

# Nr.1

Fernüberwachung mit LIDAR

Herausgeber

Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes NW, Essen

1978

LIDAR zur Fernüberwachung von Staubemissionen

- Nachweis zur Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems -

Dr. S. Krautscheid und P. Neutz

Landesanstalt für Immissionsschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen  
Bibliothek

# LIDAR ZUR FERNÜBERWACHUNG VON STAUBEMISSIONEN

- Nachweis der Kalibrierfähigkeit eines LIDAR-Systems -

Dr. S. Krautscheid und P. Neutz

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

Im vorliegenden Bericht wird die Erprobung einer mobilen LIDAR-Anlage beschrieben.

Neben Aufbau und Meßprinzip der zur Fernüberwachung von Staubemissionen konzipierten Anlage werden Ergebnisse von Testmessungen dargestellt, die an Rauchfahnen von zwei Steinkohlefeuerungen ermittelt wurden. Eine Kalibrierung der Anlage wurde über gleichzeitig durchgeführte manuelle, gravimetrische Vergleichsmessungen nach der VDI-Richtlinie 2066 vorgenommen. Außerdem wurde die Querempfindlichkeit des Verfahrens gegenüber Wasserdampf in der Rauchfahne sowie der Einfluß einer schnell wechselnden Untergrundbelastung der Atmosphäre auf das Meßergebnis untersucht. Die aus den ermittelten Verfahrenskenngrößen und den anzusetzenden Randbedingungen resultierenden Einsatzmöglichkeiten der erprobten LIDAR-Anlage werden dargestellt.

## 1. E i n l e i t u n g

Die "Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionschutzgesetz - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)" sieht für eine Vielzahl von Anlagenarten Emissionsbegrenzungen vor. Um die Einhaltung von Vorschriften und Auflagen zu sichern, sieht der Gesetzgeber auch die **Ü b e r w a c h u n g v o n E m i s s i o n e n** vor. Für diese Überwachung muß den hiermit beauftragten Behörden ein entsprechendes Überwachungssystem zur Verfügung stehen. Es geht dabei um die Bereitstellung von Meßverfahren sowohl für die ausreichend genaue Feststellung

von Situationen und Tatbeständen durch Einzelmessungen als auch für die Dauerüberwachung.

Die laufende Überwachung der Emissionen relevanter Quellen mit geeigneten, kontinuierlich-registrierenden Meßeinrichtungen wäre sicher die wirksamste Kontrolle. Jedoch stehen erst für wenige Emissionskomponenten geeignete, einfach zu wartende Betriebsgeräte - und hier auch nur für bestimmte Anlagentypen - zur Verfügung. Des weiteren sind es die relativ hohen Kosten (Anschaffungskosten, Einrichten der Meßstelle, Kalibrierung), die den breiten Einsatz solcher Dauerüberwachungsgeräte beschränken. In Ziffer 2.8.4. der TA-Luft sind die Anlagenarten aufgeführt, für die eine registrierende Dauerüberwachung vorgeschrieben wird. Es sind dies hauptsächlich "Großemittenten" und solche mit besonders toxischen Emissionen.

Abgesehen von diesen Ausnahmen werden die Emissionen von Anlagen im Rahmen der gesetzlichen Vorschriften im wesentlichen bei den Abnahmemessungen nach Inbetriebnahme einer Anlage, bei den in bestimmten Zeitabständen durchzuführenden Kontrollmessungen oder aus besonderem Anlaß (vergl. § 26 BImSchG) ermittelt.

Bei der Durchführung dieser Messungen ist die Aufsichtsbehörde auf die Mithilfe von Meßinstituten angewiesen. Schon aus rein organisatorischen Gründen ist hierbei eine kurzfristige, stichprobenartige Kontrolle kaum möglich. Auf die Schnelligkeit bei der Durchführung der Stichprobenüberwachung kommt es jedoch wesentlich an, um den ggf. zu beanstandenden Emissionszustand einer Anlage mit Maß und Zahl festlegen zu können. Der Nachteil der Notwendigkeit, hierzu in die Betriebe hineingehen zu müssen, liegt auf der Hand. Es gilt deshalb, Meßsysteme zu entwickeln, mit deren Hilfe die Emissionen einer Anlage auch von einem Standort außerhalb dieser Anlage bestimmt werden können.

Im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit solcher "Fernmeßsysteme" sind zwei grundsätzliche Forderungen zu stellen:

- a) Sie sollen über eine ausreichende Entfernung zur Quelle einen beweiskräftigen Meßwert zur Beurteilung der aktuellen, von der augenblicklichen Betriebsfahrweise abhängigen Emissionssituation bei dieser Quelle liefern,
  - b) diese Messungen sollen vor allem auch nachts möglich sein.
- Ein mögliches Meßprinzip zur Realisierung eines derartigen Fern-

Überwachungssystem stellt das LASER-LIDAR dar.

Mit LIDAR, der Abkürzung zu "Light detection and ranging", bezeichnet man ein dem Mikrowellenradar ähnliches Meßprinzip, bei welchem anstelle von Mikrowellen Licht verwendet wird. Einfache LIDAR-Anlagen befinden sich schon seit langem in der Anwendung. Sie werden hauptsächlich zur Sichtweitenmessung und zur Vermessung von Wolkenhöhen verwendet.

Um ein solches System in der Emissionsüberwachung wirkungsvoll einsetzen zu können, sind neben den meßtechnischen einige grundsätzliche technische Anforderungen zu stellen, z. B. Mobilität, Netzunabhängigkeit, Langzeitstabilität der optischen und elektronischen Systeme sowie Möglichkeiten zur Registrierung im Hinblick auf den erforderlichen Belegcharakter der Meßergebnisse.

Die meßtechnischen Anforderungen orientieren sich an den vom Gesetzgeber vorgegebenen, zu überwachenden Emissionsgrenzwerten, wobei die möglichen Störeinflüsse, wie sie schon bei der konventionellen Meßtechnik mit optischen Verfahren auftreten, bei der Applikation derartiger Anlagen berücksichtigt werden müssen. Die meisten zu überwachenden Grenzwerte sind bisher als Konzentrationswerte ausgewiesen. Es muß also möglich sein, mit einer für diese Überwachungstätigkeit einzusetzenden LIDAR-Anlage Staubmasenkonzentrationen zu ermitteln.

Neben den zweifelsohne hohen Anforderungen für den Einsatz von LIDAR-Anlagen im Rahmen der Emissionsgrenzwertüberwachung sind im Hinblick auf andere Überwachungsaufgaben auch geringere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit solcher Systeme denkbar, z. B. bei der Überprüfung, ob eine Abgasreinigungsanlage in Betrieb ist oder nicht.

Zur Klärung der Frage, wo zwischen den beiden vorgenannten Extremen die Möglichkeiten des LIDAR beim derzeitigen Stand der Anwendungstechnik einzuordnen sind, soll dieser Bericht beitragen.

## 2. B E S C H R E I B U N G D E R L I D A R - A N L A G E

Das LIDAR-System besteht im wesentlichen aus dem Laser-Sender, dem Empfänger und der Signalverarbeitung (Abb. 1).

Als Sender dient ein Rubin-Laser, dessen Anregung durch eine Xenon-Blitzlampe erfolgt. Durch Gütemodulation des Lasers (Q-Switch) mittels eines elektrooptischen Schalters (POCKELS-Zelle, Glan-Thompson-Prisma und Umkehrprisma) werden Lichtimpulse mit einer Halbwertsbreite von ca. 40 ns erzeugt. Bezogen auf die maximale Ausgangsenergie von 400 mJ und den Lichtstrahldurchmesser entspricht dies einer Spitzenleistungsdichte von ca.  $10 \text{ MW/cm}^2$ . Die Wellenlänge des emittierten Lichtes beträgt 694,3 nm. Die Divergenz des aus dem Resonatorsystem austretenden Laserlichtes wird mit Hilfe eines Aufweitungsteleskops auf kleiner 2 mrad herabgesetzt.

Das zurückgestreute Laserlicht wird mit einem CASSEGRAIN-Teleskop (Sichtfeldeinengung 0,5 - 2 mrad einstellbar) aufgefangen und durch ein Schmalband-Interferenzfilter auf die Kathode eines 14stufigen Photomultipliers geleitet. Das Interferenzfilter läßt nur Licht mit der Laserwellenlänge zum Photoverstärker durch und begrenzt damit die Störsignale auf ein Minimum.

Die Empfangssignale werden in Form von Spannungsverläufen proportional den Photoströmen des Photomultipliers auf einem Oszillographen dargestellt. Die Registrierung erfolgt über eine Polaroid-Kamera.

Sender und Empfänger sind in einer mechanischen Einheit zusammengefaßt (vergl. Abb. 2). Zur genauen Ausrichtung dieser Sende-Empfangseinheit auf das Meßobjekt ist ein Sichtfernrohr eingebaut.

Zum Schutz vor thermischer Überlastung bzw. zur Stabilisierung der optischen Eigenschaften werden Rubinstab und Blitzlampe sowie Interferenzfilter und Photomultiplier wassergekühlt. Die Kühlanlage und auch die Elektronik für Sender und Empfänger befinden sich in zwei neunzehnzolligen Schränken.

Die gesamte LIDAR-Anlage ist in einem KLEINLASTKRAFTWAGEN integriert. Die Sende-Empfangseinheit sowie die Elektronikschränke sind schwingungsgedämpft eingebaut.

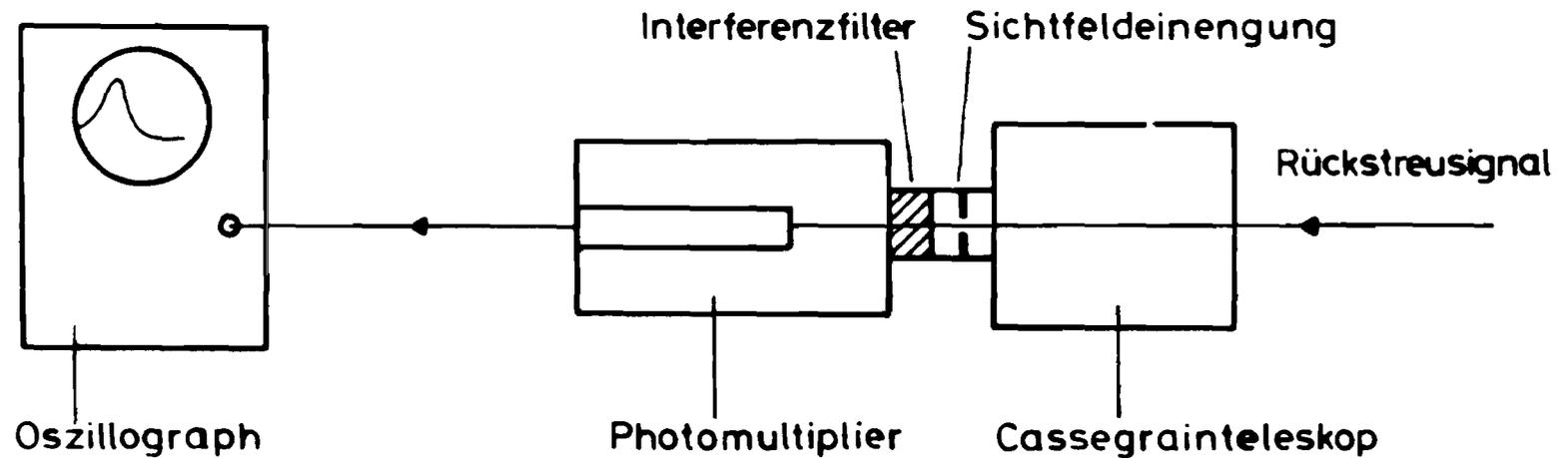
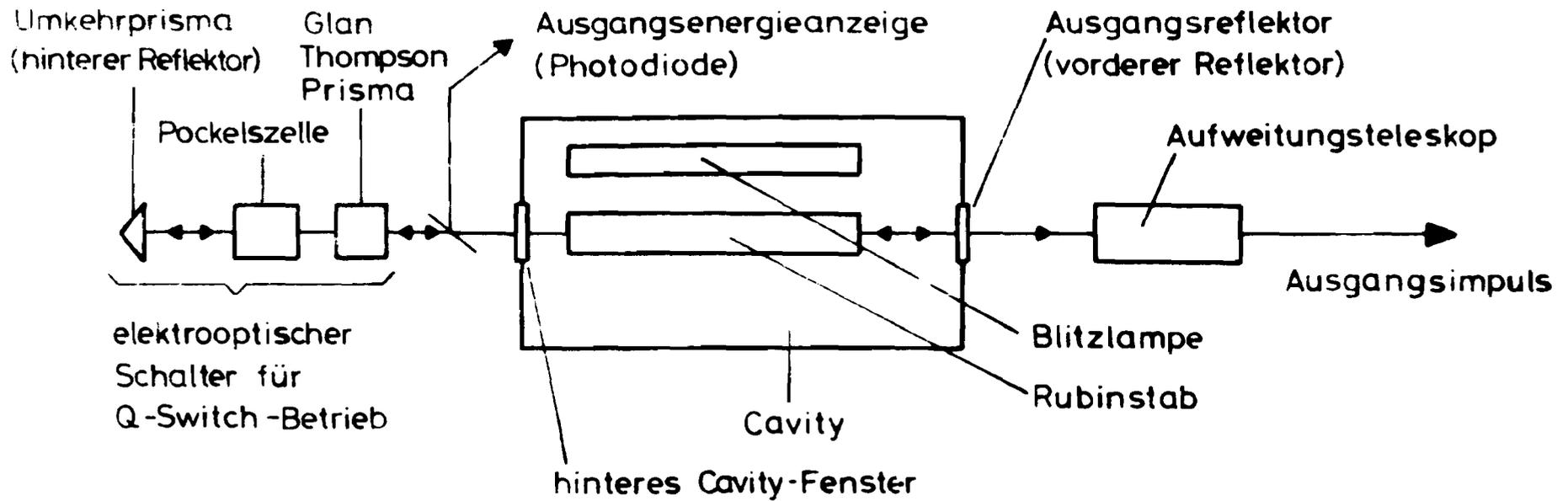
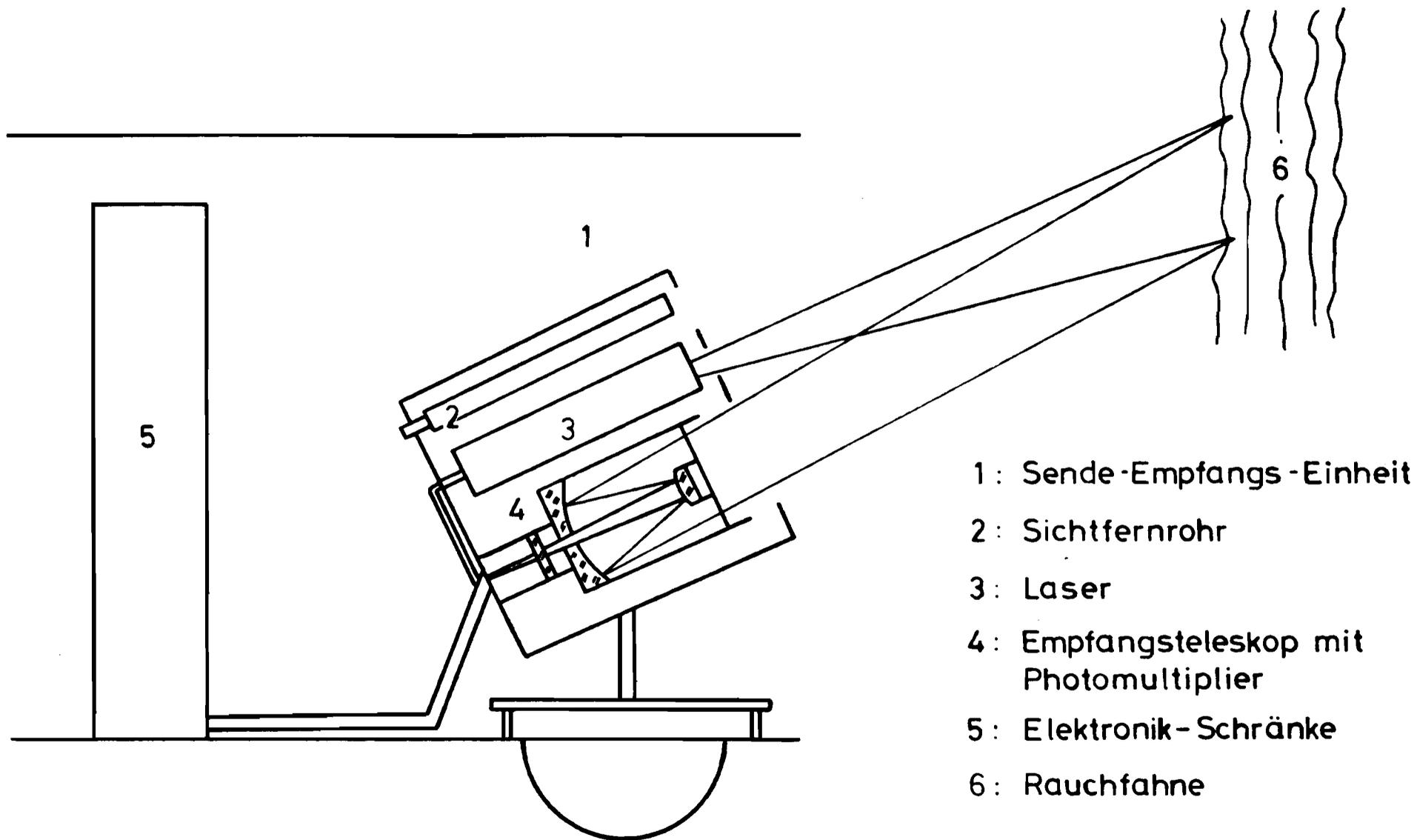


Abb. 1: Schematischer Aufbau von Sender und Empfänger



- 1: Sende-Empfangs-Einheit
- 2: Sichtfernrohr
- 3: Laser
- 4: Empfangsteleskop mit Photomultiplier
- 5: Elektronik-Schränke
- 6: Rauchfahne

Abb. 2: Konstruktive Ausführung der LIDAR-Anlage

Die Stromversorgung der Anlage erfolgt über einen mitgeführten benzinmotorgetriebenen Generator.

Die Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau der gesamten Anlage.

### 3. M e ß p r i n z i p

Das den Messungen zugrunde liegende Meßprinzip wird im folgenden kurz erläutert:

Mit Hilfe eines Lasers werden Lichtimpulse in die Atmosphäre ausgesandt. Ein Teil dieses Lichtes wird von den in der Atmosphäre enthaltenen Partikeln zurückgestreut und am Sendeort mit einem Spiegelteleskop wieder empfangen. Das hieraus resultierende elektrische Signal wird auf einem Oszillographen dargestellt. Die Zeit- bzw. Entfernungssachse ist identisch mit der X-Achse des Bildschirms. Die Empfangsleistung wird auf der Y-Achse dargestellt. Wird die Rückstreuung aus der reinen (homogenen) Atmosphäre empfangen, so hat das Empfangssignal den in Abbildung 3 gezeigten Verlauf.

Befindet sich im Meßstrahl eine Rauchfahne bzw. ein Objekt mit unterschiedlicher Transparenz und Rückstreueigenschaft, so hat das Empfangssignal den in Abb. 4 gezeigten Verlauf.

Von der Rauchfahne wird eine Erhöhung der aus der Entfernung R zurückgestreuten Lichtmenge in Form eines Transmissionsprungs verursacht. Dadurch wird die Lichtintensität hinter der Rauchfahne gegenüber dem gestrichelt eingezeichneten gleichförmigen Abfall vermindert.

Der Signalverlauf aus dem Empfangsbereich hinter der Rauchfahne

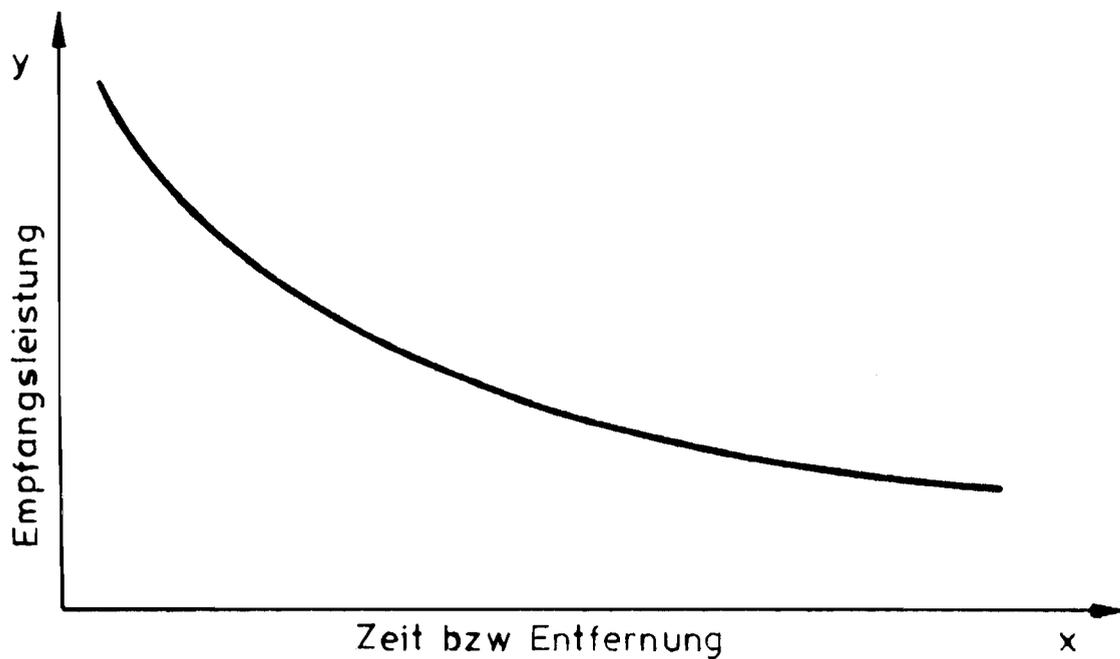


Abb. 3: Empfangssignal bei reiner Atmosphäre

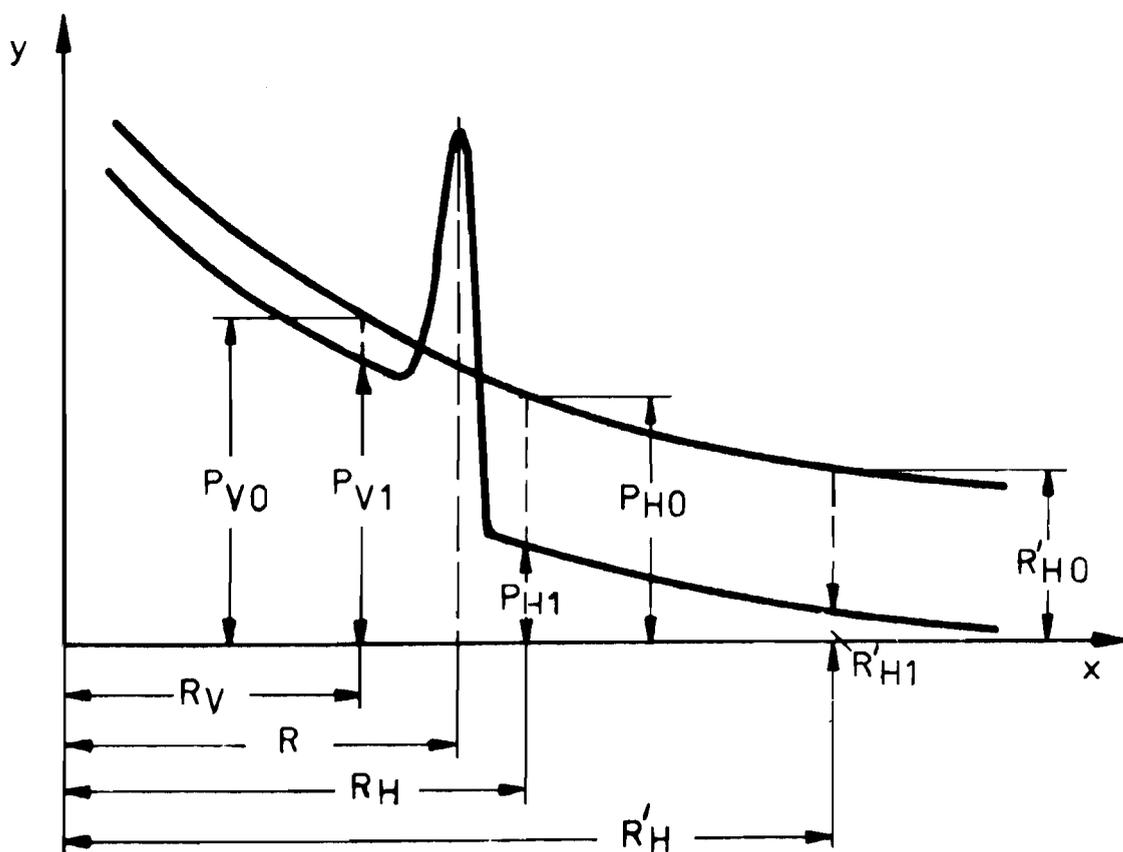


Abb. 4: Änderung des Empfangssignals durch Rauchfahne

ist also abhängig von der Transmission der Rauchfahne. Bei großem Transmissionswert, also geringer Staubkonzentration, ist das Empfangssignal aus diesem Bereich groß, bei kleiner Transmission, d. h. hoher Staubkonzentration, ist das Empfangssignal klein.

Mit Hilfe eines Referenzwertes, der durch ein Empfangssignal aus der Atmosphäre neben der Rauchfahne bestimmt wird, ist es möglich;

1. den Einfluß der sich ändernden atmosphärischen Verluste,
2. den Einfluß der Schwankungen der Laserausgangsenergie

zu eliminieren.

Zur Bestimmung der Rauchfahnen-Transmission werden den Empfangssignalen aus der Rauchfahne bzw. Atmosphäre an den festgelegten Abszissenpunkten  $R_V$ ,  $R_H$ ,  $R'_H$  die Wertepaare  $P_{VO}$  und  $P_{V1}$ ,  $P_{HO}$  und  $P_{H1}$  sowie  $P'_{HO}$  und  $P'_{H1}$  entnommen. Der Wert der Transmission ist dann:

$$T = \frac{P_{VO} \cdot P_{H1}}{P_{V1} \cdot P_{HO}} = \frac{P_{VO} \cdot P'_{H1}}{P_{V1} \cdot P'_{HO}} \quad (1)$$

Der Quotient  $P_{VO}/P_{V1}$  kompensiert die Einflüsse gemäß 1. und 2.

#### 4. M a t h e m a t i s c h e H e r l e i t u n g d e s Z u s a m m e n h a n g s v o n T r a n s m i s s i o n u n d L I D A R - M e ß g r ö ß e

Das zur Anwendung kommende Auswerteverfahren resultiert aus den nachfolgenden Ableitungen. Die dabei auftretende Größe L wird im weiteren als LIDAR-Meßgröße bezeichnet.

Für die rückgestreute Leistung aus einer homogenen Atmosphäre gilt die LIDAR-Formel:

$$P(R) = P_S \cdot C \cdot R^{-2} \cdot \beta_{180}(R) \cdot \exp\left[-2 \int_0^R L(R) dR\right] \quad (2)$$

$$L = \int n(r) \cdot k(r, \lambda, m) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr \quad (3)$$

wobei

P (R)	:	Empfangsleistung
P <sub>S</sub>	:	Sendeleistung
C	:	Gerätekonstante
R	:	Entfernung
β <sub>180</sub> (R)	:	Rückstreuungsfunktion
L	:	LIDAR-Meßgröße
n (r)	:	Anzahldichte der Teilchen
r	:	Radius der Teilchen
K (r, λ, m)	:	Extinktionskoeffizient
λ	:	Farbe der Teilchen
m	:	Masse der Teilchen

Die zurückgestreute Leistung aus der Entfernung R<sub>V</sub> unmittelbar vor der Rauchfahne ist:

$$P(R_V) = P_S \cdot C \cdot R_V^{-2} \cdot \beta_{180}(R_V) \cdot \exp\left[-2 \int_0^{R_V} L(R) dR\right] \quad (4)$$

Die zurückgestreute Leistung aus der Entfernung  $R_H$  unmittelbar hinter der Rauchfahne ist:

$$P(R_H) = P_S \cdot C \cdot R_H^{-2} \cdot \beta_{180}(R_H) \cdot \exp\left[-2 \int_0^{R_H} L(R) dR\right] \quad (5)$$

Definitionsgemäß ist die Transmission T:

$$T = \frac{P(R_H)}{P(R_V)} \quad (6)$$

Unter der Bedingung, daß mit ausreichender Näherung gilt:

$$\beta_{180}(R_V) = \beta_{180}(R_H) \quad \text{und} \quad R_H - R_V \ll R_V$$

ergibt sich aus (4), (5) und (6):

$$T = \exp\left[-2 \int_{R_V}^{R_H} L(R) dR\right] \quad (7)$$

( $R_H - R_V = D$  ist der Durchmesser der Rauchfahne)

Somit folgt aus (7):

$$T = \exp[-2 \cdot L \cdot D] \quad (8)$$

und

$$L = - \frac{\ln T}{2 D} \quad (9)$$

In der Praxis wurden die einzelnen Empfangssignale jeweils mit einer Kamera vom Oszillographenbildschirm fotografiert. Die Transmissionswerte wurden über die grafisch-numerische Bestimmung der Ordinatenwerte der Empfangssignale und die Berechnung nach Formel (1) bestimmt.

Die Ermittlung des Rauchfahndurchmessers erfolgt am besten ebenfalls an Hand der fotografierten Empfangssignale, da nur bei dieser Methode die wahre Länge des Strahlungsweges in der Rauchfahne

bestimmt werden kann.

Bei der mathematischen Herleitung wird vorausgesetzt, daß der Sendepuls beliebig kurz ist und die Form eines Rechteckimpulses besitzt. Die tatsächliche Form jedoch entspricht der eines Dreiecks. Entsprechend ergibt sich unter zusätzlicher Modifizierung durch das Konzentrationsprofil im Strahlengang das Rückstreusignal.

Ein guter Näherungswert für den Durchmesser ist die Halbwertsbreite des Transmissionssprungs.

## 5. B e z u g z u r S t a u b m a s s e n k o n z e n t r a - t i o n

Im vorangegangenen wurde beschrieben, wie aus dem Transmissionsprung die Lidarmeßgröße  $L$  mit der Dimension  $1/m$  ermittelt wird.

Der jeweilige Meßwert für  $L$  reicht allein für eine Emissionsbeurteilung nicht aus, da entsprechend der mengenmäßigen Charakterisierung der Emissionen und ihrer Begrenzungen nach der Staubmasse gefragt ist.

Da das LIDAR-Meßverfahren vergleichbar ist mit den bekannten optischen Meßverfahren zur Bestimmung der Staub- bzw. Rauchdichte in Abgasen, bei denen ebenfalls eine Transmission bzw. Extinktion gemessen wird, lassen sich demnach auch alle hierfür geltenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten übertragen. Auch beim LIDAR soll aus einer Extinktion auf eine Masse geschlossen werden. Eine theoretische Beziehung hierfür gibt es nicht. Der Zusammenhang zwischen lichtoptischem Signal und Massenkonzentration muß, wie bei den anderen lichtelektrischen Staubmeßverfahren, empirisch über Vergleichsmessungen mit gravimetrischen Verfahren unter Zuhilfenahme der üblichen mathematisch-statistischen Verfahren (Regressionsanalyse) ermittelt werden. Bei linearen Zusammenhängen stellt der Extinktionskoeffizient  $k$  die Steigung der Eichgeraden dar.

In dem Koeffizienten  $k$  sind die Einflußgrößen wie Korngröße,

Dichte, Oberfläche bzw. Reflexionsvermögen, Farbe der Partikel u.a.m. zusammengefaßt. Je nach Beschaffenheit der vorliegenden Partikel können bei gleichen Massen sehr unterschiedliche Extinktionen erhalten werden (vergl. Abb. 5). Das bedeutet, daß sich eine Aussage über den Staubgehalt des Abgases nur dann machen läßt, wenn das Verfahren auf den vorliegenden A b g a s t y p durch Vergleichsmessungen geeicht wird.

Als Bezugsmeßverfahren für diese Eichung wurde das manuelle gravimetrische Verfahren nach VDI 2066 eingesetzt.

Mit den nachfolgend beschriebenen Messungen ist die Eichfähigkeit des Meßsystems mit Hilfe von Vergleichsmessungen an dem Abgastyp "Steinkohlefeuerungen" nachgewiesen worden.

## 6. D u r c h f ü h r u n g d e r M e s s u n g e n

Im einzelnen sollte an Hand der Meßergebnisse und deren Bewertung eine Antwort auf die folgenden Fragen gefunden werden:

- a) Läßt sich ein Zusammenhang zwischen LIDAR-Meßgröße und Staubkonzentration nachweisen ("Kalibrierung" des LIDAR-Systems)?
- b) Wie sieht die über eine Regressionsanalyse ermittelte Eichfunktion aus unter den Randbedingungen, die für die Quelle anzusetzen sind?
- c) Wo liegt der Arbeitsbereich des Verfahrens?
- d) Wie ist die Querempfindlichkeit gegenüber Wasserdampf in der Rauchfahne?
- e) Wie gehen atmosphärische Einflüsse in das LIDAR-Signal ein?

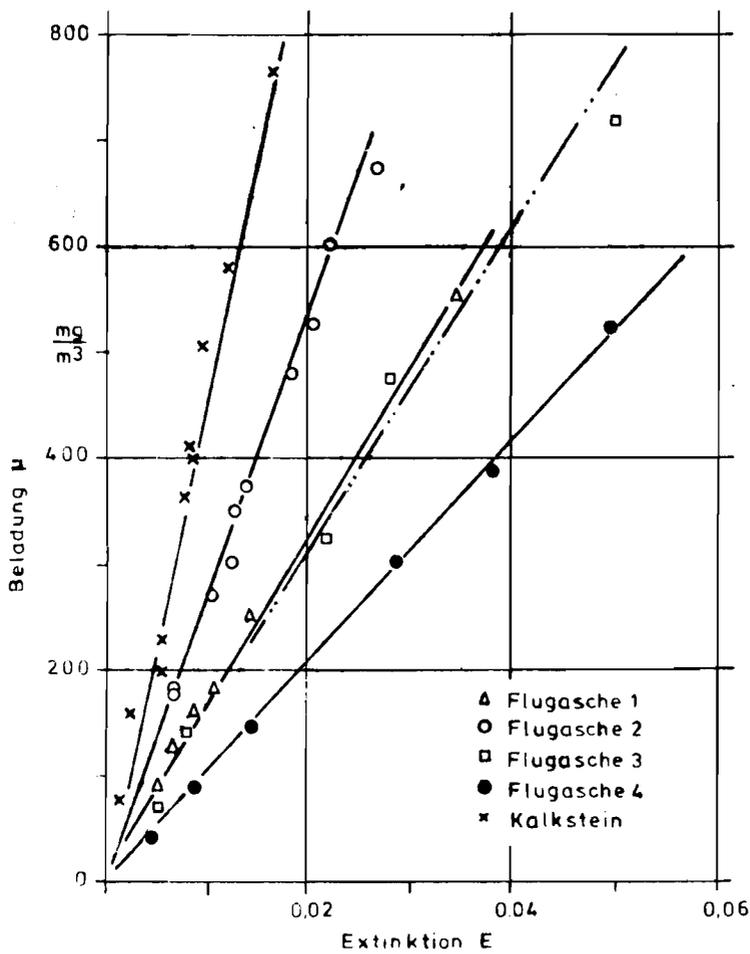


Abb. 5: Eichgeraden bei unterschiedlichen Staubarten. (Das Steigungsmaß der Eichgeraden stellt den Extinktionskoeffizienten dar.)

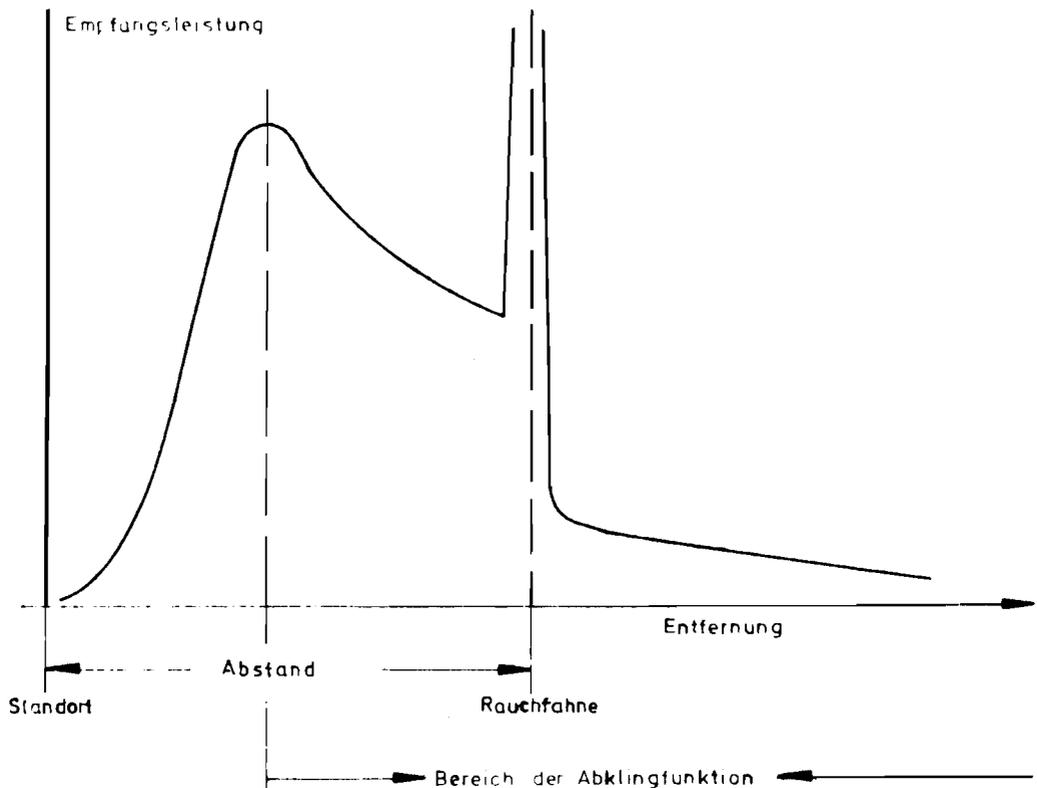


Abb. 6: Verlauf eines LIDAR-Empfangssignals.

## 6.1. Beschreibung der Emissionsquellen

Die LIDAR-Anlage wurde an den Rauchfahnen von 2 Steinkohlekraftwerken getestet, die sich wegen ihrer Lage, der Art und Menge der Emissionen als auch von den verfügbaren Meßstrecken her für die gravimetrischen Vergleichsmessungen als besonders geeignet erwiesen. Die Kraftwerke werden nachfolgend als Kraftwerk I bzw. Kraftwerk II bezeichnet.

Bei beiden Kraftwerken konnten teilweise die Rauchgasfilter abgeschaltet werden. Auf diese Weise sollte der Bereich, in dem die Abhängigkeit von LIDAR-Meßgröße und Staubmassenkonzentration überprüft wurde, größtmöglich erweitert werden.

Beim Kraftwerk II war es außerdem möglich, zusätzlich Wasser in den Abgasstrom einzudüsen, um den Wasserdampfgehalt in der Rauchfahne zu erhöhen.

## 6.2. Zeitlicher Ablauf der Messungen

Der Ablauf sowie die jeweiligen Betriebszustände im Kraftwerk sind der Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 zu entnehmen.

Die Meßzeiten wurden in Abstimmung mit den gleichzeitig durchgeführten gravimetrischen Vergleichsmessungen festgelegt. Die Probenahmezeit bei der gravimetrischen Messung betrug je nach emittierter Staubmasse 8 - 10 Minuten. Während dieser Zeit wurden 10 LIDAR-Empfangssignale registriert, deren Mittelwert dem entsprechenden Konzentrationswert zugeordnet wurde.

Die Referenzwerte wurden in Form von Signalen aus der freien Atmosphäre registriert. Diese Atmosphärensignale wurden bei Kraftwerk I alle 30 Minuten und bei Kraftwerk II alle 20 Minuten aufgenommen.

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf der Messungen (Kraftwerk I)

Meßwerte 1 - 8:	Normalbetrieb des Kraftwerks Windrichtung NW, bei Meßwert 6 Windrichtung in Laserstrahlrichtung Wetterlage: sonnig
Meßwerte 9 - 17:	Normalbetrieb des Kraftwerks Windrichtung NW Wetterlage: dunstig, sonnig
Meßwerte 18 - 29:	Normalbetrieb des Kraftwerks Windrichtung NW Wetterlage: bewölkt/sonnig zwischen 12 <sup>00</sup> und 13 <sup>00</sup> leichter Regen
Meßwerte 30 - 39:	Vorreinigung 3 + 4 der Staubfilter abgeschaltet schaltet Windrichtung NW Wetterlage: bewölkt, sonnig/bewölkt
Meßwerte 40 - 46:	Normalbetrieb des Kraftwerks Windrichtung NW Wetterlage: bewölkt, sonnig/bewölkt

Tabelle 2: Zeitlicher Ablauf der Messungen (Kraftwerk II)

Meßwerte 1 - 10:	Normalbetrieb des Kraftwerks Windrichtung W Wetterlage: bewölkt
Meßwerte 11 - 19:	Vorreinigung der Staubfilter abgeschaltet Windrichtung SO, ab ca. 12 <sup>00</sup> NO Wetterlage: bewölkt, leichter Regen, bewölkt

Tabelle 2: Fortsetzung

- Meßwerte 20 - 28: a) Nachreinigung der Staubfilter abgeschaltet  
Meßwerte 20 - 25
- b) Nachreinigung abgeschaltet +  
5,5 t H<sub>2</sub>O/h- Eindüsung  
Meßwerte 26 - 28  
Windrichtung SO  
Wetterlage: neblig, sonnig/dunstig
- Meßwerte 29 - 37: a) Normalbetrieb des Kraftwerks  
Meßwerte 29 - 33
- b) Normalbetrieb +  
5,5 t H<sub>2</sub>O/h - Eindüsung  
Meßwerte 34 - 37  
Windrichtung SW; gegen Mittag NW  
Wetterlage: bewölkt, leichter Regen
- Meßwerte 38 - 47: Normalbetrieb +  
5 t H<sub>2</sub>O/h - Eindüsung  
Windrichtung SW  
Wetterlage: bewölkt/sonnig
- Meßwerte 48 - 57: Vorreinigung abgeschaltet +  
4 t H<sub>2</sub>O/h - Eindüsung  
Windrichtung SW  
Wetterlage: bewölkt, sonnig/bewölkt
- Meßwerte 58 - 70 a) Normalbetrieb des Kraftwerks  
Meßwerte 58 - 62
- b) Nachreinigung abgeschaltet  
Meßwerte 63 - 70  
Windrichtung SW  
Wetterlage: bewölkt, leichter Regen, neblig

### 6.3. Wahl der LIDAR-Standorte

Die Wahl der LIDAR-Standorte erfolgte unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien:

#### a.) Windrichtung

Eine wichtige Voraussetzung für reproduzierbare Messungen ist die Ausrichtung des Laserstrahls auf den stabilsten und homogensten Bereich der Rauchfahne. Dieser Bereich liegt erfahrungsgemäß direkt über der Kaminöffnung. Bei Wind hingegen knickt die Rauchfahne entsprechend der Windrichtung ab. Die LIDAR-Anlage muß deshalb so aufgestellt werden, daß der Wind entweder quer zur Strahlrichtung weht oder in Richtung auf den Meßort.

#### b.) Entfernung zur Kaminmündung

In Abbildung 6 ist der vollständige Verlauf eines LIDAR-Empfangssignals dargestellt. Die mathematische Auswertung ist lediglich im Bereich der Abklingfunktion überprüft. Resultierend aus dieser Bedingung und den üblichen Schornsteinhöhen ergibt sich ein Mindestabstand von ca. 250 m.

#### c.) Einhaltung der Unfallverhütungsvorschriften für den Betrieb von Laseranlagen

Beim Betrieb von Laseranlagen kommt die Unfallverhütungsvorschrift VBG 93 zur Anwendung. So ist nach § 8,1 und 2 insbesondere beim Einsatz von Impulslasern hoher Energiedichte über größere Entfernungen darauf zu achten, daß eine gesundheitliche Gefährdung durch den Laserstrahl und dessen Reflexionen ausgeschlossen wird.

### 6.4. Einstellung der Sende-Empfangseinheit

Die Einstellung wurde mittels Zielfernrohr höhenmäßig so vorgenommen, daß der Auftreffpunkt möglichst dicht über der Kaminöff-

nung im relativ homogenen Bereich der Rauchfahne lag (Bereich der Überhöhung).

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß der Laserstrahl infolge seiner Divergenz, die in der Größenordnung von 1 mrad liegt, in einer Entfernung von 1000 m einen Durchmesser von ca. 1 m besitzt. Der Sendestrahl muß daher so hoch über der Kaminmündung ausgerichtet sein, daß Reflexionen von der Kaminkante ausgeschlossen sind. Die jeweiligen Referenzsignale aus der Atmosphäre wurden ermittelt, indem der Laserstrahl höhengleich, aber seitlich dicht an der Rauchfahne, ebenfalls unter Berücksichtigung der Divergenz, vorbeigelenkt wurde.

Die Entfernung zwischen LIDAR-Anlage und Kaminmündung betrug 400 - 500 m. Die Ausgangsenergie der Laserimpulse lag zwischen 180 und 300 mJ.

Durch eine speziell entwickelte Triggereinheit wurde der Triggerzeitpunkt für den Oszillographen so gelegt, daß der Transmissionsprung mit größter Auflösung optimal auf dem Oszillographenbildschirm abgebildet wurde.

Zur Anzeige der Empfangssignale wurde ein Oszillograph der Firma TEKTRONIX vom Typ R 556, bestückt mit einem Verstärkereinschub 1 A 1, eingesetzt.

## 7. M e ß e r g e b n i s s e u n d A u s w e r t u n g d e r M e s s u n g e n

Zur Berechnung der LIDAR-Meßgröße werden nach Formel (9) die Zahlengröße des Rauchfahndurchmessers  $D$  und der Rauchfahnentransmission  $T$  benötigt. Beide Größen werden grafisch-numerisch aus den Bildern der Empfangssignale ermittelt.

Die  $D$ -Skala ist in Schritten von 0,75 m mit Skalenfixpunkten bei 0, 1,5, 3, 4,5, ... m ablesbar. Ablesungen von Zwischenwerten sind nicht möglich. Die ermittelten  $D$ -Werte bewegen sich zwischen 5 und 10 m. Die Skala zur Ermittlung von  $T$  ist in Schritten von

0,5 Einheiten mit Skalenfixpunkten bei 0, 1, 2, 3, ... Einheiten ablesbar. Ablesungen von Zwischenwerten sind nicht möglich. Hierbei wurden Werte zwischen 1 und 30 Einheiten ermittelt.

### 7.1. Kraftwerk I

Insgesamt wurden Einzelmessungen (s. Tabelle 3) zur Ermittlung von 46 LIDAR-Meßwerten durchgeführt. Nach Abzug der aus den genannten Gründen (vergl. Fußnote) ausgesonderten Werte verbleiben 42 Werte zur Erstellung einer Eichkurve. Diese 42 Werte wurden wie folgt ermittelt:

12 Werte	aus je	10 Einzelmessungen		
6 "	"	"	9	"
14 "	"	"	8	"
5 "	"	"	7	"
3 "	"	"	6	"
1 Wert	"		5	"
1 "	"		3	"

Bei allen Meßwerten, die aus weniger als 10 Einzelwerten berechnet wurden, konnte auf Grund schlechter Bildqualität oder ungünstiger Geräteeinstellung nur die angegebene Zahl an Einzelmessungen zur Mittelwertbildung herangezogen werden.

37 von 42 Mittelwerten bestehen aus 7 und mehr Einzelwerten.

In Abb. 7 wurden alle 37 Wertepaare LIDAR-Meßgröße/Staubmassenkonzentration eingezeichnet. Die über eine Regressionsanalyse ermittelte Kalibrierfunktion stellt sich wie folgt dar:

$$K [\text{mg}/\text{m}^3] = 3606 [\text{mg}/\text{m}^2] \cdot L [1/\text{m}] + 38 [\text{mg}/\text{m}^3]$$

Der Korrelationskoeffizient wurde zu 0,96 errechnet.

Der mittlere Wasserdampfanteil in der Rauchfahne betrug während der Messungen etwa 7 Vol %.

Tabelle 3: Meßergebnisse Kraftwerk I

lfd. Nr.	grav.Vergl.- messung Konzentration [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	LIDAR- Meßgröße [ $1/\text{m}$ ]
1	179	0,0354
2	165	0,0358
3	148	(0,0466) *)
4	148	0,0404
5	178	0,0366
6	168	(0,0539)
7	168	0,0353
8	162	0,0303
9	142	0,0343
10	128	0,0302
11	148	0,0344
12	136	0,0307
13	131	0,0291
14	144	0,0367
15	138	0,0332
16	148	0,0349
17	130	0,0240
18	123	0,0319
19	171	0,0279
20	144	0,0326
21	111	0,0302
22	166	0,0357
23	172	0,0354
24	138	0,0275
25	132	0,0301
26	132	0,0259
27	166	0,0295
28	126	0,0257
29	150	(0,0246)

Tabelle 3: Fortsetzung

lfd. Nr.	grav.Vergl.- messung Konzentration [ $\mu\text{mg}/\text{m}^3$ ]	LIDAR- Meßgröße [ $^{-1}/\text{m}$ ]
30	137	(0,0752)
31	340	0,0704
32	341	0,0754
33	348	0,0787
34	343	0,0741
35	372	0,0770
36	449	0,1068
37	416	0,1062
38	462	0,1252
39	439	1,1320
40	260	0,0474
41	189	0,0557
42	185	0,0465
43	212	0,0455
44	192	0,0420
45	191	0,0435
46	184	0,0339

\*) Aus betriebstechnischen Gründen (z.B. kein stationärer Kraftwerksbetrieb oder Übersteuerung der Empfangsoptik durch direkte Sonneneinstrahlung sowie durch sonstige klar erkennbare Störgrößen, z.B. Wasserdampfschwaden von umliegenden Kühltürmen oder stark wechselnde Windrichtungen) müssen die in Klammern gesetzten Werte entfallen.

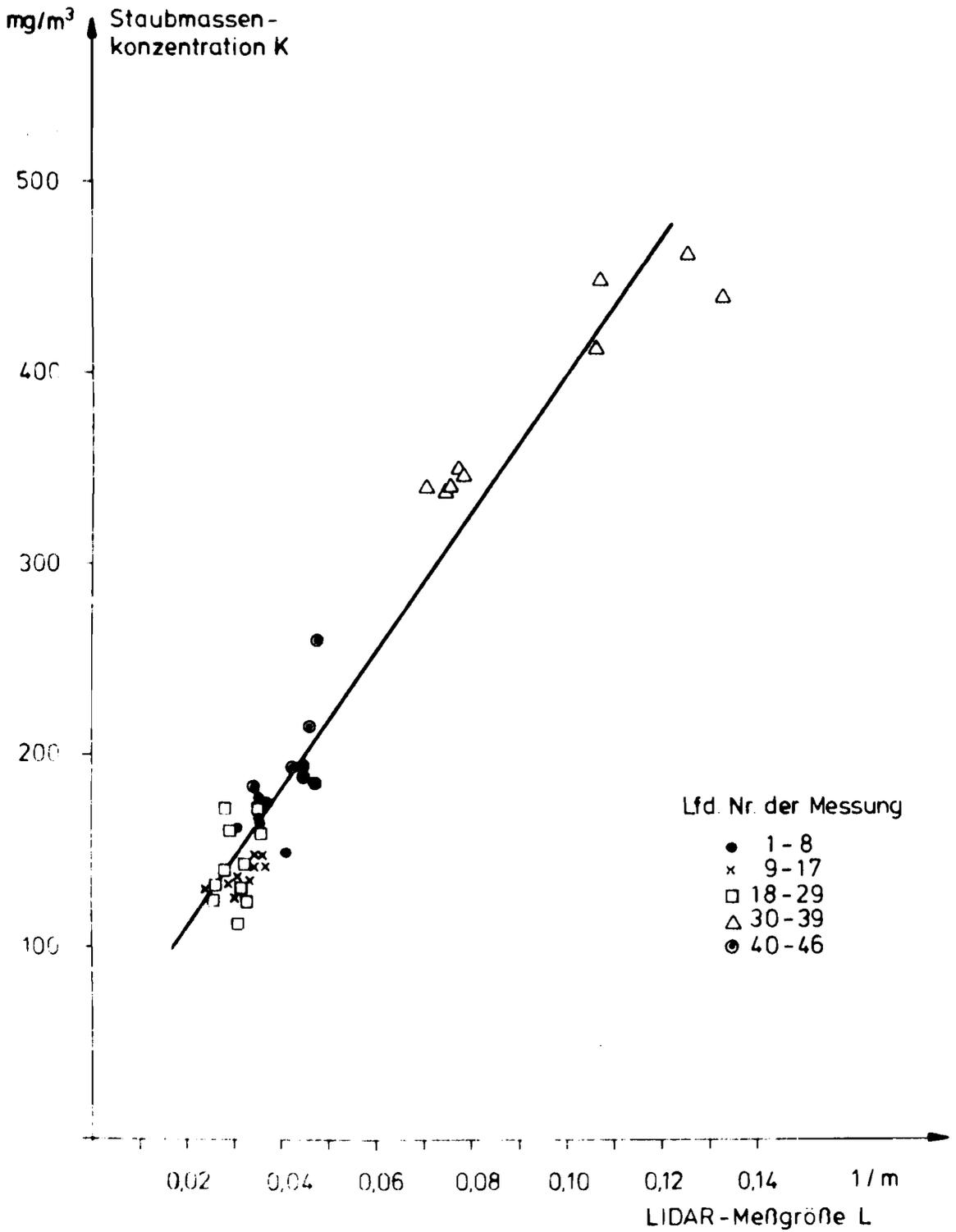


Abb. 7: Kalibrierfunktion Kraftwerk I

## 7.2. Kraftwerk II

Insgesamt wurden Einzelmessungen zur Ermittlung von 70 LIDAR-Meßwerten durchgeführt (s. Tabelle 4). Nach Abzug der aus den vorgeannten Gründen ausgesonderten Werte verbleiben 60 Wertepaare LIDAR-Meßgröße/Staubmassenkonzentration. Diese sind in der Abbildung 8 eingezeichnet.

Die Ermittlung der Regressionsgeraden erfolgte ohne die Werte, die unter der Nachweisgrenze liegen. Somit verbleiben 50 Werte. Diese wurden wie folgt ermittelt:

16 Werte aus je 10 Einzelmessungen

16	"	"	"	9	"
11	"	"	"	8	"
3	"	"	"	7	"
1 Wert	"			6	"
2 Werte	"	je		5	"
1 Wert	"			3	"

Bei allen Meßwerten, die aus weniger als 10 Einzelwerten berechnet wurden, konnte auf Grund schlechter Bildqualität oder ungünstiger Geräteeinstellung nur die angegebene Zahl an Einzelmessungen zur Mittelwertbildung herangezogen werden. 46 von 50 Mittelwerten bestehen aus 7 und mehr Einzelwerten.

Die somit als Kalibrierungsgerade gefundene Funktion hat die Form:

$$K [\text{mg}/\text{m}^3] = 6509 [\text{mg}/\text{m}^2] \cdot L [1/\text{m}] - 39 [\text{mg}/\text{m}^3]$$

Der Korrelationskoeffizient wurde zu 0,93 errechnet.

Auffallend ist jedoch die stärkere Streuung der Einzelwerte für die LIDAR-Meßgröße im Vergleich mit den Ergebnissen von Kraftwerk I. Insbesondere im Konzentrationsbereich über  $760 \text{ mg}/\text{m}^3$  kann keine eindeutige Aussage darüber gemacht werden, ob die Charakteristik des LIDAR-Meßverfahrens tatsächlich dem Verlauf der in Abbildung 8 eingezeichneten Regressionsgeraden entspricht.

Tabelle 4: Meßergebnisse Kraftwerk II

Lfd. Nr.	H <sub>2</sub> O-Anteil [Vol%]	grav. Vergl.- Messung Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]	LIDAR- Meßgröße [1/m]
1	4,9	133	0,01463
2		181	0,02132
3		111	0,01975
4		136	0,01050
5		132	0,01921
6		148	0,01480
7		131	0,02533
8		132	0,02560
9		127	0,02338
10		152	0,01888
11	4,4	401	(0,04923) *)
12		461	(0,02433)
13		507	0,09553
14		445	0,08012
15		430	0,09271
16		427	0,09530
17		441	0,07815
18		350	0,06615
19		275	(0,06873)
20	4,4	1231	0,19928
21		1173	0,18048
22		955	0,16110
23		1270	0,13755
24		1021	0,13997
25		1076	0,12588
26	6,4	821	0,13462
27		724	0,13816
28		929	0,13431
29	5,2	114	0,02057

\*) vergl. Fußnote Tabelle 3

Tabelle 4: Fortsetzung

Lfd. Nr.	H <sub>2</sub> O-Anteil [Vol%]	grav. Vergl.- Messung Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]	LIDAR Meßgröße [1/m]
30		111	0,00886
31		110	0,00586
32		170	0,00682
33		157	(-0,00408)
34	8,5	151	(-0,00509)
35		121	0,00095
36		128	0,03171
37		127	0,03149
38	5,2	143	0,03517
39		206	(0,02060)
40		125	0,02599
41		174	0,02431
42		138	0,01989
43		-	(0,01583)
44		137	0,01469
45		148	0,01234
46		134	0,01526
47		143	0,03358
48	5,8	487	0,10331
49		563	0,10993
50		548	0,12229
51		729	0,14125
52		589	0,11116
53		746	0,13304
54		664	0,11207
55		747	0,12462
56		630	0,12050
57		538	0,09464
58	5,8	88	(0,01628)
59		160	0,02989
60		107	0,02114
61		112	(0,03096)
62		96	(0,03835)

Tabelle 4: Fortsetzung

Lfd. Nr.	H <sub>2</sub> O-Anteil [Vol%]	grav. Vergl.- Messung Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]	LIDAR Meßgröße [1/m]
63		1433	0,14002
64		994	0,15241
65		836	0,14055
66		812	0,12203
67		785	0,11908
68		776	0,10817
69		851	0,15672
70		859	0,16089

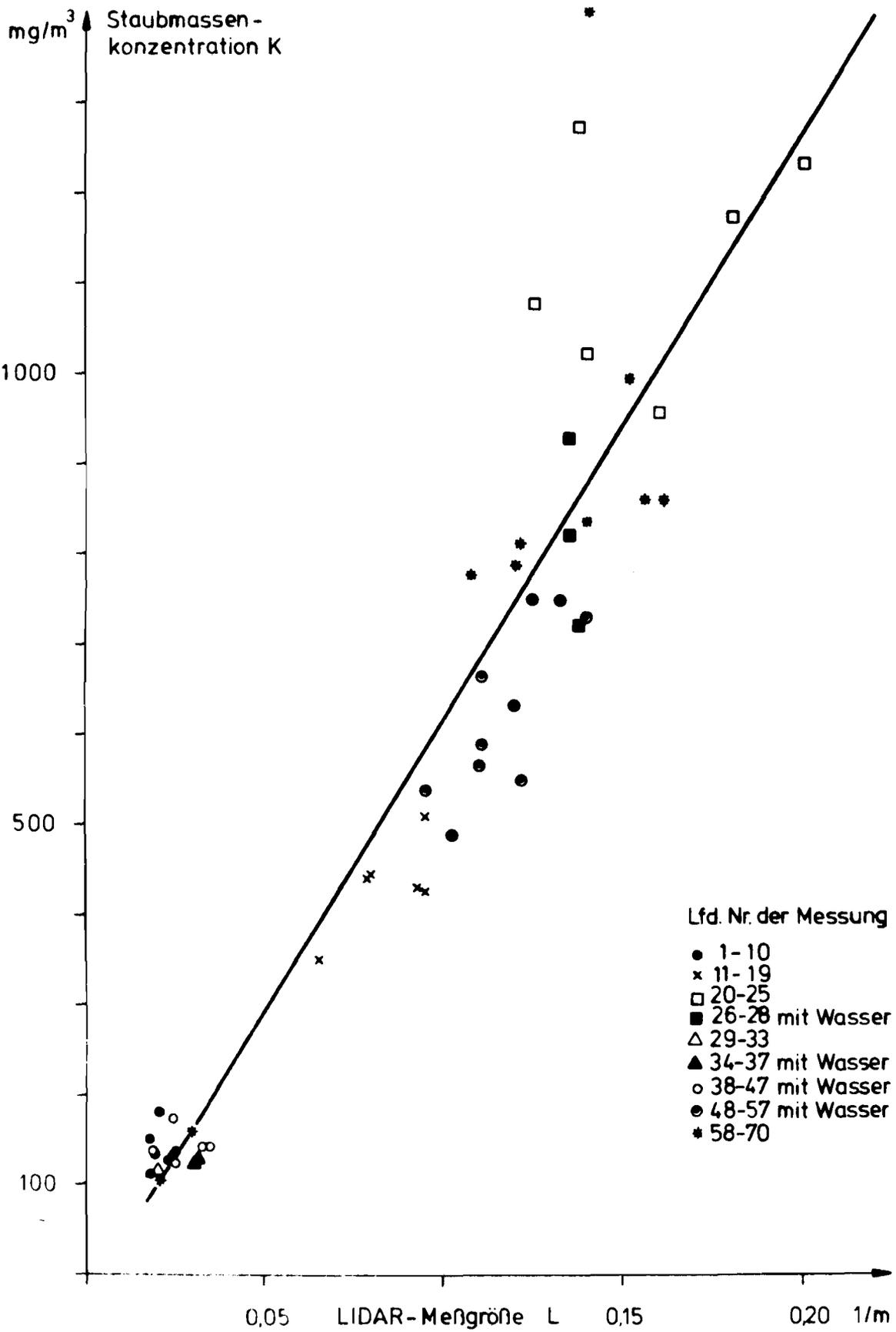


Abb. 8: Kalibrierfunktion Kraftwerk II

Es besteht die Möglichkeit, daß die Eichkurve in diesem Konzentrationsbereich abknickt und in eine Parallele zur Ordinate übergeht, womit die obere Grenze des Arbeitsbereichs gefunden wäre.

Die Unsicherheit hinsichtlich des Verlaufs in diesem Bereich resultiert aus den kaum noch von Null unterscheidbaren Empfangsintensitäten aus dem Bereich hinter der Rauchfahne. Bei der grafisch-numerischen Auswertung der Empfangssignale wirkt sich der Ablesefehler bei so geringen Intensitäten besonders stark aus.

Eine endgültige Klärung dieser Frage kann nur an Hand weiterer Messungen mit modifizierter Aufnahmetechnik und Darstellungsweise des Empfangssignals erreicht werden.

Aus den vorgenannten Gründen wurde die Regressionsgerade noch einmal, und zwar nur bis zu Konzentrationen von  $760 \text{ mg/m}^3$ , berechnet und in Abbildung 9 dargestellt. Nach Abzug der bei höheren Konzentrationen ermittelten LIDAR-Meßgrößen verbleiben 34 Werte. Diese wurden wie folgt bestimmt:

13 Werte	aus je	10 Einzelmessungen		
12 "	"	"	"	"
5 "	"	"	8	"
1 Wert	"		7	"
1 "	"		6	"
1 "	"		5	"
1 "	"		3	"

31 von 34 Mittelwerten bestehen aus 7 und mehr Einzelwerten.

Die somit als Kalibrierungsgerade gefundene Funktion hat die Form:

$$K [\text{mg/m}^3] = 5187 [\text{mg/m}^2] \cdot L [1/\text{m}] + 7 [\text{mg/m}^3]$$

Der Korrelationskoeffizient wurde zu 0,98 errechnet.

Bei den Messungen am Kraftwerk II wurde auch der Einfluß von Wasserdampf in der Rauchfahne auf das Meßergebnis untersucht. Verschiedene Staubmassenkonzentrationsbereiche wurden bei unter-

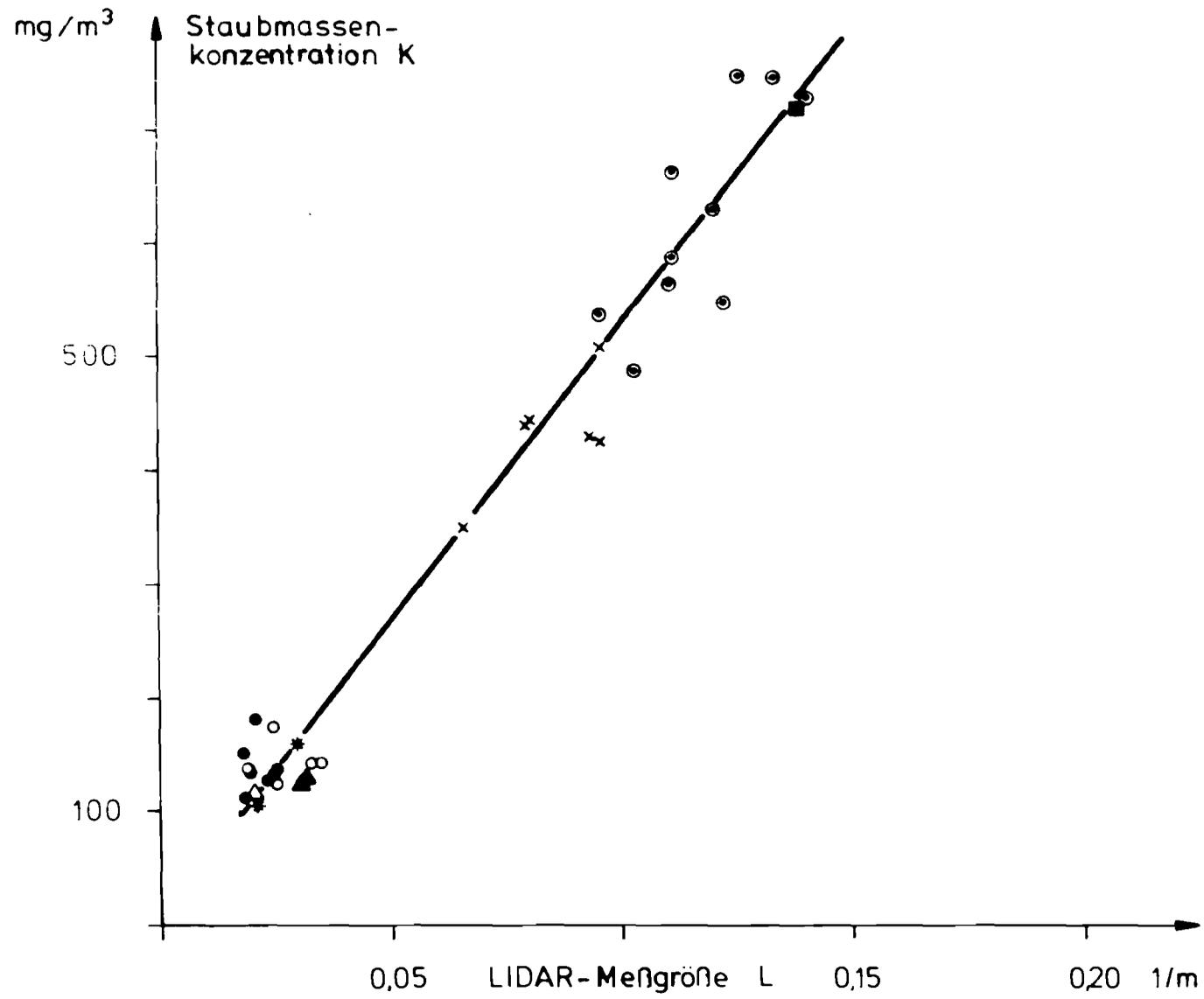


Abb. 9: Kalibrierfunktion (korrigiert) Kraftwerk II

schiedlichen Wasserdampfanteilen bis maximal 8,5 Vol.% gemessen.

Ein signifikanter Unterschied bei den LIDAR-Meßwerten konnte bei gleichen Staubmassenkonzentrationen aber unterschiedlichem Wasserdampfanteil nicht festgestellt werden.

#### 8. Einfluß des Atmosphären-Quotienten $P_{VO}/P_{HO}$ auf die LIDAR-Messgröße

Bei der Berechnung der Rauchfahnen-Transmission bzw. der LIDAR-Meßgröße geht der aus der Atmosphäre ermittelte Quotient  $P_{VO}/P_{HO}$  direkt in das Ergebnis mit ein (siehe Formel (1)).

Es wurde festgestellt, daß dieser als Referenzwert herangezogene Quotient relativ starken Schwankungen im Verlauf von mehreren Stunden unterworfen ist. Zur Veranschaulichung wurde der Verlauf des Referenzwertes in den Abbildungen 10 und 11 eingezeichnet. Wie hieraus hervorgeht, treten im Extremfall innerhalb von 20 Minuten Änderungen des Bezugswertes um bis zu 70 % auf.

Anhand der im Anschluß an die Restmessungen an den Kraftwerken durchgeführten Untersuchungen wurde geklärt, ob diese relativ starke Streuung tatsächlich aus sich schnell ändernden Atmosphärenzuständen resultiert oder auf einen Meßgerätefehler (z. B. Drift des Empfangsverstärkers) zurückzuführen ist.

Die Überprüfung der Meßgerätekonzanz erfolgte über die Ermittlung der Reproduzierbarkeit von Empfangssignalen unter weitgehend konstanten atmosphärischen Bedingungen während der Testmessungen. Die Randbedingung der "konstanten Atmosphäre" wird dann als erfüllt angesehen, wenn die Messungen

- in einem Gebiet mit möglichst geringer und sich kaum ändernder Staubbelastung der Luft
  - in wolken- und dunstfreier Atmosphäre
  - bei nur minimaler Luftbewegung
- erfolgen.

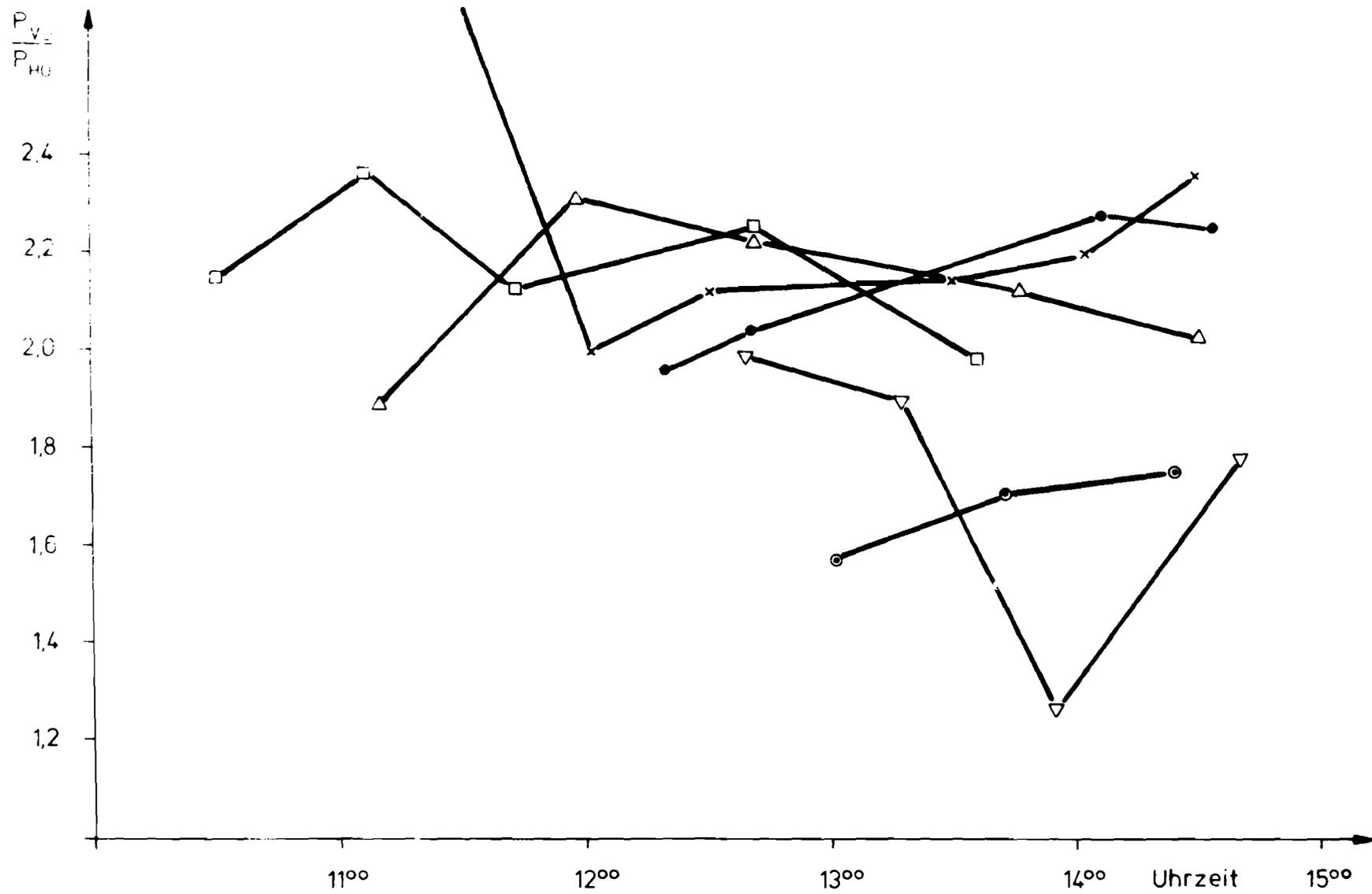


Abb. 10: Verlauf des Atmosphärensignals an verschiedenen Meßtagen am Standort Kraftwerk I  
 (Symbole vergl. Kalibrierfunktion Kraftwerk I)

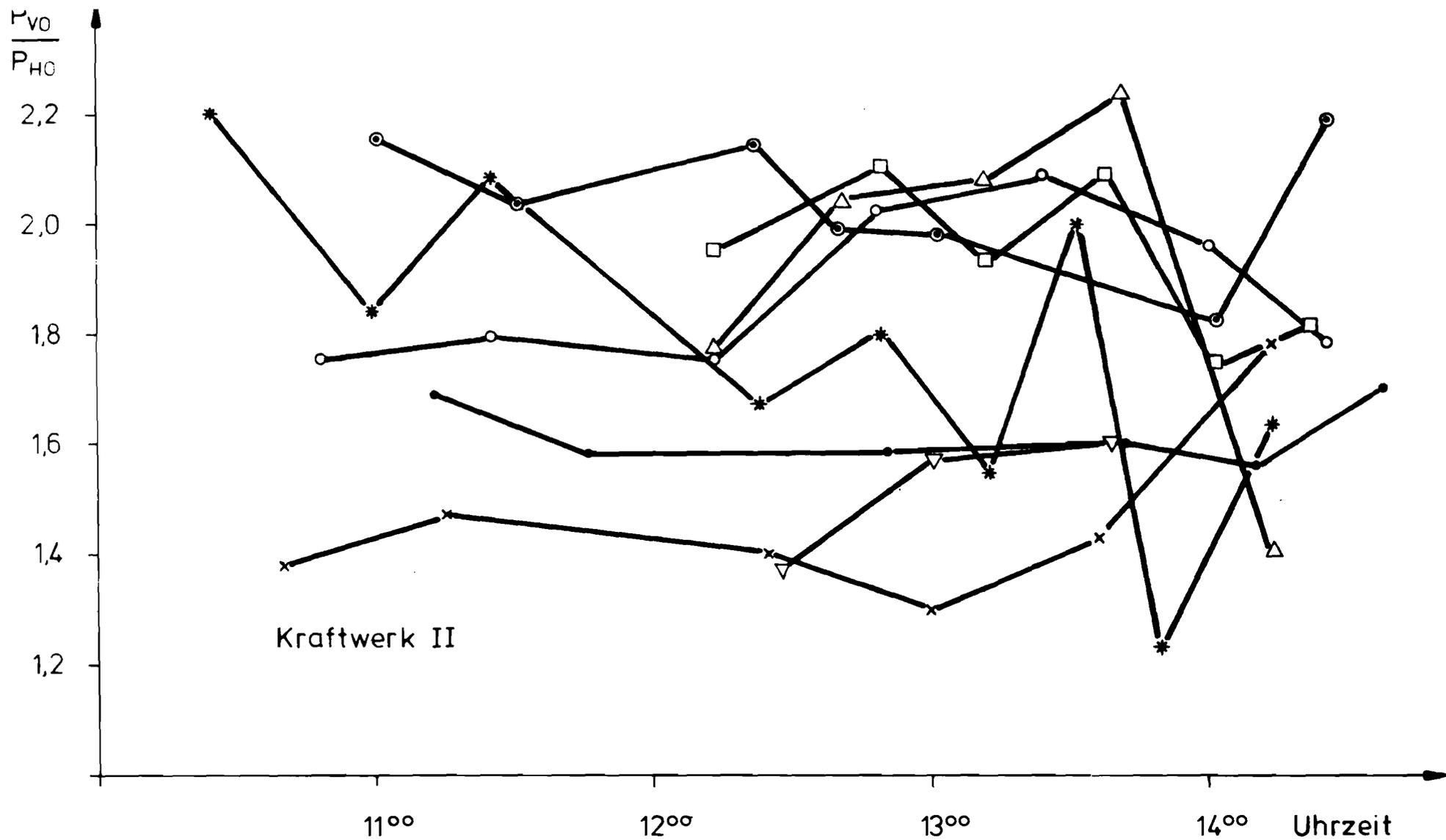


Abb. 11: Verlauf des Atmosphärensignals am Standort an verschiedenen Meßtagen Kraftwerk II (Symbole vergl. Kalibrierfunktion Kraftwerk II)

Die Einstellung der Geräteparameter der LIDAR-Anlage stimmte mit der der Testmessung überein. Es wurden drei Meßreihen aus je 20 Empfangssignalen erstellt. Die Impulsrate betrug 1 je Minute. Die hieraus resultierenden Atmosphärenquotienten  $P_{VO}/P_{HO}$  sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Auf Grund dieser Ergebnisse können gerätespezifisch bedingte Schwankungen der Atmosphärenbezugswerte ausgeschlossen werden. Die minimale Streuung der Werte, selbst über mehrere Stunden bei "konstanter" Atmosphäre, kann im Hinblick auf die Unsicherheit der grafisch-numerischen Auswertung vernachlässigt werden. Eine Drift ist nicht zu erkennen.

Im Anschluß daran wurden weitere Messungen durchgeführt mit dem Ziel, festzustellen, inwieweit möglicherweise Witterungsänderungen solche Schwankungen verursachen. Hierzu mußten die Messungen

- in einem Gebiet mit möglichst geringer Staubbelastung der Luft und
- bei wechselhafter Witterung

erfolgen.

Die Einstellung der Geräteparameter der LIDAR-Anlage stimmte wiederum mit der der Testmessung überein. Es wurden zwei Meßreihen über je 3 Stunden erstellt. Die Impulsrate betrug 2 je 20 Minuten und jeweils für die Dauer von 20 Minuten innerhalb jeder Meßreihe 1 je Minute.

Witterung:

hochliegende, geschlossene Wolkendecke - durchziehende, tieferliegende Einzelwolken - diffuse Sonneneinstrahlung - sich auflösende Bewölkung - direkte Sonneneinstrahlung - wieder zunehmende, dünne, hochliegende Wolkendecke

Windrichtung: SSW

Die Meßergebnisse und die hieraus resultierenden Atmosphärenquotienten sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 5: Atmosphärenquotient im Gebiet mit geringer Vorbelastung

Nr.	$P_{VO}/P_{HO}$	Nr.	$P_{VO}/P_{HO}$	Nr.	$P_{VO}/P_{HO}$
1	1,54	21	1,90	41	1,75
2	1,86	22	1,76	42	1,67
3	1,81	23	1,89	43	1,58
4	-	24	1,83	44	1,81
5	1,61	25	1,82	45	1,74
6	1,70	26	1,87	46	1,70
7	1,65	27	1,80	47	1,70
8	1,65	28	1,78	48	1,73
9	1,69	29	1,83	49	1,70
10	1,65	30	1,73	50	1,71
11	1,70	31	1,76	51	1,72
12	1,70	32	1,80	52	1,75
13	1,69	33	1,72	53	1,69
14	-	34	1,75	54	1,65
15	-	35	1,73	55	1,70
16	-	36	1,75	56	1,75
17	1,65	37	2,00	57	1,82
18	1,61	38	1,69	58	1,77
19	1,64	39	1,76	59	1,77
20	1,70	40	1,70	60	1,75

Mittelwert: 1,68

1,79

1,72

Standard-  
abweich.:

0,9756  
(4,5 %)

0,0753  
(4,2 %)

0,0546  
(3,2 %)

Mittelwert über alle Meßwerte: 1,73

Standardabweichung:

0,0813 (4,7 %)

Tabelle 6: Atmosphärenquotient, geringe Vorbelastung, wechselhafte Witterung.

Uhrzeit	Nr.	P <sub>VO</sub>	P <sub>HO</sub>	P <sub>VO</sub> /P <sub>HO</sub>
9.00	1	2,5	1,4	1,78
9.01	2	2,7	1,5	1,80
9.20	3	2,6	1,4	1,85
9.21	4	2,7	1,5	1,80
9.40	5	2,4	1,3	1,84
9.41	6	2,6	1,4	1,85
10.00	7	2,9	1,6	1,81
10.01	8	3,0	1,65	1,81
10.20	9	2,35	1,3	1,80
10.21	10	2,25	1,2	1,87
10.22	11	2,3	1,25	1,84
10.23	12	2,15	1,15	1,86
10.24	13	2,15	1,15	1,86
10.25	14	2,2	1,15	1,91
10.26	15	2,2	1,2	1,83
10.27	16	2,5	1,4	1,78
10.28	17	2,45	1,4	1,75
10.29	18	2,3	1,25	1,84
10.30	19	1,95	1,1	1,77
10.31	20	2,45	1,35	1,81
10.32	21	2,2	1,2	1,83
10.33	22	2,3	1,2	1,91
10.34	23	2,45	1,35	1,81
10.35	24	2,55	1,4	1,82
10.36	25	2,55	1,45	1,75
10.37	26	2,55	1,4	1,82
10.38	27	2,1	1,1	1,90
10.39	28	2,25	1,25	1,80
11.00	29	2,5	1,3	1,92
11.01	30	2,4	1,3	1,84
11.20	31	2,8	1,6	1,75
11.21	32	2,6	1,45	1,79
11.40	33	2,4	1,25	1,92

Tabelle 6: Fortsetzung

Uhrzeit	Nr.	$P_{VO}$	$P_{HO}$	$P_{VO}/P_{HO}$
1141	34	2,6	1,45	1,79
12.00	35	2,5	1,35	1,85
12.01	36	2,8	1,6	1,75
14.00	37	2,6	1,45	1,79
14.01	38	2,9	1,65	1,75
14.20	39	2,55	1,4	1,82
14.21	40	2,4	1,35	1,77
14.40	41	2,35	1,4	1,67
14.41	42	2,8	1,6	1,75
15.00	43	2,9	1,6	1,81
15.01	44	2,85	1,65	1,72
15.20	45	2,7	1,45	1,86
15.21	46	2,65	1,45	1,82
15.22	47	2,8	1,55	1,80
15.23	48	2,7	1,45	1,86
15.24	49	2,55	1,4	1,82
15.25	50	2,6	1,4	1,85
15.26	51	2,85	1,6	1,78
15.27	52	2,8	1,55	1,80
15.28	53	2,55	1,35	1,88
15.29	54	2,55	1,35	1,88
15.30	55	2,45	1,35	1,81
15.31	56	2,7	1,45	1,86
15.32	57	2,7	1,5	1,80
15.33	58	2,9	1,6	1,81
15.34	59	2,65	1,5	1,76
15.35	60	2,7	1,5	1,80
15.36	61	2,55	1,4	1,82
15.37	62	2,35	1,3	1,80
15.38	63	2,3	1,25	1,84
15.39	64	3,0	1,7	1,76
16.00	65	2,75	1,55	1,77

Tabelle 6: Fortsetzung

Uhrzeit	Nr.	$P_{VO}$	$P_{HO}$	$P_{VO}/P_{HO}$
16.01	66	2,6	1,4	1,85
16.20	67	2,7	1,5	1,80
16.21	68	2,9	1,65	1,75
16.40	69	2,85	1,55	1,83
16.41	70	2,75	1,5	1,83
17.00	71	2,8	1,5	1,86
17.01	72	2,6	1,4	1,85

Mittelwert über alle Meßwerte: 1,8158

Standardabweichung: 0,0478 (2,63 %)

Mittelwert über Meßwert 1-36: 1,8253

Standardabweichung: 0,0481 (2,63 %)

Mittelwert über Meßwert 37-72: 1,8064

Standardabweichung: 0,0462 (2,56 %)

Mittelwert über Meßwert 9-28: 1,8280

Standardabweichung: 0,0475 (2,6 %)

Mittelwert über Meßwert 45-64: 1,8205

Standardabweichung: 0,0358 (1,96 %)

Auf Grund der Meßergebnisse können auch Witterungsveränderungen als Ursache für Schwankungen der Atmosphärenbezugswerte ausgeschlossen werden.

Zum Vergleich sind nachfolgend die Bezugswerte aufgeführt, die im Verlauf von Emissionsmessungen in Industriegebieten ermittelt wurden.

#### K r a f t w e r k I

25.8. 1,95; 2,04; 2,28; 2,25  
Mittelwert: 2,13; Standardabweichung: 0,1606 (7,54 %)

26.8. 3,34; 2,0; 2,12; 2,14; 2,2; 2,36  
Mittelwert: 2,36; Standardabweichung: 0,4943 (20,94 %)

27.8. 2,14; 2,36; 2,12; 2,25; 1,98  
Mittelwert: 2,17; Standardabweichung: 0,1432 (6,59 %)

30.8. 1,85; 2,31; 2,23; 2,12; 2,025  
Mittelwert: 2,10; Standardabweichung: 0,1798 (8,53 %)

31.8. 1,57; 1,7; 1,75  
Mittelwert: 1,67; Standardabweichung: 0,0929 (5,55 %)

Mittelwert über alle Meßwerte: 2,13  
Standardabweichung: 0,3358 (15,77 %)

#### K r a f t w e r k I I

12.10. 1,69; 1,58; 1,6; 1,59; 1,56; 1,7  
Mittelwert: 1,62; Standardabweichung: 0,0597 (3,68 %)

13.10. 1,38; 1,47; 1,4; 1,3; 1,43; 1,78  
Mittelwert: 1,46; Standardabweichung: 0,1667 (11,42 %)

18.10. 1,95; 2,1; 1,93; 2,09; 1,74; 1,81  
Mittelwert: 1,93; Standardabweichung: 0,145 (7,48 %)

- 19.10. 1,77; 2,04; 2,08; 2,24; 1,39  
Mittelwert: 1,90; Standardabweichung: 0,3334 (17,50 %)
- 20.10. 1,75; 1,79; 1,75; 2,02; 2,09; 1,96; 1,68  
Mittelwert: 1,86; Standardabweichung: 0,1581 (8,48 %)
- 21.10. 2,15; 2,04; 2,14; 1,99; 1,98; 1,82; 2,19  
Mittelwert: 2,04; Standardabweichung: 0,1284 (6,28 %)
- 22.10. 2,2; 1,84; 2,09; 1,67; 1,8; 1,55; 2,0; 1,23; 1,64  
Mittelwert: 1,79; Standardabweichung: 0,2956 (16,52 %)
- Mittelwert über alle Meßwerte: 1,80  
Standardabweichung: 0,2554 (12,74 %)

Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß die Schwankungen der bei den Testmessungen an den Kraftwerken ermittelten Werte für den Atmosphären-Quotienten weder gerätespezifisch noch witterungsbedingt sind sondern vermutlich auf die wechselnde Bestung der Atmosphäre durch umliegende Emittenten zurückzuführen sind.

## 9. Kenngrößen

Soweit es das vorliegende Zahlenmaterial zuläßt, wurden unter Anwendung der üblichen mathematisch-statistischen Verfahren die folgenden Kenngrößen ermittelt.

### 9.1. Nachweisgrenze

Nach KAISER [1] ist die Nachweisgrenze aus den Schwankungen des "leer" ablaufenden Verfahrens zu ermitteln (Blindwertstreuung). Für ein aufzeichnendes Verfahren, wie es hier vorliegt, bedeutet das: es ist die kleinste Quantität des Meßobjekts zu ermitteln, die zu einer sich deutlich aus dem Untergrundrauschen abhebenden Anzeige führt.

Das Leerverfahren besteht hier in der Aufzeichnung des Atmosphärensignals. Aus den Schwankungen dieser Atmosphärensignale bei konstanter Atmosphäre wurde zunächst der numerische Wert für die LIDAR-Meßgröße errechnet. Für den Rauchfahndurchmesser wurde ein Mittelwert von 7,5 m eingesetzt. Es ergab sich:

Mittelwert über 55 Blindwerte:  $\bar{L}_{bl} = 0,00803 \text{ 1/m}$

Standardabweichung:  $S_{bl} = 0,00297 \text{ 1/m}$

und somit für den Wert für die LIDAR-Meßgröße an der Nachweisgrenze

$$\underline{L} = \bar{L}_{bl} + 3 S_{bl} = 0,01694 \text{ 1/m} .$$

Aus den Kalibrierfunktionen ergeben sich hieraus die entsprechenden Staubmassenkonzentrationen:

Kraftwerk I:  $\underline{K} = 99 \text{ mg/m}^3$

Kraftwerk II:  $\underline{K} = 90 \text{ mg/m}^3$

Diese Nachweisgrenze stellt die Leistungsgrenze des Verfahrens unter optimalen Bedingungen dar, d. h. geringe Vorbelastung der Atmosphäre mit geringer Schwankungsbreite der Nullsignale.

Tatsächlich ist aber bei diesem Meßverfahren eine v a r i a b l e Nachweisgrenze in Betracht zu ziehen. In Ballungsräumen liegen die Atmosphärenbezugswerte höher und sind dabei stärkeren Schwankungen unterworfen. Aus systememanenten Gründen ist es nicht möglich, in jedem Augenblick einen Atmosphärenbezugswert zu ermitteln und bei einem zeitgleichen Meßwert in Abzug zu bringen. In Ballungsräumen wird die zeitliche Variation der Schwebstoffkonzentration des Untergrundes und damit des Störpegels größer. Die "effektive Nachweisgrenze" liegt höher und man gelangt in den Bereich der Emissionsgrenzwerte.

Der in den Abbildungen 10 und 11 dargestellte Verlauf der Atmosphärenbezugssignale basiert auf Referenzmessungen, die in Abständen von 30 bis 20 Minuten vorgenommen wurden. Durch Verringerung des Referenzzeitintervalles lassen sich Bezugs- und Meßwerte besser einander zuordnen. Als praktikabel haben sich die Referenzmessungen als Stützmessungen in Abständen von 5 Minuten erwiesen.

Geht man von einer 5minütigen Änderung der in den Abbildungen 10 und 11 dargestellten Atmosphärenbezugssignale aus und setzt man voraus, daß die zeitlichen Schwankungen innerhalb dieser 5-Minuten-Intervalle nicht größer sind als diejenigen der getesteten 20-Minuten-Intervalle, wird die für den praktischen Meßeinsatz relevante Nachweisgrenze bei etwa  $150 \text{ mg/m}^3$  zu liegen kommen.

## 9.2. Unsicherheitsbereich

Die Streuung des Verfahrens wurde über eine Regressionsanalyse ermittelt. Der Unsicherheitsbereich wurde dabei aus der Streuung um die Regressionslinie in Ordinantenrichtung errechnet. Er liegt damit etwas günstiger als der nach den üblichen Verfahren, nämlich aus der Wiederholungs- bzw. Doppelbestimmungs-Standardabweichung, ermittelte Unsicherheitsbereich. Beide Verfahren sind im vorliegenden Fall jedoch nicht anwendbar, was in der Besonderheit des Meßverfahrens begründet ist.

Außerdem wurde bei diesen Berechnungen von der Annahme ausgegangen, daß die Streuung des Bezugsmeßverfahrens klein ist gegenüber der des LIDAR-Meßverfahrens. Bei den in Doppelbestimmung durchgeführten gravimetrischen Vergleichsmessungen ergab sich eine relative Standardabweichung von  $\pm 6 \%$ .

Die mittlere Standardabweichung über den gesamten Bereich der Regressionslinie (bei Kraftwerk II bis  $760 \text{ mg/m}^3$ ) beträgt:

$$\text{Kraftwerk I: } \pm 26 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{Kraftwerk II: } \pm 43 \text{ mg/m}^3$$

Für das Verfahren wird damit eine Unsicherheit U (P = 95 %) von  $\pm 30 \%$  ausgewiesen.

Bei diesen Berechnungen wurden Referenzzeitintervalle von 20 Minuten zugrundegelegt. Für den ungünstigsten Fall, nämlich einer plötzlichen Änderung der Atmosphäreneigenschaften unmittelbar nach durchgeführter Referenzmessung und damit auch Änderung des Referenzsignales auf den Wert der nachfolgenden Stützpunktmessung,

vergrößert sich die Unsicherheit bei 20minütigem Referenzzeitintervall um 12 % bzw. um 3 %, bei 5minütigem Abstand zwischen den Bezugswerten.

## 10. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Testmessungen an zwei Steinkohlekraftwerken stellen sich zusammenfassend wie folgt dar:

- a) Zwischen LIDAR-Meßgröße und Staubmassenkonzentration in der Rauchfahne ist über eine Regressionsanalyse ein Zusammenhang nachgewiesen worden.
- b) Für den Arbeitsbereich zwischen 150 und 760 mg/m<sup>3</sup> ergeben sich aus den durchgeführten Regressionsanalysen die Korrelationskoeffizienten von 0,96 bzw. 0,98.
- c) Die effektive Nachweisgrenze liegt bei 150 mg/m<sup>3</sup>.
- d) Bei Referenzmessungen im 5-Minutenabstand beträgt der Unsicherheitsbereich U (P = 95 %) ± 33 %.
- e) Wasserdampfanteile in der Rauchfahne bis zu 8,5 Vol % haben keinen signifikanten Einfluß auf das Meßergebnis.
- f) Das Verfahren kann außer bei Nebel bzw. starkem Niederschlag bei allen sonstigen atmosphärischen Bedingungen (auch Nachtbetrieb) eingesetzt werden.
- g) Der Zeitaufwand für Auf- und Abbau im Rahmen eines Standortwechsels ist bei der vorhandenen Anlagenausführung mit mindestens 90 Minuten anzusetzen.
- h) Bei der gegenwärtigen, verbesserten konstruktiven Ausführung der Anlage sind Bewegungen im Rahmen eines mobilen Einsatzes für die Justierung und die Funktion von Optik und Elektronik von untergeordneter Bedeutung.

Im Hinblick auf die ermittelten Daten für Nachweisgrenze und Unsicherheit sind nachfolgende Einsatzmöglichkeiten denkbar:

- a) Zur Überwachung von Kraftwerken in Ballungsräumen, wenn um den Faktor 2 bis 3 über der Emissionsbegrenzung liegende Staubmassenkonzentrationen zu erwarten sind.
- b) In Sonderfällen zur Ermittlung geringer Grenzwertüberschreitungen an isoliert liegenden Kraftwerken, wo mit geringer Untergrundstreuung gerechnet werden kann.
- c) In Sonderfällen zur qualitativen Untersuchung der Emissionsstruktur von Quellen, d. h. Ermittlung zeitlicher Verläufe der Emissionen in Abhängigkeit von der Betriebsfahrweise.

Diese Ergebnisse haben nur Gültigkeit für eine Anwendung bei Steinkohlefeuerungen. Die Übertragbarkeit auf andere Quellentypen muß durch entsprechende Untersuchungen überprüft werden.

## S u m m a r y

In this report, a description of a mobile LIDAR apparatus is presented. Besides sections on the construction and operating principles of the facility, which was developed for remote monitoring of dust emissions, results of test measurements on plumes from bituminous coal firing are also given. The instrument was calibrated through simultaneous manual gravimetric measurements as described in VDI Guideline 2066. Cross interference with water vapor in the plume and a rapidly changing background level in the atmosphere were also checked for their effects on the measurements. Based on the technical characteristics and the boundary conditions to be considered, possible uses for the LIDAR apparatus are described.

## S c h r i f t t u m

- [1] Kaiser, H.:  
Zur Definition der Nachweisgrenze, der Garantiegrenze  
und der dabei benutzten Begriffe.  
Z. anal. Chem., Bd. 216 (1966), S. 80 - 94
- [2] VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1  
Messen von Partikeln. Staubmessungen in strömenden  
Gasen. Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung.  
Übersicht.
- [3] VDI-Richtlinie 2449 Blatt 1  
Prüfkriterien von Meßverfahren. Datenblatt zur Kenn-  
zeichnung von Analysenverfahren für Gas-Immissions-  
messungen.
- [4] VDI-Richtlinie 2450  
Messen von Emission, Transmission und Immission luft-  
verunreinigender Stoffe, Begriffe, Definitionen, Erläu-  
terungen.