluß. Bis zu einem Bewölkungsgrad von 70 % betrug der Höhenzuwachs der Hauptsperrschicht bei einer um 10 % geringeren Bewölkung im Mittel nämlich nur etwa 20 m, bei Bewölkungsgraden von mehr als 90 % aber etwa 300 m.

Eine weitere Ursache für den unterschiedlichen Einfluß der Bewölkung dürfte - wie ausgeführt - die gesteigerte Konvektion aufgrund der bei höheren Bewölkungsgraden in größerem Umfang frei werdenden Kondensationswärme sein.

Im Vergleich zur Bewölkung hatte die Windgeschwindigkeit im Winterhalbjahr einen deutlicheren Einfluß auf die Höhe der Hauptsperrschicht. Der Einfluß, der größer war als im Sommerhalbjahr, nahm vom Morgen zum Mittag hin zu und ging dann wieder zurück. Bei einer um 1 m/s höheren Windgeschwindigkeit (Mittel über 3 Std. vor dem Zeitpunkt der Lidarsondierung) lag die Hauptsperrschicht z.B. um 13.00 Uhr um etwa 80 m höher. Zu Beginn und Ende der Lidarmessungen um 9.00 Uhr bzw. 15.00 Uhr war der Einfluß der Windgeschwindigkeit am geringsten. Bei einer um 1 m/s höheren Windgeschwindigkeit lag die Hauptsperrschicht zu diesen Zeiten nur um etwa 10 m höher. Bei höheren Bewölkungsgraden hatte die Windgeschwindigkeit einen größeren Einfluß auf die Höhe der Hauptsperrschicht als bei nur wenig bedecktem Himmel (siehe Abb. 7). Im Mittel über alle Fälle lag die Höhe der Hauptsperrschicht nämlich bei einer um 1 m/s höheren Windgeschwindigkeit um etwa 40 m höher, bei Bewölkungsgraden von mehr als 80 % aber um etwa 100 m.

2.4.2.2.2. Winterhalbjahr -

Untere Sperrschicht

Die Bewölkung hatte im Winterhalbjahr zwischen 9.00 und 13.00 Uhr den entgegengesetzten Einfluß auf die Höhe der unteren Sperrschicht als erwartet. Im Mittel über diesen Meßzeitraum lag die untere Sperrschicht nämlich bei völlig bedecktem Himmel um etwa 40 m höher als bei wolkenlosem Himmel. Um 13.00 Uhr, als der Einfluß am größten war, lag die untere Sperrschicht bei völlig bedecktem Himmel um etwa 80 m höher als bei wolkenlosem Himmel. Bei einer um 1 m/s größeren Windgeschwindigkeit lag die untere Sperrschicht im Mittel über den Meßzeitraum um etwa 20 m höher.

2.5. Die Wetterverhältnisse bei Durchführung der Lidarmessungen

Um auch Sperrschichten in größeren Höhen erfassen zu können, wurden die Lidarmessungen vorwiegend bei Wetterlagen mit geringer

Wolkenbedeckung durchgeführt. Während der Messungen betrug die Bewölkung im Mittel 46 % (Meßwerte des Wetteramtes Essen), wohingegen im langjährigen Durchschnitt in Mülheim-Flughafen 70 % gemessen wurden. Die an den Meßtagen in den einzelnen Monaten im Mittel vorhandene Bewölkung sowie die langjährige durchschnittliche Bewölkung ist in Tabelle 2 angegeben. Abgesehen vom September lag die Bewölkung in allen Monaten bei den Lidarmessungen im Mittel niedriger als im langjährigen Monatsmittel. Die größten Unterschiede traten in den Wintermonaten sowie im Mai auf.

Tabelle 2 enthält auch die mittlere Windgeschwindigkeit an den Meßtagen sowie die Windgeschwindigkeit im langjährigen Monatsmittel.

Die Windgeschwindigkeit lag an den Meßtagen im Mittel unter dem langjährigen Durchschnitt und zwar im Winterhalbjahr im Mittel um 0,6 m/s und im Sommerhalbjahr im Mittel um etwa 0,5 m/s.

Die im vorhergehenden Abschnitt angegebenen Regressionsgleichungen lassen sich dazu verwenden, die im Sommerhalbjahr gemessenen Sperrschichthöhen auf mittlere Bewölkungsgrade und Windverhältnisse umzurechnen.

Wenn man diese Umrechnungen durchführt, so ergeben sich im Mittel um etwa 20 m niedrigere Sperrschichthöhen.

Die größten Unterschiede ergaben sich für 15.00 Uhr. Im April und Mai betrug die Unterschiede bei der Hauptsperrschicht etwa 300 m, im Juni bis August einige 10 m.

Abbildung 8 zeigt die mittlere Höhe der Hauptsperrschicht um 15.00 Uhr in den einzelnen Monaten. Außerdem enthält die Abbildung die auf mittlere Bewölkungs- und Windverhältnisse umgerechnete Höhe dieser Schicht. Die Kurve, die mittleren Verhältnissen entspricht, verläuft im Sommerhalbjahr deutlich symmetrischer zum Sonnenstandsmaximum als die unkorrigierte Kurve.

Für das Winterhalbjahr ist wegen des stark unterschiedlichen Einflusses der Bewölkung eine Umrechnung auf mittlere Bewölkungsverhältnisse nur mit Einschränkungen möglich. Wenn man die Umrechnungen dennoch durchführt, so ergeben sich im Mittel um etwa 20 m hö-

here Werte.

Abbildung 9 enthält den tageszeitlichen Verlauf der auf mittlere Bewölkungs- und Windverhältnisse umgerechneten Höhe der Hauptsperrschicht für die Monate mit gleichem Abstand vom Sonnentiefstand am 21.12.. Der Verlauf der korrigierten Kurven ist ähnlich wie der der unkorrigierten.

2.6. Höhe der Hauptsperrschicht, wenn am Boden das morgendliche SO_2 -Immissionsmaximum auftritt

Die SO_2 -Immissionsbelastung am Boden steigt am Morgen gewöhnlich auf ein Maximum an. Eine Mittelung der an den Smogwarndienststationen im Ruhrgebiet im Verlauf von mehr als 10 Jahren gemessenen SO_2 -Immissionskonzentrationen zeigt, daß hier im Winter im Mittel ein SO_2 -Immissionsmaximum gegen 11.00 Uhr und im Sommer zwischen 9.00 Uhr und 10.00 Uhr auftrat.

Dieses morgendliche SO_2 -Immissionsmaximum hat vor allem folgende Ursachen:

Die am Morgen ansteigenden Emissionen aus Hausbrand und Kleingewerbe reichern sich in der zu diesem Zeitpunkt noch niedrigen Mischungsschicht an. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung wächst die Mischungsschicht allmählich in die Höhe. Die aus niedrigen Quellen freigesetzten Emissionen verteilen sich dann über einen größeren Austauschraum, nacheinander werden aber auch die in größere Höhen aufgestiegenen Abgase höherer Emittenten in die Schicht turbulenter Durchmischung einbezogen und zum Boden hin transportiert. Dadurch steigt die Immissionsbelastung am Boden zunächst noch an. Dieser Anstieg geht gewöhnlich so lange vor sich, bis der Austauschraum eine gewisse Höhe überschreitet. Danach nimmt die Immissionsbelastung wieder ab. Das Immissionsmaximum ist meist umso ausgeprägter, je geringere Werte die Windgeschwindigkeit annimmt. Durch Vergleich des Tagesgangs der Höhe der Hauptsperrschicht mit dem Tagesgang der SO_2 -Immissionsbelastung wurde die Sperrschichthöhe ermittelt, von der ab die SO_2 -Immissionsbelastung am Boden wieder zurückging. Die Kenntnis dieser Höhe kann in Smogsituationen eine Rolle spielen: Wenn nämlich bekannt ist, bei welcher Höhe der Hauptsperrschicht die SO_2 -Immissionsbelastung am Boden wieder abnimmt, dann kann aus dem voraussichtlichen Tagesgang der Hauptsperrschicht auf den Verlauf der

SO₂-Immissionsbelastung geschlossen werden.

Da Abgasfahnen umso höher aufsteigen, je niedriger die Windgeschwindigkeit liegt, sollte diese kritische Höhe der Hauptsperrschicht, bei der die SO₂-Immissionsbelastung am Boden wieder zurückgeht, umso höhere Werte annehmen, je geringer die Windgeschwindigkeit ist. Das ist auch tatsächlich der Fall. In Abbildung 10 ist die kritische Höhe der Hauptsperrschicht gegen die Windgeschwindigkeit am Boden und in Abbildung 11 gegen die Windgeschwindigkeit zwischen Boden und Hauptsperrschicht aufgetragen. Im letzteren Fall ergibt sich ein etwas strafferer Zusammenhang.

Die meisten der für die Beantwortung der Fragestellung verwertbaren Lidarmessungen wurden bei einer Windgeschwindigkeit zwischen Boden und Hauptsperrschicht von etwa 4 m/s durchgeführt. Die kritische Höhe der Hauptsperrschicht lag bei dieser Windgeschwindigkeit in fast allen Fällen etwa zwischen 500 und 700 m.

Die Höhe der unteren Sperrschicht, bei der die SO₂-Immissionsbelastung ein Maximum erreichte, schwankte sehr stark. Die Höhen lagen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, zwischen 200 und 800 m.

2.7. Höhe der Hauptsperrschicht in Abhängigkeit von der Ausbreitungsklasse

Für die Simulation von Schadstoff-Immissionen mit Hilfe von Ausbreitungsmodellen wird die mittlere Höhe der Mischungsschicht-Obergrenze in Abhängigkeit von der Ausbreitungsklasse benötigt. Um einen Überblick über die zu erwartenden Höhen zu erhalten, wurde den Höhen der Hauptsperrschicht, wie sie mit Lidar zu den verschiedenen Tages-/Jahreszeiten und Wetterlagen gemessen wurden, die zugehörige Ausbreitungsklasse nach Turner zugeordnet. Dabei wurde von dem in der Raffinerie-Richtlinie [3] beschriebenen Ausbreitungsklassen-Schema ausgegangen, das eine Charakterisierung des Turbulenzgrades der Atmosphäre in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung durch die Ausbreitungsklassen 2, 3, 4 und 5 vorsieht.

Labile Temperaturschichtung der Atmosphäre wird durch Klasse 2, stabile Temperaturschichtung durch Klasse 5 repräsentiert. Den Klassen 3 und 4 entsprechen leicht labiles bzw. leicht stabiles Gleichgewicht.

Die Aufteilung der Höhen der Hauptsperrschicht auf die einzelnen Ausbreitungsklassen hatte folgendes Ergebnis:

Es wurden Lidarmessungen bei Ausbreitungsklasse 2, 3 und 4 durchgeführt, nicht aber bei Ausbreitungsklasse 5 (stabile Temperaturschichtung).

Der Prozentsatz der Lidarmessungen, der auf die einzelnen Ausbreitungsklassen entfiel, ist in Tabelle 3 angegeben.

Die Tabelle 3 enthält gleichzeitig auch die Häufigkeiten der einzelnen Ausbreitungsklassen in dem fünfjährigen Zeitraum 1962-1966 an der Station Düsseldorf-Lohausen. Wie aus der Tabelle zu ersehen ist, waren bei den Messungen die Klassen 2 und 3 im Vergleich zur 5-jährigen Ausbreitungsklassenstatistik überrepräsentiert und die Klasse 4 geringfügig unterrepräsentiert.

Die mittlere Höhe der Hauptsperrschicht lag bei den Messungen in Ausbreitungsklasse 2 im Jahresmittel bei 970 m über NN, in Ausbreitungsklasse 3 bei 700 m über NN und in Ausbreitungsklasse 4 bei 730 m über NN (siehe Tabelle 3).

Im Winterhalbjahr stieg wider Erwarten die Höhe der Hauptsperrschicht beim Übergang von Ausbreitungsklasse 2 auf Ausbreitungsklasse 4 von 390 auf 520 m über NN an. Bei leicht stabiler Temperaturschichtung der Atmosphäre lag die Obergrenze der Mischungsschicht also höher als bei labiler Temperaturschichtung, wie sie nach dem Ausbreitungsklassenschema gegeben sein sollte. Das dürfte damit zusammenhängen, daß sich - wie schon erwähnt - im Winter bei unbedecktem oder wenig bedecktem Himmel gewöhnlich starke Inversionen ausbilden, welche verhindern, daß die Mischungsschicht eine größere Mächtigkeit erreicht. Des weiteren dürfte hier ebenfalls die gesteigerte Konvektion aufgrund der in größerem Umfang frei werdenden Kondensationswärme bei höheren Bewölkungsgraden eine Rolle spielen.

Abbildung 11 zeigt die Häufigkeit der einzelnen Höhenbereiche der Hauptsperrschicht in Abhängigkeit von der Ausbreitungsklasse. Bei allen drei Ausbreitungsklassen wurden Höhen zwischen 200 und etwa 2000 m gemessen.

Allerdings traten bei labiler Temperaturschichtung der Atmosphäre (Ausbreitungsklasse 2) die größeren Höhen häufiger und die niedrigeren seltener auf. Die Unterschiede zwischen Ausbreitungsklasse 3 und 4 waren gering.

Da die Lidarmessungen zwischen 8.00 und 15.30 Uhr durchgeführt wurden, zeigen die ermittelten Sperrschichthöhen zwar, in welchen Bereichen die Mischungsschichthöhen bei den einzelnen Ausbrei-

tungsklassen schwanken, nicht aber, welche Mischungsschichthöhen im Mittel bei den einzelnen Ausbreitungsklassen auftreten.

Um diese mittleren Höhen für die nur tagsüber auftretenden Ausbreitungsklassen 2 und 3 zu ermitteln, wurden die gemessenen Hauptsperrschichthöhen bis Sonnenaufgang bzw. Sonnenuntergang extrapoliert. Es wurde angenommen, daß die um 9.00 Uhr ermittelte Höhe der Hauptsperrschicht an dem betreffenden Tag auch schon bei Sonnenaufgang vorlag und die um 15.00 Uhr gemessene Höhe bis Sonnenuntergang bestehen blieb.

Den so erhaltenen Höhen wurde die für 9.00 Uhr bzw. 15.00 Uhr ermittelte Windgeschwindigkeit und Wolkenbedeckung zugeordnet.

Die sich bei dieser Extrapolation für die einzelnen Ausbreitungsklassen ergebenden Häufigkeitsverteilungen der Hauptsperrschichthöhen gehen aus Abbildung 12 hervor. Für Ausbreitungsklasse 2 ergibt sich bei Mittelung aller Höhen eine Hauptsperrschichthöhe von 970 m über NN, für Ausbreitungsklasse 3 eine Höhe von 760 m über NN und für Ausbreitungsklasse 4 eine Hauptsperrschichthöhe von 800 m über NN.

Für Ausbreitungsklasse 2 und 3 dürften die so ermittelten Höhen den bei diesen Klassen in etwa zu erwartenden Mischungsschichthöhen entsprechen, nicht aber bei Ausbreitungsklasse 4, da diese Klasse auch nachts auftritt und Nachtwerte nicht vorliegen.

Im Mittel über alle Ausbreitungsklassen ergab sich eine Hauptsperrschichthöhe von 810 m über NN. Bei einer Berücksichtigung mittlerer Bewölkungs- und Windverhältnisse errechnet sich für das Sommerhalbjahr ein um etwa 20 m niedrigerer Wert. Der sich bei der Umrechnung für das Winterhalbjahr ergebende Zuschlag von 20 m ist zu gering. Den tatsächlichen Verhältnissen dürfte ein Mehrfaches dieses Betrages entsprechen. Eine Berücksichtigung mittlerer Wetterverhältnisse führt infolgedessen eine Hauptsperrschichthöhe von etwa 850 m ergeben. Diese Höhe von 850 m dürfte auch annähernd der Mischungsschichthöhe entsprechen, die im Jahresmittel tagsüber zu erwarten ist. Eine Berücksichtigung mittlerer Wetterverhältnisse wird bei den Ausbreitungsklassen 2 und 3 zu Hauptsperrschichthöhen von etwa 1000 bzw. 800 m führen.

Nach Klug [4] ist bei labiler Temperaturschichtung (Ausbreitungsklasse 2) eine Mischungsschichthöhe von 1500 m zu erwarten und bei leicht labiler Temperaturschichtung (Ausbreitungsklasse 3) eine Mischungsschichthöhe von 1000 m.

Wenn das Ausbreitungsklassenschema nach Klug auch geringfügig anders definiert ist und Hauptsperrschicht- und Mischungsschichthöhe auch nicht immer übereinstimmen, so zeigt dieser Vergleich jedoch, daß die Mischungsschichthöhen für die Ausbreitungsklassen 2 und 3 mit 1500 bzw. 1000 m für Deutschland wahrscheinlich zu hoch angesetzt sind.

Schrifttum

- [1] BENKLEY, C.W. und L.L. Schulmann:
Estimating Hourly Mixing Depths from Historical
Meteorological Data.
Journal of Applied Meteorology,
17 (1979), S. 772-780.
- [2] SMITH, F.B.:
Some Thoughts on the Specification of the Boundary-Layer
relevant to Numerical Modelling.
Boundary-Layer Meteorology, 12 (1977), S. 307-330.
- [3] Verwaltungsvorschriften zum Genehmigungsverfahren nach
§ 6,15 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) für
Mineralölraffinerien und petrochemische Anlagen zur
Kohlenwasserstoffherstellung.
RdErl. d. Ministers für Arbeit, Gesundheit und Soziales
des Landes NW - III B 4/III B 6 - 8856.4 (III Nr. 13/1975)
v. 14.4.1975. Ministerialblatt NW, 28 (1975), 65,
S. 966-982.
- [4] KLUG, W.:
Ein Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungsbedingungen
aus synoptischen Beobachtungen.
Staub - Reinhaltung der Luft, 29 (1969), S. 143-147.

T a b e l l e n - u n d B i l d a n h a n g

Tabelle 1: Regressionsgleichungen

Sperrschichthöhe in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Bewölkungsgrad

mit

y: Sperrschicht [m]

u: Windgeschwindigkeit [m/s]

(mittlere Bodenwindgeschwindigkeit in den 3 Stunden vor dem Zeitpunkt der Lidarmessung)

B: Bewölkungsgrad [%]

(mittlere Bewölkung zwischen 1 Std. nach Sonnenaufgang und dem Meßzeitpunkt)

Die Hauptsperrschicht im Sommerhalbjahr

Uhrzeit	Regressionsgleichung
9.00	$y = 69,3 \cdot u - 1,0 \cdot B + 365$
10.00	$y = 15,2 \cdot u - 0,40 \cdot B + 688$
11.00	$y = 4,4 \cdot u - 2,4 \cdot B + 1036$
12.00	$y = -20,9 \cdot u - 3,9 \cdot B + 1400$
13.00	$y = -41,8 \cdot u - 3,8 \cdot B + 1673$
14.00	$y = -52,7 \cdot u - 8,9 \cdot B + 2089$
15.00	$y = -36,1 \cdot u - 8,7 \cdot B + 2110$

Die Hauptsperrschicht im Winterhalbjahr

Uhrzeit	Regressionsgleichung
9.00	$y = 8,9 \cdot u + 0,59 \cdot B + 354$
10.00	$y = 30,1 \cdot u + 0,60 \cdot B + 297$
11.00	$y = 26,3 \cdot u + 0,10 \cdot B + 349$
12.00	$y = 68,1 \cdot u - 0,79 \cdot B + 280$
13.00	$y = 81,2 \cdot u - 1,4 \cdot B + 314$
14.00	$y = 39,3 \cdot u + 0,15 \cdot B + 401$
15.00	$y = 16,6 \cdot u + 0,63 \cdot B + 517$

noch Tabelle 1

Die untere Sperrschicht im Sommerhalbjahr

Uhrzeit	Regressionsgleichung
9.00	$y = 32,8 \cdot u - 0,30 \cdot B + 248$
10.00	$y = 31,4 \cdot u - 1,2 \cdot B + 428$
11.00	$y = 24,9 \cdot u - 2,0 \cdot B + 664$
12.00	$y = 26,1 \cdot u - 2,3 \cdot B + 808$
13.00	$y = 11,2 \cdot u - 1,8 \cdot B + 937$
14.00	$y = -26,8 \cdot u - 4,3 \cdot B + 1384$
15.00	$y = -4,9 \cdot u - 6,6 \cdot B + 1556$

Die untere Sperrschicht im Winterhalbjahr

Uhrzeit	Regressionsgleichung
9.00	$y = 16,9 \cdot u + 0,18 \cdot B + 217$
10.00	$y = 22,4 \cdot u + 0,57 \cdot B + 180$
11.00	$y = 19,6 \cdot u + 0,048 \cdot B + 240$
12.00	$y = 32,7 \cdot u + 0,27 \cdot B + 204$
13.00	$y = 2,3 \cdot u + 0,78 \cdot B + 312$
14.00	$y = 27,7 \cdot u - 0,37 \cdot B + 318$
15.00	$y = 24,8 \cdot u - 0,31 \cdot B + 327$

Tabelle 2: Mittlere Bewölkung und Windgeschwindigkeit an den Meß-
tagen sowie im langjährigen Mittel

Monat	Anzahl der Meß- tage	Bewölkung		Windgeschwindigkeit in Anemometerhöhe	
		langjäh- riges Monats- mittel [%]	an den Meß- tagen [%]	langjäh- riges Monats- mittel [m/s]	an den Meß- tagen [m/s]
Januar	2	78	49	4,3	5,0
Februar	5	75	34	4,0	4,6
März	8	69	61	4,1	4,4
April	8	66	18	3,9	4,0
Mai	4	66	5	2,5	3,6
Juni	1	66	59	3,0	3,4
Juli	7	71	62	2,8	3,4
August	4	67	52	2,8	3,6
September	4	62	81	3,6	3,8
Oktober	5	66	58	3,1	4,0
November	9	77	48	3,6	4,6
Dezember	6	79	19	3,9	4,8
Jahres- mittel		70	46	3,5	4,1

Tabelle 3: Mittlere Höhen der Hauptspererschicht in Abhängigkeit von der Ausbreitungsklasse

Ausbreitungsklasse	Häufigkeit der Ausbreitungsklasse im langjährigen Mittel [%]	Häufigkeit der auf die einzelnen Ausbreitungsklassen entfallenden Lidarmessungen [%]	Höhe über NN im Jahresmittel [m]	Standardabweichung [%]	Anzahl der Messungen	Höhe über NN im Winter- bzw. im Sommerhalbjahr		Anzahl der Messungen
						(Winterhalbjahr)	(Sommerhalbjahr)	
5	22,3	0	-	-	-	-	-	-
4	63,6	58,6	733	57	276	519/1016	45/43	157/119
3	9,6	22,9	703	59	108	492/1034	28/47	66/42
2	4,5	18,5	965	53	87	393/1084	25/44	15/72
							insges.	<u>238/233</u>

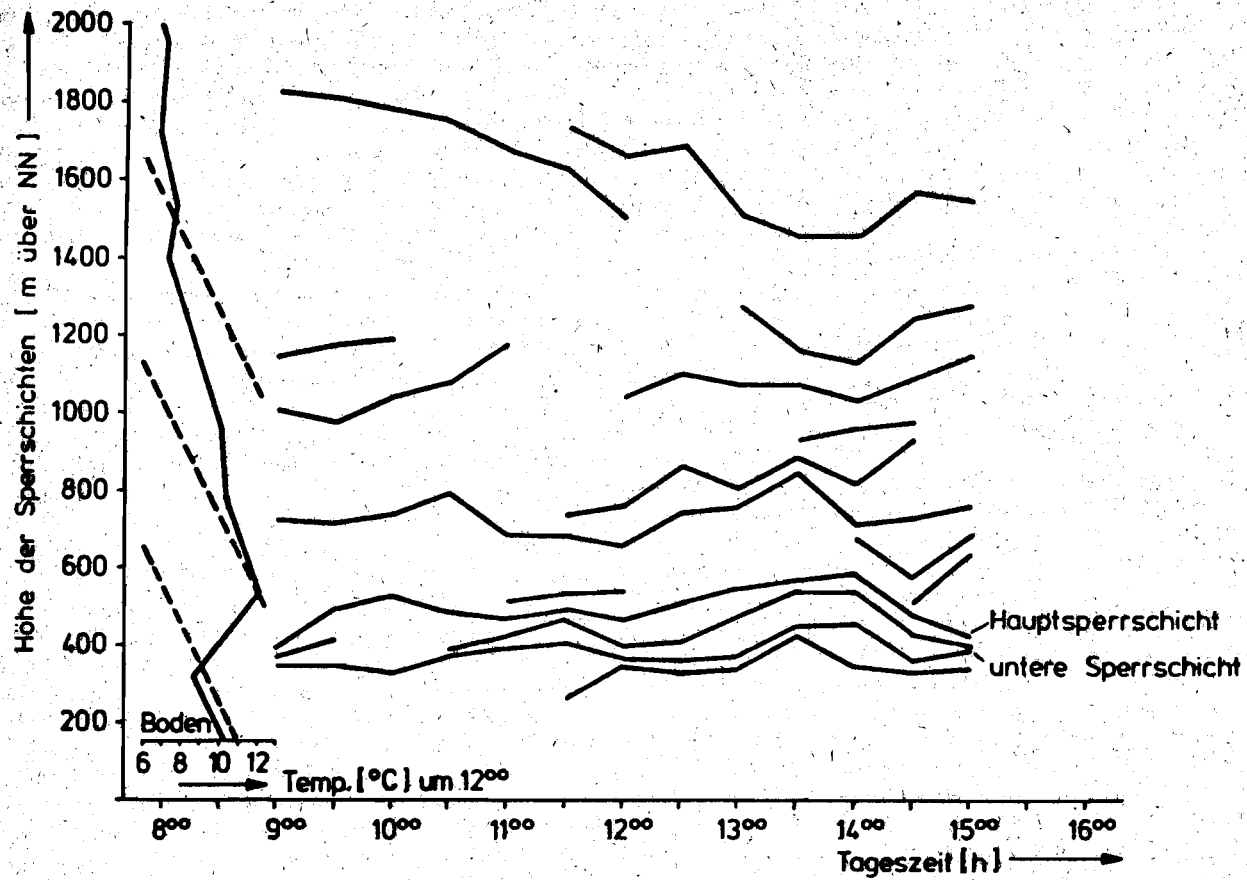


Abb. 1: Sperrschichten und Temperaturprofil am 2.11.1978

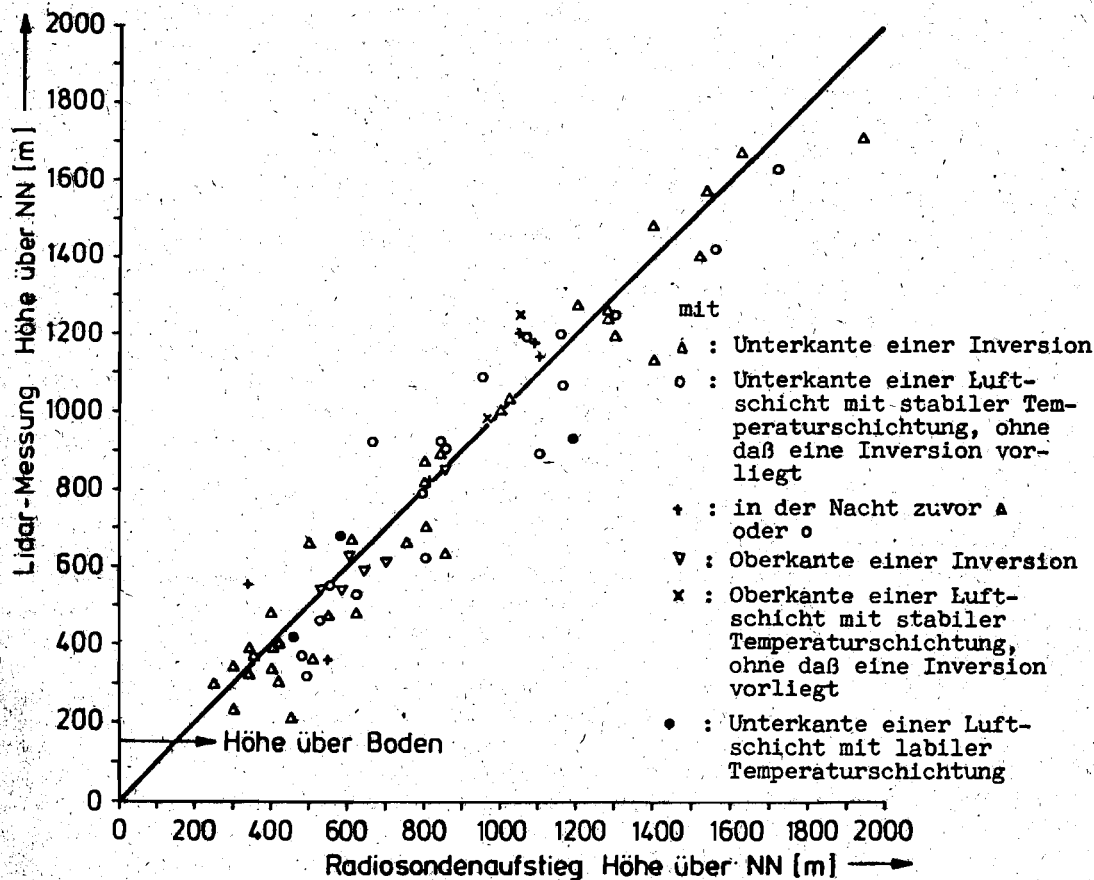


Abb. 2: Vergleich der Sperrschichten - Radiosondenaufstieg
WA-Essen. Lidarmessung LIS - Essen (Meßtermin 12⁰⁰ mittags)

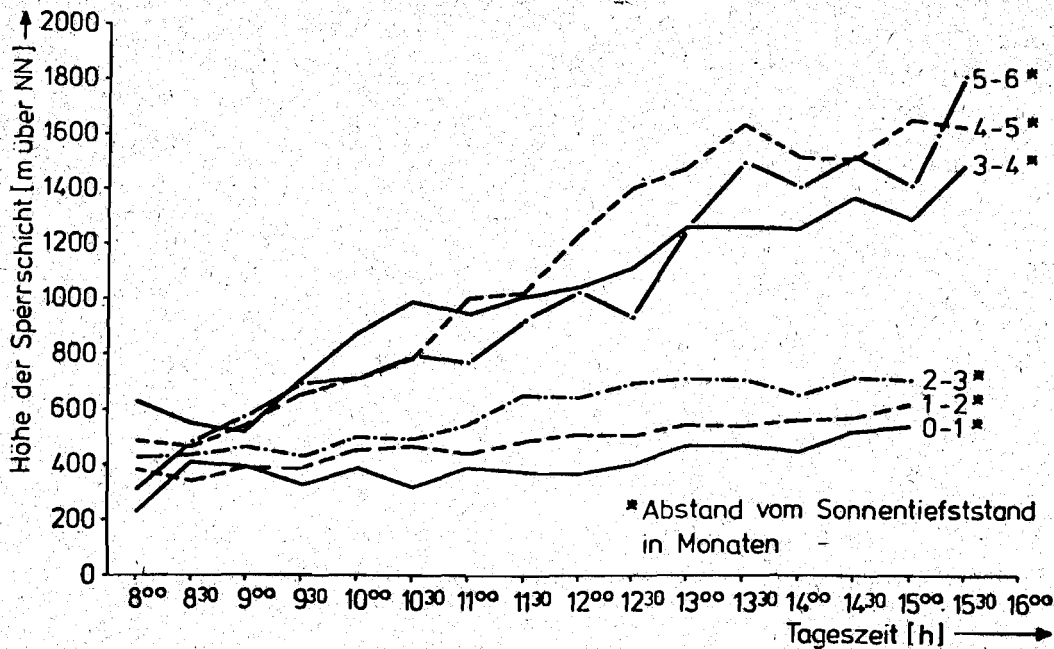


Abb. 3: Tageszeitlicher Verlauf der mit Lidar ermittelten mittleren Höhe der Sperrschicht mit dem kleinsten Transmissionswert (Hauptsperrschicht) für die Monate mit gleichem Abstand vom Sonnentiefststand am 21.12.

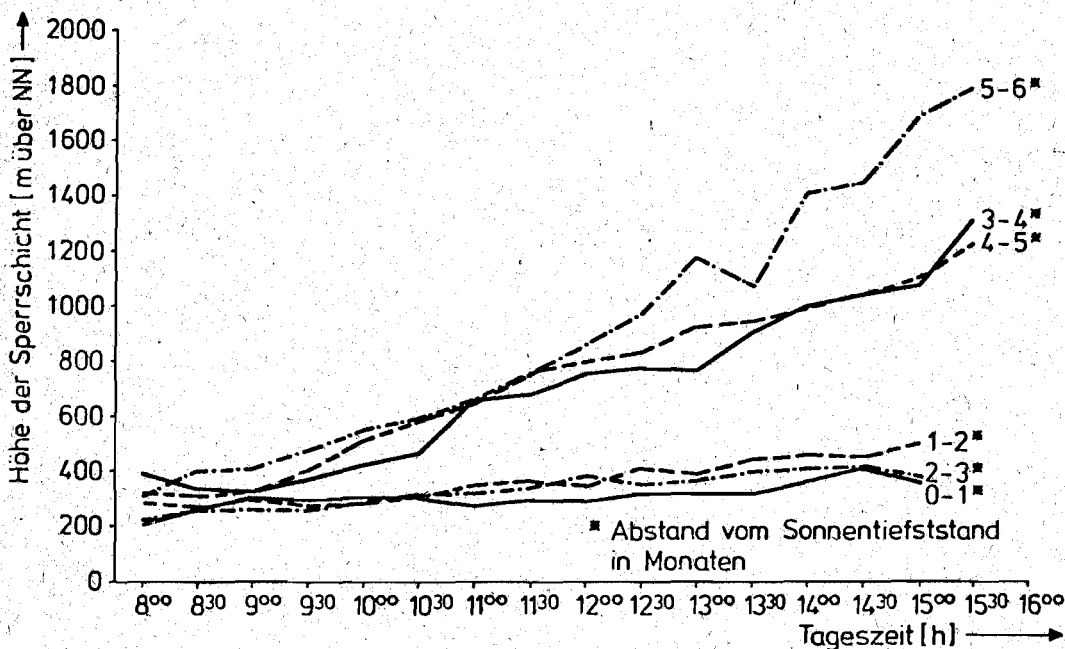


Abb. 4: Tageszeitlicher Verlauf der mit Lidar ermittelten mittleren Höhe der unteren Sperrschicht für die Monate mit gleichem Abstand vom Sonnentiefststand

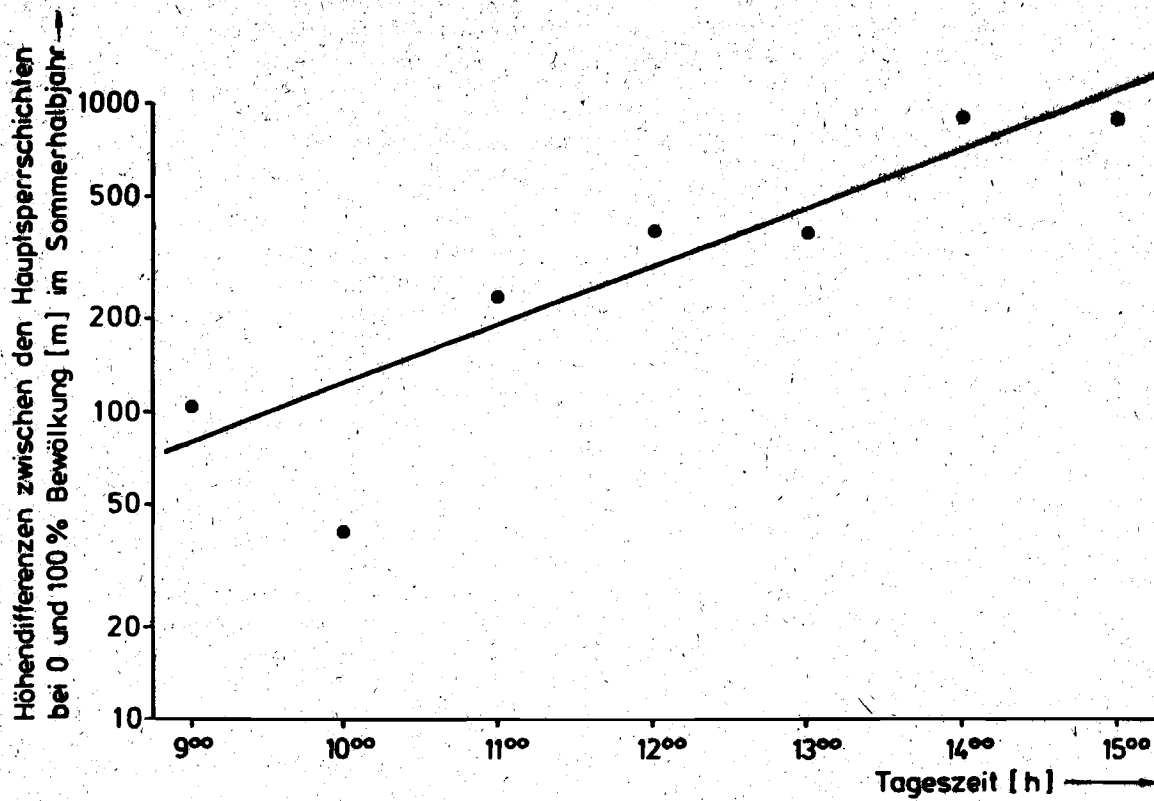


Abb. 5: Tageszeitliche Abhängigkeit der Höhe der Hauptsperrschicht vom Bewölkungsgrad

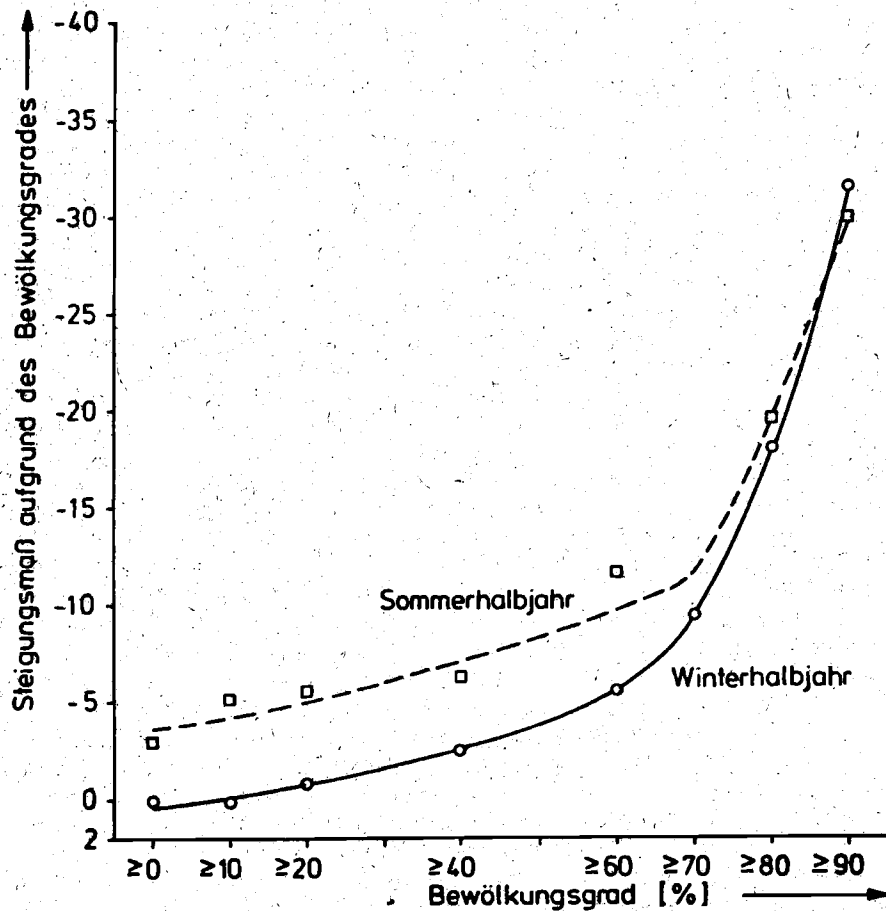


Abb. 6: Einfluß der Bewölkung auf die Höhe der Hauptsperrschicht (Mittel über dem Meßzeitraum zwischen 9:00 und 15:00 Uhr) bei verschiedenen Bewölkungsgraden

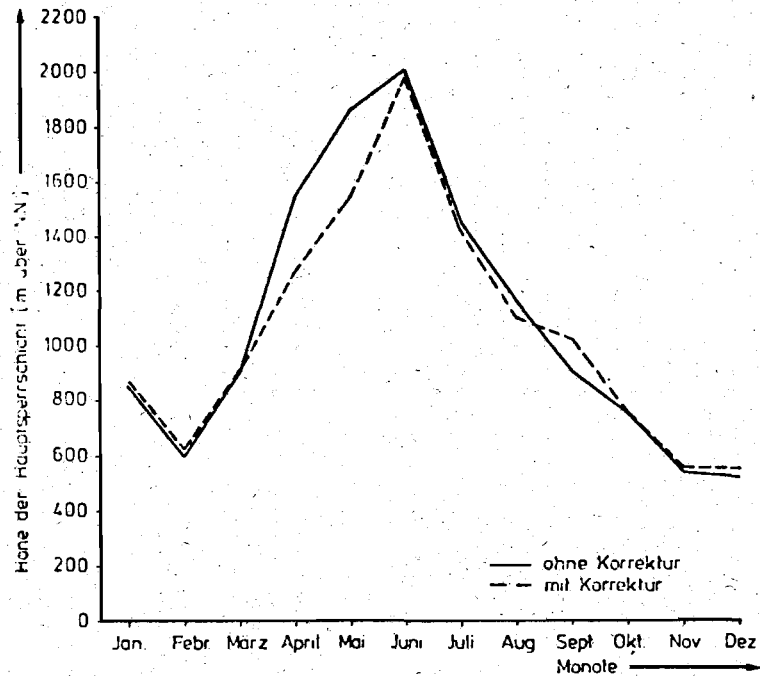


Abb. 8: Jahreszeitlicher Verlauf der mit Lidar ermittelten mittleren Höhe der Hauptsperrschicht (kleinster Transmissionswert) um 15⁰⁰ Uhr bei allen Bewölkungsgraden (0 - 100 %) mit und ohne Korrektur über Bewölkung und Windgeschwindigkeit nach den Formeln der multiplen Regressionsanalyse

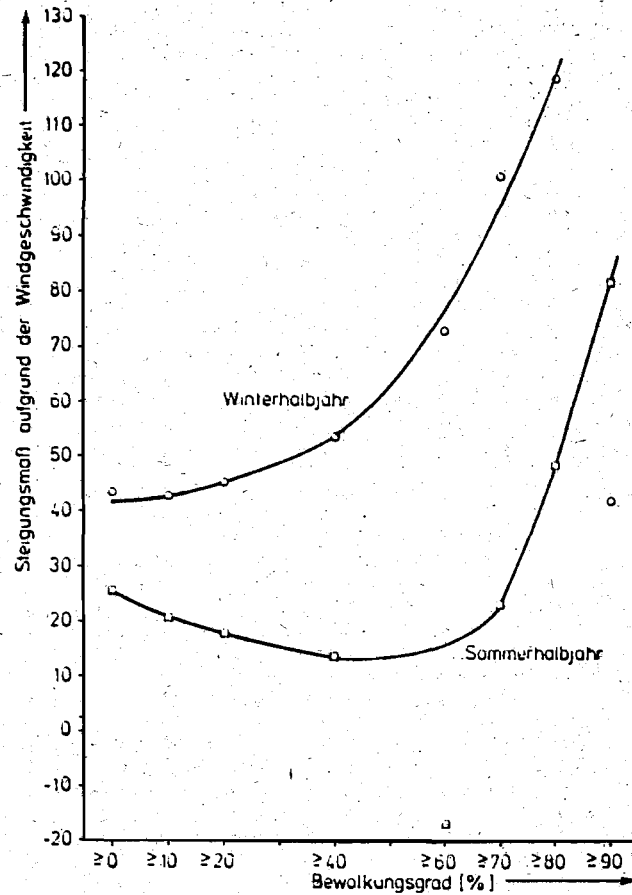


Abb. 7: Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Höhe der Hauptsperrschicht (Mittel über den Meßzeitraum zwischen 9⁰⁰ und 15⁰⁰ Uhr) bei verschiedenen Bewölkungsgraden

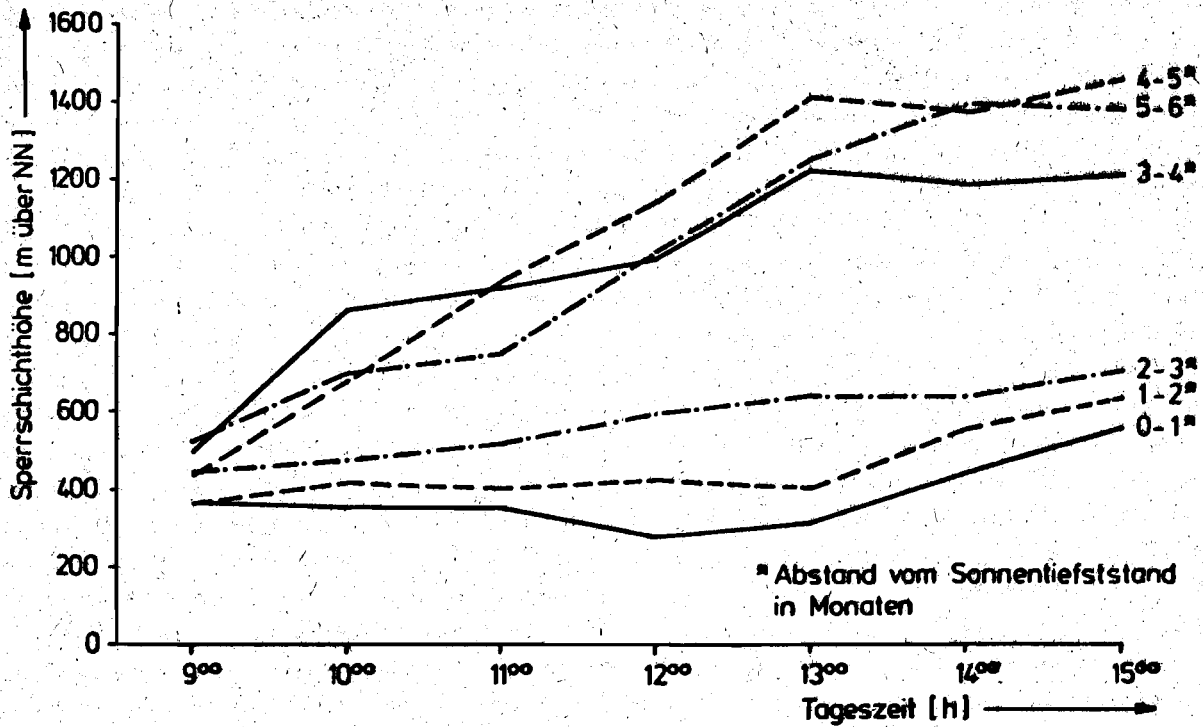


Abb. 9: Tageszeitlicher Verlauf der auf mittlere Wetterverhältnisse umgerechneten Höhe der Hauptsperrschicht für die Monate mit gleichem Abstand vom Sonnentiefstand am 21.12.

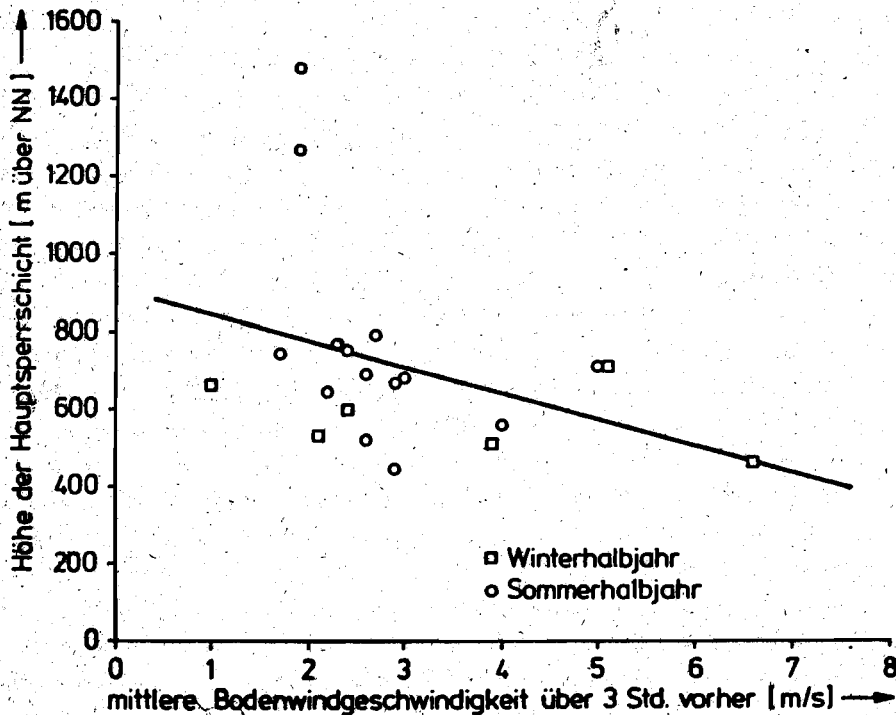


Abb. 10: Höhe der Hauptsperrschicht, bei der die SO_2 -Maximalkonzentration errechnet wurde, in Abhängigkeit von der Bodengeschwindigkeit

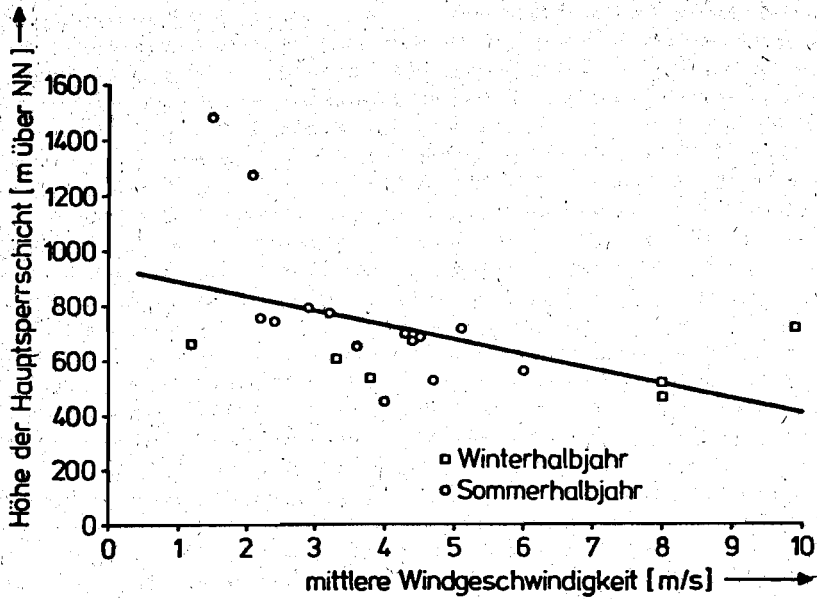


Abb. 11: Höhe der Hauptschicht, bei der die SO_2 -Maximalkonzentration erreicht wurde, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit zwischen Boden und Hauptschicht

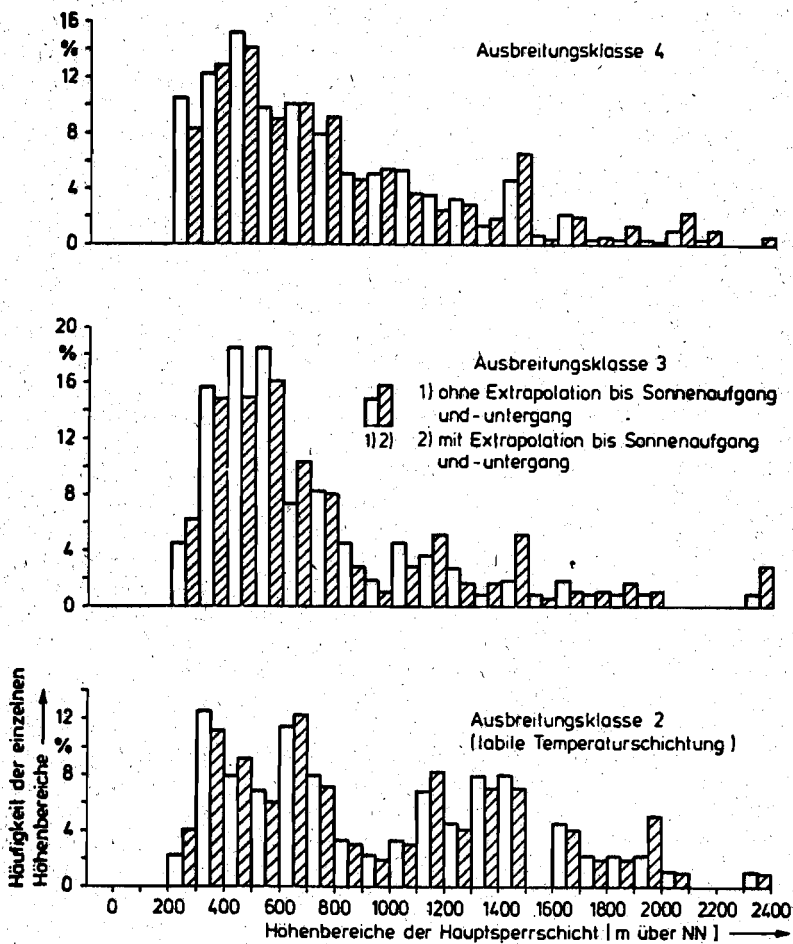


Abb. 12: Häufigkeit der einzelnen Höhenbereiche der Hauptschicht in Abhängigkeit von der Ausbreitungsklasse

BERICHTE DER

LANDESANSTALT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN

- LIS-Berichte -

- Bericht-Nr. 1:** KRAUTSCHEID, S. und P. NEUTZ: **- vergriffen -**
LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen.
- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems -
Kurztitel: Fernüberwachung mit LIDAR
1978. 47 Seiten mit 11 Abbildungen, 6 Tabellen und 4 Literaturhinweisen
- Bericht-Nr. 2:** BÜCK, M.:
Die Bedeutung unterschiedlicher Randbedingungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität.
Kurztitel: Randbedingungen bei der Beurteilung der Luftqualität.
1978. 44 Seiten mit 8 Abbildungen, 10 Tabellen und 20 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 3:** SCHEICH, G.:
Entwicklung und Anwendung von Ausbreitungsmodellen und Luftüberwachungsprogramme in den USA.
Kurztitel: Luftüberwachung und Ausbreitungsmodelle - Ein USA - Reisebericht -
1979. 47 Seiten mit 17 Abbildungen und 74 Literaturhinweisen
- Bericht-Nr. 4:** SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:
Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten am Bau.
Kurztitel: Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten.
1979. 133 Seiten mit 53 Abbildungen, 13 Tabellen und 6 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 5:** SPLITTGERBER, H.:
Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen.
Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen.
Kurztitel: Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen.
1979. 52 Seiten mit 13 Abbildungen, 2 Tabellen und 27 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 6:** STRAUCH, H.:
Ermittlung der Dämmwirkung von Dachentlüftern für Werkshallen im Einbaustand unter Berücksichtigung der baulichen Nebenwege.
Kurztitel: Dämmwirkung von Dachentlüftern.
1979. 33 Seiten mit 13 Abbildungen, 2 Tabellen und 7 Literaturhinweisen.

- Bericht-Nr. 7:** KRAUSE, G.M.H., B. PRINZ und K. ADAMEK:
Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Falschfarbenfotografie für die Aufdeckung und Dokumentation von Immissionswirkungen auf Pflanzen.
Kurztitel: Falschfarbenfotografie - Ein Mittel zur Erkennung von Pflanzenschäden.
1980. 43 Seiten mit 9 Abbildungen, 2 Tabellen und 11 Karten.
- Bericht-Nr. 8:** WIETLAKE, K.H.:
Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schabotte-Schmiedehämmern.
Kurztitel: Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schmiedehämmern
1980. 59 Seiten mit 15 Abbildungen, 5 Tabellen und 7 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr. 9:** STRAUCH, H.:
Methoden zur Aufstellung von Lärminderungsplänen.
Kurztitel: Konzept für Lärminderungspläne.
1980. 49 Seiten mit 11 Abbildungen und 18 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr.10:** HILLEN, R:
Untersuchung zur flächenbezogenen Geräuschbelastungs-Kennzeichnung -Ziele, Methodik, Ergebnisse-.
Kurztitel: Flächenbezogene Geräusch-Immissionen.
1980. 75 Seiten mit 18 Abbildungen, 7 Tabellen und 12 Literaturhinweisen.
- Bericht-Nr.11:** Manns H., H. Gies und W. Stramplat:
Erprobung des Staub-Immissionsmeßgerätes FH62I für die kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Luft.
Kurztitel: Schwebstaubmeßgerät FH62I für die automatisierte Immissionsmessung.
1980. 26 Seiten mit 10 Abbildungen und 2 Literaturhinweisen.