

ENTWICKLUNG EINES OPTISCHEN KONZENTRATIONS-
MESSVERFAHRENS ZUR ERMITTLUNG DES TURBULENTEN
MASSENAUSTAUSCHS IN EIN- UND ZWEIPHASIGEN
AUFTRIEBSSTRAHLEN

von

B. Barczewski und H. Kobus

SFB 80 / EM / 24
April 1974

SONDERFORSCHUNGSBEREICH 80
AUSBREITUNGS- UND TRANSPORTVORGÄNGE IN STRÖMUNGEN
UNIVERSITÄT KARLSRUHE

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
VERZEICHNIS DER BILDER	2
1. EINLEITUNG UND VERSUCHSPROGRAMM	3
2. PRINZIP DER OPTISCHEN KONZENTRATIONSMESSUNGEN	8
2.1 Tracermessungen	9
2.1.1 Tracermessung mit Lichtleitersonden	10
2.2 Luftblasenmessung	11
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSERGEBNISSE	13
3.1 Tracermessungen	13
3.2 Optik und Eichküvette zur Blasenkonzentrationsmessung im Durchstrahlungsverfahren	17
3.3 Optik zur Blasenkonzentrationsmessung im Reflexionsverfahren	19
3.4 Elektrischer Aufbau und Signalverarbeitungselektronik	23
3.5 Messung der Luftblasenkonzentration	32
4. SCHLUSSWORT	36
LITERATURVERZEICHNIS	37

	VERZEICHNIS DER BILDER	Seite
1	Vergleich verschiedener Leitfähigkeitsmeßsonden	5
2	Lichtschrankensonde zur Konzentrationsmessung einer Tracersubstanz	14
3	Eichkurve der Lichtleitersonde	15
4	Eichkurve der Lichtleitersonde, 2 Wellenlängen, 2 Tracer	16
5	Eichversuchsstand zur Blasenkonzentrationsmessung im Durchstrahlverfahren	18
6	Foto des Eichversuchsstandes	17
7	Versuchsaufbau zur Messung der Blasenkonzentration im Reflexionsverfahren	20
8	Stabilisiertes Netzgerät, Lampenversorgung	22
9	Foto der Lampenversorgung	23
10	Zeitschalter 2 sec - 3600 sec	25
11	Lageplan und Bestückungsliste des Zeitschalters	26
12	Integrationseinheit	27
13	Polaritätsanzeige	28
14	Frequenzteiler in BCD Zählweise	31
15	Foto der Signalverarbeitungselektronik	
16	Abhängigkeit der Lichtschwächung von der Blasenkonzentration, Durchstrahlverfahren	33
17	Abhängigkeit der Lichtschwächung von der Blasenkonzentration, Reflexionsverfahren	34

1. EINLEITUNG UND VERSUCHSPROGRAMM

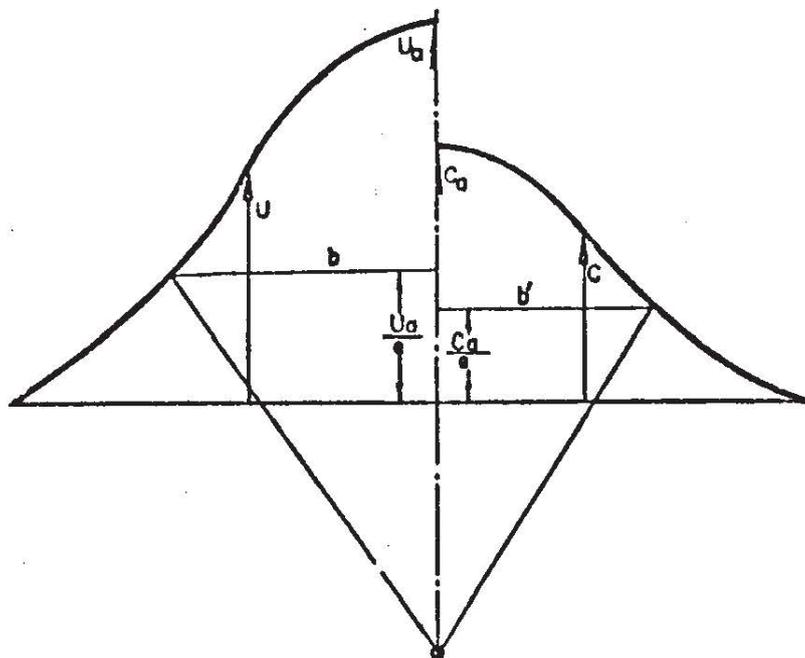
Im Rahmen des Teilprojekts A3 "Luftschleier in Querströmung", dessen Ergebnisse in [1], [2] und [3] wiedergegeben sind, wurden unter anderem Messungen zur Bestimmung der Blasenschlupfgeschwindigkeit Δu_b und des Breitenverhältnisses von Massen- zu Impulsaustausch durchgeführt. Dabei ist die Blasenschlupfgeschwindigkeit

$$\Delta u_b = u_b - u \quad (1.1)$$

gleich der Differenz aus örtlicher Blasengeschwindigkeit u_b und örtlicher Wassergeschwindigkeit u . Das Breitenverhältnis β

$$\beta = \frac{b'}{b} \quad (1.2)$$

ergibt sich als Quotient zweier, in der folgenden Definitionsskizze angegebener, charakteristischer Breiten b und b'



Dabei ist:

- u_b = örtliche Blasengeschwindigkeit
- u = örtliche Wassergeschwindigkeit
- u_a = Wassergeschwindigkeit in der Strahlachse
- c_a = Volumenkonzentration der Luftblasen in der Strahlachse

Δu_b und β spielen eine große Rolle bei der Berechnung der Ausbreitung zweiphasiger Auftriebstrahlen und damit bei der Bemessung von Luftschleieranlagen für verschiedene Anwendungsfälle, z.B. bei Preßluftölsperren, Anlagen zur

Eisfreihaltung, Anlagen zur künstlichen Belüftung, Anlagen zur Beeinflussung von Dichteströmungen und Dichteschichtungen, etc. Wegen der fehlenden Meßtechnik kann Δu_b im Luftschleier nicht direkt gemessen werden, und die Ermittlung von β bereitet ebenfalls erhebliche meßtechnische Schwierigkeiten. Man ist deshalb auf entsprechend grobe Schätzungen angewiesen. Einer Annahme für die Schlupfgeschwindigkeit Δu_b kann die Beziehung für die Aufstiegs geschwindigkeit einzelner Luftblasen in Wasser zugrundegelegt werden. Eine erste Annahme für

Δu_b liegt demnach bei 25 cm/s. Für das Ausbreitungsverhältnis gibt es widersprüchliche Schätzwerte. Sie liegen zwischen 0,2 [4] und etwa 1 [5]. Die eigenen Messungen [3] ergaben einen Wert von $\beta = 0,68$. Die Berechnung von β erfolgte nach (1.2) aus den mit Mikroflügeln gemessenen Geschwindigkeitsprofilen und den im Differenzverfahren mit Leitfähigkeitsmeßsonden ermittelten Konzentrationsprofilen.

Für Δu_b ergibt sich unter Annahme Gaußscher Verteilungen für Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofile

$$u(x) = u_a e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^2} \quad 1.3)$$

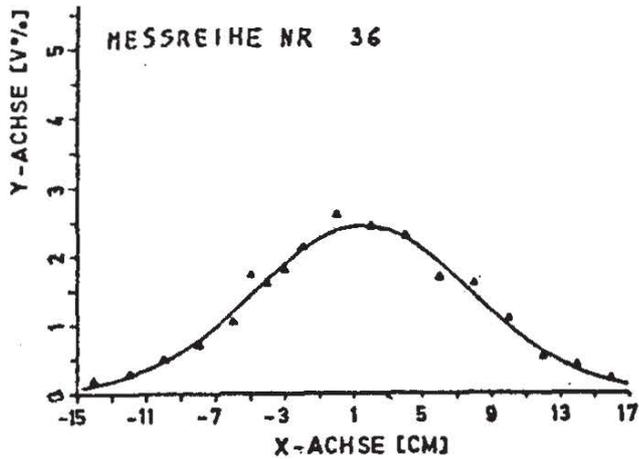
$$c(x) = c_a e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^2} = c_a e^{-\left(\frac{x}{\lambda b}\right)^2} \quad 1.4)$$

aus der Kontinuitätsgleichung und der bekannten, pro Breitereinheit ausströmenden Luftmenge q_L

$$\Delta u_b = \frac{q_L}{c_a \lambda b} \sqrt{\frac{1 + \lambda^2}{\pi}} - u_a \quad (1.5)$$

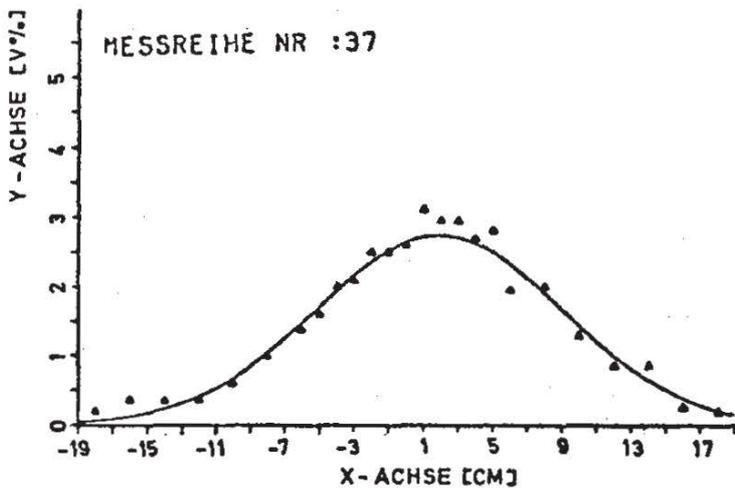
Die Blasenschlupfgeschwindigkeit kann also aus den gemessenen Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilungen berechnet werden.

Einschränkend zur Konzentrationsmessung mit Leitfähigkeitssonden muß gesagt werden, daß dies Verfahren im vorliegenden Fall nur qualitative Messungen ermöglichen. Dies wird durch Bild 1 deutlich gemacht, in dem drei mit verschiedenen Sonden unter gleichen Bedingungen ermittelte Konzentrationsprofile aufgenommen sind. Qualitativ zeigt sich bei allen Sonden die gleiche Verteilung, erkenntlich an der etwa gleichen Halbwertsbreite. Die gemessenen Achskonzentrationen schwanken jedoch zwischen 2,5 und 6,5 Vol % Luftanteil: das entspricht einem relativen Fehler von über 150 %. Wie Messungen, die auch in anderen Versuchsständen durchgeführt wurden, zeigten, hängen die auf diese Weise ermittelten Konzentrationsmeßwerte unter anderem



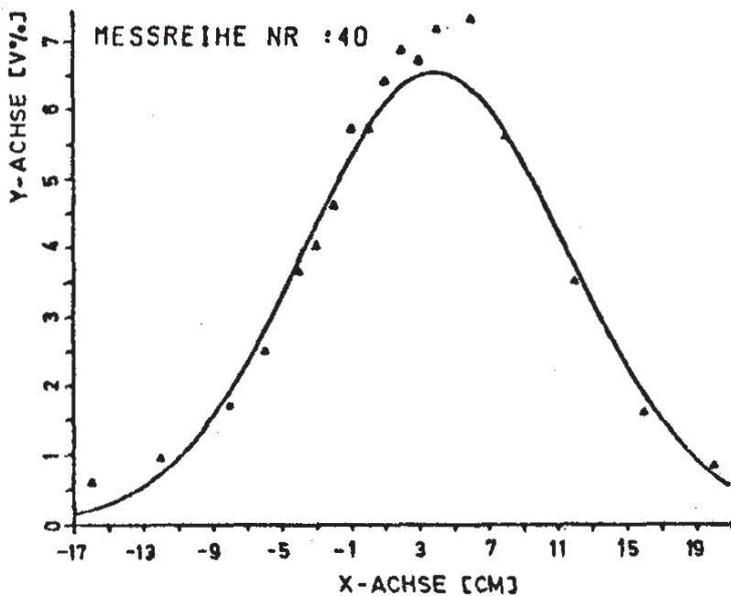
HOEHE =80.00
LUFTMENGE =0.0080
QUERGESCHWINDIGKEIT =0.00
MAX.KONZENTRATION =2.45
HALBWERTSBREITE =7.45
VERSCHIEBUNG =1.50

Sonde 2a



HOEHE =80.00
LUFTMENGE =0.0080
QUERGESCHWINDIGKEIT =0.00
MAX.KONZENTRATION =2.74
HALBWERTSBREITE =8.40
VERSCHIEBUNG =1.90

Sonde 2b



HOEHE =80.00
LUFTMENGE =0.0080
QUERGESCHWINDIGKEIT =0.00
MAX.KONZENTRATION =6.53
HALBWERTSBREITE =8.98
VERSCHIEBUNG =3.95

Sonde 3a

ab von Blasengröße, Strömungsgeschwindigkeit, dem Winkel zwischen Sondenachse und Strömungsrichtung, Sondenform- und -größe, Verkalkung der Sonde sowie von Salz- und Schmutzgehalt des Wassers.

Somit war eine Berechnung der Blasenschlupfgeschwindigkeit wegen der Ungenauigkeit der gemessenen Achskonzentrationen C_a nicht möglich. Die nach (1.5) mit den aus Leitfähigkeitsmessungen ermittelten Blasenkonzentrationsverteilungen berechneten Blasenschlupfgeschwindigkeiten ergaben keine sinnvollen Werte. Dies ist eine weitere Bestätigung für die Behauptung, daß Leitfähigkeitsmessungen nur sehr eingeschränkt zur Konzentrationsbestimmung in Zweiphasenströmungen verwendet werden können.

Da eine geeignete Methode zur Messung des zeitlichen Mittelwertes von Volumenkonzentrationen in Zweiphasenströmungen weit über den Rahmen des Projektes A3 hinaus von großer Bedeutung ist, wurden andere mögliche Meßverfahren untersucht. Für eine geeignete Methode wurden die folgenden Bewertungskriterien herangezogen.

1. Störungsfreie Messung; d.h. keine oder nur sehr kleine Sonden
2. Unabhängigkeit des Meßsignals von Blasengröße, Blasengeschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit
3. Direkte Angabe der (Dichte oder) Konzentration
4. Genaues und reproduzierbares Meßverfahren
5. Einfachheit der Messung und Auswertung
6. Verwendbarkeit des Meßverfahrens für andere Anwendungsfälle
7. Möglichkeit zum Ausbau für Naturmessungen.

Kein Meßverfahren kann alle Kriterien vollständig erfüllen. Vom Prinzip her erscheinen jedoch optische Methoden besonders erfolgversprechend, da sie den obigen Kriterien weitestgehend Genüge tragen. Insbesondere gewährleisten sie störungsfreie Messungen und völlige Unabhängigkeit von Blasen- und Strömungsgeschwindigkeit.

Im Rahmen der weiteren Arbeiten des Projektes mußte demnach durch entsprechende Vorversuche geklärt werden, ob photometrische Methoden, wie sie in der Chemie zur Konzentrationsmessung, Trübungsmessung u.s.w. verwendet werden, bei entsprechender Modifizierung auch zur Konzentrationsmessung in Zweiphasenströmungen und insbesondere turbulente Wasser-Luftgemischen geeignet sind. Da ähnlich wie beim Luftschleier bzw. beim zweiphasigen Auftriebstrahl auch im einphasigen Auftriebstrahl der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeits- und

Konzentrationsverteilung noch weitgehend unbekannt bzw. experimentell unbestätigt ist, sollen auch für den einphasigen Fall Konzentrations- und Geschwindigkeitsprofile ermittelt werden. Die Messung der Konzentrationsprofile, die zur Berechnung des Breitenverhältnisses β notwendig sind, kann auch im einphasigen Fall optisch erfolgen. Dazu wird die Konzentration einer dem Einleitungsfluid zugegebenen Tracersubstanz bestimmt.

Die zur Überprüfung der Meßmethoden notwendigen Eichversuchsstände mit der entsprechenden Optik und Elektronik mußten aufgebaut werden und sowohl für den einphasigen als auch für den zweiphasigen Fall getestet werden.

Weiterhin muß geprüft werden, ob optische Methoden zur Messung der Blaugeschwindigkeitsverteilung [6] und der Blasengrößenverteilung [7] in turbulenten Wasserluftgemischen geeignet sind, bzw. welche andere Meßmethoden sich zur Bestimmung dieser Größen anbieten.

2. PRINZIP DER OPTISCHEN KONZENTRATIONSMESSUNGEN

Grundlage optischer, d.h. spektralphotometrischer Konzentrationsmeßverfahren ist das Bouguer-Lambert-Beersche Gesetz über die Lichtabsorption, das sich herleiten läßt [8] aus dem Ansatz, daß der Energieverlust der einfallenden Strahlung in einem Schichtelement des homogenen absorbierenden Mediums der Dicke ds des Schichtelements und der Intensität der einfallenden Strahlung proportional ist.

$$-d\vartheta = m_n \cdot \vartheta \cdot ds \quad (2.1)$$

Durch Integration ergibt sich

$$\ln \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = -m_{n\lambda} \cdot s \quad (2.2)$$

oder

$$\lg \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = -m_\lambda \cdot s \quad (2.3)$$

mit :

- ϑ_0 = in die Meßstrecke einfallender Lichtstrom
- ϑ = aus der Meßstrecke austretender Lichtstrom
- s = Schichtdicke der Meßstrecke
- $m_{n\lambda}$ = natürlicher Extinktionsmodul
- m_λ = dekadischer Extinktionsmodul

Handelt es sich bei dem durchstrahlten Medium nicht um einen einheitlichen Stoff, sondern um die Lösung eines absorbierenden in einem nichtabsorbierenden Stoff, so sind die Extinktionsmodulen der Konzentration c des absorbierenden Stoffes proportional

$$m_\lambda = \epsilon_\lambda \cdot c \quad (2.4)$$

wobei ϵ_λ der dekadischen Extinktionskoeffizient, eine wellenlängenabhängige stoffspezifische Konstante ist.

Somit ergibt sich als Grundgesetz der Absorptionsspektroskopie aus (2.3) und (2.4) das Lambert-Beersche Gesetz

$$\lg \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = -\epsilon_\lambda \cdot c \cdot s \quad (2.5)$$

oder

$$c = -\frac{1}{\epsilon_\lambda \cdot s} \lg \frac{\vartheta}{\vartheta_0} \quad (2.6)$$

Dieses Gesetz gilt für paralleles monochromatisches Licht (d.h. für konstantes ϑ_0), falls das Lösungsmittel nicht absorbiert und die äußeren Bedingungen, z.B. die Temperatur, konstant sind.

2.1 Tracermessung

Aus (2.6) folgt sofort, daß durch Messung der Lichtströme ϑ_0 und ϑ bei einer vorgegebenen Wellenlänge die Konzentration der Tracersubstanz bestimmt werden kann, falls die durchstrahlte Schichtdicke s und die Konstante ϵ_λ des Tracers bekannt sind. Um Reflexions-, Streu- und Absorptionsverluste durch Behälterwände, Lösungsmittel oder Fremdstoffteilchen auszugleichen, darf als Lichtstrom ϑ_0 nicht der von der Lichtquelle ausgestrahlte Lichtstrom angesetzt werden. Es muß daher als Referenzlichtstrom ϑ_0 der durch die Meßstrecke durchtretende Lichtstrom angesetzt werden, falls diese keine Tracersubstanz enthält. Eine bessere Methode, die auch Veränderungen der Störeinflüsse, z.B. veränderliche Lampenintensität berücksichtigt, besteht darin, ϑ_0 als Lichtstrom eines Referenzstrahles zu messen, der eine örtlich getrennte, sonst völlig gleiche Meßstrecke ohne die nachzuweisende Tracersubstanz durchlaufen hat. Diese als Zweistrahilverfahren bekannte Methode eignet sich daher sehr gut zur Konzentrationsmessung bei Einleitungen in geschlossenen Versuchskreisläufen, weil hierbei die ansteigende Grundkonzentration automatisch berücksichtigt werden kann.

Unter der Voraussetzung, daß die Konzentration der zugegebenen Tracersubstanz in der durchstrahlten Meßstrecke konstant ist, läßt sich somit eine kontinuierliche völlig störungsfreie Konzentrationsmessung durchführen. Ist die Konzentration der Tracersubstanz, in der Meßstrecke nicht konstant, so wird (automatisch) der Mittelwert der Konzentration gemessen. Im Vergleich zu anderen Meßverfahren können Konzentrationsveränderungen extrem schnell registriert werden (Verzögerung $< 10^{-6}$ sec.)

Diese Methode bietet zudem noch einen weiteren wesentlichen Vorteil. Durch Verwendung von zwei (oder mehr) diskreten Lichtwellenlängen gleichzeitig können die Konzentrationen von zwei (oder mehr) Tracersubstanzen gleichzeitig gemessen und damit bei vielen Problemen ganz erhebliche Verkürzungen der Meßzeit erzielt werden. Im einfachsten Fall eines Gemisches aus zwei Stoffen A und B der Konzentrationen C_A und C_B gilt bei zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 für die Extinktionsmodulen m_1 und m_2

$$m_1 = \epsilon_{A1} \cdot C_A + \epsilon_{B1} \cdot C_B \quad (2.7)$$

$$m_2 = \epsilon_{A_2} \cdot c_A + \epsilon_{B_2} \cdot c_B \quad (2.8)$$

mit ϵ_{A_1} = Extinktionskoeffizient des Stoffes A bei der Wellenlänge λ_1

ϵ_{B_1} = Extinktionskoeffizient des Stoffes B bei der Wellenlänge λ_1

ϵ_{A_2} = Extinktionskoeffizient des Stoffes A bei der Wellenlänge λ_2

ϵ_{B_2} = Extinktionskoeffizient des Stoffes B bei der Wellenlänge λ_2

Sind die Extinktionskoeffizienten bekannt, so ergibt sich für die Konzentrationen der Stoffe A und B.

$$c_A = \frac{m_1 \epsilon_{B_2} - m_2 \epsilon_{B_1}}{\epsilon_{A_1} \epsilon_{B_2} - \epsilon_{A_2} \epsilon_{B_1}} \quad (2.9)$$

$$c_B = \frac{m_2 \epsilon_{A_1} - m_1 \epsilon_{A_2}}{\epsilon_{A_1} \epsilon_{B_2} - \epsilon_{A_2} \epsilon_{B_1}} \quad (2.10)$$

Erreicht man durch geschickte Wahl der Tracer und der Lichtwellenlänge, daß Tracer A nur das Licht der Wellenlänge λ_1 und Tracer B nur das Licht der Wellenlänge λ_2 absorbiert, d.h. daß $\epsilon_{A_2} = \epsilon_{B_1} = 0$ sind, so vereinfacht sich die gleichzeitige Konzentrationsmessung. Dann ist

$$c_A = - \frac{1}{\epsilon_{A_1} \cdot s} \lg \frac{\phi_{\lambda_1}}{\phi_{0\lambda_1}} \quad (2.11)$$

$$c_B = - \frac{1}{\epsilon_{B_2} \cdot s} \lg \frac{\phi_{\lambda_2}}{\phi_{0\lambda_2}} \quad (2.12)$$

mit:

$\phi_{0\lambda_1}, \phi_{\lambda_1}$ = Lichtströme der Wellenlänge λ_1

$\phi_{0\lambda_2}, \phi_{\lambda_2}$ = Lichtströme der Wellenlänge λ_2

Damit ist die gleichzeitige Konzentrationsmessung zweier Tracer auch ohne Rechenaufwand möglich.

2.1.1 Tracermessung mit Lichtleitern

Ein wesentlicher Nachteil für Messungen an größeren Versuchsständen, z.B. in wasserbaulichen Versuchen, besteht darin, daß die gesamte Meßstrecke durchstrahlt werden muß. Damit ist die Methode in der zuvor beschriebenen Form im wesentlichen

auf die Messung zweidimensionaler Probleme beschränkt.

Um auch in Versuchsrinnen oder größeren Versuchsständen kontinuierlich und (nahezu) punktförmige Konzentrationsmessungen durchführen zu können, wurden Überlegungen angestellt, unter welchen Bedingungen Lichtleiter zum Bau von möglichst kleinen Konzentrationsmeßsonden verwendet werden können. Ein Lichtleiter ist eine flexible Glasfaser, die üblichen Durchmesser liegen zwischen 0,05 mm und 1 mm, mit einem Kern aus hochbrechendem Glas der von einem Mantel aus niedrigbrechendem Gals umhüllt ist. Wegen der Totalreflexion an der Grenzfläche der beiden Gläser ermöglichen Lichtleiter die Übertragung von Licht auf beliebig gekrümmten Wegen. Somit besteht die Möglichkeit, das Licht von der Lichtquelle ohne äußere Störungen mit einem Lichtleiter an den gewünschten Meßpunkt (in der Rinne) zu leiten und einem zweiten Lichtleiter, dessen Eintrittsöffnung vom ersten beleuchtet wird, das Licht zum Photodetektor zu leiten.

Da das Licht aus dem Lichtleiter stets mit einem bestimmten Öffnungswinkel austritt, abhängig vom Fasertyp und vom Brechungsindex des Mediums (zwischen 22° und 120° gegen Luft und ca. 15° und 80° gegen Wasser) und damit ϑ_0 eine Funktion des Abstands der Lichtleiter ist, können Konzentrationsmessungen mit Lichtleitersonden nicht ohne Einschränkungen durchgeführt werden. Der am Photodetektor gemessene Lichtstrom hängt neben der Konzentration c vom Brechungsindex der Lösung und auch ohne Tracersubstanz vom Abstand s der beiden Lichtleiter, sowie von der Lösung der Lichtleiter ab. Setzt man voraus, daß durch Änderungen der Tracerkonzentration der Brechungsindex (und damit der Öffnungswinkel des Lichtstrahls) nur sehr geringfügig geändert wird, so können unter gleichen apparativen Bedingungen (Länge der Lichtleiter, Abstand $s = \text{const}$) Konzentrationsmessungen mit zuvor geeichten Lichtsonden durchgeführt werden.

2.2. Luftblasenmessung

Bei der Herleitung des Lambert-Beerschen Gesetzes wird vorausgesetzt, daß der Energieverlust des eingestrahlt Lichts der Schichtdicke ds und der Intensität des einfallenden Lichts proportional ist. Diese Bedingung ist für die mikroskopische, d.h. atomare Lichtabsorption in verdünnten Lösungen erfüllt. Im Fall der zweiphasigen Gemische, d.h., z.B. der Wasserluftgemische, tritt an die Stelle der atomaren Absorption des Lichtverlusts durch die von den einzelnen Blasen, Tropfen oder Feststoffteilchen bewirkte Brechung, Reflexion, Streuung, Beugung und Linsenwirkung, d.h. ein "makroskopischer" Energieverlust. Nimmt man die Gültigkeit statistischer Gesetze an, d.h. eine entsprechend lange Mittelungszeit

und große Schichtdicke s sowie einen Durchmesser des Lichtstrahls, der größer ist als die größten Blasen, Tropfen oder Teilchen, so sollte sich auch für diese "makroskopische" Lichtabsorption eine Lambert-Beersche Gesetzmäßigkeit für die Konzentrationsabhängigkeit der Lichtschwächung ergeben, d.h. es sollte gelten:

$$\vartheta = \vartheta_0 \cdot e^{-\epsilon c d} \quad (2.13)$$

Damit sollten aus den gemessenen Extinktionen $E = \lg \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ Rückschlüsse auf die Konzentration der "absorbierenden" Phase möglich sein, wobei die Abweichungen von dieser Gesetzmäßigkeit je nach den Abweichungen von der angenommenen Statistik relativ groß sein können. Diese Extinktionsmessung wird z.B. angewendet zur Bestimmung von Feststoffkonzentrationen mittels Trübungsmessungen [9], [10]. Außerdem können auf diese Art mit einigen Einschränkungen Phasengrenzflächen bestimmt werden [11].

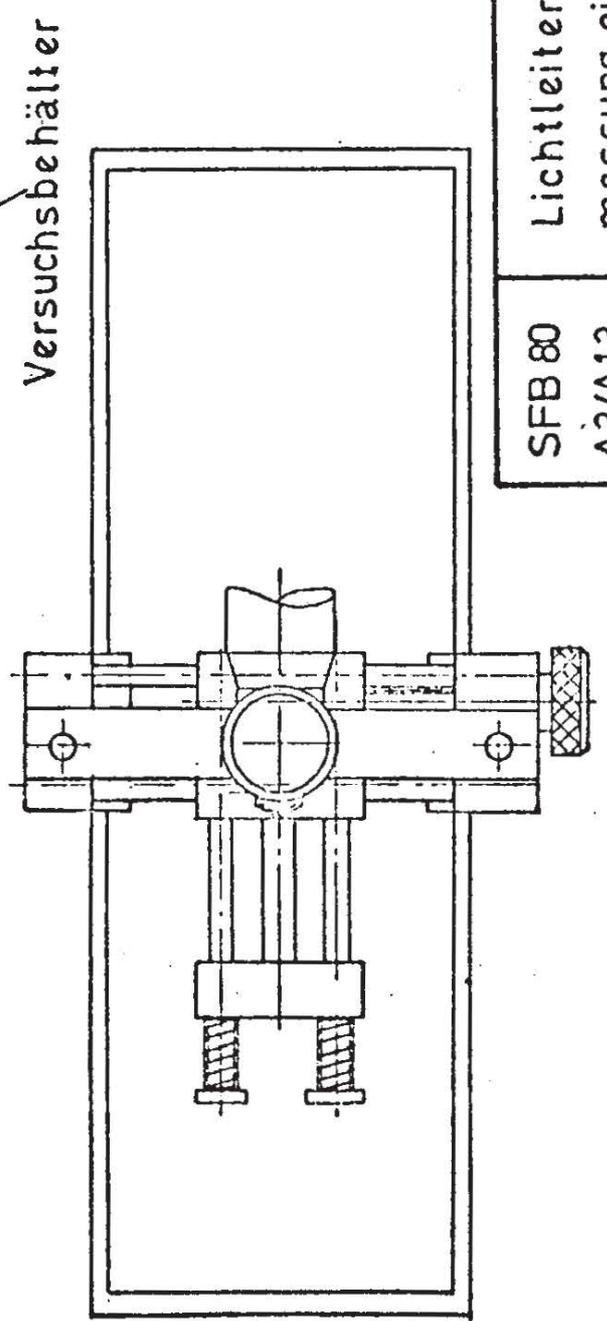
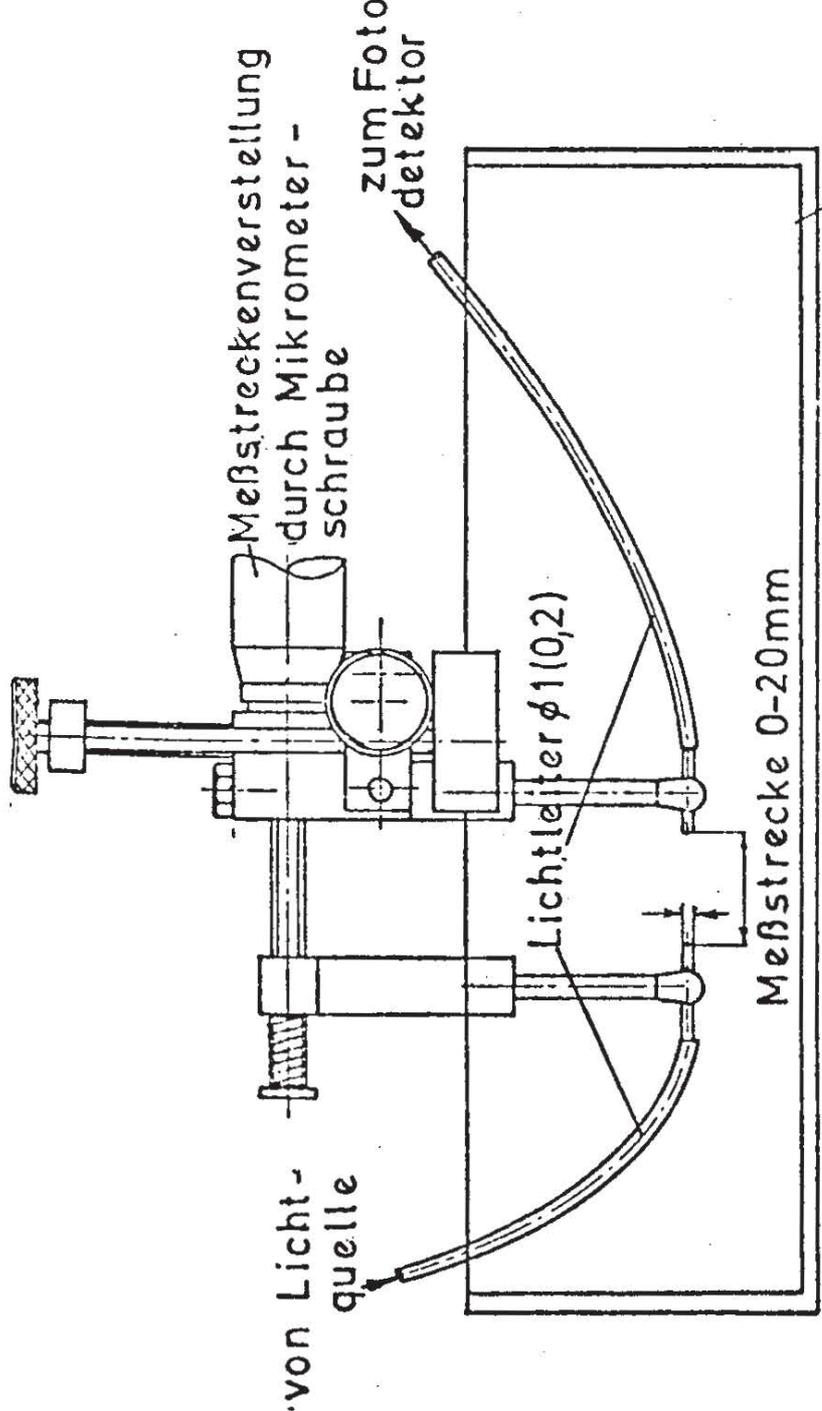
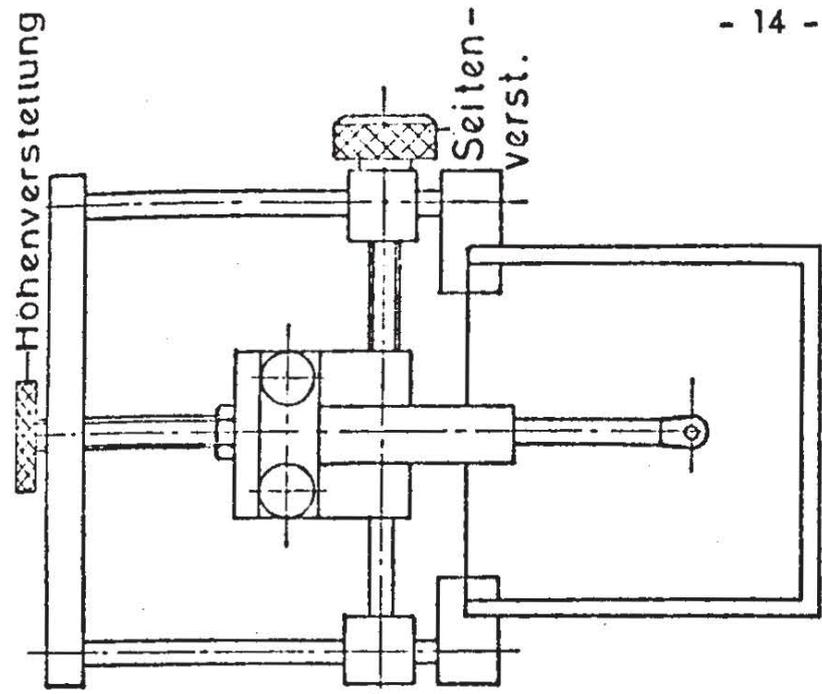
Da die Lichtabsorption durch Blasen, Tropfen oder Feststoffteilchen in guter Näherung unabhängig von der Wellenlänge ist, sollte auch die Extinktionskonstante ϵ unabhängig von der eingestrahnten Lichtwellenlänge sein. Somit wäre ϵ bei vorgegebener Blasen-, Tropfen- oder Teilchengröße bzw. -größenverteilung eine relativ leicht zu ermittelnde Konstante die nur von der Art des zweiphasigen Gemisches abhängt. Nach Ermittlung der Extinktionskoeffizienten für verschiedene mittlere Blasen-, Tropfen- oder Teilchengrößen bzw. Größenverteilungen sollten dann auch Konzentrationsmessungen in Zweiphasensystemen und insbesondere Wasser-Luftgemischen möglich sein. Setzt man andererseits z.B. für Wasser-Luftgemische an, daß der Lichtverlust pro Einzelblase, d.h. der "Blasextinktionskoeffizient" proportional zur Querschnittsfläche der Blase ist und nimmt man weiterhin Kugelgestalt der Blasen an, so würden Änderungen des Blasendurchmessers nur mit der dritten Wurzel aus der Blasenquerschnittsfläche in die Konzentrationsbestimmung eingehen. Fehler in der angenommenen mittleren Blasengröße bzw. der Blasenverteilung und damit in dem angesetzten Wert für die Extinktionskonstante würden daher zu weit geringeren Fehlern in der Konzentrationsmessung führen. Dieses Verhalten, d.h. die Unabhängigkeit der Konzentrationsmessung von der Blasengröße scheinen die im Eichversuchsstand durchgeführten Messungen (siehe 3.5) ausdrücklich zu bestätigen. Setzt man die zulässigen Fehlergrenzen nicht zu eng, so lassen sich Messungen der Volumenkonzentration von Luftblasen in Wasser-Luftgemischen auch dann durchführen, wenn nur wenige "Blasextinktionskoeffizienten" bekannt sind.

3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSVERFAHREN

3.1 Tracermessungen

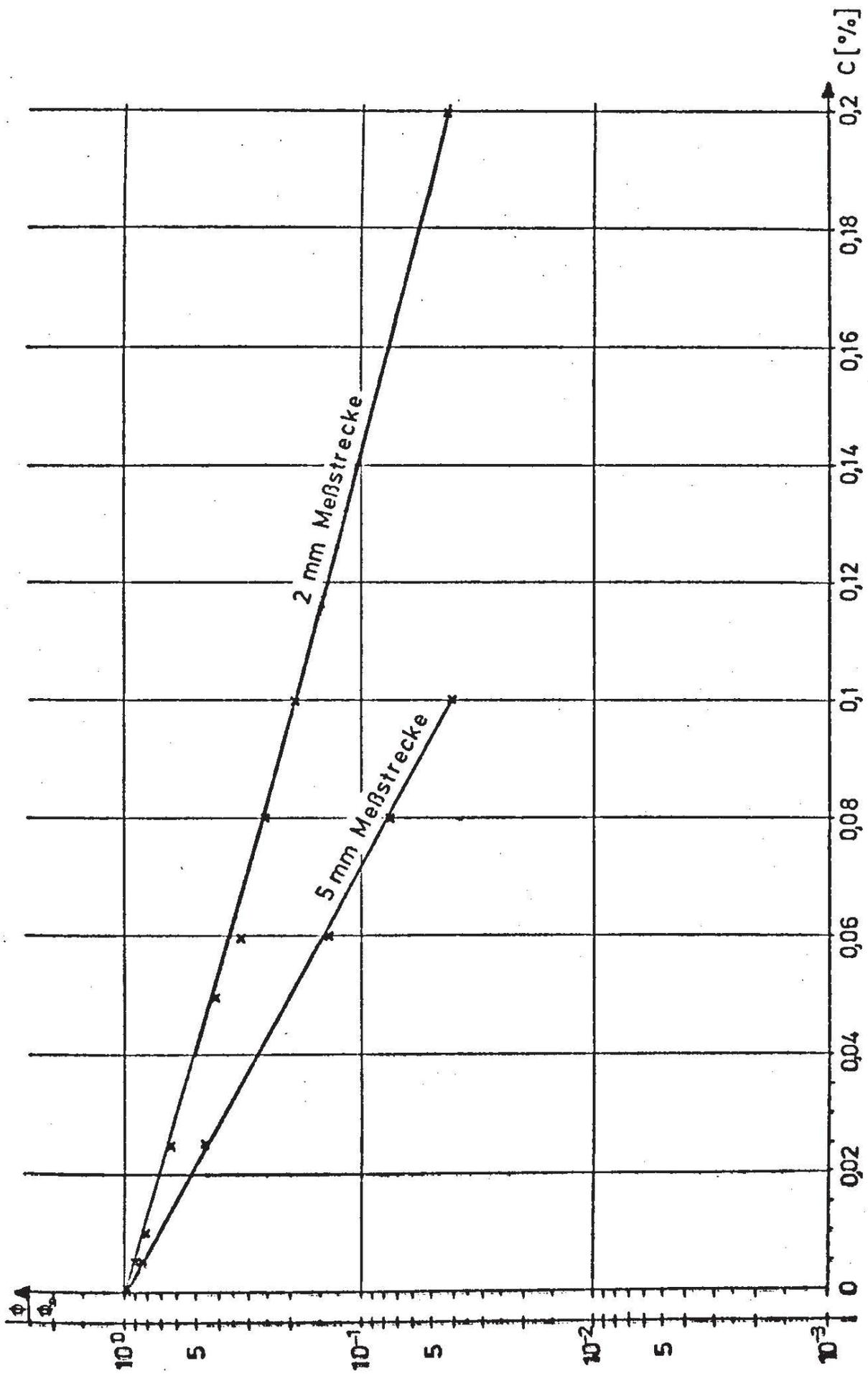
Zur direkten kontinuierlichen und nahezu punktförmigen Tracerkonzentrationsmessung wurde die in Bild 2 gezeigte Lichtleitersonde als Einstrahlphotometer gebaut und in einer kleinen Glasküvette an einigen Verifikationsexperimenten getestet. Der Durchmesser der Lichtleiter betrug 1 mm und als Meßstrecke (=Abstand der Lichtleiter, die mit einer Mikrometerschraube zwischen 0 und 20 mm einstellbar ist), wurden 2 mm bzw. 5 mm gewählt. Das ergibt Meßvolumina von ca. $1,6 \text{ mm}^3$ bzw. 4 mm^3 . Als Lichtquelle wurde eine Quecksilberhöchstdrucklampe verwendet aus deren Spektrum je nach Tracer eine bestimmte Lichtwellenlänge mittels Interferenzfiltern herausgefiltert wurde. Als Tracer wurden Kaliumpermanganat (KMnO_4), das im grünen Wellenlängenbereich (546 nm) absorbiert, und Kaliumhexaferrocyanat ($\text{K}_3 \text{Fe}(\text{CN})_6$) verwendet, das im blauen Wellenlängenbereich (407 nm) absorbiert. Als Photodetektor diente ein Photomultiplier (Typ RCA 931A).

Gemessen wurden zunächst die in Bild 3 wiedergegebenen Eichkurven für Kaliumhexaferrocyanatkonzentrationen von 0,005 % bis 0,2 % bei 407 nm für Lichtleiterabstände von 2 mm und 5 mm. Beide Eichkurven zeigen die erwartete gute Übereinstimmung mit dem Lambert-Beerschen Gesetz. Außerdem wurde diese Eichung für beide Tracersubstanzen für die Meßstrecke von 2 mm bei 407 nm (blau) und 546 nm (grün) durchgeführt. Wegen der Verwendung von Interferenzfiltern zur Wellenlängenselektion - es stand kein geeigneter Monochromator zur Verfügung - mußten die einzelnen Meßkurven nacheinander ermittelt werden. Wie Bild 4 zeigt, ist die Absorption des $\text{K}_3 \text{Fe}(\text{C/N})_6$ im grünen Wellenlängenbereich erwartungsgemäß praktisch gleich Null. KMnO_4 absorbiert demgegenüber sowohl bei 546 nm als auch bei 407 nm. Allerdings ist die Absorption bei 407 nm im Konzentrationsbereich von 0,005 % bis 0,1 % nahezu unabhängig von der Konzentration und liegt bei ca. 25 %. Das bedeutet, daß die Anwesenheit des $\text{K}_3 \text{Fe}(\text{C/N})_6$ die Konzentrationsmessung des KMnO_4 praktisch nicht stört, während für den umgekehrten Fall eine fast konstante Störung erfolgt, die jedoch mathematisch bzw. elektronisch leicht zu eliminieren ist. Damit ließen sich die Konzentrationen dieser beiden Tracersubstanzen nach dem in 2.1 (mit den Gleichungen (2.11) und (2.12)) beschriebenen vereinfachten Verfahren ausreichend genau gleichzeitig mit einer Sonde kontinuierlich und nahezu punktförmig messen. Dabei sollte es ohne weiteres möglich sein, Tracerkombinationen bzw. Wellenlängenkombinationen zu finden, die die in 3.1 geforderten Bedingungen

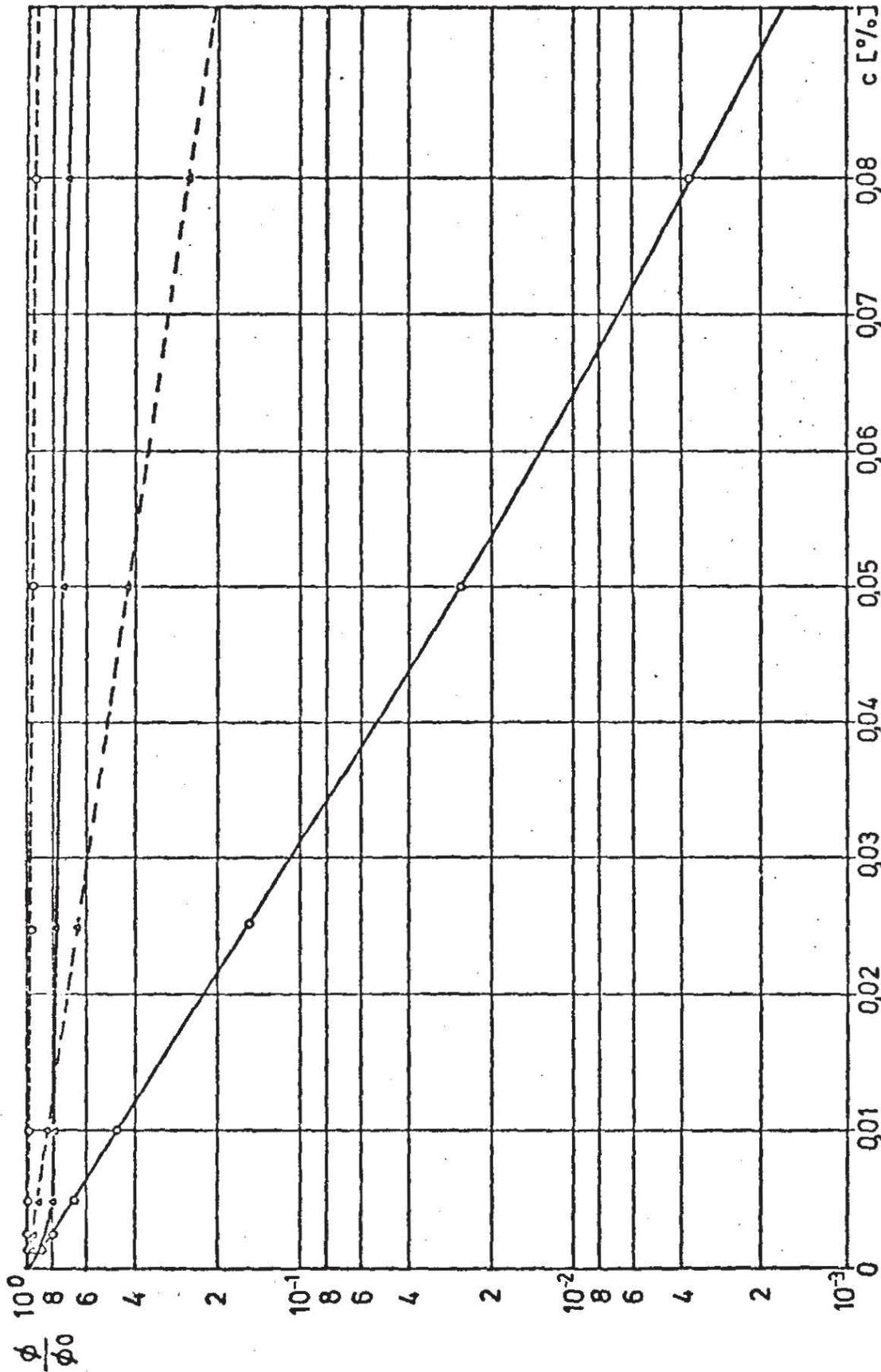


SFB 80
A3/A13

Lichtleitersonde zur Konzentrations-
messung einer Tracersubstanz



— 1. Tracer KMnO_4 ○ grün
- - - 2. Tracer $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ △ blau



SFB 80 EICHKURVE DER LICHTLEITERSONDE
A3/A13 2 FREQUENZEN 2 TRACER

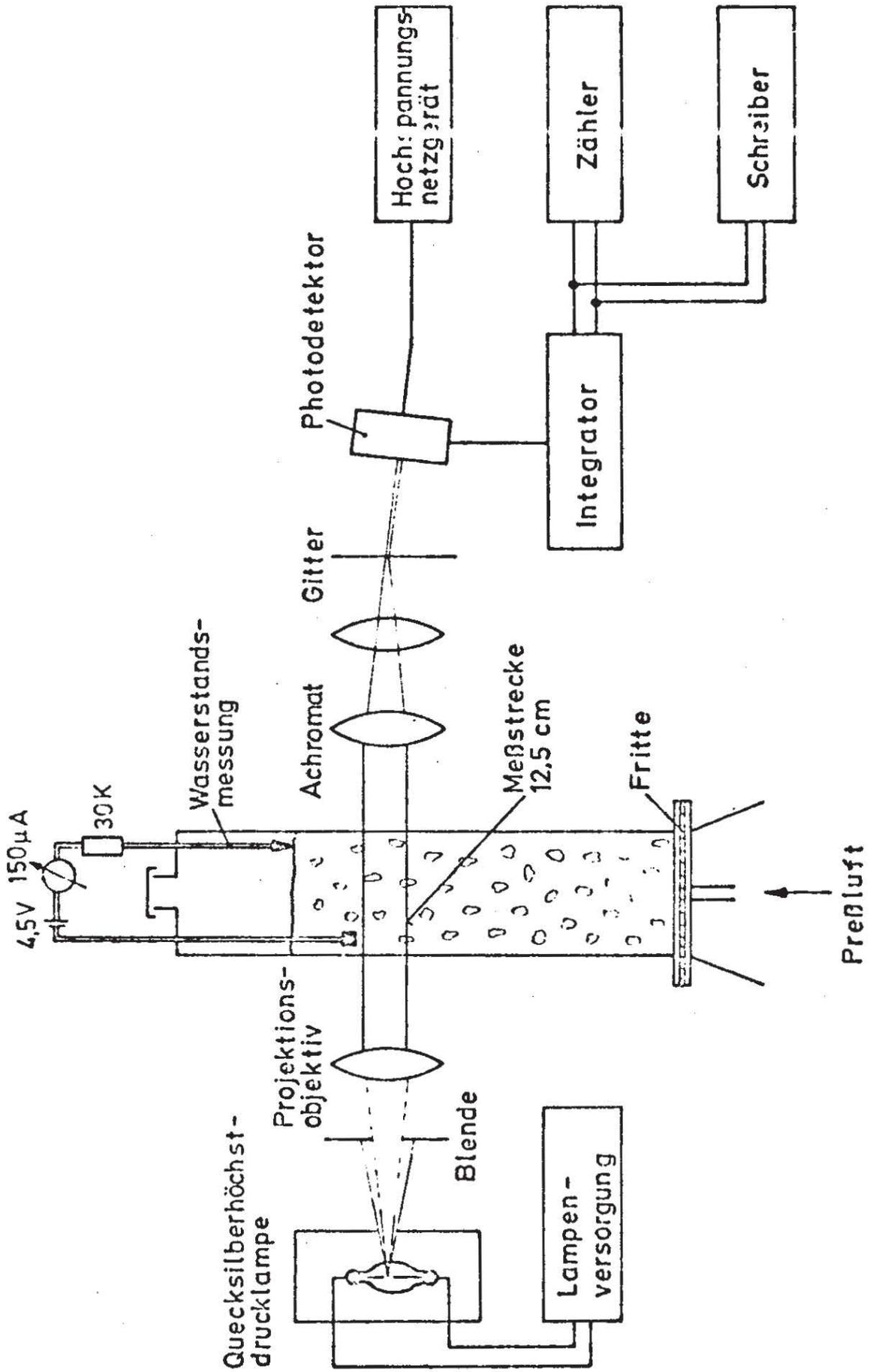
($\epsilon_{A_2} = \epsilon_{B_1} \approx 0$) noch besser erfüllen, als die hier gewählten.

3.2 Optik und Eichküvette zur Blasenkonzentrationsmessung im Durchstrahlungsverfahren

Zur Überprüfung der Behauptung, daß sich auch für Wasser-Luftblasengemische eine dem Lambert-Beerschen Gesetz entsprechende Abhängigkeit der Lichtschwächung (Extinktion) von der Volumenkonzentration der Luftblasen ergibt, wurde der in Bild 5 (als Prinzipskizze) und Bild 6 gezeigte Eichversuchsstand aufgebaut.

Bild 6 Eichversuchsstand

Auch dieser Versuchsstand ist von der Optik her zunächst nur als Einstrahlphotometer aufgebaut. Als Lichtquelle wird eine Quecksilberhöchstdrucklampe verwendet die wegen ihrer außerordentlich kleinen Leuchtfläche von ca. $0,07 \text{ mm}^2$ eine fast ideal punktförmige Lichtquelle darstellt. Außerdem können für spektralphotometrische Messungen aus dem ausgesandten Spektrum einige der besonders ausgeprägten Intensitätsmaxima herausgefiltert werden. Mit einem Linsensystem wird das ermittelte Licht zu einem parallelen Strahl gebündelt, der danach die Eichküvette durchstrahlt. Die Durchmesser des Strahls können mit einer Blende zwischen 0 und 30 mm variiert werden. Nach Durchlaufen der Meßstrecke wird der Lichtstrahl von einem zweiten Linsensystem auf einen geringeren Durch-



messer fokussiert und gelangt danach im Photodetektor zum Nachweis. Um bei diesem offenen Aufbau äußere Störungen möglichst klein zu halten, kann vor den Photodetektor ein Gitter (ca. 1000 Linien/mm) gesetzt werden, wodurch nur ein im Vergleich zum Störlicht besonders intensive Wellenlänge der Lampe nachgewiesen wird. Die Eichküvette ist ein rechteckiges Plexiglasrohr (lichte Weite 12,5 m, Höhe 1 m) das über einen Glasfrittenboden (Porendurchmesser ca. 100 μm) sehr gleichmässig mit Luftblasen beschickt werden kann. Dadurch wird mit guter Näherung eine in der gesamten Küvette konstante Volumenkonzentration der Luftblasen erzielt. Aus diesem Grund kann die optisch durch Extinktionsmessung ermittelte örtliche Luftblasenkonzentration gleich der aus der Steighöhe bestimmten mittleren Konzentration gesetzt werden. Die Ermittlung der mittleren Konzentration erfolgte aus der Differenz der Wasserhöhen h und h_0 mit und ohne Luftblasen nach

$$C = \frac{h - h_0}{h} \quad (3.1)$$

Die Bestimmung der Oberfläche erfolgte mit einem elektrischen Doppelspitzentaster (Spitzenabstand 2 mm). Dabei wurde so gemessen, daß die eine Spitze gerade ins Wasser eintauchte, die andere gerade noch in der Luft war. Mit dieser Methode konnte die Bestimmung der Wasseroberfläche und damit der Konzentration bei kleinen und mittleren Luftblasenanteilen (bis etwa 12 Vol %) recht genau bestimmt werden. Wegen der bei höheren Konzentrationen auftretenden Wellenbewegungen konnten die Oberflächenbestimmungen für diese Fälle nur erheblich ungenauer erfolgen.

3.3 Optik zur Blasenkonzentrationsmessung im Reflexionsverfahren

Da es bei vielen Problemstellungen, z.B. wegen eines schon vorhandenen Versuchsstandes, nicht möglich ist, die Meßstrecke zu durchstrahlen, mußte untersucht werden, ob es ohne wesentliche Einschränkungen durch Umbau des Versuchsaufbaus möglich ist auch in Versuchsständen zu messen, die nur einseitig durchsichtig sind. Zu diesem Zweck wurde der in 3.2 beschriebene optische Versuchsaufbau abgeändert. Dazu wird in den Strahlengang vor der Eichküvette ein halbdurchlässiger Spiegel gestellt und an der Rückwand der Küvette ein Planspiegel angebracht. Bild 7 zeigt die Draufsicht des geänderten optischen Aufbaus. Durch diese Veränderung wird der von der Lampe kommende Lichtstrahl vom halbdurchlässigen Spiegel in zwei zueinander senkrecht laufende etwa gleich intensive Teilstrahlen aufgespalten. Einer dieser Teilstrahlen durchläuft die Meßstrecke, wird an der Rückwand von dem dort angebrachten Planspiegel reflektiert, durchläuft erneut

die Meßstrecke und trifft danach auf den halbdurchlässigen Spiegel. Von dort wird wiederum die Hälfte des noch verbliebenen Lichts in die Richtung des Photodetektors reflektiert, wo schließlich die Messung der Intensität erfolgt.

Mit diesem Versuchsaufbau, der keinen wesentlichen Mehraufwand erfordert, könnten Luftblasenkonzentrationen auch in einseitig durchsichtigen Versuchsstände gemessen werden.

3.4 Elektrischer Aufbau und Signalverarbeitungselektronik

Da der Eichversuchsstand nur als Einstrahlphotometer aufgebaut wurde, mußte besonders darauf geachtet werden, alle ohne größeren Aufwand vermeidbaren Störeinflüsse, wie z.B. Schwankungen des von der Lichtquelle emittierten Lichtstroms, weitgehend zu eliminieren. Da Veränderungen der Lampenversorgungsspannung (50 - 60 V Gleichspannung, 5 - 6 A) einen außerordentlich starken Einfluß auf den Lichtstrom haben, wurde zur Versorgung der Quecksilberhochdrucklampe ein transistorstabilisiertes Gleichspannungsnetzgerät mit einer Leistung von 700 W (100 V, 7 A bzw. 70 V, 10 A) gebaut. Zur Begrenzung des Lampenstroms - dieser würde nach dem Zünden der Lampe so weit ansteigen, daß die Lampe zerstört wird - ist im Netzgerät ein variabler Vorwiderstand eingebaut. Bild 8 zeigt den Schaltplan dieser Lampenversorgung einschließlich des integrierten Hochspannungszündgeräts und Bild 9 ein Foto dieses Gerätes.

Bild 9 Lampenversorgung

Zum Nachweis der durch die Eichküvette tretenden Lichtströme diente ein Photomultiplier (RCA 931A) der von einem hochstabilen Hochspannungsnetzgerät (Fluke 145B) gespeist wurde.

Wegen der sehr schnellen und beachtlich großen Veränderungen der momentanen

örtlichen Luftblasenkonzentration im Meßvolumen des Lichtstrahls, die zu entsprechenden Schwankungen der Lichtintensitäten und damit der Ausgangsströme bzw. Ausgangsspannungen des Photomultiplier führten, konnten sinnvolle Meßergebnisse nur durch echte Mittelwertbildung über lange Meßzeiten (über 100 sec) erzielt werden. Dies entspricht im übrigen auch den Voraussetzungen, die für die Anwendung des Lambert-Beerschen Gesetzes auf Wasser-Luftgemische gemacht wurden.

Aus diesem Grund wurde eine spezielle Signalintegrationselektronik für Spannungen von 100 μV - 100 V und Ströme von 1 nA - 1 A gebaut die eine Mittelwertbildung

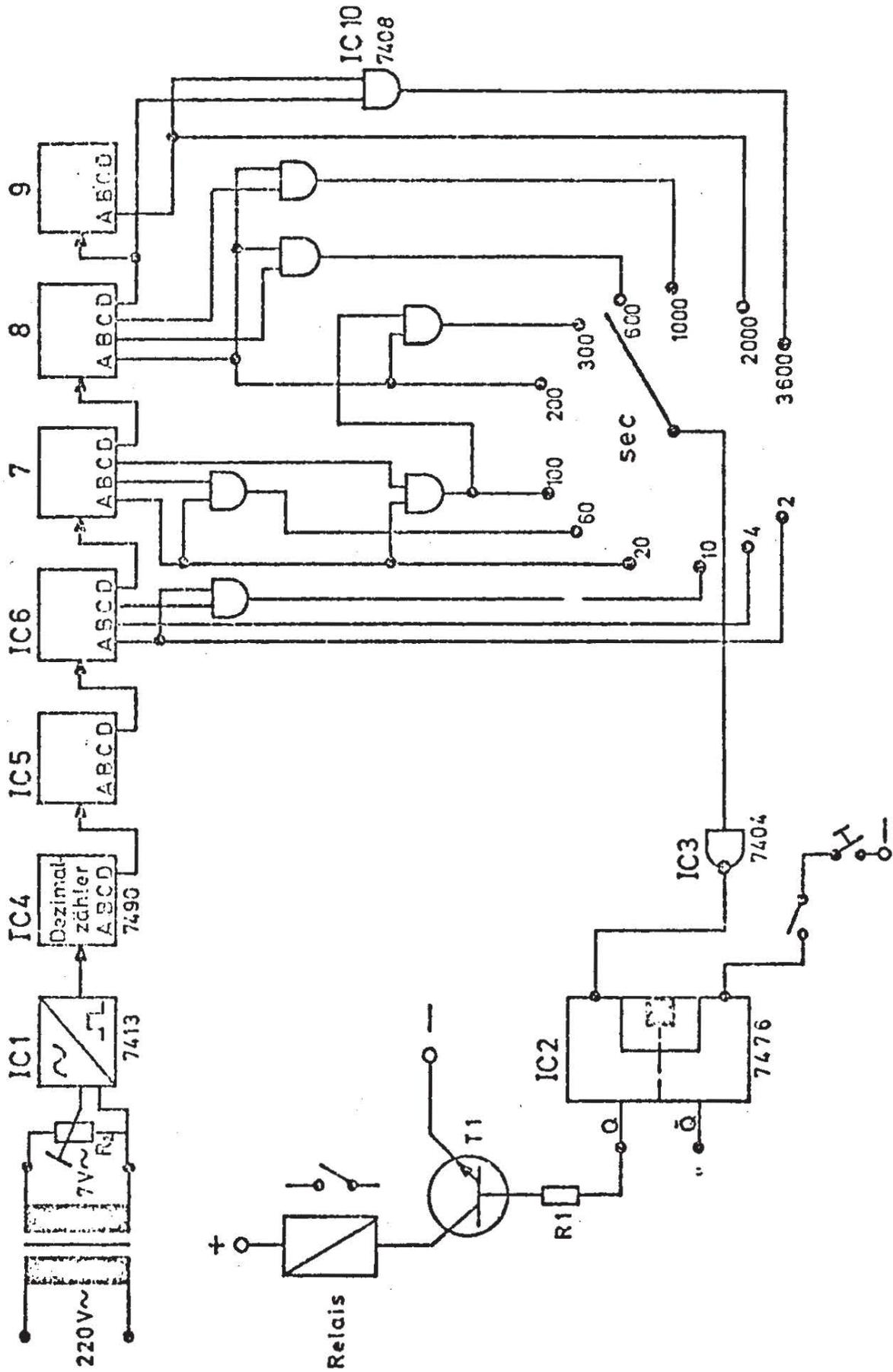
$$\bar{S} = \frac{1}{T} \int_0^T S dt \quad (3.2)$$

bzw. Signalintegration

$$J = \int_0^T S dt \quad (3.3)$$

des variablen Signals über Zeiten bis zu 3600 sec ermöglicht. Bei der Entwicklung dieses Gerätes wurde entscheidend Wert darauf gelegt, daß es auch für eine Reihe anderer Meßaufgaben benutzt werden kann, so z.B. als Digitalvolt- und Ampèremeter, als präziser elektronischer Zeitschalter, als Frequenzteiler, als Spannungsfrequenzwandler u.s.w.. Das Gesamtgerät besteht daher im wesentlichen aus vier, unabhängig voneinander funktionsfähigen Teilgeräten: Dem elektronischen Zeitschalter, der Integrationseinheit, dem Frequenzteiler und einem handelsüblichen Zähler (Kontron 400A). Der netzfrequenzgesteuerte Zeitschalter (2 - 3600 sec), Bild 10 und Bild 11 zeigen Schalt- und Belegungspläne, dient dazu, das Eingangssignal nur für die vorgewählte Zeit auf den Eingang der Integrationseinheit zu legen. Die Überprüfung der Schaltgenauigkeit ergab Fehler unter 0,1 %.

Wichtigster Teil der Integrationseinheit deren Schaltpläne Bild 12 zeigt, ist ein hochgenauer (Fehler $< 0,05\%$) integrierter Spannungs- Frequenzwandler (Teledyne-Philbrick 4705). Dieser integrierte Baustein wandelt eine am Eingang anliegende positive Spannung in eine ihr proportionale Frequenz um und zwar mit dem Proportionalitätsfaktor von 10 $\mu\text{V}/\text{Hz}$. Die kleinste nachweisbare Spannung beträgt 10 μV entsprechend 1 Hz, die größte 11 V, entsprechend 1,1 MHz. Wegen der hohen erreichbaren Frequenzen reagiert dieser Spannungs-Frequenzwandler außerordentlich schnell auf Änderungen der Eingangsspannung, z.B. bei einem Spannungssprung von 1 V auf 10 V in ca. 1 μsec . Dies ist besonders wichtig für die Genauigkeit der Integration sehr schnell und stark schwankender Signale.

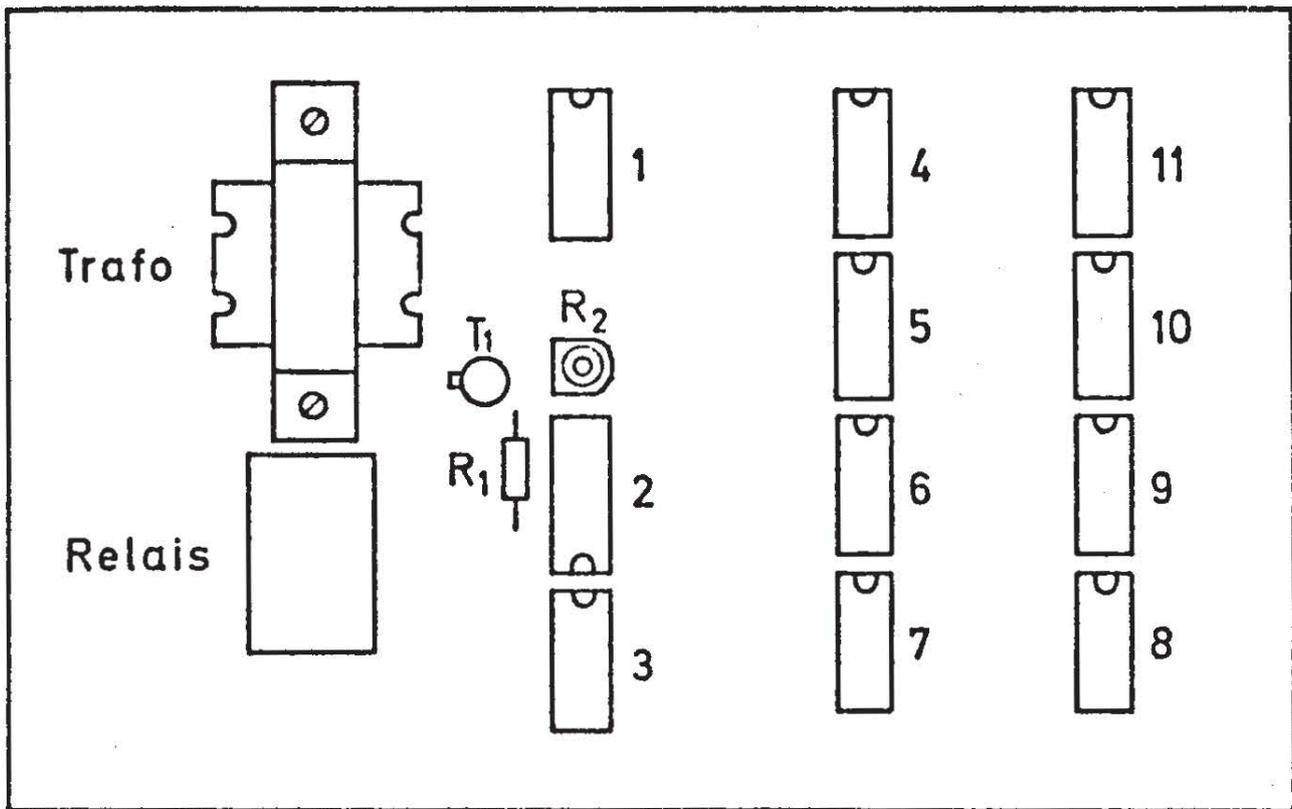


SFB 80
A3 / A13

ZEITSCHALTER 2 sec - 3600 sec

Lageplan

Zeitschalter



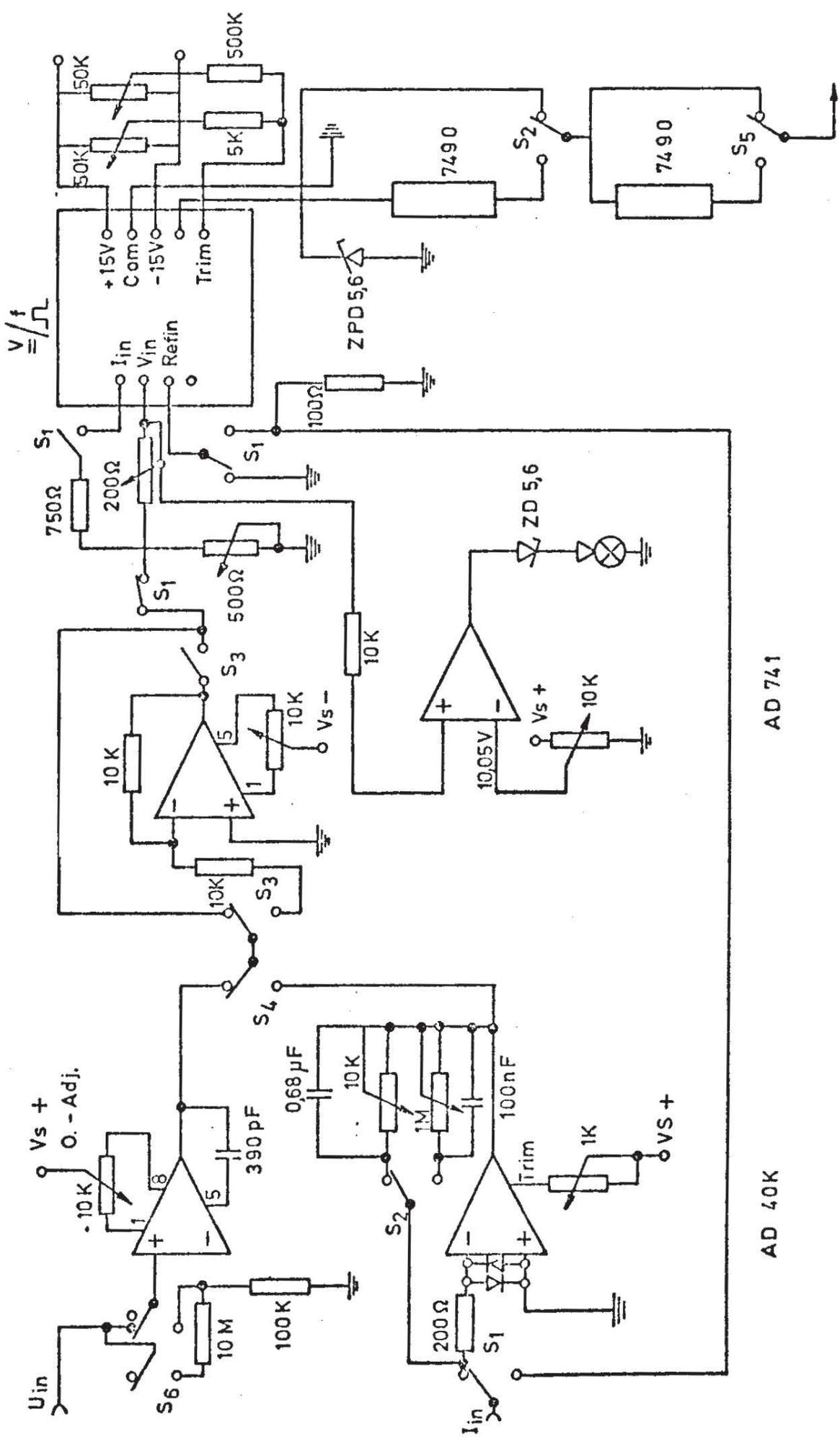
Bestückungsliste Zeitschalter

Trafo	220V - 7 V / 100 m A		
Relais			
T 1	BC 140 -10		
R 1	1,2 K Ω		
R 2	Trimpotentiometer 4,7 k Ω		
Bausteine			
IC 1	Schmitt - Trigger	FLJ 131	7413 N
IC 2	J-K-MS-Flip - Flop	SN	7476 N
IC 3	Inverter	FLH 211 -	7404
IC 4,5,6,7,8,9	Dezimalzähler	SN	7490 N
IC 10, 11	UND - Gatter	FLH 381 -	7408

AD 504 LH

TP 131901

TP 4705

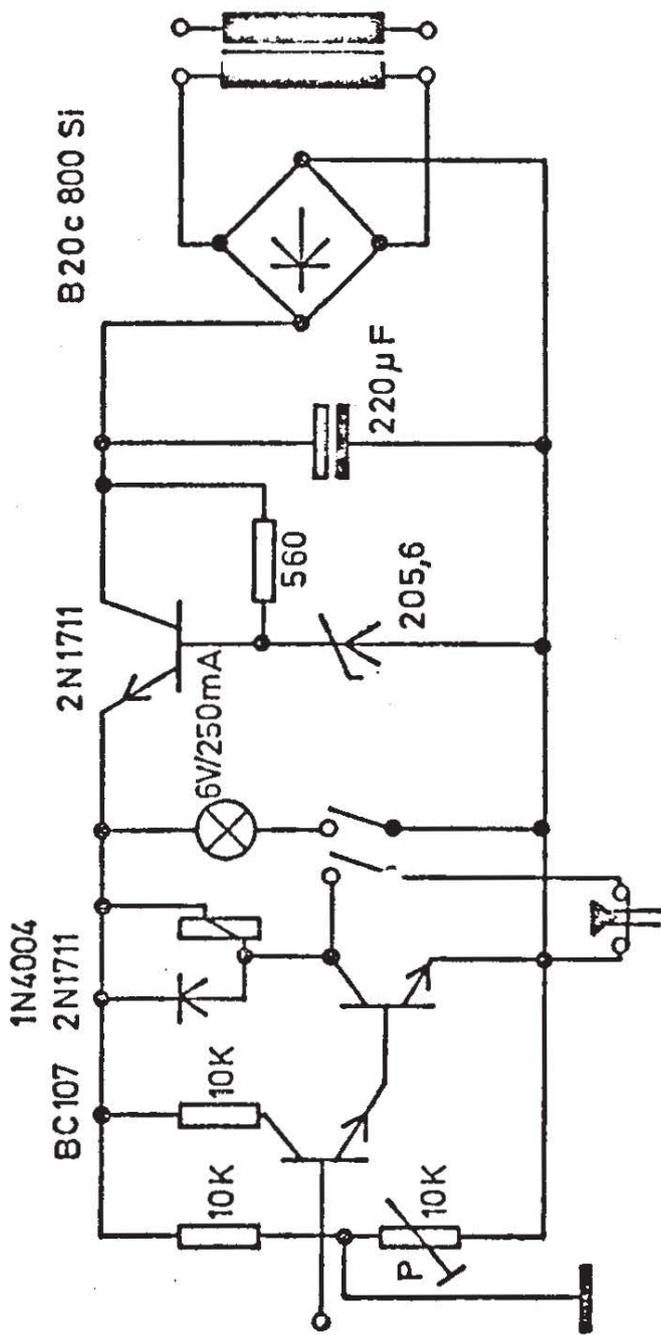


AD 741

AD 40K

SFB 80
A3/A13

Integrationsseinheit



Mit dieser Umwandlung eines Spannungssignals in eine Frequenz ergibt sich durch Zählung der Ausgangsimpulse eine sehr einfache und genaue Integration des Spannungssignals über beliebig lange Meßzeiten. Da der verwendete Spannungs-Frequenzwandler nur positive Spannungen in Frequenzen wandelt, kann ihm ein als Invertierer geschalteter Operationsverstärker mit geringer Temperaturdrift (Teledyne Philbrick 131901) vorgeschaltet werden, der eine negative Spannung in eine gleich große positive umwandelt, wodurch auch die Integration negativer Spannungen möglich wird. Um auch kurzzeitige negative (bzw. positive) Spannungsimpulse, die Meßfehler hervorrufen würden, zu erkennen, ist eine Polaritätsanzeige (Bild 13) eingebaut worden, die bei einem Wechsel der Polarität eine Kontrolllampe aufleuchten läßt, die nur durch Knopfdruck gelöscht werden kann. Zur Messung an hochohmigen Geräten (z.B. als Spannungsquellen geschaltete Photomultiplier), ist dem Spannungseingang ein hochohmiger Operationsverstärker (Analog Devices 504 LH) mit einem Eingangswiderstand $> 100 \text{ M}\Omega$ als Impedanzwandler vorgeschaltet. Ein Spannungsteiler am Eingang ermöglicht auch die Messung von Spannungen bis 100 V , die bei Photomultipliern auftreten können. Da Photomultiplier normalerweise als Stromquellen betrieben werden, die sehr geringe Ausgangsströme zwischen 10 nA und 1 mA liefern, besitzt das Gerät einen zusätzlichen Stromeingang für Ströme 1 nA bis 1 mA . Hierzu wird ein extrem hochohmiger Operationsverstärker mit Feldeffekteingang als Strom-Spannungswandler geschaltet, der den Eingangsstrom in eine dazu proportionale Spannung wandelt, so daß dann wieder die zur Integration notwendige Frequenzwandlung erfolgen kann. Zum Schutz des wertvollen Spannungs-Frequenzwandlers ist eine Übergangsanzeige für Spannungen $> 10 \text{ V}$ eingebaut, die mit einem als Spannungskomparator geschalteten Operationsverstärker (Analog Devices 741) und einer Leuchtdiode arbeitet,

Zur Bildung des Signalintegrals

$$J = \int_0^t S \, dt$$

wird das variable Signal S während der gewählten Integrationszeit t auf den Eingang der Integrationseinheit gelegt und die dort erzeugten Impulse vom Zähler gezählt. Zur Bildung des Signal-Mittelwertes

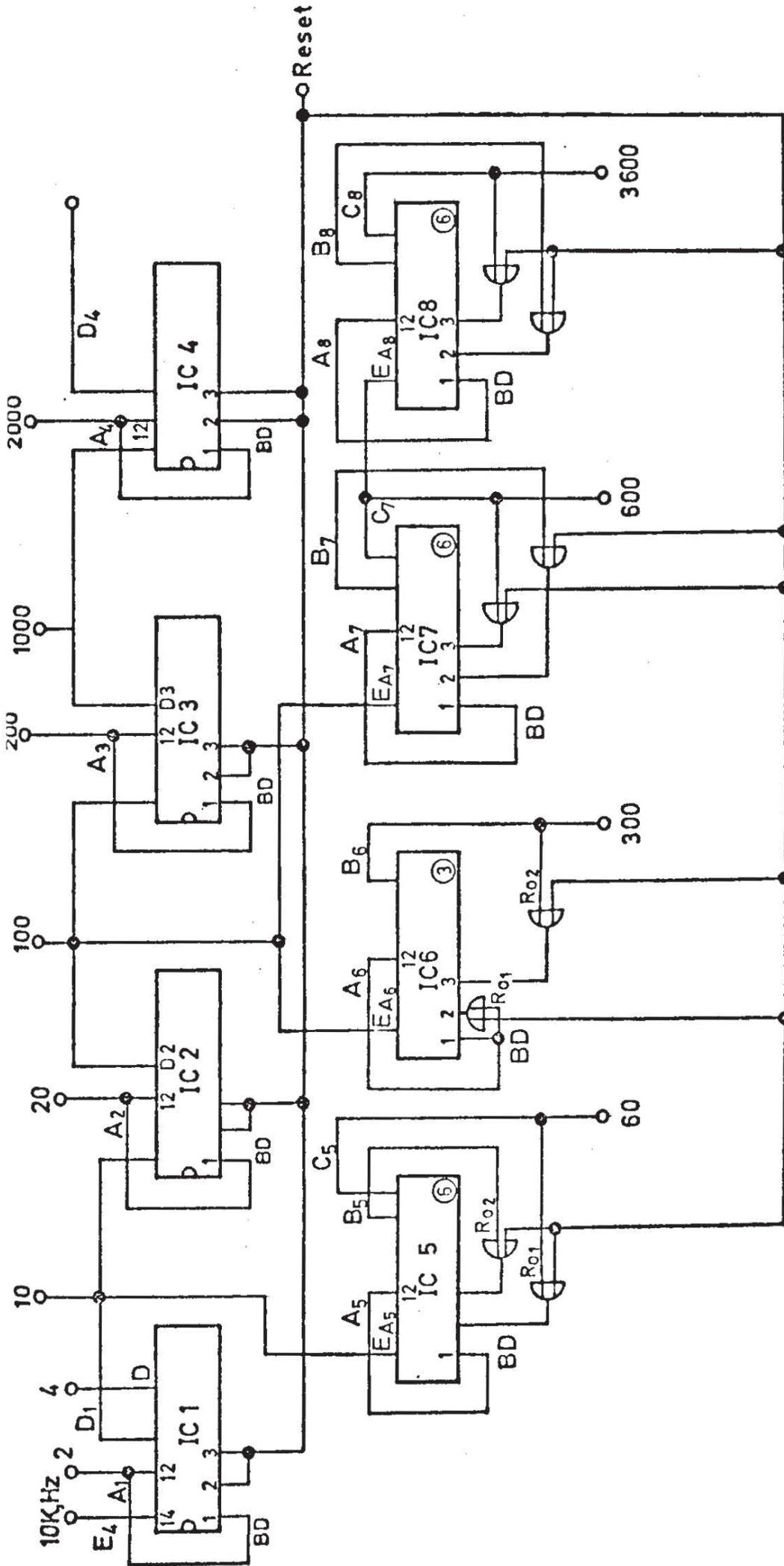
$$S = \frac{1}{t} \int_0^t S \, dt$$

muß das Integral durch die Integrationszeit dividiert werden. Diese Funktion erfüllt der in Bild 14 gezeigte Frequenzteiler, der die Ausgangsfrequenz der Integrationseinheit automatisch durch die gewählte Integrationszeit t teilt. Wird z.B. über 300 Sekunden integriert, so leitet der Frequenzteiler nur jeden dreihundertsten Impuls der Integrationseinheit auf den Zähler, so daß nach Ablauf

der Integrationszeit auch nur dieser Bruchteil der Gesamtimpulszahl, die dem Signalintegral entspricht, registriert ist.

Mit dieser eingehend getesteten Signalintegrationselektronik, die Bild 15 zeigt, konnten Langzeitmittelwerte der schnell veränderlichen Lichtströme und damit der Extinktionen aufgenommen werden. Damit war auch von der Signalverarbeitung her eine Überprüfung der optischen Konzentrationsmessung in Wasser-Luftgemischen möglich.

Bild 15 · Signalintegrationselektronik



IC 1-8 7490 Zähler
IC 7432 Oder - Glieder

Teilungsverhältnis 1 : 2 : 4 : 10 : 20 : 60 : 100 : 200 : 300 : 600 : 1000 : 2000 : 3600

SFB 80 A3/A13	FREQUENZTEILER IN BCD - ZÄHLWEISE
------------------	--------------------------------------

3.5 Messung der Luftblasenkonzentration

Mit dem in 3.2 bis 3.4 beschriebenen Versuchsaufbau wurden die zur Überprüfung der optischen Methode zur Blasenkonzentrationsmessung notwendigen Messungen der Lichtschwächung in Abhängigkeit von der Volumenkonzentration der Luftblasen durchgeführt werden. Diese Messungen sind für das Durchstrahlungsverfahren in Bild 16 und für das Reflexionsverfahren in Bild 17 wiedergegeben. Aufgetragen ist die Extinktion, d.h. $\lg \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0}$, über der zeitlich gemittelten Volumenkonzentration der Luftblasen. Dabei ist ϑ_1 der um den Restlichtstrom ϑ_R (ohne eingeschaltete Quecksilberhöchstdrucklampe) reduzierte Lichtstrom ϑ .

$$\vartheta_1 = \vartheta - \vartheta_R \quad (3.4)$$

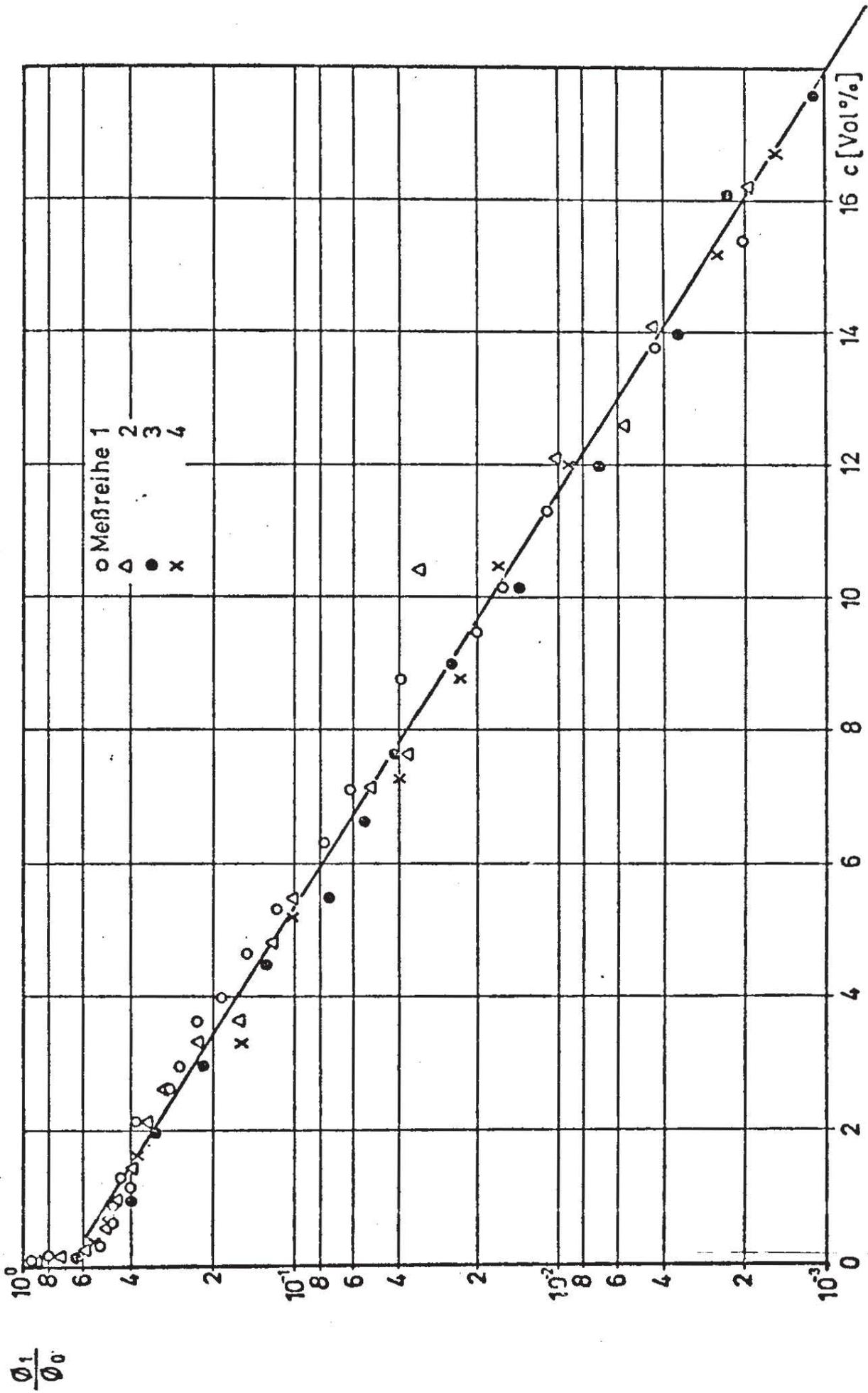
Jeder der aufgetragenen Meßpunkte ist der Mittelwert aus mindestens drei Einzelmessungen über Integrationszeiten von mehr als 100 Sekunden. Die ermittelte Eichkurve für das Durchstrahlungsverfahren zeigten im Rahmen der mit dem einfachen optischen Aufbau zu erwartenden Eichgenauigkeit eine sehr gute Übereinstimmung mit der erwarteten Gestzmäßigkeit im Konzentrationsbereich von 1 Vol% bis über 20 Vol%.

$$\lg \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} = -\epsilon cd \quad (3.5)$$

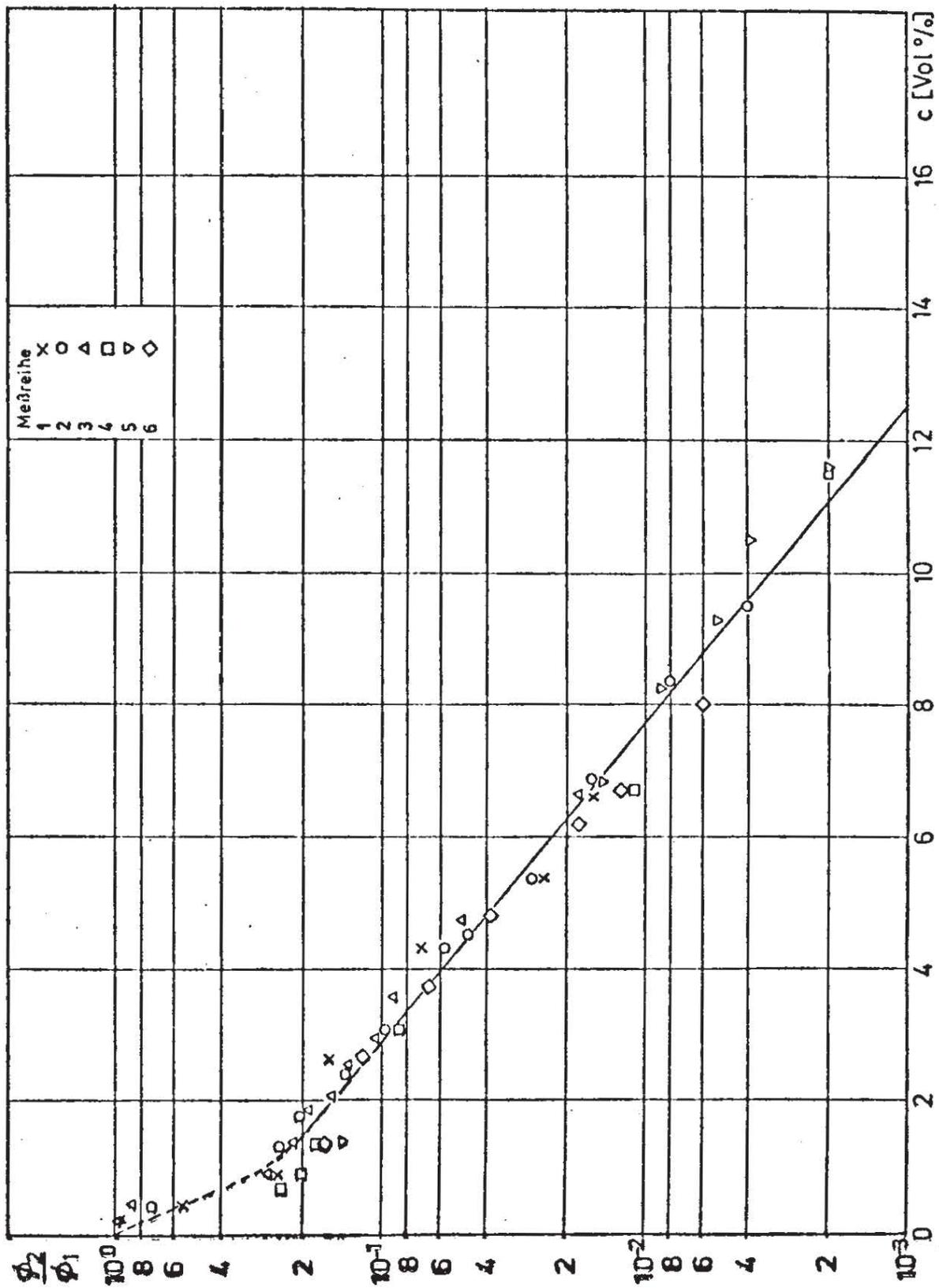
Mit

$$\lg \frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} - \lg 0,7 = -\epsilon cd \quad (3.6)$$

stimmen die gemessenen Werte auch bis zu Konzentrationen von minimal 0,2 Vol% Luftanteil überein. Dabei ändert sich in diesem Konzentrationsbereich die Blasengröße, die jedoch nicht gemessen werden konnte, um größenordnungsmäßig mindestens 200%. Diese weitgehende Unabhängigkeit der Gleichung (3.6) von der Blasengröße bzw. Blasengrößenverteilung scheint die in 2.2 gemachten Annahmen bezüglich der Anwendbarkeit der Extinktionsmessung auch bei variabler Blasengrößenverteilung zu bestätigen. Die Extinktionskonstante ϵ scheint den Messungen zufolge weitgehend unabhängig von der Blasengröße zu sein. Die Abweichungen der Meßwerte von Gl. (3.5) und (3.6) bei sehr geringen Konzentrationen konnten aus Zeitgründen nicht experimentell untersucht werden. Denkbar sind unter anderem folgende Gründe: Bei einer Wasserstandshöhe von $h_0 = 70$ cm ergibt 1 mm Ungenauigkeit in der Oberflächenbestimmung (das ist etwa die Genauigkeit der angewendeten Methode) einen Fehler von 0,15 Vol% bei der Konzentrationsmessung. Da bei sehr kleinen Luftanteilen unter 0,5 Vol% dieser Fehler nun zu



SFB80 Abhängigkeit der Lichtschwächung von der
A3/A13 Luftblasenkonzentration, -Durchstrahlungsverfahren



SFB 80
A 3/A13

ABHÄNGIGKEIT DER LICHTSCHWÄCHUNG
VON DER BLASENKONZENTRATION -
REFLEXIONSVERFAHREN.

scheinbar höheren Konzentrationen führt, wäre damit der Verlauf der Eichkurve bei kleinen Konzentrationen erklärbar. Andererseits ist anzunehmen, daß die in 3.2 angenommene ideale Blasengleichverteilung in der Eichküvette bei geringen Luftdurchsätzen d.h. kleinen Konzentrationen nicht erreicht wird. Das würde wiederum zu dem Kurvenverlauf in Bild 15 führen, da die örtliche (optisch gemessene) Luftblasenkonzentration größer wäre, als die auf der Abzisse aufgetragene mittlere Konzentration. Denkbar ist unter anderem jedoch auch, daß durch die außerordentlich kleinen Luftbläschen (1 mm und kleiner) bei geringen Blasenkonzentrationen der Extinktionskoeffizient nicht mehr unabhängig von der Blasengröße oder der verwendeten Lichtwellenlänge ist.

Ebenso wie die Eichkurve für das Durchstrahlungsverfahren zeigen auch die Messungen für das Reflexionsverfahren für Konzentrationen über 1 Vol % eine überraschend gute Übereinstimmung mit dem erwarteten Lambert-Beerschen Gesetz (3.5) bzw. mit

$$\lg \frac{I_1}{I_0} - \lg 0,4 = -ECd \quad (3.7)$$

Da bei diesem Versuchsaufbau die Eichküvette zweimal durchstrahlt wird, sind auch die Abweichungen bei kleinen Luftblasenkonzentrationen erheblich größer. Hinzu kommt, bedingt durch den veränderten Versuchsaufbau, ein stark erhöhter Restlichtstrom, z.B. durch Reflexion an den Küvettenwänden und am halbdurchlässigen Spiegel, der zumindest bei dem hier verwendeten einfachen Versuchsaufbau zu erheblich größeren Meßfehlern führen kann.

5. SCHLUSSWORT

Unabhängig von allen Einschränkungen und bisher noch ungeklärten Fragen, kann schon nach den wenigen durchgeführten Versuchen gesagt werden, daß die optische (Extinktions-) Methode der Konzentrationsmessung, die für einphasige Systeme durchaus üblich ist, auch für Messungen im Wasser-Luftgemischen bzw. Zweiphasenströmungen gute und ausbaufähige Möglichkeiten bietet. Nach entsprechender Entwicklung und Erprobungszeit sollte dieses Verfahren auch für Routinemessungen anwendbar sein.

Zusammen mit der Blasengrößenmessung nach [11] und der noch weiterzuentwickelnden Blasengeschwindigkeitsmessung nach [12] sowie der leicht durchführbaren Blasenzählung, die zusammen wieder die Messung der örtlichen Volumenkonzentration der Luftblasen ermöglichen, bietet sich ein in sich geschlossenes System für Messungen in Zweiphasensystemen.

Durch diese Methoden werden wesentliche Größen in Zweiphasenströmungen meßbar, womit unter anderem ein erheblicher Beitrag zur Erforschung des Ausbreitungsverhaltens strahlförmiger Einleitungen mit Auftriebseffekt geleistet werden könnte.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] H. Kobus: "Bemessungsgrundlagen und Anwendungen für Luftschleier im Wasserbau", Erich Schmidt Verlag, Bielefeld, 1973.
- [2] H. Honekamp, H. Kobus: "Analytische Behandlung von Auftriebstrahlen unter Berücksichtigung der Besonderheiten von Luftblasenschleiern", Fortschrittsbericht T9, SFB 80, Universität Karlsruhe, Juni 1973.
- [3] H. Kobus, H. Honekamp, B. Barczewski: "Experimentelle Ermittlung des von einem Luftschleier in einer Querströmung erzeugten Strömungsfeldes", Fortschrittsbericht ET18, SFB 80, Universität Karlsruhe, März 1974.
- [4] A. Sjöberg: "Strömingshastigheter kring luftbubbelrida i tätthetshomogent och stillastaende vatten". Meddenlande nr. 39, Institutionen för vatterbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1967.
- [5] Ch. Mäder: "Von Luftblasenschleiern erzeugte Wasserströmungen in stehenden und fließenden Gewässern", Dissertation an der Technischen Hochschule Darmstadt, 1971.
- [6] W. Mathes, W. Riebold, E. de Cooman: "Measurements of the Velocity of Gas Bubbles in Water by a Correlation Method", The Review of Scientific Instruments, Vol. 41, pp. 843-845, 1970.
- [7] Th. Pilhofer, H.-D. Müller: "Photoelektrische Meßmethode zur Bestimmung mitteldisperser Tropfen in einem nicht mischbaren Zweistoffsystem", Chemie-Ingenieur-Technik 44, S. 295-300, 1972.
- [8] G. Kortum: "Kolorimetrie, Photometrie und Spektrometrie", Springer Verlag, S. 14 ff.. und 28 ff.., 1955.
- [9] P. Wolf, W. Nordmann: "Grundlagen für die kontinuierliche Messung der Feststoffkonzentration in Belebungsbecken", gwf-Wasser/Abwasser 114, Heft 7, S. 137-138, 1973.
- [10] W. Sigrüst: "Zur Aussagekraft von optischen Trübungsmessungen", Chemische Rundschau 26, Nr. 8, S. 1-3, 1973.
- [11] S. Weiss, G. Ziegel: "Ein Beitrag zur Bestimmung der Phasengrenzfläche in Bodenkolonnen", Chemische Technik, 24, Heft 1, S. 15 - 20, 1972.