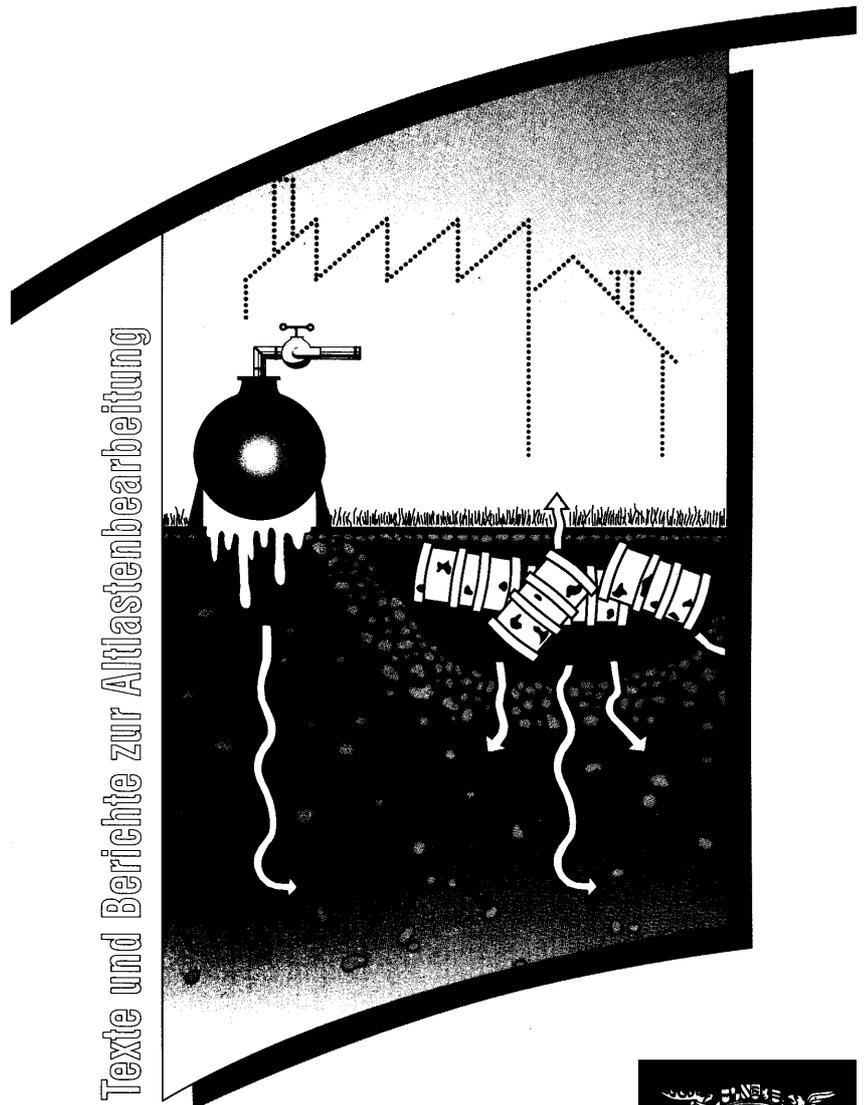


Zentraler Fachdienst Wasser - Boden - Abfall - Altlasten bei  
der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Handbuch Altlasten  
und Grundwasserschadensfälle**

**Literaturstudie  
Vor-Ort-Analytik**



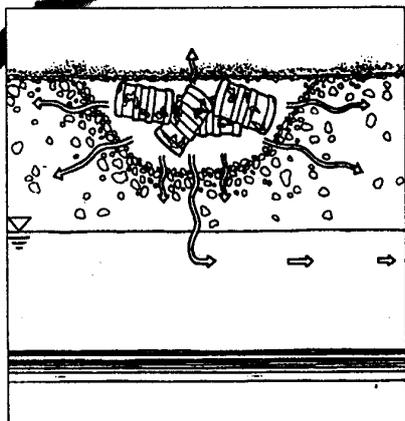
Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung



**BODEN  
ABFALL  
ATTLASTEN**



# Literaturstudie Vor-Ort-Analytik



Herausgegeben von der  
Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
1. Auflage

Karlsruhe 1996



Altlastenfachinformation im WWW

## **Impressum**

**Herausgeber:** Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
Griesbachstr. 1  
76185 Karlsruhe

**Redaktion:** Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg  
Abteilung           Boden, Abfall, Altlasten  
Referat 55 –       Labor, MABOWEG  
Frieder Kern

**Verfasser:** Dr. rer. nat. Karin Huck  
Universität Karlsruhe (TH)  
Forschungszentrum Umwelt  
Kaiserstr. 12  
76128 Karlsruhe

Karlsruhe, Juli 1996

**Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2. EINLEITUNG</b> .....	<b>2</b>
2.1 PROBLEMSTELLUNG.....	2
2.2 ORGANISATION UND DURCHFÜHRUNG DES PROJEKTES .....	5
2.3 ÜBERSICHT ÜBER FELDTAUGLICH EINGESCHÄTZTE ANALYSEGERÄTE .....	7
<b>3. PROBENVORBEREITUNG</b> .....	<b>8</b>
3.1 ALLGEMEINE KRITERIEN .....	8
3.2 PROBENNAHME UND PROBENAUFBEREITUNG.....	8
3.2.1 Gasproben.....	8
3.2.2 Wasserproben.....	8
3.2.3 Bodenproben.....	9
3.2.4 Aufschlußverfahren.....	11
<b>4. ANALYSEMETHODEN</b> .....	<b>12</b>
4.1 KRITERIEN ZUR BEWERTUNG DER MEBSYSTEME .....	12
4.2 SENSORBASIERTE MEßMETHODEN.....	13
4.2.1 Definition eines Sensors.....	14
4.2.2 Beschreibung verschiedener Sensorsysteme .....	17
4.3 NICHTSENSORBASIERTE MEßMETHODEN .....	19
4.3.1 Methoden zum Nachweis von Metallen und Cyaniden.....	19
4.3.2 Methoden zum Nachweis von VOC.....	23
4.3.3 Gaschromatographie .....	26
4.3.4 Gaschromatographie-Massenspektrometrie .....	29
4.3.5 Fahrbare Labors.....	31
4.3.6 Biologische Nachweisverfahren.....	32
<b>5. NEUE ENTWICKLUNGEN</b> .....	<b>36</b>
5.1 NACHWEIS VON METALLEN UND CYANIDEN.....	36
5.1.1 Funkenspektrometrie.....	36
5.1.2 Atomabsorptionsspektrometrie .....	36
5.1.3 ICP-MS .....	36
5.1.4 Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie.....	36
5.1.5 Auswertungsmethoden .....	37
5.2 NACHWEIS VON LEICHTFLÜCHTIGEN KOHLENWASSERSTOFFEN .....	37
5.2.1 Mikro-Analysensysteme.....	37
5.2.2 Weitere Sonderverfahren .....	37
5.3 SENSOREN ZUR BESTIMMUNG ORGANISCHER SCHADSTOFFE .....	38
5.3.1 Photothermische Spektroskopie .....	38
5.3.2 Integriert-optische Interferometer.....	38
5.3.3 PAK-Bestimmung .....	38
5.3.4 Oberflächenionisation als Detektionsprinzip.....	39
5.3.5 Remote-Sensing-Techniken .....	39
5.3.6 Labormuster und Prototypen .....	39
5.4 IONENMOBILITÄTSSPEKTROMETER (IMS).....	41
5.5 KAPILLARELEKTROPHORESE.....	42
5.6 BIOLOGISCHE VERFAHREN .....	44
<b>6. KOSTEN- UND EFFEKTIVITÄTSERMITTLUNG</b> .....	<b>45</b>
<b>7 LITERATUR</b> .....	<b>49</b>

---

<b>A ANHANG .....</b>	<b>57</b>
A.1 GERÄTEVERZEICHNIS.....	57
A.2 PROTOTYPENVERZEICHNIS.....	66
A.3 MOBILE MEßGERÄTE ZUM VOC-NACHWEIS.....	68
A.4 DATEN AUSGEWÄHLTER GC BZW. GC-MS-SYSTEME.....	70
A.5 GERÄTEAUSWAHL DER BIOLOGISCHEN VERFAHREN .....	71
A.6 BESCHREIBUNG KOMMERZIELLER GERÄTE DER BIOLOGISCHEN VERFAHREN .....	72
A.6.1 <i>Testsysteme</i> .....	72
A.6.2 <i>Enzymtests</i> .....	75
A.6.3 <i>Immunoassays</i> .....	75
A.7 GERÄTEAUSWAHL FÜR DIE FELDTTESTS .....	77
<b>ABKÜRZUNGEN.....</b>	<b>78</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>80</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>80</b>
<b>INDEXVERZEICHNIS.....</b>	<b>81</b>

# 1. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie befaßt sich mit dem Thema der Vor-Ort-Analytik. Die Problematik und der Hintergrund dieses jungen Arbeits- und Forschungsgebietes wird vorgestellt und die Zielsetzung und Notwendigkeit erläutert.

Im Rahmen des Projektes "Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik" der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg wurde eine umfangreiche Markterhebung kommerziell erhältlicher Analysengeräte zur Vor-Ort-Analytik durchgeführt.

Dadurch ist es gelungen, einen ersten Überblick über die Marktsituation zu erhalten. Es konnte eine Zusammenstellung von Meßgeräten gegeben werden, die den Einsatz im Felde erlauben.

Da die Mehrzahl der Analysenmethoden eine Probenahme bzw. Probenvorbereitung benötigen, beinhaltet die Studie einen kurzen Überblick über die gängigsten Methoden der Probenvorbereitung.

Über die Suche nach Neuentwicklungen und Prototypen (siehe Kap. 5) konnte der Stand der Technik dokumentiert werden.

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Einordnung von Vor-Ort-Analysenmethoden ist die Kosten- und Effektivitätsermittlung. Diese ist sehr komplex und muß für den konkreten Fall durchgerechnet werden. Welche Faktoren in der Regel in Betracht gezogen werden müssen, wird in Kapitel 6 angesprochen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Problematik der Vor-Ort-Analytik in zunehmendem Maße von Wissenschaftlern und Industrie erkannt wird und speziell für diesen Anwendungsfall Geräte hergestellt werden bzw. sich in der Entwicklung befinden.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studie sind Feldtests in Planung, die ausgewählte Meßgeräte an ausgewählten Standorten im praktischen Einsatz einem Tauglichkeitstest unterwerfen. Dadurch sollen Erfahrungswerte gesammelt und bewertet werden.

Da in den nächsten Jahren mit einigen Neu- und Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Vor-Ort-Analytik zu rechnen ist, muß die Marktsituation aufmerksam beobachtet werden.

## 2. Einleitung

### 2.1 Problemstellung

Die Untersuchung von Schadstoffbelastungen von Boden-, Abfall- und Wasserproben mit Probennahme und nachfolgender Laboranalytik ist zeit- und kostenintensiv. Manche Untersuchungen benötigen einschließlich Probenvorbereitung bis zu mehreren Tagen.

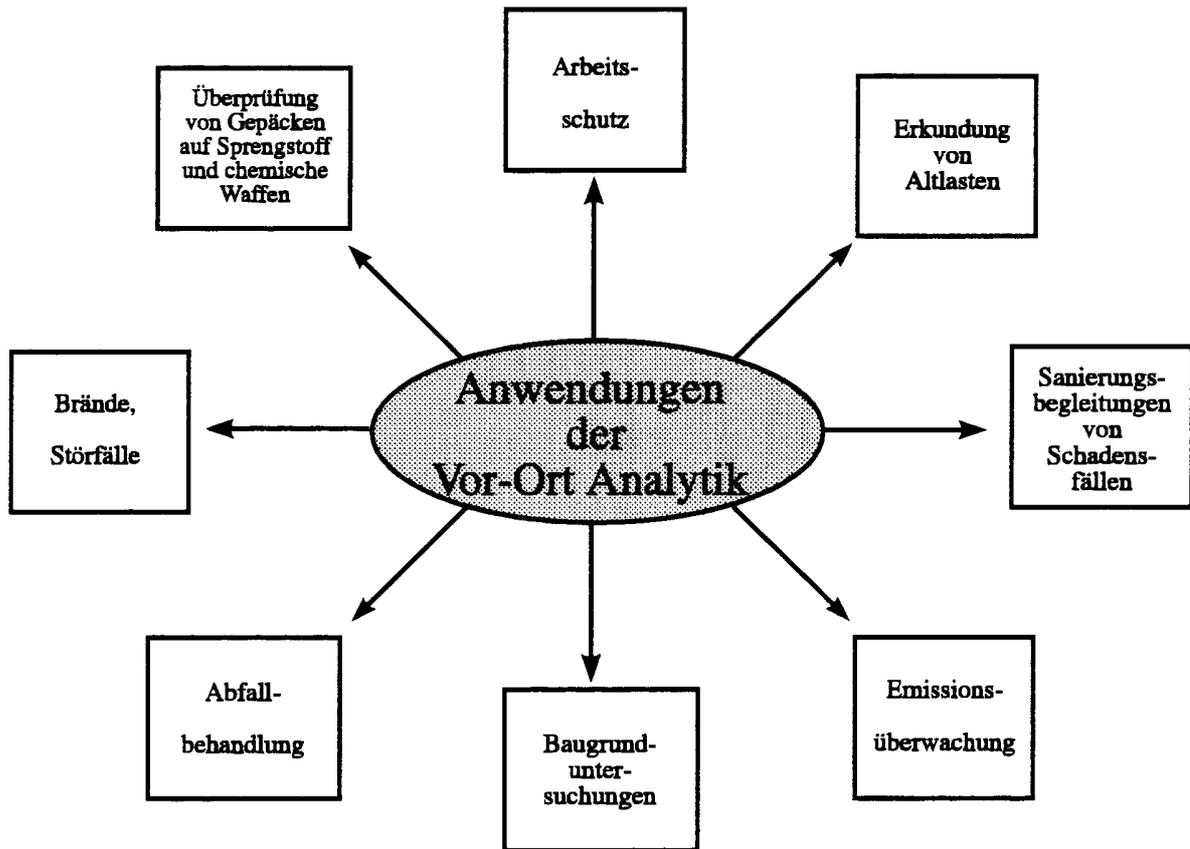
Dieser Zeitbedarf kann unkritisch sein, beispielsweise bei der gutachterlichen Gefährdungsabschätzung von altlastverdächtigen Standorten, bei der für die Probengewinnung, die gutachterliche Auswertung der Untersuchungsergebnisse und die Berichterstellung in der Regel wesentlich mehr Zeit benötigt wird als für die chemisch-physikalische Analytik im Labor.

Es gibt aber sehr viele Fälle, wo sehr rasch Untersuchungsergebnisse zur Verfügung stehen müssen, beispielsweise bei der Überwachung und Steuerung von Altlastensanierungen, bei der Behandlung und Beseitigung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, bei der Kontrolle von Arbeitsplatzbedingungen oder bei der Festlegung von Sofortmaßnahmen zur Schadensbegrenzung oder -abwehr bei Unfällen. Die Abbildung 1 zeigt eine Zusammenstellung möglicher Einsatzgebiete der Vor-Ort-Analytik.

Die Vor-Ort-Analytik ist auch immer dann sinnvoll, wenn die Schadstoffe stark inhomogen auftreten (z.B. im Boden) oder sich die Konzentration schnell verändern kann (tritt z.B. bei Sanierungsarbeiten in der Luft auf). Eine realistische Beurteilung der Belastung ist dann nur durch sehr viele Proben und Analysen möglich.

Eine statistisch abgesicherte Beurteilung von kontaminierten Böden kann aufgrund der Inhomogenität theoretisch nur durch unendlich viele Analysen oder nach Homogenisierung einer sehr großen Probenmenge gelingen.

Da dies in der Realität nicht möglich ist, wird intensiv über akzeptable Probennahmestatistik nachgedacht (1). Dabei ist eine große Probenzahl gefordert, die im Labor mit den anerkannten, zum Teil sogar standardisierten Verfahren analysiert werden kann. Jedoch stellen hierbei die Probenlogistik und der Zeitverzug zwischen Probennahme und Analyse wesentliche Probleme dar, die beim Analysieren vor Ort nicht auftreten.



**Abb. 1: Anwendungsgebiete der Vor-Ort-Analytik**

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der Vor-Ort-Analytik ist die Probenauswahl für die Analytik im Labor. Hierbei wird mit Hilfe von Vor-Ort-Analytik eine Vorauswahl der Proben getroffen, die im Labor untersucht werden müssen. Dieses kombinierte Verfahren kann zu enormen Kosteneinsparungen führen, da die Zahl an unnötigen, aufwendigen Untersuchungen reduziert wird.

Eine schematische Zusammenstellung der wesentlichen Vorteile der Vor-Ort-Analytik ist in Abbildung 2 dargestellt.

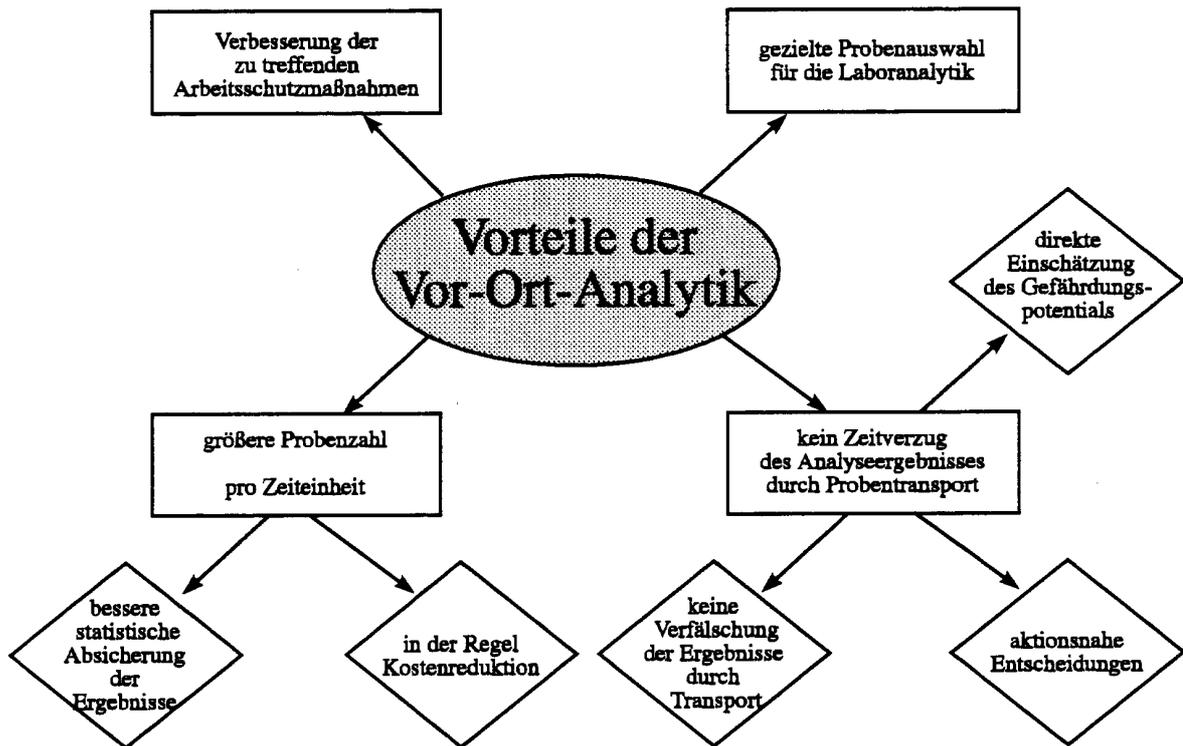


Abb. 2: Vorteile der Vor-Ort-Analytik

Verschiedene Forschungsinstitute und Hersteller von **Analysengeräten** haben die Vorteile und den Bedarf an Vor-Ort-Analytik erkannt und beschäftigen sich schon geraume Zeit mit der Entwicklung von Geräten, die an Ort und Stelle eingesetzt werden können und möglichst schnell Ergebnisse über Vorhandensein, Art und Konzentration von umweltrelevanten Schadstoffen liefern.

Diese, als feldtauglich bezeichneten Geräte, besitzen unterschiedlichste Spezifikationen und unterscheiden sich in wesentlichen Kriterien wie Zuverlässigkeit, Zeitbedarf, Nachweisgrenzen, Probenvorbehandlung, Handhabbarkeit und Kostenbedarf. Die Handhabbarkeit wird dabei von den Herstellern unter den Bezeichnungen tragbar, mobil, Koffergerät, Tischgerät oder Standgerät spezifiziert.

Jedes dieser Geräte hat seine mehr oder weniger spezifischen Einsatzbereiche. Für eine abschließende Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Systeme benötigt man eine große Menge an Informationen, vor allem auch vergleichbare und übertragbare Praxiserfahrungen.

Da diese Geräte jedoch noch nicht allgemein anerkannt und auch noch nicht zertifiziert sind, haben sie trotz dieser Vorteile bisher keine weitere Verbreitung gefunden.

Diese Situation war für die Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg im Jahre 1992 Anlaß, das Projekt "Studie über Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik" zu starten.

Unter der Projektbezeichnung Analytik mit Sensortechnik wurde anfangs eine Analytik ohne eigentliche Probennahme und Probenvorbereitung verstanden. Im Verlauf der Bearbeitung

zeigte sich aber, daß nur sehr wenige Geräte diese strenge Bedingung erfüllen. Den meisten der angebotenen Vor-Ort-Analysengeräte muß eine Probe des zu untersuchenden Mediums in irgendeiner Art und Weise zugeführt werden. Außerdem ist häufig eine mehr oder weniger umfangreiche Probenaufbereitung nötig. Deshalb entschloß man sich im Verlauf der Bearbeitung von der Bedingung, Analyse ohne Probennahme; abzugehen und alle, üblicherweise als feldtauglich oder feldfähig angesehenen Geräte in die Untersuchung einzubeziehen.

Als Ziel des Projektes steht, die vorhandenen Vor-Ort-Analysengeräte zu erheben, geeignete Geräte auszuwählen, sie Praxistests (Feldtests; siehe Anhang A.7) zu unterwerfen, ihre Leistungsfähigkeit zu prüfen und daraus gerätespezifische Anwendungsbereiche abzuleiten, um sie in Zukunft als sinnvolle Ergänzung zur Laboranalytik einsetzen zu können. Dadurch sollen der Zeitbedarf minimiert und durch eine größere Probenzahl oder kontinuierliche Messungen die Ergebnisse statistisch abgesichert werden.

Ein weiteres Ziel des Projektes ist es, Impulse für die Weiterentwicklung bis zur Praxisreife beziehungsweise Normung der Meßgeräte und Methoden zu geben und dadurch die Akzeptanz der Vor-Ort-Analytik weiter zu erhöhen.

## 2.2 Organisation und Durchführung des Projektes

Die Durchführung des Projektes ist in vier Phasen eingeteilt:

Phase 1: Vorstudie mit Projektplanng

Phase 2: Feasibility-Studie

Phase 3: Feldtest (derzeit in Bearbeitung)

Phase 4: Abschlußbericht mit Auswertung und Empfehlungen

In der Phase 1 (Vorstudie mit Projektplanung), die 1992 durchgeführt wurde, wurde das Projektziel formuliert und der Projektaufbau geplant. Hierfür war es erforderlich, sich einen Überblick über derzeit auf dem Markt befindliche Vor-Ort-Analysengeräte und -methoden zu verschaffen. Es wurde eine umfassende internationale Literaturrecherche durchgeführt, wobei acht relevante Datenbanken auf Literatur von der Zeit nach 1980 durchsucht wurden. Parallel dazu wurde ein ebenso umfangreiche Markterhebung durchgeführt, bei der Firmenprospekte, Ausstellungskataloge und Anfragen bei Geräteherstellern ausgewertet wurden.

Neben der Literaturrecherche und der Markterhebung wurden ausgewählte Dokumente durchgearbeitet und darauf untersucht, ob Hinweise auf erfolgversprechende Entwicklungen für den Bereich Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik aufgeführt sind. Hierzu gehörten Tagungsbände des Kongresses "Field Screening Methods", Las Vegas 1991 sowie weitere Veröffentlichungen, die sich mit der Thematik beschäftigen.

Aus der Bearbeitung der Phase 1 ergab sich ein Überblick, welche Firmen und Institute sich in Deutschland mit der Vor-Ort-Analytik, bzw. speziellen Analysentechniken, die im Feld einsetzbar sind, beschäftigen.

In der Phase 2, die 1993 durchgeführt wurde, waren folgende Projektpartner mit der vertieften Literaturrecherche, Marktanalyse, Einholung von Anwendererfahrungen (soweit vorhanden) und Prüfung der Meßgeräte auf Eignung zur Vor-Ort-Analytik beauftragt.

Teilprojekt 1:	<b>"Metalle und Cyanide" (2)</b>	Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau
Teilprojekt 2:	<b>"Leichtflüchtige organische Schadstoffe und Gase" (3)</b>	Institut für System- und Innovationsforschung, Fraunhofer Institut Karlsruhe
Teilprojekt 3:	<b>"Gaschromatographische Bestimmung und Ionenmobilitätsspektroskopie von organischen Schadstoffen" (4)</b>	Mobilab Umweltanalytik GmbH Hamburg
Teilprojekt 4:	<b>"Sensoren zur Bestimmung organischer Schadstoffe" (5)</b>	Prof. Dr. Nießner; Technische Universität München
Teilprojekt 5:	<b>"Mit biologischen Verfahren nachweisbare Schadstoffe" (6)</b>	Gesellschaft für Biotechnologische Forschung (GBF) Braunschweig
Teilprojekt 6:	<b>"Vor-Ort-Analytik für Grund- und Sickerwassermonitoring" (7)</b>	Ingenieurarbeitsgemeinschaft Röver und Partner Bensheim und TAUW Umwelt Moers

Die Literaturrecherche und die Markterhebung in der Phase 1 war breit gefächert, deshalb führten die Subunternehmer in der Phase 2 eine spezifische, auf ihr Teilgebiet abgestimmte, weitergehende Literaturrecherche und Markterhebung durch. Zudem wurden Anwendererfahrungen, soweit vorhanden, eingeholt und die Meßmethoden und Geräte, wenn möglich, auf ihre Eignung getestet.

Die in der Phase 2 identifizierten Geräte sollen in der Phase 3 (Feldtests) Praxistests unterworfen werden. Die Phase 3 läuft seit Juni 1994. Die Vor-Ort-Meßprinzipien und Meßmethoden sollen dabei auf ihre Brauchbarkeit im Bereich Boden, Abfall und Altlasten getestet werden. Dazu werden ausgewählte Geräte (siehe Anhang A.7) an ausgewählte Standorte gebracht und dort vergleichend erprobt. Die Ergebnisse sollen mit herkömmlichen Labormethoden verglichen werden.

Die Phase 4 beinhaltet die Auswertung und Zusammenstellung der Ergebnisse aus den Phasen 1 bis 3. Als Ergebnis sollen konkrete Empfehlungen stehen, welche Vor-Ort-Meßmethoden bei der jeweiligen Aufgabenstellung eingesetzt werden können.

Der hier vorliegende Bericht ist eine Zusammenfassung der aus der Phase 2 des Projektes gewonnenen Ergebnisse aus den Einzelberichten der genannten Projektteilnehmer. Die Gliederung dieser Zusammenfassung wurde entsprechend den Teilprojekten, die eine ausführliche und vertiefte Darstellung der Ergebnisse beinhalten, angelegt. Es wird darauf hingewiesen, daß die gemachten Angaben nicht den Anspruch, der Vollständigkeit erheben, sondern eine Zusammenstellung der durch die Projektpartner gesammelten Daten darstellen.

Da ein Teil der Sensorprinzipien auf Erkennungsstrukturen biochemischer Art beruhen und auch z.B. miniaturisierte GC-Systeme bereits dem Sensorbereich zugeordnet werden, sind Überlappungen zwischen den oben genannten Teilprojekten vorhanden.

## 2.3 Übersicht über feldtauglich eingeschätzte Analysegeräte

Als zusammenfassendes Ergebnis der Phase 2 (s.o.) steht nachfolgende Tabelle, in der ausgesuchte Geräte, die für die Fragestellung der Vor-Ort-Analytik geeignet erscheinen, aufgeführt sind. Die getroffene Auswahl erhebt ebenfalls nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und beinhaltet keine weitere Wertung:

Meßprinzip	Gerät (Hersteller)	Parameter													
		Nitroverb.	PCP	PCB	MKW	PAK	BTEX	CKW	BSB	Metalle	Methan	VOC	Cyanid	org. Param.	Toxizität
Lumineszenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lumis'lox (Dr. Lange)</li> <li>• Microtox (Microbics/Heyl)</li> </ul>														
Immunoassays	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapid Assay (Baker)</li> <li>• Envicheck (Dräger)</li> <li>• D-Tech (Merck)</li> <li>• Envirogard (Millipore)</li> </ul>		++ +												
Photometrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CN-Autoanalyzer (Skalar)</li> </ul>														
Fiberoptische Spektrometer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SPEC (O.K.TEC)</li> <li>• Fiberopt. Sonden (Polytec)</li> </ul>									+					
Flammenionisationsdetektion (FID)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OAV 128 (Ansyco)</li> </ul>									+					
Elektrochemie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PDV 2000 (GAT)</li> <li>• BSB5-Kurzzeit (LAR)</li> </ul>														
Infrarot-spektrometrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OCMA 220 (Horiba)</li> <li>• TPH-Analysator (Wolters)</li> <li>• Multigasmonitor 1301/1302 (Bruel &amp; Kjaer)</li> <li>• Miran 1b (Ansyco)</li> </ul>														
Fluoreszenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feldfluorometer 10-AU (GAT)</li> </ul>														
Laserinduzierte Fluoreszenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PAK Lasersonde (LaserLab Berlin)</li> </ul>														
Röntgenfluoreszenz (XRF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SpecTrace 6000 (Noran)</li> <li>• SpecTrace 9000 (Noran)</li> <li>• X-Met 920 (Outokumpu)</li> </ul>														
Kapillarelektrophorese	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quanta 400 (Waters)</li> </ul>														
ICP/OES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SpectroPrep (CEM)</li> </ul>														
Gaschromatographie (GC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quad 400 (MTI)</li> <li>• 8610 (SRI)</li> <li>• Scentograph (Sentex)</li> <li>• Modell 311 (hnu)</li> <li>• HC 1010 (Airmotec)</li> </ul>														
GC-MS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MMI (Bruker)</li> <li>• EM 640 (Bruker)</li> <li>• SpectraTrak (Viking)</li> </ul>														
Ionenmobilitäts-spektroskopie (IMS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AVM Grasby (Airmotec)</li> <li>• Raid 1 (Bruker Saxonia)</li> <li>• Raid 2 (Bruker Saxonia)</li> </ul>														

## 3. Probenvorbereitung

### 3.1 Allgemeine Kriterien

Reale "Umweltproben" stellen meist ein heterogenes Gemisch fester, flüssiger und gasförmiger Phasen dar. Die meisten Analysemethoden benötigen deshalb eine Probennahme und Probenaufbereitung; wobei die komplexe Natur des Probenmaterials in einer Probennahmestrategie berücksichtigt werden muß (8) (9) (10). Auf diese Problematik soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden. Zum Beispiel besteht die Leistung einer Probenaufbereitung für eine nachfolgende GC-Analyse im wesentlichen in der Probenhomogenisierung und Separierung nicht-flüchtiger, nichtlöslicher Bestandteile von der chromatographierbaren Fraktion, häufig verknüpft mit Anreicherungsschritten.

### 3.2 Probennahme und Probenaufbereitung

Bei der Probennahme muß entsprechend der Aggregatzustände unterschieden werden zwischen Gas-, Flüssigkeits-(Wasser-) und Feststoff (Boden-)Proben.

Im Rahmen des Berichtes soll nicht näher auf die einzelnen Techniken eingegangen werden. Allerdings wird zu den einzelnen Verfahren Literatur angegeben, so daß der interessierte Leser die Möglichkeit erhält, sich gezielt zu informieren.

#### 3.2.1 Gasproben

Probengas kann z.B. für die GC-Analytik direkt mit der Injektionsspritze entnommen oder in Behältern (z.B. Tedlar, elektropolierte Stahlkanister) gesammelt werden (11). Problematisch kann die Lagerung bzw. der Transport der Probe sein, da bei geringen Schadstoffbeladungen, Adsorptionseffekte an dem Behältermaterial zu Verfälschungen der Analyseergebnisse führen können (12). Zum Senken von Nachweisgrenzen und für den bequemeren Proben transport reichert man gasförmige Inhaltsstoffe an.

Die Anreicherung kann erfolgen durch:

- Ausfrieren auf Glasträgermaterial oder gekühlter Festphasenträgersubstanz (13) (14)
- bei Temperaturen oberhalb des Taupunktes mit hochadsorptiven Trägermaterialien (z.B. Aktivkohle) mit anschließendem Eluieren (15) - (19)
- Adsorption und thermischer Desorption (an z.B. Tenax oder Aktivkohle) (20) (21)
- Adsorption mit nachfolgender Desorption mit Hilfe von Mikrowellen (22) (23)

#### 3.2.2 Wasserproben

In Tabelle 1 wird eine Übersicht und Bewertung der gängigen Probenahme- und -aufbereitungstechniken gegeben. Ein Übersichtsartikel von Namiesnik behandelt den Bereich der flüchtigen Verbindungen (24).

**Tabelle 1: Übersicht über Aufbereitungstechniken von Wasserproben**

Verfahren	Vorteile	Nachteile	Feldtaugl.	Literatur
Direkteinspritzung	einfach, schnell, auch wasserlösliche Verbindungen	geringe Nachweisstärke, Injektorverschmutzung	+	(25)
Headspace	schnell, geringe Probenaufbereitung	nur Leichtflüchtige, keine Anreicherung	++	(26) - (30)
Purge & Trap	Anreicherungsverfahren, nachweisstark	Tenside stören, Leichtflüchtige benötigen Kryofokussierung	++	(31) - (34)
Closed-Loop-Stripping	Anreicherungsverfahren, nachweisstark	apparativ aufwendig, ungeeignet für Screening	-	(35), (36)
Spray & Trap	Anreicherungsverfahren, nachweisstark, Tenside stören nicht, auch Leichtflüchtige	Düse kann verstopfen	+++	(37), (38)
Flüssig-Flüssig-Extraktion	Schwerflüchtige	Verwendung von Lösungsmitteln, Artefaktbildung möglich	++	(39) - (41)
Flüssig-Fest-Extraktion SPME	schnell, kein Lösungsmittel	Selektivität der Anreicherungsmatrix	++	(42) - (45)

- nicht feldtauglich    + bedingt feldtauglich    ++ feldtauglich    +++ gut feldtauglich

### 3.2.3 Bodenproben

In der Tabelle 2 sind die gängigen Aufbereitungstechniken für Bodenproben zusammengestellt. Für detailliertere Informationen wird auf die Literaturangaben zu den jeweiligen Techniken verwiesen.

**Tabelle 2: Übersicht über Aufbereitungstechniken für Bodenproben**

Verfahren	Vorteile	Nachteile	Feldtaugl.	Literatur
Soxhlet-Extraktion	Standardverfahren, hohe Ausbeuten	apparativ aufwendig, viel Lsgm., langwierig, Fehlerquellen durch feste Probenpackungen	-	(17), (46) - (49)
Schütteln mit Lösungsmittel	schnell, wenig Lsgm., felderprobt	nur bei hochbelastetem Material	+	(47), (50) - (53)
Superkritische Fluidextraktion	hohe Ausbeuten, Derivatisierung online, wenig Lsgm.	apparativ aufwendig, Erfolg abhängig von vielen Parametern	++	(54) - (65)
Direkte thermische Desorption	keine Probenaufbereitung, schnell	nur hochbelastetes Material, schlechte Reproduzierbarkeit, geringe Probenmenge	+/-	(66), (67)
Mikro-Wasserdampf-Destillation	selektive Anreicherung aus komplexer Matrix	apparativ aufwendig, ungeeignet für Screening	-	(68), (69)
Extraktion mit hochtourigen Rührern	schnell, wenig Lsgm., hohe Ausbeuten auch bei sehr untersch. Schadstoffpolarität	leichte Querkontamination durch das Rührwerk	+/-	(46), (70), (71)
Ultraschallextraktion	schnell, wenig Lsgm., hohe Ausbeuten, felderprobt	bei Verwendung polarer Lsgm. Artefaktbildung	+++	(47), (72) - (78)
Purge & Trap Anreicherung	schnell, hohe Anreicherung	nur Leichtflüchtige (schlechte Ausbeuten)	+	(79) - (80)
Headspace Technik	schnell, geringe Probenaufbereitung, nachweisstark	nur Leichtflüchtige	+++	(81) - (85)

- nicht feldtauglich

+/- Nachteile überwiegen Vorteile

+ bedingt feldtauglich

++ feldtauglich

+++ gut feldtauglich

### 3.2.4 Aufschlußverfahren

In realen Proben liegen Cyanide häufig in Schwermetallkomplexen vor. Diese sind zum Teil äußerst stabil und damit einer direkten Analytik z.B. in Form einer Farbreaktion mit photometrischer Detektion, mittels Bestimmung über ionensensitive Elektroden oder auch mittels Ionenchromatographie bzw. Kapillarelektrophorese nicht zugänglich.

Als Aufschlußverfahren kommt einerseits eine **saure Destillation**, wie in zwei DIN-Normen (DIN 38 405, Teil 13 und Teil 14; Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung D13 und D14) vorgesehen ist, in Frage. Hier werden die Cyanide als HCN-Gas von der Matrix abgetrennt und, in einer Lauge aufgefangen.

Andererseits werden Aufschlußverfahren beschrieben, bei denen die komplexen Cyanide mittels **UV-Licht** zersetzt werden und das CN bzw. das HCN über eine Membran (Dialyse) abgetrennt wird.

Für Metalle ist der Aufschluß mit **Königswasser** ein bewährtes, im Labor übliches Verfahren, das als nicht felddauglich zu bewerten ist. Er benötigt einen hohen Aufwand und wird durch Matrixeffekte beeinflusst.

**Mikrowellenaufschlußgeräte** bieten die Möglichkeit, Aufschlüsse in relativ kurzer Zeit unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen durchzuführen (86).

## 4. Analysenmethoden

### 4.1 Kriterien zur Bewertung der Meßsysteme

Die Wahl des Meßgerätes richtete sich nach der jeweiligen Problemstellung. Dabei können mehrere Auswahlkriterien herangezogen werden. Abbildung 3 gibt einen Überblick über mögliche Faktoren, die bei der Auswahl des geeigneten Analysensystems eine Rolle spielen können.

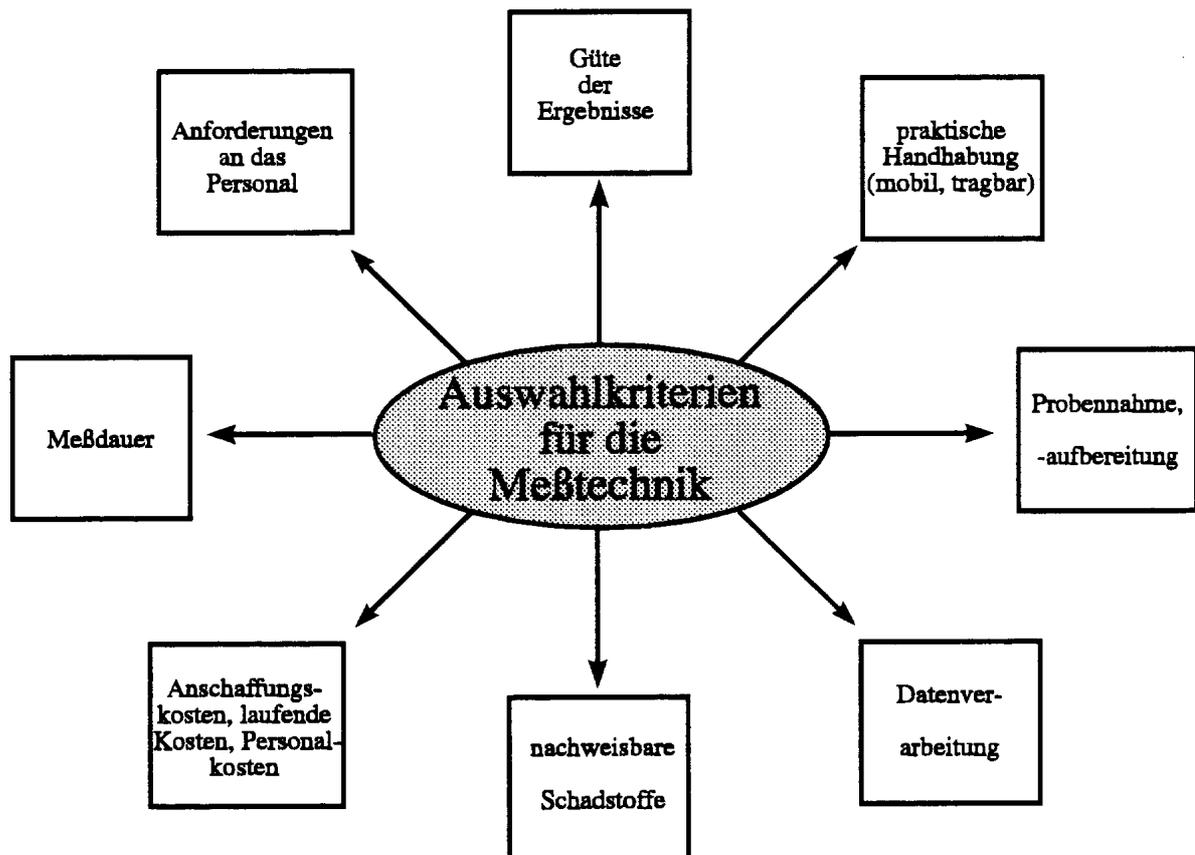


Abb. 3: Auswahlkriterien für die Meßtechnik

Diese Kriterien beinhalten in sich wiederum Einzelkriterien:

- Güte der Ergebnisse, Meßtechnik
  - Nachweisempfindlichkeit
  - Querempfindlichkeit
  - Stoffgruppendetektion, Selektivität
  - Fehlergrenzen
  - Kalibrieraufwand, Linearität
  - Reproduzierbarkeit
- praktische Handhabung
  - Portabilität (mobil, tragbar)
  - Leistungsaufnahme
  - netzunabhängig ja/nein
  - Gewicht
  - benötigte Hilfsstoffe
- Probenvorbereitungsaufwand
  - Probenaufbereitung
  - Probenanreicherung
- Datenverarbeitung
  - Meßwertspeicherung
  - Datenbankfunktionen
  - Automatisierung der Meßwertverarbeitung
- Kosten
  - Anschaffungskosten
  - Personalkosten
  - laufende Kosten
- Dauer einer Messung
  - Dauer der eigentlichen Messung
  - Totzeiten zwischen den Messungen
  - Aufwand zur Reinigung des Meßgerätes

## 4.2 Sensorbasierte Meßmethoden

Der Zeitverzug durch Probentransport und langwierige Standardanalytik soll durch leistungsfähige, qualifizierte Schnellverfahren und neue Analysengeräte minimiert werden und das Ergebnis durch eine große Probenzahl oder kontinuierliche Messungen statistisch abgesichert werden. Die sensorbasierten Meßmethoden bilden hierfür ein Gebiet mit großen Erfolgsaussichten (87).

Neben den schon genannten Vorteilen, die die Vor-Ort-Analytik bietet (siehe Abb. 2, Kap. 2.1), bringt die Sensortechnik durch das Wegfallen der Probennahme noch weitere Vorteile mit sich (siehe Abb. 4).

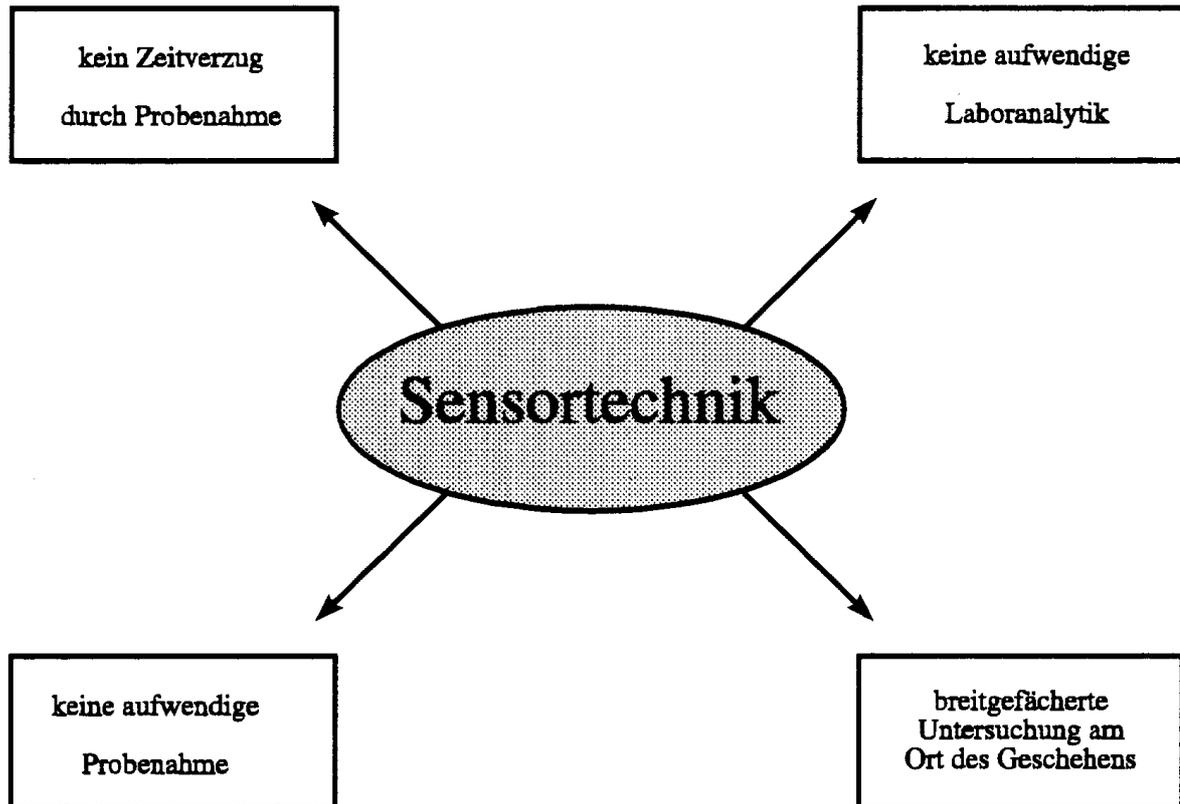


Abb. 4: Vorteile der Sensortechnik

### 4.2.1 Definition eines Sensors

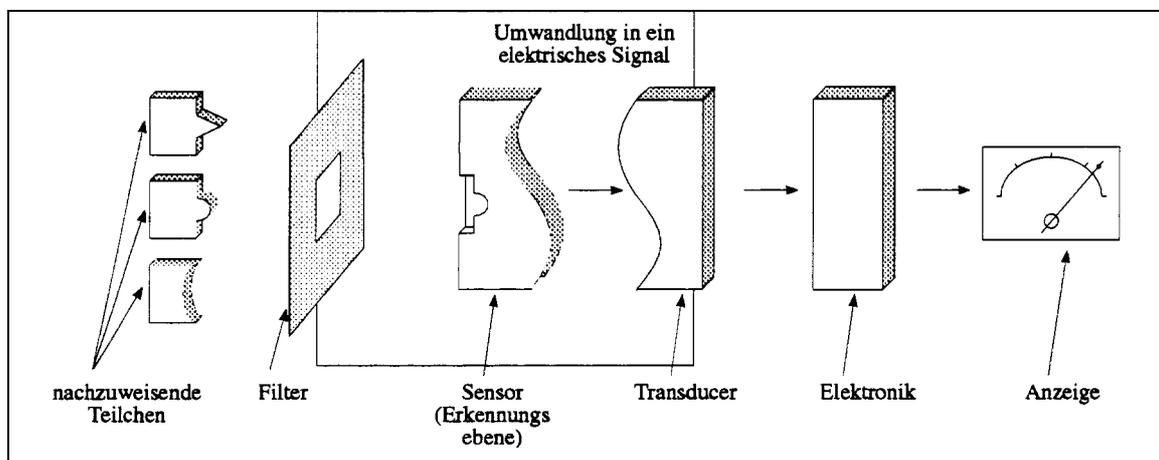
Zunächst soll eine genaue Definition des Sensorbegriffes festgelegt werden, um falsche Interpretationen zu vermeiden (88) (89).

- **Definition 1:** Unter **Sensoren** versteht man Komponenten, in denen eine physikalische oder chemische Veränderung in ein geeignetes Nutzsignal erfaßt oder gemessen wird. "Erfassen" bedeutet dabei die Feststellung oder das Erkennen eines Zustandes mit 1-Bit-Aussage. "Messen" im Sinne eines Sensors bedeutet das Vergleichen von Werten mit mehr als 1 Bit.
- **Definition 2:** Ein **Meßfühler oder Elementarsensor** ist das erste Element in einer Erfassungs- oder Meßkette.
- **Definition 3:** Ein **Komplettensor** ist ein in einem gemeinsamen Gehäuse integrierter Elementarsensor und ein Transducer. Dieser beinhaltet Konditionierung, Signalverarbeitung, A/D-Wandlung und Mikroprozessor sowie gegebenenfalls optische, mechanische oder chemische Komponenten. (Bei vielen Komplettensoren, wie z.B. bei den optochemischen, finden spektroskopische Auswerteverfahren Anwendung.)

Abbildung 5 zeigt schematisch die Funktionsweise eines chemischen Sensors (90).

Die Umsetzung des chemischen Signals erfolgt meistens in drei Stufen. Die erste Stufe ist die Erfassung und Änderung eines elektrophysikalischen Parameters eines sensitiven Materials durch die Wechselwirkung mit der zu messenden Chemikalie (physikalischer Effekt: Absorption von Licht, Massenänderung, Änderung der Phasengeschwindigkeit; Spannungsänderung, usw.). In Tabelle 3 sind Möglichkeiten der Signalerzeugung zusammengestellt.

Die zweite Stufe ist die eigentliche Messung. Die Veränderung des physikalischen Parameters wird mit einem geeigneten mikroelektronischen Element erfaßt (Meßmethode: Strom/Spannungsmessung, Leitfähigkeitsmessung, Kapazitätsmessung, Impedanzmessung, Austrittsarbeitsmessung, Frequenzmessung, optische Messung, Wärmetönungsmessung, usw.).



**Abb. 5: Skizze eines Sensorsystems**

In der dritten Stufe wird der erfaßte Parameter ausgewertet und klassifiziert (Auswerteverfahren: Spektroskopie, Kennlinie, Funktionalbeziehungen, Mustererkennung, usw. ).

**Tabelle 3: Methoden der Signalerzeugung bei einem Sensorsystem**

<b>Bildung des Sensorsignals</b>	<b>Sensor-Typ</b>
<b>Elektrische Signalerzeugung</b>	
Leitfähigkeitsänderung	Homogener Metalloxid-Halbleiter, Organische Halbleiter, Pellistoren
Elektrochemische Strom- bzw. Potentialbildung	Anorganische Festkörperelektrolyte
	Chemisch sensitive Metalloxid-Halbleiterstrukturen
Resonanzfrequenzänderung	Piezoelektrische Waage, SAW-Sensoren
elektrische Mobilität	Laufzeit-Massenspektrometer
Pyroelektrischer Effekt	Piezo- und pyroelektrische Folie
<b>Optische Signalerzeugung</b>	
Transmission	
Fluoreszenz, Phosphoreszenz	
Lichtbrechung	Faseroptiken, Lichtleiter Miniatur-Spektrometer
Ramanstreuung	
Remission	
Chemilumineszenz	
optothermische Wechselwirkung	Photoakustischer Sensor, Optothermischer Sensor
Strahlungsinduzierte Leitfähigkeit	Photo-Impedanz-Halbleiter, Thermo-Ionisation
Photoemission	Aerosol-Photoemission, Photoionisation
Plasmonen Anregung	Surface-Plasmon-Resonance Detektor

## 4.2.2 Beschreibung verschiedener Sensorsysteme

In diesem Kapitel werden die Prinzipien verschiedener Sensortypen erläutert. Eine tabellarische Auflistung mit detaillierteren Angaben zu den Sensoren befindet sich im Anhang A.3, Tab. 8 sowie im Anhang A.1.

### 4.2.2.1 Halbleiter-Sensoren (HLS)

Bei **Halbleitersensoren** werden die elektrischen Leitfähigkeitsänderungen (durch Ein- oder Ausdiffundieren von chemischen Komponenten oder durch Adsorption einer chemischen Spezies) von vorzugsweise oxidischen monolithischen Körpern oder dünnen Filmen ausgenutzt.

Kommerziell erhältlich ist der in Japan hergestellte "**Figaro-Sensor**" zum Nachweis reduzierender Gase. Weitere HLS zum Einzelgasnachweis bietet unter anderem der englische Hersteller EEV sowie die japanische Firma Scimarec (Nachweis von Benzolverbindungen und KW) an.

### 4.2.2.2 Feldeffekt-Sensoren (FES)

Durch Ladungsanreicherung an der Oberfläche eines Halbleiters, welcher mit einem Isolator oder einem Metall in Kontakt steht, verändert sich die Ladungsträgeraustrittsarbeit. Ein Stromfluß senkrecht oder parallel zur Grenzfläche wird durch diese Änderung beeinflusst. Die Strom-Spannungs- (oder Kapazitäts-Spannungs-) Kennlinie ist eine Funktion der Oberflächenladung und damit der Konzentration der nachzuweisenden Teilchensorte.

Es stehen derzeit vor allem MOS (Metall-Oxid-Halbleiter) und Feldeffekt-Anordnungen (Feldeffekt-Transistoren, FETs) als elektronische Basiselemente zur Verfügung. Neben Wasserstoff können im allgemeinen auch andere wasserstoffhaltige Moleküle wie Alkohol, Acetylen und andere ungesättigte KW nachgewiesen werden.

### 4.2.2.3 Optochemische Sensoren (OCS)

In optoelektronischen und fiberoptischen Versuchsaufbauten werden Änderungen optischer Eigenschaften durch Wechselwirkungen von Molekülen oder Ionen mit chemisch sensitiven Grenzflächen nachgewiesen (91) :

Einen solchen typischen physikalischen Effekt zeigt Abbildung 6. Anhaftende Moleküle im Mantelgebiet des Lichtwellenleiters (LWL) beeinflussen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Photonen im Faserkern. Die gesamte Meßanordnung besteht aus einer Lichtquelle, einem Filter, einer chemisch sensitiven Beschichtung des optisch aktiven Elements (hier Mantel des LWL) und einem Lichtdetektor.

Primäres Einsatzgebiet ist die Grundwasserüberwachung von z.B. Chlorid, Sulfat, organischen Verunreinigungen oder Herbiziden, aber auch die Überwachung von Luftverunreinigungen (PAK, Formaldehyd, Ammoniak, Stickoxiden, Chloroform, Schwefelwasserstoff und reaktiven KW):

Diese Systeme sind überwiegend noch Gegenstand der Forschung und meist nur als Prototypen erhältlich (siehe Kapitel 5.3.6). Bei vielen OCS werden nachgeschaltete spektroskopische Auswerteverfahren angewendet (siehe Kap. 4.3.2).

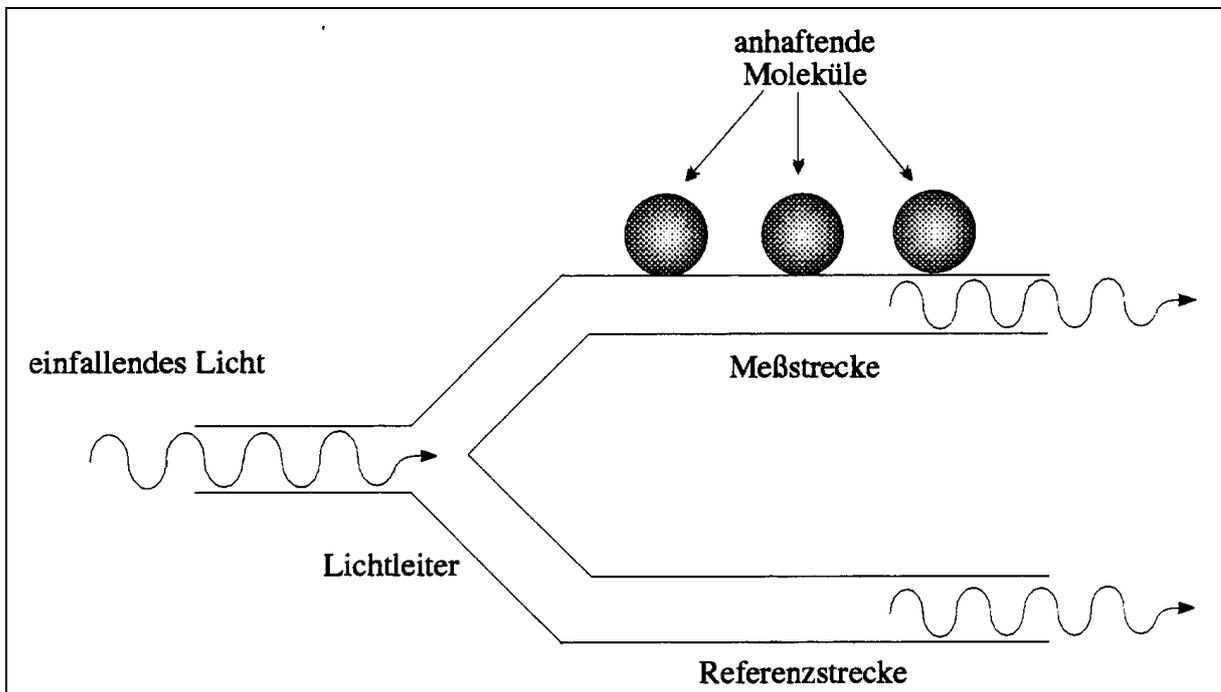


Abb. 6: Beeinflussung der Lichtausbreitung im Lichtwellenleiter; Prinzip eines intrinsischen Sensors

#### 4.2.2.4 Massensensitive Sensoren (MCS)

Über den piezoelektrischen Effekt lassen sich Massenänderungen durch die Adsorption oder Absorption von zu detektierenden Molekülen in Form von charakteristischen Frequenzänderungen von Schwingquarzen erfassen (bulk acoustic waves, **BAW**). Alternativ dazu können charakteristische Änderungen der Frequenz oder die Dämpfung von oberflächenakustischen Wellen (surface acoustic waves, **SAW**) als Folge der Adsorption oder Absorption von zu detektierenden Molekülen gemessen werden. Durch geeignete Wahl der Beschichtung wird in beiden Fällen eine hohe Empfindlichkeit und Selektivität angestrebt: Im Prinzip lassen sich so Moleküle im Gas aber auch in Flüssigkeiten nachweisen, wobei die Einsatzmöglichkeiten im wesentlichen nur durch die Eigenschaften der selektiven Beschichtung bestimmt wird.

Die Basis eines **Quarzsensors** zum Nachweis von CKW sind Käfigmoleküle, die über Schwefelbrücken an die Goldkante des Schwingquarzes angebunden werden. Ein CKW-Molekül lagert sich in die Käfigverbindung wie ein Schlüssel in das Schloß ein und bewirkt eine Veränderung der charakteristischen Resonanzfrequenz des Quarzes (90).

Die erforderliche Genauigkeit in der Bestimmung von Frequenzen bzw. Dämpfungen bei konstanter Temperatur ist Grund dafür, daß bislang lediglich Labor- bzw. Prototypen zur Verfügung stehen. Solche werden von der Universität Tübingen und dem Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) erforscht (siehe Kap. 5.3.6).

### 4.2.2.5 Kalorimetrische Chemische Sensoren (KCS)

Kalorimetrische- oder Wärmetönungs-Sensoren messen Reaktionswärmen bei der Wechselwirkung von Gasen (vor allem von brennbaren Gasen, z.B. CO, CH<sub>4</sub> in Luft) mit chemisch reaktiven, vornehmlich katalytisch aktiven Oberflächen (oft aktive Oberfläche auf der Basis von Rh-, Pd-, oder Pt-dotiertem ThO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> oder AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Die von der zu messenden Komponente bewirkte Änderung der Oberflächentemperatur läßt sich über Widerstandsänderungen, aber auch pyroelektrisch oder über den Seebeck-Effekt erfassen.

### 4.2.2.6 Multikomponenten Sensorsysteme (MULKS)

Mustererkennungsverfahren (neuronale Netze mit Parallelverarbeitung) bei der Signalauswertung einer ganzen Gruppe von Sensoren (Sensor-Arrays) ermöglichen eine Mehrkomponentenanalyse (92). Anstelle einer Gruppe von Sensoren können auch unterschiedliche Signale eines einzelnen Sensors bei unterschiedlichen Betriebsmodi für die Mustererkennung herangezogen werden.

Dieses Funktionsprinzip ist in biologischen Systemen realisiert und perfektioniert. So werden beispielsweise mit etwa zehn Einzelsensoren der menschlichen Nase, durch die nachfolgende Mustererkennung im Gehirn, mehr als tausend unterschiedliche Gerüche identifiziert:

Voraussetzung für eine einfache Mustererkennung mit heute möglicher sequentieller Datenverarbeitung ist, daß die Sensorsignale reproduzierbar sind und mit konstanter Selektivität und Sensitivität einem Komponentengemisch zugeordnet werden können.

Heute eingesetzte Auswerteverfahren aus der Informationstheorie konzentrieren sich auf Clusteranalysen, Klasifizierungsmethoden und Faktoranalysen. Mehrkomponentenanalyse im allgemeinen Sinne wurde bisher beispielsweise an Sensorsystemen auf der Basis von Pellistoren, von SnO<sub>2</sub>-Sensoren oder von kombinierten Katalysator-Sensor-Systemen durchgeführt. Einen Prototyp eines Quarzsensorarrays bietet die Universität Tübingen an (siehe Kap. 5.3.6, Tab. 7).

## 4.3 Nichtsensorbasierte Meßmethoden

In diesem Kapitel werden verschiedene Analysenmethoden behandelt. Im Anhang A.1 ist dazu eine thematisch nach den verschiedenen Methoden sortierte Aufstellung kommerziell erhältlicher Geräte aufgeführt (Stand 1993). In (93) werden Empfehlungen zu kommerziell erhältlichen Vor-Ort-Analysengeräten für Metalle und flüchtige sowie schwerflüchtige organische Verbindungen gegeben.

### 4.3.1 Methoden zum Nachweis von Metallen und Cyaniden

Im Bereich der **Metallanalytik** werden vielfältigste analytische Methoden und Gerätetypen beschrieben. Die Bandbreite der Verfahren ist dabei äußerst weit gefächert und reicht von einfachen Schnelltests bis hin zu aufwendigster Technik mit Großgeräten (siehe Anhang A.1 ). Außer dem relativ jungen und technisch sehr aufwendigen Verfahren der ICP-MS (inductive coupled plasma-mass spectroscopy), werden alle gängigen im Labor üblichen Analyseverfahren in der Literatur als mobil möglich beschrieben.

Besonderen Schwerpunkt bildet bei der Metallanalytik die Röntgenfluoreszenz, über die sehr umfangreiche Studien vorliegen (siehe Kapitel 4.3.1.10) (94) (95).

Im Bereich der **Cyanidanalytik** gibt es verglichen mit dem Bereich Metallanalytik wenig Literatur. Speziell mobile Systeme werden nur vereinzelt und dann nur für sehr spezielle Anwendungen, insbesondere die HCN-Bestimmung in Luft; beschrieben. Ein Grund hierfür ist wohl, daß Cyanide in realen Proben häufig als Cyanokomplexe vorliegen, die einer Analytik nur nach Aufschluß zugänglich sind. Deshalb sollte für eine flexible Analytik die Möglichkeit einer Destillation und/oder eines UV-Aufschlusses vorhanden sein.

Neben der Analytik von festen Cyaniden sollte auch die Analytik von gasförmigem HCN in der Bodenluft vorgesehen werden, da unter normalen pH-Verhältnissen ( $\text{pH} < 8.5$ ) ein beträchtlicher Teil des Cyanids als gasförmiges HCN vorliegen kann. Hier sind unter anderem einige Techniken im Bereich des Arbeitsschutzes verfügbar.

Probleme bei der **Quecksilberanalytik** macht die Probenvorbereitung (siehe Kapitel 3.2.3). Ansonsten kann Quecksilber mit Hilfe von ICP-MS, RFA oder, nach Reduktion zum Element, mittels Kaltdampftechnik gut bestimmt werden (Quecksilbersulfid,  $\text{HgS}$ , wird dabei nur teilweise erfaßt). Bei der Kaltdampftechnik werden zwei Prinzipien angewandt, die Bestimmung über Atomabsorption und die Bestimmung über Änderung der Leitfähigkeit nach Amalgamierung. Beide Techniken sind äußerst empfindlich und weit verbreitet.

Eine neuere Methode beruht auf der thermischen Freisetzung des Quecksilbers durch Veraschen der Probe mit nachfolgender Amalgamierung an einer Goldoberfläche. Dieses amalgamierte Quecksilber wird nach erfolgter Veraschung durch spontane thermische Desorption freigesetzt und mittels Atomabsorption bestimmt.

Die Geräte sind relativ teuer sowohl bei der Anschaffung wie auch im Unterhalt (hochreine Gase erforderlich): Da es sich aber bei Quecksilber um ein für Altlasten besonders relevantes Element handelt, kann ein derartiges Gerät in die Überlegungen einbezogen werden (siehe Anhang A.1 ).

Eine Studie von Environmental Monitoring System Laboratory (EMSL) ermittelte als beste Methode zur Bestimmung von Arsenemissionen die Methode 108 (96). Bei dieser Methode wird das **Arsen** in Auffanglösungen bzw. Filtern gesammelt und anschließend mit Hilfe von Atomabsorptionsspektroskopie quantitativ bestimmt.

#### 4.3.1.1 AAS

Die **Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)** ist ein im Labor seit Jahren bewährtes Verfahren zur Bestimmung einer ganzen Reihe von **Metallen**, für einige Metalle unumstritten sogar das empfindlichste. Die Nachteile dieser Methode liegen zum einen darin, daß nur ein oder wenige Elemente gleichzeitig bestimmt werden können, zum anderen daß eine geeignete Probenvorbereitung (in der Regel ein naßchemischer Aufschluß) erforderlich ist: Die AAS-Methode ist sehr zuverlässig aber auch sehr zeitaufwendig.

### 4.3.1.2 Funkenspektrometer

**Funkenspektrometer** werden vielfach in der Analytik von Legierungen eingesetzt, wobei in diesem Fall die Handhabung sehr einfach ist. Die Nachteile dieser Methode liegen in der Forderung, daß die Proben elektrisch leitend und trocken sein müssen. Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Funkenspektroskopie von nichtleitenden Materialien können hier nicht endgültig bewertet werden.

### 4.3.1.3 Filterphotometer

**Filterphotometer** werden sehr verbreitet in der Gewässer- bzw. Abwasserkontrolle eingesetzt. Es werden hierfür fertige Reaktionskits angeboten, die eine sehr einfache und schnelle Analytik ermöglichen. Sie sind nur für wäßrige bzw. aufgeschlossene Proben geeignet. Als quantitative Methoden sind sie mit Vorbehalt zu betrachten, da eine Reihe von Matrixeinflüssen die Ergebnisse beeinträchtigen können.

### 4.3.1.4 ICP

Das **induktiv gekoppelte Plasma (ICP)** basiert auf dem Prinzip der induktiven Aufheizung eines Gases. Hierbei dissoziiert das Gas (in der Regel Argon) zu einem gewissen Grad in elektrisch geladene Teilchen, so daß neben den Gasatomen auch Ionen und freie Elektronen vorhanden sind (Plasmazustand). Je nach eingestrahelter Leistung zwischen 1 und 4 kW werden im Plasma Anregungstemperaturen von 6000 bis 8000 K erreicht: In das Plasma eingebrachte Verbindungen können somit problemlos dissoziiert, atomisiert oder ionisiert und anschließend angeregt werden.

### 4.3.1.5 ICP-OES

Neben einer hohen Präzision zeichnet sich die **Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spektrometrie (ICP-OES)** durch die Vielfalt der detektierbaren Elemente aus. Diese Methode setzt jedoch hohe Anforderungen an die Probenvorbereitung, benötigt eine aufwendige Infrastruktur und fordert einen hohen Platzbedarf. Ferner sind die Anschaffungskosten und auch die Unterhaltskosten hoch.

Prinzipiell sind alle Elemente des Periodensystems mit Ausnahme der Plasmaelemente (Ar, N<sub>2</sub>) bestimmbar. Vorteile sind die Selektivität, die gute Reproduzierbarkeit und ein über 3-6 Dekaden reichender linearer Arbeitsbereich sowie die weitgehende Freiheit von Querempfindlichkeiten und Störungen durch die Probenmatrix.

### 4.3.1.6 ICP-MS

Dieses neue Verfahren besitzt im Vergleich zur ICP-OES eine erhöhte Empfindlichkeit: Es handelt sich um ein Verfahren mit hoher Zuverlässigkeit, aber die Anschaffungskosten sind sehr hoch.

### 4.3.1.7 Ionenchromatographen

**Ionenchromatographen** können sowohl in der Kationen- wie auch in der Anionenanalytik eingesetzt werden (z.B. Bestimmung von Cyanid, Alkali-, Erdalkalielemente). Allerdings können nur Proben, die frei von Feststoffen sind, untersucht werden. Sind die Bedingungen erfüllt, ist die Ionenchromatographie eine schnelle und zuverlässige Methode, wobei der Kostenaufwand gering ist.

### 4.3.1.8 Ionenmeter

**Ionenmeter** werden in der Gewässer- und Abwasserüberwachung häufig mit ionenselektiven Elektroden (ISE) eingesetzt. Es fallen praktisch keine laufenden Kosten an, aber die Analytik ist störanfällig (97) (98).

Interesse finden ionenselektive Elektroden zur Messung biochemisch wirksamer Stoffe. Hierzu wird meist die Elektrode mit einem immobilisierten Enzym in Verbindung gebracht. Das Arbeiten mit ionenselektiven Elektroden erfordert wegen den Einflüssen von Komplexbildnern, Inhibitoren und Fällungsreagenzien häufig eine Matrixkorrektur.

### 4.3.1.9 Polarograph/Voltameter

Diese Methode gilt in der Spurenanalytik für ausgewählte Elemente als empfindlich und präzise, wobei die Geräte kompakt und preiswert sind. Allerdings benötigt man auch hier aufgeschlossene Proben in wässriger Form. Die Methode ist gegenüber organischen Stoffen störanfällig und verlangt das Arbeiten mit elementarem Quecksilber.

### 4.3.1.10 Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA oder XRF)

Bei der **Röntgenfluoreszenz** werden durch energiereiche Strahlung die inneren Elektronen der einzelnen Elemente angeregt. Das angeregte Atom kehrt unter Abgabe von charakteristischer Fluoreszenzstrahlung in den Grundzustand zurück. Diese Fluoreszenzstrahlung wird nach Intensität und Wellenlänge gemessen. Zur Anregung können Elektronen-, Ionen-, Röntgen- oder Gammastrahlen verwendet werden.

RFA benötigt praktisch keine Probenvorbereitung, ist schnell; erfasst eine Vielzahl von Elementen simultan, ist relativ empfindlich und die laufenden Kosten sind relativ niedrig. Es treten jedoch Probleme bei der Kalibrierung des Gerätes für verschiedene Matrices auf, da Effekte der Bodenmatrix die Quantifizierung beeinflussen können. Neue Entwicklungen versuchen, dieses Problem mit Hilfe von Matrixbibliotheken und Rechnerunterstützung zu verkleinern.

In (99) wird über den Feldtest eines tragbaren Röntgenfluoreszenzgerätes berichtet. Ziel dieses Feldversuches war es, die Effektivität dieses Gerätes zum Auffinden von Kontaminationsschwerpunkten bzw. zum Screening zu prüfen.

#### 4.3.1.1 Schnelltestkits (Teststäbchen/Prüfröhrchen)

Da diese Methoden einer Reihe von Störeinflüssen unterworfen sind, sind sie zur quantitativen Analyse nur bedingt brauchbar. Allerdings eignen sie sich sehr gut für ein qualitatives bis halbquantitatives Screening. Diese Methoden sind in der Regel sehr schnell, preisgünstig und leicht zu handhaben.

### 4.3.2 Methoden zum Nachweis von VOC

Neben der Gaschromatographie, die in Kapitel 4.3.3 näher beschrieben wird, eignen sich spektroskopische Verfahren zum Nachweis von VOC. Leichtflüchtige organische Kohlenwasserstoffverbindungen lassen sich prinzipiell entweder als definierte Einzelsubstanzen oder summarisch über gruppenspezifische Merkmale bestimmen. Einige der für den VOC-Nachweis in der Bodenluft besonders geeigneten Verfahren, werden im nachfolgenden kurz dargestellt.

#### 4.3.2.1 FID

Die auf dem Prinzip des **Flammenionisationsdetektors (FID)** basierenden Analysengeräte eignen sich zur Messung von **Gesamtkohlenwasserstoffkonzentrationen** in Luft oder anderen Gasen. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes an eine Flamme, die mit reinem Wasserstoff unter Zuführung von Luft, die frei von Kohlenwasserstoffen ist, entsteht ein sehr niedriger, noch meßbarer Ionenstrom. Wird dieser Flamme ein kohlenwasserstoffhaltiges Meßgas zugeführt, so ändert sich der Ionenstrom an der Kollektorelektrode proportional zur Anzahl der Kohlenwasserstoffmoleküle, die pro Zeiteinheit zugeführt werden.

#### 4.3.2.2 Infrarot-Spektroskopie

Organische Stoffe zeigen im Bereich der Infrarot-Strahlung (IR) stoffspezifisches Absorptionsverhalten. Mit Hilfe von IR-Spektroskopie kann man sowohl qualitative als auch quantitative Analytik betreiben. Prinzipiell befinden sich verschiedene Gerätetypen auf dem Markt, die jeweils für verschiedene Problemstellungen in Frage kommen.

Es gibt Geräte, die in der Lage sind, sogenannte Summenparameter zu bestimmen. Diese Geräte erlauben nur eine Aussage über die Gesamtmenge an vorhandenen organischen Komponenten. Eine Identifikation der Einzelsubstanzen ist jedoch nicht möglich (z.B. Kohlenwasserstoffe nach DIN 38409H18).

Ferner gibt es Geräte, die durch den Einbau bestimmter Filtereinheiten in der Lage sind, quantitative Ergebnisse bestimmter vorkalibrierter Stoffe zu liefern. Diese Gerätetypen sind immer dann für den Einsatz empfehlenswert, wenn der Schadstoff bekannt ist und eine quantitative Bestimmung erwünscht ist.

Bei der klassischen IR-Spektroskopie wird sukzessive das gesamte Frequenzband abgefahren. Dadurch erhält man sowohl die Möglichkeit einen IR-aktiven Stoff qualitativ zu identifizieren als auch eine quantitative Analyse durchzuführen.

Eine Weiterentwicklung der klassischen IR Spektroskopie stellt die **Fourier-Transformations-Infrarot-Technik (FTIR)** dar, die durch einen erhöhten mathematischen und damit EDV-Aufwand; die Analysenzeit verkürzt. Je nach Frequenzbandbereich und Auflösungsvermögen des Analysengerätes kann man auch kompliziertere Stoffgemische mit Hilfe der IR-Analytik identifizieren.

#### 4.3.2.3 Geräteauswahl

Die genannten Projektteilnehmer (siehe Kapitel 2.2) führten eine internationale Markterhebung bei deutschen, amerikanischen und japanischen bzw. Repräsentanten von Herstellern kommerziell verfügbarer, mobiler VOC-Gasmeßsysteme durch. Die identifizierten Meßsysteme und ihre technischen Daten wurden nach einem einheitlichen Schema charakterisiert und erfaßt. Dabei wurden schwerpunktmäßig sensorbasierte Meßsysteme betrachtet. Hierzu zählen hauptsächlich Sensorsysteme mit spektroskopischen Auswerteverfahren und direkt anzeigende Gassensoren (z.B. FID, PID, Halbleitersensoren, Wärmetönungssensoren).

In Tabelle 4 sind charakteristische Meßmethoden und dafür typische Geräte näher betrachtet.

**Tabelle 4: Auswahl kommerziell verfügbarer VOC-Meßsysteme**

Gerätebezeichnung	Hersteller	Parameter	Preis
Spectra Trak 600 GC-MS	Viking	alle Gase	368 TDM
Gasmonitor 1301 IR-Spektrometer	Brüel & Kjaer	IR-aktive Gase	60-80 TDM
Gasmonitor 1302 IR-Spektrometer	Brüel & Kjaer	IR-aktive Gase	30-60 TDM
Quad 400 Gaschromatograph	MTI	alle Gase	30-70 TDM
1BX IR-Spektrometer	Miran	wichtige VOC	60 TDM
Micro TIP PID	Photovac	VOC	15-30 TDM
TVA 1000 PID/FID	Foxboro	VOC	30 TDM
10 S plus Gaschromatograph	Photovac	VOC	30-65 TDM
G819 PER/TRI elektroch. Zelle	GfG	PER/TRI	15 TDM

**Gasmonitor 1301 (Fa. Brüel & Kjaer)**

Hierbei handelt es sich um ein Infrarot-Spektrometer mit nachgeschaltetem photoakustischem Detektor. Das Durchstimmen der Wellenlänge erfolgt mittels eines modifizierten Michelson-Interferometers.

Das Gerät hat einen Meßbereich von 1 ppm bis Vol. %. Ein Meßzyklus benötigt etwa 2 Minuten (abhängig vom Volumen des verwendeten Probenschlauchs).

Das Gerät eignet sich sowohl für Stoffidentifikationen als auch für quantifizierende Meßaufgaben. Für die Auswertung der Spektren, Identifikation der gemessenen Stoffe und Kalibrierung werden hohe Anforderungen an den Benutzer gestellt. Aufgrund seiner Charakteristiken stellt das Gerät ein vollwertiges Vor-Ort-Analysensystem dar.

Unter der Voraussetzung, daß qualifiziertes Bedienungspersonal verfügbar ist, kann das Meßgerät für alle Meßaufgaben von der Vor-Ort-Erkundung bis zum Monitoring eingesetzt werden. Im Prinzip läßt sich dieses Gerät auch für rein quantifizierende Meßaufgaben einsetzen, da softwaremäßig Bandpaßfilter zur Spektralanalyse realisiert werden können, die stoffspezifische IR-Teilspektren identifizieren. Für Messungen mit dem nachfolgend genannten Gasmonitor 1302 muß dabei der zu messende Stoff bekannt sein.

**Gasmonitor 1302 (Fa. Brüel & Kjaer)**

Entsprechend dem Modell 1301 derselben Firma handelt es sich um ein Infrarot-Spektrometer mit nachgeschaltetem photoakustischem Detektor. Das Modell 1302 ist in der Lage, fünf verschiedene Stoffe in einem Stoffgemisch durch den Einsatz von fünf verschiedenen optischen Bandpaßfiltern unter Kompensation der Luftfeuchte zu quantifizieren. Zur Auswahl stehen derzeit ca. 25 verschiedene Bandpaßfilter, die sich zum Nachweis von spezifischen Stoffgruppen wie CKW, TOC sowie auch von Einzelstoffen eignen. Die optischen Filter können wahlweise zusammengestellt werden. Aufgrund der jeweils gewählten Filterkombination (Filterwechsel vor Ort ist zwar möglich, aber wegen des hohen Kalibrieraufwandes nicht empfehlenswert) kann das Gerät in beschränktem Umfang zur Stofferkennung bei der Vorerkundung eingesetzt werden.

Besonders gut geeignet ist das Gerät für quantifizierende Monitoringaufgaben in der Sanierungsphase (z.B. Prozeßüberwachung bei der in-situ Bodenluftabsaugung). Herausragende Eigenschaften des Gerätes sind sein großer Meßbereich von ppb bis Vol. %, sein geringer Meßprobenvolumenbedarf und seine einfache Handhabung.

**1BX (Fa. Miran)**

Bei diesem IR-Spektrometer handelt es sich um ein Einstrahlspektrometer, dessen Wellenlänge über ein Interferenzfilter eingestellt werden kann. Der Wellenlängenbereich wird in einem programmierbaren Meßprogramm kontinuierlich durchfahren. Der Optik nachgeschaltet ist ein pyroelektrischer Detektor. Der Meßbereich des Gerätes umfaßt 1 ppm bis Vol. %. Das vorprogrammierte Gerät stellt keine besonderen Benutzeranforderungen. Es eignet sich besonders gut für quantifizierende Monitoringaufgaben, wobei große Probenvolumina (ca. 10 l pro Probe) zur Verfügung stehen müssen.

Unter Verwendung der geeigneten Software kann die gespeicherte Probe analysiert und das gemessene Spektrum mit Spektren aus der Bibliothek verglichen werden. Hierdurch kann das Gerät auch gut für qualifizierende Meßaufgaben eingesetzt werden. Die Auswertung der Spektren erfordert jedoch eine geschulte Fachkraft.

#### **Quad 4 (Fa. MTI)**

Hierbei handelt es sich um einen vierfach-Gaschromatograph, der eine schnelle Qualifizierung und Quantifizierung von angesaugter Bodenluft ermöglicht. Das Meßsystem benötigt einen Probenvolumenanteil von weniger als 1 ml, wobei die Probe direkt von der eingebauten Pumpe angesaugt werden kann.

Das Gerät ist mit vier Kapillarsäulen ausgestattet, die jeweils verschiedene Trenncharakteristika haben. Es kann aufgabenspezifisch aus ca. 25 verschiedenen Trenncharakteristika für CKW, KW, Aromaten, Alkohole, Ketone, Gase (z.B. O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) und Schwefelverbindungen gewählt werden.

Die Detektion erfolgt mit Hilfe eines integrierten Wärmeleitfähigkeitsdetektors. Aufgrund der extrem kurzen Meßzyklen (C 2 Minuten für die Gasanalyse) und des weiten Meßbereiches (1 ppm bis Vol. %, mit vorgeschaltetem Anreicherungsverfahren kann sogar bis ppb gemessen werden) stellt das Gerät eine vollwertiges und vor Ort einsetzbares Analysensystem mit der GC-üblichen Genauigkeit dar. Mit diesen Eigenschaften eignet sich das Gerät sowohl für Meßaufgaben bei der Vorerkundung (qualifizierende Meßaufgabe) und für Monitoringaufgaben in der Sanierungsphase (quantifizierende Meßaufgaben).

### **4.3.3 Gaschromatographie**

Da die **Gaschromatographie** seit langem zum festen Bestandteil der Laboranalytik gehört und neue analytische Probleme sowohl bei Altlasten wie auch zur Arbeitsplatzüberwachung in den letzten 10 Jahren zu lösen waren, sind auch für die Feldanalytik eine große Anzahl von Spezialgeräten entwickelt worden (100). Aus diesem Grund sind von der U.S. EPA eine Reihe von Geräten intensiv getestet worden (101) (102) (103). Eine detaillierte Spezifikation der beschriebenen Geräte, die in Deutschland erhältlich sind, ist im Anhang A.4 gegeben. Weitere auf dem Markt befindliche Geräte sind der Gesamtübersicht (Anhang A.1) zu entnehmen. Die für die Feldtests vorgesehenen Geräte sind dem Anhang A.7 zu entnehmen.

Die Gaschromatographie arbeitet nach folgendem Prinzip:

Das zu trennende Gasgemisch wird in einer speziellen Säule aufgetrennt. Die so getrennten Komponenten verlassen nach reproduzierbaren Zeiten (Retentionszeiten) wieder die Säule und werden vom Detektor erfaßt. Dadurch ist je nach Detektor eine Identifizierung und eine Quantifizierung einzelner Parameter möglich. Bei Gasgemischen mit sehr vielen (unbekannten) Einzelkomponenten kann die Identifikation der Einzelsubstanzen schwer fallen oder unmöglich werden.

### 4.3.3.1 Injektoren

Ziel des Injektionsvorganges in der Gaschromatographie ist es, möglichst kurze Probenaufgabenzeiten zu realisieren, so daß aufgrund geringer Signalbreite eine optimale Nutzung der gaschromatographischen Trennleistung eintritt. Aus der Vielzahl der Injektoren werden hier einige, besonders für den mobilen Einsatz geeignete; in Tabelle 5 zusammengestellt (104).

### 4.3.3.2 Trennsäulen

In der Gaschromatographie werden im wesentlichen zwei verschiedene Typen von Trennsäulen eingesetzt, gepackte Säulen (ein Glasrohr gefüllt mit Phasengranulat) und Quarzkapillarsäulen.

Manche mobilen Gaschromatographen werden mit **gepackten Säulen** angeboten. Dies ist einerseits historisch bedingt, da einige Geräte ohne Modifikation seit Jahren auf dem Markt sind und eigentlich ein veraltetes Trennmedium verwendet wird. Andererseits haben gepackte Säulen wesentlich höhere Kapazitäten bezüglich der injizierten Stoffmengen und sind daher robuster. Die Trennleistung von gepackten Säulen ist niedrig gegenüber der von Kapillarsäulen. In der mobilen Gaschromatographie ist daher in modernen Geräten die Verwendung von Kapillarsäulen üblich.

**Kapillarsäulen** sind mit inneren Durchmessern von 0.5 mm (Widebore) über 0.2 mm (Minibore) bis zu 0.05 mm (Microbore) handelsüblich. Die Dicke des Phasenfilm liegt zwischen 0.1-5 µm. Die Phasenzusammensetzung gibt es in unterschiedlichster Polarität.

Die Länge der Trennsäule beeinflußt deren Trennleistung. Diese steigt jedoch nicht linear mit größerer Kapillarlänge, sondern nähert sich einer maximal erreichbaren Trennleistung.

Tabelle 5: Übersicht der Injektoren

Injektor	Vorteile	Nachteile	Urteil
Split-Injektor	geringe Säulenkontamination, einfacher Aufbau	niedrige Geräteempfindlichkeit durch Stoffverlust, Diskriminierung von Schwerflüchtigen	++
PTV	hoher Stofftransfer, gute Reproduzierbarkeit, geringe Kontamination	apparativ aufwendig	-
Split-Splitless Injektor	hoher Stofftransfer, Abtrennung der Nichtflüchtigen	Überladung der Chromatographie aufgrund von Überdosierung, Kontaminationsgefahr	+-
On-Column Injektor	keine Stoffverluste, gute Reproduzierbarkeit	hohe Kontaminationsgefahr	-
Thermodesorber	gut geeignet für Leichtflüchtige	z.T. aufwendige Fokussierung, ungeeignet für Schwerflüchtige	+++
Metallgewebe-Thermodesorber	guter Stofftransfer, geringe Kontaminationsgefahr	nur für GCs mit spezieller Trägergasversorgung	+++
Pyrolyse Injektor	geringe Kontaminationsgefahr, auch Aussagen über Schwer- und Schwerstflüchtige	stark matrixabhängig, komplizierter Zusammenhang zwischen Stoff und Signalen	-
Hochgeschwindigkeitsinjektor	geeignet für Schnellanalysen	nur Leichtflüchtige, für Schwerflüchtige apparativ aufwendig	++(?)

(?) noch in der Entwicklung

+ bedingt feldtauglich

- nicht feldtauglich

++ feldtauglich

+- Nachteile überwiegen Vorteile

+++ gut feldtauglich

Je dünner die Kapillaren sind, desto mehr verschiebt sich das Mengenverhältnis der mobilen Phase zur stationären Phase zugunsten der stationären Phase. Damit nimmt die Trennleistung zu und die Analysenzeit für gleiche Trennungen aufgrund einer kürzeren Kapillare ab (105). Bei sehr dünnen Kapillaren ( $< 100 \mu\text{m}$ ) liegen die Signalbreiten im Millisekundenbereich bei einer Analysenzeit von wenigen Minuten. Man spricht hier von **Hochgeschwindigkeits-Gaschromatographie (HGGC)** Notwendig für ihren Betrieb ist ein Injektor, der sehr geringe Mengen zu dosieren erlaubt und ein entsprechend hochempfindlicher Detektor (105) (106) (107). Berücksichtigt man die beeinflussenden Parameter wie Mengenbelastbarkeit der Säule, Säulengasfluß, Injektions- und Detektionsgeschwindigkeit, so ist die HGGC ein außerordentlich leistungsfähiges Trennverfahren, das kurze Analysenzeiten ermöglicht. Trotz des hohen apparativen Aufwandes erscheint ihr Einsatz im Feld sinnvoll.

Durch die einer normalen Gaschromatographie nachgeschaltete HGGC als zweidimensionale Gaschromatographie oder durch den Einsatz zweier Säulen unterschiedlicher Polarität im Parallelbetrieb sind z.B. selbst komplexe Gemische schnell und gut trennbar (108).

Die Parameter, die Einfluß auf die Leistungsfähigkeit gaschromatographischer Trennungen haben, sind die Art des **Trärgases**, die Temperatur, der Gasdruck und Gasfluß. Der Umgang mit den als Transportmedien verwendeten Gasen (üblicherweise: Helium, Stickstoff, Argon, Luft, Kohlendioxid oder Wasserstoff; wobei sich beim Einsatz von Wasserstoff bei Undichtigkeiten explosive Gemische bilden können) ist auch im Feld verhältnismäßig einfach und Heizung bzw. Temperiereinheiten benötigen aufgrund der geringen Wärmekapazitäten von Kapillarsäulen nur wenig aus Batterien lieferbare Energie.

### 4.3.3.3 Detektoren

In der Gaschromatographie werden eine Vielzahl von **Detektoren** eingesetzt (siehe Tabelle 6) (4). Bei unbekannter Probenzusammensetzung ist zur Erfassung der gesamten chromatographierbaren Inhaltsstoffe der Einsatz eines Detektors, der auf alle Verbindungen anspricht (Summenparameter Detektor) sinnvoll. Die Stoffidentifizierung geschieht dabei durch Retentionszeitvergleich mit Referenzmaterial oder besser durch Referenzanalysen mit Detektoren, die eine Stoffidentifizierung anhand von Spektren zulassen (z.B. Infrarot-, Massenspektrometrie).

Mit Hilfe von **gruppenspezifischen Detektoren** sind, durch selektive Detektion, spezielle Ziel-Stoffgruppen auch in Vielstoffgemischen erfaßbar (z.B. ungesättigte Kohlenwasserstoffe im Kohlenwasserstoffgemisch durch PID).

Zur Analyse von Einzelstoffen als Spurenkomponenten in Gemischen wie z.B. Mineralölen werden **elementspezifische Detektoren** eingesetzt, zulassen (z.B. Analyse von polychlorierten Biphenylen in Altöl).

Die Menge der gleichzeitig erfaßbaren Stoffe nimmt vom Summen Detektor über den gruppenspezifischen zum elementspezifischen Detektor ab, während in der Regel in der gleichen Reihenfolge die Empfindlichkeit zunimmt.

Zur Steigerung des Informationsgehaltes kann es sinnvoll sein, mehrere Detektoren parallel oder in Reihe einzusetzen. Der Parallelbetrieb verursacht dabei, wegen der Aufteilung des Gasstromes, einen Verlust an Empfindlichkeit. Bei der Reihenschaltung sind die zerstörenden Detektoren (z.B. FID, ECD) als letztes Glied in der Kette zu plazieren. Grenzen der **Multidetektoren** liegen in der Signalverbreiterung, bedingt durch zu hohe Detektor-Volumina und durch Substanzverlust oder Memory-Effekte von aktiven Stellen der Detektorwände.

### 4.3.4 Gaschromatographie-Massenspektrometrie

Das zu untersuchende Gasgemisch wird wie unter Kapitel 4.3.3 aufgetrennt. Zur Identifikation von Einzelstoffen ist als Detektor ein Massenspektrometer nachgeschaltet. Durch chemische Zerfallsreaktionen und Auftrennung der gebildeten Ionen entsprechend ihrem Masse/Ladung-

Verhältnis können auch Gemische mit sehr vielen Einzelstoffen quantitativ untersucht werden.

Der Einsatz mobiler GC-MS im Gelände ist seit einigen Jahren apparativ machbar (109).

Speziell für den **Feldeinsatz** sind auf dem Gebiet der GC-MS drei Systementwicklungen bis zum verkaufbaren Produkt geführt worden (siehe Anhang A.4).

Ausgehend von einem sehr bewährten und weitverbreiteten Hewlett-Packard Labor GC-MS-System (5972 MSD) hat die amerikanische Firma Viking ein mobiles System entwickelt und seit 1991 auf dem Markt.

**Tabelle 6: Übersicht der Detektoren**

Detektor	Stoffnachweis	k.n.S. [pg]	dyn. Bereich	Urteil
<b>Summenparameter Detektoren</b>				
WLD	universell	0,15 - 400	10 <sup>4</sup>	+++
FID	alle org. Stoffe	10 - 100	10 <sup>7</sup>	+++
HID	universell	0,5 - 5	10 <sup>4</sup>	++
AID	universell	1 - 10	10 <sup>3</sup>	++
SAW	universell	-	-	++(?)
<b>Gruppenspezifische Detektoren</b>				
PID	abhängig vom Ionisationspotential	0,1 - 10	10 <sup>7</sup>	+++
Fluoreszenz	fluoreszierende Stoffe (PAK)	2000 - 6000	10 <sup>2</sup>	+-
<b>Elementspezifische Detektoren</b>				
ECD	F, Cl, Br, Nitro, 10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> :1 (C)	0,05 - 1	10 <sup>4</sup>	+++
AED	diverse Elemente 10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> :1 (C)	0,1 - 20	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	+-
ELCD	Halogene, S, N 10 <sup>4</sup> :1 (C)	0,1 - 4	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>4</sup>	-
FIRE	C, Cl, F	60000 - 200000	10 <sup>4</sup>	+
FPD	S, P 10 <sup>4</sup> :1 (C)	0,9 - 10	10 <sup>4</sup>	+-
NPD	N, S 10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> :1 (C)	0,4 - 10	10 <sup>4</sup>	++
Chemolumin.	S, N 10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> :1 (C)	1	10 <sup>4</sup>	++
<b>Spektrometrische Detektoren</b>				
MS	universell	100 - 1000	10 <sup>8</sup>	+++
IR	IR-Absorber	1000	10 <sup>4</sup>	+-
IMS	Kampf-, Sprengstoffe, Rauschgifte	1 - 10000	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	++

k.n.S. kleinste nachweisbare Stoffmenge

- nicht felddauglich

++ felddauglich

+- Nachteile überwiegen Vorteile + bedingt felddauglich

+++ gut felddauglich

Das erste mobile GC-MS-System MMI der Firma Bruker-Franzen in den Jahren 1980-85 entwickelt, hat seinen Ursprung in der Kampfstoffanalytik und ist mit den Vorgaben entwickelt worden, daß es in gepanzerten Fahrzeugen zu militärischen Zwecken eingesetzt werden kann. Als neueres System mit ähnlichen Spezifikationen ist das EM640 zu sehen, das ebenfalls komplett neu für den Zweck der Vor-Ort-Analytik entwickelt wurde und seit Mitte 1993 angeboten wird. An diesem Gerät wurden seither kleine Verbesserungen vorgenommen, die im Januar 1996 auf der -Fourth International Conference: On-Site Analysis- in Florida vorgestellt wurden (110).

### 4.3.5 Fahrbare Labors

Es gibt eine Reihe von Laborunternehmen und auch Ämter (z.B. Gewerbeaufsichtsämter, Umweltämter), die für die Analytik im Feld Meßfahrzeuge oder Laborcontainer aufgebaut haben. Sie sind mit der für die jeweilige Fragestellung geeigneten Geräte ausrüstbar. Diese Fahrzeuge sind sehr umfangreich mit Abzügen, Klimatisierung, Strom- und Gasversorgung ausgestattet. Da jedoch allein der Betrieb von Gasflaschen im Fahrzeug einen hohen sicherheitstechnischen Aufwand erfordert, und viele Spezialeinbauten verwendet werden, sind diese Fahrzeuge relativ teuer.

In diese Fahrzeuge oder Container kann jede analytische Komponente, von einfachen Summenparametergeräten über Gaschromatographen, Flüssigkeitschromatographen, Infrarotsystemen, AAS und RFA bis hin zu GC-MS Systemen installiert werden und im Prinzip nach den gleichen Prozeduren wie im Labor betrieben werden.

Aus diesem Grund ist im Rahmen des Eureka Projektes 674 das Konzept verfolgt worden, ein handelsübliches Labor-GC-MS, das Quadrupolgerät FISIONS MD 800, so in einen stoßgesicherten Rahmen zu integrieren, daß dieses System in jedem Laborfahrzeug ohne Risiko eingesetzt werden kann. Als nächste Entwicklung aus diesem Projekt wird ein mobiles ICP-MS erwartet.

Bekannt sind ebenfalls eine Reihe von Fahrzeug-Installationen der Laborgeräte Finningan Ion-trap GC-MS, ebenso wie die von Hewlett Packard GC-MSD und Shimadzu GC-MS.

Diese Systeme arbeiten im Feldlabor nach den gleichen Verfahren wie im Labor. Es hat sich aber herausgestellt, daß die Laborsysteme in der Regel unter den rauen Bedingungen im realistischen Feldbetrieb nicht langzeitstabil arbeiten. Häufig sind es schlagende Türen, unterbrochene Stromversorgungen, Ausfall der Klimaanlage, Ausfall der Gasversorgung, Staub und Feuchtigkeit, die zu Störungen führen.

Um dieses Risiko zu mindern und mit der Erfahrung aus umfangreichen Tests durch die U.S. EPA werden zur Zeit die Entwicklungen hin zu Spezialgeräten durchgeführt.

## 4.3.6 Biologische Nachweisverfahren

### 4.3.6.1 Indikatoren

Tiere, Pflanzen, Mikroorganismen oder auch Lebensgemeinschaften, die in der Umwelt vorhanden sind, werden erfaßt und zur Beurteilung der Umweltsituation herangezogen. Dazu gehört das Vorhandensein bestimmter Arten (z.B. Bakterien und Flechten) wie auch ihr Verhalten oder Erscheinungsbild (z.B. Insektenbefall von Pflanzen, Flechtenwachstum und Vermehrung von Bakterien).

Die Messung von **Metabolismusraten** von in dem Bereich vorkommenden Mikroorganismen (z.B. Nitratfixierung, O<sub>2</sub>-Verbrauch und Fluoreszenzänderung) läßt Schlüsse auf die Belastung des untersuchten Bereiches zu.

Organismen (Pflanzen, Molusken, Anneliden und Fische), die dem Untersuchungsgebiet entnommen werden, können auf akkumulierte Schwermetalle oder organische Verbindungen hin untersucht werden. Daneben können auch durch Gifteinwirkung induzierte physiologische Veränderungen wie DNA-Reparaturenzyme (Cytochrom P450 in Fischen) oder die entsprechenden mRNA als Nachweis einer Gifteinwirkung dienen.

Ein Vorteil der unter Indikatoren zusammengefaßten Verfahren ist, daß mit solchen Tests die vorhandene Umweltbelastung ohne kontinuierliche Messungen über größere Zeiträume hinweg beurteilt werden kann, da sich auch kurzfristige Belastungen in der Vergangenheit über längere Zeit auf die Indikatororganismen auswirken. Erfaßt werden Summenparameter wie Gesamt- oder Gentoxizität.

Obwohl die genannten Vorteile für die Beurteilung der Umweltbelastungen existieren, sind biologische Verfahren mit Indikatororganismen bisher insgesamt nicht für die schnelle Vor-Ort-Analytik geeignet. Beurteilung von Lebensgemeinschaften in einem Gebiet erfordern Zeit und Erfahrung. Die Messung von Metabolismusraten, akkumulierten Giftstoffen oder Enzymvorkommen erfordern eine meist aufwendige Laborausrüstung. Die Entwicklung der notwendigen analytischen Methoden und die Sammlung von Daten über in der Umwelt bestehende Zusammenhänge ist für die gestellten Anforderungen noch nicht weit genug fortgeschritten.

### 4.3.6.2 Testsysteme

Tiere, Pflanzen, Mikroorganismen oder Zellkulturen werden der Umwelt oder einer Probe ausgesetzt. Zur Bewertung der Umweltqualität werden die unterschiedlichsten Veränderungen nach einer Proben oder Umwelteinwirkung erfaßt: Verhalten, Überlebensrate, Metabolismus (Atmung, Photosyntheserate, Substratverbrauch, Produktbildung) Enzyminduktion, DNA-Veränderung. Für einige dieser Verfahren sind Durchführungsnormen vorhanden (Fisch-, Daphnien- oder Bakterientest).

Die **Toxizitätsmessung mit Organismen** ist unspezifisch. Daher können Einzelsubstanzen nicht erkannt oder quantifiziert werden. Probeninhaltsstoffe, die allein ungiftig, zusammen jedoch schädlich sind, werden von solchen unspezifischen Testsystemen erfaßt. Die Toxizität einer Probe kann nur relativ zu einer ungiftigen Referenz angegeben werden (z.B. Leitungs-

wasser). Die als giftig erkannten Proben können dann mit spezifischeren Methoden (z.B. Immunanalytik, GC oder HPLC) weiter untersucht werden. Damit eignen sich solche Summenparameter erfassenden Untersuchungsmethoden zum schnellen Vor-Ort-Screening großer Probenmengen.

**Fisch- oder auch Zellkulturtests** sind wegen des apparativen Aufwandes nur als stationäre Methoden in Labors durchführbar. Viele Verfahren erfordern die Anzucht oder Kultivierung der Organismen in einem Labor. Nur wenige Tests sind für schnelle und einfache Vor-Ort-Analytik geeignet.

Bei der **Markterhebung** (Stand 1993) wurden 13 kommerziell erhältliche Geräte gefunden. Die angebotenen Verfahren benutzen Algen, Bakterien oder Tiere als Testorganismen für die Toxizität von Umweltproben. Zur Beurteilung der Proben werden die Stoffwechselaktivitäten der Organismen bestimmt.

Der größte Teil dieser Testsysteme wurde für kontinuierliche Wasser- und Abwasseranalytik entwickelt. Nur wenige Hersteller beschreiben Verfahren zur Messung kontaminierter Bodenproben. Da bei giftigen Proben die Testorganismen absterben, muß die biologische Komponente schnell und einfach austauschbar sein. Bei den Geräten handelt es sich um Stand- und Tischversionen, die oft nicht zum Transport geeignet sind.

Die mit Algen arbeitenden Geräte werden meist zur kontinuierlichen **Gewässerüberwachung** eingesetzt. In den meisten Fällen besteht zwar die Möglichkeit, Einzelproben zu untersuchen, es liegen jedoch keine Vorschriften und Erfahrungen in der Aufbereitung bzw. Untersuchung von Bodenproben vor. Mit einer Ausnahme erfordern alle Algentoximeter Anzuchtmöglichkeiten für die Testorganismen (bei dem Gerät LAR werden die Algen im Gerät kultiviert und automatisch in der Meßkammer ersetzt).

Die mit Bakterien arbeitenden Geräte lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

a.) **BSB-Messung** mit Belebtschlamm oder immobilisierten Bakterien

b.) Bestimmung der Stoffwechselaktivität durch **Lumineszenz oder Redoxpotentialmessung**

**zu a. )** Die mit Belebtschlamm arbeitenden Geräte sind zur kontinuierlichen Kontrolle von Kläranlageneinläufen entwickelt worden. Bei zwei Geräten (Medingen und TU-Berlin; siehe Anhang A.1 und A.6) werden auf Membranen immobilisierte Bakterien zur Messung eingesetzt. Diese Membranen werden von den Anbietern geliefert und können bei Bedarf ausgetauscht werden. Es besteht zwar die Möglichkeit, Einzelproben zu untersuchen, Bodenextraktionsvorschriften sind aber nicht vorhanden.

**zu b.)** Für die Analyse von Bodenproben sind nur zwei der gefundenen Geräte (Dr. Lange: LumiStox und Microbics: Microtox; siehe Anhang A.1 und A.6) aus dem Bereich der Testsysteme geeignet. Diese Tests verwenden lumineszierende Bakterien. Durch toxische Proben wird der Stoffwechsel und damit auch die Lumineszenz der Bakterien gehemmt (111) (112) (113). Die Lumineszenz wird mit einem Photometer gemessen. Die Messung einer Probe dauert bei beiden Geräten etwa 60 min. Die Bakterien werden gefriergetrocknet geliefert und vor einer Messung reaktiviert. Für Bodenproben werden Extraktionskits mit entsprechenden

Durchführungsvorschriften geliefert. Die notwendigen Geräte sind tragbar oder lassen sich gut in Laborwagen einbauen.

#### 4.3.6.3 Enzymhemmung

Viele giftige Substanzen hemmen oder zerstören Enzyme. Setzt man solche Enzyme Umweltproben aus, so kann durch eine anschließende Messung der Aktivität der Enzyme deren Hemmung und damit die Konzentration der entsprechenden Enzymgifte gemessen werden (114).

Im Bereich der Enzymsensoren liegen vielversprechende Ansätze für Schadstoffmessungen durch Enzymhemmung vor. 1993 konnte nur ein kommerziell verfügbares System für die Umweltanalytik gefunden werden (Cholinesterase-Hemmtest, Boehringer; siehe Anhang A.1 und A.6). Das Verfahren basiert auf der Hemmung des Enzyms Acetylcholinesterase durch Insektizide (Carbamate und Organophosphate). Durch die Enzymreaktion mit einem modifizierten Substrat wird ein farbiges Produkt erzeugt, dessen Konzentration ein Maß für die Enzymaktivität ist und photometrisch bestimmt werden kann. Wird das Enzym durch Insektizide in der Probe gehemmt, entsteht weniger Farbstoff. Dieses Verfahren wurde zur Untersuchung von Trink- und Oberflächenwasser entwickelt.

#### 4.3.6.4 Immunoassays

Die **Immunoassays** stellen im Bereich der Umweltanalytik ein neues junges Teilgebiet dar, obwohl diese Technik aus der klinischen Analytik schon seit mehr als zwanzig Jahren bekannt ist. In den letzten Jahren haben sich Testsysteme, die auf diesem Prinzip beruhen, zur schnellen Pestiziddetektion etabliert. Der Vorteil dieser Systeme liegt in der spezifischen Erkennung des Analyt-Moleküls oder einer Gruppe von Analyt-Molekülen, so daß die zu untersuchende Probe in der Regel nicht aufgearbeitet oder derivatisiert werden muß.

Mit Immunoassays können Stoffe analysiert werden, die im biologischen System Immunreaktionen (Produktion von Antikörpern) hervorrufen. Die Immunoassays bedienen sich der spezifischen Antigen-Antikörper-Reaktion.

Durch die hohe Affinität zum Antigen sind Antikörper zur selektiven Erkennung von speziellen Analyten in unterschiedlichen Matrices (Wasser und Bodeneluat) geeignet. In der Literatur werden Antikörper für unterschiedliche Analyte (Herbizide, Pestizide, Schwermetallchelate, PCBs, Dioxine, TNT, DNT und BTX) beschrieben. Es können sowohl einzelne Substanzen als auch Stoffgruppen bestimmt werden.

Antikörper wurden zuerst in der Medizin, später auch in der Umweltanalytik zur Bestimmung von Bioziden (Insektizide, Fungizide und Herbizide) eingesetzt. In diesen Bereichen besteht ein großes Angebot verschiedener Antikörper, die fertig, auf 96-Well-Mikrotiterplatten immobilisiert, angeboten werden. Für die Testdurchführung und Auswertung sind automatisch arbeitende Systeme vorhanden. Für die Vor-Ort-Analytik von Schadstoffen aus dem Altlastenbereich sind bisher wenige Immunoassays auf dem Markt. Die Tests werden hauptsächlich in zwei Formaten angeboten:

1. Schnelltest zur Vor-Ort-Analyse der Proben, deren Auswertung per Farbvergleich erfolgt und semiquantitative Aussagen über den Schadstoffgehalt ermöglicht.
2. Testsets, zu deren Auswertung transportable Photometer angeboten werden, die auch quantitative Aussagen über den Schadstoffgehalt zulassen.

#### 4.3.6.5 Geräteangebot

Die Testformate der einzelnen Hersteller unterscheiden sich stark und sind untereinander nicht kompatibel. Ein großes Angebot für den Altlastenbereich besteht bei Merck und Millipore. Eine Geräteauswahl ist im Anhang A.5 zusammengestellt.

Die Tests von Merck, Millipore und Ohmicron sind netzunabhängig und tragbar. Von Merck und Millipore werden Feldtestkits angeboten, in denen die 1 Meßgeräte und alle notwendigen Verbrauchsmaterialien untergebracht sind. Die Auswertung erfolgt bei Merck optisch mit Farbvergleich oder mit einem batteriebetriebenen tragbaren Reflektometer für 600 DM. 4 bis 5 Tests können parallel innerhalb von 30 min durchgeführt werden.

Die im Anhang A.5 angegebenen **Bakterienlumineszenzgeräte** unterscheiden sich nur in den Kosten für Verbrauchsmaterial.

1993 befanden sich von den Firmen Merck, Millipore, Ohmicron/Baker, r-Biopharm und pab Productions ca. 38 Testsysteme für 26 verschiedenen Pestizide im Handel. Immunoassays, mit denen Stoffe detektiert werden können, die in und als Altlasten auftreten, sind im Vergleich zur relativ großen Zahl der Pestizidtests noch selten.

Die Angebote der Firmen unterscheiden sich nicht nur durch die zu detektierenden Analyte sondern auch durch das Format der Tests, die je nach Probenaufkommen unterschiedliche Vorteile besitzen.

Grundsätzlich kann man bei den vorhandenen Tests zwischen Plattenversionen, semiquantitativen Sticktests und Röhrchentests unterscheiden (siehe Anhang A.5).

Zum Screening und zur Kartierung von Sanierungsflächen, bei denen mehrere hundert Proben vermessen werden müssen, eignen sich **ELISAs** im Plattenformat, da bei diesen die Kosten pro Messung am günstigsten sind und eine große Anzahl schnell abgearbeitet werden kann. Für solche Geräte benötigt man einen eingerichteten Arbeitsplatz oder einen Laborcontainer.

Für Einzelanalysen oder Untersuchungen, bei denen weniger als 20 Proben pro Tag gemessen werden, erweisen sich die Röhrchen- und Sticktests als vorteilhaft, da sie flexibler eingesetzt werden können.

## 5. Neue Entwicklungen

### 5.1 Nachweis von Metallen und Cyaniden

Im Bereich der Metall- und Cyanidanalytik wurden im Rahmen der Untersuchungen wenig prinzipielle Neuentwicklungen gefunden.

#### 5.1.1 Funkenspektrometrie

Bei der Methode der **Funkenspektrometrie** wurde eine Neuentwicklung als Patent angemeldet, die verspricht, nichtleitende Materialien messen zu können. Die Methode soll bei Kunststoffen mit Erfolg angewandt worden sein.

#### 5.1.2 Atomabsorptionspektrometrie

Auf dem Gebiet der **Atomabsorption** gibt es Entwicklungen im Bereich der Vereinfachung der Probenvorbereitung. So wird bereits ein Gerät (Grün SM30 Zeemann, siehe Anhang A.1) angeboten, das verspricht, im Graphitrohr Feststoffproben direkt messen zu können. Dieses Gerät wurde mit Probenmessungen geprüft und scheint für die Feldtests in Frage zu kommen.

#### 5.1.3 ICP-MS

Eine neue Entwicklung ist die **on-line-ICP-MS (Inductiv Coupled Plasma-Massenspektrometrie)** Analyse mit **Fließinjektions-Analyse FIA/Mikrowelle**, die eine schnelle Analytik der Schwermetalle im Rahmen von mobilen Einsatzfahrzeugen oder ortsfesten Containern z.B. bei der Deponiekontrolle erlaubt. Die Technik erscheint aufgrund der hohen Anschaffungskosten (300.000,- DM) und Unterhaltskosten nur im Rahmen größerer Erkundungs- und Sanierungsvorhaben und in der Deponiekontrolle nutzbar. Eine fachkundige Betreuung durch einen Spezialisten ist notwendig.

#### 5.1.4 Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie

Eine weitere neue Technik ist die **laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS)**, eine auf optischer Signalerzeugung beruhenden Bestimmungsmethode für Schwermetalle. Hierbei ist es möglich, durch hochenergetische Break-Down Spektroskopie, Probenmaterial direkt zu atomisieren und die hierbei ausgestrahlten Emissionsspektren zu analysieren. Das Krupp Forschungsinstitut in Essen besitzt einen Prototypen, das LIESA-System, an dessen Miniaturisierung derzeit gearbeitet wird.

## 5.1.5 Auswertungsmethoden

Im gesamten Bereich der Spektrometrie wurden die Auswertungsmethoden weiterentwickelt. Auf diese Weise lassen sich z.B. Störungen rechnerisch eliminieren. Diese erweiterte Software erfordert aber auch eine entsprechende Hardwareausstattung.

## 5.2 Nachweis von leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen

Aufgrund der Transport- und Reaktionsprozesse, denen leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe unterworfen sind, kann neben der Bodenluft unter bestimmten hydrogeologischen Bedingungen auch das Grundwasser mit VOC kontaminiert sein. Bisher stehen für Untersuchungen des Grundwassers teure und aufwendige Verfahren mit klassischer Probennahme und anschließender Laboranalyse zur Verfügung.

### 5.2.1 Mikro-Analysensysteme

Eine kostengünstige Alternative könnten in Zukunft winzige **Mikro-Analysensysteme** sein. Anspruchsvolle Aufgaben wie z.B. die automatische Überwachung des Grundwassers in der Nähe von Altlasten ist nicht allein mit Einzelsensoren lösbar, sondern verlangt ein komplexes, miniaturisiertes Analysenlabor.

Ein solches System ist **IMAS** (FhG, 1993). Es stellt ein tragbares Mikrolabor in Taschenformat dar, das periodisch winzige Proben aus seiner Umwelt ansaugt, die analysierten Werte zwischenspeichert und weiterleitet. Das System wird dabei modular aufgebaut. Dabei sind viele Komponenten universell einsetzbar, so daß in Kombination mit speziellen Teilkomponenten je nach Meßgröße beliebig unterschiedliche Analysensysteme zusammengesetzt werden können. Die Hauptelemente, die auf einem Siliziumträger integriert werden, sind Probeneinlaß, Probenaufbereitung, Analysenmodule, Fluidkanäle und Module zur Systemsteuerung und Meßdatenverarbeitung. Ähnliche Entwicklungsvorhaben (ELMAS) laufen am Forschungszentrum Karlsruhe (115).

### 5.2.2 Weitere Sonderverfahren

Als weitere neue Verfahren werden über die **RADAR-Technologie** (wird durch die Firma Atlas Elektronik in Bremen erprobt) und die Messung eines Neutronenflusses im Boden berichtet (116) (117). Der Nachweis von Perchlorethylen in sandigen Aquiferen mit Hilfe geophysikalischer Methoden werden von Schneider und Greenhouse beschrieben (118).

## 5.3 Sensoren zur Bestimmung organischer Schadstoffe

### 5.3.1 Photothermische Spektroskopie

Diese Analysengeräte sind durch den Verbund von Lichtleitern und optischen Weichen/Kopplern in der Lage, eine große Anzahl von Meßstellen gleichzeitig zu überwachen. Ausgestattet mit fein abstimmbaren Anregungslasern, Lichtleitern und photothermischen Sonden, die den gesamten Spektralbereich von UV bis IR abdecken, arbeiten diese Meßsysteme nach dem Prinzip der Absorptionsspektroskopie. Durch die Absorption von Lichtquanten wird die innere Energie eines Moleküls erhöht. Dies führt in der näheren Umgebung zu einer graduellen Änderung des Brechungsindex des Lichtwellenleiters (LWL). Als Meßmethoden stehen zur Verfügung die Lichtintensitätsmessung im Vergleich zu einem nichtsensitiven LWL und ortsempfindliche Photodetektoren (119).

### 5.3.2 Integriert-optische Interferometer

Solch ein Interferometer besteht aus einem Strahlteiler, einer festen Referenz- und einer variablen Meßstrecke.

Nachteilig ist, daß durch die Integration die Lichtwege genau festgelegt sind. Eine Phasenverschiebung von Meß- und Referenzstrahl kann deshalb bei einem integriert-optischen Interferometer nur durch Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im sensitiven LWL erfolgen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird wesentlich beeinflusst durch den graduellen Brechungsindex an der Kern-Mantel-Oberfläche. Ein Gangunterschied zwischen beiden Teilstrahlen im Interferometer läßt sich dadurch erzeugen, daß man die Referenzstrecke mit einer polymeren Schutzschicht abdeckt und die Meßstrecke mit dem zu analysierenden Medium in Kontakt bringt.

Der Sensor reagiert mit den Substanzen in einer oberflächennahen Schicht der Meßstrecke und erzeugt je nachdem, welches Polymer verwendet wird und welcher Stoff eindiffundieren kann, eine spezifische Änderung des Brechungsindex. Dieser bewirkt wiederum eine Phasenverschiebung am Ausgang, welche ausgewertet werden kann.

### 5.3.3 PAK-Bestimmung

Im Bereich der **PAK-Bestimmung** gibt es als Neuentwicklungen die laserspektroskopischen bzw. faseroptischen Verfahren (LaserLab Berlin-Adlershof, siehe Anhang A.2). Es handelt sich dabei um eine Sonde, die über Fluoreszenzmessungen die PAK-Konzentrationen in Wasser und im Bereich der Bodenluft messen kann.

Durch Laserlicht werden PAK-Moleküle angeregt und geben ihre Energie als charakteristische Fluoreszenzstrahlung ab. Diese Fluoreszenzstrahlung wird gemessen. Mit dieser Methode können nur fluoreszenzfähige Moleküle wie PAK analysiert werden.

Der TÜV Rheinland hat ein PAK-Schnelltestverfahren entwickelt, das eine Einstufung der PAK-Belastung während Sanierungsarbeiten durch Vergleichsstandards ermöglicht. Das Verfahren ist schnell und hinreichend zuverlässig.

### 5.3.4 Oberflächenionisation als Detektionsprinzip

Zur schnellen und kostengünstigen Erkennung von **stickstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen** im Bodengas wird die Anwendung der **Oberflächenionisation** untersucht. Es wird hierbei versucht, den thermoionischen Detektor und den Flammenionisationsdetektor durch eine flammenlose Variante, einen heißen Platindraht als Positiv-Ionen-Emitter, zu ersetzen. Die organischen Moleküle kommen kurzfristig mit dem ca. 800°C heißen Platindraht in Kontakt, werden fragmentiert und bilden durch Thermoionisation positive Gasionencluster. Diese werden an einer entsprechend gestalteten Kathode abgesaugt und mittels eines Elektronenverstärkers registriert (120).

Bisher ist noch kein kommerziell erhältliches Gerät bekannt.

### 5.3.5 Remote-Sensing-Techniken

In (121) (122) wird über den Versuch berichtet, eine Gas- bzw. Aerosolcharakterisierung von einer räumlich entfernten Warte aus zu betreiben. Im wesentlichen stehen dafür folgende Prinzipien zur Verfügung:

- (DIAL) Differential Absorption LIDAR
- (DISC) Differential Scattered LIDAR
- Raman-LIDAR
- Fluoreszenz LIDAR

*(LIDAR = Light Detection and Ranging)*

Die Techniken erfordern einen hohen technischen Aufwand. Auch sind die gegenwärtig erzielbaren Nachweisgrenzen zu hoch. Andererseits dürften die zunehmende Kompaktierung der Laser und der Auswertungs elektronik den Platzbedarf und auch die Kosten reduzieren.

### 5.3.6 Labormuster und Prototypen

In Tabelle 7 sind aussichtsreiche neue Entwicklungen, die noch nicht kommerziell verfügbar sind, vorgestellt. Geschätzter Systempreis sind unverbindliche Einschätzungen der jeweiligen Entwickler bzw. der FhG-ISI für serienweise Meßsysteme.

Die Meßprinzipien einiger der in Tabelle 7 vorgestellten Prototypen sollen im folgenden kurz erläutert werden.

**Tabelle 7: Übersicht von Labortypen zur Vor-Ort-Analytik von VOC**

Meßsystem	Entwickler	Parameter	Preis (DM)
Reflexionsspektrometer	FhG-IPM	CKW, KW, BTX	ca. 75000,-
EFAS	FZK	CH-, NH-, OH-	ca. 50000,-
IR-EFAS	FZK/FhG-ICT	VOC	ca. 50000,-
SAW-Quarz-Array	FZK	VOC	ca. 10000,-
Quarz-Array	Uni Tübingen	Aromaten, FCKW, CKW, KW	ca. 15000,-
IMAS (Mikrolabor)	FhG u.a.	viele Gase	n.b.
Mikrolabor	FZK u.a.	viele Gase	n.b.
Optochemische Spektroskopie	Uni Tübingen sowie FhG	Einzelstoffe	ca. 15000,-

#### **EFAS, Evanescent Field Absorbance Sensor** (Forschungszentrum Karlsruhe FZK)

Der faseroptische Sensor EFAS basiert auf der Anreicherung unpolarer organischer Stoffe (CKW, Aromaten) aus wäßriger Lösung im Siliconfasermantel eines aufgespulten Quarzglaslichtleiters und der direkten (Nahinfrarot-)Absorptionsmessung der extrahierten Spezies mit Hilfe des Prinzips des evaneszenten Feldes. Er eignet sich vor allem zum Nachweis von CH-, NH- und OH-Bindungen.

#### **SAW-Quarz-Array, Surface Acoustic Wave** (Forschungszentrum Karlsruhe)

Dieser massensensitive Chemosensor ist auf der Basis von SAW-Bauelementen aufgebaut, die in Arrayanordnung konfiguriert sind. Das Meßsystem umfaßt noch neben den eigentlichen Sensoren die notwendigen Aktoren (Pumpe, Ventile) zur Beschickung der Sensoren mit dem Meßgas, Meßwerterfassung und -auswertung, sowie Anzeigeinstrumente.

Das Meßsystem spricht innerhalb ca. 1 bis 3 Minuten an und erlaubt einen Nachweis bis in den ppb-Bereich. Die für die Meßdatenauswertung notwendige Mustererkennung wird mit Hilfe von neuronalen Netzen durchgeführt und erlaubt auch Multikomponentenanalysen. Das Meßgerät wurde mit verschiedenen organischen Gasen und Gasgemischen getestet und eignet sich neben der Prozeß- und Emissionsüberwachung auch zur Arbeitsplatzüberwachung.

#### **IR-EFAS** (Forschungszentrum Karlsruhe FhG-ICT)

Vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, Karlsruhe Pfinztal, wurde ein spektroskopisches Auswertungssystem, das extremen Anforderungen bezüglich der benötigten Meß- und Auswertungszeit gerecht wird, entwickelt. Das IR-EFAS versteht sich als Entwicklungsvorschlag zur Ankopplung des Glasfasersensors EFAS an derartige Systeme

## Reflexionsspektrometer (FhG-IPM)

Diese Methode beruht auf dem physikalischen Meßeffect, daß durch die Eindiffusion von Fremdmolekülen eine refraktive Änderung verursacht wird (Brechungsindex als Funktion der eingelagerten Gase). Der Sensor basiert auf einem dynamischen Reflexionsverfahren, bei dem die Winkelposition einer charakteristischen Dunkellinie verfolgt wird. Die Position der Linie ist dabei abhängig vom Brechungsindex des Dünnsfilms. Für den summarischen Nachweis von BTX-Derivaten und polyhalogenierten Kohlenwasserstoffen eignen sich vor allem bestimmte Fluorpolymere als Dünnsfilmmaterial (123).

## 5.4 Ionenmobilitätsspektrometer (IMS)

Beim **Ionenmobilitätsspektrometer** werden H<sub>2</sub>O-Moleküle in einer Ionisationskammer durch Elektronenbeschuß (z.B. aus einer Ni<sup>63</sup>-Folie), UV-Strahlung oder Laserimpulse ionisiert. Diese Ionen reagieren mit organischen Molekülen und bilden Produkt-Ionen, die durch eine Ionengatterelektrode in die Driftkammer gelangen. Dort werden die geladenen Teilchen in einem Hochspannungsfeld beschleunigt und driften entgegen einem Driftgas (z.B. Stickstoff oder Argon) zur Detektorelektrode.

Die Driftgeschwindigkeit ist abhängig von der Molekülgröße und der sterischen Konfiguration des Moleküls. Daraus ergeben sich Laufzeitunterschiede, aus denen auf Art und Konzentration von organischen Verbindungen geschlossen werden kann.

Im Gegensatz zum Massenspektrometer arbeitet das Gerät unter Normaldruck und eignet sich deshalb besonders gut für eine feldfähige Ausführung.

In den letzten zehn Jahren sind, vom militärischen Bedarf nach einfachen Detektionssystemen angetrieben, eine Reihe von Ionenmobilitätsspektrometern entwickelt worden. Bendix, Honeywell, Graceby, Environmental und Bruker Saxonia sind Unternehmen, die speziell für die sehr nachweisstarke Kampfstoffdetektion, IMS mit Beta-Ionisierung durch eine radioaktive Ni-Folie entwickelt haben. Diese Systeme sind klein und handlich, lassen sich im Bereich der Umweltprobleme aber nur in einem sehr engen Spezialbereich der Rüstungsaltslasten einsetzen. Auch nach Aussagen des einzigen deutschen Vertreibers des Graceby IMS, Airmotec, ist der Einsatz dieses Gerätes im Arbeitsschutz in Bereichen, in denen Isocyanate auftreten, sinnvoll, in der Altslastenproblematik jedoch nicht.

Seit Frühjahr 1993 sind erste Prototypen von IMS mit Photoionisation auf dem Markt. Ein PI-IMS der Firma Bruker-Saxonia, Leipzig, arbeitet mit derselben UV-Quelle wie die meisten Photoionisations-Detektoren. In diesem Handgerät sind die mit Energien bis zu 10.2 eV ionisierbaren Stoffe, z.B. die Gruppe BTX, prinzipiell im ppm-Bereich innerhalb von einigen Sekunden analysierbar.

Im Gegensatz zum herkömmlichen PID, der ein nicht spezifizierbares Summensignal liefert, ist es mit dem PI-IMS möglich, z.B. Benzol von Toluol oder Xylol zu unterscheiden. Laboruntersuchungen lassen erkennen, daß diese Technik zum Screening von Kohlenwasserstoffen und Aromaten im Bereich der Arbeitsplatzüberwachung oder bei Altslasten geeignet scheint.

Das PI-IMS kann mit Batterie betrieben werden. Die Ionenmobilitätsspektren werden entweder intern ausgewertet oder auf einem Laptop dargestellt.

## 5.5 Kapillarelektrophorese

Eine interessante Neuentwicklung könnte die **Kapillarelektrophorese** darstellen. Mit dieser Technik können sowohl Anionen als auch Kationen bestimmt werden (allerdings nicht gleichzeitig). Die Kapillarelektrophorese ist ein Analysenverfahren, das die Möglichkeiten der Methoden der Elektrophorese und die Effizienz der GC bzw. HPLC kombiniert. Organische oder anorganische Substanzmengen werden durch unterschiedliche elektrophoretische Migrationsgeschwindigkeiten, welche durch die Wahl der experimentellen Parameter (pH-Wert, Ionenstärke des Puffers, Temperatur, angelegte Spannung) einstellbar ist, fraktioniert. Die Detektion erfolgt mit Hilfe von UV- oder Fluoreszenzspektroskopie (124) (125) (126) (127).

Abbildung 7 zeigt schematisch das Arbeitsprinzip der Kapillarelektrophorese. Eine mit Puffer gefüllte unbeschichtete Quarzglas Kapillare befindet sich zwischen zwei Pufferreservoirien. Die Probe wird elektrokinetisch oder durch Druckänderungen an einem Ende der Kapillare eingeführt. Durch Ionisierung bildet sich eine solvatisierte kationische Doppelschicht, die sich nach Anlegen einer beliebigen Spannung zur Kathode bewegt und in der Kapillare einen Fluß ergibt.

Eine Trennung der geladenen Substanzen in der Probe erfolgt mit Hilfe der Kombination des durch die angelegte Spannung erzeugten elektroosmotischen Flusses und der Fraktionierung der Substanzen aufgrund ihres Ladung/Masse-Verhältnisses.

Als Vorteile sind eine kostengünstige, empfindliche, exakte, einfache und schnelle Analytik zu sehen. Man benötigt jedoch eine Probenvorbereitung, da nur flüssige Proben gemessen werden können. Weitere Vorteile dieser Methode liegen im geringen Verbrauch an Chemikalien, der kurzen Analysendauer, den geringen laufenden Kosten, der Robustheit der Geräte und an den erstaunlich niedrigen Nachweisgrenzen (siehe Anhang A.1 ).

Die Nachteile liegen in den noch weitgehend unausgereiften Applikationen. So scheint es bislang noch keinem Anbieter gelungen zu sein, eine saure Aufschlußlösung direkt zu messen. In der nächsten Zeit ist auf diesem Gebiet, etwa durch geeignete Komplexbildner, sicherlich mit Neuentwicklungen zu rechnen.

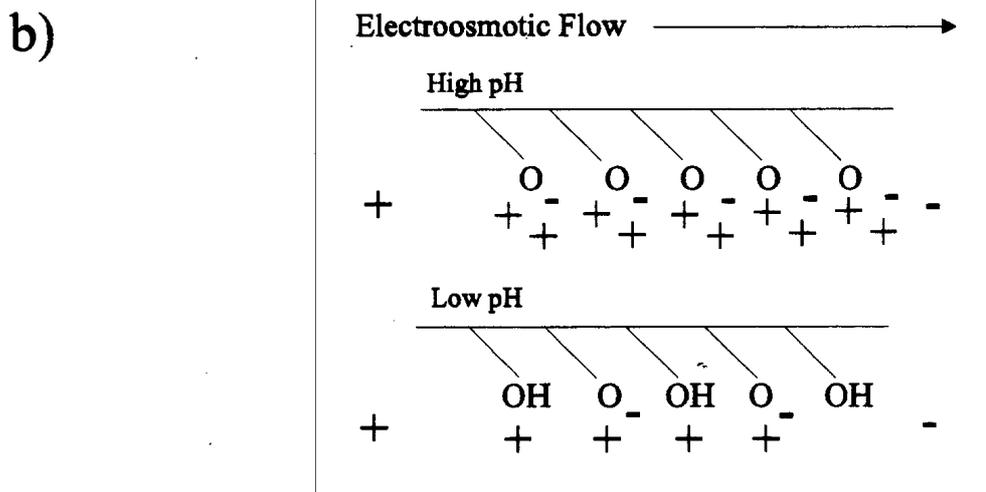
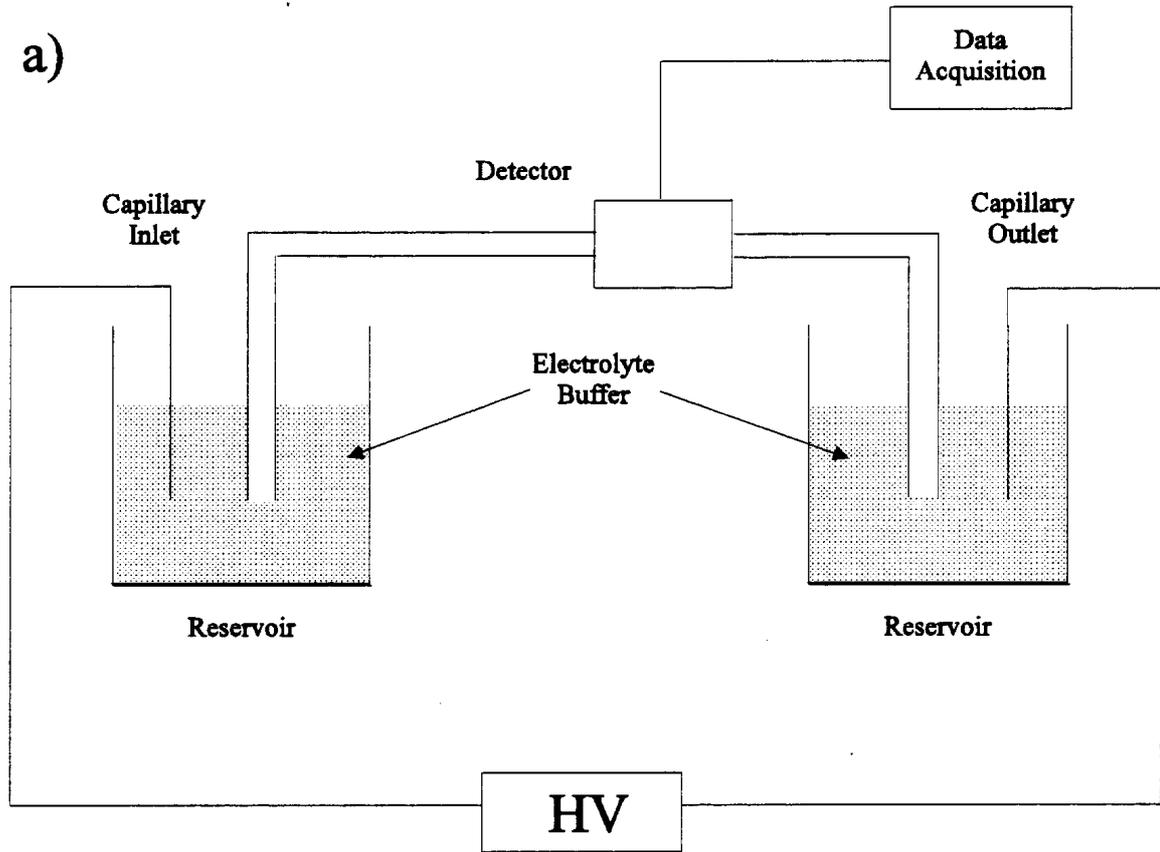


Abb. 7: a) Skizze der Kapillarelektrophorese, b) Elektroosmotischer Fluß

## 5.6 Biologische Verfahren

Folgende marktreife neue Entwicklungen werden erwähnt (Stand 1993):

### **Molecular-Devices**

**Threshold Immuno-Ligand Assay-System** (Enzymgelabelte Antikörper, pH-Veränderung durch enzymatische Reaktion wird gemessen); mit diesem Verfahren können beliebige Assays hergestellt werden, sobald ein entsprechender Antikörper vorliegt.

**Cytosensor Microphysiometer** (Messung der Stoffwechselaktivität von Zellkulturen über pH-Veränderung)

### **Ohmicron**

**SmartSense** (Enzymgelabelte Antikörper, pH-Veränderung wird durch enzymatische Reaktion gemessen; Atrazinbestimmung in Wasser- und Bodenproben)

## 6. Kosten- und Effektivitätsermittlung

In die **Kosten- bzw. Effektivitätsermittlung** fließen neben den Anschaffungskosten der Geräte, die Betriebskosten (Hilfsmaterialien z.B. Kalibriergase, Ersatzteile, z.B. Sensoren, Verbrauchsmaterialien, z.B. Prüfröhrchen und technische Verbrauchsmaterialien, wie Batterien) und die Personalkosten mit ein. Eine Beispielrechnung einer Kostenabschätzung für die Feldanalytik mit einem GC-MS System wird von Schröder et al. in (109) durchgeführt. Die Anschaffungskosten der jeweiligen Analysengeräte sind der Geräteliste im Anhang A.1 zu entnehmen.

Je nach Häufigkeit der Messungen ergeben sich finanzielle Vor- oder Nachteile der einzelnen Verfahren, die gegen die technologischen Vor bzw. Nachteile abzuwägen sind.

Im Bereich der Personalkosten ergeben sich drei Kostenniveaus

- Hilfskräfte bzw. angelerntes Personal
- technisches Personal
- wissenschaftliches Personal

Für die Auswertung der Meßdaten muß geeignete Software und eine entsprechend leistungsfähige Hardwarekomponente zur Verfügung stehen. Die Preise für die Rechnersysteme sind oftmals nur zum Teil in den Gerätekosten enthalten.

Hinsichtlich der Gerätetypen bzw. der Meßmethoden zeigte sich, daß es wenig sinnvoll sein dürfte, direkte Vergleiche zwischen Geräten bzw. Methoden innerhalb der großen Spannweite an Kosten und Qualität der Ergebnisse anzustellen, d.h. bei Kosten- und Effektivitätsvergleichen müssen an alle Geräte die gleichen Maßstäben angelegt werden.

Sinnvoller scheint es, die Methoden in Kategorien einzuteilen und solche Vergleiche nur innerhalb dieser Kategorien durchzuführen. Diese Einteilung sollte sich an der gewünschten Güte der Ergebnisse orientieren und könnte im wesentlichen in die drei folgenden Punkte unterteilt werden. Abbildung 8 zeigt schematisch diese Einteilung.

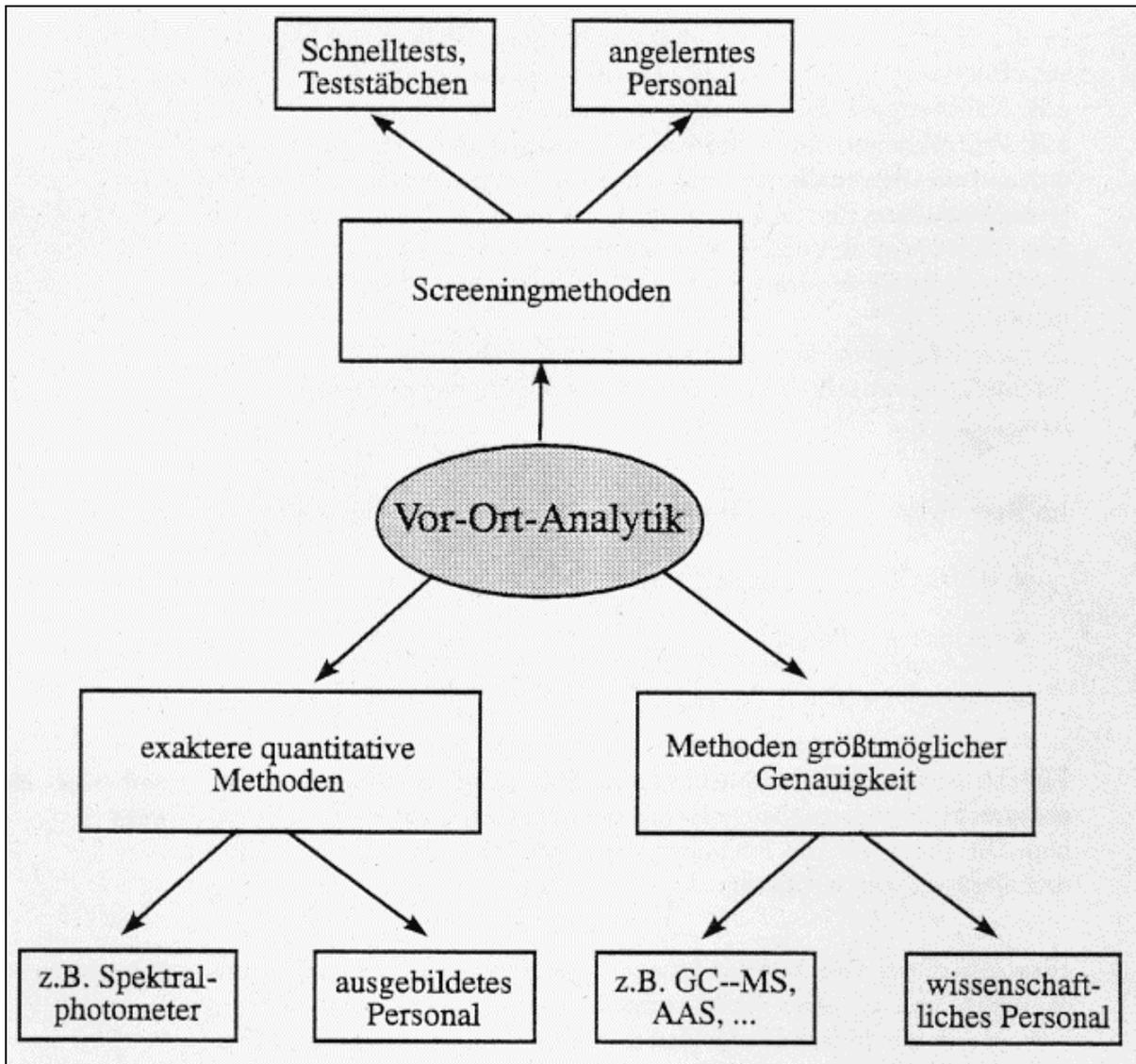


Abb. 8: Einteilung der Analysensysteme in drei Kategorien

### Methoden zur Durchführung eines Screenings

In diese Kategorie gehören einfachste Analysenverfahren wie Schnelltests, Teströhrchen und Teststäbchen. Diese zeichnen sich durch eine kurze Analysendauer (einige Sekunden bis wenige Minuten) aus und sind sehr kostengünstig (< 1,- DM pro Analyse). Die Qualität der Ergebnisse beschränkt sich auf qualitative bis halbquantitative Aussagen.

Als Geräteausstattung stehen preisgünstige Filterphotometer (mit Fertig-Schnelltests) zur Verfügung, wie sie von einer Reihe von Firmen angeboten werden und in der Prozeßkontrolle sehr verbreitet sind (z.B. zur Überwachung von Kläranlagen). Sie können auch von angeleertem Personal betrieben werden.

Mit dieser Ausstattung läßt sich ein erstes Screening durchführen, wobei die Art und die etwaige Zusammensetzung der Proben ermittelt werden kann. Durch diese Voruntersuchungen erhält man Anhaltspunkte für eine gezielte Analytik mit aufwendigeren Analysenverfahren, wodurch Fehluntersuchungen minimiert werden können, was wiederum einen Kosten- und Geschwindigkeitsvorteil mit sich bringt.

### **Methoden mit exakterer quantitativer Aussage**

In diese Kategorie gehören z.B. Spektralphotometer, einfache Destillationsapparaturen (z.B. im Bereich der Cyanid-Analytik) und einfache Geräte zur Reduktion (z.B. Quecksilber-Analytik).

Die Geräte dieser Kategorie erlauben eine Aussage über die Qualität der Analyse, da in bestimmtem Rahmen die Möglichkeit gegeben ist, Störungen zu erkennen.

Ferner ist die Dokumentation der Ergebnisse verbessert. Allerdings steigt hier auch die Anforderung an das Personal.

### **Methoden mit größtmöglicher Genauigkeit**

Diese Ausstattung ermittelt Ergebnisse mit höchster Qualität. Ferner ist die Automation der Analytik erhöht und die Dokumentation der Ergebnisse verbessert.

Zu dieser Gerätekategorie zählen im Bereich der Metallanalytik z.B. Röntgenfluoreszenzgeräte und kleinere AAS-Geräte, im Bereich der Cyanidanalytik sind automatische Analysensysteme vorgesehen oder universell einsetzbare Geräte wie Ionenchromatographen, Kapillarelektrophoresegeräte oder Autoanalyser. Für die Quecksilberanalytik kommen spezielle Quecksilberbestimmungssysteme (Kaltdampftechnik, Amalgambildung) in Frage.

Unter den ICP-Geräten, die ebenfalls als Beispiel dieser Geräteklasse zu nennen sind, ist soweit bekannt, nur das Modell der Firma Leeman (siehe Kap. A.1) schon mobil im Einsatz (allerdings nur in den USA). Aber auch die Geräte der Firmen Instruments SA, Spectro und GBC (Berghof Maasen) sind laut Angaben der Vertreiber für den mobilen Einsatz geeignet.

Alternativ zu den ICP-Spektrometern kommt das RFA-Gerät der Firma Atomika (Modell: EXTRA IIA) in Frage (siehe Kap. A.1).

Es ist in allen Fällen ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit der Ergebnisse gegeben. Diese Kategorie ermöglicht auch im Bereich der Grenzwerte eine exakte Bestimmung der einzelnen Parameter.

Es werden große Anforderungen an die Ausstattung des mobilen Labors gestellt. Auch die Anforderungen an das Personal sind erheblich. Ferner entstehen erheblich höhere Kosten für Einzelanalysen als in den zuvor genannten Kategorien.

Um eine sinnvolle Kosten- und Effektivitätsermittlung durchzuführen, muß eine konkrete Problematik detailliert betrachtet werden. Hadka gibt z.B. für einen realistischen Fall an, daß selbst die qualitativ hochstehenden GC-MS-Analysen im Feld um den Faktor 5 kostengünstiger sein können als vergleichbare Laboranalysen (128) Voraussetzung dafür ist unter anderem, daß neue Analysenverfahren zu höherem Probendurchsatz führen oder die Kosten für die Probenlogistik entfallen (129).

Drastisch kann sich der Preisvorteil der Vor-Ort-Analytik auswirken, wenn kontaminierter Bodenaushub nach Auskofferung entsorgt werden muß, und die Bodenmenge lediglich durch Laboranalytik festgelegt wurde. Reichert berichtet von einem Beispiel, bei dem 20 % zuviel Material entsorgt wurde, das bei Vor-Ort-Analytik nicht entstanden wäre (130).

Eine konkrete Kostenabschätzung beim Einsatz verschiedener Analysengeräte wird im Rahmen der erwähnten Feldtestversuche (siehe Kapitel 2.1) durchgeführt. Die Ergebnisberichte für die Feldtests in Sinsheim und in Rastatt sind derzeit in Bearbeitung (131) (132).

## 7 Literatur

- (1) W. Rasemann. Brauchen wir eine Probennahmeforschung für die Abfall- und Entsorgungswirtschaft? Müll und Abfall, 6:460-469,1993.
- (2) Universität Stuttgart. Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft; Endbericht zum Projekt: Studie über Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik, Teilprojekt 1: Metalle und Cyanide. unveröffentlicht, 1993.
- (3) Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Endbericht zum Projekt: Studie über Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik, Teilprojekt 2: Leichtflüchtige organische Schadstoffe und Gase. unveröffentlicht, 1994.
- (4) Technische Universität Hamburg-Harburg. Mobilab Umweltanalytik GmbH; Endbericht zum Projekt: Studie über Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik, Teilprojekt 3: Gaschromatographische Bestimmung und Ionenmobilitätsspektroskopie von organischen Schadstoffen. unveröffentlicht, 1993.
- (5) Technische Universität München. Lehrstuhl für Hydrogeologie, Hydrochemie und Umweltanalytik; Endbericht zum Projekt: Studie über Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik, Teilprojekt 4: Sensoren zur Bestimmung organischer Schadstoffe. unveröffentlicht, 1993.
- (6) Gesellschaft für Biotechnologische Forschung Braunschweig. Endbericht zum Projekt: Studie über Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik, Teilprojekt 5: Mit biologischen Verfahren nachweisbare Schadstoffe. unveröffentlicht, 1993.
- (7) Arge-Ing. Röver & Partner/TAU Umwelt und Technologie GmbH. Endbericht zum Projekt: Studie über Anwendungsmöglichkeiten der Vor-Ort-Analytik mit Sensortechnik für den Standort Sondermülldeponie Malsch, Teilprojekt 6: Grund- und Sickerwassermonitoring. unveröffentlicht, 1994.
- (8) G. Brands. Theorie der Probennahme. Fres. Z. Anal. Chem., 314:6-12, 1983.
- (9) V. Liebich, G. Ehrlich, H. Siegert, W. Kluge. Characterization of the Chemical Homogeneity of Solid-State Materials by Chemometric Methods. Multivariate Aspects and General Recommendations. Fres. J. Anal. Chem., 343:251-258, 1992.
- (10) G.W. Bryden, L.R. Smith. Sampling for Environmental Analysis. Am. Lab. July 1989, pages 30-39, 1989.
- (11) J. Rudolph, K.P. Müller, R. Koppmann. Sampling of Organic Volatiles in the Atmosphere at Moderate and Low Pollution Levels. Analytica Chimica Acta, 236:197-211,1990.
- (12) J.M. Andino, J.W. Butler. A Study of the Stability of Methanol-Fueled Vehicle Emissions in Tedlar Bags. Environmental Science and Technology, 25:1644-1646, 1991.
- (13) P.V. Doskey. The Effect of Treating Air Samples with Magnesium Perchlorate for Water Removal During Analysis for Non-Methane Hydrocarbons. J. of High. Resol. Chromat., 14:724-728, 1991.
- (14) X.L. Cao, C.N. Hewitt. Trapping Efficiencies of Capillary Cold Traps for C<sub>2</sub>-C<sub>10</sub> Hydrocarbons. J. Chromat., 627:219-226,1992.

- (15) K. Figge, A.M. Dommröse, W. Rabel, W. Zerbau. Sammel- und Analysensystem zur Bestimmung organischer Spurenstoffe in der Atmosphäre. *Fres. Z. Anal. Chem.*, 327:279-292, 1987.
- (16) K. Figge, W. Rabel, A. Wiek. Adsorptionsmittel zur Anreicherung von organischen Luftinhaltsstoffen. *Fres. Z. Anal. Chem.*, 327:261-278, 1987.
- (17) K. Hunchak, I.H. Suffet. Analysis of Acetone-Hexane Artifacts Produced in the Soxhlet Extraction of Solid Environmental Samples. *J. Chromat.*, 392:185-198, 1987.
- (18) J.C. Chuang, S.W. Hannan, N.K. Wilson. Field Comparison of Polyurethan Foam and XAD-2 Resin for Air Sampling for Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. *Environmental Science and Technology*, 21:789-804, 1987.
- (19) R.J. Vreeken, W.M.A. Niesen, J. Van Thuijl. Identification of Artefacts in the Desorption of Active Charcoal Tubes with Carbon Disulfide and Methanol. Reduction of Artefact Formation by Selecting Other Polar Additives. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 33:23-33, 1988.
- (20) K. Grob, A. Artho, C. Frauenfelder, I. Roth. Charcoal Open Tubular Traps for the Analysis of Air and Headspace Samples. *J. High Resol. Chromat.*, 13:257-260, 1990.
- (21) R.H. Brown, C.J. Purnell. Collection and Analysis of Trace Organic Vapour Pollutants in Ambient Atmospheres, the Performance of a Tenax-GC Adsorbent Tube. *J. Chromat.*, 178:79-90, 1979.
- (22) R. Imhof, J.O. Bosset. Comparison of Two Systems for Sample Preparation and Injection by Dynamic Headspace GC Analysis. *J. High Resol. Chromat.*, 14:621-625, 1991.
- (23) T. Vu-Duc, C.K. Huynh. Graphitized Carbon Black in Quartz Tubes for the Sampling of Indoor Air Nicotine and Analysis by Microwave Thermal Desorption-Capillary Gas Chromatography. *J. Chromat Science*, 29:179-183, 1991.
- (24) J. Namiesnik, T. Gorecki, M. Biziuk, L. Torres. Isolation and Preconcentration of Volatile Organic Compounds from Water. *Analytica Chimica Acta*, 237:1-60, 1990.
- (25) D. Gurka, S. Pyle, R. Titus. Environmental Analysis by Direct Aqueous Injection. *Analytical Chemistry*, 64:1749-1754, 1992.
- (26) B. Ioffe, A. Vitenberg. *Headspace Analysis and Related Methods in Gas Chromatography*. J. Wiley & Sons, New York, 1984.
- (27) H. Hachenberg. *Die Headspace Gaschromatographie als Analysen- und Meßmethode*. DANI Analysentechnik, Mainz, 1991.
- (28) L. Kaelin, K. Crandall, T. Pritchett. Analytical Protocols for Portable Gas Chromatographs as used by the U.S.E.P.A. Environmental Response Team. American Chemical Society 198th National Meeting, Miami Beach Florida, USA, 1989.
- (29) Compendium of ERT Field Analytical Procedures. PB92-963405, U.S. EPA, . Office of Emergency and Remedial Response Washington DC 20460, 1992.
- (30) J. Rossabi, B. Eckenrode, B. Owens. Onsite Well Screening with a Transportable Gas Chromatograph /Mass Spectrometer System. Report No. DE-AC09-89SR18035, US Department of Energy, 1992.
- (31) R. Wynnyk, L. Kaelin, G. Powell. Field Screening of Water and Soil Samples from a Chemical Train Derailment using Portable Gas Chromatographs. *Proceedings International Symposium on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe*, Budapest, Hungary, page 232, 1992.

- (32) L. Kaelin, R. Wynnyk, D. Mickunas, A. Humphrey, T. Pritchett. On-Site Analysis of Volatile Organic Compounds Via Field Portable Gas Chromatographs. 9th World Clean Air Conference, AWMA/IUPPA, Montreal, Canada, 1992.
- (33) X. Yan, K. Carney, E. Overton. Application of Purge-and-Trap Method to Fast and Convenient Field Analysis of Water and Soil Samples. *Journal of Chromatographic Science*, 30:491-496, 1992.
- (34) G. Matz, W. Schröder, P. Kesners. Vor-Ort Analytik zur Erkundung von Rüstungsaltslasten mit mobilen Gaschromatographie/Massenspektrometer System. *Technik-Wirtschaft-Umweltschutz, Altslasten 3*, EF-Verlag, pages 331-340, 1989.
- (35) K. Grob. Organic Substances in Potable Water and in its Precursor Part I. Methods for their Determination by Gas Liquid Chromatography. *Journal of Chromatography*, 84:255-273, 1973.
- (36) K. Grob, F. Zuercher. Stripping of Trace Organic Substances from Water; Equipment and Procedures. *Journal of Chromatography*, 17:285-294, 1976.
- (37) G. Matz, P. Kesners. Spray & Trap Method for Water Analysis by Thermal Desorption Gas Chromatography/Mass Spectrometry in Field Applications. *Analytical Chemistry*, 65:2366-2371, 1993.
- (38) G. Baykut. Spray Extractor: A New Sampling Device for Gas Chromatographic/Mass Spectrometric Analysis of Volatile Organic Compounds in Aqueous Systems. *Review of Scientific Instruments*, 63:3196-3200, 1992.
- (39) K. Grob, K.Jr. Grob, G. Grob. Organic Substances in Potable Water and in its Precursor III. The Closed Loop Stripping Procedure Compared with Rapid Liquid Extraction. *Journal of Chromatography*, 106:200-315, 1975.
- (40) E. Stottmeister, P. Hendel, H. Hermenau. Bestimmung von Monocyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen im Wasser durch Mikroextraktion und Kapillargaschromatographie. *Chemosphere*, 17:801-808, 1988.
- (41) L. Weil, K.E. Quentin. Zur Analytik der Pestizide im Wasser III. Mitteilung: Extraktion der chlorierten Kohlenwasserstoffe aus dem Wasser. *Gas-Wasserfach/Wasser-Abtütuasser*, 112:184-185, 1971.
- (42) R. Bagnati, E. Benfenati, E. Davioli, R.I. Fanell. Screening of 21 Pesticides in Water by Single Extraction with C18 Silica Bonded Phase Columns and HRGC-MS. *Chemosphere*, 17:59-65, 1988.
- (43) C. Rostad, W. Pereira, S. Ratcliff. Bonded-Phase Extraction Column Isolation of Organic Compounds in Groundwater at a Hazardous Waste Site. *Analytical Chemistry*, 56:2856-2860, 1984.
- (44) B. Odernheimer. Massenspektrometrische Verfahren zum Spüren von organischen Schadstoffen. Dissertation, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, 1983.
- (45) C. Arthur, L. Killiam, S. Motlagh, M. Lim, D. Potter, J. Pawliszyn. Analysis of Substituted Benzene Compounds in Groundwater Using Solid-Phase Microextraction. *Environmental Science and Technology*, 26:979-983, 1992.
- (46) P.J. Fowlie, T.L. Bulman. Extraction of Anthracene and Benzo(a)pyrene from Soil. *Anal. Chem.*, 58:721-723, 1986.
- (47) U. Wahle, W. Kördel, W. Klein. Methodology for the Exposure Assessment of Soil for Organic Chemicals. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 39:121-128, 1990.

- (48) L. Q. Huang, J.J. Pignatello. Improved Extraction of Atrazine and Metolachlor in Field Soil Samples. *J.A.O.A.C.*, 73:443-446, 1990.
- (49) S. Blomberg, J. Roeraade. An Evaluation and Comparison of Microtechniques for Concentration of Volatile Components from Dilute Solutions. *Chromatographia*, 25:21-24, 1988.
- (50) DIN-Verfahren 38 409, Teil 18. Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H), Bestimmung von Kohlenwasserstoffen (H18). Normenausschuß Wasserwesen im Deutschen Institut für Normung e.V., 1981.
- (51) S. Schmidt. Standardisierung von Analysenverfahren im Wasserfach. *Korrespondenz Abwasser*, 36:1150-1158, 1989.
- (52) U.S. EPA. Field-Screening Methods. EPA/540/2/88/005, Washington, 1988.
- (53) J.N. Driscoll, E.S. Atwood. Application of Gas Chromatography with Photoionization and Electron Capture Detectors for Field-Screening of Semivolatiles in Soil and Water. *J. Chromat.*, 642:435-443, 1993.
- (54) F. Höfler. Überkritische Fluidextraktion (SFE) I. Laborpraxis, pages 350-356, 1992.
- (55) F. Höfler. Überkritische Fluidextraktion (SFE) II. Laborpraxis, pages 506-508, 1992.
- (56) J. Pawliszyn. Kinetic Model of Supercritical Fluid Extraction. *J. Chromat. Science*, 31:31-37, 1993.
- (57) M. Ashraf-Khorassani, L.T. Taylor. Nitrous Oxide versus Carbon Dioxide for Supercritical Fluid Extraction and Chromatography of Amines. *Anal. Chem.*, 62:1177-1180, 1990.
- (58) J.L. Snyder, R.L. Grob, M.E. McNally, T.S. Oostdayk. The Effect on Instrumental Parameters and Soil Matrix on the Recovery of Organochlorine and Organophosphate Pesticides from Soils Using Supercritical Fluid Extraction. *J. Chromat. Science*, 31:183-191, 1993.
- (59) S.B. Hawthorne, D.J. Miller, M.S. Krieger. Rapid and Quantitative Extraction and Analysis of Trace Organics Using Directly Coupled SFE-GC. *J. High Resol. Chromat.*, 12:714-720, 1989.
- (60) K. Wuchner, R.T. Ghijsen, U.A.T. Brinkmann, R. Grob, J. Mathieu. Extraction of Organophosphorous Pesticides from Soil by Off-Line Supercritical Fluid Extraction. *Analyst*, 118:11-16, 1993.
- (61) S. Mitra, N.K. Wilson. An Empirical Method to Predict Solubility in Supercritical Fluids. *J. Chromat. Science*, 29:305-309, 1991.
- (62) J.W. King, J.M. Snyder, S.L. Taylor, J.H. Johnson, L.D. Rowe. Translation and Optimization of Supercritical Fluid Extraction Methods to Commercial Instrumentation. *J. of Chromat. Science*, 31:1-5, 1993.
- (63) R.J. Maxwell, O.W. Parks, E.G. Piotrowski. Improved SFE Recovery of Trace Analytes from Liver Using an Integral Micrometering Valve - SPE Column Holder Assembly. *J. High Resol. Chromat.*, 15:807-811, 1992.
- (64) L.J. Vlulcahey, J.L. Hedrick, L.T. Taylor. Collection Efficiency of Various Solid Phase Traps for Off Line Supercritical Fluid Extraction. *Anal. Chem.*, 63:2225-2232, 1991.
- (65) M. Ashraf-Khorassani, R.K. Houck, J.M. Levy. Cryogenically Cooled Adsorbent Trap for Off-Line Supercritical Fluid Extraction. *J. Chromat. Science*, 30:361-366, 1992.
- (66) B. Wiezorek, A. Schiller, G. Baykut, K.P. Wanczek. An Infrared Pyrolyzer for Analysis of Solid Samples by Gas Chromatography/Mass Spectrometry. *Rev. Sci. Instrum.*, 63(12):5607-5612, 1992.

- (67) A.H. Lawrence, L. Elias. A Single-Stage GC Injector Apparatus for Thermal Desorption of Sorbent Tubes. *Am. Lab.*, 21:88-93, 1989.
- (68) G.P. Blanch, J. Tabera, M. Herraiz, G. Regelero. Preconcentration of Volatile Components of Foods: Optimizing of the Steam Distillation-Solvent Extraction at Normal Pressure. *J. Chromat.*, 628:261-268, 1993.
- (69) R. Bierl. Combined Trace Analysis of Volatile and Semivolatile Chlorinated Hydrocarbons in River Sediment. *Fres. Z. Anal. Chem.*, 330:438-439, 1988.
- (70) M.P. Coover, R.C. Sims, W. Donath. Extraction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Spiked Soil. *J.A.O.A.C.*, 69:430-432, 1987.
- (71) H.H. Cheng. Organic Residues in Soils: Mechanism of Retention and Extractability. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 39:165-171, 1990.
- (72) A.E. Smith. A Review of the Extraction of Herbicide Residues from Aged Saskatchewan and Field Soils. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 46:111-116, 1992.
- (73) F.M. Dunnivant, A.W. Elzerman. Determination of Polychlorinated Biphenyls in Sediments, Using Sonication Extraction and Capillary Column Gas Chromatography Electron Capture Detection with Internal Standard Galibration. *J.A.O.A.C.*, 71:551-556, 1988.
- (74) P.H. Chen, W.A. VanAusdale, W.S. Keeran, D.F. Roberts. GC-MS Identifikation of Artifacts Formed during Sample Preparation Usind U.S. EPA Methods 625 and 8270. *Chemosphere*, 26:1743-1749, 1993.
- (75) G.N. Brillis, P.J. Marsden. Comparative Evaluation of Soxhlet and Sonication Extraction in the Determination of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in Soil. *Chemosphere*, 21:91-98, 1990.
- (76) J.L. Snyder, R.L. Grob, M.E. McNally, T.S. Oostdayk. Comparison of Supercritical Fluid Extraction with Classical Sonication and Soxhlet Extractions for Selected Pesticides. *Anal. Chem.*, 64:331-351, 1991.
- (77) T. Zurmühl. Development of a Method for the Determination of Phtalate Esters in Sewage Sludge Including Chromatographic Separation from Polyaromatic Hydrocarbons. *Analyst*, 115:1171-1175, 1990.
- (78) Test Methods for Evaluation Solid Waste, 3rd.ed. EPA SW-846, Methods 3550. U.S. Government of Printing Office Washington D.C., 1990.
- (79) M.J. Charles, M.S. Simmons. Recovery Studies of Volatile Organics in Sediments Using Purge & Trap Methods. *Anal. Chem.*, 59:1217-1221, 1987.
- (80) B.L. Sawhney, J.J. Pignatello, S.M. Steinberg. Determination of 1,2-Dibrommethane (EDB) in Field Soils: Implications for Volatile Organic Compounds. *J. Environ. Qual.*, 17:149-152, 1988.
- (81) B. Kolb, L.S. Ettore. Theory and Practice of Multiple Headspace Extraction. *Chromatographia*, 32:505-513, 1991.
- (82) A.B. Crockett, M.S. DeHaan. Field Screening Procedures for Determining the Presence of Volatile Organic Compounds in Soil. Second International Symposium: -Field Screening Methods for Hazardous Wastes and Toxic Chemicals, Las Vegas, USA, pages 383-393, 1991.
- (83) T.E. Lewis, B.A. Deason, C.L. Gerlach. Performance Evaluation Materials for the Analysis of Volatile Organic Contaminants in Soil: A Preliminary Assessment. *J. Environ. Sci. Health*, 25:505-531, 1990.
- (84) Z. Zhang, J. Pawliszyn. Headspace Solid-Phase Microextraction. *Anal. Chem.*, 65:1843-1852, 1993.

- (85) B.A. Thomson, T. Sakuma, J. Fulford, D.A. Lane, N.M. Reid, J.B. French. Fast In Situ Measurement of PCB Levels in Ambient Air to  $\text{ng x m}^{-3}$  Levels Using a Mobile Atmospheric Pressure Chemical Ionization Mass Spectrometer System. *Adv. Mass Spectrom.*, 8:1422-1428, 1980.
- (86) L. Dunemann. Neue Mikrowellenunterstützte Aufschlußmethoden zur Spurenanalytik in biologischen Matrices. *GIT Fachzeitschrift für das Laboratorium*, 10:854-858, 1993.
- (87) K. Cammann, U. Lemke, A. Rohen, J. Sander, H. Wilken, B. Winter. Chemo- und Biosensoren - Grundlagen und Anwendungen. *Angew. Chemie*, 103:519-541, 1991.
- (88) R. Grabowski. Sensoren und Aktoren: Schlüsselkomponenten der Mikroelektronik im Umweltschutz. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1991.
- (89) H.F. Grabnitzki. Sensordefinition. *Sensor Report*, 1:5, 1990.
- (90) W. Goepel et al. Chemische Sensoren. *Spektrum der Wissenschaft*, 1:97-105, 1994.
- (91) S.M. Barnard, D.R. Walt. Fiber-Optic Organic Vapour Sensor. *Environmental Science and Technology*, 25(7):1301-1304, 1991.
- (92) T.J. McAvoy. Combining Signals from Multiple Sensors to Solve Engineering Problems. Vortrag auf der Tagung -Fourth International Conference On-Site Analysis-; Florida, 1996.
- (93) R.A. Jenkins, M.P. Maskarinec, W.H. Griest, F.H. Dyer, R.L. Moody, M.V. Buchanan. Technology Assessment of field portable instrumentation for use at Rocky Mountain Arsenal: final report. Report, ORNL/TM-10542; Order No. DE88015557, 1988.
- (94) Sonderheft. Röntgenfluoreszenzanalyse. *Nachr. Chem. Tech. Lab.*, 37, 1989.
- (95) G. Matz, W. Schröder, J. Flachowsky. Vor-Ort Analytik verunreinigter Böden durch GC/MS- und EDXRS-Verfahren. TNO Kongreß, pages 651-659, 1993.
- (96) T.E. Ward, T.J. Logan, M.R. Midgett, R.K.M. Jayanta, W.F. Gutknecht. Field Validation of EPA Proposed Method 108 for Measurement of Inorganic Arsenic Emissions from Stationary Sources. *J. Air Pollution Control Assoc.*, 35:822-827, 1985.
- (97) H. Hirata. Automated Determination of Total Cyanide in Waters Using Cyanide Ion-selective Electrode. *Kankyo Gijutsu*, 12:687-690, 1983.
- (98) F. Oehme. Ionenselektive Elektroden. *Reihe ABC der Meß- und Analysetechnik*, Hüthig Verlag, 1986.
- (99) G.A. Raab, D. Cardenas, S.J. Simon, L.A. Eccles. Evaluation of a Prototype Field-portable X-ray Fluorescence System for Hazardous Waste Screening. Report, EPA/600/4-87/021, Order No. PB87 227633, 1987.
- (100) H.G. Struppe. Gaschromatographie. *Nachr. Chem. Tech. Lab.*, 43:23-36, 1995.
- (101) H.B. Kerfoot, E.N. Amick, S.L. Pierett, T.E. Lewis, D.W. Botrell. Field Evaluation of Portable Gas Chromatographs. U.S. EPA, Environmental Monitoring Systems Laboratory, EPA 600/X-89, 1989.
- (102) U.S. EPA. Office of Solid Waste and Emergency Response - The Superfund Innovative Technology Evaluation Program: Technology Profiles. Fifth Edition, EPA/540/R-92/077, 1992.
- (103) U.S. EPA. Office of Emergency and Remedial Response - Publication 9360.4-04. Compendium of ERT Field Analytical Procedures, 1992.
- (104) P. Sandra. Sample Introduction in Capillary Gas Chromatography I. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg Basel New York, 1985.

- (105) G. Gaspar. High-Speed Gas Chromatography, Theoretical and Practical Aspects. *J. Chromat.*, 556:331-351, 1991.
- (106) R. Tijssen, N. van den Hoed, M.E. van Kreveld. Theoretical Aspects and Practical Potentials of Rapid Gas Analysis and Capillary Gas Chromatography. *Anal. Chem.*, 59:1007-1015, 1987.
- (107) A. van Es. High Speed Narrow Bore Capillary Chromatography. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1992.
- (108) Z. Liu, J.B. Phillips. Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography Using an On-Column Thermal Modular Interface. *J. Chromat. Science*, 29:227-231, 1991.
- (109) W. Schröder, G. Matz. Feld-Analytik mit GC-MS. WLB, Wasser, Luft und Boden, 1-2:47-50, 1995.
- (110) B. Nölke, T. Zey, J. Franzen. On-Site Strategies for Mobile GC-MS Analysis. Vortrag auf der Tagung -Fourth International Conference On-Site Analysis-; Florida, 1996.
- (111) B. Bisa. Sinnvolle Ergänzung, Der Leuchtbakterientest als Methode zur Beurteilung der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden. *Entsorgung-Magazin*, 5:95-98, 1991.
- (112) H.-J. Scheibel, P. Harborth, E. Lang, H.H. Hanert. Einsatz des Leuchtbakterien und Daphnientests zur toxikologischen Bewertung von Grundwasser- und Bodenreinigung bei der Altlastensanierung. *Wasser-Abwasser*, 132:441-447, 1991.
- (113) R. Pudill. Biolumineszenz in der Umweltanalytik, Anwendung des Biolumineszenztests zur Toxizitätsabschätzung von Böden, Altlasten und Abfällen. *BioTec ANALYTIK*, 4:31-36, 1992.
- (114) G. Karsten. Anwendbarkeit des Biolumineszenz-Hemm- und des AMES-Mutagenitätstests zur Schadstoffabschätzung von mit Kohlenwasserstoff belasteten Böden. Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum, 1990.
- (115) W. Hoffmann, H. Eggert, W. Schomburg, D. Seidel. Elektrochemisches Mikroanalytensystem für die Ionometrie von Flüssigkeiten. 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik, pages 87-91, 1993.
- (116) G.R. Olhoeft. Geophysical Detection of Hydrocarbon and Organic Chemical Contamination; Symposium on the Application of Geophysics in Engineering and Environmental Problems. Proceedings SAGEEP-Conference, Chicago, pages 587-595, 1992.
- (117) J.D. Redmann. Geophysics and the Solvents-in-Groundwater Program; Symposium on the Application of Geophysics in Engineering and Environmental Problems. Proceedings SAGEEP-Conference, Chicago, pages 375-382, 1992.
- (118) G.W. Schneider, J.P. Greenhouse. Geophysical Detection of Perchloroethylene in a Sandy Aquifer Using Resistivity and Nuclear Logging Techniques; Symposium on the Application of Geophysics in Engineering and Environmental Problems. Proceedings SAGEEP-Conference, Chicago, pages 619-628, 1992.
- (119) D. Mund: Pflanzenschutzmittel im Laserlicht. *Chemische Industrie*, 10:20-22, 1993.
- (120) H. Arimoto, T. Fujii. Surface-Ionization Detector for Gas Chromatography; Characteristics and Applications to Organic Substances. *Anal. Sci.*, 7:415-422, 1991.
- (121) S. Babichenko, L. Poryvkina. Laser Remote Sensing of Natural Water Organics. *SPIE Proc. Series*, 1492:319-323, 1991.
- (122) W. Grant, R. Kagann, W. McClenny. Optical Remote Measurement of Toxic Gases. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 42:18-30, 1992.

- (123) G. Gauglitz et al. Optochemische Sensoren. Spektrum der Wissenschaft, 1:92-97, 1994.
- (124) Ph. Schmitt, A. Kettrup. Kapillarelektrophorese in der Umweltanalytik. GIT Fachzeitschrift für das Laboratorium, 12:1312-1318, 1994.
- (125) G. Schomburg, D. Belder, M. Gilges, M.H. Kleemiss, J.A. Lux, S.R. Motsch. Kapillar-Elektrophorese. Eine neue miniaturisierte Analysenmethode zur Trennung kleiner und großer Moleküle in wässrigen Systemen. GIT Spezial- Chromatographie, pages 7-17, 1993.
- (126) P. Jandik. Electrophoretic Capillary Ion Analysis: Origins, Principles and Applications. LC GC, 9:634, 1991.
- (127) W.R. Jones, P. Jandik. Various Approaches in Analysis of Difficult Sample Matrices of Anions Using Capillary Ion Electrophoresis. J. Chromatogr., 608:385-393, 1992.
- (128) M.C. Hadka, R.K. Dickinson. Rapid Screening of Organic Contaminants Using a Mobile Mass Spektrometer in the Field. U.S. Environ.. Prot. Agency, Res. Dev., (Rep.) EPA, 600/D-89/189, Field Screening Method Hazard. Waste Site Invest., pages 463-467, 1988.
- (129) C.P. Leibmann. Transportable GC/Ion Trapp Mass Spectrometry for Trace Field Analysis of Organic Compounds. Second International Symposium -Field Screening Methods for Hazardous Wastes and Toxic Chemicals, Las Vegas, USA, pages 339-349, 1991.
- (130) J.K. Reichert, J. Kanitz. Vor-Ort-Analytik bei kontaminierten Boden und Altlasten. Gewässer-Wasser-Abwasser, Wasser- und Bodenschutz-Anspruch und Wirklichkeit, Bericht der 25. Essener Tagung 1992; Hrsg.: Dohmann. M., Aachen, 1993.
- (131) Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Vergleichende Prüfung von Vor-Ort-Analytik-Geräten in Sinsheim am Modellvorhaben ehemalige Fa. Reinig. Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung; derzeit in Bearbeitung, 1996.
- (132) Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Vergleichende Prüfung von Vor-Ort-Analytik-Geräten in Rastatt. Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung; derzeit in Bearbeitung, 1996.

# A Anhang

## A.1 Geräteverzeichnis

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über kommerziell erhältliche Analysengeräte, die bei der Markterhebung der Teilprojektpartner (siehe Kapitel 2.2) gefunden wurden. Die Geräteliste entspricht dem Stand 1993 und erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Sie enthält außerdem Laborgeräte, die weder mobil noch tragbar sind.

### Spektralphotometer

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
GBC-911 A	GBC	div. Kationen und Anionen	14835,-
GBC-914	GBC		23890,-
Lambda 2	Perklin Elmer		23920,-
SPEKOL	Carl Zeiss Jena		21275,-
Specord M500	Carl Zeiss Jena		32400,-
Cary 1E	Varian		21900,-
Cary 3E	Varian		31900,-
AVIV 14	Sopra		92000,-
CADAS 100	Dr. Lange		23920,-
CADAS 50	Dr. Lange		15755,-
CADAS 30	Dr. Lange		11270,-
Nanocolor SM-1	Macherey Nagel		11000,-

### Filterphotometer

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
LASA Aqua	Dr. Lange	div. Kationen und Anionen	2070,-
Nanocolor 300 D/100	Macherey Nagel		2800,-
Nanocolor D/PT-3	Macherey Nagel		4950,-
PF-10	Macherey Nagel		1127,-
Spektroquant	Merck		3190,-
RQflex	Merck		795,-
DR/2000 Spektrometer	Struers		4290,-
DR/7000 Colorimeter	Struers		1928,-

**Polarographien**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
GAT-PDV 2000	GAT	div. Metalle Anionen/Kationen	31229,-
VA 693/VA 694	Metrohm		45994,-

**Ionenchromatographen**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
DX-100 (1 Kanal)	Dionex	div. Kationen und Anionen	29900,-
DX-100 (2 Kanal)	Dionex		35200,-
DX-300 (1 Kanal)	Dionex		29900,-
DX-300 (2 Kanal)	Dionex		35200,-
Biotronik IC 2000	Eppendorf		25000,-

**Kapillarelektrophorese**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Quanta 4000	Waters	div. Kationen und Anionen	59000,-

**Röntgenfluoreszenzanalysatoren (RFA)**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
200 T	Asoma Instruments	RFA-Elemente	65000,-
EXTRA IIA	Atomika		380000,-
SEA2010	C3-Analysentechnik		95000,-
X-MET 820	Outokumpu Electronics	Elemente Al-U	50000,-
X-MET 920	Outokumpu Electronics	Elemente Al-U	120000,-
XR 400	Oxford Instruments	RFA-Elemente	157495,-
Lab-X 3000	Oxford Instruments		59120,-
PW 2600	Philips	Elemente Al-U	
Spectro X-Lab	Spectro Analytical Instruments	Elemente F-U	216675,-
Spectrace 9000	Tracor Europa	Elemente S-U	129000,-
Spectrace 5000	Tracor Europa	Elemente Na-U	187000,-
Spectrace 6000	Tracor Europa		169000,-
SEFA-P	HNU-Systems	RFA-Elemente	90000
System 5000	HNU-Systems	RFA-Elemente	80000,-

**Atomabsorptionsspektrometer (AAS)**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
GBC-932	GBC	AAS-Elemente	27850,-
GBC-904 B	GBC		39700,-
AAS 4	Carl Zeiss Jena		100000,-
Grün SM30 Zeeman	Instruments SA		88360,-
AAS/AES 200-A	MLS Mikrowellen		21735,-
	Laborsysteme		
3110 AAS	Perkin Elmer		36000,-
AA-6501	Shimadzu		82000,-
SpectrAA-10 Plus	Varian		24000,-
SpectrAA-20 Plus	Varian		44000,-
SpectrAA-250 Plus	Varian		38500,-

**ICP Spektrometer (Inductive Coupled Plasma)**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Integra XM	GBC (Berhof Maasen)	ICP-Elemente	144000,-
Plasmaquant 110	Carl Zeiss Jena		230000,-
JP 46P	Intruments SA		179400,-
PS950	Leeman Labs		100000,-
PS3000	Leeman Labs		200000,-
SpectroFlame	Spectro Analytical		89500,-
	Instruments		135000,-
Liberty 100	Varian		
Liberty 200	Varian		158000,-

**ICP-OES-Spektrometer**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Optima 3000	Perkin Elmer	ICP-Elemente	120500,-
SpectroFlame Modula	Spectro Analytical Instruments		

**ICP-MS-Spektrometer**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Elan 5000	Perkin Elmer	ICP-Elemente	379000,-
ICP/MS(FIA/Mikrowelle)	CEM	ICP-Elemente	300000,-

**Ionenmeter**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
ORION pH/ISE-Meter 720A	Colora	pH, ISE, C, KF	2850,-
ORION pH/ISE-Meter 920A	Colora	pH, ISE, C, KF	4100,-
pMX 3000/Ion	WTW	pH, ISE	5722,-

**Quecksilberanalysatoren**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Mercury Analyzer AMA 254	Intruments SA	Hg	67800,-
HG 254 A	Intruments SA		14100,-
Fully Automated Mercury Analysis System	LDC Analytical		58500,-
AP200	Leeman Labs		54625,-
ps200	Leeman Labs		44850
Merlin Fluoreszenz-Detektor	P.S. Analytical LTD		18350
Hg-MAK 1200 Hg Monitor	Seefelder Meßtechnik		11100,-
Hg 254 A	Seefelder Meßtechnik		14100,-

**Schnelltest für Metalle bzw. Cyanide**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Testpapier	Macherey-Nagel	Cyanide	27,-
Reagenzieneinsatz	Gebr. Liebisch	Cyanide	
Gasspürröhrchen	Dräger	Cyanide	
Merckoquant	Merck	Schwermetalle	
Aquamerck	Merck	Schwermetalle	

**Cyanid-Bestimmung**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
EX-tox-Alarm	Auer MSA	HCN	3707,-
GasCorder	Auer MSA	HCN	15785,-
Compur Monitox plus	Bayer	HCN	3059,-
QuickChem AE	Lachet Vertrieb	Cyanid	52000,-
Micro Dist	Lachet Vertrieb	Cyanid	9800,-
behrotest	Hans Landgraf	Cyanid	
AP/PS1214	Leeman Labs	Cyanid	38500,- bis 40000
CNField	Perstorp Analytical	Cyanid	25000,-
CNLab	Perstorp Analytical	Cyanid	28000,-
SANplus-System	Skalar	Cyanid	45000,- bis 70000,-
MPM 3000	WTW	Cyanid	4950,-

**Mikrowellenaufschlußgeräte**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
MLS-1200 MEGA	MLS GmbH	-	26190,-
	Leutkirch	-	
Super-Digest	Kürner	-	
	Analysentechnik	-	
PMD	Kürner	-	30564,-
	Analysentechnik	-	
AP1000	Leeman Labs	-	33752,-

**UV-Aufschlußgeräte**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
UV-1000	Kürner Analysentechnik	-	14850,-

**GC-MS**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Spectra Trak 600	Viking	org. Stoffe	368000,-
MM1	Bruker-Franzen		400000,-
EM 640	Bruker-Franzen		364000,-

**PID/FID**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
TVA 1000	Foxboro	VOC	30000,-
OVA-128 FID	ANSYCO	VOC	23000,-
FID 3006	Bernath Atomic		
Compur FID	Bayer Diagnostic		
Micro TIP	Photovac	VOC	15000,- bis 30000,-
PID 100	HNU		
FID Modell 3-100	JUM		

**Infrarot-Spektrometer**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Gasmonitor 1301	Brüel & Kjaer	IR-aktive Gase	60000,- bis 80000,-
Gasmonitor 1302	Brüel & Kjaer		30000,- bis 60000,-
Miran 1BX	Anysco		60000,-
airTOX (4 Kanal)	Fresenius		17710,-
THP-Analysator	Wolters	MKW, org. Stoffe	20000,-
SAM-I	Wolters	IR-aktive Gase	9850,-
BINOS	Leybold-Heraeus	IR-aktive Gase	
LIMORL NIR-Prozeß-photometer	Maihak		
Accuro 2000	Dräger		
FTIR	Nicolet	IR-aktive Gase	
FTIR	Polytec	IR-aktive Gase	

**Gaschromatograph**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Quad 400	MIT	alle Gase	65000,-
10 S plus	Photovac	VOC	30000,- bis 65000,-
HC1010	Airmotec	VOC	149000,-
3HE II/PID	META Meßtechnik	VOC	ab 25000,-
P200	MIT		46000,-
Scentograph	Sentex		58650,-
HNU 311	HNU Systems inc.		51000,- bis 64000,-
GC 8610	SRI-Instruments	VOC, schwerflüchtige KW	43600,-
Minicams	CMS Research	VOC	ab 40000,-
AID 511	Thermo Instruments		ab 37000,-
GC 700A	American Scientific		ab 31970,-
OVA-128-GC	Century		
MSI 301	Microsensor System		
EKHO-M	Centre of Instr. Eng.		46000,-

**Elektrochemische Zelle**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
G819 PER/TRI	GfG	PER, TRI	bis 15000,-

**Ionenmobilitäts-Spektrometer**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Bruker-Raid 2	Bruker Saxonia	VOC	34500,-
AVM	Graseby Ionics	VOC	

**Kompaktgeräte**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Deponiegasmonitor	Ansyco	CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	

**Sensor**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Organic vapour sensor	Morlock Environmental	VOC	
HLS	Scimarec	Benzol, KW, KW-OH	
versch. Sensoren	EEV	viele VOC	
versch. Sensoren	Auer	brennbare Gase	
HLS	ADC	CH <sub>4</sub> ..... O <sub>2</sub>	
DIR	Astro	VOC	
HLS	ECO	viele VOC	
OCS	FhG-IPM	IR-Gase	
versch. Sensoren	GfG	viele VOC	
IR-Sensor	FZK	viele VOC	
SAW	FZK	VOC	
versch. Sensoren	MST	MAK-Gase	
HLS	Microsens	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , -OH, PER	
versch. Sensoren	RAE	VOC	
HLS	Uni Tübingen	PER	
MS-Sensorarray	Uni Tübingen	(C), KW, BTX	
versch. Sensoren	Winter	7 versch. Gase	

**Enzym-Immunoassay**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
D-Tech-BTX	Merck	BTEX	600,-
D-Tech-PCB	Merck	PCB	800,-
D-Tech-TNT	Merck	TNT	600,-
EnviroGrad	Millipore	langkettige KW	2444,-
EnviroGrad	Millipore	PCB	2444,-
Rapid Assay	Ohmicron, Baker	PCP	5000,- bis 12000,-
RIDASCREEN-TNT-ELISA	r-Biopharm	TNT	850,-
ELISA	PAB-Productions	Biozide	10000,-
ELISA	TRANSIA	Atrazin	10000,-

**Sonden**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Stiltz-Sonde (Dräger Röhrchen)	Dräger AG	BT, PER, TRI, H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>	4685,-

**Leuchtbakterientest**

<b>Gerät</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Parameter</b>	<b>Preis (+MWST)</b>
LUMIStox	Dr. Lange	Schwermetalle, KW, CKW	28500,-
Microtox	Microbiotics		28800,-

**Testsysteme für mit biologischen Methoden nachweisbare Stoffe**

<b>Gerät</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Parameter</b>	<b>Preis (+MWST)</b>
Algentest XL	ABIMED	Summenparameter	
BIOSSENS		Summenparameter	38500,-
BI-1000	BIOSCIENCE	Summenparameter	
ToxAlarm-pro	LAR	Summenparameter	78000,-
ARAS	Dr. Lange	Summenparameter	16500,-
BSB-Modul	Medingen	Summenparameter	
RA-1000	M+C Products	Summenparameter	54800,-
Protoplasten Biotest	OXYTEC	Summenparameter	80000,-
Stiptox-norm	STIP	Summenparameter	50000,-
EuCyano-Bakterienelektrode	TU-Berlin	Summenparameter	90000,-
Cholinesterase-Hemmtest	Boehringer	Insektizide	

## A.2 Prototypenverzeichnis

### Quarz-Array

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Labormuster	Uni Tübingen	Aromaten, FCKW, KW, CKW	ca. 40000,-

### Evanescent Field Absorbance Sensor

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
optischer Sensor	FZK	CH-, NH-, OH-Gruppen	ca. 50000,-
IR-EFAS	FZK/FhG-ICT	VOC	ca. 60000,-

### Reflexionsspektrometer

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Reflexionsspektroskop	FhG-IPM		ca. 35000,-

### Analytisches Mikrosystem zur Detektion organischer Gase (AMDOG)

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
SAW-Laser	FZK	VOC	ca. 5000,-

### Sonderverfahren

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Radon	Scintrex	KW, CKW, FCKW	ca. 10000,-
Sammelbehälter	Petrex	alle Gase	systemabh.

### Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS)

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
LIESA	Krupp-Forschungsinstitut Essen	Metalle	

### PAK-Messung

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
PAK-Sonde	LaserLab Berlin-Düsseldorf	PAK	
PAK Schnelltest	TÜV Rheinland	PAK	

### Elektroanalytische Methoden, Cyclische Voltametrie

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Prototyp	NewMexico State Uni	Metalle, Cr, U, Cr(III), Cr(IV)	

**Anodisches Stripping**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Prototyp	General Electric	Hg	

**Sensor**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Prototyp	Transducer Research	CKW	
Prototyp	Ohio State Uni	CO	

**Microchip-GC**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Prototyp	Louisiana State Uni	VOC	

**Fiber-Optic**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Diodenlaser	Naval Research Lab	TCE, Tetra, Chloroform	
Prototyp	Rutgers Uni	pH, BTEX	
Komplexbildung	Naval Reserach Lab	CU(I)	
Photometrie			
Biosensor	Naval Reserach Lab	verschiedene	

**Zweikanalfluorimeter**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Prototyp	FiberChem Inc.	CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Organohalogene	

**Laserablation-ICP/AES**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Prototyp	Ames Labs	Metalle	

**Laserinduzierte Fluoreszenz**

Gerät	Hersteller	Parameter	Preis (+MWST)
Prototyp	North Dakota State Uni	BTEX, PAH	
Prototyp	Naval Command	BTEX, PAH	

### A.3 Mobile Meßgeräte zum VOC-Nachweis

Tabelle 8 faßt die Ergebnisse der Markterhebung zusammen und gibt eine Übersicht über die VOC -Meßgerätehersteller. Alle angegebenen Geräte erfüllen den Anspruch der Mobilität.

**Tabelle 8: Mobile Meßgeräte für den Nachweis von VOC. Ergebnisse der Markterhebung in Deutschland, USA, Japan**

Firma	Technologie	Parameter	untere Meßgrenze	obere Meßgrenze	Meßzeit
Auer	PID	TOC	ppm	2000 ppm	sek.
Auer	PID/FID	TOC	ppm	5 Vol.%	sek.
Auer	versch. Sensoren	brennbare Gase	ppm	1000 ppm	sek
ADC	HL-Sensoren	CH <sub>4</sub> ,..., O <sub>2</sub>	ppm	500 ppm	min
Astro	DIR-Sensor	TOC	ppm		min
B & Kjaer	FTIR	VOC	ppm	10 Vol.%	2 min
B & Kjaer	IR-Photoakustik	KW, CKW	ppm	100 Vol.%	1 min.
Bernath	FID	TOC	ppm	1 Vol.%	sek
CDS	GC	alle Gase	sub ppm	Vol.%	20 min.
Crompac	GC-WLD, ECD,...	alle Gase	sub ppm	Vol.%	20 min.
Compur	FID	TOC	ppm	1 Vol.%	sek.
ECO	HL-Sensor	viele VOC	ppm	500 ppm	2 sek.
EEV	versch. Sensoren	viele VOC	ppm		10 sek
FhG-IPM	div. Optosensoren	IR-Gase	ppm		min.
FhG-IPM	Reflexionssp.	CKW	ppm		1 min.
Foxboro	FID/PID	TOC	ppm	1 Vol.%	5 sek.
Foxboro	GC/FID	VOC	ppm	1 Vol.%	15 min.
GfG	elektrochem. Zelle	PER, TRI	ppm	500 ppm	min
GfG	versch. Sensoren	viele VOC	ppm	500 ppm	5 min.
GIV	Sammler	alle Gase	variabel	variabel	variabel
H & Braun	FID/PID	TOC	ppm	2 Vol.%	sek.
FZK	IR-EFAS-Sensor	viele VOC	sub ppm	2 Vol.%	30 min.
FZK	SAW-Sensor	VOC	ppb	1000 ppm	3 min.
Keco	Sammler	alle Gase	variabel	variabel	variabel
Keco	GC	alle Gase	sub ppm	Vol.%	20 min.
Keco	GC	alle Gase	sub ppm	Vol.%	20 min.
MSI	n.b.	BTX	ppb		6 min.
Miran	IR-Spektroskopie	IR-Gase	ppm	1 Vol.%	2 min.
Midac	FTIR	IR-Gase	ppb		5 min.
Matheson	Sammler	alle Gase	variabel	variabel	variabel
Matheson	Wärmetönung	brennbare Gase	ppm	1000 ppm	min.
Mannesmann	Wärmetönung	brennbare Gase	ppm	1000 ppm	min.
Merck	Indikator	BTEX	ppb		3 min
MTI	GC	alle Gase	sub ppm	Vol.%	2 min
MTI	4-fach GC	alle Gase	sub ppm	Vol.%	2 min.
MST	versch. Sensoren	MAK-Gase	ppm	2000 ppm	4 min

Microsens	HL-Sensor	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , -OH, PER	10 ppm	n.b.	n.b.
Nicolet	GC-IR-Spektr	IR-Gase	sub ppm	Vol.%	min.
Perkin Elmer	GC	alle Gase	sub ppm	Vol.%	min.
Photovac	GC	alle Gase	ppm	Vol.%	7 min.
Photovac	PID-Module	TOC-Stufen	ppm	2000 ppm	sek.
RAE	versch. Sensoren	VOC	ppm	1000 ppm	3 sek.
RAE	PID-Module	TOC	ppm	2000 ppm	10 sek.
Siegrist	versch. Sensoren	div. VOC	ppm	1000 ppm	1 sek.
Siegrist	IR-Spektroskopie	IR-Gase	sub ppm	Vol.%	2 min.
Scimarec	HL-Sensoren	Benzole, KW, KW-OH	ppm	2500 ppm	min.
Uni Tübingen	HL-Sensor	PER	50 ppm		5 min.
Uni Tübingen	MS-Sensorarray	C, KW, BTX	100 ppm	2000 ppm	5 min.
Viking	GC-MS	alle Gase	sub ppb	Vol.%	20 min.
Zellweger	Wärmetönung	brennbare Gase	ppm	2000 ppm	3 min.
Winter	versch. Sensoren	7 versch. Gase	ppm	2000 ppm	1 min.

## A.4 Daten ausgewählter GC bzw. GC-MS-Systeme

	Airmotec	META	HNU	MTI	Photovac	Sentex	SRI	Viking	Bruker	Bruker
	HC 1010	3HE II PID	311	P200	10S Plus	Scentograph	8610	Spectratrak	MM1	EM640
Einsatzbereich: leichtfl. KW	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Einsatzbereich: schwerfl. KW			bedingt			bedingt	+	+	+	+
<b>Geräteigenschaften des Komplettsystems</b>										
Koffergerät			+	+	+	+				
tragbar			+	+	+	+				
transportierbar	+	+					+	+	+	+
Vollautomat	+	+		+	+	+				
Halbautomat			+				+			
Manuelle Bedienung								+	+	+
Luft, aktivkohlegereini- gt							+	+	+	+
Trärgase H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , synth Luft	+	+	+				+	+	+	+
intern 8h Gas + Batte- rie				+	+	+				
netzabhängig		+	+							
<b>Technische Spezifikation</b>										
alle Säulentypen selbst einsetzbar	+		+				+	+	+	+
Speziälsäulen		+		+	+	+				
Mehrsäulengerät				+						
Säulen isotherm max. 150-200°C		+	+	+		+				
Säulen program. max. 150-180°C	+					+				
Säulen program. max. 240-300°C							+	+	+	+
Option zur Voran- reicherung (intern)	+	+				+				
Option zur Voran- reicherung (extern)				+						
<b>Detektoren</b>										
Simultanbetrieb von 2 Detektoren möglich				+		+	+			
WLD										
PID		+	+		+	+	+			
FID	+						+			
ECD		+	+			+	+			
MS-Quadrupol SEV								+	+	+
TID, FUV, FPD, MAID, FPD, ELCD		+	+			+	+			
Analysenzeit für BTX- Messung [min]	10	5	10	2	10	10	10	10	5	5
Analysenzeit für BTX- Messung [min]							30	20	7	7
circa Preis ohne MWSt. in DM	130	30,5	55	40	54	51	37,9	320	400	316,5

## A.5 Geräteauswahl der biologischen Verfahren

Firma/Produkt	Analyt	Sensitivität [ppb] (90% B/Bo)	Testformat	Mobilität	Preis/Messung (inkl. Extraktion)	Investitions- kosten
Ohmicron, Baker (RPA-I)	PCB	0.06 /W	Magnetpartikel	tragbar	21,- DM	4980,- DM
	BTX	600 /W; 2500 /B	Testkarte	tragbar	ca. 62,- DM Der Test enthält immer eine Nullkontrolle	ca. 600,- DM
PCB	500 /B					
Millipore	TNT	5 /W; 200 /B	Röhrchentest	k.A.	ca. 49,- DM	2444,- DM (Differential- Photometer)
	KW (Kerosin)	10 000 /B				
	PCB	1000 /B				
r-Biopharm	PCP	5 /W; 50 /B	Platten ELISA	Laborwagen	ca. 49,- DM ca. 20,- DM (jedoch ohne Extraktions-Kit)	ELISA-Reader ca. 10 000,- DM
	TNT	0.03 /W /B				
Dr. Lange (Lumi Stox)	Toxizität		Leuchtbakterien Teströhrchen	tragbar	9,- DM	28 500,- DM Luminometer
Microbics (Microtox)	Toxizität		Leuchtbakterien Teströhrchen	Laborwagen	5,- DM	28 800,- DM Luminometer

Sensitivität bei gegebener Matrix: /B = Boden, /W = Wasser

## A.6 Beschreibung kommerzieller Geräte der biologischen Verfahren

### A.6.1 Testsysteme

**ABIMED:** Algentest XL  
 Biokomponente: Grünalgen  
 Prinzip: Messung der Biomasse über Chlorophyllfluoreszenz; Toxizität wird als Summenparameter in % Wachstumshemmung angegeben  
 Anwendungsgebiet: kontinuierliche Gewässerüberwachung, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift  
 Messung: 60 Proben werden in 5h gemessen und ausgewertet  
 Organismen: Algen müssen im Labor kultiviert werden  
 Gerät: Standgerät

**BIOSENS:**  
 Biokomponente: Grünalgen  
 Prinzip: Messung der Veränderung der Chlorophyllfluoreszenz bei Gifteinwirkung, Toxizität als Summenparameter, Fluoreszenzänderung bei toxischen Proben  
 Anwendungsgebiet: Gewässerüberwachung, Einzelproben, keine Bodenextraktionsvorschrift  
 Messung: 2 min/Probe, Algenvorbereitung 3 h, Algenkultur ist 2 Wochen haltbar  
 Organismen: Algen müssen in einem Zusatzgerät kultiviert werden  
 Gerät: tragbar

**BIOSCIENCE:** BI-1000  
 Biokomponente: Belebtschlamm  
 Prinzip: Messung des Sauerstoffbedarfs, Toxizität als Summenparameter, geringerer Sauerstoffbedarf bei toxischen Proben  
 Anwendungsgebiet: kontinuierliche Einlaufkontrolle in Kläranlagen, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift  
 Messung: Meßzeit nicht angegeben  
 Organismen: Kultur muß vorhanden sein  
 Gerät: Tischgerät

**LAR:** ToxAlarm-pro  
 Biokomponente: Bakterien oder Grünalgen  
 Prinzip: Bakterien O<sub>2</sub>-Verbrauch, Algen O<sub>2</sub>-Produktion, Toxizität als Summenparameter  
 Anwendungsgebiet: Kontinuierliche Wasser- oder Abwasserkontrolle, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift  
 Messung: Meßzeit nicht angegeben  
 Organismen: werden im Labor gezüchtet und automatisch dosiert  
 Gerät: Standgerät

<b>Dr. Lange:</b>	ARAS
Biokomponente:	Bakterien
Prinzip:	Messung des Sauerstoffbedarfs
Anwendungsgebiet:	kontinuierliche Abwasserüberwachung, Toxizität als Summenparameter, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift
Messung:	Meßzeit 2 min
Organismen:	einsatzfähige Bakterienmembranen beim Hersteller erhältlich
Gerät:	Standgerät
<b>Dr. Lange:</b>	LumiStox
Biokomponente:	Bakterien
Prinzip:	Bakterienlumineszenzmessung
Anwendungsgebiet:	Wasser, Abwasser, Bodenextrakte, Toxizität als Summenparameter (Abnahme der Lumineszenz bei Toxizität), Einzelproben möglich, Bodenextraktionsvorschrift vorhanden
Messung:	Ergebnis nach 60 min
Organismen:	gefriergetrocknete Bakterien, die vor der Messung reaktiviert werden, beim Hersteller erhältlich
Gerät:	transportabel
<b>Medingen:</b>	BSB-Modul
Biokomponente:	Bakterien
Prinzip:	Messung des Sauerstoffbedarfs
Anwendungsgebiet:	kontinuierliche Wasser- oder Abwasserkontrolle, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift, Toxizität als Summenparameter (Verringerung des BSB bei toxischen Proben)
Messung:	2 min nach Einstellung eines konstanten Sauerstoffverbrauchs
Organismen:	Membran mit immobilisierten Bakterien, gebrauchsfertig, beim Hersteller erhältlich
Gerät:	Tischgerät
<b>M+C Products:</b>	RA-1000 Respirationsanalysator
Biokomponente:	Bakterien
Prinzip:	Messung des Sauerstoffbedarfs
Anwendungsgebiet:	Kontinuierliche Abwasserüberwachung, Einlaufkontrolle in Kläranlagen, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift, Toxizität als Summenparameter (Verringerung des BSB bei toxischen Proben)
Messung:	nach Einstellung konstanter Respirationsgeschwindigkeit, Meßzeit nicht angegeben
Organismen:	müssen im Labor kultiviert werden
Gerät:	Tischgerät

<b>MICROBICS:</b>	Microtox Solid Phase Test
Biokomponente:	Bakterien
Prinzip:	Bakterienlumineszenz
Anwendungsgebiet:	Toxizitätsbestimmung von Boden- und Sedimentextrakte, Einzelprobenbestimmung, Bodenextraktionsvorschrift und Extraktionskit, Toxizität als Summenparameter (Abnahme der Lumineszenz bei Toxizität)
Messung:	Meßzeit mit Extraktion 60 min
Organismen:	gefriergetrocknete Bakterien, die vor der Messung reaktiviert werden, beim Hersteller erhältlich
Gerät:	tragbar
<b>OXYTEC:</b>	Protoplasten Biotest
Biokomponente:	Protoplasten (Pflanzenzellorganellen)
Prinzip:	Sauerstoffproduktion durch Protoplasten
Anwendungsgebiet:	kontinuierliche Wasserüberwachung, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift, Toxizität als Summenparameter (hauptsächlich photosynthesehemmende Herbizide, Abnahme der Sauerstoffproduktion bei toxischen Proben)
Messung:	Meßzeit 60 min, Messung gegen Referenzprobe ohne Schadstoffe (bei belasteten Böden nicht möglich)
Organismen:	Zellorganellen (Protoplasten) müssen aus Pflanzen isoliert werden
Gerät:	Standgerät
<b>STIP:</b>	Stiptox-norm
Biokomponente:	Bakterien
Prinzip:	Messung des Sauerstoffbedarfs
Anwendungsgebiet:	kontinuierliche Abwasserüberwachung, Kläranlageneinlauf, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift, Toxizität als Summenparameter (Verringerung des Sauerstoffbedarfs bei toxischen Proben)
Messung:	Meßzeit 3 min, nach Einstellung einer konstanten Respirationsgeschwindigkeit
Organismen:	Bakterien müssen in separatem Fermenter kultiviert werden
Gerät:	Standgerät
<b>TU Berlin:</b>	EuCyano-Bakterienelektrode
Biokomponente:	Cyanobakterien oder Eubakterien
Prinzip:	Mediatorvermittelte Messung des Elektronenflusses in den Elektronentransportketten der Organismen
Anwendungsgebiet:	kontinuierliche Wasser- und Abwasserüberwachung, Einzelproben möglich, keine Bodenextraktionsvorschrift, Toxizität als Summenparameter (verringertes Elektronenfluß bei toxischen Proben)
Messung:	Meßzeit 10 min, nach Einstellung der Grund-Elektronentransportrate
Organismen:	Cyanobakterien müssen kultiviert werden, E.coli-Membranen sind erhältlich
Gerät:	Standgerät

## A.6.2 Enzymtests

<b>BOEHRINGER:</b>	Cholinesterase Hemmtest
Biokomponente:	Acetyl-Cholinesterase
Prinzip:	Bakterienlumineszenz
Anwendungsgebiet:	Entstehung eines farbigen Reagenz durch die Enzymreaktion, erfolgt nicht bei gehemmten Enzymen, Photometrische Bestimmung des Farbstoffes; Insektizide (Carbamate, Organophosphate) werden in Paraoxoneäquivalenten angegeben Wasserproben, Einzelproben, keine Bodenextraktionsvorschrift
Messung:	Meßzeit 45-60 min
Bemerkung:	Photometer muß bei anderen Herstellern gekauft werden

## A.6.3 Immunoassays

<b>J.T. Baker:</b>	RaPID Assays
<b>Ohmicron</b>	
Analyte:	PCB
Biokomponente:	Antikörper
Prinzip:	Kompetitiver ELISA, Antikörper auf magnetischen Partikeln immobilisiert und enzymgekoppelte Antigene; photometrische Detektion eines, durch die Enzymreaktion entstehenden Farbstoffes
Anwendungsgebiet:	Wasser, Lebensmittel, Boden, Bodenextraktionsvorschrift vorhanden, Extraktionskits werden angeboten
Messung:	Meßzeit 60 min
Gerät:	tragbar
<b>Millipore:</b>	EnviroGard Test Kits
Analyte:	KWS, PCB, PCP
Biokomponente:	Antikörper
Prinzip:	Kompetitiver ELISA, Antikörper auf Küvettenwänden immobilisiert und enzymgekoppelte Antigene; photometrische Detektion eines, durch die Enzymreaktion entstehenden Farbstoffes
Anwendungsgebiet:	Wasser, Lebensmittel, Oberflächen, Boden, Bodenextraktionskits und -verfahren werden angeboten
Messung:	Meßzeit 60 min
Gerät:	tragbar

**PAB-Product.:**

Analyte:	nur Biozide
Biokomponente:	Antikörper
Prinzip:	Kompetitiver ELISA, Antikörper auf Mikrotiterplatten bzw. Röhrenwand immobilisiert und enzymgekoppelte Antigene; photometrische Detektion eines, durch die Enzymreaktion entstehenden, Farbstoffes
Anwendungsgebiet:	Wasser, Boden, Bodenextraktionsvorschrift auf Anfrage
Messung:	Meßzeit 3h (ELISA), 90min (Stick)
Gerät:	Tischgerät

**r-Biopharm:**

Analyte:	TNT
Biokomponente:	Antikörper
Prinzip:	Kompetitiver ELISA, Antikörper auf Mikrotiterplatten immobilisiert und enzymgekoppelte Antigene; photometrische Detektion eines, durch die Enzymreaktion entstehenden, Farbstoffes
Anwendungsgebiet:	Wasser, Boden, Bodenextraktionsvorschrift vorhanden
Messung:	Meßzeit 70 min
Gerät:	Tischgerät

**Transia:**

Analyte:	Atrazin
Biokomponente:	Antikörper
Prinzip:	Kompetitiver ELISA, Antikörper auf Mikrotiterplatten immobilisiert und enzymgekoppelte Antigene; photometrische Detektion des entstehenden Farbstoffes
Anwendungsgebiet:	Wasser, Boden, Bodenextraktionsvorschrift vorhanden
Messung:	Meßzeit 30 min
Gerät:	Tischgerät

**Merck:**

Analyte:	BTEX, PCB, TNT
Biokomponente:	Antikörper
Prinzip:	Kompetitiver ELISA, Antikörper auf Latexpartikeln immobilisiert und enzymgekoppelte Antigene; reflektrometrische Detektion des entstehenden Farbstoffes
Anwendungsgebiet:	Wasser, Boden, Lebensmittel, Oberflächen, Bodenextraktionskits und -verfahren werden angeboten
Messung:	Meßzeit 30 min
Gerät:	Handreflektometer

## A.7 Geräteauswahl für die Feldtests

Teilgebiet	Parameter	Verfahren	Anbieter	Gerät		
„Metalle und Cyanide“	Metalle	Elektrochemie	GAT	PDV 2000		
		ICP/OES	CEM	Spectro Prep		
		XRF	Noran (chem. Tracor)	SpecTrace 6000 o. 9000		
		Kapillarelektrophorese	Outokumpu	X-Met 920		
		Photometrie	Waters	Quanta 400		
„Leichtflüchtige organische Schadstoffe und Gase“	Methan CKW und BTEX	FID	Skalar	CN-Autoanalyzer		
		GC	Ansyco	OVA 128		
		IR-Spektrometrie	MTI	Quad 400		
			Bruel & Kjaer	Multigasmonitor 1301/1302		
VOC	IMS	Ansyco	Miran 1b			
		Bruker-Saxonia	Raid 2			
„Gaschromatographische Bestimmung organischer Schadstoffe“	VOC und andere organische Schadstoffe	GC	SRI	8610		
			Sentex	Scentograph		
			HNU	Modell 311		
			Airmotec	HC 1010		
			Viking	Spectra Trak 600		
		GC-MS	Bruker	MM1		
			Bruker	EM 640		
			Airmotec	AVM Grasby		
			IMS	IMS	LaserLab Berlin	Lasersonde PAK
						Wolters
Nitroverbindungen, Rüstungsaltsen	VOC, Gase und andere organische Schadstoffe (z.B. PAK)	Fluoreszenz	GAT	Feldfluorometer 10-AU		
		Fiberoptische Spektrometer	O.K. TEC	O.K. TEC SPEC		
		Spektroskopie	Polytec	Fiberoptische Sonden		
		Immunoassay	Horiba	OCMA 220		
			Millipore	Envirogard		
„Mit biologischen Verfahren nachweisbare Schadstoffe“	organische Schadstoffe	Elektrochemie	Merck	D-Tech		
			Dräger	Envi-Check		
			Baker			
			LAR	BSB5-Kurzzeit		
			Dr. Lange	LumiStox		
BSB Toxizität	Lumineszenztest	Lumineszenztest	Microbics (Heyl)	Microtox		

## Abkürzungen

AAS	Atomabsorptionsspektrometer
AED	Atomemissionsdetektor
AID	Argon-Ionisations-Detektor
AMDOG	Analytisches Mikrosystem zur Detektion organischer Gase
BAW	Bulk Acoustic Waves
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
BTEX	Benzol,Toluol,Ethylbenzol,Xylol
BTX	Benzol,Toluol,Xylol
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
CLSA	Closed Loop Stripping
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DAI	Direktinjektion von Wasser
DIAL	Differential Absorption LIDAR
DISC	Differential Scattered LIDAR
ECD	Elektroneneinfang-Detektor
EFAS	Evanescent Field Absorbance Sensor (faseroptischer Sensor)
ELCD	Elektrolytischer Leitfähigkeitsdetektor
ELISA	Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay
EMSL	Environmental Monitoring System Laboratory
EPA	Environmental Protection Agency
FD	Fluoreszenz-Detektor
FES	Feldeffektsensoren
FET	Feldeffekttransistor
FFT	Fourier Transformations Spektrometer
FIA	Fließinjektions-Analyse
FID	Flammenionisationsdetektor
FIRE	Flammen-IR-Spektroskopie Detektor
FMLIR	Frequenzmodulierte Laser-Infrarot Spektrometrie
FPD	Flammenphotometrischer Detektor
GC	Gaschromatographie
HGGC	Hochgeschwindigkeits-Gaschromatographie
HID	Helium-Ionisations-Detektor
HKW	leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
HLS	Halbleitersensoren
ICP	Inductiv Coupled Plasma
ICP-OES	Inductiv Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer
IMS	Ionen übilitäts Spektrometer
IR	Infrarot
IS	Ionenselektiv
ISE	Ionenselektiv Elektrode
ITD	Ion Trap Massenspektrometer
KCS	Kalorimetrische Chemische Sensoren
KW	Kohlenwasserstoffe
LIBS	Laserinduzierte Break-Down Spektroskopie
LIDAR	Light Detection and Ranging

---

Lsgm.	Lösungsmittel
LWL	Lichtwellenleiter
MCS	Massensensitive Chemische Sensoren
MKW	Mineralöl-Kohlenwasserstoffe
MOS	Metalloxidhalbleiter
MoSt	Modellstandort
MULKS	Multikomponenten Sensorsysteme
MS	Massenspektrometer
n.b.	nicht benannt
NPD	Stickstoff Phosphor (thermionischer) Detektor
OCS	Optochemische Sensoren
PAH	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCP	Pentachlorphenol
PER	Perchlorethylen
PID	Photoionisationsdetektor
PTV	Temperaturprogrammierbarer Splitinjektor (programmable temperature vaporizer)
RFA	Röntgenfluoreszenzspektrometer
RS	Ramanspektroskopie
SAW	Surface Acoustic Waves
SEV	Sekundär-Elektronen-Vervielfältiger
SERS	Surface Enhanced Raman Spectroscopy
SIM	Selected Ion Monitoring
SPR	Surface Plasmon Resonance Detektor
TRI	Trichlorethylen
U.S.EPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultraviolett
VOC	Volatile Organic Compound
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor
XRF	Röntgenfluoreszenzspektrometer

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Anwendungsgebiete der Vor-Ort-Analytik .....	3
Abb. 2: Vorteile der Vor-Ort-Analytik.....	4
Abb. 3: Auswahlkriterien für die Meßtechnik.....	12
Abb. 4: Vorteile der Sensortechnik .....	14
Abb. 5: Skizze eines Sensorsystems.....	15
Abb. 6: Beeinflussung der Lichtausbreitung im Lichtwellenleiter; Prinzip eines intrinsischen Sensors.....	18
Abb. 7: a) Skizze der Kapillarelektrophorese, b) Elektroosmotischer Fluß.....	43
Abb. 8: Einteilung der Analysensysteme in drei Kategorien.....	46

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Aufbereitungstechniken von Wasserproben .....	9
Tabelle 2: Übersicht über Aufbereitungstechniken für Bodenproben.....	10
Tabelle 3: Methoden der Signalerzeugung bei einem Sensorsystem.....	16
Tabelle 4: Auswahl kommerziell verfügbarer VOC-Meßsysteme .....	24
Tabelle 5: Übersicht der Injektoren .....	28
Tabelle 6: Übersicht der Detektoren.....	30
Tabelle 7: Übersicht von Labortypen zur Vor-Ort-Analytik von VOC.....	40
Tabelle 8: Mobile Meßgeräte für den Nachweis von VOC. Ergebnisse der Markterhebung in Deutschland, USA, Japan.....	68

## Indexverzeichnis

<b>1</b>	
1BX (Fa. Miran) .....	25
<b>A</b>	
ABIMED Algentest XL .....	72
Altlastensanierung	
Gasproben .....	8
Analysengeräte	
Analytisches Mikrosystem zur Detektion organischer Gase (AMDOG) .....	66
anodisches Stripping .....	67
Atomabsorptionsspektrometer (AAS)	59
Cyanid-Bestimmung .....	61
elektroanalytische Methoden, cyclische	
Voltametrie .....	66
elektrochemische Zelle .....	63
Enzym-Immunoassay .....	64
Evanescent Field Absorbance Sensor	66
Fiber-Optic .....	67
Filterphotometer .....	57
Gaschromatograph .....	63
GC-MS .....	61
ICP Spektrometer (Inductive Coupled Plasma) .....	59
ICP-MS-Spektrometer .....	59
ICP-OES-Spektrometer .....	59
Infrarot-Spektrometer .....	62
Ionenchromatographen .....	58
Ionenmeter .....	60
Ionenmobilitäts-Spektrometer .....	63
Kapillarelektrophorese .....	58
Kompaktgeräte .....	63
Laserablation-ICP/AES .....	67
laserinduzierte Breakdown- Spektroskopie (LIBS) .....	66
laserinduzierte Fluoreszenz .....	67
Leuchtbakterientest .....	65
Microchip-GC .....	67
Mikrowellenaufschlußgeräte .....	61
PAK-Messung .....	66
PID/FID .....	62
Polarographen .....	58
Quarz-Array .....	66
Quecksilberanalysatoren .....	60
Reflexionsspektrometer .....	66
Röntgenfluoreszenzanalysatoren (RFA) .....	58
Schnelltest für Metalle bzw. Cyanide	60
Sensor .....	64, 67
Sonden .....	64
Sonderverfahren .....	66
Spektralphotometer .....	57
Testsysteme für mit biologischen Methoden nachweisbare Stoffe .....	65
UV-Aufschlußgeräte .....	61
Vor-Ort-Analytik .....	4
Zweikanalfluorimeter .....	67
Analysenverfahren	
ABIMED Algentest XL .....	72
Arsenanalytik .....	20
Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) .....	20, 36
biologische Verfahren .....	44, 72
BIOSCIENCE BI-1000 .....	72
BIOSENS .....	72
BOEHRINGER Cholinesterase Hemmtest .....	75
Cyanidanalytik .....	20
Cytosensor Microphysiometer .....	44
Differential Absorption LIDAR (DIAL) .....	39
Differential Scattered LIDAR (DISC)	39
Dr. Lange ARAS .....	72
Dr. Lange LumiStox .....	73
EFAS, Evanescent Field Absorbance Sensor .....	40
elektroosmotischer Fluß .....	42
faseroptischer Sensor .....	40
Filterphotometer .....	21
Flammenionisationsdetektor (FID) .....	23
Fließinjektions-Analyse FIA/Mikrowelle .....	36
Fluoreszenz-LIDAR .....	39
Fourier-Transformations-Infrarot- Technik (FTIR) .....	24
Funkenspektrometer .....	21
Funkenspektrometrie .....	36
Gaschromatographie (GC) .....	26
Gaschromatographie mit Massenspektrometrie (GC/MS) .....	29
GC bzw. GC-MS-Systeme .....	70
Geräte .....	57

Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration .....	23	Prüfröhrchen.....	23
ICP-MS.....	21	Quecksilberanalytik.....	20
IMAS .....	37	RADAR-Technologie .....	37
Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spektrometrie (ICP-OES).....	21	Raman-LIDAR.....	39
induktiv gekoppeltes Plasma (ICP) ...	21	r-Biopharm.....	76
Infrarot-Spektroskopie .....	23	Reflexionsspektrometer .....	41
integriert-optische Interferometer .....	38	Remote-Sensing-Techniken .....	39
Ionenchromatographen .....	22	Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA oder XRF) .....	22
Ionenmeter .....	22	SAW-Quarz-Array, Surface Acoustic Wave .....	40
Ionenmobilitätsspektrometer (IMS)....	41	Schnelltestkits .....	23
IR-EFAS .....	40	Screening.....	23, 46
J.T. Baker RaPID Assays.....	75	SmartSense.....	44
Kapillarelektrophorese.....	42	Sonderverfahren .....	37
Kosten- bzw. Effektivitätsermittlung .	45	stickstoffhaltige Kohlenwasserstoffe ..	39
Labormuster und Prototypen .....	39	STIP Stipox-norm .....	74
Labortypen.....	40	Teststäbchen.....	23
LAR ToxAlarm-pro.....	72	Threshold Immuno-Ligand Assay-System.....	44
laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) .....	36	Transia.....	76
laserinduzierte Fluoreszenz .....	38	TU Berlin EuCyano-Bakterienelektrode .....	74
leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe ...	37	Analytisches Mikrosystem zur Detektion organischer Gase (AMDOG) .....	66
Light Detection and Ranging (LIDAR) .....	39	anodisches Stripping .....	67
Literatur .....	49	Arsenanalytik .....	20
M+C Products RA-1000 Respirationsanalysator .....	73	Atomabsorptionsspektrometer (AAS)....	59
massensensitiver Chemosensor .....	40	Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS) Allgemeines .....	36
Medingen BSB-Modul .....	73	Atomabsorptions-Spektroskopie (AAS) Allgemeines .....	20
Merck.....	76	Aufschlußverfahren	
Metalle.....	19, 20	Königswasser .....	11
Metalle und Cyanide.....	36	Mikrowellenaufschluß .....	11
MICROBICS Microtox Solid Phase Test .....	73	Probenvorbereitung.....	11
Mikro-Analysensysteme .....	37	saure Destillation .....	11
Millipore EnviroGard Test Kits.....	75	UV-Licht .....	11
mobile Meßgeräte .....	68	Vor-Ort-Analytik.....	11
Molecular-Devices.....	44	<b>B</b>	
Oberflächenionisation.....	39	Bakterienlumineszenzgeräte .....	35
Ohmicron .....	44	BAW .....	18
on-line-ICP-MS (Inductiv Coupled Plasma-Massenspektrometrie).....	36	biologische Nachweisverfahren	
OXYTEC Protoplasten Biotest.....	74	ABIMED Algatest XL .....	72
PAB-Product.....	75	Allgemeines .....	72
PAK-Analytik .....	38	Bakterienlumineszenzgeräte .....	35
PAK-Schnelltestverfahren .....	38	BIOSCIENCE BI-1000 .....	72
photothermische Spektroskopie.....	38	BIOSENS .....	72
Polarograph/Voltameter.....	22	BOEHRINGER Cholinesterase Hemmtest .....	75
Prototypenverzeichnis.....	66		

BSB-Messungen .....	33	Cytosensor Microphysiometer .....	44
Cytosensor Microphysiometer .....	44	<b>D</b>	
Dr. Lange ARAS .....	72	Differential Absorption LIDAR (DIAL) .....	39
Dr. Lange LumiStox .....	73	Differential Scattered LIDAR (DISC) ...	39
ELISA .....	35	Dr. Lange ARAS .....	72
Enzymhemmung .....	34	Dr. Lange LumiStox .....	73
Fisch- oder Zellkulturtests .....	33	<b>E</b>	
Geräteangebot .....	35	EFAS, Evanescent Field Absorbance	
Geräteauswahl .....	44	Sensor .....	40
Gewässerüberwachung .....	33	elektroanalytische Methoden, cyclische	
Immunoassays .....	34	Voltametrie .....	66
Indikatoren .....	32	elektrochemische Zelle .....	63
J.T. Baker RaPID Assays .....	75	elektroosmotischer Fluß .....	42
LAR ToxAlarm-pro .....	72	ELISA .....	35
Lumineszenz oder		Enzymhemmung .....	34
Redoxpotentialmessung .....	33	Enzym-Immunoassay .....	64
M+C Products RA-1000		Evanescent Field Absorbance Sensor ....	66
Respirationsanalysator .....	73	<b>F</b>	
Markterhebung .....	33	faseroptischer Sensor .....	40
Medingen BSB-Modul .....	73	Feldeffekt-Sensoren (FES) .....	17
Merck .....	76	Fiber-Optic .....	67
Metabolismusraten .....	32	Figaro-Sensor .....	17
MICROBICS Microtox Solid Phase Test		Filterphotometer .....	21, 57
.....	73	Fisch- oder Zellkulturtests .....	33
Millipore EnviroGard Test Kits .....	75	Flammenionisationsdetektor (FID) .....	23
Molecular-Devices .....	44	Fließinjektions-Analyse FIA/Mikrowelle	36
Ohmicron .....	44	Fluoreszenz-LIDAR .....	39
OXYTEC Protoplasten Biotest .....	74	Fourier-Transformations-Infrarot-Technik	
PAB-Product .....	75	(FTIR) .....	24
r-Biopharm .....	76	Funkenspektrometer .....	21
SmartSense .....	44	Funkenspektrometrie .....	36
STIP Stipox-norm .....	74	<b>G</b>	
Testsysteme .....	32	Gasanalytik	
Threshold Immuno-Ligand Assay-		1BX (Fa. Miran) .....	25
System .....	44	Allgemeines .....	23
Toxizitätsmessung mit Organismen ...	32	Gaschromatographie .....	26
Transia .....	76	Gaschromatographie mit	
TU Berlin EuCyano-Bakterienelektrode		Massenspektrometrie (GC/MS) .....	29
.....	74	Gasmonitor 1301 (Fa. Brüel & Kjaer)	25
Vor-Ort-Analytik .....	6	Gasmonitor 1302 (Fa. Brüel & Kjaer)	25
BIOSCIENCE BI-1000 .....	72	GC bzw. GC-MS-Systeme .....	70
BIOSENS .....	72	Geräteauswahl .....	24
Bodenprobe		IR-Spektrometer .....	25
Probenvorbereitung .....	9	mobile Meßgeräte .....	68
Vor-Ort-Analytik .....	9	Quad 4 (Fa. MTI) .....	26
BOEHRINGER Cholinesterase Hemmtest		Gaschromatograph .....	63
.....	75	Gaschromatographie	
BSB-Messungen .....	33	Allgemeines .....	26
<b>C</b>		Detektoren .....	29, 30
Cyanidanalytik .....	20, 61	elementspezifische Detektoren .....	29

gepackte Säulen .....	27	Ionenmeter .....	22, 60
gruppenspezifische Detektoren.....	29	Ionenmobilitäts-Spektrometer.....	41, 63
Hochgeschwindigkeits- Gaschromatographie (HGGC).....	28	IR-EFAS.....	40
Injektoren.....	27, 28	IR-Spektrometer.....	25
Kapillarsäulen.....	27	<b>J</b>	
Multidetektoren .....	29	J.T. Baker RaPID Assays.....	75
Summenparameter-Detektor.....	29	<b>K</b>	
Trägergas .....	29	kalorimetrische chemische Sensoren (KCS).....	19
Trennsäulen .....	27	Kapillarelektrophorese.....	42, 58
Gaschromatographie mit Massenspektrometrie (GC/MS)		Kompaktgeräte.....	63
Allgemeines .....	29, 70	<b>L</b>	
feldfähige Geräte .....	30	Labormuster und Prototypen.....	39
Geräteverzeichnis .....	61	Labortypen .....	40
Prinzip.....	29	LAR ToxAlarm-pro .....	72
Gasmonitor 1301 (Fa. Brüel & Kjaer)....	25	Laserablation-ICP/AES.....	67
Gasmonitor 1302 (Fa. Brüel & Kjaer)....	25	laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) .....	36, 66
Gasproben		laserinduzierte Fluoreszenz.....	38, 67
Allgemeines .....	8	leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe Analysemethoden.....	37
Altlastensanierung/-sicherung .....	8	Vor-Ort-Analytik.....	37
Anreicherung .....	8	leichtflüchtige organische Schadstoffe und Gase	
direkte Probennahme .....	8	Vor-Ort-Analytik.....	6
Vor-Ort-Analytik.....	8	Leuchtbakterientest	
Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration .	23	Allgemeines .....	65
Gewässerüberwachung .....	33	Light Detection and Ranging (LIDAR)...	39
Grund- und Sickerwassermonitoring		Literatur	
Vor-Ort-Analytik .....	6	Analyseverfahren .....	49
<b>H</b>		Vor-Ort-Analytik.....	49
Halbleiter-Sensoren (HLS).....	17	Lumineszenz oder Redoxpotentialmessung .....	33
<b>I</b>		<b>M</b>	
ICP-MS-Spektrometer		M+C Products RA-1000	
Allgemeines .....	21	Respirationsanalysator .....	73
Geräteverzeichnis .....	59	massensensitive Sensoren (MCS).....	18, 40
ICP-OES-Spektrometer		Medingen BSB-Modul.....	73
Geräteverzeichnis .....	59	Merck .....	76
ICP-Spektrometer		Meßfahrzeuge	
Geräteverzeichnis .....	59	Vor-Ort-Analytik.....	31
IMAS		Meßtechnik	
Analysemethoden .....	37	Vor-Ort-Analytik.....	12
Vor-Ort-Analytik .....	37	Metabolismusraten.....	32
Immunoassay .....	34	Metalle und Cyanide	
Inductive Coupled Plasma Optical Emission Spektrometrie (ICP-OES)...	21	Analysemethoden.....	36
induktiv gekoppeltes Plasma (ICP) .....	21	Vor-Ort-Analytik.....	6, 19, 20, 36
Infrarot-Spektrometer .....	62	MICROBICS Microtox Solid Phase Test	73
Infrarot-Spektroskopie.....	23	Microchip-GC .....	67
integriert-optische Interferometer .....	38	Mikro-Analysensysteme	
intrinsischer Sensor.....	18		
Ionenchromatographen .....	22, 58		

Analysenmethoden .....	37	r-Biopharm .....	76
Vor-Ort-Analytik .....	37	Reflexionsspektrometer .....	41, 66
Mikrowellenaufschlußgeräte .....	61	Remote-Sensing-Techniken .....	39
Millipore EnviroGard Test Kits .....	75	Röntgenfluoreszenzanalysatoren (RFA) ..	58
mobile Meßgeräte .....	68	Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA	
mobiles ICP-MS		oder XRF) .....	22
Vor-Ort-Analytik .....	31	<b>S</b>	
Molecular-Devices .....	44	SAW .....	18
Multikomponenten Sensorsysteme		SAW-Quarz-Array, Surface Acoustic	
(MULKS) .....	19	Wave .....	40
<b>N</b>		Schnelltest für Metalle bzw. Cyanide ....	60
nichtsensorbasierte Meßmethoden		Schnelltestkits .....	23
Vor-Ort-Analytik .....	19	Screening .....	23, 46
<b>O</b>		Sensor	
Oberflächenionisation .....	39	Allgemeines .....	14, 64, 67
Ohmicron .....	44	Vor-Ort-Analytik .....	14
on-line-ICP-MS (Inductiv Coupled		sensorbasierte Meßmethoden	
Plasma-Massenspektrometrie) .....	36	Vor-Ort-Analytik .....	13
optochemische Sensoren (OCS) .....	17	Sensorsysteme	
organische Stoffe		Allgemeines .....	17
Vor-Ort-Analytik .....	6	BAW .....	18
OXYTEC Protoplasten Biotest .....	74	Feldeffekt-Sensoren (FES) .....	17
<b>P</b>		Figaro-Sensor .....	17
PAB-Product .....	75	Halbleiter-Sensoren (HLS) .....	17
Photoionisationsdetektor (PID) .....	62	intrinsischer Sensor .....	18
photothermische Spektroskopie .....	38	kalorimetrische chemische Sensoren	
Polarograph .....	22, 58	(KCS) .....	19
polycyclische aromatische		Komplettensor .....	14
Kohlenwasserstoffe (PAK)		massensensitive Sensoren (MCS) .....	18
Bestimmung .....	38, 66	Meßfühler oder Elementarsensor .....	14
Schnelltestverfahren .....	38	Multikomponenten Sensorsysteme	
Probennahme		(MULKS) .....	19
Vor-Ort-Analytik .....	8	optochemische Sensoren (OCS) .....	17
Probenvorbereitung		Quarzensensor .....	18
Aufschlußverfahren .....	11	SAW .....	18
Bodenproben .....	9	Sensoren .....	14
Wasserproben .....	8	Vor-Ort-Analytik .....	16, 17
Prüfröhrchen		Sensortechnik	
Allgemeines .....	23	Vor-Ort-Analytik .....	13
<b>Q</b>		SmartSense .....	44
Quad 4 (Fa. MTI) .....	26	Sonden .....	64
Quarz-Array .....	66	Sonderverfahren Analysengeräte .....	66
Quarzensensor .....	18	Spektralphotometer .....	57
Quecksilberanalysatoren .....	60	stickstoffhaltige Kohlenwasserstoffe	
Quecksilberanalytik .....	20	Analysenmethoden .....	39
<b>R</b>		Vor-Ort-Analytik .....	39
RADAR-Technologie		STIP Stipox-norm .....	74
Analysenmethoden .....	37	<b>T</b>	
Vor-Ort-Analytik .....	37	Teststäbchen .....	23
Raman-LIDAR .....	39	Testsysteme (biologische Methoden)	

Allgemeines .....	32	Funkenspektrometrie.....	36
Geräteverzeichnis .....	65	Gasanalytik.....	23
Threshold Immuno-Ligand Assay-System		Gaschromatographie (GC) .....	26
.....	44	Gaschromatographie mit	
Toxizitätsmessung mit Organismen .....	32	Massenspektrometrie (GC/MS) .....	29
Transia .....	76	Gasmonitor 1301 (Fa. Brüel & Kjaer)	25
TU Berlin EuCyano-Bakterienelektrode	74	Gasmonitor 1302 (Fa. Brüel & Kjaer)	25
<b>U</b>		Gasproben .....	8
UV-Aufschlußgeräte.....	61	GC bzw. GC-MS-Systeme.....	70
<b>V</b>		Geräteverzeichnis.....	24, 57
Vor-Ort-Analytik		Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration	
1BX (Fa. Miran) .....	25	.....	23
ABIMED Algentest XL .....	72	Grund- und Sickerwassermonitoring ....	6
Allgemeines .....	2	Halbleiter-Sensoren (HLS).....	17
Analysengeräte.....	4	ICP-MS .....	21
Analysensysteme .....	45	IMAS.....	37
Arsenanalytik.....	20	Inductive Coupled Plasma Optical	
Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)		Emission Spektrometrie (ICP-OES)	21
.....	20, 36	induktiv gekoppeltes Plasma (ICP).....	21
Aufschlußverfahren .....	11	Infrarot-Spektroskopie .....	23
BAW .....	18	integriert-optische Interferometer .....	38
biologische Nachweisverfahren 6, 44, 72		intrinsischer Sensor.....	18
BIOSCIENCE BI-1000.....	72	Ionenchromatographen.....	22
BIOSENS.....	72	Ionenmeter .....	22
Bodenproben.....	9	Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) ...	41
BOEHRINGER Cholinesterase		IR-EFAS.....	40
Hemmtest.....	75	IR-Spektrometer.....	25
Cyanidanalytik .....	20	J.T. Baker RaPID Assays .....	75
Cytosensor Microphysiometer.....	44	kalorimetrische chemische Sensoren	
Differential Absorption LIDAR (DIAL)		(KCS) .....	19
.....	39	Kapillarelektrophorese .....	42
Differential Scattered LIDAR (DISC)	39	Kosten- bzw. Effektivitätsermittlung..	45
Dr. Lange ARAS .....	72	Labormuster und Prototypen.....	39
Dr. Lange LumiStox .....	73	Labortypen .....	40
EFAS, Evanescent Field Absorbance		LAR ToxAlarm-pro .....	72
Sensor .....	40	laserinduzierte Breakdown-	
elektroosmotischer Fluß .....	42	Spektroskopie (LIBS).....	36
fahrbare Labors .....	31	laserinduzierte Fluoreszenz.....	38
faseroptischer Sensor .....	40	leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe.....	37
Feldeffekt-Sensoren (FES) .....	17	leichtflüchtige organische Schadstoffe	
feldtaugliche Analysengeräte.....	7	und Gase.....	6
Figaro-Sensor.....	17	Light Detection and Ranging (LIDAR)	
Filterphotometer .....	21	.....	39
Flammenionisationsdetektor (FID)....	23	Literatur.....	49
Fließinjektions-Analyse FIA/Mikrowelle		M+C Products RA-1000	
.....	36	Respirationsanalysator .....	73
Fluoreszenz-LIDAR .....	39	massensensitive Sensoren (MCS) .....	18
Fourier-Transformations-Infrarot-		massensensitiver Chemosensor.....	40
Technik (FTIR).....	24	Medingen BSB-Modul.....	73
Funkenspektrometer .....	21	Merck .....	76

Meßfahrzeuge .....	31	RADAR-Technologie .....	37
Meßtechnik .....	12	r-Biopharm .....	76
Metalle .....	19, 20	Reflexionsspektrometer .....	41
Metalle und Cyanide .....	6, 36	Remote-Sensing-Techniken .....	39
MICROBICS Microtox Solid Phase Test .....	73	Röntgenfluoreszenzspektrometer (RFA oder XRF) .....	22
Mikro-Analysensysteme .....	37	SAW .....	18
Millipore EnviroGard Test Kits .....	75	SAW-Quarz-Array, Surface Acoustic Wave .....	40
mobile Meßgeräte .....	68	Schnelltestkits .....	23
mobiles ICP-MS .....	31	Screening .....	23, 46
Molecular-Devices .....	44	Sensor .....	14
Multikomponenten Sensorsysteme (MULKS) .....	19	sensorbasierte Meßmethoden .....	13
nichtsensorbasierte Meßmethoden .....	19	Sensorsysteme .....	16, 17
Oberflächenionisation .....	39	Sensortechnik .....	13
Ohmicron .....	44	SmartSense .....	44
on-line-ICP-MS (Inductiv Coupled Plasma-Massenspektrometrie) .....	36	Sonderverfahren .....	37
optochemische Sensoren (OCS) .....	17	stickstoffhaltige Kohlenwasserstoffe ..	39
organische Schadstoffe .....	6	STIP Stipox-norm .....	74
OXYTEC Protoplasten Biotest .....	74	Teststäbchen .....	23
PAB-Product .....	75	Threshold Immuno-Ligand Assay- System .....	44
PAK-Analytik .....	38	Transia .....	76
PAK-Schnelltestverfahren .....	38	TU Berlin EuCyano-Bakterienelektrode .....	74
photothermische Spektroskopie .....	38	Verfahrensübersicht .....	45
Polarograph/Voltameter .....	22	Wasserproben .....	8
Probennahme und Probenaufbereitung. 8		<b>W</b>	
Projekt .....	5	Wasserprobe	
Prototypenverzeichnis .....	66	Probenvorbereitung .....	8
Prüfröhrchen .....	23	Vor-Ort-Analytik .....	8
Quad 4 (Fa. MTI) .....	26	<b>Z</b>	
Quarzsensoren .....	18	Zweikanalfluorimeter .....	67
Quecksilberanalytik .....	20		