

# Chemische Mikroanalyzesysteme

## Chemical Microanalysis Systems

H.-J. ACHE, Karlsruhe \*

**Key words:** Chemische Mikroanalyzesysteme, Optochemische Sensoren, Elektrochemische Sensoren, Massensensitive Sensoren (SAW-Elemente), Analytische Mikrosonden

Chemical microanalysis systems, Optochemical sensors, Electrochemical sensors, Mass sensitive sensors (SAW's), Analytical microprobes

### Zusammenfassung

Anhand von ausgewählten applikationsorientierten Entwicklungen von innovativen Meß- und Regelsystemen, realisiert auf der Basis integrierter chemischer Mikrosensorsysteme, unter Einschluß von Mikroelektronik und Mikroaktoren, werden Ansätze für echte Mikrosystemlösungen für „Vor-Ort“ Analytik in den Bereichen Prozeßkontrolle, Umweltschutz, Arbeitssicherheit und Medizintechnik diskutiert. Die Beispiele integrieren Mikrosysteme auf der Basis optochemischer, elektrochemischer und massensensitiver Sensoren.

### Summary

Application-oriented developments of innovative monitoring and controlsystems, produced on the basis of integrated chemical microsensorsystems including microelectronics and microactuators will be discussed.

They represent genuine microsystem approaches for „in-situ“ analysis in the areas processcontrol, environmental protection, safety in working places and medical technology. They are equipped with optochemical, electrochemical as well as mass sensitive sensors.

### Konventionelle Analytik

Die Bedeutung und das Potential von „Chemischen Mikroanalyzesystemen“ läßt sich am besten abschätzen durch eine Betrachtung der derzeitigen Situation der Instrumentellen Analytischen Chemie. Da gilt die Feststellung: Mit den vorhandenen analytischen Techniken ist es möglich, praktisch alle relevanten chemischen Substanzen zu identifizieren und zu quantifizieren. Ausnahmen dazu sind zu finden im Bereich der extrem schnellen (Echtzeit) Analytik, im Milli- oder Mikrosekundenbereich und bei der in-vivo Analytik in der medizinischen Diagnostik, wo kleinste Dimensionen und die Biokompatibilität von ausschlaggebender Bedeutung sind.

Ferner ist ein ausgeprägter Trend zu verzeichnen, der weg von den technisch aufwendigen, für viele Aufgaben geeigneten und darum auch sehr teuren Hochleistungsforschungsgeräten hin zu anwendungs- oder kundenspezifischen, äußerst zuverlässigen, wartungsfreien bedienerfreundlichen und kostengünstigeren Prozeßanalysengeräten führt. Diese Entwicklung, nicht zuletzt ausgelöst durch den stetig steigenden Analysenbedarf in der Prozeßkontrolle, Umweltschutz, Arbeitssicherheit und Medizintechnik, hat bereits ihren Niederschlag in Analysengeräten gefunden, die diesen Anforderungen weitgehend entsprechen, z. B. Analyseautomaten, die schnell und zuverlässig große Probemengen bewältigen können wie auch in semi-kontinuierlichen Techniken, z. B. beruhend auf dem Prinzip der Fließinjektionsanalyse und neuerdings auch in einigen kontinuierlich messenden Vor-Ort-Analysetechniken.

Chemische Mikroanalyzesysteme erheben nun den Anspruch, daß sie vielen der hier aufgeführten Anforderungen besser entsprechen als die herkömmlichen Techniken. Diese Ansprüche werden daraus abgeleitet, daß die Miniaturisierung unter Einsatz moderner Technologien wie der

Mikrosystemtechnik zu einer Reihe technischer Verbesserungen und auch durch flexible Fertigungstechniken zu einer kostengünstigen Herstellung der Geräte selbst bei mittleren und kleineren Stückzahlen führt [1–3].

Miniaturisierung kann die technische „performance“ dadurch steigern, daß z. B. bei einer spektroskopischen Technik die Lichtwege von Lasern oder anderen Lichtquellen die Wege drastisch verkürzt werden, was eine größere Pointing und Modenstabilität und ein besseres Signal/Rausch Verhältnis gewährleistet. Sie wird aber auch, und das ist im Hinblick auf die geforderten Ansprüche an höchster Zuverlässigkeit des Analysengeräts von größter Bedeutung, durch systemorientierte Integration unterschiedlicher Funktionen, elektronisch, mechanisch, optisch, chemisch, fluiddynamisch und akustisch, in hybrider oder monolithischer Weise auf sehr engem Raum die Voraussetzung für die gewünschte Zuverlässigkeit im Betrieb schaffen. Der Einsatz fortgeschrittener Software kann ferner zu einer hohen Flexibilität und Adaptionfähigkeit des Gerätes für verschiedene analytische Anwendungen beitragen und damit, zusammen mit durch die Mikrosystemtechnik möglich gemachten flexiblen und kostensparenden Fertigungstechnik, die Herstellung äußerst zuverlässig arbeitender kundenspezifischer Geräte, auch in kleineren Stückzahlen zu akzeptablen Preisen erlauben. Neben diesen primären Vorteilen ergeben sich durch die Miniaturisierung auch noch sekundäre Vorteile wie geringere Größe und Gewicht, kleinerer Platzbedarf und damit größere Mobilität. Durch die verwendeten kleineren Volumina, z. B. der Meßzellen, ist auch ein geringerer Chemikalienverbrauch und Materialaufwand realisierbar. In einigen Fällen resultieren daraus auch kürzere Analysezeiten. Daraus lassen sich ebenfalls viele neue Anwendungsfelder erschließen.

\* Prof. Dr. Hans-Joachim Ache, Kernforschungszentrum Karlsruhe und Universität Karlsruhe, Institut für Radiochemie, Postfach 36 40, 76021 Karlsruhe

**Analysenstrategie**

Für den Einsatz von Chemischen Mikroanalyzesystemen gelten die gleichen Bedingungen wie für konventionelle Techniken: Die Ausarbeitung und Verfolgung einer bestimmten Analysenstrategie, die aus den Schritten Probenahme, Probenvorbereitung, Messung, Signalaufbereitung, Datenauswertung, Übertragung des Meßergebnisses in Regelungsfunktionen besteht. Im Idealfall könnten alle diese Funktionen durch ein voll integriertes Mikrosystem, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, wahrgenommen werden. Auch hier wird die Gestaltung und Gewichtung der einzelnen Schritte je nach Anwendungsfall und Anforderungsprofil, unterschiedlich ausfallen und damit den jeweiligen apparativen Aufwand bestimmen. Ein konsequenter Systemansatz würde nun „top-down“ die Spezifikationen und Anforderungen an die einzelnen Komponenten oder Subsysteme festlegen und die Planung der einzelnen Schritte zur Realisierung des Systems vornehmen. Wegen des Fehlens von wichtigen „Standard“ Komponenten kann diese Vorgehensweise zur Zeit noch nicht strikt verfolgt werden. Die grundsätzlichen Voraussetzungen für eine Integration der einzelnen Komponenten oder Subsysteme in das Mikroanalyzesystem lassen sich jedoch abschätzen und gelten als Richtlinien für die laufenden Entwicklungsarbeiten.

Damit ist auch der derzeitige Entwicklungsstand weitgehend gekennzeichnet: Für die einzelnen Subsysteme werden mikrosystemkompatible Komponenten entwickelt, die den technischen Spezifikationen entsprechen wie auch insbesondere im Hinblick auf Betriebszuverlässigkeit und Langzeitstabilität allen Anforderungen genügen. Dazu gehören auf der einen Seite, wie auch aus der Abbildung 1 zu entnehmen ist, Mikropumpen und -ventile und Mikrofluidiksysteme. Auf der anderen Seite sind es im Subsystem, das die eigentliche Messung ausführt, mikrosystemtechnisch kompatible Mikrosensoren oder analytische Mikroproben (d.h. miniaturisierte Ausführung eines Analysengerätes oder Teile eines solchen). Für beide Arten von Detektoren sind sowohl voll kontinuierliche wie auch semi- oder diskontinuierliche Arbeitsweisen denkbar. Für die Signalaufbereitung und Datenauswertung kann weitgehend auf existierende Mikrocontroller und -prozessoren zurückgegriffen werden, so daß hier die Systemintegration bereits am weitesten fort-

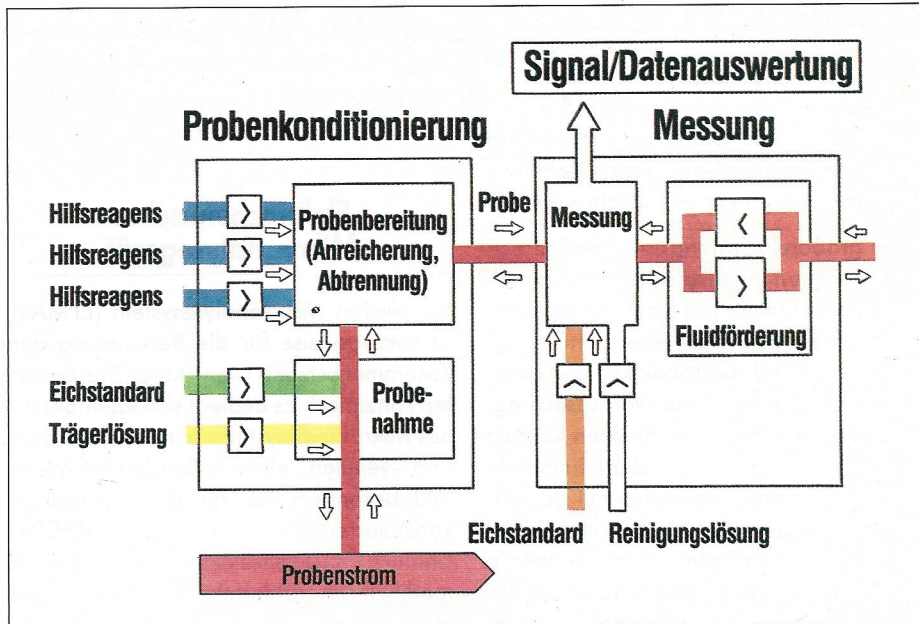


Abb. 1: Fließschema – Chem. Mikroanalysergerät

geschritten ist und der Schwerpunkt nun auf der Entwicklung fortgeschrittener Software liegt. Aus dem hier gesagten geht hervor, daß komplette chemische Mikroanalyzesysteme, die mittels der Mikrosystemtechnologie hergestellt wurden, noch nicht existieren.

**Optochemische Mikroanalysergeräte**

Gerade mit Hilfe der sogenannten optochemischen Sensoren oder Optroden, deren Wirkungsweise auf einer Änderung ihrer optischen Eigenschaften als Folge einer Reaktion zwischen Analyt und einem im Sensorkopf immobilisierten Erkennungs-

oder Rezeptormolekül beruht und von einer nachgeschalteten „Transducer“ wahrgenommen wird, hatte man gehofft, der Wunschvorstellung eines jeden Chemikers oder Analytikers nahezukommen.

Diese gipfelt darin, eine chemische Verbindung mit einem „Sensor“ spezifisch, schnell, einfach und zuverlässig in einer beliebig zusammengesetzten Matrix zu identifizieren und quantifizieren. Bei der reichen Auswahl an möglichen Reaktionspartnern erschien es hier naheliegend, eine hochspezifische Reaktion zu finden, die zu einer eindeutigen Änderung der spektralen Eigenschaften führt, wie sie praktisch von keiner anderen Substanz gezeigt wird.

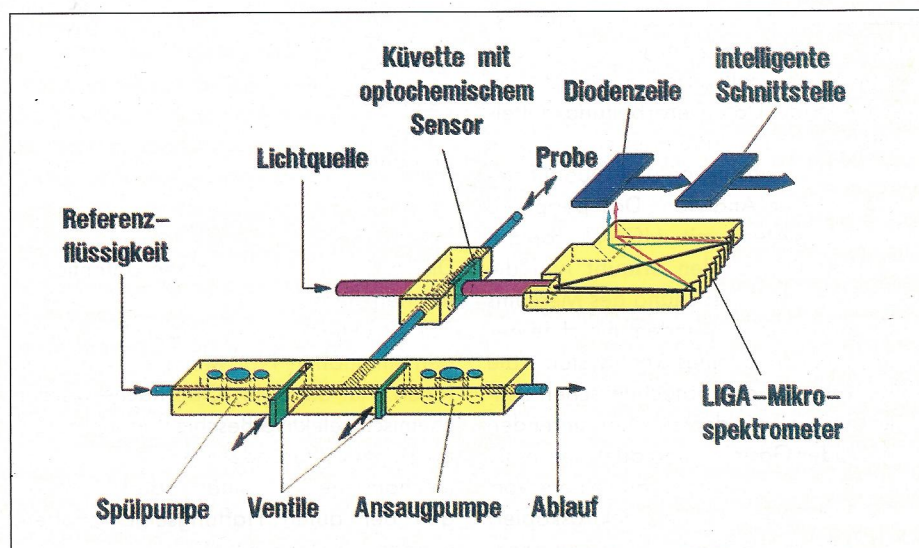


Abb. 2: Optochemisches Mikroanalyzesystem

Auch hier, wie bei einer Reihe anderer hochselektiver analytischer Verfahren wie z.B. den Immunoassay Techniken, hat man jedoch einsehen müssen, daß es ohne ein Minimum an Probevorbereitung nicht geht und daß keine dieser Techniken völlig frei von Querempfindlichkeiten ist.

Noch größere Schwierigkeiten stellen sich ein, wenn man mit reversiblen chemischen Sensoren kontinuierlich über längere Zeit messen will. Hier wäre eine hohe Langzeitstabilität und -beständigkeit des optochemischen Sensors die Voraussetzung. Durch den erforderlichen direkten Kontakt des Sensorkopfes und den darin immobilisierten Erkennungsmolekülen mit der oftmals sehr aggressiven Umgebung, in der sich der Analyt befindet, kommt es aber in vielen Fällen zu einer allmählichen Veränderung der Sensoreigenschaften, z.B. durch ein Auswaschen der Erkennungsmoleküle aus der Immobilisierungsmatrix. Für dieses Alterungsverhalten lassen sich zur Zeit noch keine definierten Kennlinien aufstellen und damit nicht im System zwecks Rekalibration abspeichern. Als Beispiel ist in Abbildung 2 ein spektrales Mikroanalyzesystem als optischer Schadstoffanalysator entweder zum Nachweis von toxischen Gasen oder Schwermetallionen konzipiert worden [4].

Die Hauptkomponenten dieses Systems sind einmal der optochemische Sensor, der in diesem Fall Porphyrinderivate als Erkennungsmoleküle enthält, die in einer Polymer- oder Sol-Gel Glas Matrix fixiert sind, in einer 1 µl-Mikrodurchflußzelle. Diese Zelle wird mittels Lichtleiterverbindung mit Weißlicht bestrahlt. Der Meßstrahl gelangt in das LIGA Mikrospektrometer mit angeschlossener Foto-Diodenzeile. Hier werden die durch die anwesenden Analyte im Sensor ausgelösten spektralen Änderungen wahrgenommen und in elektrische Meßwerte umgesetzt. Die anschließende Datenverarbeitung mittels Spektrum deconvolution, ermöglicht die simultane Identifizierung und Quantifizierung mehrerer Analyten. Das periphere Mikrofluidiksystem mit LIGA-Mikropumpen und Mikroventilen erlaubt nun die wechselweise Untersuchung des Mediums und die Kalibrierung, indem mit Hilfe der Mikropumpe und eines Ventilsystems die Meßküvette mit den optochemischen Sensoren, einmal mit der zu analysierenden Lösung oder Gasmischung oder alternativ mit der Kalibriersubstanz aus einem Vorratsbehälter gefüllt und spektroskopiert wird. Weiterhin enthält es Vorrichtungen, die eine selbsttätige periodische Reini-

gung des Systems ermöglichen. Alle diese Vorgänge werden vollautomatisch von einem Mikroprozessor gesteuert.

## Elektrochemisches Mikroanalysegerät

Ein zweites Mikroanalyzesystem (ELMAS) ist vorzugsweise für die Bestimmung der Zusammensetzung von Körperflüssigkeiten konzipiert. Es bedient sich ebenfalls eines Mikrofluidiksystems mit Mikropumpen und -ventilen, einer Mikrodurchflußzelle und besonders der für diese Aufgaben konzipierten Sensorchips mit ISFET's, ChemFET's (ionenselektive oder chemisch modifizierte Feldeffekttransistoren) und miniaturisierten ISE (ionenselektiven Elektroden). Der eigentliche Sensor ISFET oder ISE besteht dabei aus dem Transducer, hier ein FET (Feldeffekttransistor) oder eine Mikroelektrode, auf denen eine dünne ionensensitive Membran (ISM) aufgebracht ist. In beiden Fällen bildet sich ein elektrochemisches Potential an der Lösung/Membran Grenzfläche aus, das kontrolliert wird durch die Ionenkonzentration in der Lösung. Damit läßt sich die Art und Konzentration von elektrochemisch aktiven Analytspezies in ein elektrisches Signal umwandeln und damit bestimmen. Es zeigt sich, daß die Eigenschaften der ISM einen ganz entscheidenden Einfluß auf die Funktionscharakteristik dieses potentiometrischen Sensors haben. Bereits geringfügige (Material)veränderungen können einen störenden Effekt auf die Sensorfunktion ausüben, so daß er einer ständigen Selbstkontrolle und Selbstkalibration unterworfen sein sollte. Aber in gleicher Weise wie bei den optochemischen Sensoren ist das Problem einer Materialüberwachung mit Selbstkalibration noch nicht gelöst und man muß hier wie dort bei anspruchsvollen Analysenaufgaben auf Systeme zurückgreifen, die alternierende Meß- und Kalibrierzyklen erlauben.

Die im ELMAS verwendeten potentiometrischen Sensorchips enthalten duale ISFET Strukturen und ermöglichen daher den simultanen Nachweis von mehreren Ionen. Auf die Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Oberfläche wurden chemisch selektive Beschichtungen aufgebracht. Aus Gründen einer vermehrten mechanischen Stabilität, aber auch wegen der guten Haftungseigenschaften, wurden Festkörper-ISM's bevorzugt, die mit Hilfe von Dünnschichttechniken wie

Sputtern oder Aufdampfen aufgebracht wurden. Durch Magnetron Sputtern war es z.B. möglich, dünne Na-Al-Si-Glasschichten auf FET's stabil aufzubringen, die z.B. sehr gute Nachweiseigenschaften für Na Ionen aufweisen.

Weiterhin konnten ionenselektive Mikroelektroden (ISE) chips in das System integriert werden, die eine ausgezeichnete Kupfersensitivität nach Aufputtern einer Cu-As-Se Membran zeigten. Beide Sensoren wiesen damit vergleichbare oder bessere Eigenschaften als die bekannten (Makro)ionenselektiven Elektroden auf. Polymerbeschichtete Chips mit Erkennungsmolekülen für andere Ionenspezies wurden ebenfalls eingesetzt. Die Mikrochips lassen sich nun in leicht auswechselbarer Weise in eine Mikrodurchflußzelle einbringen und elektronisch anschließen. Die ELMAS Funktionen, wie die alternativen Meß- und Kalibriervorgänge, werden Mikroprozessor gesteuert durchgeführt. Multiionenbestimmung ist möglich durch das Anbringen zusätzlicher Sensorelemente und Zweipunktkalibrierungen werden mit einer zusätzlichen Pumpe und einem Reservoir, das die Kalibrierlösung realisiert [5].

Ein prototypischer Aufbau des ELMAS Systems ist in Abbildung 3 dargestellt. Eine detaillierte Ansicht der verwendeten elektrochemischen Mikrochips mit Halterung und ihr Einbau in die Mikrodurchflußzelle zeigt Abbildung 4.

## Massensensitive (SAW) Mikroanalyzesysteme

Massensensitive Detektoren, besonders vom Typ der „Surface Acoustic Wave“ Bauelemente (SAW's) haben in der jüngsten Vergangenheit wegen ihres großen Anwendungsgebietes vermehrtes Interesse gewonnen, zumal es gelungen ist, die damit zu erzielenden Nachweisgrenzen für Analyte durch fortgeschrittene Signalaufbereitung nachhaltig zu verbessern.

Das Prinzip der Methode besteht darin, daß durch Anlegen einer Hochfrequenzschwingung bis zu 433 MHz an ein piezoelektrisches Substrat, z.B. Quarz, eine Oberflächenschwingung erzeugt wird (Rayleigh Welle), deren Frequenz durch die Masse der an der Oberfläche vorhandenen, z.B. sorbierten Stoffe, beeinflußt wird.

Im einfachsten Fall wird die Oberfläche mit einer chemisch selektiven Schicht, z. B. einem Polymer, belegt, das vorzugsweise mit einer bestimmten Komponente eines Gasgemisches durch einen reversiblen Sorptionsprozeß in Wechselwirkung tritt. Die in dieser Schicht sorbierte Analytmenge ist dabei bestimmt durch Verteilungsgleichgewicht des Analyts zwischen den beiden Phasen, Gas und Flüssigkeit (Polymer). Durch einen Vergleich der auftretenden Frequenz mit der einer nicht präparierten Referenz-Quarzschiicht kann man die resultierende Frequenzdifferenz mit der sorbierten Menge des Analyten korrelieren.

Hier, wie bei fast allen chemischen Sensoren, ist eine ausreichende Spezifität für die Detektion einer einzelnen Substanz normalerweise nicht gegeben oder nur durch sehr hohen Forschungsaufwand zu erreichen. Im Sinne einer Ersparnis von Entwicklungskosten und gleichzeitig einer späteren flexiblen Fertigungstechnik wurde daher von vornherein der Detektor als Sensorarray entwickelt. Durch die Kombination verschiedener Sensoren mit Beschichtungen, z. B. Polymeren unterschiedlicher Sorptionseigenschaften, lassen sich Sensitivitätsmuster gewinnen, die nach einer chemometrischen Auswertung (PLS-Algorithmus) auch aus einer Analytmischung die geforderte qualitative und quantitative Bestimmung einer oder mehrerer Komponenten zulassen. Unter Verwendung des Linear Solvation Energy Relationship (LSER)-Modells läßt sich eine Vorhersage der Sorptionseigenschaften verschiedenster Schichtmaterialien treffen. Dadurch wird eine gezielte Optimierung durch Auswahl von Schichtmaterialien bzw. deren Kombination möglich, was kostspielige und langwierige Versuchsprogramme erübrigt. Mit dem so konzipierten und optimierten Sensor-Array sind selektive Bestimmungen einer größeren Vielfalt von gasförmigen organischen Analyten erreichbar, wobei sich die in Tabelle 1 gezeigten Nachweisgrenzen für eine Reihe chemischer Verbindungen erzielen ließen.

Das KfK System, wie es schematisch in Abbildung 5 dargestellt und als ein erstes Labormuster in Abbildung 6 gezeigt ist, enthält weiterhin eine Signal- und Datenverarbeitung in Mikroausführung. Als stand-alone Instrument konzipiert wurde auch besonderer Wert auf einen niedrigen Energieverbrauch gelegt.

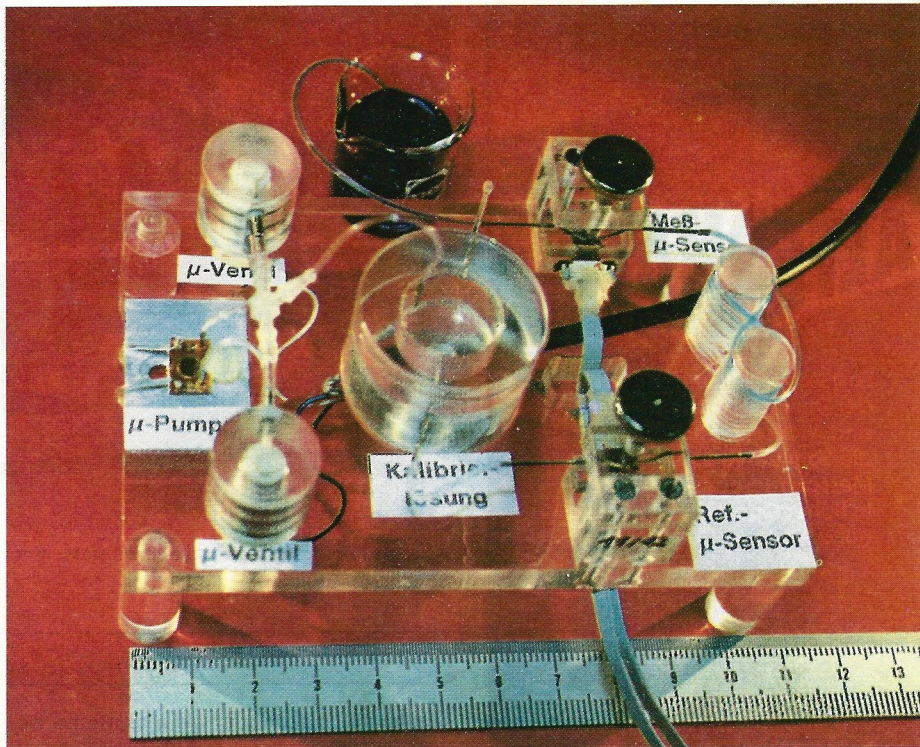


Abb. 3: Elektrochemisches Mikroanalyseystem (ELMAS)

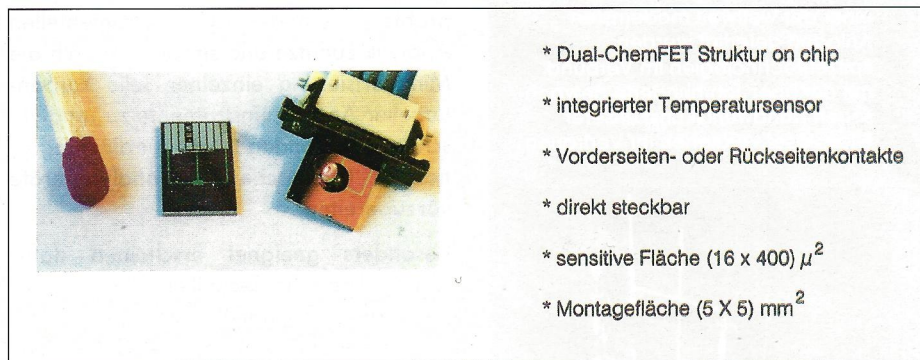


Abb. 4: ChemFET Sensorchip für ELMAS

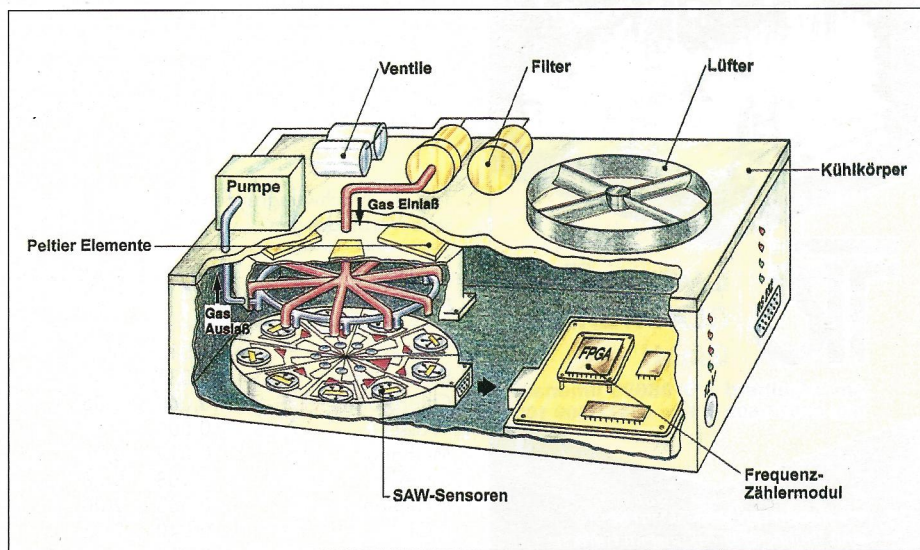


Abb. 5: Schematische Darstellung eines Analytischen SAW-Mikrosystems zur Detektion organischer Gase

Unsere spezialisierte Welt  
kennt kaum noch  
Alleskönner  
wir sind  
dabei

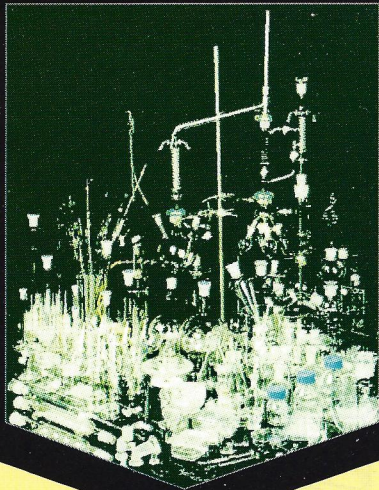
+  
zugleich

**DIE  
ALTERNATIVE**

Fest verwurzelt in der Tradition  
der Thüringer Glasindustrie  
sind wir Komplettanbieter für  
die Sortimente Laborglas und  
Messgeräte aus Glas.  
In hoher Qualität und mit Blick  
auf geringe Kosten.

1735 in Ilmenau die erste Glashütte.  
Im Umfeld die Weltpremierer  
für die Röntgenröhre und das  
Flüssigkeitsthermometer.

Selbst ein Klassiker wie der gute  
alte Erlenmeyerkolben profitiert  
heute in seiner Qualität von den  
gleichen, hochmodernen Techni-  
ken der Glasherstellung, wie z.B.  
von technisch anspruchsvollen  
Sicherheitsschaugläsern, die auf  
einer der weltweit modernsten  
Anlagen gefertigt werden.  
Spitzentechnologien im Verbund  
mit der über Jahrhunderte gewach-  
senen Handwerkskunst unserer  
Glasbläser verdienen Ihr Vertrauen.



**TRÜ**<sup>®</sup>

**ILMENAU<sup>ER</sup>  
GLASWERKE  
GmbH**

Am Vogelherd 1 D-98693 Ilmenau  
Tel.: 03677/609 0, Fax: 03677/609 100

Wir haben DIN und ISO im Kopf  
und Thüringer Glaskunst im Herzen-  
auch in einer spezialisierten Welt.

Weitere Informationen über Kenn-Nr. 116

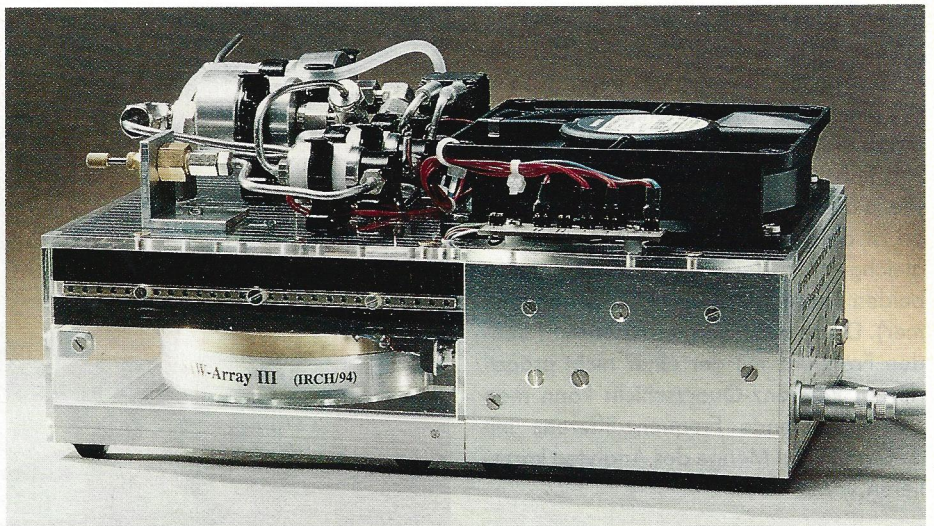


Abb. 6: Photographie des Labormusters: Analytisches SAW-Mikrosystem

## Ausblick

Die bisher diskutierten Mikrosysteme be-  
ruhen auf der Anwendung von chemi-  
schen Mikrosensoren als Detektionsmetho-  
de. Eine zweite Entwicklungslinie macht  
sich die bekannten Vorteile langjährig er-  
probter Methoden der instrumentellen  
Analytik zunutze und strebt an, durch die  
Miniaturisierung einzelner Teile konven-  
tioneller Analyseninstrumente zu „analyti-  
schen Mikrosonden“, diese für die Integri-  
ation in Chemische Mikroanalysegeräte  
vorzubereiten.

Besonders geeignet erscheinen dafür  
spektroskopische Techniken, da sich hier  
die aggressive Analytlösung in einer inerten  
Umgebung, z. B. in einer Quarz-  
zelle, befindet. Es findet hier keine chemische,  
sondern eine physikalische Wechselwir-  
kung statt, womit a priori eine Reihe von  
Problemen, wie sie beim chemischen Sen-  
sor auftreten, eliminiert sind. Die Zuver-  
lässigkeit einer analytischen Mikrosonde,  
verglichen mit dem chemischen Sensor als

Teil eines chemischen Mikroanalyssensy-  
stems, sollte erheblich besser sein, immer  
vorausgesetzt, daß eine Integration mög-  
lich ist.

Zwei Techniken sollen hier kurz erwähnt  
werden: Die erste beruht auf einer Meß-  
sonde, die nach dem Prinzip der evanes-  
zenten Felder arbeitet [7]. Die zweite be-  
ruht auf den bekannten Phänomenen der  
photothermischen Spektroskopie, insbe-  
sondere der „Thermischen Linsen“ Technik  
[8]. Bei beiden Methoden ist eine Miniatu-  
risierung und eine Inkorporation in Mikro-  
systeme möglich. Für andere mikrosystem-  
technische Lösungen lassen sich Ansätze  
durch Miniaturisierung chromatographi-  
scher Methoden wie z. B. Mikroelektro-  
phorese etc. erkennen.

## Literatur

- [1] ACHE, H.J.: Chemische Industrie **7/8**, 40 (1994)
- [2] DROBE, H., St. DROST: GIT Fachz. Lab. **10**, 1034 (1992)
- [3] BRECHT, A., G. GAUGLITZ: GIT Fachz. Lab. **11**, 1150 (1992)
- [4] SCHOMBURG, W.K., R. RAPP, B. BÜSTGENS, J. REICHERT, O. FROMHEIN: KfK Report **5238**, 76 (1993)
- [5] HOFFMANN, W., H. EGGERT, W. SCHOMBURG, D. SEIDEL: KfK Report **5238**, 89 (1993)
- [6] RAPP, M., M. BALZER, W. COERDT, O. FROMHEIM, T. KÜHNER, J. REICHERT, A. VOIGT: KfK Report **5238**, 83 (1993)
- [7] CONZEN, J.P., J. BÜRCK, H.J. ACHE: Appl. Spectrosc. **47** (6), 285 (1989)
- [8] BOHNERT, B., W. FAUBEL, H.J. ACHE: Fresenius J. Analy. Chem. **343**, 513 (1992)

Tab. 1: Nachweisgrenzen für einige organi-  
sche Verbindungen

Lösungs- mittel	ppm [ml/m <sup>3</sup> ]	g/m <sup>3</sup>	MAK-Werte [g/m <sup>3</sup> ]
Xylol	3	0,013	0,44
Ethylacetat	8	0,031	1,40
Chloroform	12	0,060	0,05
Wasser	7	0,005	—
Methanol	14	0,019	0,26
n-Hexan	29	0,108	0,18
n-Heptan	15	0,563	2,00
n-Oktan	9	0,040	2,35
n-Nonan	4	0,018	—
n-Decan	3	0,014	—