

50 Jahre NDIR-Gasanalyse

50 years NDIR gas analysis

K. F. Luft, W. Schaefer und G. Wiegler

Schlagwörter: Gasanalyse, NDIR-Verfahren, Gerätetechnik, historische Entwicklung

*Die Geschichte der Nicht-Dispersiven-Infrarot (NDIR)-Gasanalyse begann vor 50 Jahren bei der BASF/Ludwigs-
hafen in Deutschland. Seit dieser Zeit wurden mehrere
100 000 Analysatoren produziert. Insbesondere für medizi-
nische, automobilen und chemischen Anwendungen hat sich
die NDIR-Technik als zuverlässige Methode für über 100
verschiedene Gase vom ppm- bis zum Prozent-Bereich
etabliert. Durch die ständigen Verbesserungen während der
letzten 50 Jahre hat sich die NDIR-Gasanalyse zu einer der
erfolgreichsten und vielseitigsten Technik für analytische
Geräte entwickelt. Im vorliegenden Bericht wird ein
historischer Abriss dieser Entwicklung wiedergegeben, die
von den Autoren als Zeitzeugen miterlebt und mitgestaltet
wurde.*

*The history of Non-Dispersive Infra Red (NDIR) gas
analysis began 50 years ago in Germany at BASF. Since
that time more than 150 000 analyzers have been produced.
Especially for medical, automotive and chemical applica-
tions NDIR technique is an established and reliable method
for measuring a variety of more than 100 different gases
from ppm to per cent ranges. Due to improvements during
the last 50 years NDIR gas analysis is one of the most
successful and versatile techniques for analytical instrumen-
tation. In this paper a brief survey of this development is
shown.*

1 Einleitung

Vor 50 Jahren erschien in der Zeitschrift für technische Physik die erste Publikation zum Thema der nichtdispersiven Infrarot-Gasanalyse [1]. Seit diesen grundlegenden Arbeiten von Lehrer und Luft [2], die in der Zeit von 1937–1943 durchgeführt wurden, entstand eine Fülle von unterschiedlichen Ausführungsformen, die zu einer weltweiten Anwendung dieser Gerätetechnik geführt haben.

2 Ausgangssituation

In den 30er Jahren nahm die Entwicklung und Anwendung physikalischer Technik und Meßtechnik in der Industrie, insbesondere der chemischen Großindustrie, einen schnellen Aufschwung. Letztere befand sich in einer ausgeprägten Wachstumsphase, bedingt durch die Ausweitung der bereits bestehenden und die Schaffung neuer

Produktionsanlagen, wie beispielsweise für synthetische Kunststoffe und Treibstoffe, in denen die rationelle Umsetzung und Verarbeitung großer Stoffmengen oft nur mit physikalischen Methoden möglich ist. In den älteren Werken wurde dieser Entwicklung schon seit längerer Zeit durch Schaffung physikalischer Arbeitsgruppen Rechnung getragen. Als besonderes Beispiel dieser Betätigung im Dienste der chemischen Industrie kann man die Betriebskontrolle des Werkes Oppau hervorheben, in der zahlreiche Meßverfahren entwickelt wurden und die immer wieder sozusagen als Keimzelle für entsprechende Einrichtungen in den neuen Werken gedient hat.

3 Die Jahre vor 1950

Als Luft sich 1937 entschloß, seine Tätigkeit als Assistent des Physikalischen Institutes der Universität Frankfurt aufzugeben und in die Dienste der Betriebskontrolle Oppau der BASF zu treten, fand er erwartungsgemäß ein vielseitiges und zukunftsträchtiges Arbeitsgebiet vor. So wurde er bald mit einem Meßproblem konfrontiert, das in der neuen Bunafabrik der Chemischen Werke Hüls auftrat. Bei dem damals angewandten Fabrikationsverfahren bestand die Gefahr der Bildung hochexplosiver Butadien-Luft-Gemische. Um das Entstehen solcher Gemische zu vermeiden, sollte eine Methode zur Messung sehr geringer Butadienkonzentrationen in Luft entwickelt werden. Da Butadien starke Absorptionsbanden im infraroten Spektralbereich besitzt, kam unter anderem die Messung der Infrarotabsorption der Gas-Luft-Gemische infrage. Es erwies sich jedoch bald, daß die damals bekannten photometrischen Methoden versagten, da die Messung zu stark durch die im Gemisch vorhandenen, ebenfalls Infrarot-Strahlung absorbierenden Gase Kohlendioxid und Wasserdampf gestört wurde. Die Verwendung spektroskopischer Methoden zur Selektivierung der Messung auf das zu bestimmende Gas schied wegen des zu großen apparativen Aufwands für ein Betriebsphotometer aus.

So entstand der Gedanke, das im Gemisch zu bestimmende Gas selbst als Strahlungsempfänger zu verwenden und damit die notwendige Selektivierung zu erreichen. Die Diskussion dieser Möglichkeit mit Lehrer, dem gerade die Entwicklung eines registrierenden Infrarot-Spektralphotometers mit bemerkenswerten Eigenschaften mit großem Erfolg gelungen war, führte zum Entschluß, die Entwicklung eines Betriebsphotometers mit selektivem Empfänger gemeinsam durchzuführen. Schon nach knapp einem Jahre konnte ein erster Prototyp für die

Messung von Kohlenmonoxidspuren im Reinwasserstoff für die Ammoniaksynthese im Werk Oppau erprobungsweise eingesetzt werden. Die Überlegenheit des schnell und zuverlässig arbeitenden physikalischen Gerätes über die bisher verwendeten, elektrochemisch arbeitenden Meßgeräte zeigte sich bald und überzeugte auch manchen Betriebschemiker, der zuvor dem Einsatz eines physikalisch, zudem mit Elektronenröhren arbeitenden Gerätes für eine so betriebswichtige Messung mit verständlichem Mißtrauen entgegensah.

Nachdem sich die günstigen Eigenschaften der neuen Meßmethode erwiesen hatten, meldeten *Lehrer* und *Luft* im März 1938 ein Patent [2] an, dessen Erteilung im Dezember 1942 erfolgte. Die zur Feststellung der Patentfähigkeit erforderlichen, umfangreichen Literatur- und Patentrecherchen hatten gezeigt, daß beide nicht als erste auf den Gedanken gekommen waren, ein Gas als Empfänger für infrarote Strahlung zu verwenden. Bereits im Jahr 1881 hatten *Bell*, *Tyndall* und *Roentgen*, unabhängig voneinander, auf einen opto-akustischen Effekt hingewiesen, der in einem abgeschlossenen Gasvolumen bei Eintritt periodisch unterbrochener Wärmestrahlung entsteht. Etwa gleichzeitig mit *Lehrer* und *Luft*, also in den Jahren 1937/38 haben *Veingerow* [3] und *Pfund* [4] unabhängig voneinander auf Anordnungen zu wissenschaftlich-technischen Anwendungen dieses Effekts hingewiesen, wobei allerdings Wege gegangen wurden, die sich für die technische Anwendung als weitgehend ungeeignet erwiesen.

Auf ausführliche Angaben über den Aufbau und die Funktionsweise des neuen Gerätes der BASF, im folgenden kurz „URAS“ (Ultrarot Absorptions-Schreiber) genannt, soll in diesem historischen Abriß verzichtet und lediglich mit einer Abbildung aus der ersten Veröffentlichung [1] an die Ansicht des Gerätes erinnert werden (Bild 1). Die etwas ungewöhnliche Art der Unterbringung der drei Baugruppen: der Stromversorgung, des optischen Teils sowie des Verstärkers in aneinandergeflanschte, handelsübliche elektrische Schaltkästen erklärt sich aus den schon kurz vor dem Krieg aufgetretenen Beschaffungsschwierigkeiten. Es zeigte sich jedoch im Laufe der Zeit, daß die Robustheit dieses improvisierten Gehäuses von großer Bedeutung für die Einsatzfähigkeit unter Prozeßbedingungen war.

Trotz aller während dieser Zeit aufgetretenen Beschaffungs- und Fertigungsschwierigkeiten konnten bis 1945 mehrere hundert URAS-Geräte hergestellt werden, die im wesentlichen in den Werken der damaligen I.G. Farbenindustrie zum Einsatz kamen. Eine Reihe von Geräten wurde bei Luftangriffen zerstört, darunter auch ein gerade neu entwickelter Dreifach-URAS [5], der mit dem Gebäude der Betriebskontrolle in Oppau einem Bombenvolltreffer zum Opfer fiel.

Eine größere Anzahl von einsatzbereiten Geräten, die man in das Steinsalzbergwerk Heilbronn verlagert hatte, wurden nach 1945 von Beauftragten der Besatzungsmächte beschlagnahmt und nach USA und England gebracht. Nach vielen Befragungen mußte auch *Luft* eine unfreiwillige Reise mit militärischer Begleitung nach England antreten, wo er in Wimbledon gemeinsam mit

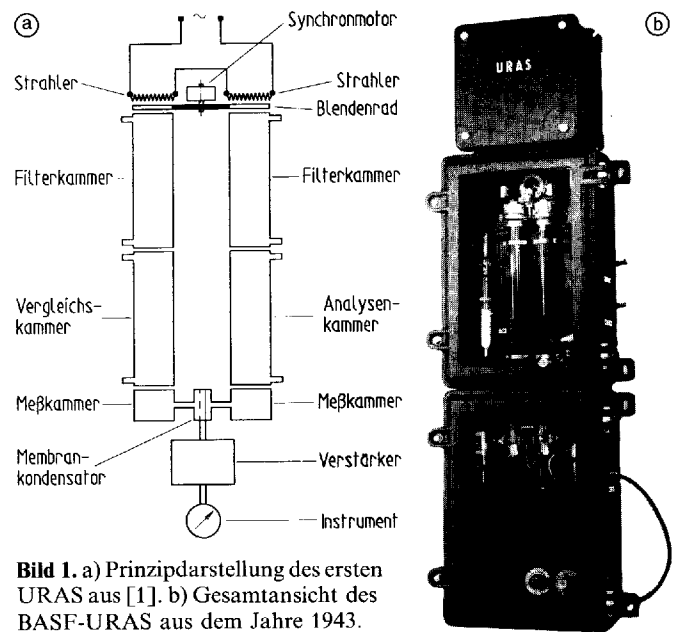


Bild 1. a) Prinzipdarstellung des ersten URAS aus [1]. b) Gesamtansicht des BASF-URAS aus dem Jahre 1943.

vielen anderen deutschen Technikern und Wissenschaftlern fünf Wochen lang Gast im sogenannten Interrogation-Camp war.

Zweifellos hat diese intensive Befragung sowie die Beschlagnahme von Geräten und Unterlagen auch auf dem Gebiet der NDIR-Analyse, vor allem in USA, zu starken Impulsen geführt, wie man aus der einschlägigen Literatur entnehmen kann und wovon sich *Luft* auch bei einem späteren Aufenthalt in USA und Besuchen bei auf diesem Gebiet tätigen Firmen wie Mine Safety Appliances, Perkin-Elmer und Beckman persönlich überzeugen konnte.

Nach der Rückkehr von Wimbledon nach Ludwigshafen bestand wenig Aussicht, die Tätigkeit auf diesem Arbeitsgebiet in absehbarer Zeit wieder aufnehmen zu können. Obwohl auch einige Angebote zur Weiterarbeit in USA vorhanden waren, entschloß sich *Luft*, ein Angebot nach Frankreich anzunehmen, das von der damaligen französischen Administration des Werkes vermittelt wurde. Verhältnismäßig schnell und unter für die Nachkriegszeit guten Bedingungen konnte er im französischen Luftfahrtforschungsinstitut ONERA – (Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques) – zuerst in Toulouse und dann in Chatillon bei Paris seine Arbeiten wieder aufnehmen.

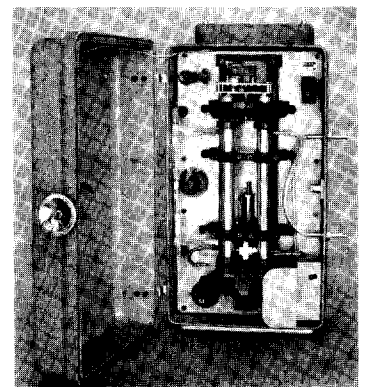


Bild 2. Verbesserter URAS-Nachfolger vom Typ ONERA 80.

So entstand bald ein neues Gerät nach dem URAS-Prinzip, das jedoch bezüglich seines Aufbaus, seiner Elektronik und seiner Handhabung verbessert werden konnte. Nach dem Bau und der Erprobung einiger Prototypen wurde die Serienfertigung des Gerätes von ONERA der Firma Controle de Chauffage übergeben, die später in die Hände des Meßgeräteherstellers Schlumberger überging. Eine Ansicht des Gerätes – Type ONERA 80 – zeigt Bild 2. Auf Einzelheiten soll jedoch nicht eingegangen und nur auf eine neuartige Anwendung (2-Komponenten-Messung von Kohlenmonoxid in Verbrennungsgasen) des URAS-Meßprinzips hingewiesen werden. Bei diesem Zweifachanalysengerät wurde davon Gebrauch gemacht, daß in einem URAS-Empfänger jeweils nur die innerhalb der Absorptionsbanden des Empfänger-gases gelegene Strahlung absorbiert, die übrige Strahlung dagegen ungenutzt bleibt und für die Messung weiterer Komponenten eines zu untersuchenden Gasgemischs zur Verfügung steht [6]. Versieht man den Empfänger mit einer strahlungsdurchlässigen Rückwand, so kann die Strahlung auf einen zweiten Empfänger wirken, der ein anderes Empfänger-gas enthält. Zwischen die beiden Empfänger wurde ein zweites Analysen-Vergleichskammerpaar geschaltet, wobei durch die Längen und das Längenverhältnis der Kammern die gewünschten Empfindlichkeitsbereiche eingestellt werden konnten.

4 Die 50er Jahre

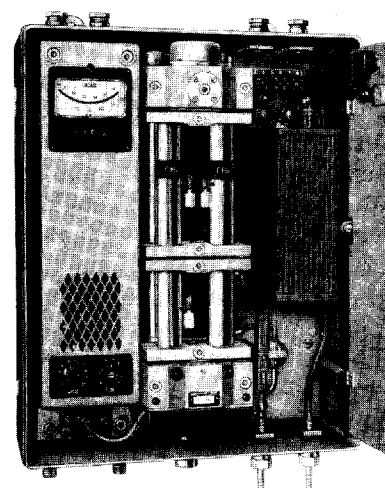
Ende 1952 übernahm die Firma Hartmann & Braun in Frankfurt/M. von der BASF die Lizenz zur Herstellung und zum Vertrieb des URAS gleichzeitig mit den Benutzungsrechten für das eingetragene Warenzeichen. Ende 1955 erfolgte der Serienanlauf des URAS 1, der gegenüber dem BASF-URAS eine vollkommene Neukonstruktion darstellte. Wesentliche Kennzeichen des konstruktiven Aufbaus waren:

- Unterbringung aller Bauteile, also physikalischer Meßteil oder optischer Analysenteil, Verstärker, Netzteil und Thermostat in einem staub- und spritzwasserdichten Leichtmetallgußgehäuse mit verschließbarem Gehäusedeckel;
- modularer Aufbau der optisch-analytischen Bauelemente, bestehend aus Strahlereinheit, Küvetten und Empfänger, leicht auswechselbar auf einer optischen Bank;
- Vorverstärker und Empfänger starr aber leicht lösbar miteinander verbunden;
- Röhrenverstärker mit Langlebensdauerrohren;
- Umluftthermostat mit Übertemperatursicherung.

Der URAS 1 (s. Bild 3) war zunächst nur für die drei Meßgase CO, CO₂ und CH₄ lieferbar. In kurzer Zeit wurden dann aber rund 20 weitere Gase der Erfassung durch den URAS 1 zugänglich gemacht. Darunter befanden sich auch die besonders schwer voneinander zu trennenden aliphatischen und olefinischen Kohlenwasserstoffe, für die spezielle Gasfiltertechniken (positive und negative Filterung) entwickelt wurden [14]. Zur Korrektur

Bild 3.

Erster serienmäßiger URAS 1 mit Röhrenverstärker und Umluftthermostaten.



des atmosphärischen Luftdruckeinflusses bei stark unterdrückten Meßbereichen wurde eine sogenannte Barometerblende entwickelt. Diese bestand aus einem Membrandosensatz, der über einen Hebelmechanismus eine optische Blende im Meßstrahlengang beeinflusste und so den Luftdruckeinfluß am unterdrückten Nullpunkt kompensieren konnte.

Die hauptsächlichen Anwendungen des URAS 1 bestanden in der Überwachung und Reinheitsprüfung von Betriebsgasen in der chemischen Industrie, in der Raumluftkontrolle auf gesundheitsschädliche und explosive Gase, in der Überwachung und Regelung von Rauchgasen und Ofenatmosphären sowie in der Pflanzenphysiologie. In einer besonderen Einschubausführung gab es den URAS auch für medizinische Anwendungen wie z. B. Lungenfunktionsprüfungen und Narkoseüberwachung. Während der URAS 1 mit einer Modulationsfrequenz von 6,25 Hz betrieben wurde, erzielte der medizinische URAS mit einer Modulationsfrequenz von 25 Hz 90-%-Zeiten von 150 ms.

Wie bereits erwähnt konnten zu Beginn der 50er Jahre Firmen in Frankreich, England und USA das ursprüngliche BASF-Patent ohne Lizenzzahlungen benutzen. So gab es das ebenfalls schon angeführte Gerät Typ ONERA 80 der Firma Controle de Chauffage, das gleichermaßen als eine Neukonstruktion des alten BASF-URAS aufgefaßt werden kann.

In England brachte die Firma Infrared Development ein Gerät auf den Markt, das mit nur einem Strahler und zwei Reflektoren für die beiden Strahlengänge ausgerüstet war [15]. Bei diesem Gerät wurde ein Kompensationsmeßverfahren angewendet. Das Ausgangssignal des Membrankondensators wurde verstärkt und diente zum Antrieb eines Servomotors, der eine Abgleichblende im Meßstrahlengang und gleichzeitig den Schreibarm eines Kreisblattdiagrammschreibers betätigte. Die Absorption in der Meßküvette konnte so durch Herausfahren der Abgleichblende aus dem Meßstrahlengang kompensiert werden. Schwankungen der Emission des Infrarotstrahlers haben bei diesem Verfahren keinen Einfluß mehr auf die Meßanzeige.

Erwähnenswert sind noch zwei Geräte aus dieser Zeit, die von Herstellern in den USA angeboten wurden und

ebenfalls ein Kompensationsverfahren benutzten. Der LIRA (Luft type IR-Analyzer) der Firma Mine-Safety Appliances [16] besaß zwei Strahler, eine Unterbrecherblende, die abwechselnd den einen oder anderen Strahlengang freigab, eine Meß- und eine Vergleichsküvette und einen Strahlenvereiniger, der die Strahlung aus beiden Küvetten in eine Empfängerammer führte. Ein vom Membrankondensator angesteuerter Verstärker besaß am Ausgang einen phasenabhängigen Gleichrichter. Über ein von dem Kompensationsschreiber gesteuertes Abgleichpotentiometer wurde die Strahlersymmetrie in der Weise beeinflußt, daß am Ausgang der beiden Küvetten die gleiche Strahlung auf den Empfänger fällt, der Empfänger also ein Nullsignal erhält. Mit einer Strahlenquelle, drei Strahlengängen (Vergleichs-, Kompensations- und Meßstrahlengang) und einer Empfängerammer arbeitete der Tri-Non-Analyzer der Fa. Perkin-Elmer [15].

Grundsätzlich ist zu den drei zuletzt genannten Kompensationsverfahren zu sagen, daß sie zwar durch Strahleremission oder Empfängerempfindlichkeiten bedingte Proportionalfehler kompensieren können, die viel unangenehmeren Nullpunktsfehler durch Symmetrieververschiebungen zwischen Meß- und Vergleichsstrahlengang dagegen bleiben nach wie vor erhalten. Aus diesem Grund findet man bei der heutigen Generation von Infrarot-Analysengeräten keine derartigen Kompensationsverfahren mehr.

Eine grobe Theorie des URAS-Empfängers konnte Luft [1] bereits in seiner ersten Arbeit über den URAS vor 50 Jahren geben. Diese Theorie gibt bereits völlig richtig die Größenordnungen des Meßeffektes wieder: Die Amplitude der Druckdifferenz an der Membran beträgt größenordnungsmäßig $0,1 \mu\text{bar}$, die Amplitude der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Meßkammern liegt bei 10^{-4} K und die Auslenkungsamplitude der Membran bei $10^{-3} \mu\text{m}$. Eine Verfeinerung der Theorie erfolgte 1965 [17]. Diese Theorie gibt auch den Einfluß der Temperaturleitfähigkeit, der Zähigkeit und der Schwingungsrelaxationszeit des Gasgemisches in den Empfängerammern richtig wieder.

Im Zuge der vielfältigen Anwendung des URAS – vor allem bei besonderen Anforderungen an die Nullpunktstabilität bei hoher Meßempfindlichkeit und der Gegenwart von Störgasen – entstand der Wunsch nach einer Verbesserung des Meßprinzips.

Als erfolgversprechend erschien der Gedanke, den Empfänger mittels eines strahlungsdurchlässigen Fensters in zwei Kammern unterschiedlicher Länge aufzuteilen, die das Empfängergeras enthalten und nacheinander von der zu messenden Strahlung durchlaufen werden. Die Differenz der dabei entstehenden optisch-pneumatischen Signale wird wie beim URAS mit einem Membrankondensator gemessen. Die vordere, kürzere Kammer absorbiert vorwiegend die in den Zentren der Absorptionslinien, die hintere, längere Kammer die in den Flanken der Linien gelegene Strahlung, wobei die Kammerlängen so gewählt sind, daß die Signale im Nullpunkt der Messung etwa gleich sind [7; 8]. Die ersten Vorversuche waren dann

auch sehr erfolgversprechend und bestätigten diesen prinzipiellen Ansatz.

Anfang 1957 verließ Luft ONERA, um ein Angebot (Aufbau und Leitung der Physikalischen Abteilung der Bergbau-Forschung GmbH) des Steinkohlebergbauvereins in Essen anzunehmen. Nach Aufnahme seiner Tätigkeit in Essen zeigte sich bald, daß die Wiederaufnahme der Arbeiten zum 2-Schicht-Empfänger durchaus in das Konzept seines neuen Aufgabengebietes paßte. Mehrere schwere Grubenunglücke hatten die Hohe Behörde der Montanunion (Brüssel) im Jahre 1957 veranlaßt, die Entwicklung neuer Geräte zur Erhöhung der Grubensicherheit mit Hilfe eines Preisausschreibens zu fördern. Unter den ausgeschriebenen Geräten befand sich auch ein Gerät zur kontinuierlichen Messung von Kohlenmonoxid unter Tage. Die sichere und schnelle Messung von Spuren dieses Gases erlaubt die Erkennung von Grubenbränden bereits im frühen Stadium ihrer Entstehung und gibt damit die Möglichkeit, Bekämpfungsmaßnahmen rechtzeitig einzuleiten. Das Preisausschreiben enthielt eine Reihe von Auflagen, die eine sichere Funktion der Geräte unter den schwierigen Umweltbedingungen des Untertagebergbaus gewährleisten sollten. Der Abschluß des Preisausschreibens war für Anfang Februar 1962 vorgesehen, wobei vorher die etwa ein Jahr erfordernde Prüfung der eingereichten Geräte in den Laboratorien und Versuchsbetrieben des Bergbaus der Montanunion durchgeführt werden mußte.

Obwohl die personellen und sachlichen Voraussetzungen für die Geräteentwicklung im neuen Forschungsinstitut des Steinkohlenbergbauvereins erst noch geschaffen werden mußten, wurde – im Einvernehmen mit dem Patentinhaber ONERA – der Beschluß gefaßt, die Entwicklung von Infrarot-Gasanalysegeräten nach dem Zweischiebteempfängerprinzip in das Programm der Physikalischen Abteilung aufzunehmen und mit dem im folgenden „UNOR“ genannten Gerät gegebenenfalls am Preisausschreiben teilzunehmen. Trotz der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit gelang es, dank des unermüdlischen Einsatzes aller Beteiligten einige Geräte, die den Prüfungsanforderungen entsprachen, rechtzeitig fertigzustellen und zum Preisausschreiben einzureichen.

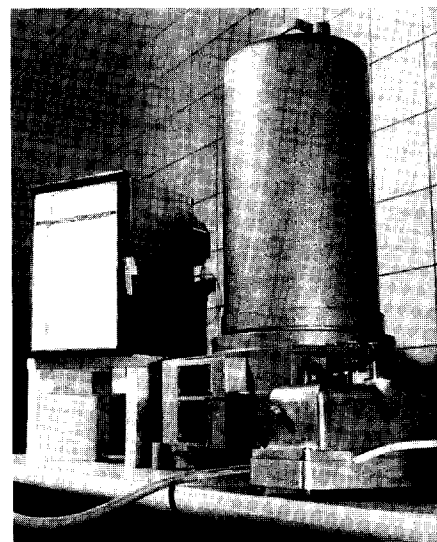


Bild 4.
Prototyp eines
schlagwetterge-
schützten UNOR
aus dem Jahre 1960
(Bergbauforschung
Essen-Kray).

Bild 4 zeigt eines dieser ersten Geräte in der erforderlichen schlagwettergeschützten Ausführung für die Messung und Registrierung von Kohlenmonoxidspuren in Grubenwettern. Am 9. Februar 1962 wurde in Luxemburg dem UNOR der erste Preis seiner Gruppe zuerkannt. An dieser Entwicklung waren *Rossi, Langner, Kessler* und *Perrey* wesentlich beteiligt.

Weitere Einzelheiten sind den Veröffentlichungen über den UNOR zu entnehmen [9; 10; 11]. Im Rahmen einer Dissertation [12] wurde eine genauere Berechnung der Absorption in den einzelnen Gasschichten des UNOR-Empfängers durchgeführt. Für den mobilen Einsatz wurde ein tragbarer, eigensicherer Klein-UNOR entwickelt [13].

5 Die 60er Jahre

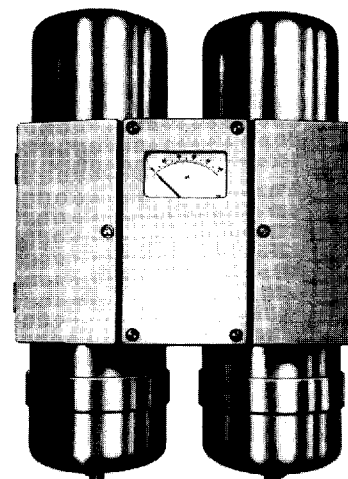
Bereits vor dem Abschluß des Preisausschreibens wurde der Firma Maihak AG in Hamburg die Lizenz zur Herstellung des UNOR erteilt. Damit beschränkte sich die Arbeit der Physikalischen Abteilung der Bergbau-Forschung auf Beratung und Hilfe bei der Serienfertigung des Gerätes und beim Einsatz unter Tage, der zügig voranging. Bereits im Oktober 1967 wurde bei Maihak der tausendste UNOR fertiggestellt, wobei etwa 700 Geräte im westdeutschen Steinkohlebergbau eingesetzt wurden. Durch die Erschließung zahlreicher Anwendungsgebiete konnte bis März 1977 die Zahl der von der Maihak fertiggestellten Geräte auf Zehntausend erhöht werden.

Der UNOR der Firma Maihak kam in den Jahren 1963/64 in zwei verschiedenen Ausführungen auf den Markt [11; 17]. Der UNOR 1 zur Messung von CO in Grubenatmosphären war in einem zylindrischen druckfesten Stahlgehäuse mit abschraubarer Haube in schlagwettergeschützter Ausführung untergebracht. Auf der Vorderseite einer senkrechten Montageplatte befand sich der Analysator, auf der Rückseite waren die elektrischen und elektronischen Baugruppen untergebracht. Der Analysator war zusätzlich luftdicht gekapselt und damit gegen Eindringen von Staub und Gasen in den Stahlgang geschützt. Integriert in das Gerät war eine Membranpumpe zum Ansaugen der Grubenluft und eine Notstrombatterie mit Zerschneiderumformer und Ladeeinrichtung. Die Anzeige- und Bedienungselemente befanden sich hinter einer verschließbaren, staubdichten Platte am Gehäusesockel. Der UNOR 2 zur Messung von CO, CO₂ und CH₄ befand sich in einem Stahlblechgehäuse mit verschließbarer Tür. Die einzelnen Baugruppen saßen auf der Rückseite einer herausklappbaren Gerätefrontplatte, auf deren Vorderseite Anzeigeinstrument und Bedienungselemente sowie das Schauglas des Strömungswächters untergebracht waren.

In der zweiten Hälfte der 60er Jahre erschienen der URAS 2 und der URAS 2 Ex auf dem Markt. Der URAS 2 war wiederum in ein staub- und spritzwasserdichtes Leichtmetallgußgehäuse eingebaut. Das Gehäuse war durch eine horizontale Trennwand in zwei Kammern geteilt, die durch jeweils eine Frontplatte mit Gummi-

Bild 5.

Ex-Ausführung des URAS 2 (Hartmann & Braun AG, Frankfurt/M.).



dichtung verschlossen waren. Die Frontplatten konnten nach vorn herausgezogen und umgeklappt werden. Auf der Rückseite der oberen Frontplatte waren Verstärker und elektronische Netzstabilisierung aufgebaut. Der Analysenteil befand sich in der unteren Gehäusenhälfte in einem thermostatierten Raum, horizontal auf einer herausziehbaren Montageplatte. Die optischen Analysenteile waren zylinderförmig in einem auf der Montageplatte befestigten Prisma leicht austauschbar gelagert.

Die gleichen Baugruppen wurden auch im URAS 2 Ex (s. Bild 5) verwendet. Dieses Gerät bestand aus zwei aufrecht stehenden und durch ein Gußgehäuseteil verbundenen zylinderförmigen druckfesten Kapseln in explosionsgeschützter Ausführung. Nach Öffnen der unteren Verschlusskappen und Betätigen einer Entriegelung konnten die schiffenförmigen Baugruppenträger bis zu einer zweiten Verriegelung nach unten herausgefahren werden.

Die in der Bundesrepublik für alle Fahrzeuge, die ab 1.7.1969 erstmals in den Verkehr kamen, amtlich vorgeschriebene Begrenzung des CO-Gehaltes im Abgas auf 4,5 Vol.-% führte zur Entwicklung einer neuen Gerätetype, dem sog. CO-Tester. Der Test wurde in Kfz-Werkstätten und TÜV-Prüfstellen im Stand und im Leerlauf durchgeführt. Dazu brauchte man tragbare Geräteausführungen, die mit einer Entnahmesonde für den Auspuff, einem Luftkühler mit Kondensatabscheider und einem Filter kombiniert wurden.

Im H & B-CO-Tester, der bei seiner Markteinführung nur 2200,- DM kostete, wurden hierzu die Baugruppen des URAS 2 kombiniert mit einer vereinfachten Elektronik verwendet (Bild 6). Gleichzeitig erschien auf dem Markt ein CO-Tester der Firma Bosch, der von Siemens hergestellt wurde. Siemens verwendete für den Bosch-Tester Baugruppen des etwas früher fertiggestellten Infrarot-Analysators ULTRAMAT 1.

Der ULTRAMAT 1 verwendete im Gegensatz zu allen bisher auf dem Markt erschienenen Infrarot-Analysatoren keinen Membrankondensator zur Erfassung der Strahlungsdifferenz, sondern einen Mikroströmungsfühler [19], der in einem Verbindungskanal zwischen den beiden Empfängerammern die Druckausgleichsströmung zwischen den Kammern erfaßte. Dieser Mikroströ-

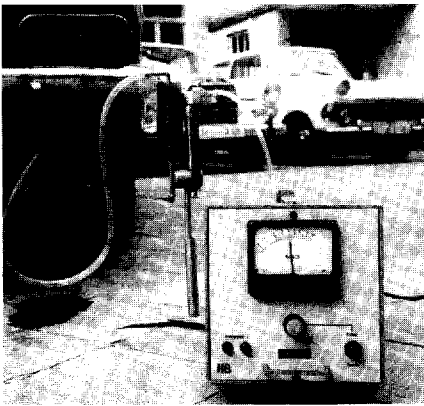


Bild 6.
Tragbarer URAS
(CO-Tester) für
Anwendungen in
Kfz-Werkstätten
und TÜV-Prüf-
stellen.

mungsfühler bestand aus zwei mäanderförmigen Nickelwiderstandsgittern mit den Abmessungen $1 \times 1 \text{ mm}^2$, die sich im Abstand von ca. 0,2 mm gegenüberstanden. Im übrigen besaß der ULTRAMAT 1 eine keramische Heizplatte als Strahlungsquelle, eine mechanische Unterbrecherscheibe vor dem Strahlteiler, der gasdicht gekapselt war und deren Drehzahl mit Hilfe eines kollektorlosen Gleichstrommotors elektronisch geregelt werden konnte. Der ULTRAMAT 1 konnte mit einem stoßkompensierten Empfänger ausgerüstet werden, bei dem zwei volumengleiche und von der Strahlung nicht beaufschlagte zusätzliche Empfängerkammern über Kreuz mit den vorhandenen Empfängerkammern so verbunden wurden, daß sich der Mikroströmungsfühler im pneumatischen Schwerpunkt aller vier Kammern befand [20]. Es gab aber auch eine Ausführung mit zwei hintereinandergeschalteten Durchstrahlempfängern für die simultane Erfassung von zwei Gaskomponenten.

Mit solchen Durchstrahlempfängern waren auch die CO/CO₂-Tester zur Automobil-Abgasmessung der Firma Hartmann & Braun, die 1975 auf den Markt kamen, ausgerüstet. Um diese Zeit boomte im übrigen der Markt für komplette Automobil-Abgasanlagen für die Kfz-Hersteller, die für den Export ihrer Fahrzeuge in die USA zur Erfüllung der dortigen strengen Abgasvorschriften Testanlagen nach amerikanischer Norm einsetzten [21]. Hier wurden Infrarot-Analysatoren zur Erfassung von CO, CO₂ und auch NO benötigt. Der auf den Markt von Automobil-Abgasmeßanlagen spezialisierte japanische Hersteller Horiba war mit seinen Anlagen weltweit in führender Position und dürfte damals der von den Stückzahlen her erfolgreichste Hersteller von Infrarot-Analysengeräten gewesen sein.

Auf dem Gebiet der Medizintechnik wurden die Baugruppen des URAS 2 T, eines verbesserten Nachfolgemodells des URAS 2, eingesetzt. Es gab den URAS MT, einen Infrarot-Gasanalysator zur schnellen CO₂-Messung, der auch für die Erfassung von CO und Lachgas im Atemgas verwendet werden konnte. Als Narkometer konnte er alle Narkosemittel wie Halothan, Fluothan, Penthrane, Trilen und Chloroform in der Atemluft erfassen und war damit in der Anästhesie und Chirurgie einsetzbar. Weitere Einsatzgebiete waren die Innere Medizin, die Kinderheilkunde, die Unfallmedizin sowie Physiologie, Rehabilitation und Sportmedizin. Mit dem Gerät, das eine Einstellzeit von < 150 ms besaß, konnten

die genannten Gaskomponenten gut aufgelöst während jedes einzelnen Atemzuges erfaßt werden.

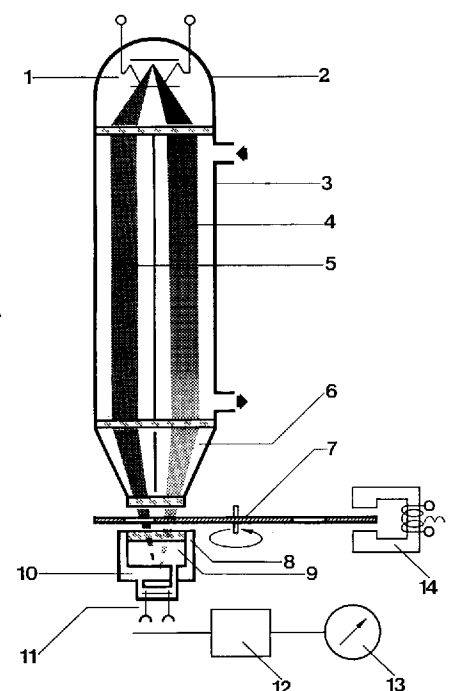
6 Die 70er Jahre

Der ULTRAMAT 1 und die Nachfolgemodelle ULTRAMAT 2 bis 5 hatten, wie bereits erwähnt, einen Strömungsfühler als Nachweiselement im Empfänger. Schunck, dem dieser Schritt als erster mit dem ULTRAMAT 1 gelungen war, nutzte diesen Erfolg für eine weiterführende Entwicklung aus. Da alle bis dahin bekannten Meßgeräte mehr oder weniger starke Mikrophoniefekte durch Erschütterungen und Gebäudeschwingungen zeigten, entschloß sich Schunck, einen Empfänger zu entwickeln, der oberhalb dieses Frequenzspektrums arbeitet. Um dieses Ziel erreichen zu können, mußte das sensitive Element (Mikroströmungsfühler) extrem schnell sein. Grundlegende Untersuchungen zu derartigen Meßfühlern führte er in der Zeit von 1967–1974 durch und promovierte mit dem Thema „Schnelle Meßfühler für kleine Gasströme“ an der TH Karlsruhe [26].

Nach seinem Wechsel zu Leybold-Heraeus, Hanau, setzte Schunck diese Ergebnisse in eine Geräteentwicklung um, aus der 1976 ein neuer Gasanalysator mit der Bezeichnung BINOS 1 hervorging [22]. Wesentliche Merkmale dieses Gerätes (s. Bild 7) sind die extrem hohe Modulationsfrequenz von über 200 Hz und die kompakte Bauweise mit zwei voneinander unabhängigen Meßkanälen. Durch eine unsymmetrische Chopperscheibe wird zusätzlich ein- bis zweimal pro Umdrehung ein Prüfpeak produziert, mit dem die Drehzahl und Intensitäten nachgeregelt werden [23]. Durch diese Intensitätsregelung erreicht man eine extrem hohe Langzeitstabilität des Analysators, die durch den klebefreien Aufbau des Empfängers [25] zusätzlich unterstützt wird. Da der BINOS-Empfänger nur aus einer Gas-Schicht besteht, mußte das

Bild 7.
Schematischer
Aufbau des
BINOS 1.

- 1: Infrarot-Strahler,
- 2: Reflektor,
- 3: Meßküvette,
- 4: Küvetten-Meßseite,
- 5: Küvetten-Ver-
gleichsseite,
- 6: Filterküvette,
- 7: Modulations-
blende,
- 8: Strahlungsemp-
fänger,
- 9: Absorptions-
kammer,
- 10: Ausgleichs-
kammer,
- 11: Strömungs-
fühler,
- 12: Signalverar-
beitung,
- 13: Anzeige-
instrument,
- 14: Wirbel-
stromantrieb



Selektivitätsproblem durch zusätzliche Gas- und Interferenzfilter gelöst werden. Weiterhin wird der Empfänger vor der Füllung über mehrere Stunden bei hohen Temperaturen ($\sim 300^\circ\text{C}$) gespült, um Wasserdampfreste, die zu einer Querempfindlichkeit führen können, auszutreiben.

Als Modulationseinheit wurde in den BINOS 1 erstmalig ein Wirbelstromantrieb [24] eingesetzt, der eine extrem gute Laufruhe hat und damit eine hohe Signalstabilität ermöglichte. Durch den modularen Aufbau des Gerätes konnten sehr schnell neue Anwendungen für unterschiedliche Spektralbereiche [28], erhöhte Prozeßtemperatur [30] und komplexe Applikationen [29] realisiert werden. Hervorzuheben ist hierbei eine Anwendung zur kontinuierlichen NO_x -Messung in einem Gerät ohne katalytische Umwandlung des NO_2 in NO . Die NO -Messung erfolgte im 1. Kanal des Fotometers im IR-Bereich mittels Negativfilterung, während die NO_2 -Messung simultan im 2. Kanal im UV-Bereich durchgeführt wurde [32].

Die 80er Jahre

Nachdem das UNOR-Patent (Zweischicht-Empfänger) abgelaufen war, wurde dieser Grundgedanke auch von Siemens und Hartmann & Braun schnell aufgegriffen. Siemens entwickelte einen ULTRAMAT 5 mit einem durchstrahlten 4-Kammer-Empfänger [35], der durch einen optischen Koppler zwischen der Meß- und Referenzseite auf minimale Querempfindlichkeiten abgeglichen werden konnte. Hartmann & Braun konstruierte für den neuen URAS 3 [34] einen „teilgeschichteten“ 4-Kammer-Empfänger [33], mit dem ebenfalls eine Querempfindlichkeitsreduzierung herbeigeführt werden konnte (s. Bild 16). Durch die vielfältigen Applikationsmög-

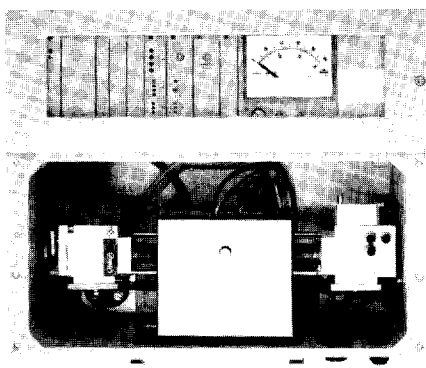


Bild 8. Aufbau des URAS 3 für Prozeßgastemperaturen bis 180°C . Im unteren geöffneten Gehäuse befindet sich der Analysator. Links sitzt die Strahler-Modulations-Einheit, rechts ist der Empfänger. Zwischen beiden Komponenten ist die beheizte Küvette angeordnet.

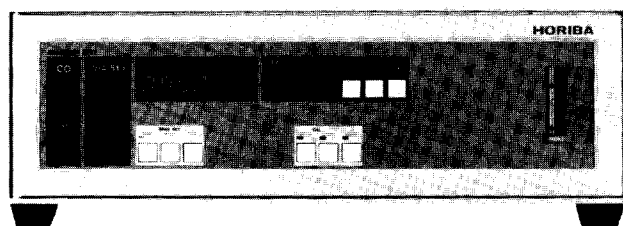


Bild 9. Geräteausführung von Horiba (Japan).

lichkeiten (ca. 35 Komponenten, Quarzküvetten, Feldgehäuse, beheizte Küvetten bis 180°C usw.) fand dieses Gerät sehr schnell viele Anwender in der Umwelt- und Verfahrenstechnik. Bild 8 zeigt einen URAS 3 GH mit einer beheizbaren Küvette (bis 180°C) für Prozeßgase mit hohen Wasserdampfgehalten bzw. hohen Säuretaupunkten.

Die Fa. Horiba (Japan) ging einen anderen Weg zur Verbesserung der Geräteeigenschaften. Da Horiba sehr stark im Bereich der Immissions- und Kfz-Meßtechnik vertreten ist, stand hier die drastische Senkung der Meßbereiche im Vordergrund. Horiba löste dieses Problem durch das sogenannte „Cross-Flow-Verfahren“. Bei diesem Verfahren erfolgt die erforderliche Modulation nicht durch einen mechanischen Zerhacker, sondern durch eine pneumatische Umschaltung von Meß- und Referenzgasströmen mit einer Frequenz von ca. 1 Hz. Diese Modulation wird allerdings erst aktiv, wenn eine Absorptionsdifferenz zwischen dem Meßgas und dem Nullgas durch eine selektive Absorption auftritt. Durch dieses Verfahren erhält man ein extrem stabiles Nullpunktssignal ohne jegliches Driftverhalten, so daß mit entsprechend hohen Zeitkonstanten (Minutenbereich) Meßbereiche von 0–1 ppm CO in Umgebungsluft realistisch sind. Im Bild 9 ist eine moderne Geräteausführung dieses Meßverfahrens dargestellt.

In der zweiten Hälfte der 80er Jahre gab es einen deutlichen Wandel in der Gerätetechnik für NDIR-Analysatoren. Ausgehend von der Leistungsfähigkeit moderner, mikroelektronischer Schaltungen und Prozessoren wurden die Analysengeräte mit immer höheren Funktionalitäten ausgestattet, wobei der physikalische Analytenteil dabei bewußt schwächer und damit kostengünstiger ausgebildet wurde.

Die Fa. Siemens präsentierte als erste einen solchen Analysator der neuen Generation. Der Analysator (s. Bild 10) basiert auf dem Einstrahlverfahren mit einem Zweischichtempfänger. Dieser prinzipielle Aufbau wurde bereits im Jahre 1957 von Luft untersucht und aufgrund der mangelhaften Nullpunktstabilität und der Abgleichprobleme verworfen. Siemens konnte diese Nachteile durch den Einsatz der μP -Technik und einer regelmäßigen Kalibrierung (alle 3–12 Stunden) ausschalten. Durch die Verrechnung des während der regelmäßigen Kalibrierung erhaltenen Offsetsignals läßt sich sogar eine Verbesserung der Empfindlichkeitsstabilität erzielen. Typische Anwendungen für dieses Gerät sind einfache Überwachungsfunktionen von Verbrennungsprozessen. Ein modifiziertes Gerät, das unter dem Namen ALCOMAT auf den Markt gebracht wurde, läßt z. B. eine exakte Atemgasanalyse im Hinblick auf Alkoholdämpfe zu. Dieses transportable Gerät wird bereits von der Verkehrspolizei zur Kontrolle von Verkehrsteilnehmern auf Blutalkoholwerte mit großem Erfolg eingesetzt.

Der zweite Gerätehersteller, der diese Funktionserhöhung durch die μP -Technik nutzte, war Leybold. 1987/88 wurden zwei Geräte vorgestellt, die unterschiedliche Anwendungsbereiche erfüllen sollten. Das Nachfolgegerät des BINOS 1 war der BINOS 1000 mit einer extrem

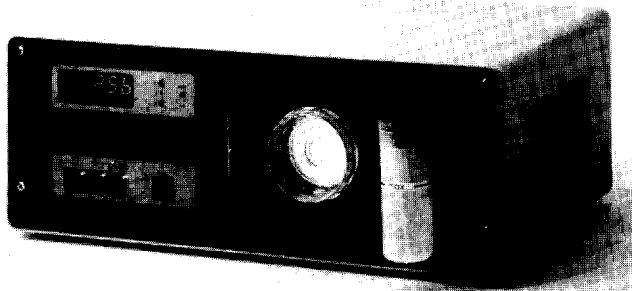
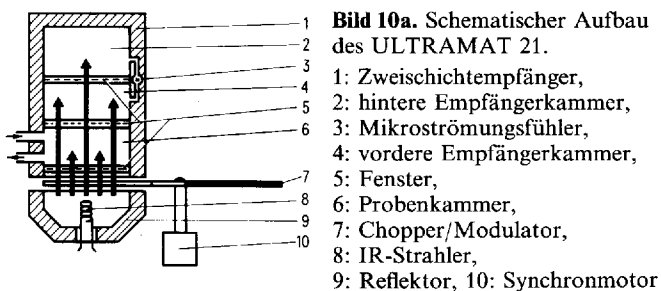


Bild 10b. Geräteausführung des ULTRAMAT 21.

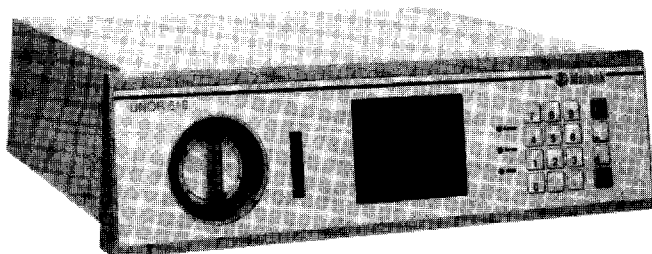


Bild 11. Geräteausführung des UNOR 610.

leistungsfähigen 16-bit-Prozessortechnik und entsprechenden Schnittstellen für eine digitale Kommunikation. Der ursprüngliche Einsatz dieses Gerätes zielte vor allem in die Kfz-Anwendung, bei der leistungsfähige Analysengeräte gefordert waren. Für die Standardaufgaben wurde der BINOS 100 [31] entwickelt, der sowohl mit pyroelektrischem Empfänger und Interferenzfiltern als auch mit dem vom BINOS 1 bekannten NDIR-Empfänger ausgestattet werden kann. Durch den kompakten und modularen Aufbau läßt sich dieses Gerät sehr vorteilhaft in andere Geräte wie Feststoffanalysatoren und TOC-Analysatoren integrieren.

Parallel zum ULTRAMAT 21 und BINOS 100 wurde bei Hartmann & Braun in Frankfurt/M. das von der Funktionalität bisher umfangreichste NDIR-Gasanalysengerät (URAS 10) entwickelt. Das photometrische Grundkonzept lehnt sich an die bereits beschriebenen UNOR- und BINOS-Konzepte an. Wie beim BINOS lassen sich an der Modulator-/Strahlereinheit zwei separate Meßkanäle mit geteilten Analysenküvetten anschließen. Als Empfänger werden in dieses Gerät allerdings Durchstrahlempfänger nach dem bewährten Zweischichtverfahren eingesetzt. Da der Empfänger durchstrahlt werden kann, können in jeden Meßkanal zwei Empfänger hintereinander angeordnet werden, so daß maximal 4 Komponenten pro Gerät erfaßbar sind [36]. Ein weiteres Novum sind die in diesem Gerät installierten Kalibrierküvetten. Durch Verschieben der Kalibrierküvette im Strahlengang

läßt sich der Analysator mit der eingeschlossenen Prüfgaskonzentration kalibrieren. Während des Kalibriervorgangs befindet sich Nullgas in der Analysenküvette. Nach der Kalibrierung wird durch ein eingebautes Magnetventil und eine Meßgaspumpe wieder das Meßgas in die Küvette geleitet. Die eingesetzte kleberfreie Kalibrierküvette ermöglicht eine periodische Kalibrierung des Gerätes mit einer Genauigkeit von 1–2% pro Jahr, so daß innerhalb dieses Zeitraums auf aufwendige Prüfgasversorgungen verzichtet werden kann [37].

8 Ausblick

Die jüngsten Entwicklungen zur NDIR-Gasanalyse wurden anlässlich der INTERKAMA 1992 in Düsseldorf präsentiert. Es zeigte sich, daß die elektronischen Möglichkeiten für diese Gerätetechnik noch nicht erschöpft sind. Insbesondere die Bedienungs- und Anzeigetechniken sowie die Datenkommunikation mittels eines Feldbusses stehen noch am Anfang einer sicherlich interessanten Entwicklung bis zum Jahre 2000. Die auf der INTERKAMA '92 gezeigten neuen Geräte UNOR 610 (Maihak) (s. Bild 11), URAS 4 (Hartmann & Braun) (s. Bild 12) und BINOS 1004 (Rosemount) (s. Bild 13) sind nur die ersten Schritte in diese Richtung. Neben der sinnvollen Anwendung der vorhandenen elektronischen Möglichkeiten wird es aber sicherlich punktuelle Verbesserungsmöglichkeiten zur Verringerung der Meßbereiche bei gleichzeitiger Erhöhung der Selektivität geben.

Insbesondere bei Vergleich mit konkurrierenden Verfahren wie Massenspektrometrie und Fourierspektroskopie

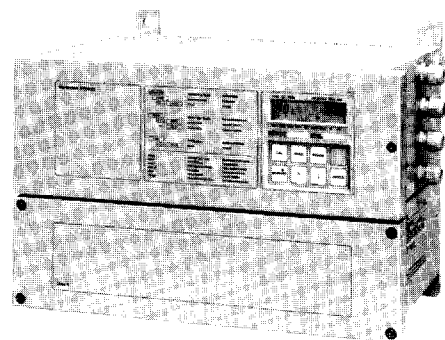


Bild 12.
URAS 4
(im Feldgehäuse).

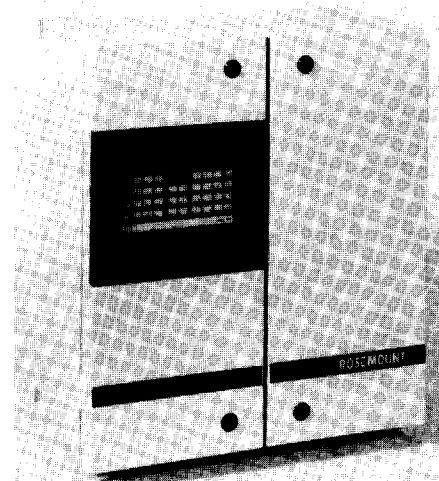


Bild 13.
BINOS 1004
(im Feldgehäuse).

[38] wird der NDIR-Technik in der Zukunft zusätzliche Anforderungen stellen, die mit einer weiter verbesserten Gerätetechnik erfüllt werden müssen.

Literatur

- [1] Luft, K. F.: Über eine neue Methode der registrierenden Gasanalyse mit Hilfe der Absorption ultraroter Strahlen ohne spektrale Zerlegung. Z. f. techn. Physik 24 (1943), S. 97–104.
- [2] Lehrer, E. und Luft, K. F.: Verfahren zur Bestimmung von Bestandteilen in Stoffgemischen mittels Strahlenabsorption. DRP 730478 vom 09.03.1938.
- [3] Veingorow, M. L.: Eine neue Methode der Gasanalyse beruhend auf dem optisch-akustischen Tyndall-Röntgeneffekt. C. R. Acad. Sci. URSS 19 (1937), S. 687.
- [4] Pfund, A. H.: Atmospheric contamination. Science 90 (1939), S. 326.
- [5] Luft, K. F.: Anwendung des ultraroten Spektrums in der chemischen Industrie. Z. f. angew. Chemie B-19 (1947), S. 2–12.
- [6] Luft, K. F.: Über nichtdispersive Ultrarotanalysengeräte. Z. anal. Chemie 164 (1958), S. 100–108.
- [7] Luft, K. F.: Physique de L'Infrarouge – Analyse des gaz par absorption infrarouge non dispersive. C. R. Acad. Sci. 242 (1956), S. 482–484.
- [8] Luft, K. F.: Vorrichtung zum Analysieren von insbesondere gasförmigen Gasgemischen durch Absorption von Strahlung. DBP 1017385 v. 07.05.1955.
- [9] Luft, K. F.: Der UNOR, ein neues Gasanalysengerät für den Bergbau. Glückauf 98 (1962), S. 493–495.
- [10] Luft, K. F. und Kessler, G.: Analysenmeßtechnik unter Tage. VDI-Berichte Nr. 97, VDI-Verlag, Düsseldorf (1965), S. 93–100.
- [11] Luft, K. F., Kessler, G. und Zörner, K. H.: Nichtdispersive Ultrarot-Gasanalyse mit dem UNOR. Chem.-Ing.-Technik 39 (1967), S. 937–945.
- [12] Kessler, G.: Über die Absorption ultraroter Strahlung in hintereinanderliegenden Gas-Schichten und ihre Bedeutung für photometrische Analysenverfahren. Diss. TU Clausthal (1967).
- [13] Luft, K. F. und Kessler, G.: Der neue eigensichere Klein-UNOR. Glückauf 110 (1974), S. 125–128.
- [14] Schaefer, W.: Gasanalyse mit dem URAS bei kompliziert zusammengesetzten Meßgasen. Chem.-Ing.-Techn. 33 (1961), S. 426–430.
- [15] Winterling, K. H.: Kontinuierliche Gasanalyse durch Absorption infraroter Strahlung, Teil II: Geräte und Anwendungen. ATM-Blatt V 723-23, Lfg. 350 (1965), S. 59–62.
- [16] Schaefer, W.: Ultrarot-Analysatoren und andere Betriebsphotometer. VDI-Berichte Nr. 97, VDI-Verlag, Düsseldorf (1965).
- [17] Schaefer, W.: Bestimmung der Schwingungsrelaxationszeit von CO/N₂-Gasgemischen aus der Analyse des Frequenzganges eines Ultrarot-Gasanalysators. Z. angew. Phys. 19 (1965), S. 55–60.
- [18] Blunck, O.: Allgemeine Fortschritte und gegenwärtiger Stand der nichtdispersiven Ultrarot-Gasanalysetechnik. ATM-Blatt V 723-31, Lfg. 395 (1968), S. 263–268.
- [19] Schunck, G.: Einrichtung zur Messung schwacher Gasströmungen, vorzugsweise in einem Gasanalysegerät. DBP 1573098 v. 30.11.1966.
- [20] Schaefer, W.: IR-Analysatoren. VDI-Berichte Nr. 199, VDI-Verlag, Düsseldorf (1974).
- [21] Engelhardt, H. und Schaefer, W.: Die Schadstoff-Emission des Ottomotors, ihre Messung und die Möglichkeit zu ihrer Verminderung. Chem.-Ing.-Techn. 44 (1972), S. 645–652.
- [22] Schunck, G.: Nichtdispersive Infrarot-Gasanalysatoren für Industrieprozesse und Umweltschutz. Dechema Monographien Bd. 80/2 (1976).
- [23] Schunck, G. und Randow, A.: Verfahren zur Messung des optischen Absorptionsvermögens von Proben und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. DBP 2614181 v. 02.04.1976.
- [24] Schunck, G. und Randow, A.: Vorrichtung zur Messung des optischen Absorptionsvermögens einer festen, flüssigen oder gasförmigen Probe. DBP 2608669 v. 03.03.1976.
- [25] Schunck, G. und Randow, A.: Pneumatischer Infrarot-Strahlungsdetektor mit einer vakuumdichten Kammer und einem strahlungsdurchlässigen Fenster. DBP 2720636 v. 07.05.1977.
- [26] Schunck, G.: Schnelle Meßfühler für kleine Gasströmungen. Diss. TH Karlsruhe (1974).
- [27] Zehner, B.: Signal und Rauschen beim Differential-Hitzdraht-anemometer. Diss. TH Karlsruhe (1979).
- [28] Wiegler, G. und Randow, A.: SO₂-Messung mit dem neuen UV-BINOS. Technisches Messen 50 (1983), S. 143–150.
- [29] Wiegler, G. und Mook, K.: Rauchgasanalyse mit dem BINOS-System. Technisches Messen 50 (1983), S. 423–428.
- [30] Wiegler, G.: Gasanalysensystem für erhöhte Prozeßtemperaturen. Technisches Messen 51 (1984), S. 385–393.
- [31] Lehnert, M., Modlinski, U. und Wiegler, G.: Mikroprozessor-gesteuertes Gasanalysegerät in Kompaktbauweise. Technisches Messen 54 (1987), S. 423–429.
- [32] Wiegler, G.: NO_x-Messung mit dem BINOS-System. messen, prüfen, automatisieren (1988), S. 259–261.
- [33] Fabinski, W., Deptolla, U. und Ascherfeld, M.: Nichtdispersives Infrarot-Gasanalysengerät. DBP 2924843 v. 20.06.1979.
- [34] Fabinski, W. und Ascherfeld, M.: Funktion und Aufbau des NDIR-Prozeßfotometers URAS 3. Technisches Messen 47 (1980), S. 257–264.
- [35] Weinl, J.: Nichtdispersives Infrarot-Gasanalysengerät. DBP 2926662 v. 02.07.1979.
- [36] Ascherfeld, M., Fabinski, W. und Vogt, R.: Erweiterte Möglichkeiten und Anwendungen mit dem NDIR-Fotometer URAS 10 E. Technisches Messen 57 (1990), S. 11–12.
- [37] Wiegler, G.: Mehrkomponenten-Gasanalysengerät mit µP-Steuerung und interner Kalibrier- und Korrekturmöglichkeit. VDI-Bericht Nr. 960 (1992), S. 625–634.
- [38] Wiegler, G.: Neue Entwicklungstendenzen in der Analysetechnik. GMA-Fachbericht 4 (1993), S. 137–143.

Dr. Karl Friedrich Luft, D-45149 Essen.

Dr. Werner Schaefer, D-61476 Kronberg.

Dr. Gerhard Wiegler, Hartmann & Braun AG, D-60488 Frankfurt.