

Mitteilungen
des
Deutschen Wetterdienstes

Nr. 39
(Band 5)

DK 551.510.42:551.510.72:621.039

Zur meteorologischen Begutachtung der Standorte
von Kernkraftwerken mit einem Einblick in Grund-
lagen und Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung

von

Anneliese Gutsche, Helga Pfeiffer und Gerhard Seifert

(mit 9 Tabellen und 19 Abbildungen im Text)

Offenbach a. M. 1966
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes



Zu 97669

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	5
Abstract	5
1. Einleitung	5
2. Einblick in Ergebnisse theoretischer bzw. semi-empirischer Untersuchungen zur Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre	7
2.1. Einige Formeln zur Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen	7
2.1.1. Formeln zur Berechnung der Schadstoffkonzentration von O. G. Sutton	8
2.1.2. Eine von M. L. Barad und D. A. Haugen verwendete Formel	10
2.1.3. Die von F. Pasquill verwendeten Formeln	10
2.1.4. Die von H. E. Cramer verwendeten Formeln	11
2.1.5. Die von F. Wippermann und W. Klug verwendeten Formeln	13
2.1.6. Hinweis auf Formeln von R. Trappenberg	14
2.1.7. Hinweis auf einige den „Fumigation-Effekt“ und den „Wash-Out-Effekt“ berücksichtigende Formeln	15
2.1.8. Eine vereinfachte Formel zur Berechnung der Schadstoffkonzentration	15
2.2. Diskussion über die in den Ausbreitungsformeln vor- kommenden Parameter n , C_y , C_z , σ_y , σ_z sowie über die Schornsteinüberhöhung und das Meßzeitintervall	16
2.2.1. Der meteorologische Exponent „ n “	17
2.2.2. Die virtuellen Diffusionskoeffizienten C_y und C_z	19
2.2.3. Die Streuungen σ_y und σ_z	24
2.2.4. Berücksichtigung der Schornsteinüberhöhung	29
2.2.5. Zur Bedeutung der Meßdauer	30
2.3. Vergleiche zwischen Messungen und Ergebnissen der Ausbreitungsrechnung	31
2.3.1. Untersuchungen von D. B. Turner über die SO ₂ -Konzentration in einem Stadtgebiet	32
2.3.2. Untersuchungen von R. Trappenberg und M. Diem über den Staubniederschlag einzelner Werkanlagen	33
2.3.3. Diffusionsexperimente	36
2.3.4. Untersuchungen über die Schornsteinüberhöhung	37
2.4. Zur Verwendung von Trajektorien	38
3. Zur praktischen Durchführung klimatologischer Standortbeurteilungen	39
3.1. Die geforderten meteorologischen Angaben	40
3.1.1. Grunddaten	40
3.1.2. Ergänzungsangaben	41
3.1.2.1. Die Variation der Windrichtung	41
3.1.2.2. Erfassung von Inversionen	41
3.1.2.3. Reliefbedingte Luftströmungen	41

	Seite
3.2. Erlangung der benötigten meteorologischen Daten . . .	41
3.2.1. Beobachtungen des aerologischen Netzes	41
3.2.1.1. Drachen- und Fesselballonaufstiege	42
3.2.1.2. Flugzeugaufstiege	42
3.2.1.3. Radiosondenaufstiege	42
3.2.2. Zur Durchführung von Sondermessungen	43
3.2.2.1. Messungen an Gittermasten	43
3.2.2.2. Mobile Ballonstationen	44
3.2.2.3. Rauchbeobachtungen	45
3.2.2.4. Spezielle Meßstationen im Tal und am Hang . . .	46
3.2.3. Daten von Bodenstationen des Deutschen Wetterdienstes	46
3.2.3.1. Stärkewindrosen	46
3.2.3.2. Differenzen zwischen Stationen in verschiedener Höhenlage zur Abschätzung der Stabilität	47
3.2.3.3. Verwendung von Beobachtungen an einer Boden- station zur Abschätzung der Stabilität	47
3.3. Hinweise zur Aufbereitung der meteorologischen Daten	50
3.3.1. Die „solare“ Zeiteinteilung	52
3.3.2. Skaleneinteilungen für Windbeobachtungen und Temperaturgradienten	52
3.3.3. Reduktion auf längere Perioden	54
3.4. Empfehlungen für ein Minimalprogramm der meteoro- logischen Beurteilung bei verschiedenen Typen von Standorten	55
3.4.1. Sehr reliefschwacher Standort	55
3.4.2. Standort mit mäßig starkem Relief	56
3.4.3. Standort mit starkem Relief	56
3.5. Maximal ungünstige Fälle	56
3.6. Strahlungsfluß von Emissionswolken	57
3.7. Grundlegende Arbeiten des Deutschen Wetterdienstes (ohne Ausrichtung auf einen speziellen Standort) . . .	57
3.7.1. Windstatistik	57
3.7.2. Inversionsstatistik	57
3.7.3. Nebelkarten	58
3.7.4. Kleinaerologische Aufstiege	58
4. Schluß	58
Literatur	59

Die vorliegende Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministers für wissenschaftliche Forschung (Kennzeichen: St.Sch. 155) gefördert.

Anschriften der Verfasser:

Dr. Anneliese Gutsche, Deutscher Wetterdienst - Zentralamt -
605 Offenbach a. M., Frankfurter Straße 135

Dipl.-Met. Helga Pfeiffer, 6501 Budenheim, Mombacher Straße 66

Dr. Gerhard Seifert, Deutscher Wetterdienst - Zentralamt -
605 Offenbach a. M., Frankfurter Straße 135

Zusammenfassung

Es werden zunächst Formeln verschiedener Autoren für die Berechnung der Schadstoffkonzentration dargelegt und die hierin auftretenden Parameter diskutiert. Ferner werden Ergebnisse einiger Untersuchungen zusammengestellt, in denen beobachtete Ausbreitungswerte verglichen werden mit Daten, die auf dem Wege der Ausbreitungsrechnung ermittelt wurden.

Im folgenden Teil wird die Erlangung derjenigen meteorologischen Daten erörtert, die in der Praxis der Standortbeurteilung verwendet werden. Hieran schließen sich einige Hinweise zur Aufbereitung solcher Daten sowie Empfehlungen für ein Minimalprogramm der meteorologischen Begutachtung verschiedener Standorttypen.

Abstract

In the first part formulae of different authors for the calculation of concentration of contaminants are presented followed by a discussion of the parameters occurring herein. Further is given a compilation of results of several investigations in which observed values of spreading are compared with data obtained by calculation.

In the following part the authors discuss possibilities of gaining meteorological data being used for expertises on atmospheric conditions of sites of plants. Finally some recommendations for a minimum programme of meteorological expertises for different types of sites are given following hints for the preparation of data of the above kind.

1. Einleitung

In neuester Zeit wird in der Bundesrepublik Deutschland die Zahl der Kraftwerke beträchtlich vergrößert, um mit dem steigenden Bedarf an Energie Schritt zu halten. Dabei kommt der Errichtung von Kernkraftwerken eine ständig wachsende Bedeutung zu. Erinnert sei beispielsweise an die betreffenden Anlagen in Stetternich b. Jülich, in Kahl am Main und in Gundremmingen bei Ulm.

Die Energiegewinnung durch Kernspaltungsprozesse ruft viele neue Probleme hervor und vergrößert den Aufgabenbereich der Verantwortlichen. Bei den technischen und wirtschaftlichen Überlegungen ist auch die Sicherung der Bevölkerung gegen radioaktive Strahlung zu einem der wichtigsten Diskussionspunkte geworden.

Im allgemeinen sind die Strahlungsbelastungen den aus einem Schornstein austretenden radioaktiven Stoffen zuzuschreiben. Strahlungsbelastungen können auch durch das Ausfließen von radioaktiven Stoffen an Leckstellen im Reaktorgebäude verursacht werden oder im Extremfall Folgen eines Reaktorunfalls sein. Hierbei werden die Schadstoffe in Bodennähe aus der Anlage freigesetzt. Das radioaktive Material kann in dreifacher Weise, nämlich durch die direkte Strahlung der radioaktiven Wolke, durch die Einatmung und durch die Nahrungsaufnahme gefährlich werden (s. Megaw (47)). So ist es verständlich, daß mit der Möglichkeit des Freiwerdens von Schadstoffen ernste Probleme erwachsen. Beispielsweise muß festgestellt werden, bis zu welchen Dosiswerten der menschliche Organismus einer radioaktiven Strahlung ausgesetzt werden darf (zum Begriff „Dosis“ s. Blässer und Wirtz (6)). Die verschiedenen Dosiszahlen, die von den einzelnen Ländern als Grenzwerte angegeben werden, zeigen, daß man sich über die volle Wirkung der einzelnen radioaktiven Stoffe auf den menschlichen Organismus, auf das Tier und auf die Pflanze noch nicht im klaren ist (s.

Schwegler (59), Rjasanow (56)). Entsprechendes gilt für andere Luftverunreinigungen. Während die Bestimmung der höchstzulässigen Dosis oder der sog. maximalen Immissionskonzentrationswerte (MIK-Werte) (s. VDI-Handbuch (78)) bzw. der maximalen Arbeitsplatzkonzentrationswerte (MAK-Werte) (s. VDI-Handbuch (78), Georgii und Weber (24)) in den Aufgabenbereich des Mediziners gehört, besteht die Hauptaufgabe des Meteorologen darin, eine Auskunft über die atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen für Schadstoffe zu erteilen. Zwangsläufig ergibt sich daraus die Notwendigkeit, das Lokalklima des Reaktorgeländes und dessen weiterer Umgebung zu untersuchen. In der Vertikalen beschränkt man sich dabei meist auf den untersten Bereich der Atmosphäre von einigen hundert Metern Mächtigkeit. Um die Ausbreitungsprozesse abschätzen zu können, sind in erster Linie Angaben über Windrichtung und -stärke sowie die Temperaturstruktur im Bereich des Reaktors notwendig und damit zumeist Sondermessungen dringend erwünscht. Darüber hinaus müssen von einem ausgedehnteren Gebiet meteorologische Informationen gewonnen werden, um klimatische Unterschiede in der Umgebung des Reaktors berücksichtigen zu können.

Die Auskünfte des Meteorologen werden in der Regel in Form von Gutachten (z. B. von Seiten des Deutschen Wetterdienstes für Stetternich, Kahl, Hitzacker, Gundremmingen) erteilt. Es ist dabei im Einzelfall sehr aufwendig und kaum durchführbar, eine umfassende Sichtung der in der meteorologischen Literatur zu diesem Thema vorhandenen Veröffentlichungen vorzunehmen. In diese Lücke soll der erste Teil des vorliegenden Beitrags eingeordnet werden. Die Verfasser möchten an dieser Stelle ausdrücklich betonen, daß sie wegen der Kürze der ihnen zur Verfügung stehenden Zeitspanne lediglich einen Einblick in die umfangreiche meteorologische Literatur zu geben vermögen, die über diesen Problemkreis existiert. Vorzugsweise sind Untersuchungsergebnisse aus neuerer Zeit zusammengetragen. Sie stammen meist aus der deutschen oder angelsächsischen Literatur; u. a. konnten Arbeiten in russischer Sprache, beispielsweise von Vorontsov, hier leider nicht berücksichtigt werden (s. z. B. Blackadar und Panofsky (5)). Es darf nicht vergessen werden, daß auch die meisten Resultate, welche man bereits vor dem zweiten Weltkrieg bei Untersuchungen über die Ausbreitung von Rauch und Gas in der Atmosphäre erhielt, auf den Transport von Reaktoremissionen angewendet werden können. Hierauf hat u. a. Meade (46) hingewiesen.

In diesem Teil der Arbeit werden zunächst Resultate einiger theoretischer bzw. semi-empirischer Untersuchungen über die Ausbreitung von Schadstoffen dargestellt. Dann wird auf die für die Berechnung der Schadstoffkonzentration wichtigsten Größen in den zuvor angeführten Formeln näher eingegangen. Hierbei wird anhand einiger Beispiele aus speziellen Arbeiten verschiedener Autoren gezeigt, welche Zahlenwerte diese Parameter annehmen können. Inwieweit die Beträge von „theoretisch“ berechneten und von gemessenen Schadstoffkonzentrationen bzw. -ablagerungen übereinstimmen, zeigt ein weiterer Abschnitt. Leider gibt es zu dieser Frage in der meteorologischen Literatur nur wenige Arbeiten. (Untersuchungen über den Prozeß des Strahlungsflusses einer radioaktiven Emissionswolke werden nicht betrachtet.)

Ein Einblick in die Literatur zur Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre kann leider einzelne Spezialuntersuchungen nicht ersetzen. Diese werden wegen der lokalklimatischen Besonderheiten, welche die Umgebung jedes Reaktorstandortes aufweist, weiterhin notwendig bleiben. Deshalb werden im zweiten Teil der Arbeit die Möglichkeiten der praktischen Durchführung der

meteorologischen Beurteilung eines Standortes behandelt. Dabei gilt es Wege zu finden, die zu einem vertretbaren Verhältnis führen zwischen Zeitaufwand, Wirtschaftlichkeit, Datengenauigkeit und Sicherheitsforderung.

Die wesentlichen im folgenden verwendeten Formelzeichen haben die nachstehende Bedeutung:

$c = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{f}{g} \right)$	Maßzahl für die Änderung des Achsenverhältnisses einer Schadstofffahne
C_x, C_y, C_z	virtuelle Diffusionskoeffizienten
f	Exponent in der Abhängigkeit der Streuung σ_y von der Quelldistanz
F	Wert der Streuung σ_y in der Quelldistanz $x = 1$
g	Exponent in der Abhängigkeit der Streuung σ_z von der Quelldistanz
G	Wert der Streuung σ_z in der Quelldistanz $x = 1$
h	Schornsteinhöhe bzw. Höhe einer Quelle über dem Erdboden
Δh	Schornsteinüberhöhung
H	vertikale Ausbreitung einer Schadstofffahne in der Entfernung r
m	Exponent des vertikalen Windprofils
n	meteorologischer Exponent (nach Sutton)
N	Makroviskosität
Q	Quellstärke
r	Quelldistanz
t	Zeit
T	Mittelbildungszeit
\bar{u}	mittlere Windgeschwindigkeit
$\bar{u}(z)$	mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z
u', v', w'	turbulente Zusatzgeschwindigkeiten in der x-, y- bzw. z-Richtung
x, y, z	kartesische Koordinaten
x_{\max}	Entfernung des Ortes maximaler Schadstoffkonzentration von der Schadstoffquelle
z_0	Höhe eines Bezugsniveaus über dem Erdboden
Γ	Gammafunktion
Θ	Ausbreitungswinkel in der Horizontalen
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Streuung der Schadstoffverteilung in der Richtung x, y bzw. z
σ_A	Streuung der azimuthalen Windrichtung
σ_E	Streuung des Höhenwinkels des Windes
χ	Schadstoffkonzentration
χ_{\max}	maximale Schadstoffkonzentration am Erdboden

2. Einblick in Ergebnisse theoretischer bzw. semi-empirischer Untersuchungen zur Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre

2.1. Einige Formeln zur Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen

Das Hauptproblem, das von seiten der Praktiker an die Theoretiker herangetragen wird, läßt sich allgemein folgendermaßen formulieren: Gegeben ist eine Quelle, die Schadstoff in Form von Gas oder feinen Suspensionen emittiert. Gesucht werden Beziehungen, mit deren Hilfe die Diffusion genügend genau aus der

Kenntnis des Zustandes der Atmosphäre vorhergesagt werden kann. Die besondere Schwierigkeit der Problemstellung liegt darin, daß der Zustand der Atmosphäre, soweit er für die Ausbreitung von Fremdstoffen maßgebend ist, zumeist nur unvollkommen bekannt ist. Darum ist es in der Regel äußerst schwierig, die Wirkung der oft sehr kompliziert ablaufenden Diffusionsvorgänge vorausschauend quantitativ abzuschätzen.

Im folgenden werden einige Formeln diskutiert, mit deren Hilfe die Konzentration eines Schadstoffes bestimmt werden kann. Sie gelten für Flachlandverhältnisse. Ihnen liegt die Annahme zugrunde, daß die Verteilungen der Schadstoffkonzentration sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen Gaußsche Verteilungen sind. Inwieweit diese Annahme in der Natur erfüllt ist, soll hier nicht näher diskutiert werden.

Es existieren auch Untersuchungen, die solche Gaußverteilungen nicht annehmen, beispielsweise diejenigen von Bosanquet und Pearson sowie die von Calder (s. Pasquill (49)). Auf diese Arbeiten wird hier nicht eingegangen.

Für unsere spezielle Fragestellung hinsichtlich der Ausbreitung von Emissionen aus Kernreaktoren interessieren im allgemeinen nur die Konzentrationen, die kontinuierlichen Punktquellen in der Höhe $h \neq 0$ zuzuschreiben sind. Lediglich für die Betrachtung eines „Reaktorunfalls“ müssen momentane Volumenquellen am Boden angenommen werden; nach Meinung von Meade (46) ist aber der Fehler, der dadurch entsteht, daß man anstelle einer Volumenquelle eine Punktquelle betrachtet, klein im Verhältnis zu den Fehlern, die durch Vernachlässigung anderer unbekannter Faktoren bei der Berechnung entstehen.

2.1.1. Formeln zur Berechnung der Schadstoffkonzentration von O. G. Sutton

Bei der theoretischen Behandlung der Ausbreitung der Schadstoffe in der Atmosphäre werden besonders die Überlegungen von Sutton (70, 71, 72) von anderen Autoren in ungeänderter oder in etwas modifizierter Art (s. Hasek (29)) übernommen. Es wird dabei meist ein kartesisches Koordinatensystem verwendet, dessen Ursprung im Fußpunkt der Schadstoffquelle liegt und welches derart orientiert ist, daß die x-Achse mit der mittleren Windrichtung zusammenfällt. Sutton entwickelt die sog. „statistische Methode“ auf den von Taylor gegebenen Grundlagen (s. Pasquill (48)). Die Schadstoffkonzentration, die einer momentanen Punktquelle in $(0, 0, h)$ zuzuschreiben ist, beträgt am Punkt (x, y, z) zur Zeit t (Sutton (72), s. auch Meade (46))

$$\begin{aligned}
 [1] \quad \chi(x, y, z; t) = & \frac{Q e^{-\left(\bar{u} t\right)^{n-2} \left\{ \frac{(x - \bar{u} t)^2}{C_x^2} + \frac{y^2}{C_y^2} \right\}}}{\pi^{3/2} C_x C_y C_z (\bar{u} t)^{\frac{3(2-n)}{2}}} \times \\
 & \times \left\{ e^{-\frac{(\bar{u} t)^{n-2} (z-h)^2}{C_z^2}} + e^{-\frac{(\bar{u} t)^{n-2} (z+h)^2}{C_z^2}} \right\}
 \end{aligned}$$

Für eine kontinuierliche Punktquelle in $(0, 0, h)$ lautet die entsprechende Beziehung

$$[2] \quad \chi(x, y, z) = \frac{Q e^{-\frac{y^2}{C_y^2 x^{2-n}}}}{\pi C_y C_z \bar{u} x^{2-n}} \left\{ e^{-\frac{(z-h)^2}{C_z^2 x^{2-n}}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{C_z^2 x^{2-n}}} \right\}$$

Wenn also die erforderlichen technischen Daten und die betreffenden meteorologischen Größen bekannt sind, ist die Schadstoffkonzentration an einem bestimmten Ort je nach der Art der Quelle berechenbar.

Von besonderem Interesse ist immer wieder die Frage nach der am Erdboden ($z = 0$) anzutreffenden maximalen Konzentration χ_{\max} . Da χ_{\max} im Lee der kontinuierlichen Punktquelle zu erwarten ist, leitet Sutton die maximale Konzentration für einen Punkt ($x_{\max}, 0, 0$) ab.

Für eine kontinuierliche Punktquelle erhält man

$$[3] \quad x_{\max} = \left(\frac{h}{C_z} \right)^{\frac{2}{2-n}}$$

$$[4] \quad \chi_{\max}(x_{\max}, 0, 0) = \frac{2 Q}{e \pi \bar{u} h^2} \left(\frac{C_z}{C_y} \right)$$

Diese Formeln besagen, daß die Schadstoffkonzentration am Erdboden ein Maximum annimmt in einer Entfernung, die für kleine n -Werte (s. Abschnitt 2.2.1.) ungefähr proportional der Schornsteinhöhe ist, und daß die maximale Konzentration direkt proportional der Quellstärke und umgekehrt proportional dem Quadrat der Schornsteinhöhe ist.

Die Formeln [1] und [2] können natürlich modifiziert werden. Setzt man beispielsweise in Formel [2] $z = 0$, so erhält man die Konzentration $\chi(x, y, 0)$ einer Punktquelle $(0, 0, h)$ in der x, y -Ebene. Setzt man außerdem $h = 0$, so erhält man die Konzentration $\chi(x, y, 0)$, die einer sich am Erdboden befindenden Punktquelle zuzuschreiben ist.

Auf einige Annahmen, die den obigen Formeln zugrunde liegen, sei hier aufmerksam gemacht:

1. die Wolke steigt nicht als Folge ihres eigenen Auftriebs auf (s. Sutton (71, 72));
2. die Partikel, welche die Wolke bilden, sind so klein, daß sie in Suspension bleiben (Partikeldurchmesser der Größenordnung von 10^{-4} cm oder kleiner (s. Sutton (70, 71, 72));
3. der Erdboden wird als nicht absorbierend und als undurchlässig für die diffundierende Substanz gedacht (s. Sutton (72));
4. es wird eine Reflexion des Schadstoffes am undurchlässigen Boden angenommen (s. Sutton (72));
5. bei der Einführung von \bar{u} wurde die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit vernachlässigt (s. Sutton (70, 71)).

Diem und Trappenberg (16) weisen darauf hin, daß die Formeln von Sutton für nahezu alle Staubfragen Gültigkeit besitzen, sofern die Fallgeschwindigkeit der Teilchen solche Werte annimmt, daß die Voraussetzungen für das Stokessche bzw. Stokes-Cunninghamsche Gesetz erfüllt sind und sofern die Trägheitskräfte bei der Bewegung der Teilchen keine überwiegende Rolle spielen. Für laminare Strömung könne damit der Durchmesser von Rußteilchen bis zu 60μ betragen, bei turbulenter Strömung bleibe der Fehler selbst bei Teilchen bis zu 500μ Durchmesser gering (s. auch Abschnitt 2.1.6.).

Diem und Trappenberg (17) nehmen auf Grund eines Vergleichs zwischen den theoretisch erwarteten und den praktisch gemessenen Werten der Schadstoffkonzentration an, daß teilweise erhebliche Absorption stattfindet. Zahlenmäßige Angaben werden darüber jedoch nicht gemacht. Reuter (55) verwendet eine

Gleichung für die Bestimmung der Konzentration, in der durch ein spezielles Glied die teilweise Absorption des Schadgases am Erdboden berücksichtigt werden soll. In (82) führt W i p p e r m a n n aus, daß die tatsächlichen Gegebenheiten zwischen den beiden Grenzfällen der vollständigen Reflexion und der vollständigen Absorption liegen. Dieser Fall, in dem die Erdoberfläche als sog. elastische Barriere wirkt, ist schwer zu meistern. Man beschränkt sich deshalb im allgemeinen auf den relativ leicht zu handhabenden Grenzfall der reflektierenden Barriere, was auch bei Ableitung von Gleichung [2] geschehen ist.

Verschiedentlich wird darauf hingewiesen, daß die Suttonschen Ausbreitungsformeln unterhalb eines gewissen Schwellenwertes von \bar{u} keine brauchbare Aussage erlauben. G e i s l e r leitet in (23) eine Beziehung für die Berechnung solcher Mindestgeschwindigkeiten \bar{u}_{\min} ab. Daraus ergibt sich beispielsweise für $n = 0,25$, $C_y = C_x = 0,16 \text{ cm}^{n/2}$, $C_z = 0,11 \text{ cm}^{n/2}$, $h = 25 \text{ m}$ ein \bar{u}_{\min} von $0,03 \text{ m/sec.}$ — F o r t a k (22) beschäftigt sich mit dem Fall der Windstille.

Der Bodenrauigkeit wird durch Einführung der Makroviskosität N Rechnung getragen (s. Abschnitt 2.2.2.).

2.1.2. Eine von M. L. Barad und D. A. Haugen verwendete Formel

Hier sei bereits auf eine Untersuchung von B a r a d und H a u g e n (4) kurz eingegangen, über die weiter unten noch referiert wird. Die beiden Verfasser überprüfen einige Grundlagen der Suttonschen Arbeiten über die Schadstoffausbreitung an Hand der Meßdaten vom Projekt „Prairie Grass“. Sie gehen dabei von der Suttonschen Formel [2] aus. Das wichtigste Ergebnis ihrer Analysen besteht in der Unterscheidung zwischen einem n_y - und einem n_z -Wert; ersterer dient zur Charakterisierung der seitlichen, letzterer zur Erfassung der vertikalen Diffusion. Gaußsche Konzentrationsverteilungen werden deshalb nach B a r a d und H a u g e n (4) besser durch folgende Gleichung wiedergegeben

$$[5] \quad \chi(x, y, z) = \frac{Q e^{-\frac{y^2}{C_y^2 x^{2-n_y}}}}{\bar{u} \pi C_y C_z x^{2-(n_y+n_z)/2}} \left\{ e^{-\frac{(z-h)^2}{C_z^2 x^{2-n_z}}} - e^{-\frac{(z+h)^2}{C_z^2 x^{2-n_z}}} \right\}$$

Es gibt weitere Formeln ähnlicher Art wie Gleichung [2] für die Berechnung der Schadstoffausbreitung, von denen einige im folgenden erörtert werden sollen.

2.1.3. Die von F. Pasquill verwendeten Formeln

Einen ausführlichen Überblick über die theoretischen und experimentellen Grundlagen, die hier interessieren, vermittelt P a s q u i l l (49) in seinem Buch „Atmospheric Diffusion“. Für die Konzentration, die einer kontinuierlichen Punktquelle in der Höhe $h = 0$ zuzuschreiben ist, gibt er folgende Beziehung an

$$[6] \quad \chi(x, y, z) = \frac{Q}{B_2 \sigma_y \sigma_z} e^{-\left[\left(\frac{\Gamma\left(\frac{3}{R}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{R}\right)} \right)^{\frac{R}{2}} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^R + \left(\frac{\Gamma\left(\frac{3}{S}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{S}\right)} \right)^{\frac{S}{2}} \left(\frac{z}{\sigma_z} \right)^S \right]}$$

wobei

$$\frac{1}{B_2} = \frac{RS}{4\bar{u}} \frac{\left[\Gamma\left(\frac{3}{R}\right) \Gamma\left(\frac{3}{S}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\Gamma\left(\frac{1}{R}\right) \Gamma\left(\frac{1}{S}\right) \right]^{\frac{3}{2}}}$$

Mit dieser sehr allgemein gehaltenen Formel wird die räumliche Verteilung der Konzentration durch die Gestalt der Wolke, die Windgeschwindigkeit und die Quellstärke gegeben. Die Größen „S“ bzw. „R“ sind ein Maß für die Art der Verteilung der Konzentration in der Vertikalen bzw. in der Horizontalen senkrecht zur Windrichtung.

Pasquill (49) führt für „R“ und „S“ verschiedene, durch Meßserien ermittelte Werte an. Er weist aber gleichzeitig darauf hin, daß eine exakte Bestimmung dieser Parameter zur Zeit noch fehlt (49, S. 151). Im Falle Gaußscher Konzentrationsverteilungen ($R = S = 2$) vereinfacht sich Gleichung [6] außerordentlich und läßt sich in der folgenden Form schreiben

$$[7] \quad \chi(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)}$$

Befindet sich die Quelle in der Höhe h , so gilt

$$[8] \quad \chi(x, y, z) = \frac{Q e^{-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}}}{2 \pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \left\{ e^{-\frac{(z-h)^2}{2 \sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2 \sigma_z^2}} \right\}$$

Diese Gleichung läßt sich mit Hilfe der in Abschnitt 2.2.3. angegebenen Beziehung für σ_y und σ_z in die Suttonsche Formel [2] überführen. Die Differentiation von [8] in bezug auf σ_z führt unter der Voraussetzung, daß $\frac{\sigma_y}{\sigma_z}$ eine entfernungsunabhängige Konstante ist, zu der Bedingung, daß die Konzentration auf der x -Achse ein Maximum für $\sigma_z \sqrt{2} = h$ annimmt. Diese maximale Konzentration χ_{\max} ist durch folgende Beziehung zu ermitteln

$$[9] \quad \chi_{\max}(x_{\max}, 0, 0) = \frac{2 Q}{e \pi \bar{u} h^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right)$$

2.1.4. Die von H. E. Cramer verwendeten Formeln

Im folgenden soll auf das Diffusionsmodell von Cramer (9, 10) eingegangen werden, das zum Teil auf den Ergebnissen der Diffusionsmessungen in Round Hill (Massachusetts) und bei O'Neill (Nebraska) basiert. Cramer geht von einem sphärischen Koordinatensystem aus, in dessen Ursprung eine kontinuierliche Punktquelle angenommen wird (s. Abb. 1); die x -Achse fällt mit der mittleren Windrichtung zusammen, y und z sind Kreisbögen in einer horizontalen bzw. einer vertikalen Ebene in der Quelledistanz r .

Der emittierte Schadstoff wandert in Windrichtung und breitet sich seitlich über einen durch den Winkel Θ_A definierten Kreisausschnitt aus. Θ_A ist gegeben durch die Variationsbreite der azimuthalen Richtungsverteilung des Windes an der Quelle. Nach der üblichen Definition (s. Pasquill (49); Sutton (72)) beträgt an den Begrenzungen der Fahne die von der Schadstoffquelle verursachte Konzentration nur noch den zehnten Teil der axialen Konzentration. Solche Grenzen sind in Abb. 1 gestrichelt eingezeichnet. Die Breite der Fahne wird mit $4.3 \sigma_y$ angegeben, was durch Messungen in O'Neill auch bestätigt wird. Analog läßt sich die Ausbreitung in der Vertikalen beschreiben; an die Stelle von Θ_A tritt der Winkel Θ_E , der gegeben ist durch die Variationsbreite des Höhenwinkels des Windes; σ_y wird

entsprechend durch σ_z ersetzt. Wird $x = r$ gesetzt und angenommen, daß die Ausbreitung in seitlicher und vertikaler Richtung dem Potenzgesetz in der Form

$$r \sigma_y = \sigma_A r^q$$

$$\text{bzw. } r \sigma_z = \sigma_E r^p$$

folgt, so erhält C r a m e r (9) für die Schadstoffkonzentration die Beziehung

$$[10] \quad \chi(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi \bar{u} r^b \sigma_A \sigma_E} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \frac{y^2}{\sigma_A^2 r^{2q-2}} + \frac{z^2}{\sigma_E^2 r^{2p-2}} \right\}}$$

wobei $b = p + q$ und σ_A die Streuung der azimuthalen Windrichtung und σ_E die Streuung des Höhenwinkels des Windes ist. Bei Annahme einer Reflexion des Schadstoffes am Erdboden ist nach C r a m e r die rechte Seite der Gleichung [10] mit dem Faktor 2 zu multiplizieren. Das Ergebnis entspricht den Suttonschen Ansätzen. Der wesentliche Unterschied zwischen Gleichung [10] und der Suttonschen Formel [2] liegt darin, daß anstelle der Diffusionskoeffizienten C_y und C_z , die relativ schwer zu bestimmen sind (s. Abschnitt 2.2.2.), die Größen σ_A und σ_E verwendet werden und daß der Exponent b mehr variiert werden kann, als die von S u t t o n in Formel [2] verwendete Größe n .

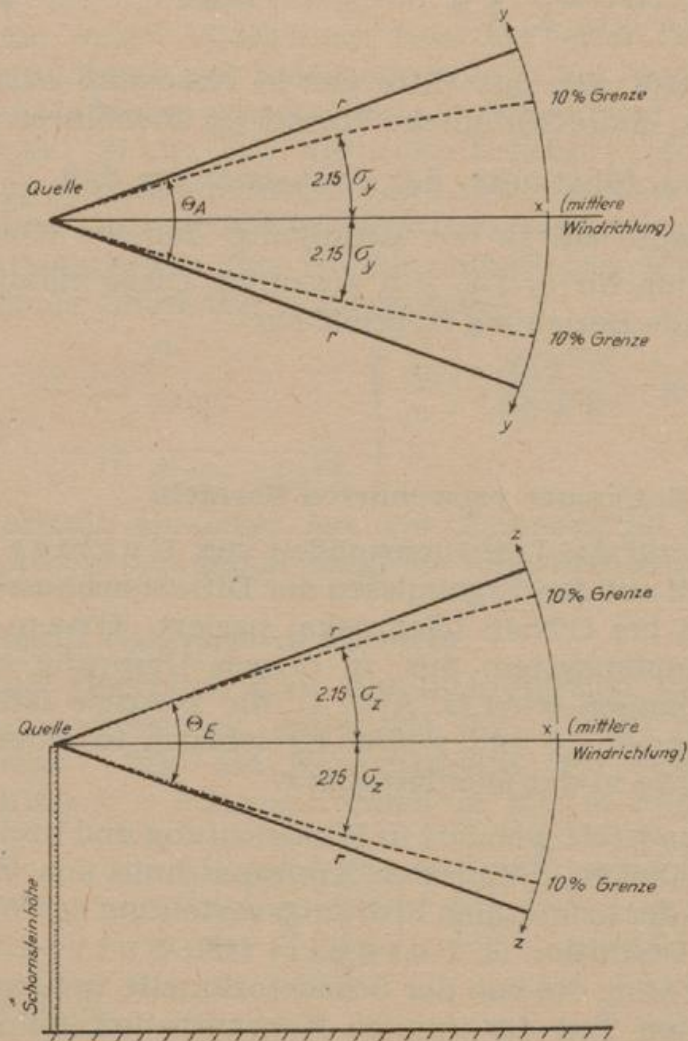


Abb. 1

Einfaches Diffusionsmodell.

Es repräsentiert die seitliche (oben) und die vertikale (unten) Ausbreitung eines von einer Quelle in der Höhe h emittierten Stoffes. Nach C r a m e r (9).

Die maximale Konzentration χ_{\max} , die einer kontinuierlichen Quelle in der Höhe $h \neq 0$ zuzuschreiben ist, tritt nach Cramer (9) in einer Quelldistanz

$$[11] \quad x_{\max} = \left(\frac{h^2 p}{\sigma_E^2 b} \right)^{\frac{1}{2p}}$$

auf und beträgt

$$[12] \quad \chi_{\max}(x_{\max}, 0, 0) = \frac{Q \left(\frac{b}{p} \right)^{\frac{b}{2p}} \sigma_E^{\frac{b}{p} - 1} e^{-\frac{b}{2p}}}{\pi \bar{u} h^{\frac{b}{p}} \sigma_A}$$

Einer Tabelle (Cramer (9)) können einige Zahlenwerte der von Cramer benutzten Exponenten p und b entnommen werden. Als Beispiele seien hieraus drei Wertepaare für verschiedene Stabilitätsverhältnisse angeführt:

	p	b
extrem stabil	0.6	1.20
fast indifferent	1.0	1.85
extrem labil	1.2	2.20

2.1.5. Die von F. Wippermann und W. Klug verwendeten Formeln

Die bis jetzt angeführten Veröffentlichungen, in denen Formeln für die Berechnung der Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre aufgestellt wurden, gehören zu der angelsächsischen Literatur. Es soll nun kurz auf einige deutsche Arbeiten zu diesem Problembereich eingegangen werden.

Wippermann und Klug (84) gehen bei ihren Untersuchungen von der Beziehung [13] aus, die von vielen Autoren verwendet wird. Für das sich auf die Mittelbildungszeit T beziehende Konzentrationsfeld einer kontinuierlichen punktförmigen Quelle in der Höhe h , das in den Ebenen senkrecht zur Rauchfahnenachse Normalverteilungen hat, gilt

$$[13] \quad \bar{\chi}_T(x, y, z) = \frac{Q e^{-\frac{y^2}{2 [\sigma_y(x)]^2}}}{2 \pi \bar{u}_T \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \left\{ e^{-\frac{(z-h)^2}{2 [\sigma_z(x)]^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2 [\sigma_z(x)]^2}} \right\}$$

Diese Beziehung stimmt weitgehend mit der oben angegebenen Formel [8] von Pasquill überein und entspricht damit auch der Suttonschen Formel [2]. Wippermann und Klug (84) nehmen nun eine Potenzabhängigkeit der Streuungen σ_y und σ_z von der Quelldistanz x an (s. Abschnitt 2.2.3.) und erhalten

mit der Bedingung $\frac{\partial \bar{\chi}_T}{\partial x} = 0$ für den maximalen Betrag der Konzentration (s. Wippermann (83)) in der Entfernung

$$[14] \quad x_{\max} = \left(\frac{h}{\sqrt{2c} G} \right)^{\frac{1}{g}}$$

von der Quelle folgenden Ausdruck

$$[15] \quad \bar{\chi}_T(x_{\max}, 0, 0) = \frac{(2c)^c Q G^{2c-1}}{\pi e^c h^{2c} \bar{u}_T F}$$

In dieser ziemlich allgemein gehaltenen Beziehung [15] sind die entsprechenden Formeln von Sutton (69) und Cramer (9) enthalten (s. Wippermann und Klug (84)).

Ausgehend von dem Potenzgesetz für die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit

$$[16] \quad \frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}(z_0)} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^m$$

bilden W i p p e r m a n n und K l u g (84) den vertikalen Mittelwert der Windgeschwindigkeit für das Zeitintervall T

$$\bar{u}'_T = \frac{\bar{u}_T(z_0)}{1+m} \left(\frac{h}{z_0}\right)^m$$

Sie setzen diese Größe in die Gleichung [15] statt der nur zeitlich gemittelten und als höhenkonstant angenommenen Windgeschwindigkeit \bar{u}_T ein und erhalten

$$[17] \quad \bar{\chi}_{T(x_{\max}, 0, 0)} = \frac{(2c)^c (1+m) z_0^m Q G^{2c-1}}{\pi e^c \bar{u}_T(z_0) h^{2c+m} F}$$

Diese Formel benutzen beide Autoren (83, 84) für die Bestimmung von Schornsteinmindesthöhen.

2.1.6. Hinweis auf Formeln von R. Trappenberg

In die Betrachtung einiger für die Berechnung der Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre wichtigen Formeln, die in der Fachliteratur diskutiert und an Hand von Meßdaten auf ihre Richtigkeit hin überprüft wurden bzw. noch zu überprüfen sind, soll auch ein Hinweis auf die von T r a p p e n b e r g (73, 74) verwendeten Formeln aufgenommen werden. Es sei bemerkt, daß sich T r a p p e n b e r g bei der Beschäftigung mit dem Problem der Schadstoffausbreitung besonders der Ausbreitung von Staub widmet. Als „Staub“ bezeichnet T r a p p e n b e r g alle festen Beimengungen der Luft (74). In (74) geht er zunächst kurz auf die mathematisch schwierige und bisher nur unter vielen Vereinfachungen durchgeführte Lösung der Diffusionsgleichung sowie auf die Ableitung von entsprechenden Formeln mit Hilfe statistischer Methoden ein. Als dritte Möglichkeit für die Bestimmung der Staubkonzentration wird ein Weg zur Berechnung dieser Größe aus dem Fluß des Staubes ausführlicher aufgezeigt. T r a p p e n b e r g stellt eine Differentialgleichung des Staubflusses auf und gibt für sie nach Vorgabe geeigneter Rand- und Anfangsbedingungen eine Lösung, die für Teilchen beliebiger Sinkgeschwindigkeit c^* gilt, sofern die Windgeschwindigkeit $u \gg c^*$. Diese Lösung kann mit der Suttonschen Formel [2] in Übereinstimmung gebracht werden. In diesem Zusammenhang berichtet T r a p p e n b e r g (74), daß bei Messungen der Teilchengröße zumeist Durchmesser $< 60 \mu$ ermittelt wurden. Aufgrund dieses Ergebnisses wird festgestellt, daß die Suttonschen Formeln mindestens bei Windgeschwindigkeiten über 2 m/sec angewendet werden können. Für Teilchen $> 60 \mu$ oder bei sehr stabiler Schichtung mit nahezu laminarer Strömung sei eine Vernachlässigung der Sinkgeschwindigkeit im allgemeinen nicht erlaubt (s. auch Abschnitt 2.1.1.). Neben der Konzentration des Staubes in Bodennähe interessiert häufig auch der Staubbiederschlag am Erdboden. Eine Formel hierfür leitet T r a p p e n b e r g (74) aus dem Fluß des Staubes durch die Fläche $z = 0$ unter Vernachlässigung der Sinkgeschwindigkeit c^* ab. Er skizziert hier (74) ferner ein anderes Verfahren zur Bestimmung des Staubbiederschlags, das bereits von D i e m und T r a p p e n b e r g (16) dargelegt wurde. Dabei wird ein stationärer Zustand vorausgesetzt und von einer Konzentrationsverteilung ausgegangen, die mit Hilfe der Gleichung [2] gewonnen wurde. Es wird angenommen, daß nach Erreichen des stationären Zustandes die weiterhin ausgeworfene Staubmenge

am Boden abgelagert wird und an den Stellen höchster Staubkonzentration in Bodennähe auch der größte Staubbiederschlag erfolgt. Die Verteilung der Staubablagerung wird aus der Konzentrationsverteilung abgeleitet.

2.1.7. Hinweis auf einige den „Fumigation-Effekt“ und den „Wash-Out-Effekt“ berücksichtigende Formeln

Die bisherige Diskussion von Ausbreitungsformeln können die Verfasser aus Zeitgründen nur noch mit wenigen Hinweisen fortsetzen. Einige weitere Gleichungen, die sich von den hier behandelten durch eine etwas andere Fragestellung unterscheiden, führt beispielsweise Gifford (26) an. Er geht kurz auf eine Formel für den Fall einer Volumenquelle ein sowie auf eine Formel, die den sog. „Fumigation-Effekt“ berücksichtigt. Den Ausdruck „fumigation“ führte H e w s o n (34) ein. Er bezeichnet damit den häufig bei beginnender Labilisierung auftretenden abwärts gerichteten und den Erdboden erreichenden Transport von Schadstoffen, die sich zuvor innerhalb einer stabilen Schicht in niedriger Höhe angesammelt hatten (s. Abb. 19). Diese Schichtung — oben invers, darunter labiler Zustand — kann gelegentlich auch länger andauern. Es sei an dieser Stelle auch erwähnt, daß K o s c h m i e d e r (s. K l u g (39)) für den Fall der Staubausbreitung unter einer Inversion eine Differentialgleichung aufgestellt hat. Gifford (26) vermittelt auch einen Einblick in die Untersuchungen von C h a m b e r l a i n, die dieser hinsichtlich der Berücksichtigung des „Wash-Out-Effektes“ — der Entfernung von Schadstoffmaterial aus der Luft durch Regen — durchgeführt hat. C h a m b e r l a i n ersetzt in den Ausbreitungsformeln die Quellstärke Q durch

$$Q(x) = Q(0) e^{-\frac{\Lambda x}{\bar{u}}}$$

Dabei bedeuten Q (0) die ursprüngliche Quellstärke, Q (x) die reduzierte Quellstärke, welche für die Quelldistanz x effektiv ist, und Λ den „Wash-Out“-Koeffizienten (durch Wash-Out entfernte Schadstoff-Partikel pro Sekunde). C h a m b e r l a i n beschäftigt sich auch näher mit der Abhängigkeit des „Wash-Out-Effektes“ von der Niederschlagsintensität (s. z. B. P a s q u i l l (49)).

2.1.8. Eine vereinfachte Formel zur Berechnung der Schadstoffkonzentration

Die Anwendung der Formeln für die Schadstoffausbreitung hängt sowohl von der Qualität und dem Umfang der vorhandenen meteorologischen Messungen als auch von dem Genauigkeitsgrad ab, mit dem die betreffende Aussage verlangt wird. Der Praktiker wird im allgemeinen bestrebt sein, möglichst leicht verwendbare Formeln zu benutzen. P a s q u i l l (48, 49) und M e a d e (46) schlagen deshalb vereinfachte Beziehungen für die Berechnung der Schadstoffkonzentration vor. In ihnen werden die schwer exakt zu bestimmenden Parameter n, C_y, C_z bzw. σ_y , σ_z (s. Abschnitt 2.2.) durch Größen ersetzt, welche direkt aus den Dimensionen der Rauchfahne entnommen werden. P a s q u i l l (48, 49) und M e a d e (46) gehen bei ihren Überlegungen von einer Rauchfahne aus, die in Windrichtung von einer Bodenpunktquelle aus fortwandert. Die Quelle wird im Nullpunkt des Koordinatensystems angenommen. Die zeitlich gemittelte Rauchfahne soll sich in der Horizontalen über einen Kreisabschnitt mit dem Winkel Θ und dem Radius r ausbreiten und sich in der Vertikalen bis zu einer Höhe H erstrecken. Nach P a s q u i l l (48) existieren einfache Beziehungen zwischen σ_y und Θ sowie zwischen σ_z und H. Man erhält für die axiale Konzentration einer Punktquelle in der

Höhe $h = 0$ bei einer Emissionsrate von einer „Einheit“ pro Minute folgende Beziehung

$$[18] \quad \chi(x, 0, 0) = \frac{2,8 \cdot 10^{-3}}{\bar{u} H r \Theta} \left(\frac{\text{Einheiten}}{\text{m}^3} \right)$$

Dabei sind \bar{u} in m/sec, H in m, r in km und Θ in Grad einzusetzen. Pasquill (48, 49) und Meade (46) geben anschließend ein Verfahren an, mit dessen Hilfe die Größen H und Θ abgeschätzt werden können (s. Abschnitt 2.2.3.).

Die beiden Verfasser betonen, daß die Wahl der Windwerte sowohl von der Quelledistanz als auch von dem ermittelten H -Wert bestimmt wird. Beispielsweise soll für eine Quelledistanz von 0.1 km (bei Meade (46)) und von 0.1 km und 1.0 km (bei Pasquill (48)) die Bodenwindgeschwindigkeit verwendet werden, während für größere Quelledistanzen die Verwendung des mittleren Windes der Schicht H empfohlen wird. Ebenso soll eine eventuelle Änderung des Windes mit der Entfernung bei der Abschätzung der betreffenden Werte nicht außer acht gelassen werden. Wird der Schadstoff in einem bebauten Gelände frei, so muß dieser Tatsache durch Vergrößerung der H - und Θ -Werte in Quellnähe Rechnung getragen werden. Auch hierzu macht Meade (46) einige richtungsweisende Angaben.

Die bisherigen Ausführungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf eine punktförmige Bodenquelle. Befindet sich die Quelle in der Höhe $h \neq 0$, dann sind an den Konzentrationswerten Korrekturen anzubringen. Möchte man die Konzentration für Punkte wissen, die von der Achse der Fahne entfernt liegen, so sind die Konzentrationswerte ebenfalls zu korrigieren. Beiden Tatsachen tragen Meade (46) und Pasquill (48) durch Einführung der Korrekturfaktoren F_1 bzw. F_2 Rechnung.

Die Autoren heben in ihren Veröffentlichungen (46, 48) hervor, daß die eben skizzierte Methode für die Berechnung der Konzentration nur angenäherte Werte zu geben vermag.

Besonders für sehr instabile und sehr stabile Situationen können bei der Abschätzung von H große Fehler vorkommen. Meade (46) führt folgende Situationen an, in denen H bis auf den Faktor 2 genau bestimmt werden kann:

1. stabile Lagen, abgesehen von extremen Fällen, für Quelledistanzen von einigen hundert Metern im offenen Land
2. neutrale Verhältnisse für Quelledistanzen von einigen Kilometern
3. instabile Bedingungen bis zu 1000 m Höhe über Grund mit einer unmittelbar darüber liegenden markanten Inversion für Quelledistanzen von 10 km und mehr.

2.2. Diskussion über die in den Ausbreitungsformeln vorkommenden Parameter n , C_y , C_z , σ_y , σ_z sowie über die Schornsteinüberhöhung und über das Meßzeitintervall

In den Beziehungen, welche in den voranstehenden Abschnitten angeführt wurden, kommen die Parameter n , C_y , C_z , σ_y , σ_z und verwandte Größen wiederholt vor. Das Ergebnis der Berechnungen wird durch sie wesentlich beeinflußt. Deshalb werden im folgenden zunächst die für die Bestimmung der einzelnen Parameter geltenden Beziehungen genannt und anschließend aus einigen Veröffentlichungen für den jeweils diskutierten Parameter Zahlenwerte angegeben. Es sei betont, daß diese sich jeweils auf einen bestimmten Beobachtungsort sowie auf eine bestimmte Beobachtungsperiode beziehen.

2.2.1. Der meteorologische Exponent „n“

Der meteorologische Exponent „n“ (Stabilitätsparameter „n“) wird aus dem vertikalen Windgeschwindigkeitsprofil bestimmt, das eng mit dem vertikalen Temperaturgradienten korreliert ist. Nach theoretischen Überlegungen ist eine exakte Wiedergabe des vertikalen Windprofils durch ein Potenzgesetz sicher nicht möglich. Aus einer großen Zahl von Meßergebnissen geht jedoch hervor, daß die Windverteilung in der atmosphärischen Bodenschicht für praktische Zwecke hinreichend genau durch ein Gesetz der Form

$$\bar{u}(z) = \bar{u}(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^m$$

(s. Gleichung [16]) mit z_0 als der Höhe eines Bezugsniveaus über dem Erdboden angenähert werden kann (s. D r i m m e l und R e u t e r (20)). Der Wert m liegt im Falle adiabatischer Schichtung häufig nahe $\frac{1}{7}$. Der Zusammenhang zwischen dem Stabilitätsparameter „n“ und dem Exponenten „m“ des vertikalen Windprofils ist nach S u t t o n (70) mit der Beziehung

$$[19] \quad m = \frac{n}{2-n}$$

bzw. mit $n = \frac{2m}{1+m}$ gegeben. (Ergänzend muß an dieser Stelle erwähnt werden, daß D r i m m e l und R e u t e r (20) in einer eingehenden Untersuchung über die Größe n diese gleich m setzen.)

Es sei hier darauf aufmerksam gemacht, daß die Verwendung von Formel [16] mit $m = \frac{n}{2-n}$ im Widerspruch steht zu der Voraussetzung eines höhenkonstanten mittleren Windes in Gleichung [2]. Nach S u t t o n (72) bringt aber diese Inkonsequenz keinen nennenswerten Fehler in die Ergebnisse. Der Wert „n“ ist eine dimensionslose Zahl, die nach S u t t o n (70) zwischen 0 und 1 liegen muß, die Grenzen mit einbegriffen. Sehr nahe am Erdboden (s. S u t t o n (72)) ist die Bodenrauigkeit von primärer Bedeutung für das Windprofil, während darüber n hauptsächlich durch die (thermische) Schichtung bestimmt wird. Bei stärkerer turbulenter Durchmischung ist in der unteren Atmosphäre die Geschwindigkeitsänderung mit der Höhe relativ gering. Deshalb vermag bei sehr starker Turbulenz (großer Labilität) n den Wert 0 zu erreichen. Bei schwacher Turbulenz (großer Stabilität) kann n gleich 1 werden. Der häufig verwendete Wert $n = 0.25$ entspricht mittlerer Turbulenz bei „neutralen“ Stabilitätsverhältnissen. S u t t o n (70) teilt mit, daß im Flachland mit Ausnahme extremer Inversionsbedingungen Werte von $n > 0.5$ relativ selten auftreten.

G e i s l e r (23) weist darauf hin, daß die Sutttonschen Ausbreitungsformeln nicht mehr gelten, wenn der meteorologische Exponent n den Wert 0 oder 1 annimmt. D i e m und Z e d l e r (18) haben aus Meßreihen an Masten n -Werte errechnet, welche die von S u t t o n angegebenen Grenzen beträchtlich überschreiten. Sie weisen auf die Tatsache hin, daß auch Fälle von Abnahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe auftreten und daß dann n entweder negativ oder größer als + 2 wird. Aus diesem Grunde können Schwierigkeiten bei der Mittelbildung auftreten. Im Hinblick auf statistische Auswertungsmöglichkeiten verwenden D i e m und Z e d l e r (18) nicht den meteorologischen Exponenten n , sondern die Größe m . — Mit Hilfe der Beziehung

$$[20] \quad n = \frac{2(a_* - b_* \gamma - c_* \gamma^2)}{1 + (a_* - b_* \gamma - c_* \gamma^2)}$$

kann n auch aus dem vertikalen Temperaturgradienten γ bestimmt werden (s. Böer und Hasek (7)). Zahlenwerte für die Koeffizienten a^* , b^* und c^* haben Diem (14) und Vorontsov (79) angegeben. In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, daß Klug (40) von drei verschiedenen Beobachtungsreihen Darstellungen der Abhängigkeit des aus dem Windprofil bestimmten meteorologischen Exponenten n von der vertikalen Temperaturdifferenz diskutiert.

Sutton (70, S. 266) betont ausdrücklich, daß n richtungsunabhängig ist. Im Hinblick auf diese Bemerkung sei nochmals die Untersuchung von Barad und Haugen (4) angeführt. Die beiden Autoren überprüfen die Suttonsche Theorie mit den Meßergebnissen des Projektes „Prairie Grass“, die in Quelledistanzen von 50 bis 800 m und größtenteils bei einer Höhe der Quelle von 46 cm gewonnen wurden. Auf Einzelheiten der Untersuchung kann hier nicht eingegangen werden. Ihr wichtigstes Ergebnis ist die Unterscheidung zwischen n_y - und n_z -Werten, die aus Standardabweichungen σ_y in verschiedenen Entfernungen bzw. durch Integration der Gleichung [2] für die Schadstoffkonzentration über y innerhalb der Grenzen $+\infty$ und $-\infty$ bestimmt werden. Die Größe „ n_y “ charakterisiert die seitliche, die Größe „ n_z “ die vertikale Diffusion. Als Beispiel seien für einen stabilen Fall für verschiedene Entfernungsbereiche folgende n_y - und n_z -Werte genannt, die einer Tabelle in (4) entnommen sind:

Entfernungsbereiche in m:

	50/100	50/200	50/400	50/800	100/200	100/400	100/800	200/400	200/800	400/800
n_y	0.61	0.61	0.61	0.68	0.61	0.62	0.70	0.72	0.75	0.87
n_z	0.14	0.20	0.32	0.33	0.24	0.25	0.39	0.46	0.46	0.45

Unter Benutzung von Windmessungen zwischen dem Boden und 8 m Höhe zeigen Barad und Haugen ferner, daß die Parameter n_y und n_z beide verschieden sind von der Größe n aus dem von Sutton benutzten Potenzgesetz für das vertikale Windprofil.

Ausgehend von der Diskussion einiger Unzulänglichkeiten der Formel [2] von Sutton bei labiler und stabiler Schichtung der Atmosphäre führt auch Schmidt (57) zur Verbesserung dieser Gleichung anstelle des meteorologischen Exponenten n die zwei Größen n_y und n_z ein und berechnet im Anschluß an seine theoretischen Überlegungen (57) n_y - und n_z -Werte aus Meßserien des Projektes „Prairie Grass“. Dem Vorschlage von Barad und Haugen (4) folgend, unterscheiden Wippermann und Klug (84) ebenfalls n_y - und n_z -Werte, für die sie folgende Beziehung explizit angeben:

$$n_y = 2 - (2c - 1)(2 - n_z)$$

$$n_z = 2(1 - g).$$

Für ein umfangreiches Beobachtungsmaterial führt Jensen (37) auf der Basis der Gleichungen [16] und [19] Bestimmungen der Größe „ n “ durch. Er benutzt Windgeschwindigkeitsmessungen in verschiedenen Masthöhen an der Station Risö und veranschaulicht in einer Isoplethendarstellung (s. Abb. 2) den mittleren Tages- und Jahresgang der n -Werte. Sie gelten für die unterste, 123 m mächtige Schicht der Atmosphäre. Die niedrigsten n -Werte kommen zur Zeit der größten thermischen Labilität vor, d. h. im Hochsommer um die Mittagszeit. Die größten n -Werte sind im Herbst in den Morgenstunden anzutreffen, d. h. zu einer Zeit, in der die Atmosphäre in der bodennahen Luftschicht häufig thermisch sehr stabil ist. Der tages- und jahreszeitliche Verlauf der n -Werte würde bei Verwendung der von Singer und Raynor (62) benutzten „solaren Zeitklassifikation“

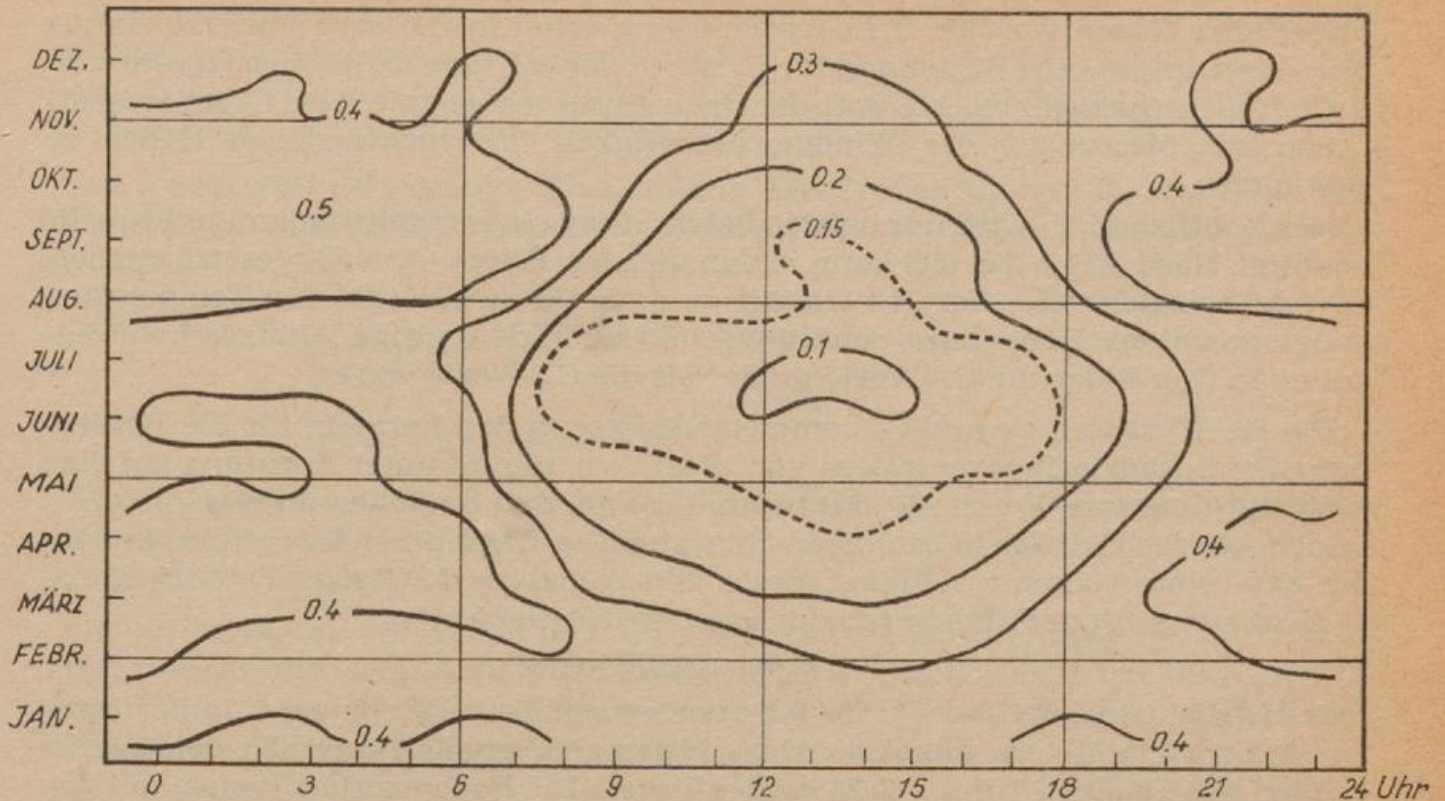


Abb. 2

Mittelwerte von n an der Station Risø für die Schicht 0 bis 123 m Höhe. Beobachtungszeitraum: 1958, Januar bis Juni 1959, 1960, 1961. Nach Jensen (37).

(s. Abschnitt 3.3.1.) sicher noch wesentlich markanter als bei der hier benutzten Zeiteinteilung zum Ausdruck kommen.

Diese Ergebnisse von Jensen (37) entsprechen den Angaben, die Diem und Trappenberg (17) bezüglich der n -Werte machen. Danach sollen die n -Werte mit großer Häufigkeit zwischen 0.2 und 0.6 liegen.

2.2.2. Die virtuellen Diffusionskoeffizienten C_y und C_z

Die virtuellen Diffusionskoeffizienten C_x , C_y und C_z definiert Sutton (72) wie folgt

$$[21] \quad C_x^2 = \frac{4 N^n}{(1-n)(2-n) \bar{u}^n} \left(\frac{\overline{u'^2}}{\bar{u}^2} \right)^{1-n}$$

$$[22] \quad C_y^2 = \frac{4 N^n}{(1-n)(2-n) \bar{u}^n} \left(\frac{\overline{v'^2}}{\bar{u}^2} \right)^{1-n}$$

$$[23] \quad C_z^2 = \frac{4 N^n}{(1-n)(2-n) \bar{u}^n} \left(\frac{\overline{w'^2}}{\bar{u}^2} \right)^{1-n}$$

Für die Bestimmung der in C_x , C_y und C_z eingehenden meßbaren Größen ist leider ein beträchtlicher instrumenteller Aufwand notwendig, das gilt besonders für die Gewinnung der turbulenten Zusatzgeschwindigkeiten u' , v' und w' .

Sutton (70) gibt mehrere Methoden zur Bestimmung von $\overline{w'^2}$ an. Er erwähnt z. B. Hitzdrahtanemometer und Windfahnen, die um eine vertikale und um eine horizontale Achse drehbar sind. Dennoch liegen bis jetzt — soweit bekannt — kaum zuverlässige Werte über die Windoszillation oberhalb der ersten wenigen

Meter über Grund vor (70). Trappenberg leitet in (74) nach Vorgabe einiger Voraussetzungen eine Beziehung für C_z ab, in der die turbulente Zusatzgeschwindigkeit w' nicht mehr vorkommt; der neue Ausdruck gestattet es, C_z im wesentlichen aus Messungen der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen zu bestimmen.

Der Koeffizient C_x wird nur bei der Betrachtung einer momentanen Punktquelle benötigt. Nach Meade (46) kann in den meisten Fällen $C_x = C_y$ gesetzt werden, obwohl beispielsweise bei Holland u. a. (s. Meade (46)) für Temperaturabnahme mit der Höhe (lapse conditions) und ziemlich niedrige Windgeschwindigkeiten in Oak Ridge die C_y -Werte größer als die C_x -Werte waren.

Die Koeffizienten C_y und C_z kommen häufiger in den Formeln für die Berechnung der Schadstoffkonzentration vor. Sutton nimmt unter Berufung auf eine Untersuchung von Best (s. Sutton (71)) an, daß in Höhen ab etwa 25 m C_y und C_z gleiche Beträge haben. Sutton stellt an Hand einer Wachstumsanalyse der Explosionswolken von Flakgranaten eine Abnahme der Größe der Diffusionskoeffizienten mit der Höhe nach der empirischen Beziehung

$$C = C(0) - 0,075 \log_{10} z$$

fest. Hierbei ist $C = C_y = C_z$; $C(0)$ ist der extrapolierte Wert von C in der Höhe $z = 0$; z wird in Metern gemessen. Diese Höhenabhängigkeit der Diffusionskoeffizienten soll Tabelle 1 für $n = 0.25$ verdeutlichen. Die Bodenwerte stimmen mit den in Porton (Flachland) gewonnenen Daten überein.

Höhe der Quelle über Grund [m]	C-Werte $\left[\frac{n}{m^2} \right]$	
0	$C_y = 0.21$	$C_z = 0.12$
10	$C_y = 0.21$	$C_z = 0.12$
25	0.12	
50	0.10	
75	0.09	
100	0.07	

Tab. 1

Werte der Diffusionskoeffizienten für $n = 0.25$. Aus Sutton (71).

Es ist nicht möglich, allgemein gültige Werte für C_z und C_y anzugeben, da diese Größen ebenso wie die Makroviskosität N und der Suttonsche Exponent n vom Zustand der Atmosphäre und von der Beschaffenheit der Erdoberfläche abhängen. Für die Größenordnung der N -Werte gibt jedoch Sutton (72) einige Hinweise, die auf Angaben von Sheppard basieren.

Bodenbedeckung	N [$\text{cm}^2\text{sec}^{-1}$]
Sehr glatte Flächen (Eis)	0.016
Rasen, Gras bis 1 cm Höhe	2.6
Dünnes Gras bis 10 cm Höhe	26
Dickes Gras bis 10 cm Höhe	104
Dünnes Gras bis 50 cm Höhe	275
Dickes Gras bis 50 cm Höhe	560

Tab. 2

Repräsentative Werte der Makroviskosität N für „natürliche“ Erdoberflächen. (Die Werte beziehen sich auf neutrale Stabilitätsverhältnisse und auf die mittlere Windgeschwindigkeit $\bar{u} = 5 \text{ m sec}^{-1}$ in 2 m Höhe.) Aus Sutton (72).

Tab. 2 veranschaulicht, in welchem hohem Maße der Wert der Makroviskosität N von der Bodenbedeckung beeinflusst wird. *Trappenberg* gibt (74) eine ähnliche Zusammenstellung und nimmt für N in der bodennahen Schicht eine Schwankung um fünf Zehnerpotenzen an.

Jensen (37) geht bei der Bestimmung der Größen C_y und C_z von folgenden Beziehungen aus, die sich etwas von Formel [22] bzw. [23] von *Sutton* unterscheiden.

$$[24] \quad C_y^2 = \frac{4 \nu^n}{(1-n)(2-n) \bar{u}^n} \left(\operatorname{tg} \sigma_A \right)^{2-2n}$$

$$[25] \quad C_z^2 = \frac{4 \nu^n}{(1-n)(2-n) \bar{u}^n} \left(\operatorname{tg} \sigma_E \right)^{2-2n}$$

Hierin bedeuten ν die kinematische Viskosität, für die *Jensen* den Wert $1,56 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{sec}$ einsetzt, und σ_A bzw. σ_E die Streuung des Azimuts bzw. der Inklination des Windes.

Es sei ferner erwähnt, daß *Meade* (46) für die Bestimmung von C_y und C_z zwei Beziehungen angibt, in welche die meßbaren Dimensionen der über die Zeit gemittelten Schadstofffahne einer Punktquelle am Boden eingehen, nämlich die vertikale Ausbreitung H und die seitliche Ausbreitung Θ .

$$[26] \quad C_y = \frac{r \Theta}{2 \sqrt{4,6}} \left(\frac{2}{r^{2-n}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$[27] \quad C_z = \frac{H}{\sqrt{4,6}} \left(\frac{2}{r^{2-n}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Die Größe r stellt hier die Quelldistanz dar.

In der Literatur finden sich nur selten spezifische Zahlenangaben für den turbulenten Diffusionskoeffizienten C_y , die auf der Basis besonderer Beobachtungsreihen gewonnen wurden. Hierzu zählen die C_y -Werte, die *Jensen* (37) mit Hilfe von Gleichung [24] aus den Mastmessungen von *Risö* in den Jahren 1958—61 berechnet hat. Diese stündlichen Werte beziehen sich im allgemeinen auf eine Höhe von 56 m; zu einem kleinen Teil gelten sie für 7 m Höhe oder sie stellen Mittelwerte dar, die aus C_y -Werten für 7, 56 und 123 m Höhe bestimmt wurden.

Jensen (37) bildet Monatsmittel der einzelnen Tagesstunden und stellt den mittleren tages- und jahreszeitlichen Verlauf von C_y in Abb. 3 dar. Die niedrigen C_y -Werte treten hier im Frühjahr, Herbst und Winter während der Abend-, Nacht- und Morgenstunden, die großen C_y -Werte in den labilen Tagesstunden der Sommermonate auf.

Für eine Höhe von 56 m über Grund hat *Jensen* (37) an Hand des Beobachtungsmaterials von 1960 auch C_z -Werte berechnet. Diesen liegt Gleichung [25] zugrunde. Abb. 4 zeigt den mittleren Tages- und Jahresgang von C_z . Das Verteilungsbild ist ähnlich wie in der entsprechenden Darstellung von C_y . Auch die größten mittleren Beträge von C_z treten zur Zeit des höchsten Sonnenstandes auf.

Eine ausführliche Untersuchung über die atmosphärische Diffusion — die auch eine Diskussion über die Parameter C_y und C_z enthält — wird von *Stewart* u. a. (64, 65) an Hand von Schadstoffmessungen im Bereich des *Bepo*-Reaktors in *Harwell* vorgenommen. Hier wurden A^{41} -Messungen am Boden bis zu einer

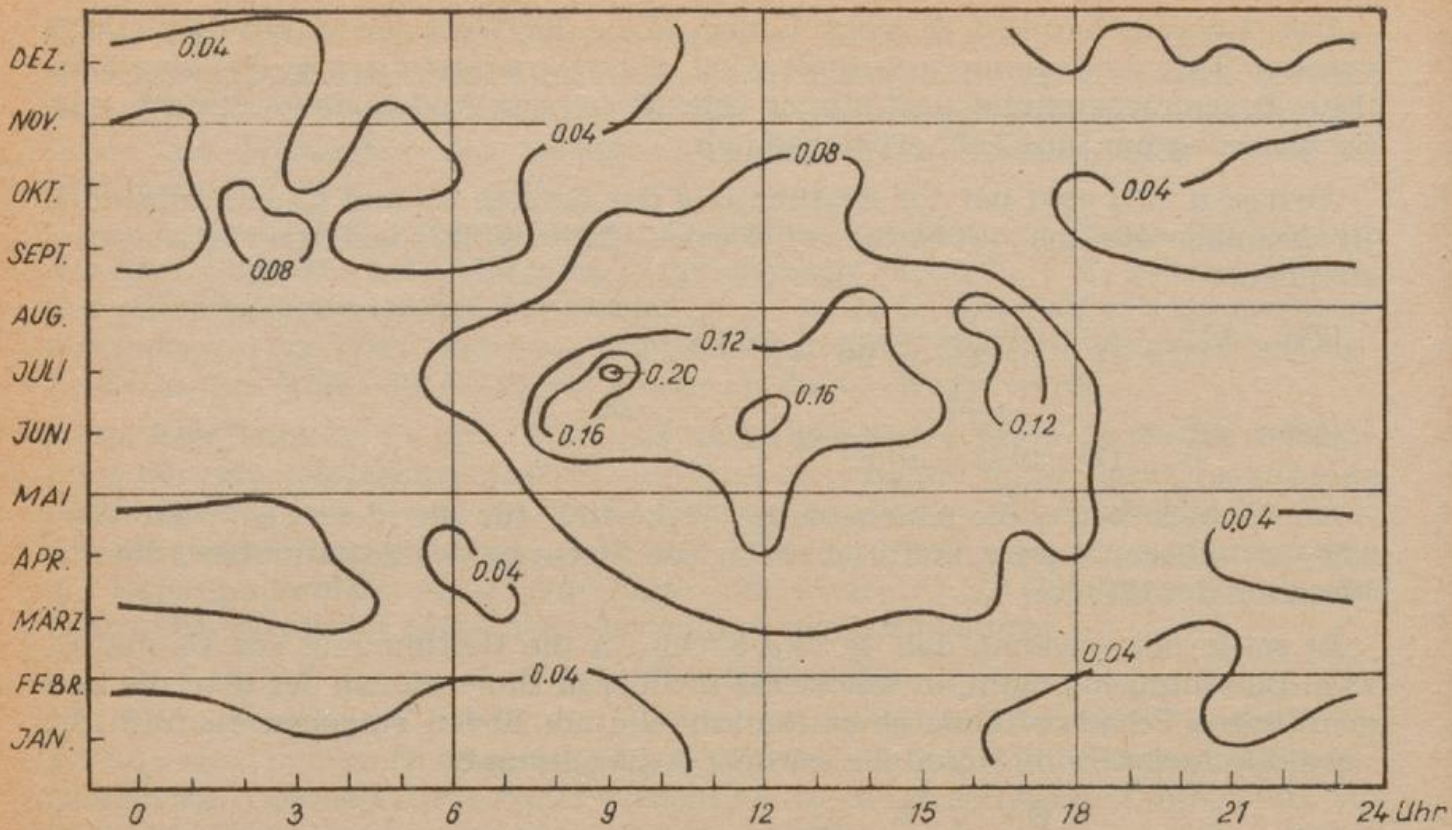


Abb. 3

Mittlere C_y -Werte an der Station Risø. Zeitraum: 1958, Januar bis Juni 1959, 1960, 1961.
Nach Jensen (37).

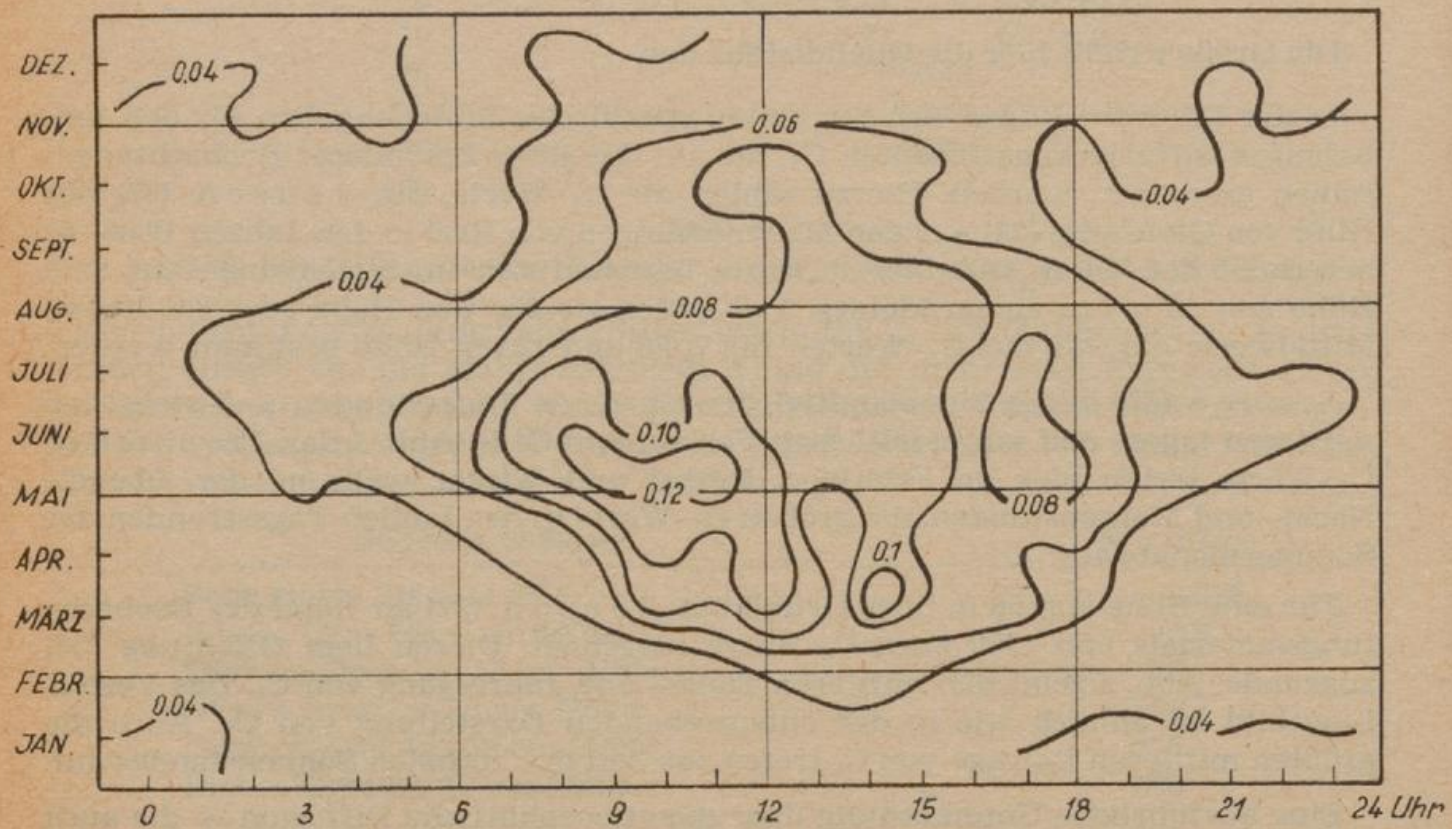


Abb. 4

Mittlere C_z -Werte an der Station Risø. Zeitraum: Januar bis Dezember 1960.
Nach Jensen (37).

Quelldistanz von 10 km und in der Höhe (bis zu 300 m über Grund) in Entfernungen von der Quelle bis zu 1 km durchgeführt. (Als Träger der Meßgeräte dienten Ballone.)

Während bei Jensen (37) für die Berechnung der turbulenten Diffusionskoeffizienten auf Grund von Gleichung [24] bzw. [25] an gemessenen Werten nur Winddaten eingehen, haben Stewart u. a. (64, 65) bei der Berechnung dieser Parameter auch Konzentrationsbestimmungen benutzt.

Tab. 3 enthält für verschieden große Entfernungsbereiche Angaben über die Parameter C_y bzw. C_z , die sich auf einzelne Typen der thermischen Schichtung und auf bestimmte Meßzeitintervalle beziehen. Es sei aber darauf aufmerksam gemacht, daß Stewart u. a. (65) für den in die Berechnung der turbulenten Diffusionskoeffizienten C_y und C_z eingehenden Stabilitätsparameter n der Einfachheit halber unabhängig von den thermischen Verhältnissen den Wert $n = 0,25$ eingesetzt haben. Die beiden Spalten rechts enthalten die auf eine Meßzeit von 40 Minuten umgerechneten C_y - und C_z -Werte. Die Spalte links außen in der Tabelle 3 gibt an, ob die A^{41} -Konzentration am Boden oder in der Vertikalen bestimmt wurde.

	Quelldistanz (m)	Meßzeit-Intervall (Min.)	Stabilitätsverhältnisse	C_y	C_z	Meßzeitintervall von 40 Min.	
						C_y	C_z
Messungen in der Vertikalen	150–1000	15–20	labil	0.15	0.25	0.16	0.27
			adiabatisch	0.09	0.20	0.10	0.22
			stabil	0.09	0.11	0.10	0.12
Messungen am Boden	590–620	40	adiabatisch und labil	0.46	—	0.46	—
	880–1050	40	adiabatisch und labil	0.28	0.32	0.28	0.32
	1200	40	adiabatisch und labil	0.33	—	0.33	—
Messungen am Boden	2400–2800	15	adiabatisch und labil	0.23	—	0.26	—
	6000–9700	15	adiabatisch und labil	0.16	0.17	0.18	0.19
Messungen am Boden	1000–10 000	60	stabil	—	<0.04	—	<0.04

Tab. 3

Experimentelle Werte von C_y und C_z in verschiedenen Quelldistanzen.
Nach Stewart u. a. (65).

2.2.3. Die Streuungen σ_y und σ_z

Ist n gegeben und sind die Diffusionskoeffizienten C_x , C_y , C_z bekannt, dann lassen sich die Standardabweichungen σ_x , σ_y , σ_z des Schadstoffs für eine bestimmte Entfernung von der Quelle aus folgenden Gleichungen bestimmen (s. Meade (46), Gifford (25), Sutton (72))

$$[28] \quad \sigma_x^2 = \frac{1}{2} C_x^2 x^{2-n}$$

$$[29] \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{2} C_y^2 x^{2-n}$$

$$[30] \quad \sigma_z^2 = \frac{1}{2} C_z^2 x^{2-n}$$

Ähnlich wie Sutton versuchen auch Wippermann und Klug (84), die Streuungen durch ein Potenzgesetz zu bestimmen. Nach Vorgabe geeigneter Werte für die Größen F , G , f und g (s. z. B. Wippermann (83)) können σ_y und σ_z mit Hilfe folgender Beziehungen berechnet werden

$$[31] \quad \sigma_y = F x^f$$

$$[32] \quad \sigma_z = G x^g$$

Ausgehend von einer Betrachtung über den für die Translation des Schadstoffes wirksamen Mittelwert des Windes in der bodennahen Luftschicht liefert Drimmel (19) einen Beitrag zur Erweiterung der theoretischen Grundlage für die Bestimmung der Turbulenzparameter. Bezüglich der Ableitung der von Drimmel eingeführten sog. effektiven Werte von σ_y und σ_z kann hier nur auf die Originalarbeit verwiesen werden.

Pasquill (48, 49) gibt folgende Beziehungen an, mit der σ_y und σ_z relativ leicht aus Beobachtungsdaten zu berechnen sind

$$[33] \quad \sigma_y \approx x [\sigma_A]_T \frac{x}{\bar{u} \beta}$$

$$[34] \quad \sigma_z \approx x [\sigma_E]_T \frac{x}{\bar{u} \beta}$$

Dabei bedeuten σ_A bzw. σ_E die Standardabweichungen des Azimuts bzw. der Inklination des Windvektors (in Radianten). Diese Standardabweichungen können aus Registrierauswertungen gewonnen werden. Der Index T gibt die Periode an, auf die sich die Werte σ_A und σ_E beziehen. Der Index $\frac{x}{\bar{u} \beta}$ bezeichnet die Größe der elementaren Zeitintervalle, für die Azimut und Inklination des Windvektors zu bestimmen sind. Nach Pasquill (48) erscheint es statthaft, für den hier auftretenden Faktor β die Zahl 4 einzusetzen, sofern die Quelledistanz x nicht größer ist als 1 km. Ausgewählte Beispiele, denen verschiedene Meßreihen zugrunde liegen, sollen im folgenden einen Einblick in die Größenordnung der Beträge geben, die σ_y und σ_z bzw. die verwandten Parameter H und Θ (s. Formel [26] und [27]) annehmen können. Zunächst seien einige Untersuchungsergebnisse von Cramer (10) angeführt. Abb. 5 und 6 basieren auf Daten, die bei O'Neill/Nebraska im Rahmen des Projektes „Prairie Grass“ in Sommermonaten gesammelt wurden. Die kontinuierliche, punktförmige SO_2 -Quelle befand sich in 64 von 70 Meßserien in 46 cm Höhe (s. Barad und Hauge (4)). Abb. 5 und 6 zeigen σ_y bzw. σ_z in Abhängigkeit von der Quelledistanz und der Standardabweichung der azimutalen Windrichtung σ_A . Für die Schicht zwischen dem Erdboden und etwa

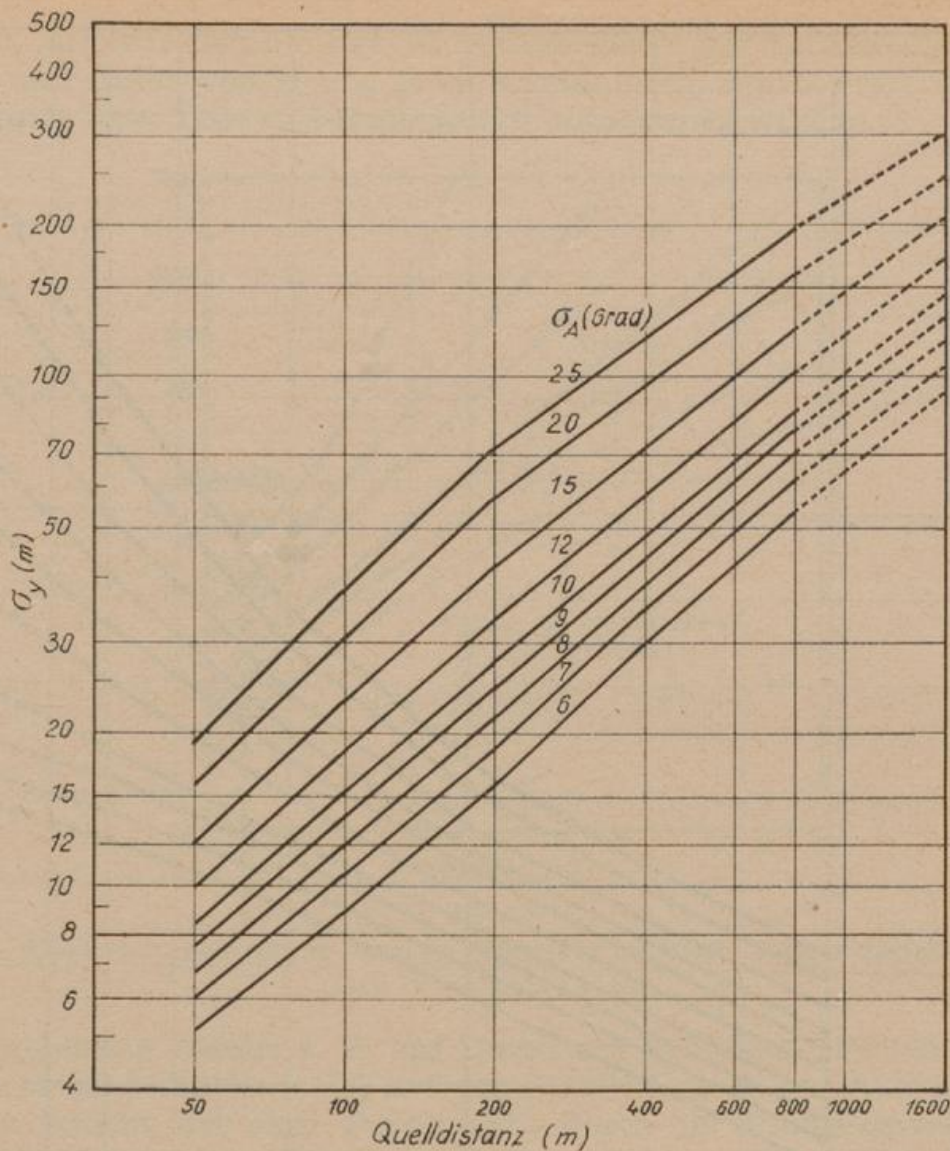


Abb. 5

Streuung σ_y in Abhängigkeit von σ_A und der Quelldistanz. Die Werte beziehen sich auf Messungen, die bei O'Neill/Nebraska am Tage durchgeführt wurden, und sind als Bogenlängen angegeben. Die gestrichelten Linien sind extrapoliert. Nach Cramer (9).

100 m Höhe ordnet Cramer (9) in Tab. 4 einige Werteklassen der Größe σ_A fünf verschiedenen Stabilitätstypen zu und unterscheidet dabei zwischen einem Gebiet mit geringer Bodenrauigkeit und einem gewellten Gelände mit Bäumen und Häusern.

Stabilitätsklasse	σ_A [Grad] bei geringer Bodenrauigkeit (Prärie)	σ_A [Grad] bei großer Bodenrauigkeit (gewelltes Gelände mit Bäumen und Häusern)
extrem stabil	2—4	2—6
mäßig stabil	4—8	7—15
fast indifferent	6—8	10—15
mäßig labil	10—15	15—20
extrem labil	20—25	25—30

Tab. 4

Geschätzte Bereiche von σ_A für verschiedene Stabilitätsklassen. Aus Cramer (9).

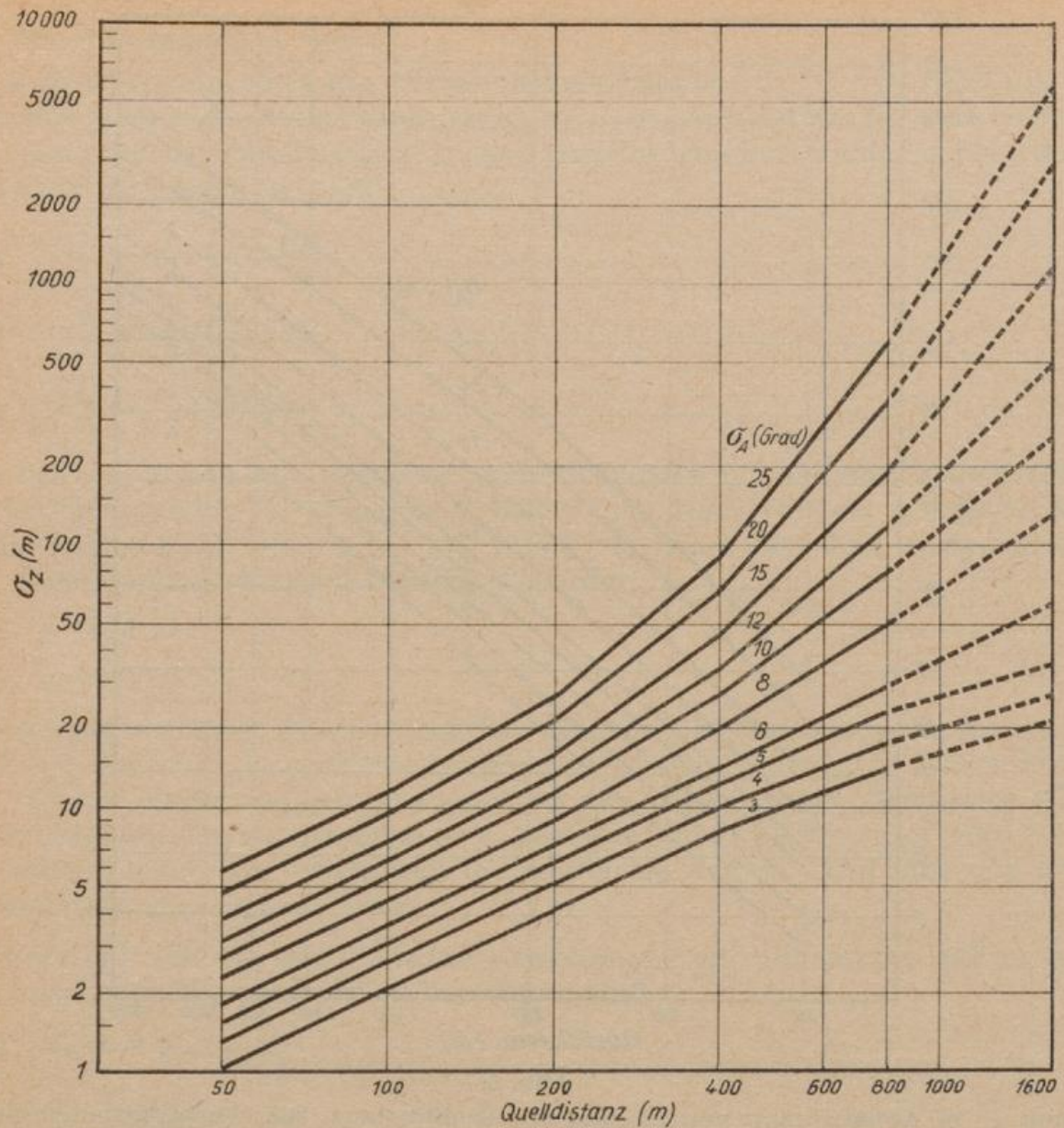


Abb. 6

Streuung σ_z in Abhängigkeit von σ_A und der Quelldistanz. Die geschätzten σ_z -Werte sind ausgedrückt als Bogenlängen. (Geschätzte σ_z -Werte für Nachtfälle mit $\sigma_A > 5$ Grad werden nicht gezeigt.) Bei den gestrichelten Linien handelt es sich um extrapolierte Werte.

Nach C r a m e r (9).

Abb. 5 enthält für den σ_A -Bereich 6 bis 25 Grad Werte der Standardabweichung σ_y , die als Bogenlängen ausgedrückt sind.

Abb. 6 liegen neben Messungen am Boden auch Konzentrationsmessungen in verschiedenen Höhen an Masten zugrunde, die 100 m von der Quelle entfernt sind. Zur Bestimmung der σ_z -Werte in Quellentfernungen > 100 m wurde Gleichung [8] in etwas modifizierter Form für $h = 0$ benutzt (9).

Weiter sei auf die schon zuvor angeführten Untersuchungen von Pasquill (48, 49) bzw. von Meade (46) eingegangen, die beide für die Berechnung der Konzentration nach Gleichung [18] Richtlinien für die Bestimmung der zu verwendenden Größen H (Ausbreitung in der Vertikalen) und Θ (seitliche Schadstoffausbreitung) geben. Wir folgen hier den Ausführungen von Pasquill (48).

Er versucht, auf sehr flexible Art die verschiedenen zur Zeit existierenden Vorstellungen und Daten von H und Θ zu kombinieren. Schätzwerte dieser beiden Größen können Abb. 7 für eine Bodenquelle entnommen werden.

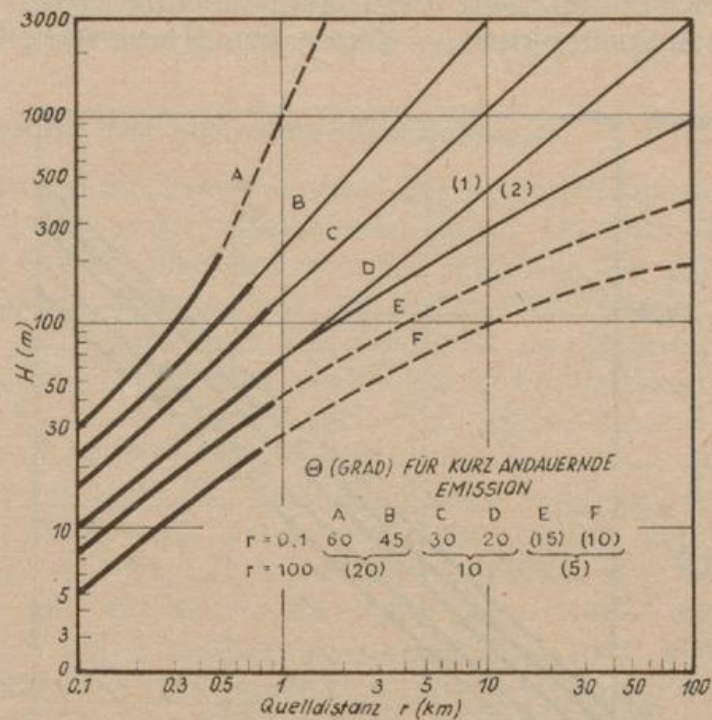


Abb. 7

Versuchte Abschätzungen der H - und Θ -Werte für ziemlich flaches unbebautes Land.
Nach Pasquill (49).

Diese Darstellung basiert z. T. auf Daten des Projektes „Prairie Grass“. Die Buchstaben A bis F beziehen sich auf den Stabilitätsgrad der Atmosphäre in der bodennahen Schicht, der nach Pasquill durch die Windgeschwindigkeit, die Einstrahlung und die Bewölkung bestimmt wird (s. Tab. 8). Bei den stabilen Bedingungen E und F handelt es sich für Entfernungen von mehr als einem Kilometer um extrapolierte Angaben. Größere Unsicherheit wird sonst für die Θ -Werte durch Klammern, für die H -Werte durch dünnere und gestrichelte Linien angedeutet. Die geschätzten Θ -Werte in Abb. 7 gelten lediglich für Emissionen von kurzer Dauer (einige Minuten). Für Emissionen, die sich über eine Stunde oder über eine noch längere Zeit erstrecken, gibt Pasquill (48) gesondert einige Hinweise, mit deren Hilfe die Θ -Werte aus Registrierungen der Windrichtung abzuschätzen sind.

Bei indifferenten Verhältnissen (Stabilitätsklasse „D“) sollen die H -Werte der D(1)-Kurve solange entnommen werden, bis das Kondensationsniveau erreicht ist, danach der D(2) — oder einer dazu parallelen Kurve. Meade (46) geht noch auf den Fall ein, in dem über einer labilen Schicht am Erdboden eine stabile Schicht vorkommt (Fumigation-Typ). In einem solchen Fall solle man annehmen, daß die Ausbreitung in der Vertikalen nicht über die Untergrenze der stabilen Schicht hinausreicht.

In einer Untersuchung von Turner (75) über die Verteilung der SO_2 -Konzentration in Nashville/Tennessee werden die Größen σ_y und σ_z als Funktionen der Stabilität und der Wanderzeit $t = \frac{x}{u}$ betrachtet (s. Abb. 8 und 9). Aus beiden Diagrammen können σ_y - bzw. σ_z -Werte für folgende Stabilitätsklassen abgelesen

werden: 1 = extrem labil, 2 = labil, 3 = leicht labil, 4 = indifferent, 5 = leicht stabil. Fälle größerer Stabilität sind hier nicht berücksichtigt, weil Turner (75) voraussetzt, daß über Städten die Atmosphäre weniger stabil geschichtet ist als über unbesiedelten Gebieten. Eine Verallgemeinerung dieser Voraussetzung erscheint allerdings sehr bedenklich. — Daten von H aus Abb. 7 können transfor-

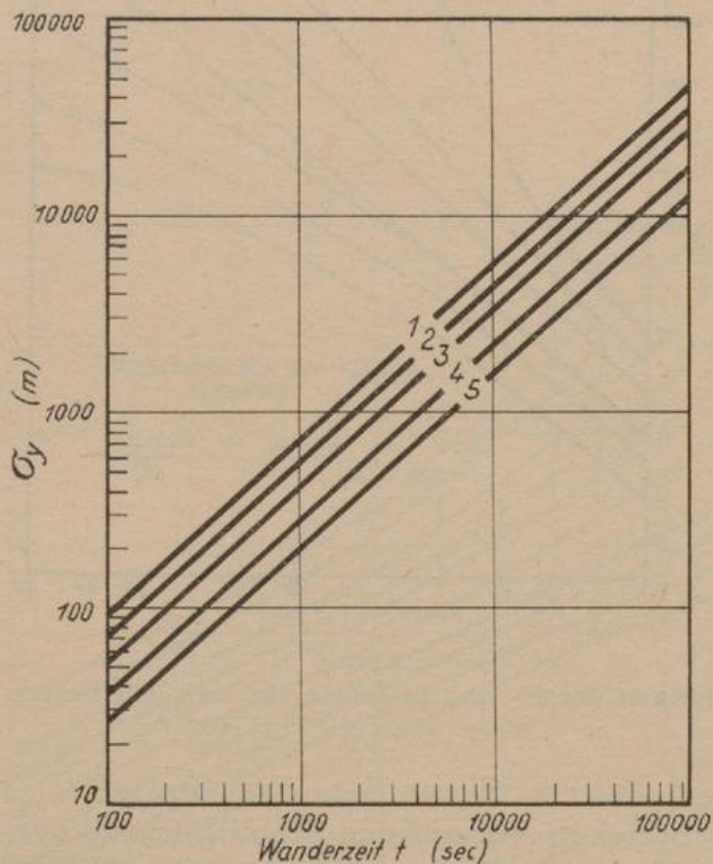


Abb. 8

Beziehung zwischen σ_y und der Wanderzeit für 5 Stabilitätsklassen. Nach Turner (75).

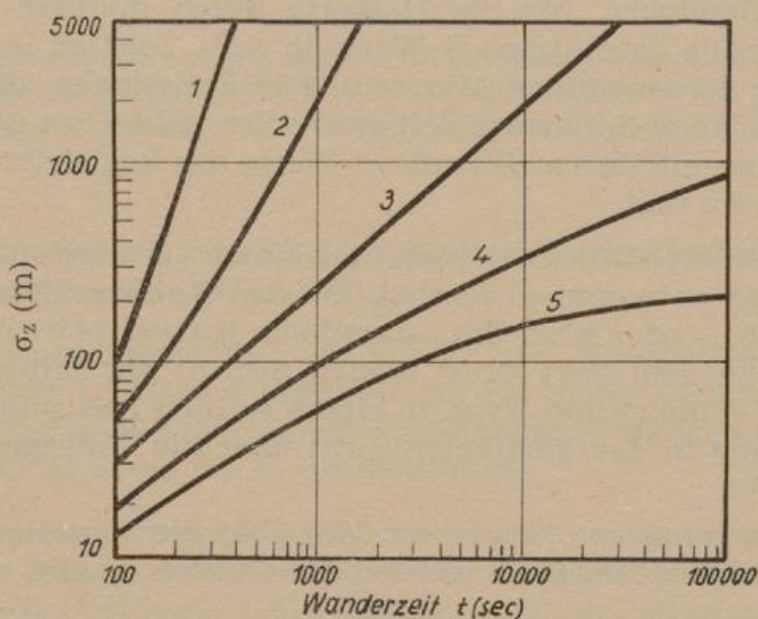


Abb. 9

Beziehung zwischen σ_z und der Wanderzeit für 5 Stabilitätsklassen. Nach Turner (75).

miert werden in Standardabweichungen σ_z (s. G i f f o r d (27)) nach der Beziehung $\sigma_z = \frac{H}{2.15}$. Es zeigt sich, daß für eine Windgeschwindigkeit von 5 m sec^{-1} σ_z -Werte aus Abb. 9 gut mit Ablesungen aus dem entsprechenden Diagramm von P a s q u i l l (Abb. 7) für die Bestimmung der Größe H korrespondieren.

2.2.4. Berücksichtigung der Schornsteinüberhöhung

Der Betrag der Schadstoffkonzentration, die mit Hilfe der angegebenen Formeln berechnet werden kann, wird mitbestimmt durch die Höhe der jeweils betrachteten Quelle. Während ein Teil der Autoren lediglich die „Höhe“ der Quelle berücksichtigt, betrachten andere auch die „effektive Höhe“ der Quelle (s. z. B. H a s e k (29)). Die Höhe der effektiven Quelle ist als die Summe aus der „Schornsteinbauhöhe“ und der „Schornsteinüberhöhung“ aufzufassen. Im VDI-Handbuch „Reinhaltung der Luft“ (77) ist die Schornsteinüberhöhung als der senkrechte Abstand der horizontal liegenden Rauchfahnenachse von der Schornsteinmündung definiert. Einen Einblick in die Untersuchungsergebnisse verschiedener Autoren, die sich mit diesem Thema beschäftigt haben, geben P a s q u i l l (49) und S t ü m k e (66, 67, 68). Letzterer zählt zunächst die Vielzahl der Einflußgrößen auf, die an der Art der Ausbreitung industrieller Abgase beteiligt sind. Hierzu gehören auch der Strahlimpuls unmittelbar nach Verlassen des Schornsteins, der Durchmesser der Schornsteinmündung sowie die aus dem Temperaturunterschied zwischen Abgasen und Umgebungsluft resultierenden Auftriebskräfte. Die komplexe Wirkung der beteiligten Faktoren ist außerordentlich schwer zu erfassen, so daß bis jetzt (67) nur Näherungstheorien oder empirische Formeln für die Berechnung der Schornsteinüberhöhung aufgestellt werden konnten. Eine allgemein gültige Beantwortung der Frage nach dem horizontalen Abstand zwischen der effektiven Quelle und dem Schornstein steht zur Zeit noch aus; für eine erste Näherung wird in den meisten Fällen eine Vernachlässigung dieses Abstandes hingenommen werden können (67).

In (67) gibt S t ü m k e einen Überblick über die bekannt gewordenen Verfahren zum Berechnen der Schornsteinüberhöhung Δh . Er teilt die Verfahren hinsichtlich der Emissionsfaktoren nach dem Gesichtspunkt ein, ob ein Anfangsimpuls oder ein Wärmeüberschuß in Rechnung gestellt wird. Hinsichtlich der meteorologischen Parameter wird unterschieden, ob es sich um eine ruhende oder um eine bewegte Atmosphäre handelt und ob eine indifferente, stabile oder nicht näher festgelegte Schichtung vorausgesetzt ist. Anschließend leitet S t ü m k e (67) zwei Formeln für die Schornsteinüberhöhung ab und prüft diese zusammen mit acht weiteren Gleichungen hinsichtlich ihrer Eignung zum Berechnen der Schornsteinüberhöhung, indem er berechnete und beobachtete Werte der Schornsteinüberhöhung vergleicht. Hierbei wird festgestellt, daß die Beziehung nach H o l l a n d

$$[35] \quad \Delta h = K_H \frac{W}{\bar{U}} \left(1,5 + 2,845 d \frac{\Theta^*}{1 + \Theta^*} \right)$$

bei indifferenter und stabiler Schichtung den übrigen Formeln überlegen ist. In Gleichung [35] ist K_H eine Konstante, \bar{U} die mittlere Windgeschwindigkeit im Aufstiegsbereich der Rauchfahne und d der Durchmesser der (kreisförmigen) Schornsteinmündung; in W gehen die Mündungsgeschwindigkeit der Schornsteingase, die Erdbeschleunigung sowie der Schornsteindurchmesser und in Θ^* die Temperatur der Rauchgase an der Schornsteinmündung sowie die Temperatur der

Umgebungsluft in Schornsteinhöhe ein. In Tab. 7 sind Δh -Werten, die mit Hilfe von Gleichung [35] berechnet wurden, beobachtete Schornsteinüberhöhungen gegenübergestellt.

In einer späteren Arbeit (68) macht *Stümke* folgenden allgemeinen Ansatz für die Schornsteinüberhöhung

$$[36] \quad \Delta h = \frac{1}{\bar{U}} \left\{ c_j w_* d + c_\theta d^{-\mu} w_*^{-\lambda} \left[\frac{w_* d^2 (\vartheta_* - \vartheta_h)}{\vartheta_*} \right]^\alpha \right\}$$

In diese Beziehung gehen die mittlere Windgeschwindigkeit \bar{U} in Rauchfahnenhöhe, der Durchmesser der Schornsteinmündung d , die Mündungsgeschwindigkeit der Schornsteingase w_* , die potentielle Temperatur an der Schornsteinmündung ϑ_* , die potentielle Temperatur der Umgebungsluft in der Höhe der Schornsteinmündung ϑ_h sowie die Koeffizienten c_j und c_θ und die Exponenten μ , λ und α ein. Anschließend bestimmt *Stümke* (68) die fünf zuletzt genannten Größen derart, daß Gleichung [36] für das vorhandene Versuchsmaterial eine relativ genaue Angabe der Schornsteinüberhöhungen liefern kann.

2.2.5. Zur Bedeutung der Meßdauer

Wie oben abgeleitet weist das Konzentrationsfeld eines aus einer kontinuierlichen Quelle austretenden Schadstoffs auf der Bodenprojektion der Rauchfahnenachse im Abstände x_{\max} vom Fuße der Quelle ein Maximum auf. Für Probleme der Luftreinhaltung ist es wichtig, daß dieser Maximalwert durch entsprechende Regulierung der Emissionsbedingungen unter einem vom Biologen und Mediziner festgesetzten kritischen Schwellenwert gehalten wird. Dieses Vorgehen erfordert auch die Berücksichtigung der Meßdauer.

Für die Berechnung zuverlässiger Konzentrationswerte aus den verschiedenen beteiligten Parametern ist es wichtig, den sog. Meßdauer-Effekt zu berücksich-

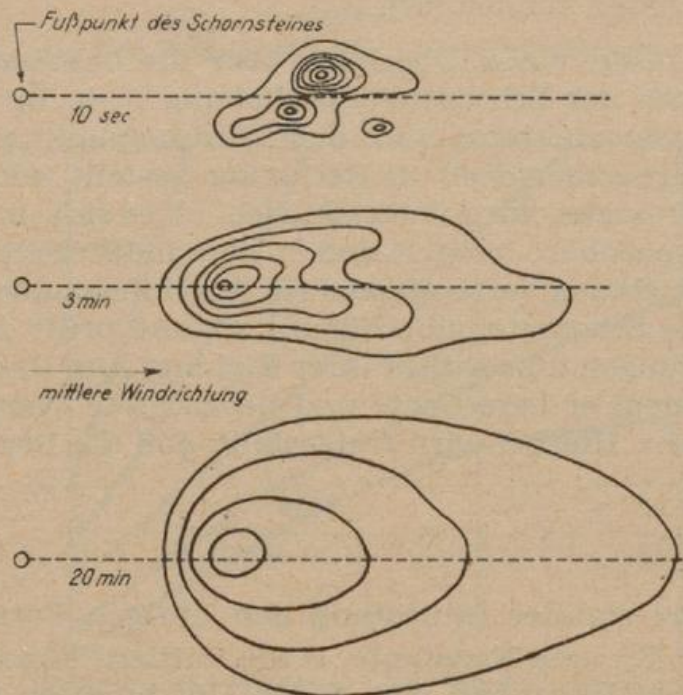


Abb. 10

Isoplethendarstellung der Gaskonzentration im Lee eines Schornsteins am Erdboden.

Nach *Wippermann* (82).

tigen. Die zeitlich gemittelte Konzentrationsverteilung hängt sehr wesentlich von der Länge des für die Mittelbildung gewählten Zeitintervalls ab. Diese Tatsache wird schematisch in Abb. 10 verdeutlicht.

Bei einem exakten Vergleich von berechneten und mit geeigneten Instrumenten gemessenen Konzentrationswerten muß die Meßdauer gleich dem Zeitintervall sein, das bei der Berechnung der Konzentrationswerte aus den angegebenen Formeln benutzt wird. Einen speziellen Beitrag zu diesem Problem liefert W i p p e r m a n n (81) mit einer theoretischen Untersuchung. Aus dieser sei hier Tab. 5 wiedergegeben. Sie zeigt den Einfluß der Meßdauer T auf das Verhältnis $\Psi(T)$ der über die Zeit T gemittelten maximalen Konzentration $(\bar{\chi}_T)_{\max}$ zu der über eine unendlich lange Zeit gemittelten maximalen Konzentration $(\bar{\chi}_\infty)_{\max}$.

Meßdauer T	Konzentrationsverhältnis $\Psi(T)$	Meßdauer T	Konzentrationsverhältnis $\Psi(T)$	Meßdauer T	Konzentrationsverhältnis $\Psi(T)$
2 min	3,57	15 min	2,33	3 h	1,71
3 min	3,20	20 min	2,25	4 h	1,63
4 min	2,97	25 min	2,20	5 h	1,56
5 min	2,83	30 min	2,16	6 h	1,51
6 min	2,72	45 min	2,07	12 h	1,33
8 min	2,56	1 h	2,01	1 d	1,20
10 min	2,47	1,5 h	1,91	2 d	1,11
12 min	2,40	2 h	1,83	3 d	1,08
				4 d	1,06

Tab. 5

Abhängigkeit des Konzentrationsverhältnisses $\Psi(T)$ von der Meßdauer T.
Aus W i p p e r m a n n (81).

W i p p e r m a n n benutzt hierbei Formel [4] von S u t t o n, in die er gemäß Gleichung [22] und [23] die entsprechenden Werte für C_y und C_z einsetzt. Tab. 5 zeigt, daß mit zunehmender Meßdauer T der Wert von $(\bar{\chi}_T)_{\max}$ abnimmt.

Die Größe

$$[37] \quad V(T_1, T_2) = \frac{(\bar{\chi}_{T_1})_{\max}}{(\bar{\chi}_{T_2})_{\max}} = \frac{\Psi(T_1)}{\Psi(T_2)}$$

d. h. das Verhältnis der für zwei endliche, verschieden lange Mittelbildungszeiten berechneten Maximalkonzentrationen, wird von W i p p e r m a n n als Meßdauerereffekt bezeichnet.

2.3. Vergleiche zwischen Messungen und Ergebnissen der Ausbreitungsrechnung

In der meteorologischen Literatur sind zahlreiche Arbeiten vertreten, in denen theoretisch bzw. semi-empirisch Beziehungen für die Berechnung von Schadstoffkonzentrationen oder -niederschlägen abgeleitet werden. Es werden auch häufig Untersuchungen durchgeführt, die sich allein auf Beobachtungsdaten stützen (s. z. B. H a m m j e (28), H e t t c h e (33), K n a u e r (41), S c h w a r z u. a. (58)).

Dagegen existiert nur eine relativ kleine Zahl von Arbeiten, die einen Vergleich zwischen beobachteten und berechneten Werten bieten. Auf einige von diesen soll hier eingegangen werden.

Zunächst sei noch bemerkt, daß Sutton (71) aufgrund von Messungen in Südengland (Porton) für Vergleiche zwischen gemessenen und auf theoretischer Grundlage ermittelten Konzentrationswerten in Quelledistanzen bis zu einigen Kilometern eine Genauigkeit von etwa $\pm 20\%$ angibt. Sutton (71) nimmt für Fabrikschornsteine im Flachland an, daß berechnete Konzentrationswerte von den wahren Werten höchstens um den Faktor 2 bis zu einer Quelledistanz von etwa 10 km und höchstens um den Faktor 5 in größeren Entfernungen voneinander abweichen. — In diesem Zusammenhang ist noch darauf hinzuweisen, daß die Sutttonschen Formeln in Schornsteinnähe nicht gelten (s. z. B. Geisler (23)).

2.3.1. Untersuchungen von D. B. Turner über die SO_2 -Konzentration in einem Stadtgebiet

Zu den vergleichenden Untersuchungen zählt eine Arbeit von Turner (75), auf die hier zunächst eingegangen sei. Er berechnet die SO_2 -Konzentration, die zahlreichen verschiedenartigen Quellen in der Stadt Nashville/Tennessee zuzuschreiben ist. Die Grundlage seiner Berechnungen bildet die Formel [8], welche Turner seinen speziellen Erfordernissen gemäß etwas modifiziert. Er vergleicht berechnete und beobachtete Konzentrationswerte für 35 24stündige Perioden, nachdem er 74 Perioden mit Regen aus der Untersuchung ausgeschlossen hat. Die hier interessierenden Messungen fallen in den Zeitraum von Oktober 1958 bis

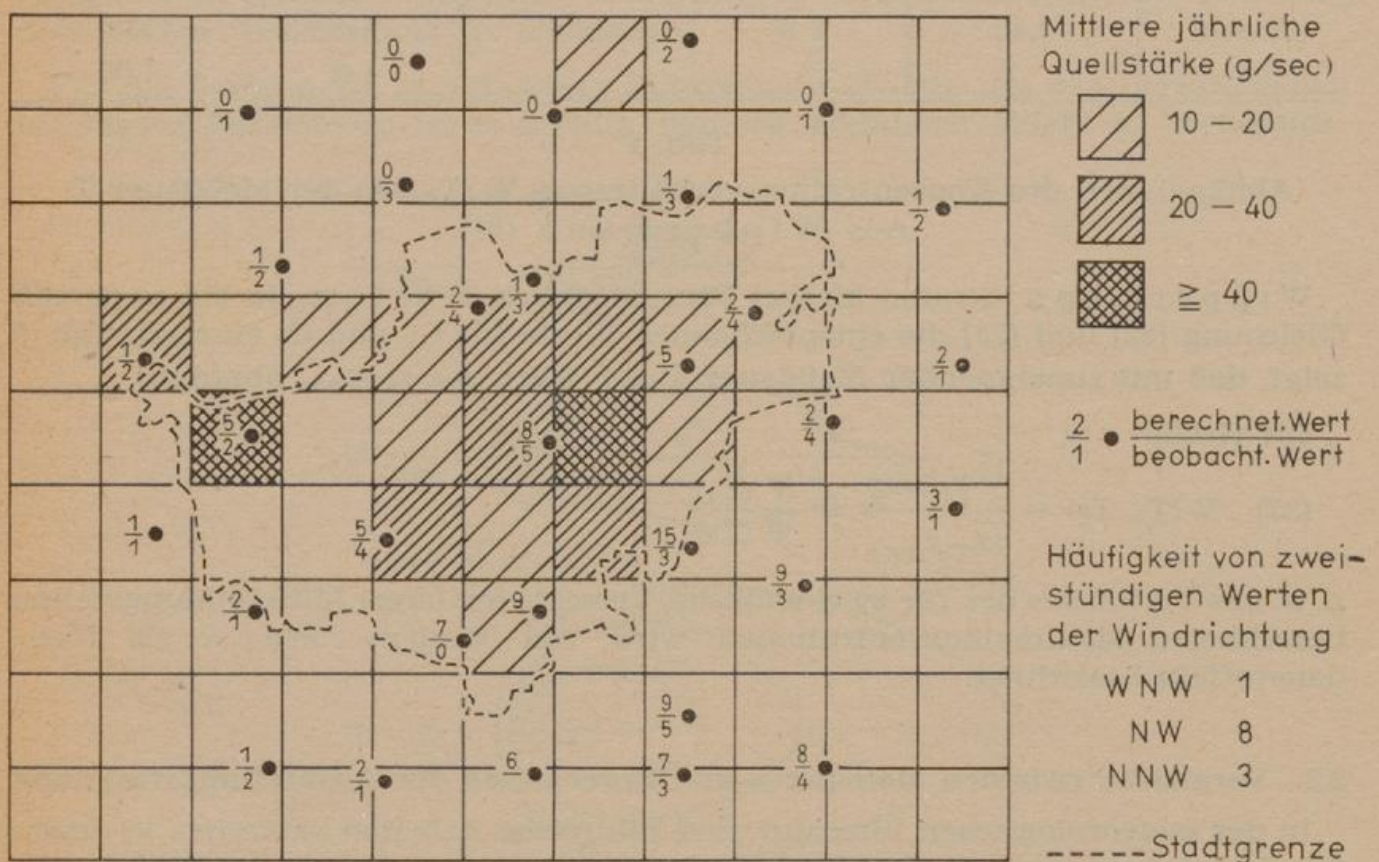


Abb. 11

Berechnete und beobachtete SO_2 -Konzentrationen (pphm) für eine 24stündige Periode mit nordwestlichen Winden, die am 6. 12. 1958 um 14 CST endete. Nach Turner (75).

März 1959. Die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit wurden für zweistündige Perioden ausgewertet. Für die Berechnung mußte ferner die Stabilitätsklasse bekannt sein, die die Größe der σ_y - bzw. σ_z -Werte wesentlich mitbestimmt. Die zweistündliche Stabilitätsklasse erhielt Turner durch Mittelung zweier stündlicher Werte. Diese wurden von ihm aus der Windgeschwindigkeit und dem sog. „Strahlungsindex“ gewonnen (s. Abschnitt 3.2.3.3.). Die SO_2 -Konzentrationen wurden jeweils für zwölf zweistündige Perioden berechnet, dann summiert und gemittelt, so daß man 24-Stundenmittel der Konzentration erhielt.

Bei den vorgenommenen Vergleichen überwiegt im allgemeinen deutlich die Tendenz, daß die berechneten Konzentrationen höher als die tatsächlich beobachteten sind. Für eine spezielle 24stündige Periode stellt Abb. 11 die berechneten den beobachteten Werten gegenüber. Das hier dargestellte Rechteck reicht in allen Richtungen mindestens um $1\frac{1}{2}$ Meilen über die Stadtgrenze von Nashville hinaus. Die Windrichtung während der 12 zweistündigen Perioden kann der Legende entnommen werden. Abb. 11 zeigt, daß die Berechnung im Lee der Hauptquellen zu hohe und in deren Luv zu niedrige Werte liefert.

2.3.2. Untersuchungen von R. Trappenberg und M. Diem über den Staubniederschlag einzelner Werkanlagen

Weiter sollen hier Arbeiten von Trappenberg (73, 74) angeführt werden, der die Verunreinigung der Weingärtensiedlung im Westen der Stadt Karlsruhe untersucht. Diese Siedlung erhält hohen Staubniederschlag aus einem südwestlich von ihr gelegenen Kraftwerk A und einer Fabrik B. Ersteres besitzt einen 40 m hohen, die Fabrik einen 15 m hohen Kamin. Haftfolien wurden in der Zeit von Februar bis Juli 1953 in etwa 2 m Höhe an 15 Meßstellen ausgelegt, die sich auf ein Gebiet von 2 km² verteilten.

Die Berechnungen wurden angenähert gemäß Gleichung [2] durchgeführt, nach einem von Diem und Trappenberg (16) angeführten Verfahren. Einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Monatssummen des Staubniederschlags bietet Tab. 6. Mit Ausnahme von zwei Monaten ist die Übereinstimmung befriedigend. In den übrigen 4 Untersuchungsmonaten bleibt die Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten meist unter 60%, häufig sogar unter 30%.

Eine andere Untersuchung, die einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Daten ermöglicht, hat Diem (15) durchgeführt. Er betrachtet den Staubausschlag eines großen Werkes am Niederrhein. Die Messung des Staubniederschlags erfolgte nach der von Trappenberg (73, 74) beschriebenen Methode mittels Haftfolien. Abb. 12 zeigt für den Monat Mai 1955 die Verteilung des Staubniederschlags [g/m²], der an 73 Stellen gemessen wurde. Der Anteil der südwestlichen Winde beträgt in diesem Monat 45%, derjenige der nördlichen Winde 21%. Die Staubverteilung weist neben dem Hauptmaximum im eigentlichen Bereich der Anlage A, welches der Verladeeinrichtung, der Brikettfabrikation und der Schlammwäsche zuzuschreiben ist, ein deutlich ausgeprägtes Nebenmaximum von 12,5 g/m² im NE auf, das mit der Hauptwindrichtung gut übereinstimmt. Für das Nebenmaximum im Süden mit 14,5 g/m² wird hauptsächlich die Periode vom 24. 5. bis zum 31. 5. verantwortlich gemacht, in der die Windrichtungen um Nord außergewöhnlich konstant waren.

Zum Vergleich gibt Diem (15) die berechneten Staubniederschläge in Abb. 13. Die Berechnungen wurden auch hier angenähert auf der Grundlage von Gleichung

Monat		Anz. der Tage	Meßstelle							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Februar	gem.	28	12,1	14,4	18,2	32,8	52,3	25,0	15,4	15,1
	ber.	28	12,8	7,8	12,8	22,8	27,1	22,8	23,8	23,3
März	gem.	27	7,9	9,4	16,9	21,4	24,3	18,5	17,4	17,1
	ber.	27	4,3	2,7	4,3	8,0	9,5	8,0	8,1	7,7
April	gem.	27	5,2	7,6	18,0	16,8	15,4	12,7	13,8	17,5
	ber.	27	7,8	5,3	7,8	15,5	18,8	15,5	14,6	13,5
Mai	gem.	30	3,7	5,6	13,1	14,1	7,7	8,6	6,2	9,5
	ber.	30	5,0	3,5	5,0	10,1	12,1	10,1	9,4	8,2
Juni	gem.	30	11,2	11,5	17,6	19,7	18,4	25,4	26,6	26,0
	ber.	30	12,5	8,3	2,5	24,4	29,2	24,4	23,3	21,5
Juli	gem.	31	8,2	10,0	16,9	16,6	17,5	18,3	28,0	26,4
	ber.	31	16,7	11,8	16,7	34,1	41,5	34,1	31,2	27,8
Summe	gem.	173	48,3	64,5	100,7	124,8	139,0	96,7	91,2	91,6
Febr.–Juli	ber.	173	59,1	39,4	59,1	114,9	138,2	114,9	110,4	102,5
Summe	gem.	145	36,2	50,1	82,5	92,0	86,7	71,7	75,7	76,5
März–Juli	ber.	145	46,3	31,6	46,3	92,1	111,9	92,1	86,6	78,7
			9	10	11	12	13	14	15	
Februar	gem.	28	36,6	18,6	—	—	—	—	—	—
	ber.	28	26,9	18,7	—	—	—	—	—	—
März	gem.	27	30,7	20,5	10,7	14,6	15,5	21,1	26,2	
	ber.	27	9,1	6,2	5,1	6,4	4,1	8,2	12,4	
April	gem.	27	30,6	15,3	9,6	14,6	8,2	20,0	23,2	
	ber.	27	16,3	13,3	11,3	15,3	7,1	14,1	21,2	
Mai	gem.	30	23,0	15,5	11,2	20,4	8,2	12,0	14,4	
	ber.	30	10,6	8,6	7,3	10,0	4,5	8,8	13,3	
Juni	gem.	30	30,0	16,5	11,9	13,3	12,0	20,3	30,6	
	ber.	30	26,1	20,4	17,1	23,1	11,8	23,0	34,9	
Juli	gem.	31	34,3	24,8	14,4	18,2	9,9	18,2	25,4	
	ber.	31	34,7	29,3	24,8	33,6	14,2	28,2	42,6	
Summe	gem.	173	200,3	112,4	—	—	—	—	—	
Febr.–Juli	ber.	173	123,7	96,5	—	—	—	—	—	
Summe	gem.	145	163,0	93,8	57,8	81,0	53,8	91,6	124,8	
März–Juli	ber.	145	96,8	77,8	65,6	88,4	41,7	82,3	124,4	

Tab. 6 Berechneter und gemessener monatlicher Staubbiederschlag [g/m² Monat]
Februar bis Juli 1953. Aus Trappenberg (74).

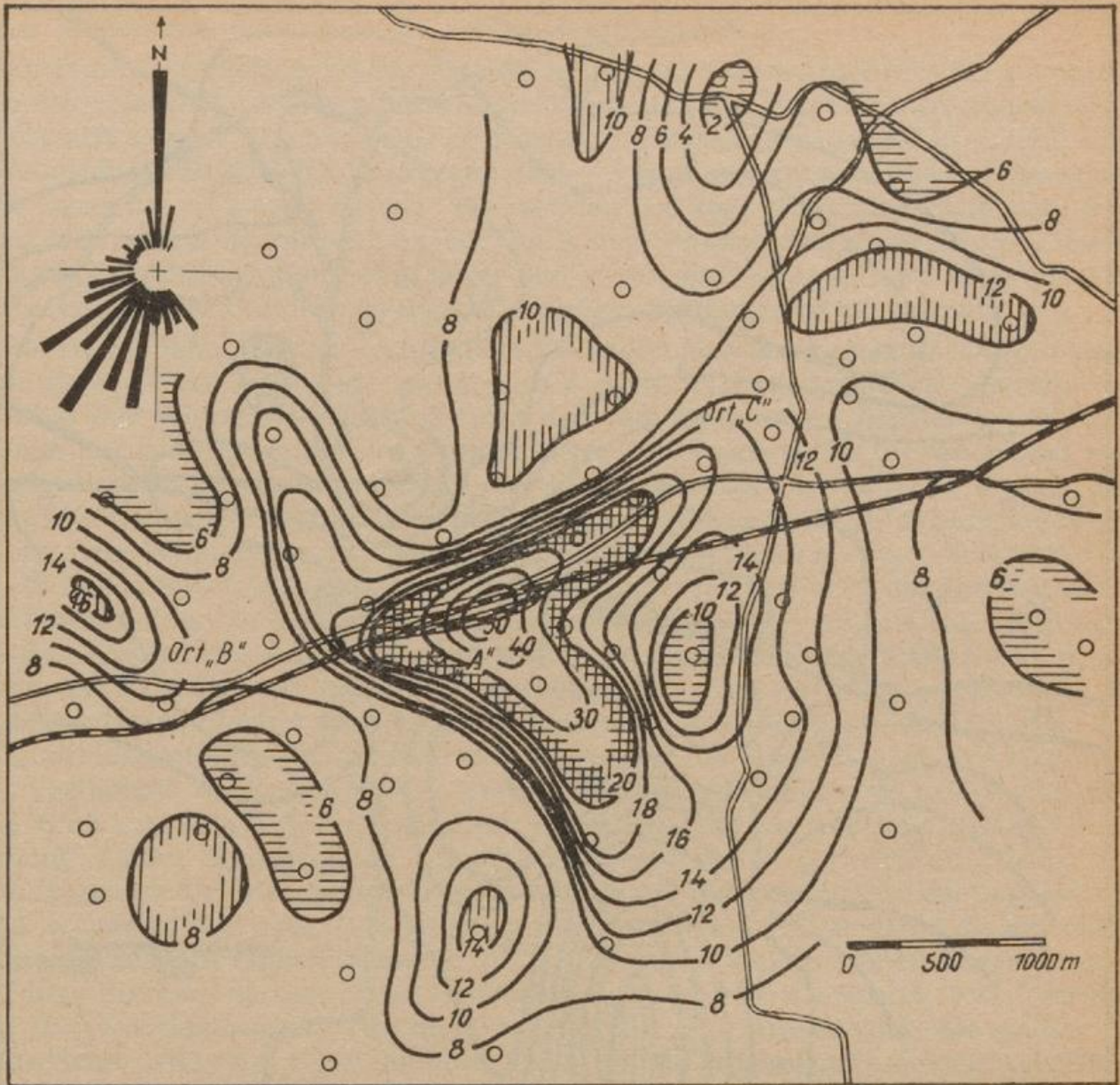


Abb. 12

Linien gleichen Staubniederschlags. Mai 1955. Nach Die m (15).

[2] durchgeführt; Einzelheiten über den Gang der Bestimmung der Staubniederschlagsbeträge sind in (16) enthalten. Die m (15) weist deutlich auf einige in den durchgeführten Berechnungen vorhandene Unzulänglichkeiten hin, die sich dadurch ergaben, daß die Schwankung der Windrichtung, die Regendauer, der Temperaturgradient und die Teilchengröße nicht erfaßt werden konnten. Die Verteilung des berechneten Staubniederschlags im Mai 1955 (s. Abb. 13) besitzt ein ausgeprägtes Maximum mit über 11 g/m^2 zwei Kilometer südlich der Anlage A, das der großen Häufigkeit der Nordwinde zuzuschreiben ist. Ein zweites Maximum, das aus dem Anteil der südwestlichen Winde resultiert, liegt mit über 7 g/m^2 2,4 km nordöstlich von A. Die übrigen aufgetretenen Windrichtungen bewirken eine allgemeine Belastung des Geländes mit Werten zwischen 0 und 3 g/m^2 . In der unmittelbaren Umgebung der Anlage A sinkt nach den Berechnungen der Staubniederschlag auf Null ab im Gegensatz zur Verteilung, die sich aus den Meßwerten ergibt. Es wird festgestellt, daß die Ergebnisse trotz der Vereinfachungen, welche die Berechnung enthält, als hinreichend zu bezeichnen sind.

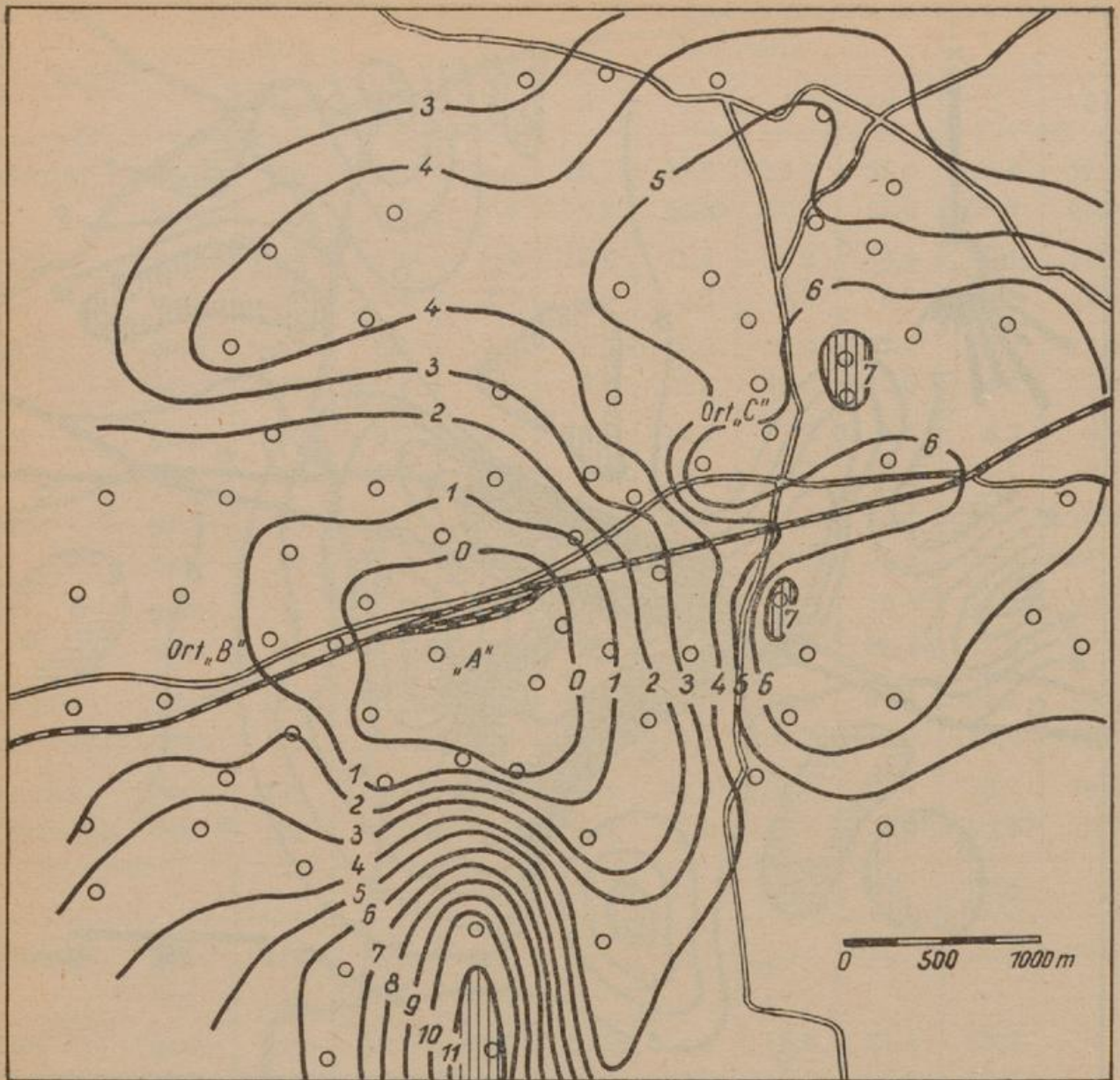


Abb. 13

Berechneter Staubniederschlag im Mai 1955. Nach Die m (15).

Es sei hervorgehoben, daß die Emissionen derjenigen Quellen der Werkanlagen, welche die extrem hohen Meßwerte im Werkgelände bedingen, bei der Berechnung nicht erfaßt wurden.

2.3.3. Diffusionsexperimente in Mainflingen

Im Lee einer Quelle in 114 m Höhe wurden vom Meteorologischen Institut der Technischen Hochschule Darmstadt bis zu 30 Filtermeßgeräte für Diffusionsexperimente in Mainflingen eingesetzt. Als Tracer wurde Natriumsalicylat verwendet. Klug berichtet in (53) über die Ergebnisse von neun Experimenten.

Werte der Entfernung des Konzentrationsmaximums von der Quelle, die nach zwei verschiedenen Verfahren berechnet wurden, sind im Mittel 9 bzw. 19% kleiner als der Mittelwert aus den Beobachtungen. Die nach den beiden benutzten Verfahren errechneten Beträge der maximalen Konzentration sind im Durchschnitt 1.7- bzw. 2.2mal größer als das aus den Beobachtungen bestimmte mittlere Konzentrationsmaximum.

2.3.4. Untersuchungen über die Schornsteinüberhöhung

Auch zum Problem der Schornsteinüberhöhung wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt, in denen berechnete Werte anhand von Beobachtungsmaterial überprüft werden. Davon berichtet Pasquill zusammenfassend in seinem Buch „Atmospheric Diffusion“. Ergänzend dazu sei hier auf einen Beitrag hingewiesen, den Lucas u. a. (42) liefern. Sie wenden die sog. „Ballonmethode“ an, d. h. man läßt in das Kaminrohr an der Basis des Schornsteins einen Ballon, dessen Fallgeschwindigkeit gleich Null ist, so daß er von den Gasen mitgeführt wird. Nach dem Austritt des Ballons aus dem Schornstein wird er optisch verfolgt.

Die Ballonbahn, die das Verhalten der Schadstofffahne repräsentieren soll, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Lucas u. a. (42) untersuchen speziell den Einfluß der Windgeschwindigkeit und der vom Schornstein emittierten Wärmemenge auf die Bewegung des Ballons. Ihre Untersuchungen führen sie an zwei Kraftwerken in England durch, deren Schornsteinbauhöhe 76 m (in Earley) und 130 m (in Castle Donington) beträgt. Bei beiden Stationen ist die Schornsteinüberhöhung der Windgeschwindigkeit umgekehrt proportional und der vierten Wurzel aus der emittierten Wärmemenge direkt proportional. Lediglich der Proportionalitätsfaktor ist an beiden Stationen unterschiedlich; eine stichhaltige Erklärung hierfür können die Verfasser nicht geben. Das Ergebnis von Lucas u. a. (42) über den Aufstieg von heißen Rauchfahnen läßt sich nach Stümke (68) mit dem verallgemeinerten Ansatz für die Schornsteinüberhöhung von Stümke (68) in Übereinstimmung bringen, wenn in diesem für die Koeffizienten und Exponenten bestimmte Werte eingesetzt werden. Es unterscheidet sich jedoch von dem von Sutton (72, S. 301) mitgeteilten Ergebnis, demzufolge die Schornsteinüberhöhung heißer Rauchfahnen umgekehrt proportional der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit und direkt proportional der Wärmeemission ist. In Abschnitt 2.2.4. wurde bereits eine Untersuchung von Stümke (67) erwähnt, in der dieser zehn verschiedene Gleichungen für die Bestimmung von Schornsteinüberhöhungen auf ihre Eignung an Hand von Beobachtungsdaten hin überprüft. Tab. 7 enthält aus (67) Vergleichswerte für die Überprüfung der Formel [35]. Sie gelten für einen Schornstein mit einer Bauhöhe von 61 m und einem Durchmesser von 3.46 m. Bezüglich der anderen Daten, die in die Rechnung eingehen, sei auf die Arbeit von Stümke (67) verwiesen.

Versuchsnummer	beobachtete Schornsteinüberhöhung (m)	nach Formel [35] berechnete Schornsteinüberhöhung (m)
11	50.0	52.7
12	53.0	62.7
13	62.0	56.7
14	61.0	50.1
15	43.0	35.1
16	63.0	62.7
17	61.0	56.8
18	82.0	89.5

Tab. 7

Beobachtete und berechnete Schornsteinüberhöhungen bei stabiler Schichtung.
Aus Stümke (67)

Analoge Vergleiche unternimmt Stümke (67) auch für indifferente und labile atmosphärische Bedingungen.

2.4. Zur Verwendung von Trajektorien

Es wäre wünschenswert für die Abschätzung der Gefährdung besiedelter Gebiete durch Schadstoffwolken deren Trajektorien angeben zu können. Wie komplex das Problem ist, derartige Bahnen mit gewisser Sicherheit zu ermitteln, geht bereits aus der Aufzählung der Voraussetzungen hervor, welche den Ausbreitungsformeln zugrundeliegen und welche die Diskrepanzen zwischen beobachteten und berechneten Werten bedingen. Mit der Ableitung von Formeln für die Trajektorien würde man einem wichtigen Anliegen vieler Praktiker Rechnung tragen. S c o r e r sagt zu diesem Problem in einem Aufsatz (60), daß Vorstellungen über die Wege von Luftteilchen auf statistischen Grundlagen basieren sollten, da die Partikelbahnen räumlich und zeitlich stark variieren. Die Kenntnis des Ausgangs- und Endpunktes von Trajektorien sei eine unzureichende Grundlage für die Entwicklung einer Theorie solcher Bahnen. Hierfür seien Messungen der Windschwankung notwendig. S c o r e r (60) stellt fest, daß die Ableitung von Trajektorien aus derartigen Messungen zwar äußerst wichtig, aber auch äußerst schwierig ist.

Als ein Beitrag aus der Praxis zu diesem Problem kann die bereits angeführte Untersuchung von L u c a s u. a. (43) angesehen werden. Zwei hieraus wiedergegebene Abbildungen zeigen in einem Vertikalschnitt (s. Abb. 14) und in einer Projektion auf die Erdoberfläche (s. Abb. 15), wie stark die Trajektorien von Ballonen mit gemeinsamem Ausgangspunkt innerhalb weniger Stunden divergieren können.

Auch in der Schweiz wurden bei Spezialuntersuchungen über die Windstruktur Ballone eingesetzt und deren Trajektorien dargestellt. L u g e o n (45) berichtet von zwei derartigen Projekten im Rhône- und Rheintal. Im Zusammenhang mit

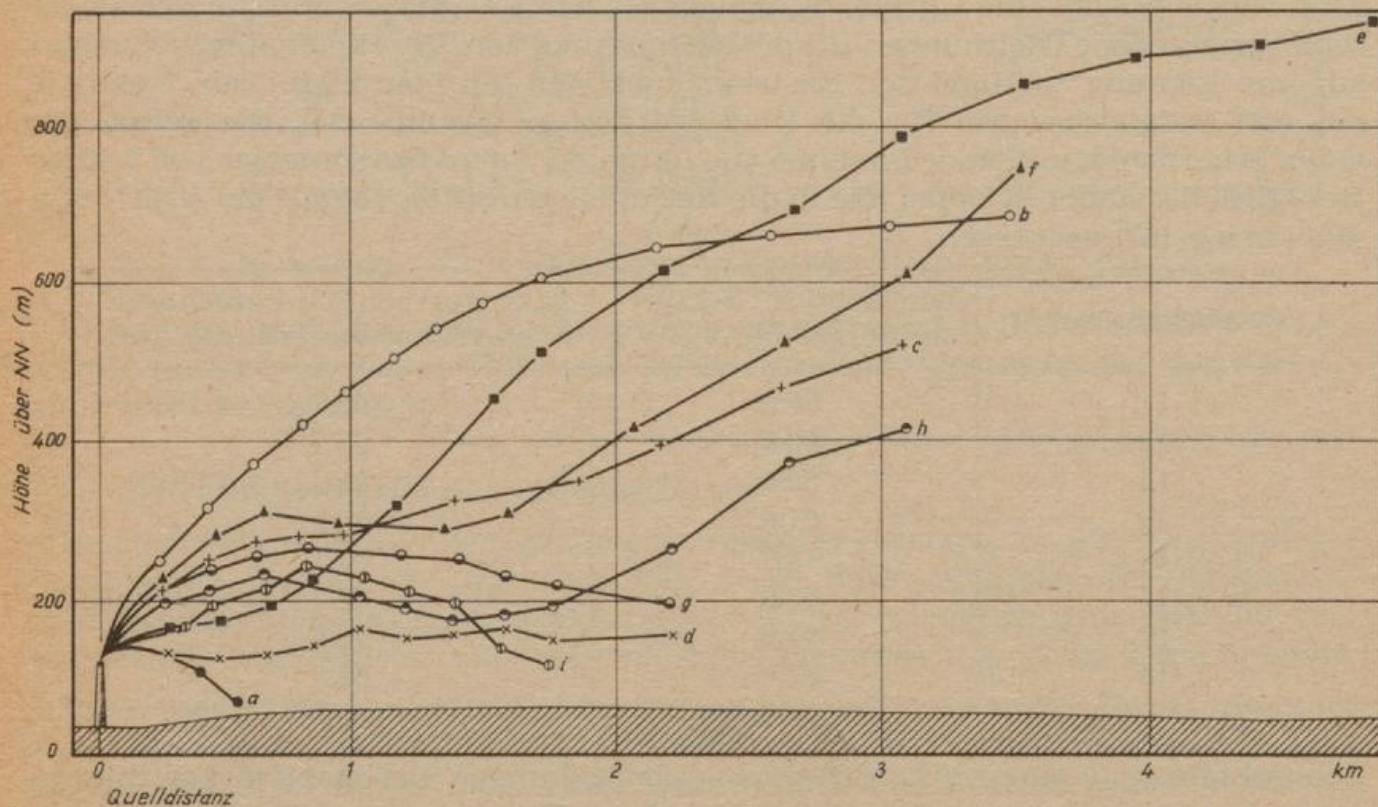


Abb. 14

Vertikalschnitt für Ballonbahnen am 8. 8. 1956, 12 bis 16 Uhr, sonniges Wetter.
Mittlerer Wind 6,9 m/sec. Nach L u c a s u. a. (43).

Frei- und Fesselballonaufstiegen zur Erfassung der Vertikalprofile verschiedener Elemente wurden dort auch leichte mit einer Reihe von kleinen Ballons besetzte Schnüre zum Nachweis der Luftbewegungen in verschiedenen Höhen benutzt.

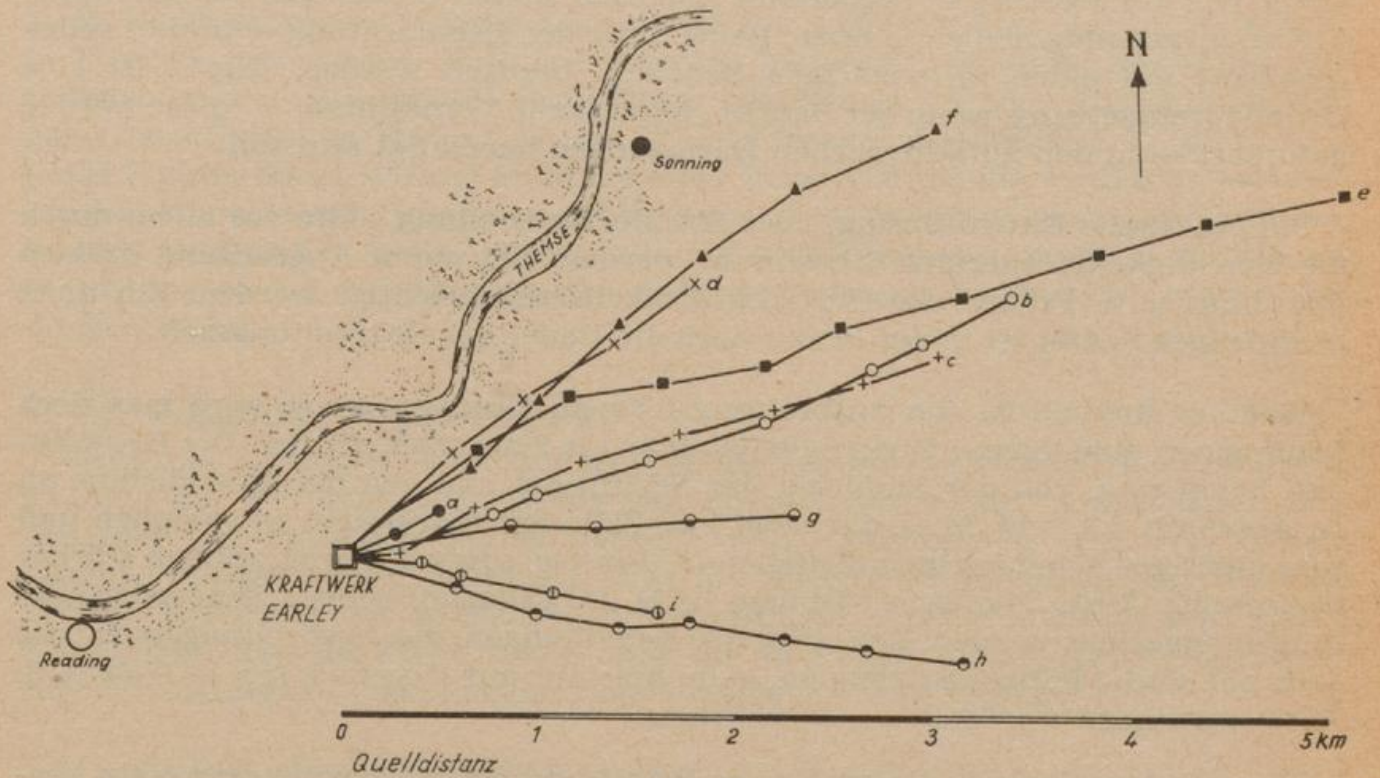


Abb. 15
Ballonbahnen am 8. 8. 1956, 12 bis 16 Uhr. Nach Lucas u. a. (43).

3. Zur praktischen Durchführung klimatologischer Standortbeurteilungen

Der erste Teil des Berichtes behandelte Ergebnisse theoretischer bzw. semiempirischer Untersuchungen über die Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre, wobei nur ein bescheidener Ausschnitt aus dem sehr rasch anwachsenden Schrifttum berücksichtigt werden konnte. Im zweiten Hauptteil sollen nun Wege aufgezeigt werden, die in der praktischen Durchführung von klimatologischen Standortbegutachtungen begangen werden können.

Die Betreiber von Kernreaktoren und die Sicherheitsbehörden benötigen für bereits festgelegte oder noch zu wählende Standorte Angaben darüber, welche radioaktiven Schadstoffmengen an die Atmosphäre abgegeben werden dürfen in Abhängigkeit von technischen und meteorologischen Bedingungen. Dabei wird unterschieden zwischen einer kontinuierlichen Abgabe über eine längere Zeit (etwa ein Jahr) und einem Kurzausstoß, wie er bei einem Unfall gegeben sein kann.

Es ergeht darum an die meteorologischen Institutionen die Forderung, die klimatischen Eigenarten des Standorts auf der Grundlage repräsentativer meteorologischer Beobachtungsreihen zu charakterisieren. Mitunter geschieht dies in zwei Schritten: zu Beginn der Planungsphase, also vor einer endgültigen Wahl des Standorts, wird eine klimatologische Grobanalyse des betreffenden Gebietes verlangt; nach der Standortwahl wird die ausführliche Begutachtung des Standorts gefordert. — In einem Fall (vorübergehend projektierte Reaktor Hitzacker) gab der Deutsche Wetterdienst eine eingehende Standortbeurteilung für zwei zur Wahl gestellte Orte (s. Dammann (12)).

Die ausführliche Begutachtung liefert a) die Beurteilung der klimatischen Verhältnisse des engeren Standortgebietes und b) Aussagen über die klimatischen Verhältnisse des angrenzenden Landschaftsraumes. Die unter a) gewünschten Daten sollen möglichst so aufbereitet sein, daß sie als Unterlagen für eine Ausbreitungsrechnung dienen können. Beide Teile der Begutachtung a) und b) sollen möglichst auf einen mehrjährigen Zeitraum bezogen werden. Dieses ist eine Grundvoraussetzung, wenn der Begriff „klimatische Verhältnisse“ — diese werden gefordert — in den gutachterlichen Darlegungen berechtigt sein soll.

Die praktische Durchführung einer Standortbeurteilung sollte vor allem durch die Genauigkeitsforderungen bestimmt werden. Bei deren Abgrenzung müssen allerdings u. a. Fragen der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden. Ein nicht unwichtiger Faktor ist in der Praxis auch die Dauer der Bearbeitungszeit.

Wenn es sinnvoll ist, die Ausbreitungsformeln anzuwenden, so wird man doch kaum einen günstigeren Genauigkeitsfaktor als 2 ansetzen dürfen. Die Genauigkeit hängt u. a. von der Stabilität der Schichtung und von der Quelledistanz ab (s. Abschnitt 2.3. und Meade (46)). Für Fälle mit markanten Inversionen und sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten (< 1 m/sec) sowie für orographisch stärker beeinflusste Ausbreitungsverhältnisse (z. B. in Tallagen) sollten Sonderbetrachtungen angestellt werden. Bezüglich der Bemühungen, die Ausbreitungsrechnung auch auf solche Fälle auszudehnen, kann hier nur auf Fortak (53, S. 37/38 u. S. 59/60) verwiesen werden.

Wenn meteorologische Daten für die Benutzung der Ausbreitungsformeln verlangt werden, so stellt sich zumeist folgende Alternative: Entweder sind für mehrere Jahre kleinaerologische Messungen in der untersten Luftschicht am geplanten Standort — bei stärkerem Relief auch in der Umgebung — anzustellen, was zeitlich und wirtschaftlich sehr hohe Ansprüche stellt, oder der Aufwand wird beschränkt auf die Durchführung eines „Minimalprogramms“ für die Gewinnung und Aufbereitung meteorologischer Daten zur Standortbeurteilung. Ein solches Minimalprogramm wird im Einzelfall bestimmt einerseits von der Lage des Standortes zu Stationen, die im wetterdienstlichen Netz aerologische und Bodenbeobachtungen durchführen, und andererseits von der Landschaftsform des Standortes und seiner Umgebung. Für einige typische Fälle werden im Abschnitt 3.4. Empfehlungen zur Aufstellung solcher Minimalprogramme gegeben.

3.1. Die geforderten meteorologischen Angaben

3.1.1. Grunddaten

Die Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre ist abhängig von der allgemeinen horizontalen Strömung und den dieser Strömung überlagerten Zusatzbewegungen, der turbulenten Diffusion. An Grunddaten sollten darum verfügbar sein: Beobachtungen der Windrichtung α und der Windgeschwindigkeit u zur Erfassung der allgemeinen Strömung sowie Angaben über Größen, welche ein Maß für die atmosphärische Turbulenz sind. Solche Größen sind die Änderungen der Temperatur und des Windes mit der Höhe $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ und $\frac{\Delta u}{\Delta z}$. Daten von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und diesen beiden Gradienten bilden die Grundlage für die Ausbreitungsrechnung.

3.1.2. Ergänzungsangaben

3.1.2.1. Die Variation der Windrichtung

Es ist wünschenswert, auch die Variation der Windrichtung für eine Zeiteinheit (z. B. innerhalb einer Stunde) oder zumindest Andauerzeiten der Windrichtung in Stunden zu erfassen. Auch bei konstant bleibender Hauptwindrichtung sind zumeist gewisse Richtungsschwankungen vorhanden, die den Ausbreitungsvorgang beeinflussen (s. Blässer und Wirtz (6) und Abschnitte 2.2.2. und 2.2.3.). Diese Fluktuationen wirken im Sinne einer Vergrößerung der seitlichen Ausbreitung und damit einer Herabsetzung der Konzentration in der Hauptwindrichtung; sie sind aufgrund bisheriger Untersuchungen abschätzbar nach der Stabilität der Schichtung, so daß ihre Ermittlung aus Windmessungen im Einzelfall nicht unbedingt nötig ist.

3.1.2.2. Erfassung von Inversionen

Wenn eine Inversion vorhanden ist, d. h. die Temperatur mit der Höhe zunimmt, so kann die vertikale Ausbreitung von Schadstoffen in der Atmosphäre stark behindert, in extremen Fällen nahezu völlig unterbunden sein. Aus diesem Grunde werden solche Schichten auch als Sperrschichten bezeichnet. Für die Charakterisierung der klimatischen Verhältnisse eines Standortes sind daher Kenntnisse über die Höhe sowie über die Intensität (Dicke und Temperaturprung), Häufigkeit und Andauer von Inversionen sehr wichtig.

3.1.2.3. Reliefbedingte Luftströmungen

Je stärker das Landschaftsrelief der Umgebung des Standortes ist, um so mehr treten in den Strömungsverhältnissen Besonderheiten auf, die einer Anwendung von Ergebnissen der Ausbreitungstheorie entgegenstehen. Z. B. sollten bei ausgesprochenen Tallagen besondere Maßnahmen getroffen werden, um Vorstellungen über die Trajektorien zu gewinnen (siehe Abschnitt 2.4.).

3.2. Erlangung der benötigten meteorologischen Daten

Es sei vorweg bemerkt, daß in den folgenden Abschnitten über die Gewinnung der erforderlichen Daten aus Stationsnetzen des Wetterdienstes und aus Sondermessungen instrumententechnische Fragen nur gelegentlich berührt und nicht im einzelnen diskutiert werden.

3.2.1. Beobachtungen des aerologischen Netzes

Sondierungen aerologischer Stationen mit Geräten an gefesselten oder frei fliegenden Flugkörpern liefern gewöhnlich keine Aufzeichnungen über eine gewisse Zeit in festen Niveaus, sondern nur hier aufgetretene Momentanwerte. Da von einer Station selten mehr als zwei Sondierungen täglich durchgeführt werden, konnten auch nur selten Abschätzungen von Tagesgängen aus diesem Material unternommen werden. Ein Beispiel hierfür ist eine Untersuchung von Holzappel und Manig (36), die auf viermal täglich durchgeführten Radiosondenaufstiegen basiert.

Es sind besondere Vorteile der Sondierungen, daß hierbei auch Meßwerte aus Schichten oberhalb der mit Hilfe von Gittermasten erfaßbaren Höhen (s. Abschnitt 3.2.2.1.) gewonnen werden und daß meist mehrjährige Meßreihen verfügbar sind.

3.2.1.1. Drachen- und Fesselballonaufstiege

Bereits in den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts wurden regelmäßig aerologische Daten bis zu einer Höhe von einigen Kilometern durch Drachen- und Fesselballonaufstiege in Lindenberg bei Berlin und auf dem Bodensee gewonnen. In kontinuierlichen Registrierungen wurden während des Auf- und Abstiegs Meßwerte der Temperatur, der relativen Feuchtigkeit und des Windes gegeben. Über statistische Ergebnisse dieser systematischen Drachen- und Fesselballonaufstiege berichteten F. Herath (31) und W. Peppler (51, 52).

In neuerer Zeit wurden Aufstiege an gefesselten Flugkörpern lediglich vereinzelt für Sonderzwecke durchgeführt (s. z. B. Lugeon (44, 45)).

3.2.1.2. Flugzeugaufstiege

Bereits Ende der zwanziger Jahre wurde in Deutschland ein Netz von Wetterflugstellen geschaffen. Die Flugzeugmeteorographen registrierten kontinuierlich während des Auf- und Abstiegs Temperatur und relative Feuchtigkeit neben dem Luftdruck. Die Flugzeugaufstiege lieferten aber keine Windwerte. Die Erfassung der thermischen Struktur wurde begünstigt durch die gute Ventilation bei nur mäßiger Aufstiegs geschwindigkeit (4 bis 5 m/s).

Gelegentlich wurde für die Standortbeurteilungen auf aerologisches Material der Wetterflugstellen zurückgegriffen, nämlich bei der Erstellung der Gutachten für die Kernkraftwerke in Stetternich bei Jülich und in Kahl am Main sowie für die Planung bei Hitzacker.

Die Dichte dieses Netzes von Wetterflugstellen entspricht etwa der Dichte des heutigen Radiosondennetzes in Westdeutschland. Der Aufbau derartiger aerologischer Netze wird in erster Linie bestimmt durch die Erfordernisse der täglichen Wetteranalyse und -vorhersage. Die gegebene Netzdichte wird diesem Zweck in ausreichendem Maße gerecht; sie ist allerdings im Hinblick auf Fragen über den Zustand der unteren Luftschichten, die stark vom Relief der Landschaft beeinflusst werden, als zu gering zu betrachten.

Auch das Flugzeug pflegt schon seit längerer Zeit für aerologische Messungen nicht mehr netzmäßig, sondern nur noch in Sonderfällen eingesetzt zu werden (s. z. B. Kleiß (38)).

3.2.1.3. Radiosondenaufstiege

An einigen deutschen Stationen wurden schon während des zweiten Weltkrieges regelmäßig Radiosondenaufstiege durchgeführt. Nach dem Krieg wurde in der Bundesrepublik Deutschland ein Radiosondennetz eingerichtet, das jetzt die sechs Stationen Schleswig, Emden, Hannover, Köln, Stuttgart und München umfaßt (zur Netzdichte s. Abschnitt 3.2.1.2.). Immerhin konnte das Datenmaterial dieser Stationen zur Charakterisierung des Klimas der unteren Hektometer der Atmosphäre mitverwendet werden, so z. B. beim Gutachten für den Standort Gundremmingen sowie für einen orientierenden Bericht über den Standort Lingen.

Die Radiosondenaufstiege liefern Werte der Temperatur, der Feuchtigkeit, des Luftdruckes und, mit Hilfe von Radargeräten, auch des Windes. Mit den zwei täglichen Terminen um 0 und 12 Uhr GMT werden Nacht- und Tagtyp der vertikalen Schichtung zwar im wesentlichen erfaßt; die Stunden stärkster Stabilität und Labilität liegen aber nach diesen Terminen.

Im Gegensatz zum Flugzeugmeteorographen gibt die netzmäßig eingesetzte Radiosonde Punktmessungen in kurzen Zeitabständen. In früheren Jahren wur-

den 7—8 Temperaturwerte pro Minute signalisiert; der Höhenabstand der Werte betrug dabei 40—45 m. Seit mehreren Jahren werden die Werte in Höhenabständen von etwa 35 m gegeben, entsprechend der auf 9—10 Werte pro Minute gestiegenen zeitlichen Dichte.

Es ist zu überlegen, ob diese Wertefolge der routinemäßig verwendeten Sonde M 60 den Genauigkeitsforderungen für den Bereich der untersten Hektometer genügt. Vergleichsaufstiege mit der vom Deutschen Wetterdienst im Instrumentenamt München entwickelten Feinstruktursonde haben gezeigt, daß die wesentlichen Merkmale der thermischen Schichtung, also auch die Inversionen, von der Routinesonde M 60 durchaus erfaßt werden. Die Aussage der Feinstruktursonde ist allerdings noch detaillierter und ermöglicht eine weitgehende Erfassung der blättrigen Struktur von Inversionen.

Es ist bei solchen Betrachtungen zu berücksichtigen, daß im Hinblick auf die zeitliche und räumliche Übertragbarkeit der Radiosondenmessungen einer Station gewisse Toleranzen zugebilligt werden müssen. Je feiner die blättrige Struktur angegeben wird, desto mehr wird die zeitliche und räumliche Repräsentanz eingeschränkt, denn die blättrige Feinstruktur unterliegt raschen zeitlichen Änderungen und dürfte auch örtlich stark wechseln.

Statistische Auswertungen von Temperaturdaten der Routineaufstiege können daher durchaus als Grundlage für Standortbeurteilungen dienen. Allerdings wäre der Einsatz von Feinstruktursonden in der Nähe eines Reaktorstandortes dann zweckmäßig, wenn — fallweise — die Ausbreitungsrechnung verfeinert werden soll.

Auch bezüglich der Windmessung sind Genauigkeitsfragen zu erheben. Die Ablesung am Radargerät wird in Abständen von einer Minute, d. h. für Höhenstufen von etwa 300 m vorgenommen. Für Zwischenabstände, die im Bereich der untersten Hektometer interessieren, können Windwerte nur durch Interpolation gewonnen werden. Diese wird dadurch erschwert, daß das Windprofil gerade in der Grundschicht eine exponentielle Charakteristik zu haben pflegt (s. Abschnitt 3.1.). Es kann nicht erwartet werden, daß sich Besonderheiten des vertikalen Windprofils der untersten Luftschicht durch die vorliegenden Radarwinddaten wiedergeben lassen.

Diese Überlegungen verlieren an Bedeutung bei der Frage der räumlichen (und zeitlichen) Übertragbarkeit der Windwerte von der Radiosondenstation auf den Standort eines Werkes. Je nach der Ausprägung des Reliefs werden die bei Interpolationen zwischen den Meßwerten sich einstellenden Fehler zurücktreten gegenüber orographisch bedingten Unterschieden zwischen dem Windprofil über dem Aufstiegsort und über der Reaktoranlage.

Erörterungen darüber, inwieweit durch radartechnische und aufstiegstechnische Maßnahmen die Winderfassung in den untersten Hektometerschichten zu verfeinern wäre, können hier nicht angestellt werden. Die Behandlung dieser Frage würde weit über den Rahmen des Berichts hinausgehen.

3.2.2. Zur Durchführung von Sondermessungen

3.2.2.1. Messungen an Gittermasten

Bereits in der Frühzeit der Aerologie wurden zur Erfassung der Struktur der untersten Schichten Messungen an Türmen und Gittermasten durchgeführt. Es sei verwiesen auf Arbeiten von Hergesell (32), Angot (2, 3), Hellmann (30) und A. Peppler (50). Das Hauptinteresse der Aerologen war jedoch seit

jeher gerichtet auf die Erforschung wesentlich mächtigerer Höhenbereiche mit dem Ziel, die großräumigen Vorgänge der Wetterentwicklung zu verfolgen. Routineaufstiege von Radiosonden erreichen heute unter günstigen Bedingungen Gipfelhöhen von mehr als 30 km. Neben den sich über Kilometer erstreckenden Höhenbereichen fanden in den letzten Jahrzehnten auch Luftschichten sehr kleiner vertikaler Dimension stark zunehmendes Interesse; agrarmeteorologische Sonderuntersuchungen in Pflanzenbeständen zur Erfassung des Klimas der bodennahen Luftschicht wurden und werden vielerorts durchgeführt.

Die spezielle Erforschung des einige Hektometer umfassenden Höhenbereiches wurde vor allem nach dem zweiten Weltkrieg vorangetrieben im Zuge des Anwachsens der Gefahren, die dem Menschen durch die Verunreinigung der Luft drohen. Messungen an Gittermasten, wie sie z. B. Frank en b e r g e r in neuerer Zeit über Jahre hinweg durchgeführt hat, sind darum heute besonders aktuell. Es sei auch auf Messungen an Sendemasten in Mühlacker b. Pforzheim durch das Meteorologische Institut der Technischen Hochschule Karlsruhe und in Mainflingen durch das Institut für Meteorologie der Technischen Hochschule Darmstadt hingewiesen. In der Bundesrepublik Deutschland sind solche Masten für Reaktoranlagen bis jetzt in Garching bei München (s. G. H o f m a n n u. a. (35)), in Gundremmingen (13) und Jülich errichtet und für den Forschungsreaktor in Karlsruhe geplant worden. Es ist besonders wichtig, daß an Masten Temperatur und Wind in verschiedenen Höhen laufend gemessen und registriert werden. Somit können von den Daten der einzelnen Niveaus sowie von den Differenzwerten für die einzelnen Höhenabschnitte Tagesgänge sowie Andauerzeiten der Überschreitung von Schwellenwerten gewonnen werden. Mit Rücksicht auf die exponentielle Charakteristik des Windprofils sollten die vertikalen Abstände zwischen den Meßpositionen unten kleiner sein als oben. Es ist wünschenswert, das Programm der Mastmessungen durch Beobachtungen einer am Boden eingerichteten Station zu ergänzen, damit auch eine Zuordnung der Mastmessungen zu anderen meteorologischen Daten, wie Bewölkungs- und Nebelbeobachtungen und Registrierungen des Niederschlags und Sonnenscheins ermöglicht wird.

Bei der Bearbeitung von Mastmessungen für Standortbeurteilungen treten zumeist auch Fragen nach den Verhältnissen oberhalb der obersten Meßposition des Mastes auf. Extrapolationen auf Höhen über Mastspitze anhand von Daten der nächstgelegenen aerologischen Stationen werden zumeist nur grob orientierende Aussagen ermöglichen. Die oberste Meßposition sollte der effektiven Schornsteinhöhe entsprechen. Diese Forderung steigert allerdings den Aufwand für die Meßanlage außerordentlich.

3.2.2.2. Mobile Ballonstationen

Wenn am Standort und in seiner Umgebung das Relief der Landschaft einen beträchtlichen Einfluß auf die Strömungsverhältnisse hat, sollten besondere Anstrengungen gemacht werden, Kenntnisse über die Luftbahnen (Trajektorien) zu gewinnen (s. Abschnitt 2.4.). Das gilt vor allem für Standorte in Tallagen bzw. an Gebirgsrändern. In solchen Fällen müssen die spezifischen, an den Talverlauf gebundenen Zirkulationsformen festgestellt werden, um aussagen zu können, ob gewisse Orte oder Zonen — beispielsweise am Hang — besonders häufig von Emissionsfahnen erreicht werden, und ob etwa gegenläufige Strömungsführung unerwartete Konzentrationen bewirkt (s. S t e i n h a u s e r (63)). Die Errichtung eines Mastes für meteorologische Messungen (s. Abschnitt 3.2.2.1.) wird für einen Standort im Tal

nur wenig befriedigende Ergebnisse bringen können, wenn die seitlichen Talränder weit über die Masthöhe hinausreichen. Bei starkem landschaftlichen Relief sind Forderungen nach Mastmessungen nicht mehr realistisch sowohl im Hinblick auf die Berghöhen der Umgebung als auch wegen des Zieles einer möglichst räumlichen Erfassung der Zirkulation — wofür eine Aufstellung von Masten an mehreren Orten des Talraumes erforderlich wäre.

Bei derartigen Geländebeziehungen erscheint die Anwendung von Methoden der kleinaerologischen Erfassung vorteilhaft, die in der Schweiz für die Planung großer Kraftwerkanlagen gewählt wurden (s. Lugeon (45); Elektro-Watt, Zürich (21)): Aufstiege im interessierenden Höhenbereich (bis mindestens 1000 m über Talgrund) mit Fesselballonen zur Temperaturmessung und mit frei fliegenden Ballonen geringer Aufstiegs geschwindigkeit zur Feststellung der Windverhältnisse, indem die Ballone durch ein elektrisches Echopfeilgerät oder durch optische Visierung verfolgt werden. Die Bahnen der langsam steigenden Ballone stellen in gewisser Annäherung Trajektorien von Emissionswolken dar. — Diese Aufstiege werden von einer „beweglichen“, in einem Meßwagen eingerichteten aerologischen Station durchgeführt, die fallweise an einem zu beurteilenden Standort eingesetzt wird.

Die Aufstiegsstermine sollten so gewählt werden, daß besonders diejenigen Zeiten des Tages belegt sind, in denen extreme Schichtungs- und Strömungsverhältnisse einzutreten pflegen. Bei der Anwendung dieser Methoden muß nicht unbedingt eine lückenlose 1- bis 2jährige Meßperiode gefordert werden. Temporäre Messungen bei charakteristischen Situationen, z. B. bei Tallängswinden, Talquerwinden und bei stabilen Schwachwindlagen werden wahrscheinlich schon wichtige Kenntnisse über lokale Besonderheiten vermitteln.

Auf Einzelheiten der Aufstiegsstechniken kann hier nicht eingegangen werden. Hierzu sei lediglich auf die Literatur verwiesen.

Der Deutsche Wetterdienst plant, eine bewegliche aerologische Station in Betrieb zu nehmen. Diese könnte temporär auch an Standorten mit schwächerem topographischen Relief eingesetzt werden, um gutachterliche Aussagen verfeinern zu helfen, z. B. bei Fragen nach den Verhältnissen oberhalb der obersten Meßposition eines Mastes.

3.2.2.3. Rauchbeobachtungen

Verschiedentlich hat man für die Beurteilung der Ausbreitungsbedingungen über Werkanlagen spezielle Rauchbeobachtungen angestellt. Böer und Kolbig (8) beschreiben ein Verfahren, bei dem das Windgeschwindigkeitsprofil durch Rauchstriche von Patronen sichtbar gemacht wird, welche von einem gefesselten Trägerballon zeitgezündet abfallen.

Von Walke u. a. (80) wurde kürzlich über den erfolgreichen Einsatz eines Flugzeuges für photographische Aufnahmen der Rauchfahne aus einem Öl-Generator berichtet. Die Verfasser empfehlen, auch beleuchtete Rauchfahnen während der Nacht zu photographieren, um Lokalzirkulationen zu erfassen, die in Tälern und in Küstenbereichen auftreten.

Aus der Schweiz berichtet Courvoisier (53, S. 61) von stündlichen Aufnahmen der Rauchfahne eines schweizerischen Industriewerkes mit einer automatischen Kamera für Zwecke der Standortbeurteilung.

3.2.2.4. Spezielle Meßstationen im Tal und am Hang

Wie Courvoisier (53, S. 47—50) ferner mitteilt, wurden für ein schweizerisches Projekt in einem Talgebiet 12 Stationen verteilt, bei denen an niedrigen Masten in 15 m Höhe Windmesser angebracht wurden, um die lokalen Windverhältnisse in ihrer Abhängigkeit von der Topographie zu erforschen. Aus einer von einem solchen Netz gelieferten Windverteilung kann annähernd auf ein dreidimensionales Bild der Talzirkulation geschlossen werden.

Die thermische Schichtung in der unteren Atmosphäre über Talböden kann roh abgeschätzt werden mit Hilfe von Temperaturbeobachtungen in verschiedenen Höhen an Talhängen. So wurden z. B. in der Nähe des schweizerischen thermischen Kraftwerks Sisseln Temperaturmessungen am Hang in Schornsteinhöhe und 140 m über diesem Niveau für die Beurteilung der Ausbreitungsverhältnisse benutzt (s. A c k e r m a n n (1)).

Wegen mikroklimatischer Besonderheiten in Bodennähe dürfen allerdings Temperaturen, die am Hang nur wenige Meter vom Erdboden entfernt gemessen wurden, nur mit größerem Vorbehalt als repräsentativ für die Verhältnisse in der benachbarten freien Atmosphäre in gleicher Höhe gelten. Es ist darum auch für Hangmessungen der Temperatur vorteilhaft, einige kleine Masten aufzustellen. W a l k e u. a. (80) haben hierfür Masthöhen von 10 bis 20 m Höhe vorgeschlagen.

3.2.3. Daten von Bodenstationen des Deutschen Wetterdienstes

3.2.3.1. Stärkewindrosen

Bei der Planung irgendeiner Werkanlage mit beträchtlichen Emissionen wird im Hinblick auf die Sektoren mit starker Besiedlung als erste wichtige meteorologische Unterrichtung zumeist eine Stärkewindrose von einer für den Standort repräsentativen, bereits seit längerer Zeit bestehenden Bodenstation verlangt. Die Stärkewindrose ist eine verhältnismäßig leicht zu gewinnende, grob orientierende Aussage über die Häufigkeitsverteilung des Emissionstransportes. Es handelt sich hierbei um die Aufbereitung von Windbeobachtungen aus etwa 10 m Höhe und nicht um Winddaten aus der Schornsteinhöhe. Eine Stärkewindrose gibt aufgrund einer Beobachtungsreihe z. B. für einzelne Monate, Jahreszeiten oder das Jahr die mittlere Verteilung der Windrichtungen in ‰ oder ‰ aufgeteilt nach Geschwindigkeitsstufen an einem Beobachtungstermin oder im Durchschnitt von mehreren Terminen.

Die häufige Verwendung derartiger Stärkewindrosen für Planungsaufgaben basiert auf vieljährigen Beobachtungsreihen (10 Jahre und länger) eines einigermaßen dichten Stationsnetzes. Neben den größtenteils 8mal täglich beobachtenden synoptischen Stationen stehen auch die wesentlich zahlreicheren Klimastationen (nahezu 400) mit den Beobachtungen ihres Morgen-, Mittag- und Abendtermins zur Verfügung. Die Länge der Beobachtungsperioden ist ein sehr wesentlicher Faktor, weil die Grundfrage nach den mittleren Häufigkeiten des Transports in verschiedenen Sektoren mit Hilfe vieljähriger Beobachtungsreihen beantwortet werden sollte.

Die vergleichende Betrachtung der Stärkewindrosen mehrerer Stationen in der weiteren Umgebung eines Standortes kann Einblick geben in Eigentümlichkeiten der Strömungsverhältnisse der betreffenden Landschaft. So konnte D a m m a n n (11) bei der Standortbegutachtung für Kahl aus den Bodenwindbeobachtungen der meteorologischen Stationen im Rhein-Main-Gebiet und in den angrenzenden Mittelgebirgen spezifische tagesperiodische Zirkulationssysteme dieses Landschaftsraumes für besondere Wetterlagentypen feststellen.

3.2.3.2. Differenzen zwischen Stationen in verschiedener Höhenlage zur Abschätzung der Stabilität

Gelegentlich können gleichzeitig gewonnene Beobachtungsdaten von synoptischen oder Klimastationen in unterschiedlicher Seehöhe einander zugeordnet werden, um Hinweise auf die thermische Schichtung (und die Windverhältnisse) in einem Gebiet zu gewinnen. Die in Abschnitt 3.2.2.4. für Sonderstationen an Hängen gemachte Einschränkung gilt auch hier. Stationen mit extremem Lokalklima entfallen von vornherein für die Charakterisierung der Verhältnisse in der freien Atmosphäre über einer Talzone. Bei Abschätzungen der thermischen Stabilität auf dieser Grundlage ist die Einhaltung der auf Minuten genau festgesetzten Beobachtungstermine ein sehr wesentlicher Faktor.

3.2.3.3. Verwendung von Beobachtungen an einer Bodenstation zur Abschätzung der Stabilität

Mitunter werden Angaben über die Schichtungsverhältnisse in der untersten Luftschicht verlangt, obgleich geeignete Beobachtungsdaten aus der freien Atmosphäre oder von Stationen in verschiedener Höhe (s. vorangehende Abschnitte) fehlen. Darum ist auch der indirekte Weg eingeschlagen worden, aus Bodenbeobachtungen an einer Station Schlüsse auf den Stabilitätsgrad der unteren Atmosphäre zu ziehen.

Pasquill (48) definiert sechs Stabilitätsgruppen A—F in Abhängigkeit von der Windstärke, der Einstrahlung und der Bewölkung. Die Stabilitätsklasse A bezeichnet sehr labile, D neutrale und F mäßig stabile Verhältnisse (s. Tab. 8).

Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (m/sec)	Tag			Bedeckt Tag oder Nacht	Nacht		$\leq \frac{3}{8}$ Bewölkung
	Einstrahlung				leicht bedeckt oder $\geq \frac{4}{8}$ niedrige Wolken		
	stark	mäßig	schwach				
< 2	A	A—B	B	D	—	—	—
2—3	A—B	B	C	D	E	F	F
3—5	B	B—C	C	D	D	E	E
5—6	C	C—D	D	D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D	D	D

Tab. 8

Pasquillsche Stabilitätsklassen für Tag und Nacht. Aus Pasquill (48).

Unter dem Begriff „starke Einstrahlung“ wird sonniges Wetter zur Mittagszeit im Hochsommer in England verstanden, „schwache Einstrahlung“ soll ähnliche Verhältnisse mitten im Winter bezeichnen. Als „Nacht“ wird die Zeit zwischen einer Stunde vor Sonnenuntergang bis zu einer Stunde nach Sonnenaufgang angesehen.

Eine ähnliche Klassifikation, die nach Windgeschwindigkeit, Einstrahlung und Bewölkung eine Einteilung trifft, bringt R e u t e r (55). Er legt für die Strahlungsintensität folgende Klassen fest: starke Einstrahlung ≥ 750 mcal/m² min, mäßige Einstrahlung 400—750 mcal/m² min, schwache Einstrahlung ≤ 400 mcal/m² min. — T u r n e r (75) verwendet bei seiner Festlegung von Stabilitätsklassen nach Bodenbeobachtungen die Windgeschwindigkeit und den sog. „Strahlungsindex“. In diesen gehen ein: der Bedeckungsgrad, die Wolkenuntergrenze und die Sonnen-

höhe. Bezüglich genauerer Erläuterungen zum „Strahlungsindex“ sei auf die Originalarbeit (75) verwiesen. — In Anlehnung an Turner und Reuter hat auch Uhlig (76) ein Schema angegeben für die Bestimmung von Stabilitätsgraden der Luft anhand von Wettermeldungen einer Bodenstation.

Es interessiert natürlich zu wissen, inwieweit die vorhandenen thermischen Verhältnisse in der untersten Luftschicht mit derartigen Hilfsmitteln erfaßt werden. Es wurden deshalb für die Radiosondenstationen Hannover und Emden, von deren Aufstiegen zum 0-Uhr-Termin aus den Jahren 1957—62 beim Deutschen Wetterdienst Werte des Temperaturgradienten T_g für die Schicht zwischen dem Boden und 100 m über Grund vorliegen, Häufigkeitsauszählungen dieses Gradienten in Abhängigkeit von der Bedeckung und der Stärke des Bodenwindes durchgeführt. — Der betrachtete Temperaturgradient ist die Differenz zwischen der für 100 m Höhe über Grund aus den Aufstiegsdaten interpolierten Temperatur und der Temperatur am Boden. — In Anlehnung an die Klassifikationen von Pasquill und Reuter wurde folgendes grobe Schema für die Nacht entworfen,

Windgeschwindigkeit v (m/sec) in 10 m Höhe über Grund	Bedeckungsgrad N	
	$\geq 4/8$	$\leq 3/8$
< 2.0	I	I
2.0—3.9	II	I
4.0—4.9	II	II
≥ 5.0	III	III

Tab. 9

Abgrenzung von Stabilitätstypen für die Nacht.

in dem drei Typen der Stabilität I, II und III definiert sind durch die Windgeschwindigkeit und die Bewölkung, d. h. es wurden vier Klassen der Windstärke gebildet und eine davon (2.0—3.9 m/sec) nach der Himmelsbedeckung unterteilt. Anschließend wurden die jährlichen Häufigkeiten der durch Windstärke und Bedeckung gegebenen Stabilitätstypen I, II und III für Hannover ausgezählt.

Ferner wurden die an der Station Hannover im selben Zeitraum für die bodennahe Schicht von 100 m Dicke aus den aerologischen Aufstiegen festgestellten Temperaturgradienten dergestalt in drei Klassen K, L und M eingeteilt, daß ihre Häufigkeiten etwa mit der entsprechenden Verteilung der Stabilitätstypen I bis III zur Deckung kommen. Dabei wurden folgende Intervalle abgegrenzt:

$$\geq +1.0 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m (K), } -0.4 \text{ bis } +0.9 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m (L), } \leq -0.5 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m (M)}$$

Die Häufigkeiten der Stabilitätstypen I bis III und der Stabilitätsklassen K bis M im betrachteten Gesamtkollektiv der Jahre 1957—62 von Hannover sind Abb. 16 a) zu entnehmen. Es ist keineswegs so, daß bei dieser Gegenüberstellung von Häufigkeiten nahezu alle Fälle einer linken Säule mit denen der benachbarten rechten Säule identisch sind. Aus Abb. 18, in der die Häufigkeiten des Zeitraumes 1957—62 von sieben Klassen des Temperaturgradienten für zehn Gruppen der Windgeschwindigkeit beim Bedeckungsgrad $\leq 3/8$ und $\geq 4/8$ (bzw. für die Stabilitätsgruppen I bis III) von Hannover gegeben sind, wird ersichtlich, daß innerhalb jeder der Gruppen I bis III ein gewisses Spektrum verschiedener Temperaturgradientbereiche liegt, das jeweils über das in Abb. 16 a) zugeordnete Gradientenintervall der Klasseneinteilung K bis M hinausreicht. Dem in Tab. 9 gegebenen

Hannover.

K: $T_g \geq +1.0^\circ\text{C}$

L: $T_g -0.4 \text{ bis } +0.9^\circ\text{C}$

M: $T_g \leq -0.5^\circ\text{C}$

Jahreszeiten

Jahr

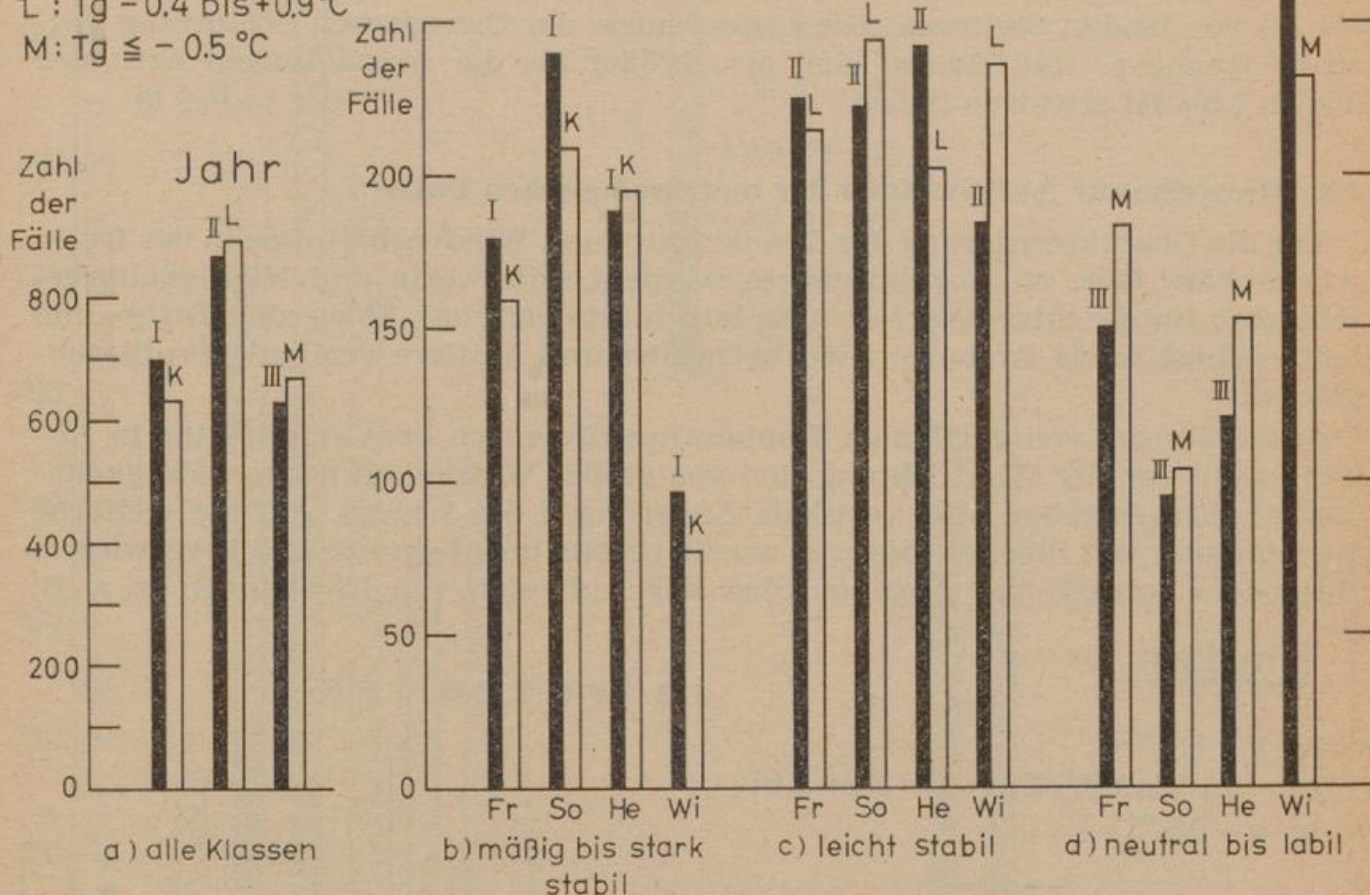


Abb. 16

Häufigkeit von Stabilitätsgruppen in Hannover um 0 Uhr GMT im Zeitraum 1957—1962.

Schema liegt eine sehr vereinfachte Vorstellung über die Beziehungen zwischen der thermischen Schichtung einerseits und der Windstärke und Bedeckung andererseits zugrunde; dieses Schema entspricht jedoch der aus Abb. 18 ersichtlichen Grundtendenz in der Verknüpfung zwischen diesen Größen.

Eine Anwendung des in Tab. 9 gegebenen Schemas zur Einteilung in die Stabilitätstypen I bis III auf andere Kollektive kann allerdings irreführende Ergebnisse zeitigen. In Abb. 16 b) — d) sind für den Zeitraum 1957—62 von Hannover auch die jahreszeitlichen Häufigkeiten der Typen I bis III sowie der Gradientgruppen K bis M zum 0-Uhr-Termin dargestellt. Die Verteilungen der beiden mäßig bis stark stabilen Gruppen I und K (Abb. 16 b)) zeigen gute Ähnlichkeit im Jahresgang, das gilt auch für den Vergleich der jahreszeitlichen Häufigkeiten von neutralen bis labilen Fällen (Abb. 16 d)). Bei der Gegenüberstellung der leicht stabilen Fälle in Abb. 16 c) weist die höchsten Differenzen zwischen II und L der Winter auf. Die Unterschiede innerhalb der Säulenpaare (Häufigkeitsdifferenzen) erreichen hier die Größe der jahreszeitlichen Unterschiede, so daß die Extremwerte des schwach ausgeprägten Jahresganges von L nicht mit denjenigen der Vergleichsverteilung von Typ II zusammenfallen.

Ähnliches ist von dem entsprechenden Vergleich zwischen Häufigkeiten der gewählten Klassifikationen für die Station Emden zu sagen (s. Abb. 17 c) — d)). Abgesehen von den Gegenüberstellungen der beiden stabilen Gruppen I und K (s. Abb. 17 b)) ergeben sich hier jedoch allgemein größere Differenzen.

Es ist festzustellen, daß die korrespondierenden Häufigkeiten der Klassen K bis M von Hannover und Emden in Abb. 16 a) — d) und Abb. 17 a) — d) stärker voneinander abweichen als die sich entsprechenden Auszählungen der Fälle I bis III von beiden Stationen. Die Unterschiede der thermischen Schichtung zwischen Hannover und Emden sind also größer als die Auszählungen nach den Typen I bis III erwarten lassen.

3.3. Hinweise zur Aufbereitung der meteorologischen Daten

Für die Charakterisierung der Temperatur- und Windverhältnisse in der freien Atmosphäre bzw. an Bodenstationen werden Mittelwerte und Häufigkeitsverteilungen für die interessierenden Zeitabschnitte verlangt. Es werden Tages- und Jahresgänge sowie Andauerzeiten betrachtet und mittlere vertikale Profile abgeleitet.

Auszählungen von vertikalen Temperaturdifferenzen bzw. -gradienten in Abhängigkeit von der Windrichtung sind von großer Wichtigkeit neben häufigkeitsstatistischen Angaben über vertikale Änderungen des Windes. Auf die vielfache Verwendung von Stärkewindrosen wurde bereits im Abschnitt 3.2.3.1. verwiesen. Besonders gefragt sind Angaben über das Auftreten von Inversionen (s. z. B.

Emden

Jahreszeiten

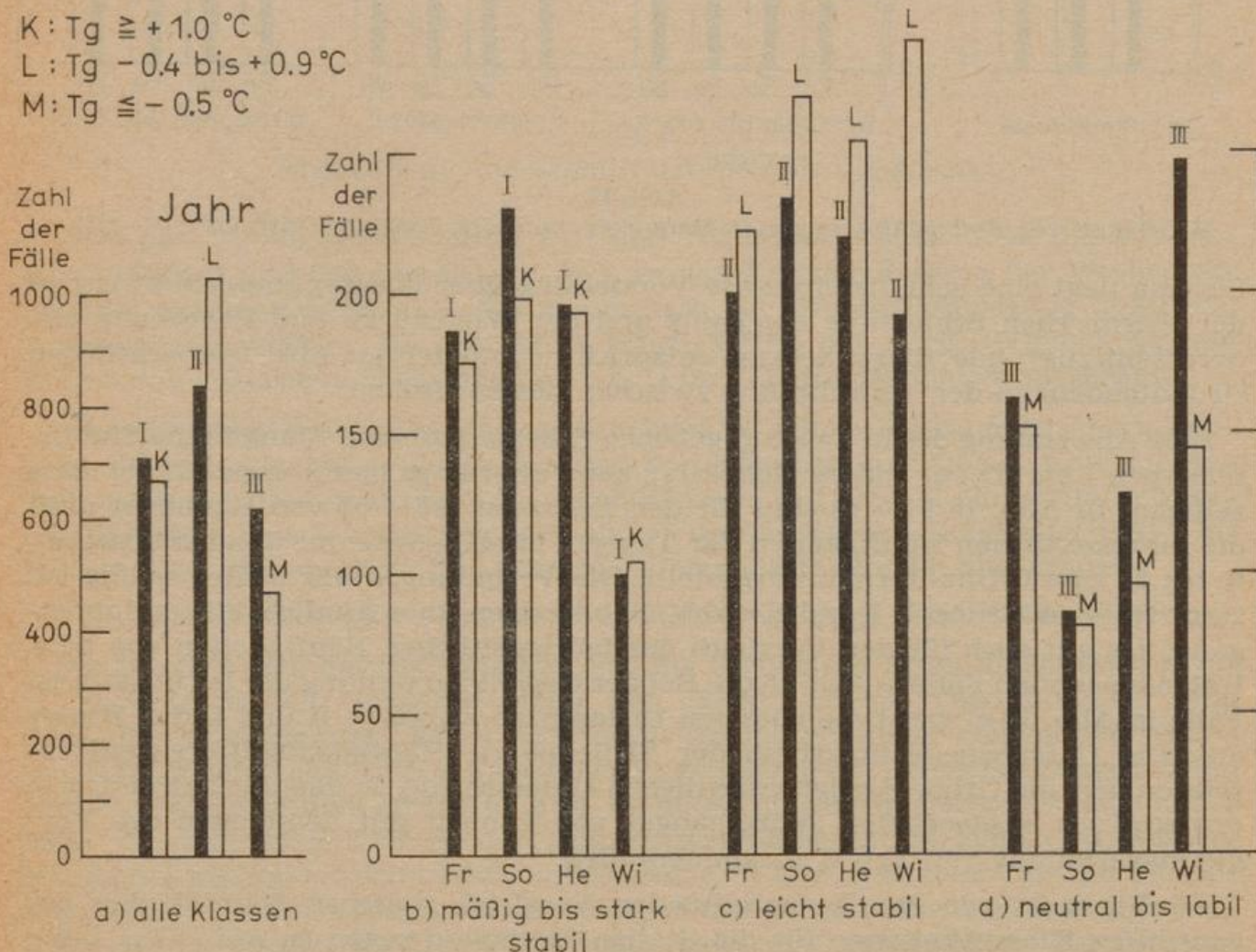


Abb. 17

Häufigkeit von Stabilitätsgruppen in Emden um 0 Uhr GMT im Zeitraum 1957—1962.

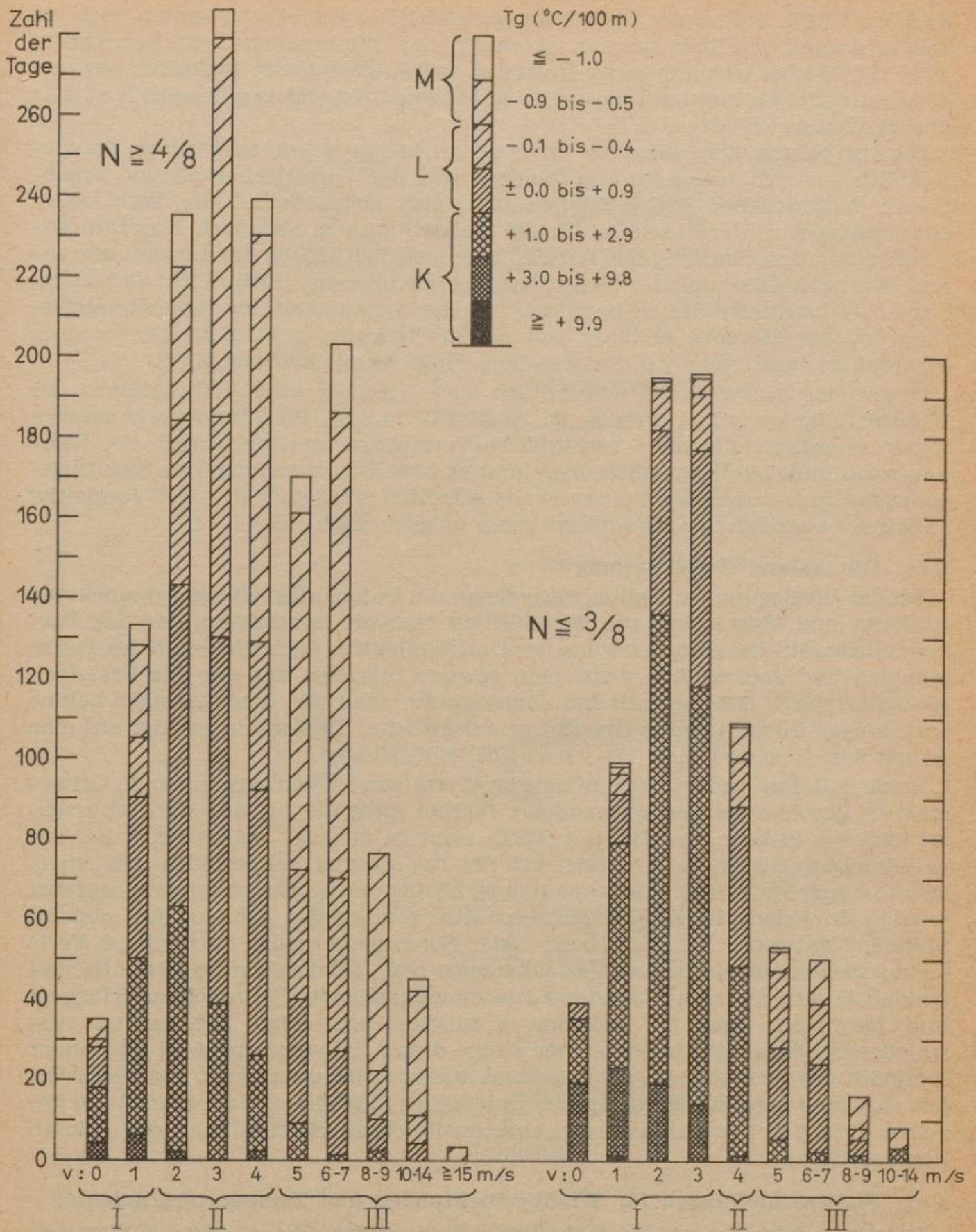


Abb. 18

Häufigkeit des Temperaturgradienten Tg zwischen Boden und 100 m Höhe in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad N und von der Windgeschwindigkeit v (bzw. von den Stabilitätstypen I, II und III) in Hannover um 0 Uhr GMT im Zeitraum 1957—1962.

Seifert (61)). Sofern das Beobachtungsmaterial es ermöglicht, sollten auch die Zeiten speziell ermittelt werden, in denen der „Fumigation-Typ“ herrscht (s. Abb. 19); hierbei ist unter einer Inversion Labilisierung vom Erdboden her und damit abwärts gerichteter Transport von Schadstoffen gegeben (s. auch Reidat und Bohnsack (54)).

Die statistische Erfassung der Inversionen bringt einige beachtliche Schwierigkeiten mit sich, was auch eine Behinderung der Vergleichbarkeit von Ergebnissen verschiedener Bearbeitungen nach sich zieht. So ist die Wahl einer zweckmäßigen Stufeneinteilung für die Aufstellung von Mehrfach-Korrelations-tabellen zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Höhen der Inversionsgrenzen, Inversionsdicke und Temperatursprung der Inversion nicht leicht zu treffen. Ferner ist beispielsweise zu beachten, daß die Genauigkeit der Inversionserfassung von der Methode abhängt, mit der die thermische Struktur der unteren Atmosphäre bestimmt wird (Fesselballon, Flugzeug, Radiosonde, Mast).

Es sei hier bemerkt, daß gelegentlich auch Angaben über Fluktuationen der Windrichtung gefordert werden (s. Abschnitt 3.1.2.1.). Für derartige Aussagen sollten allerdings allgemein verbindliche Vereinbarungen hinsichtlich der Richtungsempfindlichkeit der Meßanlage und des bei Bestimmungen der Richtungsänderung zu benutzenden Zeitintervalls getroffen werden, weil sonst Vergleiche zwischen verschiedenen Standorten kaum möglich sind.

3.3.1. Die „solare“ Zeiteinteilung

Bei der Festlegung der Zeiten, nach denen die Datenaufbereitung vorzunehmen ist, kann eine Abweichung von der üblichen Zeitwahl zweckmäßig sein. Die herkömmliche zeitliche Aufgliederung der Datenkollektive nach Uhrzeiten des Tages, Monaten und Jahreszeiten weist eine gewisse Starrheit auf, die das Erkennen spezieller, durch den wechselnden Sonnenstand bewirkter Erscheinungen behindert. Wegen ihrer in dieser Hinsicht grundsätzlichen Bedeutung sei hier auf eine Arbeit von Singer und Raynor (62) eingegangen.

Beide Autoren bearbeiteten stündliche Werte von Messungen an einem Gittermast in Brookhaven. Sie verwendeten hierbei nicht die für den Beobachtungsort geltende östliche Standardzeit (EST), sondern die sog. „solare Zeit“. Bei der Zeiteinteilung dieser Autoren setzt sich der Tag aus vier Teilperioden zusammen, welche durch Mitternacht, Sonnenaufgang, Mittag und Sonnenuntergang begrenzt werden. In jedem dieser vier Zeitabschnitte beginnt die Zählung der „solaren Stunden“ entweder bei Sonnenauf- oder Sonnenuntergang. Nach dieser Festlegung definieren die beiden Verfasser auch sog. „solare Jahreszeiten“. Hierbei handelt es sich um nicht unbedingt zusammenhängende Zeitperioden. Singer und Raynor legen für Brookhaven zunächst acht solare Jahreszeiten verschiedener Länge fest, fassen später einige dieser Zeitspannen, welche einander bezüglich des Sonnenstandes weitgehend ähnlich sind, zusammen und beschränken sich danach auf die Betrachtung von lediglich fünf solaren Jahreszeiten. In (62) geben Singer und Raynor eine ausführliche Beschreibung der solaren Zeitklassifikation.

3.3.2. Skaleneinteilungen für Windbeobachtungen und Temperaturgradienten

Bei der Aufstellung von Häufigkeitsverteilungen der interessierenden Elemente spielt die Wahl der Skaleneinteilung eine nicht unwesentliche Rolle.

Die Durchsicht einiger Veröffentlichungen über statistische Bearbeitungen zur Erfassung der Wind- und Temperaturstruktur in den unteren Schichten der Atmosphäre zeigt, daß beachtliche Unterschiede in der Skalenwahl bestehen.

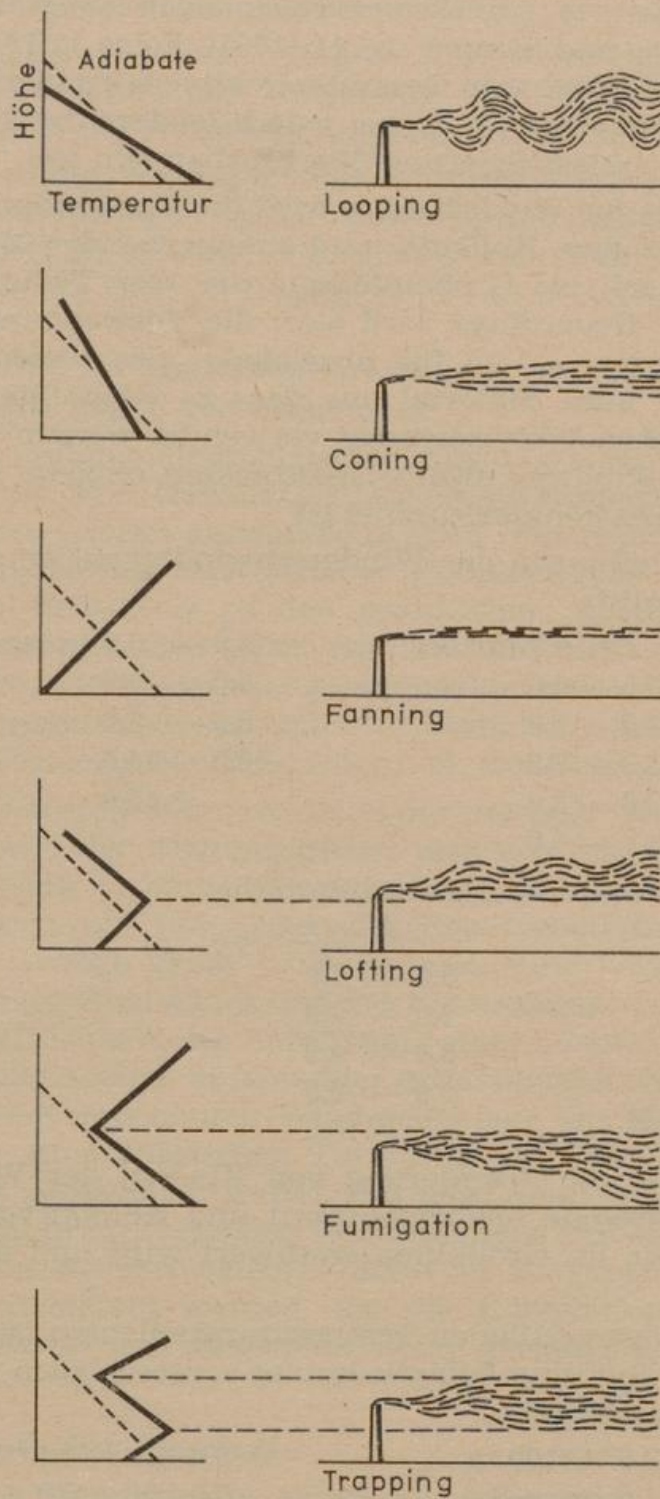


Abb. 19
 Typen des Verhaltens einer Schadstofffahne. Nach Jensen (37).

Um Häufigkeitsangaben leicht miteinander vergleichen zu können, sollten bei künftigen Bearbeitungen möglichst einheitliche Skalen benutzt werden. Eine Arbeitsgruppe im Rahmen des Fachnormenausschusses Kerntechnik hat aus diesem Grund Empfehlungen für eine Vereinheitlichung der Klasseneinteilung meteorologischer Meßwerte bei Kernenergieanlagen ausgearbeitet (inzwischen veröffentlicht in „Atom und Strom“, Jg. 11 [1965], Folge 11/12). Wegen des wechselnden Umfangs der verfügbaren Gesamtkollektive wird hierbei zwischen Grob- und Feineinteilung unterschieden, wobei jedoch letztere durch geeignete Zusammenfassung in die Grobklassifizierung überführbar sein soll.

Für die Bearbeitung der Windrichtung wird die Verwendung der 36er Teilung in 10°-Sektoren bei großem Kollektiv und entsprechender Meßgenauigkeit vorgeschlagen, daneben soll als Grobeinteilung die 12er Teilung in 30°-Sektoren bevorzugt werden. — Neuerdings wird auch die Verwendung der 18er Teilung in 20°-Sektoren erwogen. — Da für überlokale, also regionale Bearbeitungen der Windverhältnisse auch Material aus dem 8- oder 16teilig beobachtenden Klimanetz des Deutschen Wetterdienstes verwendet werden muß, wird die Benutzung der 8teiligen Windrose nicht ausgeschlossen, obgleich diese zu den beiden anderen Teilungen nicht kommensurabel ist.

Für Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit werden als Feingliederung 11 Bereiche, nämlich

< 0,5 m/sec	5,0 — 5,9 m/sec
0,5 — 0,9	6,0 — 7,9
1,0 — 1,9	8,0 — 9,9
2,0 — 2,9	10,0 — 14,9
3,0 — 3,9	≥ 15,0
4,0 — 4,9	

empfohlen und als Grobgliederung die 6 Bereiche

< 0,5 m/sec
0,5 — 1,9
2,0 — 2,9
3,0 — 4,9
5,0 — 9,9
≥ 10,0

Es sei bemerkt, daß die Normierung von Klassen der Windgeschwindigkeit nicht nur durch wechselnde Meßgenauigkeit und Kollektivgröße, sondern auch durch die Unterschiede im Großklima erschwert wird und darum nicht vollbefriedigend sein kann.

Für Auszählungen des vertikalen Temperaturgradienten ist von der genannten Arbeitsgruppe bisher nur eine Feingliederung vorgeschlagen worden. Sie besteht aus den folgenden 8 Bereichen:

≤ -2,0° C/100 m	-0,4 bis -0,1° C/100 m	} Inversionen
-1,9 bis -1,0	0,0 bis +0,9	
-0,9 bis -0,7	+1,0 bis +2,9	
-0,6 bis -0,5	≥ +3,0	

3.3.3. Reduktion auf längere Perioden

Wenn bei der Standortbegutachtung kürzere Beobachtungsreihen verwendet werden, wie es bei der Bearbeitung von Sondermessungen (s. Abschnitt 3.2.2.) der Fall ist, so bedarf es einer besonderen Prüfung der gewonnenen Ergebnisse wegen

der geringen Größe der Datenkollektive. Die kurzen Datenreihen sollten zu geeigneten längeren Vergleichsreihen anderer Stationen in Beziehung gesetzt werden, um die zuvor erzielten Resultate in ihrer Aussagekraft abzuschätzen bzw. sie eventuell in der einen oder anderen Richtung zu modifizieren und damit ihre Gültigkeit für einen längeren Zeitraum zu erhöhen.

Zu solchen Reduktionen können längere Vergleichsreihen geeigneter Klima- bzw. synoptischer Stationen der Umgebung und nicht zu entfernt liegender aerologischer Stationen des Netzes herangezogen werden.

Es ist auch zweckmäßig, Meßreihen einer kürzeren Periode in Abhängigkeit von den aufgetretenen Wetterlagen zu untersuchen, die für die betreffende Standortbeurteilung speziell klassifiziert sein sollten, und durch Vergleich mit längeren Reihen zu prüfen, ob die relative Häufigkeit dieser Wetterlagen normal war.

3.4. Empfehlungen für ein Minimalprogramm der meteorologischen Beurteilung bei verschiedenen Typen von Standorten

Für die in 3.1. genannten meteorologischen Angaben sind in den Abschnitten 3.2. und 3.3. Möglichkeiten ihrer Gewinnung und einige Hinweise zur Datenaufbereitung erörtert worden. Hieran anschließend wird nun versucht, ein Minimalprogramm für die Beurteilung verschiedener Standorttypen zu umreißen, das in einem vertretbaren Verhältnis zu den praktischen meteorologischen Möglichkeiten und dem erstrebten Ziel steht. Hierbei wird nicht eingegangen auf herkömmliche Methoden, wie Verwendung von Stärkewindrosen (s. Abschnitt 3.2.3.1.) aus mehrjährigen Datenreihen benachbarter Stationen oder Benutzung von Verteilungskarten meteorologischer Elemente, z. B. des Nebels.

Ein solches Minimalprogramm ist als Rahmengerüst für die meteorologische Begutachtung während der Planungsphase, also vor Inbetriebnahme des Kernreaktors gedacht. Wenn in einem Einzelfall mit einem Minimalprogramm den Genauigkeitsanforderungen von Seiten des Reaktorbetreibers oder der Sicherheitsbehörde nicht Genüge getan wird, so wäre eine wesentliche Erweiterung des meteorologischen Meßaufwands und der Bearbeitung erforderlich, wobei auch Fragen der Wirtschaftlichkeit, der Zubilligung einer ausreichenden Bearbeitungszeit und des Personaleinsatzes aufeinander abzustimmen sind. Beispielsweise ist mit Hilfe einer Drei-Komponenten-Windmeßanlage (an Masten) eine unmittelbare Erfassung der atmosphärischen Turbulenz möglich. Wegen des zu großen meßtechnischen und personellen Aufwandes wird diese Art der direkten Turbulenzbestimmung nicht in die folgenden Empfehlungen einbezogen. Solche Messungen sollten aber von meteorologischer Seite an Forschungs-Reaktoren in das Arbeitsprogramm eingeplant werden, um die Korrelation zwischen Emission, Umgebungsradioaktivität und atmosphärischem Zustand genauer bestimmen zu können.

3.4.1. Sehr reliefschwacher Standort

Für den Fall eines Standortes in einem sehr schwachen Relief wird zunächst angenommen, daß sich eine aerologische Aufstiegsstelle in der Nähe unter gleichen landschaftlichen Bedingungen befindet. Bei diesen Gegebenheiten werden die aus mehreren Jahren vorhandenen Ergebnisse von aerologischen Messungen als ausreichende Unterlage für die Bearbeitung im Rahmen eines Minimalprogramms betrachtet.

Liegt hingegen der reliefschwache Standort in weiterer Entfernung (größenordnungsmäßig ≥ 50 km entfernt) zu den in Betracht kommenden, landschaftlich

ähnlich gelegenen aerologischen Aufstiegsstellen, so ist ein höherer Aufwand notwendig. Zusätzlich sind, zumindest temporär für Wochen oder Monate bei charakteristischen interessierenden Wetterlagen, kleinaerologische Aufstiege einer beweglichen Station zweckmäßig, um gewisse lokale Besonderheiten des Standortraumes vergleichsweise zu erfassen. — Kosten- und Zeitaufwand bei Errichtung eines Meßmastes erscheinen in diesem Fall für ein Minimalprogramm nicht vertretbar.

3.4.2. Standort mit mäßig starkem Relief

Für den Fall eines Standortes mit mäßig starkem Relief (z. B. Gundremmingen) wird angenommen, daß aerologische Stationen nur in größerer Entfernung und in einer Landschaft mit mehr oder weniger abweichendem Relief vorhanden sind. — In dieser Situation erscheint es wünschenswert, Messungen an einem Gittermast ein bis zwei Jahre lang durchzuführen. Falls eine solche Zeitspanne nicht zur Verfügung ist oder aus finanziellen Gründen ein derartiges Vorhaben nicht verwirklicht werden kann, müßten stattdessen kleinaerologische Aufstiege einer beweglichen Station vorgenommen werden, wobei eine Einsatzdauer von einigen Monaten mit Erfassung charakteristischer Wetterlagen zu veranschlagen wäre. — Zusätzlich zu den Auswertungen von Mastmessungen bzw. kleinaerologischen Aufstiegsdaten sollten auch Ergebnisse von einer oder mehreren geeigneten Stationen des Radiosondennetzes bearbeitet werden (s. Abschnitt 3.3.3.).

3.4.3. Standort mit starkem Relief

Befindet sich der Standort in einem Tal mit höheren Randbergen, und liegen aerologische Aufstiegsstellen nur in größerer Entfernung und in abweichendem Landschaftsrelief, so treten noch weit größere Schwierigkeiten bei der meteorologischen Begutachtung auf als in den zuvor genannten Fällen.

Für diesen Standorttyp sollten Temperatur- und Windschichtung sowie der Verlauf von Trajektorien durch kleinaerologische Aufstiege einer mobilen Station erfaßt werden. Hierfür erscheint eine Einsatzdauer von mindestens einigen Monaten erforderlich; jedenfalls müssen die wichtigen spezifischen Wetterlagen (extreme thermische Schichtungen, Tallängs- und Talquerwindlagen sowie Schwachwindlagen) durch Meßreihen gut belegt sein.

Ferner werden mit Registriergeräten ausgerüstete Temperatur- und Windmeßstellen am Hang in verschiedener Höhenlage während einer mindestens zweijährigen Periode für notwendig erachtet.

Die Bearbeitung von Daten entfernter liegender Radiosondenstationen sollte zusätzlich vorgenommen werden, um Auswertungsergebnisse aus den Sondermessungen auf einen längeren Zeitraum zu beziehen.

Für den hier betrachteten Standorttyp können in der Praxis während der Planungsphase nur grob orientierende Unterlagen geliefert werden. Nach Betriebsbeginn sind weitere meteorologische Messungen dringend notwendig.

3.5. Maximal ungünstige Fälle

Häufig wird die Frage nach den Eigenschaften der „maximal ungünstigen Wetterlage“ (bzw. der „denkbar ungünstigen Wetterlage“) und der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens gestellt, in Parallele hierzu aber auch die Frage nach dem „maximal denkbaren Unfall“ („maximal credible accident“ — MCA). Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Eintritts beider Ereignisse, also das Produkt beider Einzelwahrscheinlichkeiten, würde ein extrem kleiner Wert sein.

Aussagen über die Wahrscheinlichkeit von Reaktorunfällen, insbesondere des MCA, können kaum realistisch sein, weil die empirische Grundlage hierfür fehlt. Bei der entsprechenden meteorologischen Fragestellung verhält es sich ähnlich; Angaben über das Auftreten äußerst ungünstiger Wetterlagen, für deren Definition übrigens Vorstellungen über Form und Ausmaß möglicher Unfälle wichtig sind, hängen ab von der Länge der verfügbaren meteorologischen Beobachtungsreihen.

Bei der Festlegung von extrem ungünstigen Wetterlagen spielt ferner die räumliche Abgrenzung des zu betrachtenden Gebietes (Werkgelände oder weitere besiedelte Umgebung) eine wesentliche Rolle. Es ist zweckmäßig, vor Betriebsbeginn bzw. in der Planungsphase für die Beurteilung des Auftretens kritischer Wetterlagen Korrelationstabellen aufzustellen, aus denen Häufigkeiten des gleichzeitigen Auftretens von ungünstigen Werten des vertikalen Temperaturgradienten und des Windes entnommen werden können. Für eine zuverlässige Feststellung des Auftretens sehr ungünstiger Wetterbedingungen während des Reaktorbetriebs ist es dringend notwendig, ein besonderes Meßprogramm auch nach Beginn des laufenden Betriebs fortzuführen.

3.6. Strahlungsfluß von Emissionswolken

Obwohl Untersuchungen über den Prozeß des Strahlungsflusses einer radioaktiven Emissionswolke hier nicht betrachtet wurden (vgl. Abschnitt 1.), sei doch kurz auf die Sonderstellung γ -strahlender Gase bei Ausbreitungsfragen hingewiesen. Infolge der relativ großen Reichweite der γ -Strahlung können sich radioaktive „Wolken“ schädlich auswirken, auch wenn sie sich nicht bis in den Lebensraum am Erdboden ausbreiten. Für Wolken mit γ -Strahlung sind also besondere Überlegungen anzustellen. Es ist von großer Wichtigkeit, daß während der Andauer von Schichtungstypen (s. Abschnitt 3.3.), die eine turbulente Ausbreitung nach unten hemmen und Emissionswolken in einer gewissen Höhe bündeln, — z. B. beim Fanning-Typ und beim Coning-Typ — im Fall einer γ -strahlenden Wolke eine unmittelbare Gefährdung des Lebensraumes in Bodennähe gegeben sein kann (s. Blässer und Wirtz (6)).

3.7. Grundlegende Arbeiten des Deutschen Wetterdienstes (ohne Ausrichtung auf einen speziellen Standort)

3.7.1. Windstatistik

Während der letzten Jahre wurden für die Periode 1951—60 von 267 Klimastationen der Bundesrepublik Deutschland mit 3 täglichen Beobachtungsterminen und von 52 westdeutschen synoptischen Stationen mit größtenteils 8 täglichen Terminen Häufigkeiten der Windrichtungen in Abhängigkeit von der Windstärke ausgezählt (s. Abschnitt 3.2.3.1.). Ferner wurden für die einzelnen Windrichtungen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit errechnet. Die Windrichtung wurde aus den synoptischen Beobachtungen 12teilig, aus den Klimabeobachtungen 8teilig ausgezählt, und zwar für Monate und Jahr bei Zusammenfassung der Termine sowie jahreszeitlich für die einzelnen Termine. Entsprechendes gilt für die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit der einzelnen Richtungen. — Eine systematische regionale Untersuchung ist im Gange.

3.7.2. Inversionsstatistik

Aus Temperaturdaten von mehrjährigen Aufstiegsreihen westdeutscher Radiosondenstationen wurden in einem speziellen Projekt des Deutschen Wetterdienstes die Inversionen im Bereich zwischen dem Boden und 3 km Höhe festgestellt. In

einer häufigkeitsstatistischen Untersuchung werden Temperaturdifferenz und -gradient, Schichtdicke sowie die Höhen von Unter- und Obergrenze dieser Inversionen in verschiedener Hinsicht bearbeitet. Es ist beabsichtigt, hierbei sowohl jahres- und tageszeitliche Effekte wie auch räumliche Unterschiede zu untersuchen.

3.7.3. Nebelkarten

Zur Erweiterung der Unterlagen aus langjährigen Nebelbeobachtungen des Klimanetzes führt der Deutsche Wetterdienst im Rahmen einer Sonderuntersuchung spezielle Ermittlungen über das Nebelaufreten in den verschiedenen Landschaftsräumen Westdeutschlands durch. Als Abschluß dieser Arbeiten ist eine kartenmäßige Darstellung des Nebelvorkommens geplant. Da die Nebelbildung in vielen Lagen sehr stark an das Auftreten von Inversionen geknüpft ist, werden die Ergebnisse dieser Bearbeitung auch für Fragen der Schadstoffausbreitung von Bedeutung sein.

3.7.4. Kleinaerologische Aufstiege

Es ist wünschenswert, daß der vom Deutschen Wetterdienst eingeplante Meßwagen für kleinaerologische Aufstiege auch unabhängig vom Ort einer einzelnen Werkanlage eingesetzt wird. Es sollen hierdurch Meßdaten gewonnen werden für eine systematische Erforschung des Zustandes der untersten Luftschicht über charakteristischen Landschaftsformen. Dabei ist gedacht an Küsten, an Senken und Anhöhen des Flachlandes sowie an Talböden, Hänge und Höhen gebirgiger Landschaften.

4. Schluß

Die vorliegende Arbeit hat Berichtscharakter. Im ersten Teil (Abschnitt 2. bis 2.4.) wurden aus der neueren Literatur Ergebnisse einiger wichtiger theoretischer bzw. semi-empirischer Untersuchungen über die Ausbreitungsvorgänge in der Atmosphäre dargelegt. Im zweiten Teil (Abschnitt 3. bis 3.7.4.) wurde der Rahmen abgesteckt, in dem die praktische Durchführung der meteorologischen Begutachtungen von Kernreaktor-Standorten unter Berücksichtigung einschränkender ökonomischer Gesichtspunkte vorgenommen werden kann.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, daß an den Kernreaktor-Anlagen nach Beginn des Betriebs ein gewisses meteorologisches Meßprogramm weitergeführt werden sollte. Insbesondere sollten einmal vorhandene Meßanlagen an Masten bestehen bleiben und weiter arbeiten. Dies wird für notwendig erachtet, um Daten von fortlaufenden Messungen der Umgebungsradioaktivität, welche von den Sicherheitsbehörden verlangt werden, in engem Zusammenhang mit den atmosphärischen Bedingungen betrachten zu können, vor allem bei sehr ungünstigen Wetterlagen (s. auch Abschnitt 3.5.). Die Fortführung der meteorologischen Messungen ist von großer Wichtigkeit für eine zweckmäßige, den Sicherheitsforderungen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten gerecht werdende Steuerung der Anlage. Die Reihen gleichzeitiger Messungen der interessierenden meteorologischen Elemente und der Umgebungsradioaktivität sollten benutzt werden, um Vergleiche zwischen gemessenen und „berechneten“ Konzentrationen bzw. Werten der Strahlungs-dosis anzustellen. Derartige vergleichende Betrachtungen können wesentlich dazu beitragen, die Grundlagen für die Begutachtung von Ausbreitungsbedingungen zu verbessern.

Literatur

- (1) Ackermann, P.: Ergänzende Expertise für Projekt Thermisches Kraftwerk Sisseln. Meteor. Zentralanstalt Zürich 1965.
- (2) Angot, A.: Observations météorologiques faites au Bureau Central Météorologique et à la tour Eiffel pendant l'année 1894. Ann. Bur. Central Météor. de France 1894 I, B, S. 103—138 (1896).
- (3) Angot, A.: Résumé des observations anémométriques faites au Bureau Central et à la tour Eiffel pendant les six années 1890—1895. Ann. Bur. Central Météor. de France 1897 I, B, S. 171—200 (1899).
- (4) Barad, M. L.; Haugen, D. A.: A preliminary evaluation of Sutton's hypothesis for diffusion from a continuous point source. J. Meteor. 16 (1959) S. 12—20.
- (5) Blackadar, A. K.; Panofsky, H. A.: Recent Soviet research in atmospheric turbulence. Bull. Amer. Meteor. Soc. 45 (1964) S. 80—87.
- (6) Blässer, G.; Wirtz, K.: Nukleare Grundlagen für Standort- und Geländewahl von Kernreaktoren. Nukleonik 3 (1961) S. 164—178, 210—231.
- (7) Böer, W.; Hasek, M.: Zur Frage der mathematischen Erfassung von Immissionen. Angew. Meteor. 4 (1963) S. 291—299.
- (8) Böer, W.; Kolbig, J.: Eine einfache Methode zur Bestimmung von Änderungen des Windvektors in den unteren 200—300 m über Grund. Angew. Meteor. 3 (1958) S. 161—163.
- (9) Cramer, H. E.: A practical method for estimating the dispersal of atmospheric contaminants. In: Proc. 1st Nat. Conf. Appl. Meteor. Hartford, Conn. (1957) S. C 33—C 55.
- (10) Cramer, H. E.: A brief survey of the meteorological aspects of atmospheric pollution. Bull. Amer. Meteor. Soc. 40 (1959) S. 165—171.
- (11) Dammann, W.: Amtliches Gutachten über die klimatischen Verhältnisse am Standort des Atomkraftwerkes in Kahl (Unterfranken). Offenbach a. M.: Dt. Wetterd. (1959).
- (12) Dammann, W.: Amtliches Gutachten über die klimatischen Verhältnisse im Raum von Hitzacker (Elbe) aus Anlaß der Errichtung eines Atomkraftwerkes. Offenbach a. M.: Dt. Wetterd. (1961).
- (13) Deutscher Wetterdienst: Amtliches Gutachten über die meteorologischen Verhältnisse am Standort des Kernkraftwerkes KRB-Gundremmingen/Do. Offenbach a. M. (1965).
- (14) Diem, M.: Staubausbreitung in der freien Atmosphäre in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen. Staub 11 (1951) S. 342—355.
- (15) Diem, M.: Messungen der Staubausbreitung aus den Schloten einer Industrieanlage am Niederrhein. Aus: Mitt. Vereinig. Großkesselbesitzer H. 42 (1956).
- (16) Diem, M.; Trappenberg, R.: Staubniederschlag aus Rauchfahnen. Mitt. Vereinig. Großkesselbesitzer H. 23 (1953) S. 391—395.
- (17) Diem, M.; Trappenberg, R.: Berechnung der Ausbreitung von Staub und Gas. Forsch.-Ber. Wirtschafts- u. Verkehrsmin. Nordrhein-Westfalen Nr. 502 (1957).
- (18) Diem, M.; Zedler, P.: Der Wind in der bodennahen Schicht bis 100 m in Karlsruhe und Mühlacker. Ber. Dt. Wetterd. 13 (1964) Nr. 97.

- (19) Drimmel, J.: Zur Berechnung der Abgaskonzentration am Boden im Lee isolierter Industrieschornsteine. *Geofis. pura e appl.* 56 (1963) S. 203—215.
- (20) Drimmel, J.; Reuter, H.: Eine neue Bestimmungsvorschrift für den Exponenten im Suttonschen Ansatz für die Lagrangesche Korrelationsfunktion. *VDI-Forsch.-H.* 483 (1961) S. 8—9.
- (21) Elektro-Watt, Zürich, Meteorologische Messungen 1961—1962: Auflösungsverhältnisse in der freien Atmosphäre in der Umgebung von Sisseln (Suissetherme, Projekt einer thermischen Zentrale in Sisseln [AG]). Juli 1963.
- (22) Fortak, H.: Konzentrationsverteilung um eine kontinuierliche Punktquelle bei Windstille. *VDI-Forsch.-H.* 483 (1961) S. 20—22.
- (23) Geisler, E.: Über die Gültigkeit der Sutton-Formel in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Immissionszeit. *VDI-Forsch.-H.* 483 (1961) S. 23—29.
- (24) Georgii, H.-W.; Weber, E.: Untersuchung der Kohlenoxydimmission in einer Großstadt. *Intern. J. Air Water Poll.* 6 (1962) S. 179—195.
- (25) Gifford, F. A., Jr.: Atmospheric Dispersion. *Nuclear Safety* 1 (1960) No. 3, S. 56—62.
- (26) Gifford, F. A., Jr.: Atmospheric Dispersion Calculations Using the Generalized Gaussian Plume Model. *Nuclear Safety* 2 (1960) No. 2, S. 56—59.
- (27) Gifford, F. A., Jr.: Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion. *Nuclear Safety* 2 (1961) No. 4.
- (28) Hammje, K.: Messungen der Staubsedimentation in Halle (S.) und in umliegenden Industriegebieten. *Angew. Meteor.* 4 (1963) S. 310—312.
- (29) Hasek, M.: The diffusion of smoke gases from factory chimneys and its meteorological conditions. *Stud. geophys. geodaet.* 8 (1964) S. 82—96.
- (30) Hellmann, G.: Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre. 1. u. 2. Mitt. *Sitz.-Ber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss.* 1914, S. 415—437; 1917, S. 174—197.
- (31) Herath, F.: Inversionsstudie auf Grund der Lindenberger Fesselaufstiege mit besonderer Berücksichtigung der Ultrakurzwellenausbreitung. *Ber. Dt. Wetterd. US-Zone* 9 (1949).
- (32) Hergesell, H.: *Das Klima Straßburgs.* 1893.
- (33) Hettche, H. O.: Contributions to the smog-problem. In: *The Proc. Internat. Clean Air Conference 1959.* London (1960), S. 139—141.
- (34) Hewson, E. W.: Atmospheric Pollution. In: *Compendium of Meteorology,* Boston/Mass. (1951) S. 1139—1157.
- (35) Hofmann, G.; Kraus, H.; Manier, G.: Ergebnisse der Messungen von Temperatur- und Windschichtung an der meteorologischen Station beim Forschungsreaktor München vom 1. 7. 1961 — 28. 2. 1962. *Wiss. Mitt. Meteor. Inst. München* Nr. 8 (1962).
- (36) Holzapfel, R.; Manig, M.: Zum mittleren täglichen Gang von Temperatur und Druck in der freien Atmosphäre über Deutschland. *Meteor. Rdsch.* 8 (1955) S. 85—88.
- (37) Jensen, K.: Meteorological measurements at Risö 1958—61. (Danish Atomic Energy Commission Research Establishment) *Risö Rep.* 39 (1962).
- (38) Kleiss, M.: Inversionen in der unteren Troposphäre im Raum Karlsruhe — Stuttgart. *Ber. Dt. Wetterd.* 12 (1963) Nr. 90.

- (39) Klug, W.: Bisherige Theorien der Staubausbreitung. Beitr. Phys. Atm. 30 (1958) S. 137—142.
- (40) Klug, W.: Das Verhalten meteorologischer Parameter in Ausbreitungsformeln nach bisher vorliegenden Beobachtungsdaten. VDI-Forsch.-H. 483 (1961) S. 33—37.
- (41) Knauer, A.: SO₂-Messungen im Stadtgebiet von Halle. Angew. Meteor. 4 (1963) S. 305—310.
- (42) Lucas, D. H.; Moore, D. J.; Spurr, G.: The rise of hot plumes from chimneys. Internat. J. Air Water Poll. 7 (1963) S. 473—500.
- (43) Lucas, D. H.; Spurr, G.; Williams, F.: The use of balloons in atmospheric pollution research. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 83 (1957) S. 508—516.
- (44) Lugeon, J.: Electrosondages à deux conductibilités par la détection du niveau de la vase atmosphérique. Verh. Schweiz. Naturforsch. Ges. 141 (1961) S. 93—95.
- (45) Lugeon, J.: La pollution industrielle de l'air dans un pays montagneux. Communication faite au 6ème Congrès Mondial du Pétrole. Francfort s./Main, juin 1963 (Section III — Paper 14, Switzerland).
- (46) Meade, P. J.: Meteorological aspects of the peaceful uses of atomic energy. Part I: Meteorological aspects of the safety and location of reactor plants. WMO Technical Note No. 33 (1960) = WMO-No. 97. TP. 41.
- (47) Megaw, W. J.: The discharge of radioactive effluent to the atmosphere. In: J. C. Collins: Radioactive Wastes. Their treatment and disposal. London 1960. S. 200—220.
- (48) Pasquill, F.: The estimation of the dispersion of windborne material. Meteor. Mag. 90 (1961) S. 33—49.
- (49) Pasquill, F.: Atmospheric Diffusion. London, Toronto, New York, Princeton, New Jersey (1962) 297 S.
- (50) Peppler, A.: Windmessungen auf dem Eilveser Funkturm. Beitr. Phys. fr. Atm. 9 (1921) S. 114—129.
- (51) Peppler, W.: Die thermische Schichtung der Atmosphäre. Beitr. Phys. fr. Atm. 11 (1924) S. 79—95.
- (52) Peppler, W.: Über die Windverhältnisse in der untersten Luftschicht über dem Bodensee und dem Ufer bei Friedrichshafen. Beitr. Phys. fr. Atm. 23 (1936) S. 289—309.
- (53) Protokoll zur Informations- und Arbeitstagung im Kernforschungszentrum Karlsruhe am 24. und 25. 6. 65 über die „Ausbreitung von gas- und staubförmigen Verunreinigungen in der Atmosphäre und Ablagerung von Aerosolen am Boden“. Zusammengestellt von P. Böttger, W. Comper, G. Süßmann, Gesellschaft f. Kernforsch. 82 S.
- (54) Reidat, R.; Bohnsack, G.: Auf- und Abbau von Bodeninversionen. Beobachtungen an Hand von Temperaturregistrierungen bis zu einer Höhe von 200 m am Schornstein des Kraftwerkes Schilling und ihre Bedeutung für die Ausbreitung von Rauchgasen bei Inversionswetterlagen. Mitt. VGB (Vereinig. d. Großkesselbesitzer) Nr. 87 (1963) S. 401—408.
- (55) Reuter, H.: Über den Einfluß meteorologischer Parameter auf die Lage der Maximal-Immissionskonzentration am Boden bei vorgegebener Emissionsquelle. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat. A 14 (1964) S. 55—68.

- (56) Rjasanow, V. A.: Hygienisch zulässige Grenzkonzentrationen für Luftverunreinigungen. *Angew. Meteor.* 4 (1963) S. 250—260.
- (57) Schmidt, F. H.: On the dependence on stability of the parameters in Sutton's diffusion formula. *Beitr. Phys. fr. Atm.* 33 (1960) S. 112—122.
- (58) Schwarz, K.; Gilbert, T.; Ratzki, E.: Research into atmospheric pollution in the city of Essen. In: *The Proc. Internat. Clean Air Conference 1959*. London (1960) S. 177—180.
- (59) Schwegler, H.: Das Problem der Luftverunreinigung. Eine Zusammenstellung aus Literatur und Praxis, bezogen auf die Besonderheiten des Münchner Raums. München (1963).
- (60) Scorer, R. S.: Atmospheric diffusion and air pollution. *Internat. J. Air Poll.* 1 (1958) S. 145—147.
- (61) Seifert, G.: Bemerkungen zur Inversionswetterlage Anfang Dezember 1962 in Westdeutschland. *Meteor. Rdsch.* 16 (1963) S. 82—84.
- (62) Singer, I. A.; Raynor, G. S.: Analysis of meteorological tower data, April 1950 — March 1952, Brookhaven National Laboratory. Brookhaven National Laboratory, Upton N. Y. (1957), ASTIA Doc. No. AD 133806.
- (63) Steinhauser, F.: Meteorologische Gesichtspunkte zur Planung von Industrie- und Atomkraftanlagen im Raum von Wien. *Aufbau*, Wien (1956) S. 457—462.
- (64) Stewart, N. G.; Gale, H. J.; Crooks, R. N.: The atmospheric diffusion of gases discharged from the chimney of the Harwell pile (Bepo). Harwell Berkshire. Atomic Energy Research Establishment (1957) 40 S. = AERE HP/R 1452.
- (65) Stewart, N. G.; Gale, H. J.; Crooks, R. N.: The atmospheric diffusion of gases discharged from the chimney of the Harwell Reactor Bepo. *Internat. J. Air Poll.* 1 (1958) S. 87—102.
- (66) Stümke, H.: Zur Berechnung der Schornsteinüberhöhung. Dem Ausschuß 2 der VDI-Kommission „Reinhaltung der Luft“ vorgelegt als wissenschaftliches Gutachten über die zweckmäßigste Einbeziehung der Schornsteinüberhöhung in die Sutton-Formel. *Techn. Hochschule Stuttgart* (April 1960) (Maschinenschr.).
- (67) Stümke, H.: Zur Berechnung der Aufstiegshöhe von Rauchfahnen. *VDI-Forsch.-H.* 483 (1961) S. 38—49.
- (68) Stümke, H.: Vorschlag einer empirischen Formel für die Schornsteinüberhöhung. *Staub* 23 (1963) S. 549—556.
- (69) Sutton, O. G.: A theory of eddy diffusion in the atmosphere. *Proc. Roy. Soc. London A* 135 (1932) S. 143—165.
- (70) Sutton, O. G.: The problem of diffusion in the lower atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 73 (1947) S. 257—281.
- (71) Sutton, O. G.: The theoretical distribution of airborne pollution from factory chimneys. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 73 (1947) S. 426—436.
- (72) Sutton, O. G.: *Micrometeorology*. New York, Toronto, London (1953) 333 S.
- (73) Trappenberg, R.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Staubverteilung einer Rauchfahne. T. 1 in: *Staub H.* 39 (1955) S. 5—20. T. 2 u. 3 in: *Staub H.* 40 (1955) S. 189—220.
- (74) Trappenberg, R.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Staubverteilung einer Rauchfahne. *Forsch.-Ber. Wirtschafts- u. Verkehrsmin. Nordrhein-Westfalen* Nr. 380 (1957).

- (75) Turner, D. B.: A diffusion model for an urban area. *J. appl. Meteor.* 3 (1964) S. 83—90.
- (76) Uhlig, S.: Bestimmung der Stabilitätsgrade der Luft an Hand von Wettermeldungen. *Mitt. Dt. Wetterd.* 5 (1965) Nr. 35.
- (77) VDI-Kommission Reinhaltung der Luft. VDI 2104 Begriffsbestimmungen, Reinhaltung der Luft. Düsseldorf: VDI-Verl. 1962.
- (78) VDI-Kommission Reinhaltung der Luft. VDI 2105 Maximale Immissionskonzentrationen (MIK). Nitrose Gase. Düsseldorf: VDI-Verl. 1960.
- (79) Vorontsov, P. A.: Aerologicheskoye issledovaniya pogramichnogo sloja atmosfery. Leningrad: Gidrometeozidat (1960).
- (80) Walke, G. J.; Hewson, E. W.; Gill, G. C.: A better way to evaluate nuclear-site meteorology. *Nucleonics* 23 (1965) S. 72—75.
- (81) Wippermann, F.: Der Effekt der Meßdauer bei der Ermittlung von Maximalkonzentrationen eines sich in turbulenter Strömung ausbreitenden Gases. *VDI-Forsch.-H.* 483 (1961) S. 49—51.
- (82) Wippermann, F.: Möglichkeiten einer theoretischen Erfassung des Ausbreitungsvorganges. *Staub* 21 (1961) S. 104—109.
- (83) Wippermann, F.: Diagramme zur Beurteilung der Eignung von Schornsteinhöhen für die Luftreinhaltung. *Staub* 23 (1963) S. 335—343.
- (84) Wippermann, F.; Klug, W.: Ein Verfahren zur Bestimmung von Schornsteinmindesthöhen. *Internat. J. Air Water Poll.* 6 (1962) S. 27—48.

