

Nr. 37

Untersuchungen zur
Bestimmung der Aufnahme-
rate des IRMA-Gerätes bei verschie-
denen Anströmverhältnissen

Herausgeber:
Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6

D-4300 Essen 1

1983

ISSN 0720-8499

Untersuchungen zur Bestimmung
der Aufnahme rate des IRMA-Gerätes
bei verschiedenen Anströmverhältnissen

Dr. R.-W. Bach und
Prof. Dr. H. Stratmann

UNTERSUCHUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER AUFNAHMERATE
DES IRMA-GERÄTES BEI VERSCHIEDENEN ANSTRÖMVERHÄLTNISSEN

Dr. R.-W. Bach und Prof. Dr. H. Stratmann

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

Für die Immissions-Raten-Meß-Apparatur (IRMA) werden in einem Strömungskanal folgende Zusammenhänge untersucht:

- Abhängigkeit der gemessenen Aufnahme rate (I) von den Parametern Windgeschwindigkeit (u) und SO₂-Konzentration (c)
- Abhängigkeit des Stoffübergangs (Depositionsgeschwindigkeit) von den Strömungsparametern Windgeschwindigkeit und Turbulenzgrad
- Ermittlung der effektiven Aufnahme rate der IRMA
- Darstellung und Diskussion der Strömungsbedingungen an der IRMA-Hülse und deren Einfluß auf den Stoffübergang.

Es wird gezeigt, daß die Aufnahme rate I proportional dem Produkt $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ ist, wie aus strömungstechnischen Untersuchungen des Stoff- bzw. Wärmeübergangs an Zylindern bekannt ist. Als Näherung ist der Ansatz $I \sim \bar{u} \cdot \bar{c}$ unter der Bedingung $0 \leq \bar{u} \cdot \bar{c} \leq 0,35$ zulässig.

Weiter kann gezeigt werden, daß für mittlere Anströmgeschwindigkeiten kleiner $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ der Stoffübergang (Depositionsgeschwindigkeit) eine lineare Funktion der Windgeschwindigkeit ist. Ein Einfluß der Strömungsturbulenz auf den Stoffübergang konnte bei den hier untersuchten Bedingungen nicht festgestellt werden.

Als effektive Aufnahme rate oder Entladungskapazität der IRMA wird ein Wert von nur 2-6 % ermittelt. Es kann gezeigt werden, daß die Ausbildung einer laminaren Grenzschicht beim Umströmen der

IRMA-Hülse für diese geringe Entladungskapazität verantwortlich ist.

Der Vergleich der Messungen aus dem Strömungskanal mit Freilandmessungen zeigt gute Übereinstimmung.

S u m m a r y

For the Immission Rate Measuring Apparatus (IRMA) the following relations are to be investigated in a flow channel

- dependency between uptake-rate (I) and the parameters wind speed (u) and concentration of SO₂ (c)
- dependency between mass transition (deposition velocity) and the parameters wind speed and turbulence intensity
- determination of the effective uptake rate of the IRMA
- description and discussion of the flow field around the IRMA-cylinder and its influence to the mass transition.

The results show that the uptake rate I is proportional to the product $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ as expected from flow field experiments on the mass and heat transition at cylinders. As an approximation $I \sim \bar{u} \cdot \bar{c}$ is allowed for $0 \leq \bar{u} \cdot \bar{c} \leq 0,35$.

Further it is shown that for average wind speeds smaller than $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ the mass transition (deposition velocity) is a linear function of wind speed. An influence of flow turbulence to the mass transition could not be found under the used experimental conditions.

The effective uptake rate or relieve capacity of the IRMA are only 2-6 %. The reason for such small relieve capacity is the forming of a laminar boundary layer at the IRMA cartridge.

The comparison between flow channel measurements and outdoor measurements shows good conformity.

1. Einleitung

Zur Beurteilung von Einwirkungen gasförmiger Luftverunreinigungen auf Materialien ist die Kenntnis der Immissions- oder Aufnahme rate, also die pro Flächen- und Zeiteinheit vom Material aufgenommene Schadstoffmenge, von Bedeutung. Die Bestimmung einer relativen Immissionsrate mit Hilfe der spezifischen Aufnahme rate eines Standardobjektes wird durch die Immissions-Raten-Meß-Apparatur (IRMA) vorgeschlagen [1] .

Das Verfahren beruht im Prinzip auf der Reaktion der zu bestimmenden Schadstoffe mit einer geeigneten Absorptionslösung, die als Rieselfilm an der Außenseite eines zylindrischen Trägerkörpers herabwandert. Die Gehalte der sich in der Absorptionslösung ansammelnden Reaktionsprodukte werden bestimmt und auf die Standardmeßfläche (Zylinderoberfläche) bezogen. Die Aufnahme rate wird dann in $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ berechnet. Bei Wahl einer alkalischen Absorptionslösung ist es möglich, auf diese Weise nebeneinander schwefelhaltige, fluorhaltige und chlorhaltige Luftschadstoffe zu bestimmen.

Das Meßverfahren benutzt also eine standardisierte Grenzfläche als Meßobjekt und verwendet die so erzeugten Meßwerte zu relativen Vergleichen und Aussagen. Schlüsse auf spezifische Aufnahme rates beliebiger Materialien sind nicht möglich. Des weiteren ist die quantitative Deutbarkeit der Meßwerte beschränkt, da die Einflüsse auf das Meßergebnis neben variierender Schadstoffkonzentration und Anströmgeschwindigkeit auch noch durch grenzflächenspezifische Parameter bedingt sind.

Die Aufgabenstellung für die vorliegende experimentelle Untersuchung bestand daher in der Ermittlung folgender Zusammenhänge:

- 1) Untersuchung der Abhängigkeit der IRMA-Aufnahme rate von den Parametern Geschwindigkeit und Turbulenzgrad der Luftströmung sowie Schadstoffkonzentration der Luft.
- 2) Strömungstechnische Beschreibung des Stoffüberganges an der zylindrischen IRMA-Hülse und Ermittlung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit.

- 3) Feststellung der Einflußgrößen auf die Stoffübergangszahl bzw. die Depositionsgeschwindigkeit eines Schadstoffes bezüglich der IRMA.
- 4) Ermittlung der effektiven Aufnahmerate (Entladungskapazität) der IRMA.
- 5) Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Freilanduntersuchungen.

Zur Durchführung o.a. Experimente mußte die IRMA definierbaren Strömungen mit einstellbarer Strömungsgeschwindigkeit (u) und Turbulenzgrad (Tu) sowie einem bestimmten Schadstoffgehalt (c) (als Konzentration in $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) ausgesetzt wrden. Dies konnte durch Konstruktion eines geeigneten Strömungskanals erreicht werden.

2. Experimentelles

Den Aufbau der Immissionsraten-Meßapparatur (IRMA) zeigt Abb. 1 schematisch und Abb. 2 in der technischen Ausführung als frei aufstellbares Meßgerät.

Aus einem Vorratsgefäß wird die Adsorptionslösung ($0,8 \text{ g NaOH} \cdot \text{l}^{-1}$) mittels einer Schlauchquetschpumpe in die mit Verteilerbohrungen versehene Hülsenhalterung gefördert und als gleichmäßiger Rieselfilm auf die Extraktionshülse gebracht. Der Film tropft am unteren Ende der Hülse wieder in das Vorratsgefäß zurück und wird weiter umgepumpt.

Zur Bearbeitung der o.a. Aufgabenstellungen wurde die IRMA-Hülse einem in Geschwindigkeit und Turbulenz regelbaren Luftstrom mit einstellbarer Schadstoffkonzentration ausgesetzt. Dazu wurden Hülsenhalterung, Hülse und Auffangtrichter in einem Strömungskanal eingebaut, das Vorratsgefäß mit der Adsorptionslösung und die Pumpe verbleiben außerhalb des Kanals. Durch diese Anordnung ist die IRMA-Hülse im Maßstab 1 : 1 der Strömung ausgesetzt. Dies hat den Vorteil, daß man auf die bei strömungstechnischen Experimenten mit verkleinerten Modellen sonst übliche Berücksichtigung von Ähnlichkeitsbeziehungen der Einflußgrößen verzichten kann.

In Abb. 3 ist der Aufbau des Strömungskanals schematisch dargestellt. Der Kanal ist aus Hart-PVC gefertigt und setzt sich aus bis zu 80 cm langen Einzelelementen mit quadratischem Querschnitt von $17 \cdot 17 \text{ cm}^2$ zu einer Gesamtlänge von 450 cm zusammen. Ein Gebläse (3) saugt Luft über ein vorgeschaltetes Aktivkohlefilter (1) an und drückt diese in den Kanal. Mit Hilfe von Schiebern (4, 5) und eines Bypass (6) wird nach dem Gebläse die Strömungsgeschwindigkeit des Luftstromes geregelt. Vor dem Hauptschieber (5) wird die Luft mit Schadgas (SO_2) beaufschlagt, welches in einer Wirbelkammer (7) mittels Schneiden und grobmaschigen Gittern (8) homogen mit der Luft vermischt wird. Nach der Wirbelkammer passiert der Luftstrom mehrere aus gebündelten Röhren bestehende Gleichrichter (9) und feinmaschige Gitter (10), wodurch Strömungsrotation und Windkanalturbulenz herabgesetzt werden [2]. Nach Durchlaufen einer Beruhigungsstrecke (11), in der die durch die Gitter verursachten Mikroturbulenzen abklingen, erreicht der Luftstrom die eigentliche Meßstrecke (12) mit der dort eingebauten IRMA-Hülse (13). Über einen sich anschließenden Diffusor (14) mit sich erweiterndem Querschnitt wird die Luft schließlich in einen Abluftkamin (15) geleitet.

Das für die Versuche verwendete Schadgas SO_2 wird aus Stahlflaschen (18), in denen es als 1 %- oder 5 %ige Konzentration in Stickstoff vorliegt, dem gefilterten Luftstrom zudosiert. In der Wirbelkammer findet dann eine Vermischung mit dem Luftstrom derart statt, daß in der Meßstrecke über dem gesamten Kanalquerschnitt gleiche Schadgaskonzentration erreicht wird.

Die gewünschte SO_2 -Konzentration wird in der Meßstrecke des Strömungskanals registrierend gemessen (16) und über Einstellung des Druckminderventils (20) sowie des Durchflußmengen Zählers (19) reguliert. Auf diese Weise sind beliebige Konzentrationen zwischen $0,03$ und $2,00 \text{ mg SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ einstellbar. Die Messung der SO_2 -Konzentration erfolgt durch Bestimmung nach dem Leitfähigkeitsverfahren mit dem Gerät Ultragas 3 der Firma Wösthoff. Die Halterung der Meßsonde ist so konstruiert, daß jeder Punkt des Kanalquerschnitts ausgemessen werden kann, um die Homogenität der Schadgasverteilung im Luftstrom zu prüfen.

Das Ergebnis einer solchen Überprüfung zeigt Abb. 4 beispielhaft für die SO_2 -Konzentration $c = 0,50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

An neun Stellen des Querschnitts wurde die SO_2 -Konzentration im Luftstrom gemessen, die Ergebnisse (Zahlen in Klammern unter den Meßpunkten) weichen nur geringfügig vom Sollwert $0,50 \text{ mg SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ ab. Die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt kontinuierlich durch Einschieben bzw. Herausziehen des Hauptschiebers (5), wodurch ein mehr oder weniger großer Teil des vom Gebläse kommenden Luftstroms über den Bypass (6), bei geöffnetem Schieber (4), abgelenkt wird. So sind Strömungsgeschwindigkeiten zwischen $0,50$ und $6,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ einstellbar.

Die Geschwindigkeitsmessung des Luftstroms erfolgt in der Meßstrecke des Strömungskanals durch Heißfilmsonde eines Konstanttemperatur-Anemometers der Firma Thermo-Systems Inc. (17). Auch hier kann die Sondenhalterung so bewegt werden, daß jeder Punkt des Kanalquerschnitts ausgemessen werden kann.

Aufgrund der eingebauten Gleichrichter und Dämpfungsgitter hat die Geschwindigkeitsverteilung des Luftstromes in der Meßstrecke ein kolbenförmiges Profil. Über dem Kanalquerschnitt sind also die Geschwindigkeits-Vektoren der Strömung parallel gerichtet und von gleichem Betrag. In Abb. 4 ist dies beispielhaft für die Windgeschwindigkeit $u = 2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dargestellt. Gemessen wurde wieder an neun Stellen des Kanalquerschnitts bei nicht eingebauter Hülse. Die Meßergebnisse (Zahlen ohne Klammern über den Meßpunkten) zeigen gute Übereinstimmung mit dem Sollwert.

Ein Einfluß der Strömungsturbulenz auf die Adsorption von SO_2 am Rieselfilm der IRMA kann nur durch Veränderung der Grenzschichtströmung an der Hülse erfolgen. Dies wird durch sog. "kleinballige" Turbulenz (Strömungswirbel in der Größenordnung des angeströmten Gegenstandes) bewirkt. Zur Erzeugung solcher kleinballiger Turbulenzen im Luftstrom werden in der Beruhigungsstrecke des Kanals geeignete Turbulenzgeneratoren (21) in Form von Rundstäben, Profilstäben, usw. [3, 4, 5] eingebracht.

Als Turbulenzgrad einer Strömung wird definiert [6] :

$$Tu = \frac{1}{\bar{u}} \sqrt{\frac{1}{3} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} \quad (1).$$

Hierbei sind \bar{u} die mittlere Windgeschwindigkeit in der Hauptstromrichtung (x - Koordinate) und u' , v' , w' , die Schwankungsgeschwindigkeiten in Richtung der drei Koordinatenachsen x, y, z.

Bei strömungstechnischen Experimenten wird als Maß der turbulenten Strömung die Turbulenzintensität in der Hauptstromrichtung angegeben [6]. Sie ist definiert als Verhältnis aus mittlerer Abweichung zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Hauptstromrichtung:

$$Tu_x = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}} \quad (2).$$

Die Messung der Turbulenzintensität erfolgt ebenfalls mit der Heißfilmsonde des Konstanttemperatur-Anemometers, das neben der mittleren Strömungsgeschwindigkeit gleichzeitig über ein RMS (root-mean-square) - Voltmeter die mittlere Schwankungsgeschwindigkeit zu ermitteln gestattet.

Je nach Anzahl, Form und Anordnung der erwähnten Turbulenzgeneratoren lassen sich bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit definierte Turbulenzintensitäten zwischen 0,1 und 0,4 einstellen. Dies entspricht den je nach Art der Oberflächenbeschaffenheit (Grasland, bewaldet, Stadtgebiet) variierenden Werten, die bei zahlreichen meteorologischen Messungen im Freiland [7, 8] ermittelt worden sind. Orientierend wurden eigene Messungen neben IRMA-Geräten vorgenommen, die auf dem Freigelände der LIS aufgestellt waren; sie ergaben bei unterschiedlichen Windverhältnissen Werte für die Turbulenzintensität zwischen 0,1 und 0,4.

Bei der Durchführung der Experimente wurde darauf geachtet, daß möglichst die Bedingungen bei Freilandmessungen mit der IRMA eingehalten wurden. Aufgrund der experimentellen Anordnung bedeutet das, daß die Parameter der Strömung, also Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität und Schadstoffkonzentration, konstant gehalten werden mußten und zwar entsprechend den zeitlichen Mittelwerten während der Expositionszeit beim Freilandexperiment.

Zur Vermeidung einer unübersichtlichen Kombinationsvielfalt wurden die externen Parameter Raumtemperatur ($T \approx 20-22^\circ\text{C}$) und relative Feuchte ($rF \approx 60-70\%$) konstant gehalten. Um die Aussage-sicherheit der aus den Experimenten gewonnenen Ergebnisse zu festigen und den Vergleich mit den Freilandergebnissen zu verbessern, wurden orientierende Messungen sowohl mit variierender relativer Feuchte als auch wechselnder Schadstoffkonzentration während der Dauer eines Versuchs durchgeführt.

Die Meßvorschrift für die IRMA schreibt "eine Meßperiode von 14 Tagen" zur Ermittlung eines Meßwertes vor. Auf diese Weise erhält man pro Jahr 26 Meßwerte. Um die genannten Zusammenhänge untersuchen zu können, ist eine größere Zahl von Experimenten erforderlich, die man nur durch Verkürzen der Expositionszeit der IRMA im Strömungskanal erhalten kann. Wegen der linearen Abhängigkeit zwischen der aufgenommenen Schadstoffmenge und der Expositionszeit, die bereits von LUCKAT festgestellt [9] und die auch hier nochmals experimentell überprüft wurde (siehe Abb. 5), ist eine solche Verkürzung zulässig. Wie aus der Abbildung hervorgeht, bleibt die ermittelte Immissionsrate von Expositionszeiten größer als 48 Stunden an konstant; dies entspricht linearem Anstieg der Schadstoffaufnahme mit wachsender Expositionszeit. Aus praktischen Erwägungen heraus wurden für die Versuche im Strömungskanal Expositionszeiten von 70-100 h (ca. 3-4 Tage) gewählt.

Die Experimente wurden in zwei Serien aufgeteilt. Als erstes wurden Messungen ohne Einbau von Turbulenzgeneratoren mit quasi laminarer Strömung ($Tu_x \approx 1-2\%$) durchgeführt, danach als größere Serie Messungen mit variierender Turbulenzintensität zwischen 10 und 30 %. Die Windgeschwindigkeiten lagen zwischen 0,5 und 6,0 ms^{-1} , die Konzentrationen zwischen 0,03 (als kleinste dosierbare Größe)

und $2,0 \text{ mg SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$.

Bei der Hauptzahl der Messungen lagen die Werte für die eingestellten Parameter in den Größenbereichen der Freilandmessungen, d.h. Windgeschwindigkeiten zwischen $0,5$ und $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, Konzentrationen zwischen $0,03$ und $0,50 \text{ mg SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ und Turbulenzintensitäten zwischen $0,10$ und $0,40$.

Die Kombinationen von Windgeschwindigkeit und Konzentration orientierten sich ebenfalls an Ergebnissen der Freilandmessungen. Als Richtgröße wurde dabei der Wert des Produktes $\bar{u} \cdot \bar{c}$ gewählt, der bei Messungen im Freiland zwischen $0,02$ und $0,50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ liegt. Um aber zu allgemein gültigen Aussagen für größere Bereiche von \bar{u} und \bar{c} zu gelangen, wurden die Messungen auf den Bereich $0,5 \leq \bar{u} \cdot \bar{c} \leq 2,2$ ausgedehnt, einige wenige Messungen lagen auch darüber.

Zur Ermittlung von IRMA-Werten bei Windgeschwindigkeiten nahe Null aber unterschiedlichen SO_2 -Konzentrationen der Umgebungsluft wurden IRMA-Geräte in der technischen Ausführung (Abb. 2) in einer Kammer exponiert, siehe Abb. 6. In die Kammer (Rauminhalt ungefähr $0,5 \text{ m}^3$) wird von einem Gebläse gefilterte Luft gedrückt, der vor dem Eintritt in die Kammer SO_2 zudosiert wurde. Um eine homogene Schadgasverteilung zu erreichen, wird die Luft gegen eine Prallplatte gelenkt und tritt durch eine Lochplatte in die Kammer ein. Die Abluft wird unten aus der Kammer über ein Filter nach außen abgeführt. In der Kammer werden Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie SO_2 -Konzentration gemessen. Bestimmt durch die Förderleistung des Gebläses, beträgt die vertikale Strömungsgeschwindigkeit in der Kammer etwa $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Jeweils 2 batterie-betriebene IRMA-Geräte wurden 70-100 Stunden, also analog der Kanalexpositionszeit, verschiedenen SO_2 -Konzentrationen zwischen 0 und $0,90 \text{ mg SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ ausgesetzt.

3. E r g e b n i s s e u n d D i s k u s s i o n

Die Meßergebnisse der Untersuchungen sind in den Tabellen 1 und 2 sowie in den Abbildungen 7 bis 16 dargestellt.

In den ersten Spalten der Tabellen sind von links nach rechts aufgeführt: die mittlere Windgeschwindigkeit \bar{u} , nach absteigenden Werten geordnet, die Turbulenzintensität Tu_x (nur Tabelle 2), die mittlere SO_2 -Konzentration \bar{c} , die Versuchsdauer t und die aus dem Analyseergebnis berechnete Immissionsrate I . In den beiden dann folgenden Spalten finden sich die Produkte $\bar{u} \cdot \bar{c}$ und $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$, deren Korrelation mit I untersucht werden soll. Die Mittelungen von \bar{u} und \bar{c} wurden, sofern Schwankungen dies nötig machten, über die Versuchsdauer für jeden Parameter einzeln durchgeführt und dann die Produkte $\bar{u} \cdot \bar{c}$ bzw. $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ gebildet.

Die zwei nächsten Spalten enthalten die beim jeweiligen Versuch analysierte Menge Schwefeldioxid m_A und weiter die Menge Schwefeldioxid m_F , die theoretisch in der Versuchsdauer den Querschnitt der IRMA durchströmt hätte; sie berechnet sich nach

$$m_F = \bar{u} \cdot \bar{c} \cdot t \cdot F \quad (3),$$

wobei F der der Strömung ausgesetzte Querschnitt der IRMA-Hülse ist - er beträgt 56 cm^2 . In der vorletzten Spalte ist dann der Quotient m_A/m_F gebildet, der die relative SO_2 -Aufnahme der IRMA aus dem angebotenen Luftstrom darstellt. Dieser Wert gibt die Entladungskapazität bzw. die effektive Aufnahmerate an.

In der letzten Spalte schließlich ist die Depositionsgeschwindigkeit, auch Stoffübergangszahl genannt, angegeben. Sie berechnet sich nach Definition von CHAMBERLAIN und CHADWICK [10] als

$$V_d = \frac{I}{\bar{c}} \quad (4).$$

Tabelle 1 zeigt die Meßergebnisse bei "quasi"-laminarer Strömung, in Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Messungen mit variierender

Turbulenzintensität aufgelistet. Eine erste Darstellung der Ergebnisse erfolgt in den Abb. 7 bis 10. Dort ist die Immissionsrate I über den Produkten $\bar{u} \cdot \bar{c}$ und $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ einmal für einen Weitbereich, Abb. 7 und 8 (umfaßt die gesamte Spannweite der Parameter), und zum anderen für einen Nahbereich, Abb. 9 und 10 (Produkte der Parameter sind $\leq 0,35$), dargestellt.

Betrachtet man zunächst die Abbildungen 9 und 10, so sei hier ein Ergebnis vorweggenommen, auf das später noch genauer eingegangen werden soll:

Es ist kein Einfluß der Strömungsturbulenz auf den Stoffübergang SO_2 - IRMA und damit auf die ermittelte Immissionsrate festzustellen. Wie die Abbildungen zeigen, läßt sich kein einsinnig gerichteter Unterschied zwischen den bei laminarer und turbulenter Strömung ermittelten I -Werten erkennen. Die Meßergebnisse bilden somit ein gemeinsames Wertekollektiv, wie aus den Bildern gut zu erkennen ist. Für alle weiteren Betrachtungen sind daher die Tabellen 1 und 2 als vereint anzusehen.

Zur Ergründung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen der Immissionsrate I und den Parametern Anströmgeschwindigkeit und Schadgasbelastung der Luft wurde eine Korrelations- und Regressionsanalyse [11] durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe des Software-Paketes SPSS [12] an der Großrechenanlage der LIS.

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zeigt die folgende Tabelle 3:

Tabelle 3: Korrelationskoeffizienten zwischen Immissionsrate I und den Parametern \bar{u} , \bar{c} sowie deren Kombinationen

Parameter	Korrelationskoeffizient r	
	Weit	Nah
\bar{u}	0,49	0,47
\bar{c}	0,71	0,85
$\bar{u} \cdot \bar{c}$	0,95	0,96
$\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$	0,98	0,98

Wie die Tabelle 3 zeigt, ist die Immissionsrate I sehr viel stärker mit den Kombinationen als mit den einzelnen Parametern \bar{u} und \bar{c} korreliert. Man kann sich also bei der Betrachtung der Abhängigkeit zwischen I und den Parametern \bar{u} und \bar{c} auf die beiden Produkte $\bar{u} \cdot \bar{c}$ und $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ beschränken. Die lineare Regressionsanalyse liefert einen Zusammenhang zwischen I als Zielgröße und dem Produkt $\bar{u} \cdot \bar{c}$ bzw. $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ als Einflußgröße in Form einer Geradengleichung.

In den Abbildungen 7 und 8 (Weitbereich) sind diese Regressionsgeraden eingezeichnet, sie lauten:

$$I = 10^3 \cdot (0,13 + 0,55 \bar{u} \cdot \bar{c}) \quad (5)$$

$$\text{und } I = 10^3 \cdot 1,10 \sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c} \quad (6).$$

Wie Abb. 7 aber verdeutlicht, ist für den "Weitbereich", also vornehmlich bei hohen Windgeschwindigkeiten, ein Ansatz $I \sim \bar{u} \cdot \bar{c}$, trotz hoher Korrelation nicht optimal, wie der graphisch gemittelte Parabelast (gestrichelt) andeutet. Besser dagegen ist der Ansatz $I \sim \sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ wie aus Abb. 8 ersichtlich wird.

Geht man auf die "Nahbereiche" über (gestrichelte Bereiche in den Abbildungen 7 und 8), so stellt man fest, daß hier beide Ansätze gleichwertig sind, was sich in fast gleichen Regressionsgeraden ausdrückt (Abbildungen 9 und 10):

$$I = 10^3 \cdot 1,13 \bar{u} \cdot \bar{c} \quad (7)$$

$$I = 10^3 \cdot 1,18 \sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c} \quad (8).$$

Der "Nahbereich" ist derjenige, der in mittlerer Windgeschwindigkeit und mittlerer Konzentration den Werten entspricht, die im Freiland gemessen werden.

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse von IRMA-Messungen im Freiland, bei denen gleichzeitig Windgeschwindigkeit und SO_2 -Konzentration gemessen wurden. Die Messungen stammen aus drei verschiedenen Jahren und von zwei verschiedenen Standorten: Dom, Köln (1974), LIS, Essen (1977) und LIS, Essen (1979).

Sie sind, wie in Tabelle 1 und 2, nach absteigender Windgeschwindigkeit geordnet.

Die Darstellung der Freilandmessungen erfolgt in Abb. 11, wo die Immissionsrate über dem Produkt $\bar{u} \cdot \bar{c}$ aufgetragen ist. Die Abb. zeigt den Bereich $0 \leq \bar{u} \cdot \bar{c} \leq 0,15$. Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet:

$$I = 10^3 \cdot (0,005 + 0,79 \cdot \bar{u} \cdot \bar{c}) \quad (9)$$

bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,92.

Vergleicht man die Freilandmessungen mit den Messungen im Strömungskanal (Abb. 12), so ist recht gute Übereinstimmung festzustellen. Obwohl sich die Wertebereiche überdecken, zeigt sich bei den Freilandmessungen aber eine "Meßwertdämpfung", die sich auch in der geringeren Steigung der Regressionsgeraden ausdrückt. Die Ursache dafür dürfte im Einfluß der beiden Parameter Lufttemperatur und Luftfeuchte zu finden sein. Außerdem kann bei den Freilandmessungen ein Einfluß durch den ständigen Wechsel von Strömungsgeschwindigkeit und SO_2 -Konzentration der an der IRMA vorbeistreichenden Luft auf das Meßergebnis nicht ausgeschlossen werden. Zwar ließen sich, wie eingangs erwähnt, solche Variationen im Strömungskanal simulieren, aber die Versuchsergebnisse unterschieden sich nicht signifikant von den Ergebnissen, die mit konstant eingestellten Parametern erzielt wurden.

Die Beschreibung von Stoffaustauschvorgängen erfolgt durch die Angabe einer Depositionsgeschwindigkeit V_d , in der Strömungstechnik auch Stoffübergangszahl β genannt. Der Stoffübertritt - im Falle der IRMA aus einer Gasphase in eine Flüssigkeitsphase - pro Flächen- und Zeiteinheit B_i wird durch ein Gefälle der Partialdichte q_i des reagierenden Gases bestimmt.

Es gilt allgemein:

$$\frac{m_i}{F \cdot t} = B_i \sim (q_{iG} - q_{iFl}) \quad (10).$$

Sind Löslichkeit und Reaktivität des Gases in der Absorptionsflüssigkeit hoch, so geht q_{iFl} gegen Null. Der Proportionalitätsfaktor, die Stoffübergangszahl β , ist dann aus den meßbaren Größen B_i und q_{iG} bestimmbar:

$$\beta = \frac{B_i}{q_{iG}} \quad (11)$$

(vergleiche mit Gleichung (4)).

Der Stoffübergang an einem umströmten Zylinder hängt in starkem Maße von der Art der sich ausbildenden Grenzschicht ab. Diese wird hauptsächlich beeinflußt von der Strömungsgeschwindigkeit (u) und dem Turbulenzgrad (Tu) des den Zylinder umströmenden Gases sowie von der Oberflächenrauigkeit des Zylinders (r). Die Stoffübergangszahl ist also eine Funktion dieser Einflußgrößen:

$$\beta = f(u, Tu, r) \quad (12).$$

Die Umströmung von Zylindern ist von BRAUER und SUCKER [13] und von BRAUER [14] ausführlich beschrieben worden.

Die Strömungsverhältnisse sind dabei sehr kompliziert. Bei nicht zu kleinen Anströmgeschwindigkeiten ($\bar{u} > 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei der IRMA-Hülse) bildet sich eine laminare Grenzschicht mit einem instationären Einzelwirbel [13], die bekannte Kármánsche Wirbelstraße, aus. Dies gilt für Reynoldszahlen $Re > 160$. Die dimensionslose Reynoldszahl ist definiert als

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (13)$$

mit u = Strömungsgeschwindigkeit, d = Zylinderdurchmesser

und ν = dynamische Viskosität.

Bei einer bestimmten kritischen Reynoldszahl Re_{kr} geht diese laminare Grenzschicht in eine turbulente über [13,6], was mit einer Erhöhung des Stoff- und Wärmeübergangs verbunden ist.

Der Wert von Re_{kr} hängt vom Turbulenzgrad der Strömung und von der Oberflächenbeschaffenheit des Zylinders ab. Für polierte Zylinder und laminare Anströmung gilt $Re \approx 2 \cdot 10^5$ [6], was bezogen auf die IRMA einer Strömungsgeschwindigkeit von $80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ entspricht.

Die kritische Reynoldszahl sinkt jedoch bei steigendem Turbulenzgrad der Strömung sowie bei wachsender Oberflächenrauigkeit des umströmten Zylinders. Die Faserigkeit der IRMA-Hülse, also größere Oberflächenrauigkeit, sowie eine turbulente Anströmung lassen erwarten, daß für die IRMA-Hülse eine geringere kritische Reynoldszahl gilt. Dies würde dann dazu führen, daß sich auch bei wesentlich niedrigen Anströmgeschwindigkeiten (Größenordnung $4-6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) eine turbulente Grenzschicht ausbildet, die einen erhöhten Stoffübergang ermöglicht.

In der Strömungstechnik ist es üblich, Vorgänge und Zustände durch dimensionslose Größen zu beschreiben. Im Falle des Stoffübergangs geschieht dies durch die sogenannte Sherwood-Zahl, die definiert ist als

$$Sh = \frac{\beta \cdot d}{D} \quad (14)$$

mit d = Zylinderdurchmesser und D = Diffusionskoeffizient der absorbierten Komponente in Luft.

Nach einem Vorschlag von GALLOWAY und SAGE [15] läßt sich der Stoffübergang am Zylinder in turbulenter Strömung folgendermaßen beschreiben:

$$Sh = 0,476 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} + \left[7,162 \cdot 10^{-3} \frac{Tu}{Tu + 0,130} + 1,226 \cdot 10^{-3} \right] Re \cdot Sc^{\frac{2}{3}} \quad (15).$$

Die hier enthaltene Größe Sc ist die Schmidt-Zahl, sie ist definiert als:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (16)$$

mit ν = dynamische Viskosität und D = Diffusionskoeffizient der absorbierten Komponente in Luft.

Setzt man die Definitionsgleichungen (13), (14) und (16) in Gleichung (15) ein und löst nach β auf, ergibt sich:

$$\beta = 0,476 \cdot \frac{D}{d} \cdot \left(\frac{d}{v}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{v}{D}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot u + \left[7,162 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{Tu}{Tu+0,130} + 1,226 \cdot 10^{-3} \right] \frac{D}{d} \cdot \left(\frac{v}{D}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d}{v} \cdot u \quad (17).$$

Durch Einsetzen der Zahlenwerte

$$\begin{aligned} d &= 3,75 \text{ cm} \\ v &= 0,151 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ D &= 0,122 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad [16]$$

vereinfacht sich Gleichung (17) zu:

$$\beta = 0,084 \sqrt{u} + \left[6,767 \cdot 10^{-3} \frac{Tu}{Tu+0,130} + 1,158 \cdot 10^{-3} \right] \cdot u \quad (18)$$

oder auch

$$\beta = 0,084 \sqrt{u} + b(Tu) \cdot u \quad (19),$$

wenn man den vom Turbulenzgrad beeinflussten Faktor mit $b(Tu)$ abkürzt.

Für $b(Tu)$ erhält man Werte zwischen $0,002 \leq b(Tu) \leq 0,007$

bei $0,02 \leq Tu \leq 0,40$.

Für einen mittleren Turbulenzgrad von etwa 25% erhält man dann aus Gleichung (19) die einfache Beziehung

$$\beta = 0,084 \sqrt{u} + 0,005 u \quad (20),$$

welche die Abhängigkeit der Stoffübergangszahl von der Strömungsgeschwindigkeit beschreibt. Die Dimension von u ist hier $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Der Gültigkeitsbereich der Gleichung (20) ist mit $10^{-2} \leq Re \leq 4 \cdot 10^5$ bzw. $Re < Re_{kr}$ und $Sc \leq 300$ angegeben [15].

Das heißt also, daß in dem in dieser Arbeit behandelten Bereich der Strömungsgeschwindigkeit eine Abhängigkeit des Stoffübergangs zur Wurzel der Anströmgeschwindigkeit besteht.

Dies wird auch nachdrücklich durch die experimentellen Ergebnisse der IRMA-Messungen im Strömungskanal bestätigt, wie man an der graphischen Mittelung der Meßwerte in Abb. 13 sehen kann. Aufgetragen sind hier die berechneten Depositionsgeschwindigkeiten über der Windgeschwindigkeit und zwar eine Werteauswahl aus den Tabellen 1 und 2. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Kammerexperimente (Tabelle 5) bei $\bar{u} \approx 0$ aufgetragen. Wie Tabelle 5 zeigt, ergibt sich trotz fehlender Anströmung der IRMA ein Stoffübergang mit im Mittel konstanter Depositionsgeschwindigkeit. Dies beruht auf der Diffusion der SO_2 -Teilchen in der Kammerluft, wodurch diese an die reaktive Hülsoberfläche (Rieselfilm) herangeführt und absorbiert werden.

Analog zu den I-Werten wird ein Unterschied der Depositionsgeschwindigkeiten mit verändertem Turbulenzgrad nicht deutlich. Die verfahrensbedingten Meßwertschwankungen lassen eine solche Feinauflösung nicht zu.

Betrachtet man auch hier wieder einen "Nahbereich", nämlich den durch die Ergebnisse der Freilandmessungen eingegrenzten Geschwindigkeitsbereich $0 \leq \bar{u} \leq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, so ergibt die Regressionsanalyse einen guten linearen Zusammenhang zwischen v_d und \bar{u} . Bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,95 lautet die Geradengleichung (siehe Abb. 14):

$$v_d = 0,48 + 0,69 \bar{u} \quad (21).$$

Die Regressionsanalyse nach Abszissentransformation auf $\sqrt{\bar{u}}$ liefert die lineare Abhängigkeit

$$v_d = 0,20 + 1,08 \sqrt{\bar{u}} \quad (22),$$

wobei der Korrelationskoeffizient auf 0,87 absinkt. Schon der Vergleich der Achsenabschnitte (Werte für v_d bei $\bar{u} \approx 0$) zeigt, daß hier keine Verbesserung durch den Ansatz $v_d \sim \sqrt{\bar{u}}$ erreicht wurde.

Die Ergebnisse der Freilandmessungen aus Tabelle 4 zeigt Abb. 15. Wie schon bei den I-Werten zeigt sich eine Aufweitung der Meßpunktschar. Der Einfluß ist auch hier durch die Parameter Lufttemperatur und Luftfeuchte bedingt, die ja im Strömungskanal etwa konstant gehalten wurden.

Diese Aufweitung der Punktschar erzeugt sofort ein deutliches Absinken des Korrelationskoeffizienten für einen linearen Zusammenhang zwischen v_d und \bar{u} , und zwar auf 0,57. Wie aber der F-Test zeigt, sind die Koeffizienten der Regressionsgleichung hochsignifikant. Die ermittelte Regressionsgerade lautet:

$$v_d = 0,32 + 0,77 \bar{u} \quad (23).$$

Sie zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Gleichung (21).

Die gemeinsame Darstellung der Meßwerte aus Strömungskanal und Freiland zeigt Abb. 16. Die beiden Regressionsgeraden sind, betrachtet man ihre 95-%-Vertrauensbereiche, nicht voneinander zu unterscheiden.

In einer Arbeit von GLIETENBERG und BLENKE [16] wurden Stoffübergangszahlen für radioaktiv markiertes SO_2 an Zylindern mit einem Durchmesser von 5 cm für den Geschwindigkeitsbereich $2,5 \leq u \leq 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ermittelt. Da in der Arbeit örtliche Stoffübergangszahlen ermittelt wurden, also β als Funktion des Umfangwinkels φ , sind die Ergebnisse wegen der notwendigen Mittelungen nicht so einfach mit den hier vorliegenden Ergebnissen vergleichbar.

Der dennoch durchgeführte Vergleich soll zeigen, daß, bei großen Unterschieden in den experimentellen Bedingungen und in der Anwendung von Meßverfahren, die Werte in der Größenordnung gut übereinstimmen. Aus den angegebenen Meßergebnissen in [16] läßt sich bei $\bar{u} = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ eine mittlere Stoffübergangszahl β von $1,8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

berechnen. Nach Gleichung (21) ergibt sich für den Strömungskanal eine mittlere Depositongeschwindigkeit v_d von $2,2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Betrachtet man nun die Entladungskapazität bzw. die effektive Aufnahme der IRMA, so ergibt sich, daß die Werte $100 \cdot (m_A/m_F)$ bei den Kanalmessungen und auch bei den Freilandexperimenten zwischen 1,8 % und 6,4 % liegen. Das heißt, im Mittel werden also nur etwa 4 % SO_2 aus einem Luftstrom entfernt, der bei Nichtvorhandensein des Gerätes durch die Querschnittsfläche der IRMA-Hülse geströmt wäre.

Die Begründung für diesen sehr geringen Wert liegt in der abschirmenden Wirkung der laminaren Grenzschicht, die sich bei Umströmung der IRMA-Hülse ausbildet. Sie verhindert, daß SO_2 -Moleküle, die sich nicht unmittelbar an der Hülse anliegenden Strömungsschicht befinden, zu einer Absorption am Rieselfilm gelangen.

Wie aus den Tabellen 1 und 2 ersichtlich, zeigen die Werte $100 \cdot (m_A/m_F)$ sogar die leichte Tendenz, bei hohen Windgeschwindigkeiten niedriger auszufallen. Auch dies erklärt sich mit der abschirmenden Wirkung der laminaren Grenzschicht. Zum einen wird diese bei höheren Geschwindigkeiten (wie auch bei höherer Turbulenz) dünner [17, 18], zum anderen wird die Verweilzeit der Moleküle für den Übertritt verringert. Dieser Effekt wird bei den Freilandmessungen nicht so eindeutig beobachtet, siehe Tabelle 4. Dies ist aber nicht verwunderlich, da die Störgrößen Lufttemperatur und Luftfeuchte die Übertrittsbedingungen beeinflussen.

Wie aber bereits erwähnt, findet der Umschlag von der laminaren Grenzschicht in eine turbulente Grenzschicht, die mit stark erhöhtem Stoffaustausch verbunden ist, bei einer sog. kritischen Reynolds-Zahl statt. Der Wert dieser Zahl, der für polierte Zylinder bei $2 \cdot 10^5$ liegt, ist stark von der Strömungsturbulenz und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Bei hoher Strömungsturbulenz, verbunden mit einer rauhen Zylinderoberfläche, kann der Grenzschichtumschlag laminar - turbulent schon bei wesentlich niedrigeren Reynoldszahlen, d.h. bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten auftreten [17], wie bereits erwähnt.

Um zu prüfen, ob für den in dieser Arbeit betrachteten Parameterbereich

$$0,5 \leq \bar{u} \leq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

und $0,01 \leq Tu_x \leq 0,40$ in Verbindung

mit der vorgegebenen Oberflächenrauigkeit der befeuchteten IRMA-Hülse ein solches Umschlagen der Grenzschicht überhaupt stattfinden kann, wurde die Druckverteilung in Abhängigkeit vom Umfangswinkel am IRMA-Zylinder gemessen. In der Oberfläche der Hülse wurde dazu eine Öse eingesetzt, an die im Hülseninneren ein enger Schlauch angeschlossen war, der wiederum mit seinem anderen Ende zu einem Schrägrohrmanometer führte. Durch Drehen der feuchten Hülse konnte so am Schrägrohrmanometer der Druck an der Hülsoberfläche in Abhängigkeit vom Umfangswinkel ermittelt werden. Die Ergebnisse der Messungen für drei verschiedene Windgeschwindigkeiten bei maximal einstellbarer Turbulenzintensität sind in Abb. 17, linke Hälfte, dargestellt. Aufgetragen sind die auf den Druck am vorderen Stau-punkt des Zylinders (Staudruck) bezogenen Werte über dem Umfangswinkel. In der rechten Bildhälfte sind zum Vergleich die Druckverläufe für polierte Zylinder im unterkritischen (laminare Grenzschicht) und überkritischen (turbulente Grenzschicht) Bereich nach Messungen von O. FLACHSBART [19, 6] aufgetragen.

Wie man sieht, zeichnet sich der überkritische Bereich durch einen starken Druckfall zwischen 30° und 90° mit dem Minima bei etwa 80° und einem anschließenden fast sprungartigen Wiederanstieg zwischen 90° und 120° aus. Die Verläufe der gemessenen Druckverteilungen erreichen ein schwächeres Minimum bei 70° bis 80° mit einem anschließenden deutlich geringer ausgeprägten Wiederanstieg. Die Kurven entsprechen damit dem Druckverlauf für den unterkritischen Bereich, in dem laminare Grenzschichtströmung vorliegt.

Bei Freilandmessungen liegen zwar geringe mittlere Windgeschwindigkeiten vor ($\bar{u} \leq 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), jedoch kommen Böen mit Windgeschwindigkeiten von mehr als $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ besonders bei ausgesetzten Lagen sicher bisweilen vor. Man darf daher Grenzschichtsprünge laminar-turbulent im Freiland nicht ganz ausschließen, doch dürfte es sich dabei im normalen Aufstellungsfall um nicht zu häufige

Ereignisse handeln.

4. S c h l u ß b e m e r k u n g

Als Fazit der Untersuchungen kann man abschließend folgendes zusammenfassen:

Mit der Immissions-Raten-Meß-Apparatur ist vom Prinzip her - Stoffübergang am umströmten Zylinder - eine Stoffeintragsmessung möglich. Wegen der guten Absorption, die zu deutlichen Unterschieden zwischen erzeugtem Meßwert und Nachweisgrenze führt, gilt dies recht gut für SO_2 , weniger gut für Chlor und Fluor wie von SCHOLL und PRINZ [20] gezeigt wurde. Strömungstechnisch zeigt die IRMA das theoretisch zu erwartende Verhalten: der Stoffübergang ist proportional der Wurzel der Anströmgeschwindigkeit. Es gilt $I \sim \sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$. Im Bereich kleiner Zahlenwerte für \bar{u} und \bar{c} , dies ist auch der Bereich der Freilandmessungen, läßt sich der Stoffübergang aber ohne weiteres auch durch $I \sim \bar{u} \cdot \bar{c}$ beschreiben.

Die ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten sind in der Größenordnung $1-6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und damit relativ gering. Trotz ihrer wesentlich reaktiveren Oberfläche unterscheidet sich die Depositionsgeschwindigkeit an der IRMA damit nicht sonderlich von den Depositionsgeschwindigkeiten an Wasser ($0,2 - 4,0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) und Gras ($0,2 - 2,0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) [21].

Hier wird der wesentliche Nachteil des IRMA-Verfahrens deutlich: die effektive Aufnahme rate ist zu gering, sie beträgt nur etwa 2-6 %. Trotz der Kenntnis dieses Wertes ist die Aufstellung einer Eichfunktion nicht möglich - Eichfaktoren in der Größenordnung 16-50 sind natürlich unsinnig.

Der Grund für diese schlechte Entladungskapazität liegt in der Ausbildung einer laminaren Grenzschicht bei der Umströmung der IRMA-Hülse. Diese behält ihre Laminarität trotz der relativ rauhen Hülsoberfläche und trotz hoher Turbulenzgrade der ankommenden Strömung bis zu hohen mittleren Windgeschwindigkeiten bei. Ein Umschlagen zur turbulenten Grenzschicht dürfte im Freiland beim Auftreten von Böen zwar vorkommen, ist aber dann nicht so häufig, daß

sich dies im Mittel über die Expositonsdauer bemerkbar machen würde.

Hier stellt sich natürlich die Frage nach der Verbesserung der Aufnahmekapazität. Dies ist sicher nur möglich, wenn es gelingt, die Abschirmung der laminaren Strömungsgrenzschicht zu beseitigen. Dies erscheint möglich durch Veränderungen der Oberfläche oder der Form des umströmten Körpers. Um dies zu untersuchen, sind bereits Versuche in Angriff genommen worden, deren Ergebnisse in Kürze mitgeteilt werden können. Vorläufige Ergebnisse lassen hoffen, daß die effektive Aufnahme rate um den Faktor 2 und mehr gesteigert werden kann.

S c h r i f t t u m

- [1] VDI-Richtlinie 3794, Bl. 1:
Bestimmung von Immissions-Raten.
Bestimmung der Immissions-Rate mit Hilfe des
IRMA-Verfahrens (November 1972).
- [2] PRANDTL, L.:
Führer durch die Strömungslehre.
Braunschweig: Vieweg und Sohn 1965, S. 302-311.
- [3] ARMITT, J. und J. COUNIHAN:
The Simulation of the Atmospheric Boundary
Layer in a Wind Tunnel.
Atmospheric Environment, 2 (1968), S. 49-71.
- [4] FRIMBERGER, R. und P. PUCHER:
Simulation der neutralen atmosphärischen Grenzschicht
im Windkanal.
Techn. Univ. München, Institut für Strömungsmechanik,
Bericht Nr. 75/17 (1975).
- [5] WOLFSEHER, U. und K. GERTIS:
Bodennahe Aerodynamik.
Darstellung der lokalen Windverhältnisse über unbebauten
und bebauten Flächen aufgrund vorhandener Literatur.
Teil I:
Gesundheitsingenieur, 99 (1978), Heft 9, S. 259-274.
Teil II:
Gesundheitsingenieur, 99 (1978), Heft 11, S. 321-352.
- [6] SCHLICHTING, H.:
Grenzschichttheorie.
Karlsruhe: Verlag Braun 1965, S. 421-457.

- [7] PLATOW, G.:
Atmosphärische Turbulenz- und Böigkeitsmaßzahlen in
Zusammenhang mit großräumigen Strömungsparametern.
Darmstadt, Techn. Hochsch., Institut für Meteorologie,
Bericht (1979).
- [8] HARRIS, R. J.:
The Nature of the Wind.
Proceedings of the CIRIA Seminar, paper 3.
Construction Industry Research and Information
Association, London 1970.
- [9] LUCKAT, S.:
Ein Verfahren zur Bestimmung der Immissionsrate
gasförmiger Komponenten.
Staub-Reinhaltung der Luft, 32 (1972), S. 484-486.
- [10] CHAMBERLEIN, A. C. und R. C. CHADWICK:
Deposition of Airborne Radio-Iodine Vapor.
Nucleonics, 8 (1953), S. 22-25.
- [11] SACHS, L.:
Angewandte Statistik, 4. Auflage.
Berlin, Heidelberg, New York:
Springer-Verlag 1974, S. 298-356.
- [12] Statistical Package for the Social Sciences (SPSS),
2. Edition.
New York: McGraw Hill Book Company 1975, S. 320-367.
- [13] BRAUER, H. und D. SUCKER:
Umströmung von Platten, Zylindern und Kugeln.
Chem. Ing. Techn., (1976), Nr. 8, S. 665-736.

- [14] BRAUER, H.:
Stoffaustausch einschließlich chemischer Reaktionen.
Aarau und Frankfurt a.M.: Verlag Sauerländer 1971,
S. 333-354.
- [15] GALLOWAY, T. R. und B. H. SAGE:
Local and Macroscopic Transport from a 1,5 Inch Cylinder
in a Turbulent Air Stream.
Aiche Journal, 13 (1967) 3, S. 563-570.
- [16] GLIETENBERG, H. und H. BLENKE:
Messung lokaler Stoffübergangszahlen an umströmten
Körpern mit Hilfe von Radioisotopen.
Chem. Ing. Techn., 44 (1972), Nr. 5, S. 319-325.
- [17] KOZIOL, K., L. BRONIARZ und T. NOWICKA:
Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf den Stoffaustausch
Flüssigkeit/Gas.
Chem. Ing. Techn., 51 (1979), Nr. 9, S. 897-899.
- [18] BRAUER, H. und D. SUCKER:
Stoff- und Wärmeübergang an umströmten Platten,
Zylindern und Kugeln.
Chem. Ing. Techn., 48 (1976), Nr. 9, S. 737-826.
- [19] FLACHSBART, O.:
Winddruck auf Gasbehälter.
Ergebnisse AVA, IV. Lieferung (1932), S. 134-138.
- [20] SCHOLL, G. und B. PRINZ:
Erhebungen über Aufnahme und Wirkung gas- und partikel-
förmiger Luftverunreinigungen im Rahmen des Wirkungs-
katasters des Landes NW.
Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen, Heft 53, S. 38-31,
Verlag W. Girardet, Essen 1981.

- [21] SEHMEL, G. A.
Particle and Gas Dry Deposition: a Review.
Atmos. Environ., 14 (1980), S. 983-1011.

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

Tabelle 1: Ergebnisse von Immissionsraten-Messungen im Strömungskanal ohne Einbau von Turbulenzgeneratoren ($Tu_x \approx 1-2 \%$) mit Angabe der Parameter \bar{u} und \bar{c} , deren Kombinationen, der effektiven Aufnahme und der Depositionsgeschwindigkeit

\bar{u} [m·s ⁻¹]	\bar{c} [mg·m ⁻³]	t [h]	I [mg·m ⁻² ·d ⁻¹]	$\bar{u} \cdot \bar{c}$ [mg·m ⁻² ·s ⁻¹]	$\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ [mg·m ⁻² ·s ^{-1/2}]	m _A [mg]	m _F [mg]	$\frac{m_A \cdot 100}{m_F}$ [%]	v _d [cm·s ⁻¹]
6,00	0,02	116,5	72,6	0,12	0,05	6,4	352,3	1,8	3,36
5,93	0,33	94,0	942,6	1,96	0,80	67,2	3708,4	1,8	3,31
5,93	0,31	93,0	914,4	1,84	0,75	64,4	3446,6	1,9	3,41
4,26	0,31	94,2	896,8	1,32	0,64	64,0	2507,9	2,6	3,35
4,24	0,02	89,3	50,0	0,08	0,04	3,4	152,7	2,2	2,89
4,22	0,51	95,0	1258,7	2,15	1,05	90,5	4121,9	2,2	2,86
3,94	0,48	94,0	1037,9	1,89	0,95	73,8	3583,9	2,1	2,50
3,92	0,43	77,0	1036,4	1,69	0,85	60,4	2616,6	2,3	2,79
2,28	0,02	95,5	39,6	0,05	0,03	2,9	87,8	3,3	2,29
2,23	0,53	91,3	858,7	1,18	0,79	59,3	2175,4	2,7	1,88
2,16	0,53	97,5	929,1	1,14	0,78	68,6	2250,2	3,1	2,03
2,13	0,34	95,0	605,5	0,72	0,50	43,5	1387,0	3,1	2,06
2,13	0,34	69,5	663,3	0,72	0,50	34,6	1014,7	3,4	2,26
2,12	0,36	95,0	558,3	0,76	0,52	40,1	1455,6	2,8	1,79
2,12	0,33	92,0	595,1	0,70	0,48	41,4	1297,6	3,2	2,09
2,12	0,09	117,3	167,8	0,19	0,13	14,9	451,2	3,3	2,16
2,12	0,35	48,0	547,8	0,74	0,51	19,9	718,0	2,8	1,81
2,05	0,33	96,0	427,8	0,68	0,47	31,1	1325,5	2,4	1,50
1,91	0,58	94,0	800,3	1,11	0,80	56,9	2099,3	2,7	1,60
1,91	0,56	72,0	774,0	1,07	0,77	42,2	1552,6	2,7	1,60
1,91	0,36	92,0	573,0	0,69	0,50	39,9	1275,3	3,1	1,84
1,91	0,33	96,0	546,1	0,63	0,46	39,7	1219,9	3,2	1,92
1,03	0,96	92,0	971,7	0,99	0,97	67,7	1833,9	3,7	1,17
1,03	0,90	90,0	794,5	0,93	0,91	54,1	1681,9	3,2	1,02
1,03	0,74	96,2	758,1	0,76	0,75	55,2	1478,2	3,7	1,19

Tabelle 1: Fortsetzung

\bar{u} [m·s ⁻¹]	\bar{c} [mg·m ⁻³]	t [h]	I [mg·m ⁻² ·d ⁻¹]	$\bar{u} \cdot \bar{c}$ [mg·m ⁻² ·s ⁻¹]	$\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ [mg·m ⁻² ·s ^{-1/2}]	m _A [mg]	m _F [mg]	$\frac{m_A \cdot 100}{m_F}$ [%]	v _d [cm·s ⁻¹]
1,03	0,52	74,5	533,8	0,54	0,53	30,1	804,4	3,7	1,19
1,03	0,44	99,0	444,4	0,45	0,45	33,3	904,5	3,7	1,17
1,03	0,35	96,5	308,6	0,36	0,36	22,5	701,3	3,2	1,02
1,03	0,36	96,0	361,7	0,37	0,37	26,3	717,6	3,7	1,16
1,03	0,40	96,0	393,1	0,41	0,41	28,6	797,4	3,6	1,14
0,57	0,53	97,0	323,1	0,30	0,40	23,7	590,8	4,0	0,71
0,57	0,47	96,0	321,5	0,27	0,35	23,4	518,5	4,5	0,79
0,57	0,38	95,0	265,1	0,22	0,29	19,1	414,8	4,6	0,81
0,56	0,33	95,5	257,3	0,18	0,25	18,6	355,8	5,2	0,90
0,56	0,32	96,0	254,6	0,18	0,24	18,5	346,8	5,3	0,92
0,57	0,28	96,0	256,5	0,16	0,21	18,6	308,9	6,0	1,06
0,57	0,25	96,0	205,1	0,14	0,19	14,9	275,8	5,4	0,95
0,58	0,21	96,0	155,5	0,12	0,16	11,3	235,7	4,8	0,86
0,58	0,19	96,0	141,8	0,11	0,14	10,3	213,3	4,8	0,86
0,57	0,17	74,0	151,8	0,10	0,13	8,5	144,6	5,9	1,03
0,57	0,16	96,0	135,4	0,09	0,12	9,8	176,5	5,6	0,98
0,55	0,10	93,8	67,9	0,06	0,07	4,8	104,0	4,6	0,79
0,55	0,08	93,0	61,4	0,04	0,06	4,3	82,5	5,2	0,89

Tabelle 2: Ergebnisse von Immissionsraten-Messungen im Strömungskanal bei definierten Turbulenzintensitäten ($Tu_x = 10-30 \%$) mit Angabe der Parameter \bar{u} und \bar{c} , deren Kombinationen, der effektiven Aufnahme und der Depositionsgeschwindigkeit

\bar{u} [m·s ⁻¹]	Tu_x [%]	\bar{c} [mg·m ⁻³]	t [h]	I [mg·m ⁻² ·d ⁻¹]	$\bar{u} \cdot \bar{c}$ [mg·m ⁻² ·s ⁻¹]	$\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ [mg·m ⁻² ·s ^{-1/2}]	m_A [mg]	m_F [mg]	$\frac{m_A \cdot 100}{m_F}$ [%]	v_d [cm·s ⁻¹]
6,00	10	0,60	96,0	1835,1	3,60	1,47	133,3	5013,2	2,7	3,54
5,96	20	1,56	88,5	4934,1	9,30	3,81	322,5	14058,0	2,4	3,66
5,94	30	0,50	93,5	1331,7	2,97	1,22	94,2	5198,5	1,8	3,08
4,28	30	1,45	96,0	3731,1	6,21	3,00	271,1	10295,0	2,6	2,98
3,97	30	1,24	72,0	2770,9	4,92	2,47	151,0	6635,2	2,3	2,59
3,88	20	1,54	90,0	3606,8	5,98	3,03	245,6	9292,6	2,6	2,71
3,88	10	0,96	96,8	2370,8	3,72	1,89	173,7	6198,3	2,8	2,86
2,15	20	2,09	92,5	3726,6	4,52	3,06	260,9	7818,2	3,3	2,05
1,80	10	0,05	96,5	72,6	0,09	0,07	5,3	175,1	3,0	1,68
1,80	10	0,03	94,5	40,0	0,05	0,04	2,9	102,9	2,8	1,54
1,75	20	0,07	96,0	79,8	0,12	0,09	5,8	237,1	2,5	1,32
1,70	10	0,05	96,0	70,5	0,09	0,07	5,1	164,5	3,1	1,63
1,70	10	0,05	97,0	49,0	0,09	0,07	3,6	166,2	2,2	1,13
1,45	20	0,23	95,8	370,9	0,33	0,28	26,9	644,1	4,2	1,87
1,45	20	0,20	96,0	287,4	0,29	0,24	20,9	561,3	3,7	1,66
1,35	20	0,25	96,0	366,1	0,34	0,29	26,6	653,2	4,1	1,69
1,35	20	0,24	96,0	365,3	0,32	0,28	26,5	627,1	4,2	1,75
1,35	20	0,13	96,0	183,9	0,18	0,15	13,4	339,7	3,9	1,64
1,35	20	0,14	100,5	175,6	0,19	0,16	13,4	382,9	3,5	1,45
1,35	20	0,07	98,0	88,2	0,09	0,08	6,5	186,7	3,5	1,46
1,35	20	0,08	99,3	94,2	0,11	0,09	7,1	216,2	3,3	1,36
1,30	20	0,03	95,0	34,5	0,04	0,03	2,5	74,7	3,4	1,33
1,30	20	0,03	96,0	35,0	0,04	0,03	2,5	75,5	3,3	1,35
1,20	20	0,18	101,0	191,3	0,22	0,20	14,6	439,8	3,3	1,23
1,20	20	0,12	96,3	153,7	0,14	0,13	11,2	279,6	4,0	1,48
1,20	20	0,07	96,0	85,1	0,08	0,07	6,2	162,6	3,8	1,41
1,20	20	0,06	97,8	46,5	0,07	0,06	3,4	142,0	2,4	1,28
1,20	20	0,04	96,0	50,1	0,05	0,04	3,6	92,9	3,9	1,45

Tabelle 2: Fortsetzung

\bar{u}	Tu_x	\bar{c}	t	I	$\bar{u} \cdot \bar{c}$	$\sqrt{\bar{u} \cdot \bar{c}}$	m_A	m_F	$\frac{m_A \cdot 100}{m_F}$	v_d
[$m \cdot s^{-1}$]	[%]	[$mg \cdot m^{-3}$]	[h]	[$mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$]	[$mg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]	[$mg \cdot m^{-\frac{5}{2}} \cdot s^{-\frac{1}{2}}$]	[mg]	[mg]	[%]	[$cm \cdot s^{-1}$]
1,05	30	0,33	117,0	371,3	0,35	0,34	32,9	817,3	4,0	1,30
1,05	30	0,32	96,0	363,3	0,35	0,33	26,4	650,3	4,1	1,31
1,05	30	0,21	92,5	259,4	0,25	0,22	18,2	411,2	4,4	1,43
1,05	20	0,17	95,0	227,5	0,18	0,17	17,9	341,9	5,2	1,55
1,05	20	0,17	100,0	228,6	0,18	0,17	17,3	359,9	4,8	1,56
1,05	20	0,13	98,0	174,2	0,14	0,13	12,9	269,7	4,8	1,55
1,05	20	0,12	98,7	155,0	0,13	0,12	11,6	250,7	4,6	1,50
1,05	30	0,12	91,0	149,3	0,13	0,12	10,3	231,2	4,5	1,44
1,05	30	0,12	93,0	115,9	0,13	0,12	8,2	236,2	3,5	1,12
1,05	10	0,10	96,0	102,7	0,11	0,10	7,5	203,2	3,7	1,19
1,05	10	0,09	96,0	68,8	0,09	0,09	5,0	182,9	2,7	0,90
1,05	20	0,06	98,0	76,3	0,06	0,06	5,7	124,5	4,6	1,47
1,05	20	0,06	93,0	70,8	0,06	0,06	6,5	118,1	5,5	1,36
0,80	20	0,26	69,0	296,0	0,21	0,23	15,5	289,3	5,4	1,32
0,80	20	0,26	96,2	283,5	0,21	0,23	20,6	403,4	5,1	1,26
0,80	30	0,20	92,0	192,4	0,16	0,18	13,4	296,8	4,5	1,11
0,80	30	0,19	94,0	194,3	0,15	0,17	13,8	288,1	4,8	1,18
0,80	20	0,08	52,0	99,6	0,06	0,07	3,9	67,1	5,8	1,44
0,80	20	0,08	97,3	94,0	0,06	0,07	6,9	125,5	5,5	1,36
0,80	20	0,04	95,0	49,0	0,03	0,04	3,5	61,3	5,7	1,42
0,75	10	0,11	96,0	95,8	0,08	0,09	6,9	159,7	4,4	1,01
0,75	10	0,09	96,0	75,7	0,07	0,08	5,5	130,6	4,2	0,97
0,75	20	0,04	96,0	34,4	0,03	0,03	2,5	58,1	4,3	1,00
0,75	20	0,04	101,0	29,8	0,03	0,03	2,3	61,1	3,7	0,86
0,50	20	0,06	98,5	48,3	0,03	0,04	3,6	59,6	6,0	0,93
0,50	20	0,05	97,5	29,8	0,02	0,03	2,2	49,1	4,5	0,69
0,50	10	0,04	72,0	29,7	0,02	0,03	1,6	29,0	5,6	0,86
0,50	10	0,03	75,0	14,5	0,02	0,02	0,8	22,7	3,6	0,56

Tabelle 4: Ergebnisse von IRMA-Messungen im Freiland mit Erfassung der Parameter \bar{u} und \bar{c} dazu Angabe der Kombination $\bar{u} \cdot \bar{c}$, der effektiven Aufnahme und der Depositionsgeschwindigkeit

\bar{u} [m · s ⁻¹]	\bar{c} [mg · m ⁻³]	I [mg · m ⁻² · d ⁻¹]	$\bar{u} \cdot \bar{c}$ [mg · m ⁻² · s ⁻¹]	v_d [cm · s ⁻¹]	$\frac{m_A \cdot 100}{m_F}$ [%]
2,12	0,05	72,0	0,11	1,67	2,55
2,05	0,17	325,0	0,35	2,21	3,50
1,97	0,06	129,4	0,12	2,50	4,11
1,79	0,07	85,7	0,13	1,42	2,57
1,74	0,06	113,9	0,10	2,20	4,10
1,70	0,05	70,9	0,08	1,64	3,13
1,67	0,06	55,6	0,10	1,07	2,08
1,51	0,07	65,4	0,11	1,08	2,32
1,49	0,20	245,7	0,31	1,42	3,10
1,46	0,05	59,1	0,07	1,37	3,04
1,45	0,09	82,2	0,13	1,06	2,36
1,45	0,11	136,2	0,16	1,43	3,21
1,44	0,05	55,5	0,07	1,29	2,89
1,41	0,03	38,6	0,04	1,49	3,43
1,39	0,03	48,4	0,04	1,87	4,36
1,39	0,21	237,2	0,29	1,31	3,05
1,34	0,06	108,0	0,08	2,08	5,04
1,33	0,09	111,5	0,12	1,43	3,50
1,26	0,05	77,3	0,06	1,79	4,61
1,26	0,07	42,9	0,08	0,71	1,83
1,25	0,09	68,8	0,11	0,89	2,30
1,25	0,09	94,7	0,11	1,22	3,16
1,24	0,04	39,4	0,05	1,14	2,98
1,19	0,06	46,3	0,07	0,89	2,43
1,15	0,09	58,1	0,10	0,75	2,11
1,14	0,09	55,7	0,10	0,72	2,04
1,13	0,10	111,9	0,11	1,30	3,72
1,13	0,06	79,3	0,07	1,53	4,39
1,12	0,07	43,3	0,08	0,72	2,07

Tabelle 4: Fortsetzung

\bar{u} [m · s ⁻¹]	\bar{c} [mg · m ⁻³]	I [mg · m ⁻² · d ⁻¹]	$\bar{u} \cdot \bar{c}$ [mg · m ⁻² · s ⁻¹]	v_d [cm · s ⁻¹]	$\frac{m_A \cdot 100}{m_F}$ [%]
1,11	0,13	85,7	0,11	0,76	2,23
1,11	0,07	102,7	0,08	1,70	4,96
1,10	0,08	84,0	0,09	1,22	3,58
1,09	0,07	93,8	0,08	1,55	4,62
1,09	0,10	71,0	0,11	0,82	2,45
1,09	0,08	88,3	0,09	1,28	3,80
1,07	0,06	45,6	0,06	0,88	2,67
1,04	0,06	44,3	0,06	0,86	2,67
1,04	0,05	43,2	0,05	1,00	3,12
1,03	0,03	39,7	0,03	1,53	4,82
1,01	0,09	53,4	0,10	0,69	2,21
1,01	0,06	47,2	0,06	0,91	2,92
0,99	0,04	58,7	0,04	1,70	5,57
0,98	0,04	38,0	0,04	1,10	3,64
0,96	0,07	60,0	0,07	0,99	3,35
0,95	0,06	57,9	0,06	1,12	3,81
0,93	0,08	40,2	0,07	0,58	2,03
0,93	0,03	46,1	0,03	1,78	6,20
0,89	0,08	59,5	0,07	0,86	3,14
0,87	0,08	53,3	0,07	0,77	2,88
0,85	0,08	80,8	0,07	1,17	4,46
0,85	0,10	91,6	0,09	1,06	4,05
0,82	0,08	92,2	0,07	1,33	5,28
0,81	0,11	61,0	0,09	0,64	2,57
0,77	0,13	77,2	0,10	0,69	2,90
0,76	0,13	53,7	0,10	0,48	2,04
0,75	0,03	38,6	0,02	1,49	6,44
0,72	0,04	41,5	0,03	1,20	5,41
0,67	0,08	70,2	0,05	1,02	4,92

Tabelle 5:

Ergebnisse von Immissionsraten-Messungen in der Begasungskammer bei $\bar{u} \approx 0$ und verschiedenen SO_2 -Konzentrationen \bar{c} mit Angabe der Depositionsgeschwindigkeit

\bar{u}	\bar{c}	I	v_d
[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	[$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$]	[$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$]	[$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]
0	0,88	347,6	0,46
0	0,88	314,8	0,41
0	0,74	231,9	0,36
0	0,74	247,5	0,39
0	0,43	177,2	0,48
0	0,43	150,2	0,40
0	0,36	93,8	0,30
0	0,36	120,4	0,39
0	0,17	58,4	0,40
0	0,17	62,1	0,42
0	0,08	28,3	0,41
0	0,08	25,6	0,37

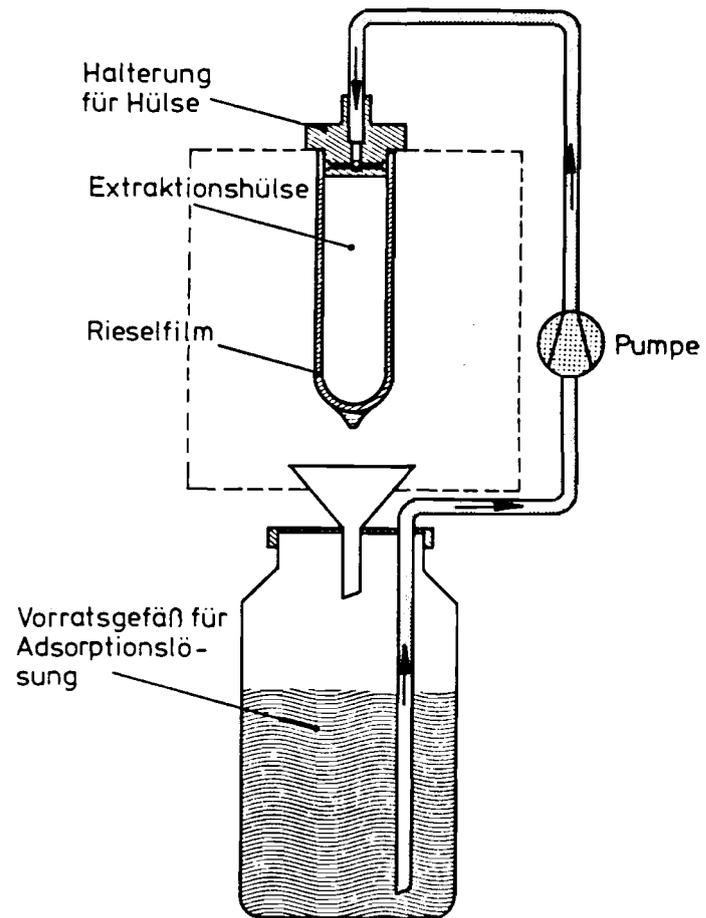


Abb. 1:
Schematische Darstellung der Funktionsweise der IRMA
(Immissions-Raten-Meß-Apparatur)

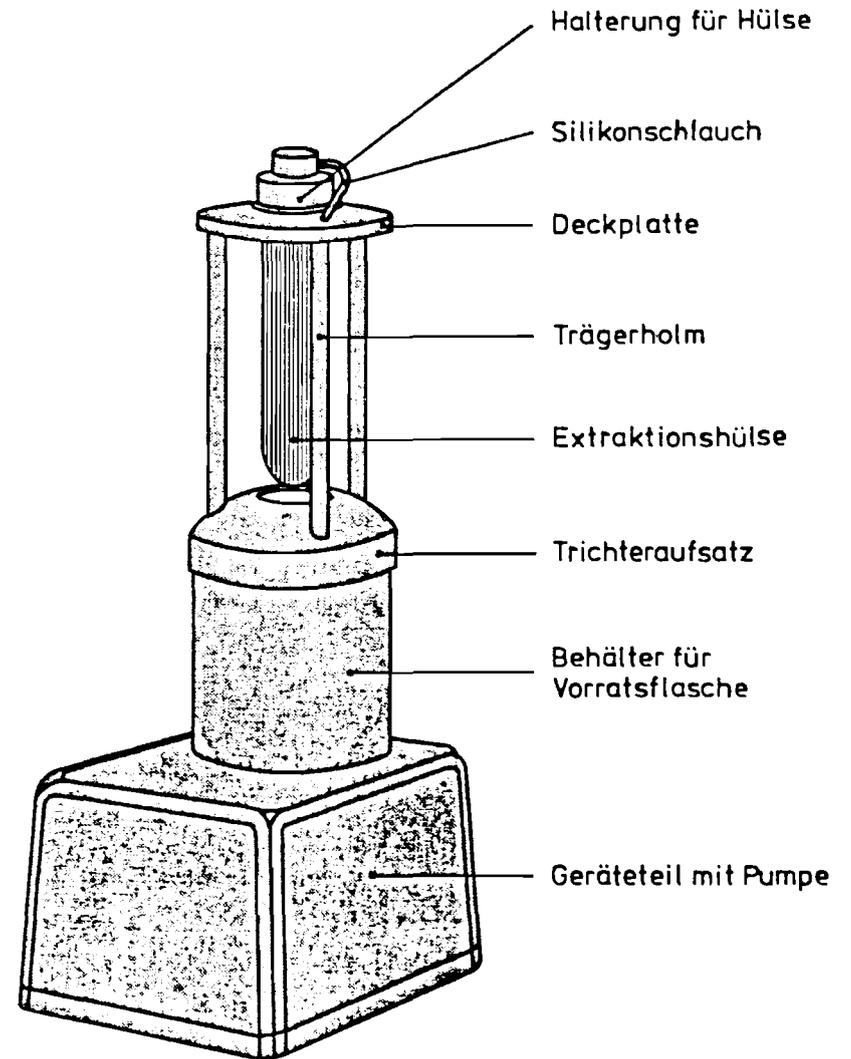


Abb. 2:
Technische Ausführung der IRMA zur netz-unabhängigen Aufstellung im Freiland

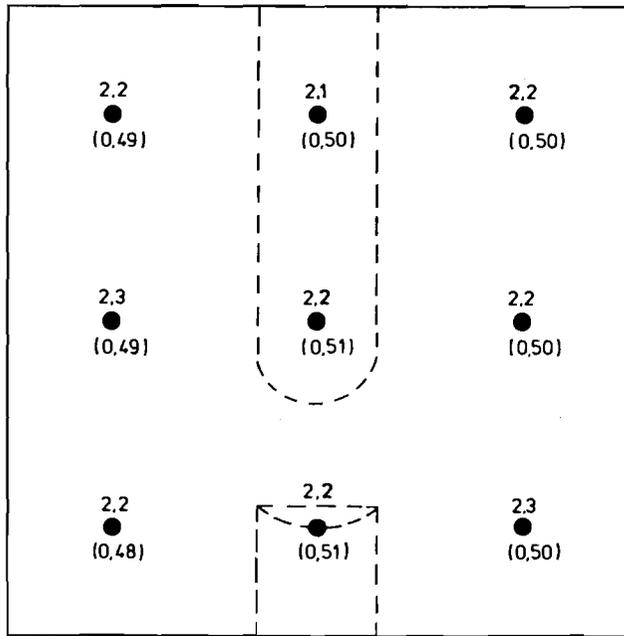


Abb. 4: Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilung über dem Kanalquerschnitt beispielhaft für $\bar{u} = 2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\bar{c} = 0,5 \text{ mg SO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$

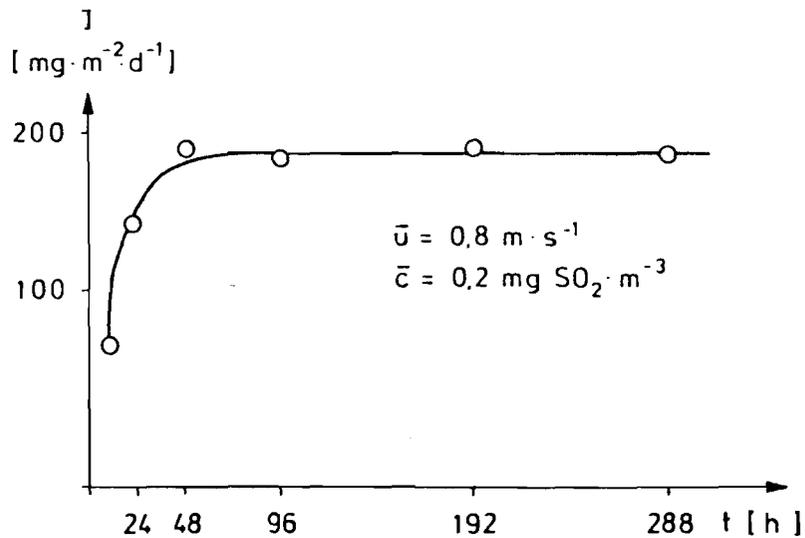


Abb. 5: Gemessene Immissionsraten als Funktion der Expositionsdauer bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und SO_2 -Konzentration $\bar{c} = 0,2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$

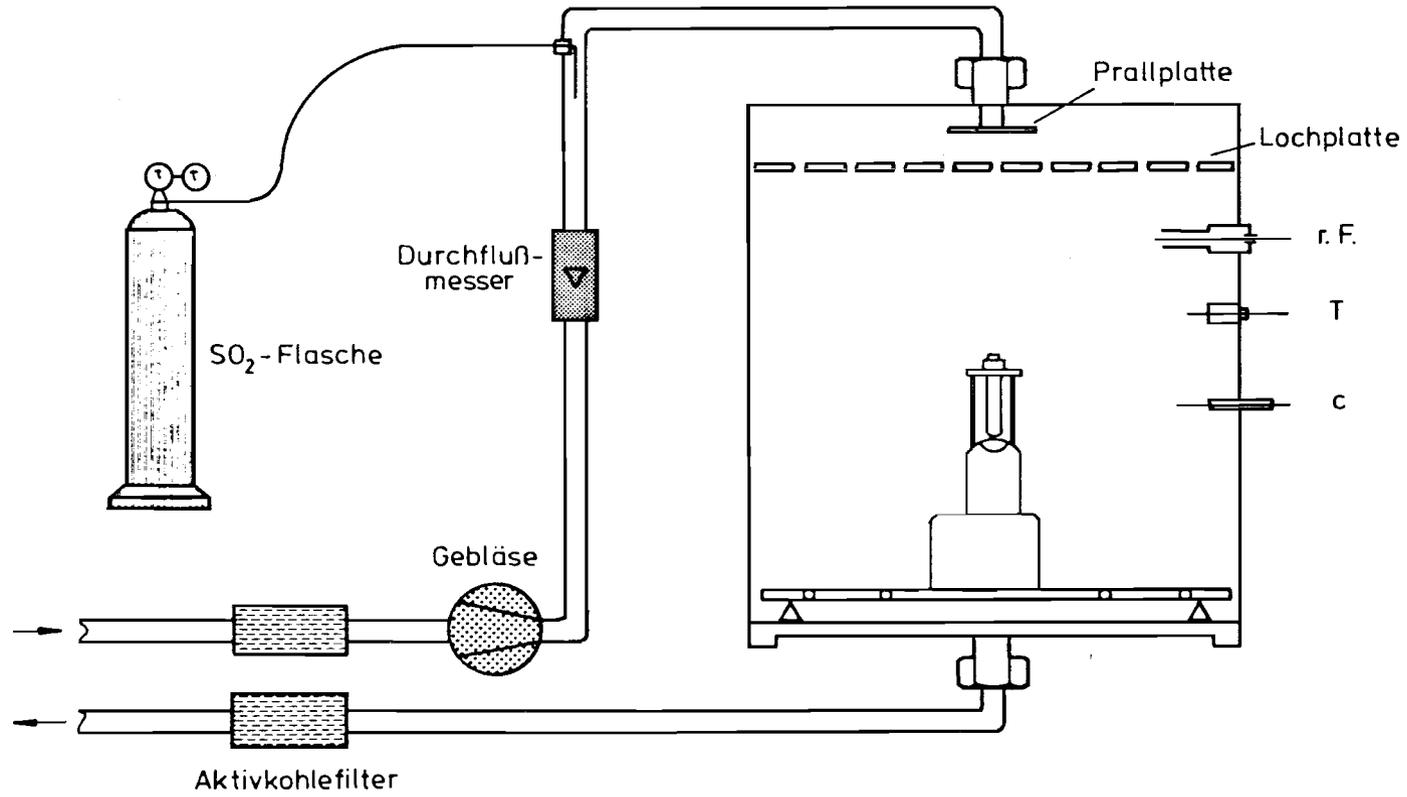


Abb. 6:
 Schematische Darstellung der Begasungskammer für Strömungsgeschwindigkeiten $\bar{u} \approx 0$ bei
 variierender Konzentrationseinstellung

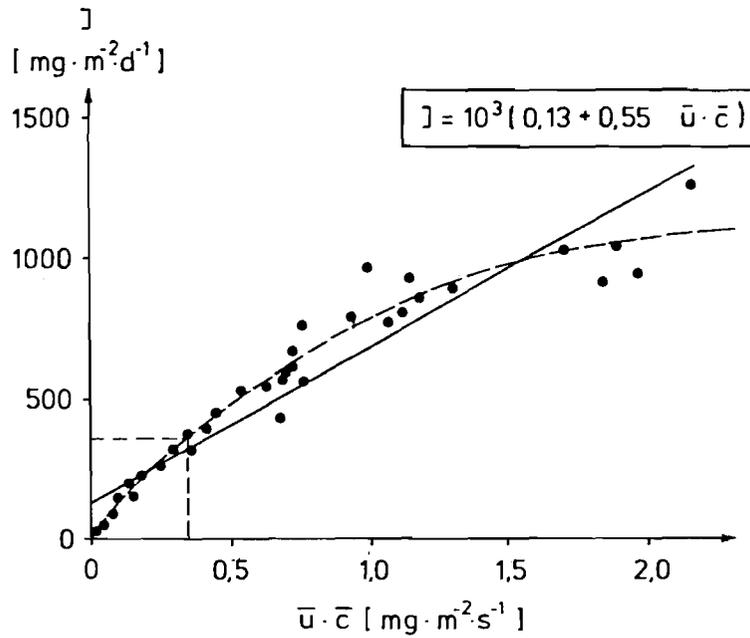


Abb. 7: Immissionsraten, im Strömungskanal gemessen, als Funktion des Produktes $\bar{u} \cdot \bar{c}$ mit berechneter Regressionsgeraden

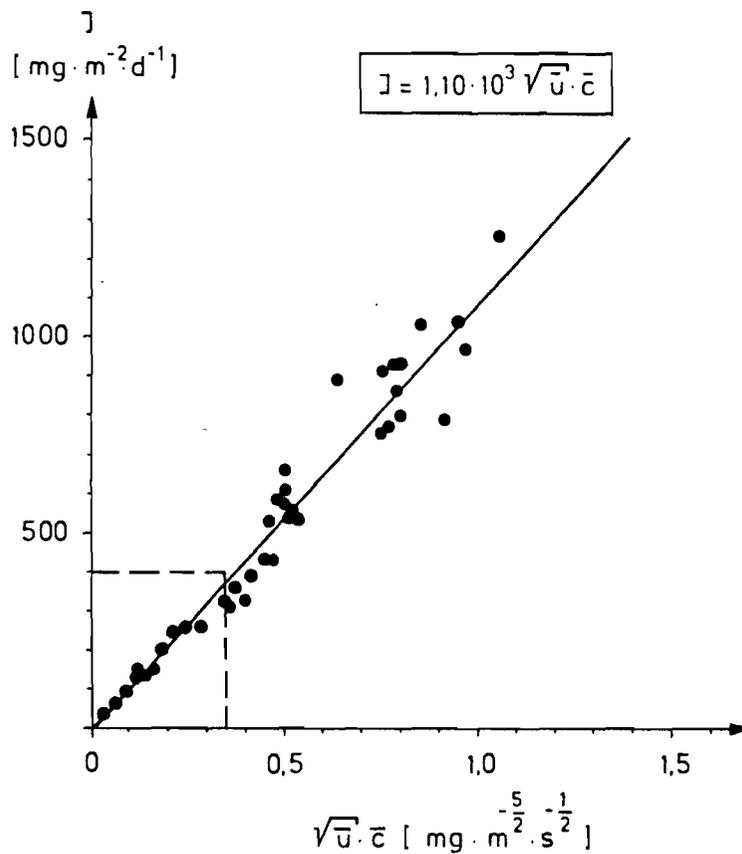


Abb. 8: Immissionsraten, im Strömungskanal gemessen, als Funktion des Produktes $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ mit berechneter Regressionsgeraden

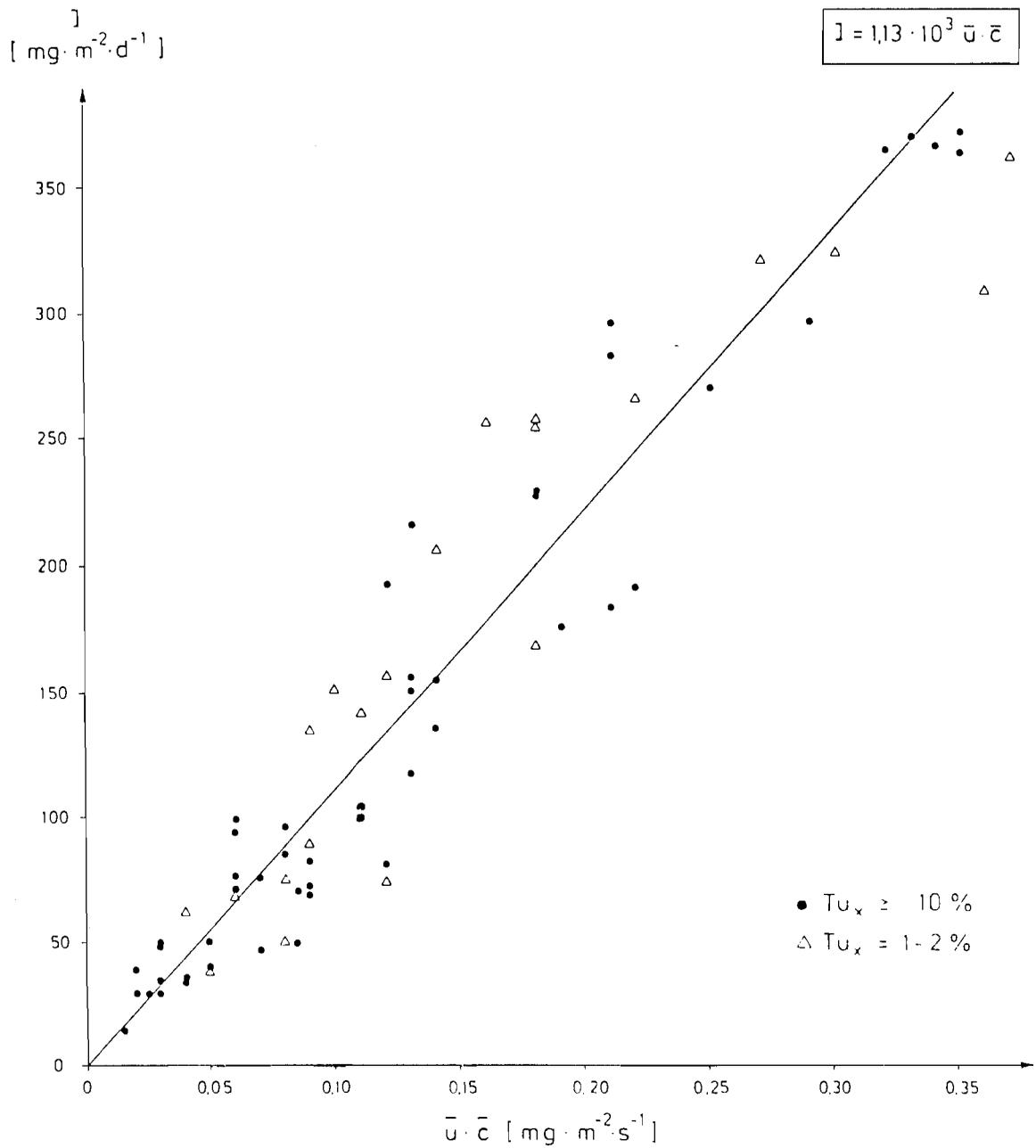


Abb. 9: Immissionsraten, im Strömungskanal gemessen, als Funktion des Produkts $\bar{u} \cdot \bar{c}$ für den Bereich $0 \leq \bar{u} \cdot \bar{c} \leq 0,35$ (Ausschnitt aus Abb. 7) mit berechneter Regressionsgeraden

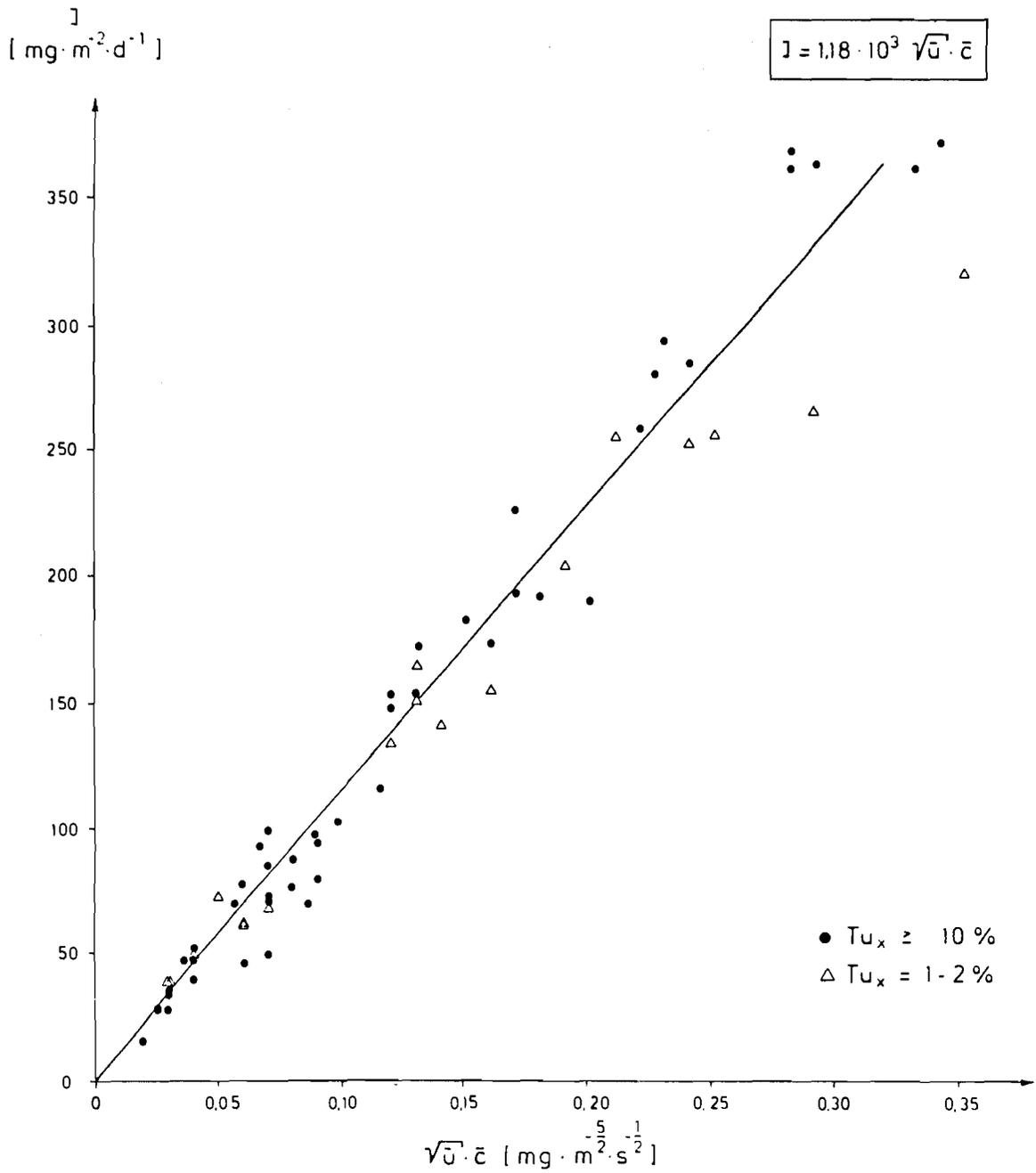


Abb. 10: Immissionsraten, im Strömungskanal gemessen, als Funktion des Produkts $\sqrt{\bar{u}} \cdot \bar{c}$ für den Bereich $0 \leq \bar{u} \cdot \bar{c} \leq 0,35$ (Ausschnitt aus Abb. 8) mit berechneter Regressionsgeraden

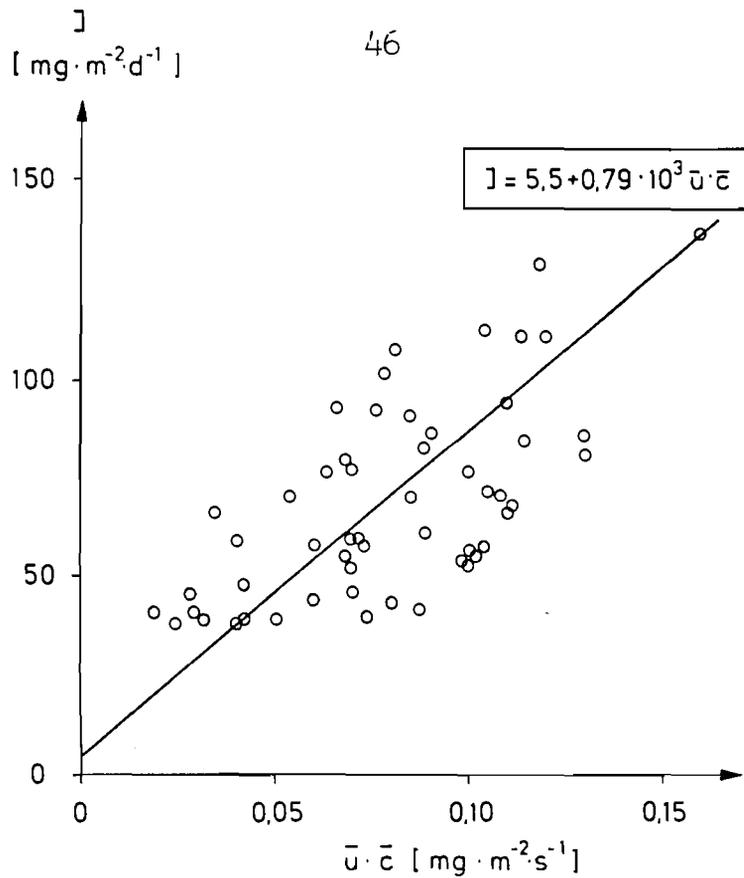


Abb. 11: Immissionsraten, im Freiland gemessen, als Funktion des Produkts $\bar{u} \cdot \bar{c}$ mit berechneter Regressionsgeraden

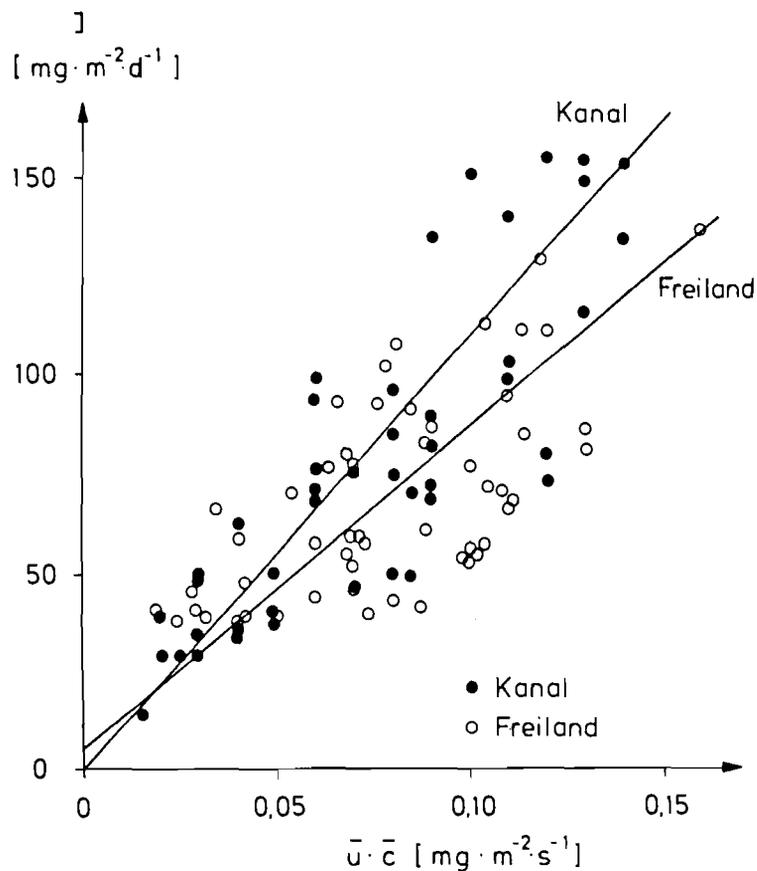


Abb. 12: Vergleich gemessener Immissionsraten aus Kanal und Freiland als Funktion des Produkts $\bar{u} \cdot \bar{c}$ mit berechneten Regressionsgeraden (Kombination der Abb. 9 und 11)

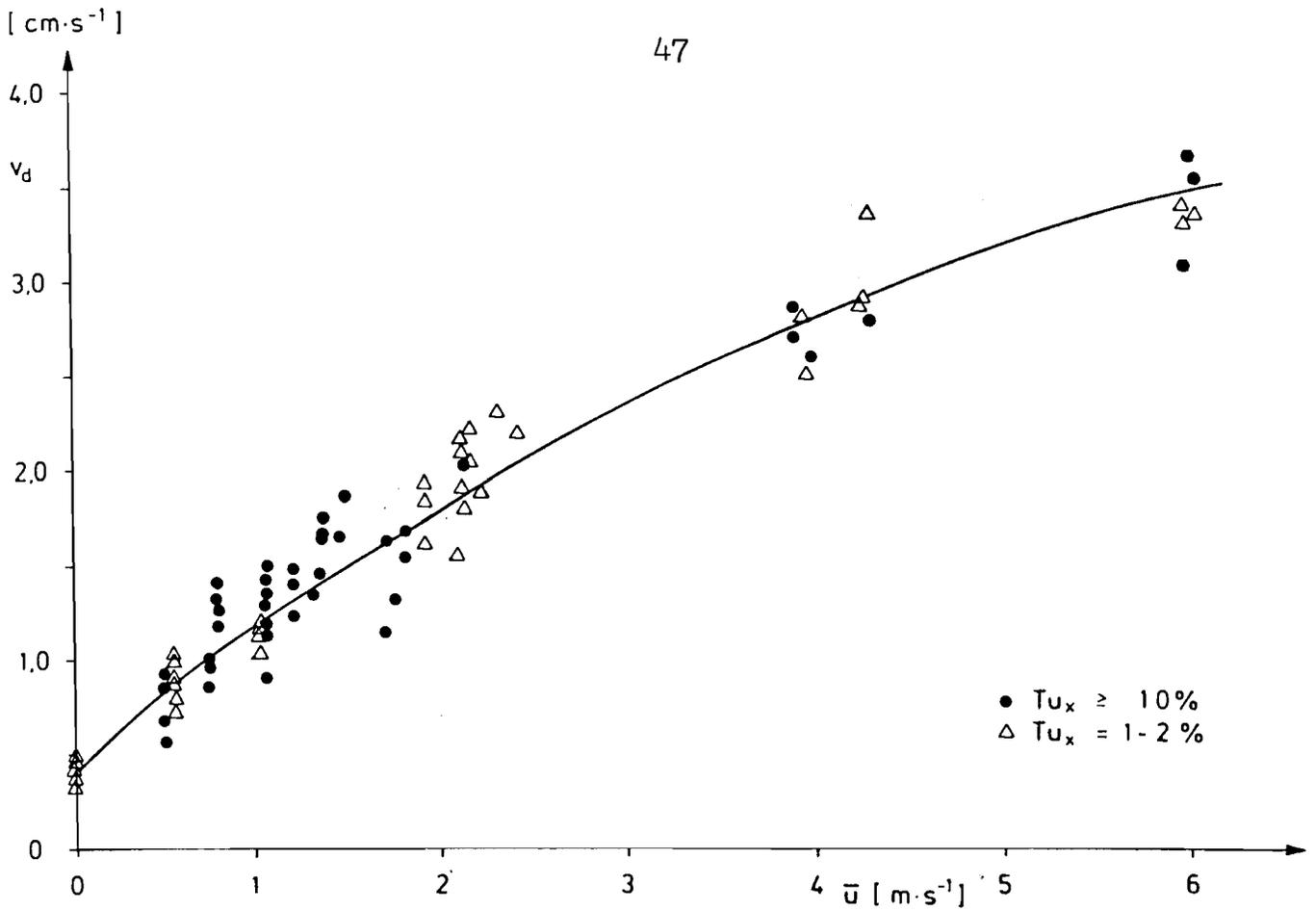


Abb. 13: Depositonsgeschwindigkeit v_d , aus Meßergebnissen im Strömungskanal berechnet, als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} für den Bereich $0 \leq \bar{u} \leq 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

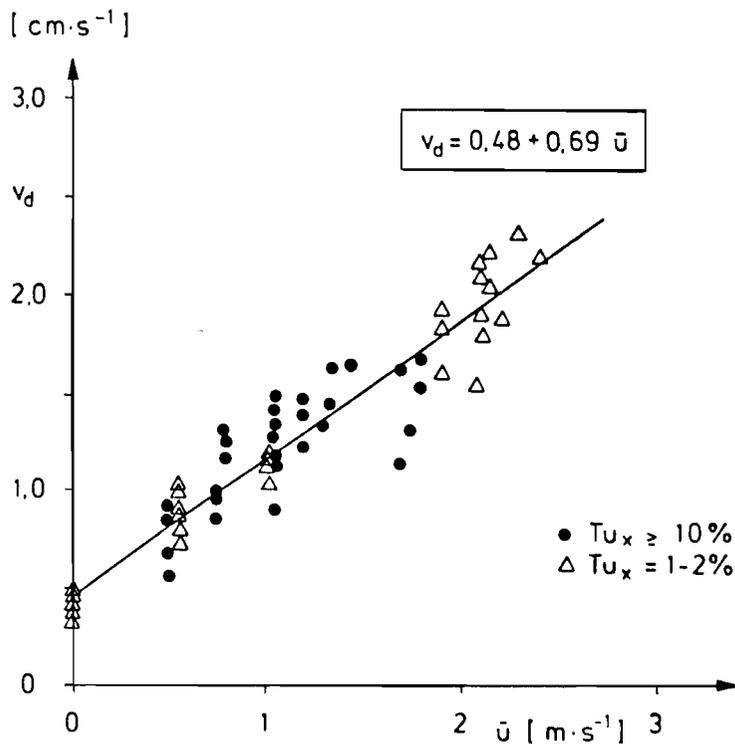


Abb. 14: Depositionsgeschwindigkeit v_d , aus Meßergebnissen im Strömungskanal berechnet, als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} für den Bereich $0 \leq \bar{u} \leq 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mit berechneter Regressionsgeraden

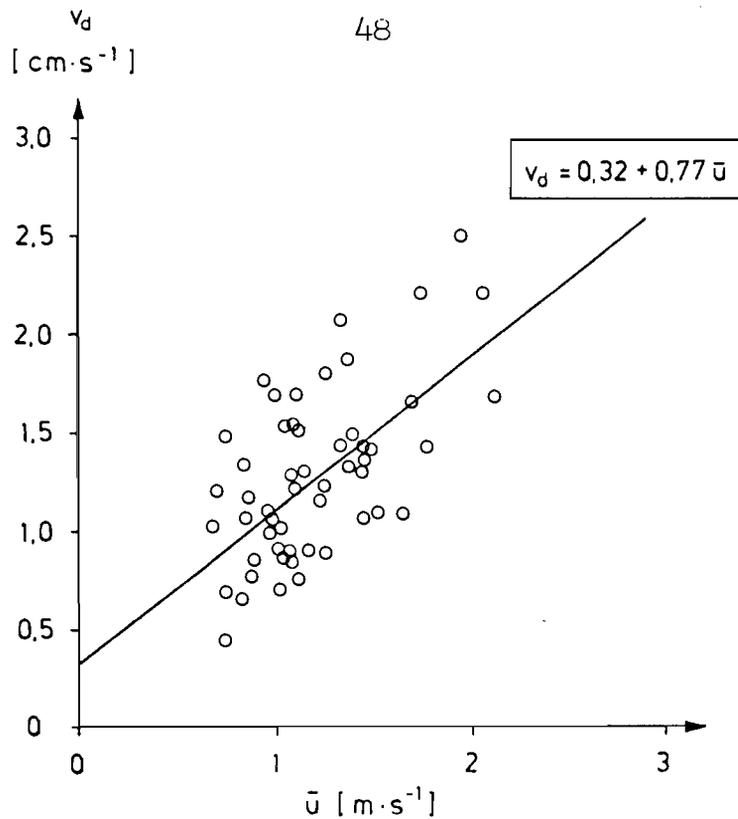


Abb. 15: Depositionsgeschwindigkeit v_d , aus Meßergebnissen im Freiland berechnet, als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} mit berechneter Regressionsgeraden

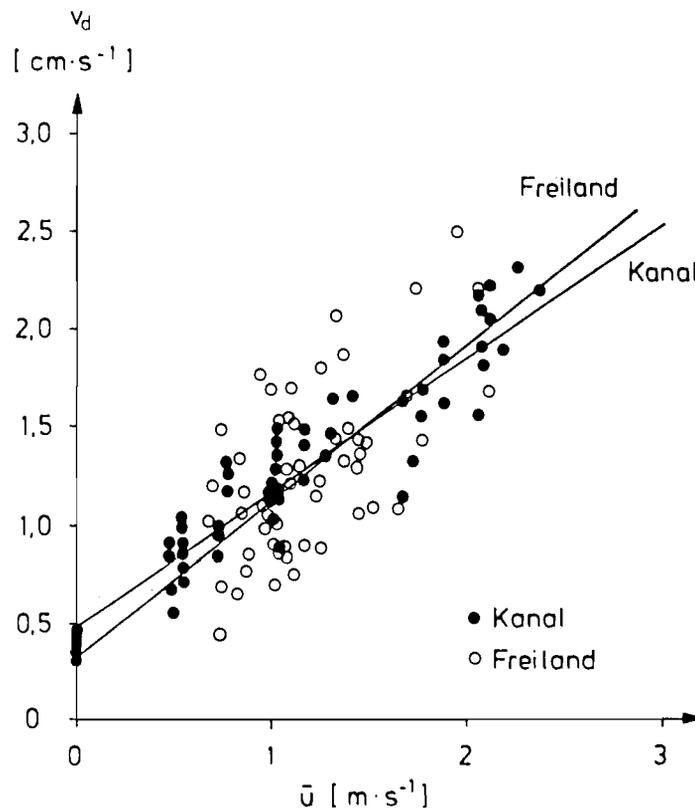


Abb. 16: Vergleich der aus Kanal- und Freilandmessungen ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit \bar{u} mit berechneter Regressionsgeraden (Kombination der Abb. 14 und 15)

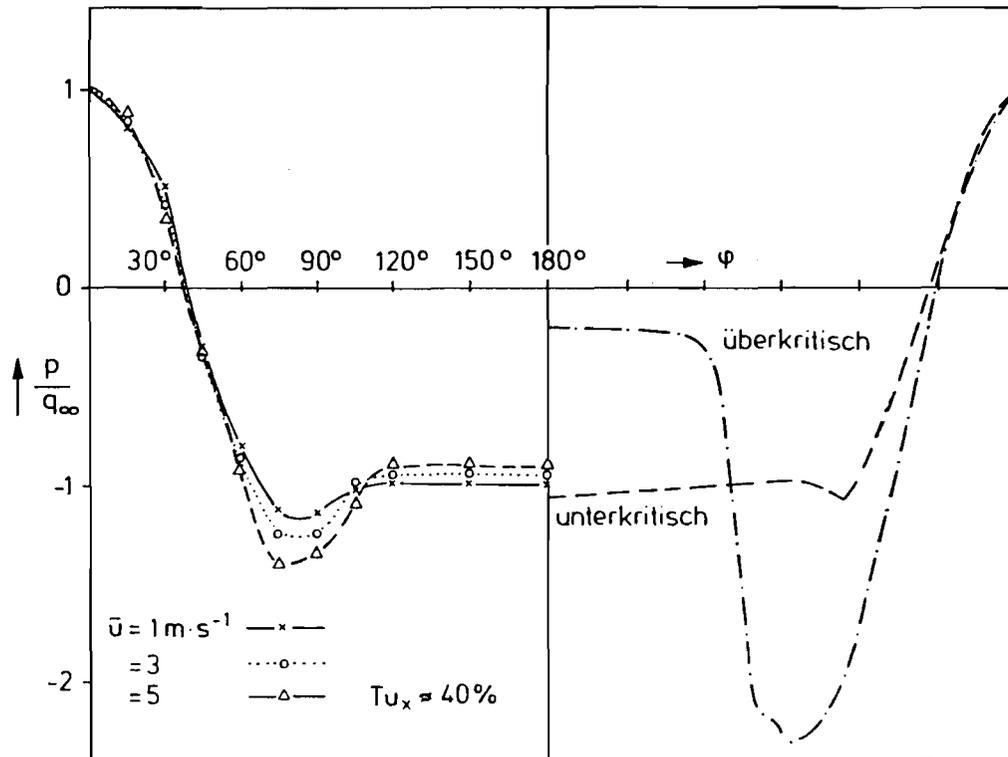


Abb. 17: Druckverteilung an der IRMA-Hülse bezogen auf den Staudruck als Funktion des Umfangwinkels ψ im Vergleich zu Messungen an Zylindern nach O. FLACHSBART [19] für zwei charakteristische Strömungszustände (überkritisch/unterkritisch)

Berichte der

LANDESANSTALT FÜR IMMISSIONSSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, ESSEN

- LIS-Berichte -

Die LIS-Berichte haben spezielle Themen aus den wissenschaftlichen Untersuchungen der LIS zum Gegenstand. Die in der Regel umfangreichen Texte sind nur in begrenzter Auflage vorrätig. Einzelexemplare werden Interessenten auf Anforderung kostenlos zur Verfügung gestellt.

Anforderungen sind zu richten an die

Landesanstalt für Immissionsschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6
4300 E s s e n 1

- Berichte-Nr. 1: KRAUTSCHEID, S. und P. NEUTZ:
(vergriffen) LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen.
- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems - (1978).
- Berichte-Nr. 2: BUCK, M.:
(vergriffen) Die Bedeutung unterschiedlicher Randbedingungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität (1978).
- Berichte-Nr. 3: SCHEICH, G.:
(vergriffen) Entwicklung und Anwendung von Ausbreitungsmodellen und Luftüberwachungsprogramme in den USA (1979).
- Berichte-Nr. 4: SPLITTGERBER, H. und K.H. WIETLAKE:
(vergriffen) Ermittlung der Luftschalldämmung von Bauelementen für Industriebauten am Bau (1979).
- Berichte-Nr. 5: SPLITTGERBER, H.:
(vergriffen) Zur Problematik der Meßgrößen und Meßwerte bei Erschütterungsimmissionen (1979).
- Berichte-Nr. 6: STRAUCH, H. und K.H. GOLDBERG:
(vergriffen) Ermittlung der Dämmwirkung von Dachentlüftern für Werkshallen im Einbauzustand unter Berücksichtigung der baulichen Nebenwege (1979).
- Berichte-Nr. 7: KRAUSE, G.M.H., B. PRINZ UND K. ADAMEK:
(vergriffen) Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Falschfarbenfotografie für die Aufdeckung und Dokumentation von Immissionswirkungen auf Pflanzen (1980).
- Berichte-Nr. 8: WIETLAKE, K.H.:
Erschütterungsminderung durch "Direktabfederung" von Schabotte-Schmiedehämmern (1980).
- Berichte-Nr. 9: STRAUCH, H.:
(vergriffen) Methoden zur Aufstellung von Lärminderungsplänen (1980).
- Berichte-Nr. 10: HILLEN, R.:
Untersuchung zur flächenbezogenen Geräuschbelastungs-Kennzeichnung -Ziele, Methodik, Ergebnisse- (1980).
- Berichte-Nr. 11: MANNS, H., H. GIES und W. STRAMPLAT:
(vergriffen) Erprobung des Staub-Immissionsmeßgerätes FH62I für die kontinuierliche Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in Luft (1980).
- Berichte-Nr. 12: GIEBEL, J.:
(vergriffen) Verhalten und Eigenschaften atmosphärischer Sperrschichten (1981).
- Berichte-Nr. 13: BRÖKER, G., H. GLIWA und E. MEURISCH:
Abscheidegrade von biologisch- und chemisch-aktiven Aggregaten zur Desodorierung osmogener Abluft von Tierkörperbeseitigungsanlagen (1981).

- Berichte-Nr. 14: BRANDT, C.J.:
(vergriffen) Untersuchungen über Wirkungen von Fluorwasserstoff auf Lolium Multiflorum und andere Nutzpflanzen (1981).
- Berichte-Nr. 15: WELZEL, K. und H.D. WINKLER:
(vergriffen) Emission und interner Kreislauf von Thallium bei einem Drehrohrofen mit Schwebegaswärmeaustauscher zur Herstellung von Portlandzementklinker unter Einsatz von Purpurerz als Eisenträger. - 1. Bericht - (1981).
- Berichte-Nr. 16: PRINZ, B.:
(In Vorbereitung) Umweltpolitik in der VR China und technologische Entwicklung.
- Berichte-Nr. 17: BRÖKER, G. und H. GLIWA:
Untersuchungen zu den Dioxin-Emissionen aus den kommunalen Hausmüllverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 18: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Die Entwicklung der Immissionsbelastung in den letzten 15 Jahren in der Rhein-Ruhr-Region (1982).
- Berichte-Nr. 19: PFEFFER, H.U.:
Das Telemetrische Echtzeit-Mehrkomponenten-Erfassungssystem TEMES zur Immissionsüberwachung in Nordrhein-Westfalen (1982).
- Berichte-Nr. 20: BACH, R.W.:
Über Schätzfunktionen zur Bestimmung hoher Quantile der Grundgesamtheit luftverunreinigender Schadstoffkonzentrationen aus Stichproben (1982).
- Berichte-Nr. 21: STRAUCH, H.:
Hinweise zur Anwendung flächenbezogener Schalleistungspegel (1982).
- Berichte-Nr. 22: SPLITTGERBER, H.:
Verfahren zur Auswertung von Erschütterungsmessungen und zur Beurteilung von Erschütterungsimmisionen (1982).
- Berichte-Nr. 23: KRAUSE, G.M.H.:
Immissionswirkungen auf Pflanzen - Forschungsschwerpunkte in den Vereinigten Staaten von Amerika. Bericht über eine Reise in die USA und die Teilnahme am 13. Air Pollution Workshop in Ithaca, N. Y., in der Zeit vom 02.05.-24.05.1981 (1982).
- Berichte-Nr. 24: KÜLSKE, S.:
Analyse der Periode sehr hoher lokaler Schadstoffbelastungen im Ruhrgebiet vom 15.01.1982 bis 20.01.1982 (1982).
- Berichte-Nr. 25: VAN HAUT, H. und G.H.M. KRAUSE:
Wirkungen von Fluorwasserstoff-Immisionen auf die Vegetation (1982).
- Berichte-Nr. 26: KOCH, E., V. THIELE, J. GIEBEL, H. STRAUCH und P. ALTENBECK:
Empfehlungen für die problemgerechte Erstellung von Immissionsschutzgutachten in Bauleitplanverfahren (1982).
- Berichte-Nr. 27: MANNS, H., H. GIES und G. NITZ:
(vergriffen) Verbesserung der Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit von Messungen zur Ermittlung aromatischer Kohlenwasserstoffe in der Außenluft (1982).
- Berichte-Nr. 28: PRINZ, B., G.M.H. KRAUSE und H. STRATMANN:
Vorläufiger Bericht der Landesanstalt für Immissionsschutz über Untersuchungen zur Aufklärung der Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland (1982).
- Berichte-Nr. 29: GIEBEL, J.:
Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Sperrschichthöhen und Immissionsbelastung (1983).
- Berichte-Nr. 30: MANNS, H. und H. GIES:
Ergebnisse der Laborprüfung und Optimierung des meßtechnischen Teiles der Ozon-Meßplätze im Meßnetz LIMES-TEMES (1983).

- Berichte-Nr. 31: BEINE, H., R. SCHMIDT UND M. BUCK:
Ein Meßverfahren zur Bestimmung des Schwefelsäure- und Sulfatgehaltes in Luft.
(1983).
- Berichte-Nr. 32: BEIER, R. und P. BRUCKMANN:
Messung und Analyse von Kohlenwasserstoff-Profilen im Rhein-Ruhrgebiet (1983).
- Berichte-Nr. 33: FRONZ, W.:
Ermittlung von Verkehrsgeräusch-Immissionen
- zum tageszeitlichen Verlauf des Geräuschpegels und des Verkehrsaufkommens an
Bundes- und Sammelstraßen (1983).
- Berichte-Nr. 34: BRÖKER, G.:
Zusammenfassende Darstellung der Emissionssituation in Nordrhein-Westfalen und
der Bundesrepublik Deutschland für Stickstoffoxide (1983).
- Berichte-Nr. 35: PIORR, D. und R. HILLEN:
Veränderung akustischer Kenngrößen infolge der nächtlichen Abschaltung von
Lichtsignalanlagen (1983).
- Berichte-Nr. 36: BUCK, M., H. IXFELD und K. ELLERMANN:
Benzol-Immissionsmessungen im Lande Nordrhein-Westfalen (1983).

Anmerkung:

Die LIS-Berichte - auch die vergriffenen - stehen Interessenten in vielen Universitäts- und Hochschulbibliotheken zur Ausleihe bzw. Einsichtnahme zur Verfügung.