

Chimia 48 (1994) 176–181
 © Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft
 ISSN 0009–4293

Irritierende Vielfalt in der instrumentellen Elementanalytik: Das Konzept ist immer dasselbe

Niklaus Kläntschi*, Peter Lienemann, Peter Richner und Heinz Vonmont

Abstract. Modern analytical chemistry relies on a multiplicity of different instrumental methods, their ranges of application being partially overlapping, partially supplementary. The universally utilizable dream method, which solves all possible problems does not exist. Nevertheless, every existing instrumental analytical method can be described as a modular composition including three steps: provocation, reaction, and detection. Based on this concept, the irritating multiplicity of existing analytical methods can be well surveyed.

1. Einleitung

Eine typische Elementanalyse aus der Zeit der Römer galt dem Goldgehalt von Münzen oder Schmuckgegenständen (Fig. 1). Die Ansprüche an die Analytik sind heute höher und gleichzeitig detaillierter. Wie andere Bereiche ist auch die chemische Analytik komplexer geworden. Es genügt nicht mehr, qualitativ das Hauptelement einer Probe zu bestimmen. Gefragt sind vielmehr die quantitativen Anteile mehrerer bis aller Elemente in der Probe, vom Hauptanteil bis in den Ultraspurenbereich ($< \mu\text{g}/\text{kg}$). Die Geburtsstunde der instrumentellen Analytik darf auf die Mitte des 19. Jahrhunderts gesetzt werden. *Bunsen* und *Kirchhoff* haben damals mit Hilfe der optischen Spektralanalyse die beiden Alkalimetalle Rubidium und Cäsium entdeckt und spurenanalytisch nachgewiesen. Der zunehmend rasante Prozess der kontinuierlich gestiegenen Anforderungen an die Analytik ist an der historischen Entwicklung des Begriffs Spuren im Lauf unseres Jahrhunderts ersichtlich (Fig. 2a). Eine Beschleunigung

der Entwicklung in der analytischen Chemie in jüngster Zeit lässt sich am Beispiel mikroelektronischer Bauteile eindrucksvoll nachweisen (Fig. 2b).

Unabhängig von dieser Entwicklung ist das Ziel einer Analyse nach wie vor dasselbe geblieben, nämlich die qualitative und quantitative Bestimmung von charakteristischen Inhaltsstoffen eines Untersuchungsobjektes. Neben Art und Massenanteil der darin enthaltenen Elemente interessieren in zunehmendem Masse auch deren chemische Bindungsform sowie die räumliche Anordnung und Verteilung der Atome im Festkörper. Die analytische Chemie ist bestrebt, diese materialspezifischen Informationen dem Fragesteller verfügbar zu machen. Dabei sollte der analytische Chemiker nicht nur als Datenlieferant in Erscheinung treten. Mit der Beurteilung der Daten schafft er Grundlagen für wichtige, unter Umständen weitreichende Entscheide.

Analytisch geht es also darum, im Material gespeicherte Information auf den Beobachter zu übertragen und nutzbar zu machen. Mit den menschlichen Sinnesorganen sind bestimmte Materialeigenschaften wie Aussehen, Farbe oder Kristallhabitus noch erfassbar. Sie gestatten jedoch nur beschränkt Rückschlüsse auf die stoffliche Zusammensetzung. Weder eine exakte Quantifizierung von Stoffeigenschaften noch eine Bestimmung von Spurenelementgehalten sind mit Hilfe der menschlichen Sinnesorgane allein möglich. Die



Fig. 1. Ein römischer Legionär prüft eine Goldmünze und wurde mit Salz (Salär) bezahlt. Die heutigen Analytiker prüfen Salz und sollten mit Gold bezahlt werden.

im Material enthaltene Information muss folglich in eine Form übergeführt werden, die von einem Detektionssystem entschlüsselt und an den Beobachter übersetzt werden kann, sei er nun Chemiker, Physiker, Biologe, Ingenieur, Umweltwissenschaftler, Mediziner, Jurist oder Politiker.

Die Zahl der bekannten analytischen Methoden ist gross und ständig wachsend. Chemische Methoden werden immer mehr durch physikalische abgelöst, Absolutmessungen durch Relativbestimmungen. Insbesondere werden gravimetrische, titrimetrische und kolorimetrische Verfahren durch spektrometrische, elektroanalytische und chromatographische ersetzt. Statt Einzelelement- sind vermehrt Mehrelementanalysen gefragt. Sequentielle Techniken, bei denen verschiedene Elemente nacheinander erfasst werden, machen Quasi-Simultanmethoden und echten Simultanmethoden Platz, mit denen viele Elemente praktisch gleichzeitig, bzw. gleichzeitig registriert werden.

Folgende Methoden sind typische Leistungsträger im modernen analytischen Laboratorium der anorganischen Elementbestimmung: die optische Emissionsspektrometrie, insbesondere die Plasma-Emission (ICP-OES), die Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS), die Atomabsorption (AAS), die wellenlängen- und energiedispersive Röntgen-Fluoreszenz (XRF) inklusive der neueren Methode der Totalreflexion (TXRF), die Röntgen-Diffraktion (XRD), die Rasterelektronenmikroskopie

*Korrespondenz: Dr. N. Kläntschi
 Eidgenössische Materialprüfungs- und
 Forschungsanstalt
 Überlandstrasse 129
 CH-8600 Dübendorf

mit wellenlängen- oder energiedispersivem Detektionssystem (REM), die Ionenchromatographie (IC). Schliesslich gehören miteinander kombinierte chromatographische und spektrometrische Verfahren dazu. Laufend werden neue Techniken entwickelt. Dies macht es zunehmend schwierig, die Übersicht zu wahren. Die Gesamtheit der in einem einzigen Heft einer renommierten analytischen Zeitschrift aufgelisteten Methoden möge diese Vielfalt illustrieren (Tab. 1). Hinter der kaum überblickbaren Fülle von Methoden verbirgt sich jedoch ein gemeinsames Konzept. Dieses soll nachfolgend erläutert werden.

Tab. 1. Vielfalt der in einem einzigen Heft einer analytischen Zeitschrift behandelten Instrumentalmethoden

Journal of Analytical Atomic Spectrometry 1993, 8, (7) October

- Radiofrequency powered glow discharges
- Helium discharge for hollow anode furnace atomization nonthermal excitation spectrometry
- Microwave-induced plasmas
- Electrothermal vaporization microwave-induced plasma atomic emission spectrometry
- Inductively coupled plasma mass spectrometry
- Automated multiple-collector thermal ionization mass spectrometry
- Zeeman-effect electrothermal atomic absorption spectrometry
- X-Ray fluorescence spectrometry and spark ablation inductively coupled plasma atomic emission spectrometry
- Resonance ionization mass spectrometry
- Inductively coupled plasma multiple-collector mass spectrometry
- Radiofrequency glow discharge quadrupole mass spectrometry

2. Das modulare Konzept

Um die in der Probe gespeicherte Information dem Beobachter oder Fragesteller verfügbar zu machen, werden analytische Methoden eingesetzt. Das modulare Konzept beschreibt die damit verbundene Abfolge des Informationsflusses vom Probenmaterial zum Detektor mittels einer analytischen Methode. Implizit damit verbunden ist die Provokation der Probe. Die Provokation besteht meistens in der gezielten, selektiven Zuführung von Energie. Mit Absicht wurde die Bezeichnung Provokation gewählt, um den je nach Art der Provokation unterschiedlichen, mitunter jedoch massiven Prozess der Störung des atomaren oder molekularen Systems aus seinem Gleichgewichtszustand zu veranschaulichen. Der Begriff Provokation kann in diesem Zusammenhang – muss aber nicht – mit demjenigen der Anregung übereinstimmen. Die gewählte Provokation hängt von der Art des Untersuchungsmaterials und der analytischen Fragestellung ab.

Die Provokation veranlasst die Probe zu einer Reaktion und führt zu einer chemischen oder physikalischen Veränderung oder einer Wechselwirkung mit dem Provokationsmodul. Die Reaktion ermöglicht dem Beobachter die Detektion daraus übertragener Informationen. Mit anderen Worten, der Prozess jeder analytischen Bestimmung lässt sich als Abfolge von Provokation, Reaktion und Detektion beschreiben (Fig. 3, oben).

Das Resultat einer Analyse, die gewünschte Information also, entsteht aus der Interaktion des Analysensystems mit dem zu untersuchenden Material. Während sich der römische Legionär (Fig. 1) für die Provokation noch seiner Zähne bediente und die Reaktion der Münze, sprich ihre Verformbarkeit, mit seinen menschlichen Sinnen detektierte, bedient

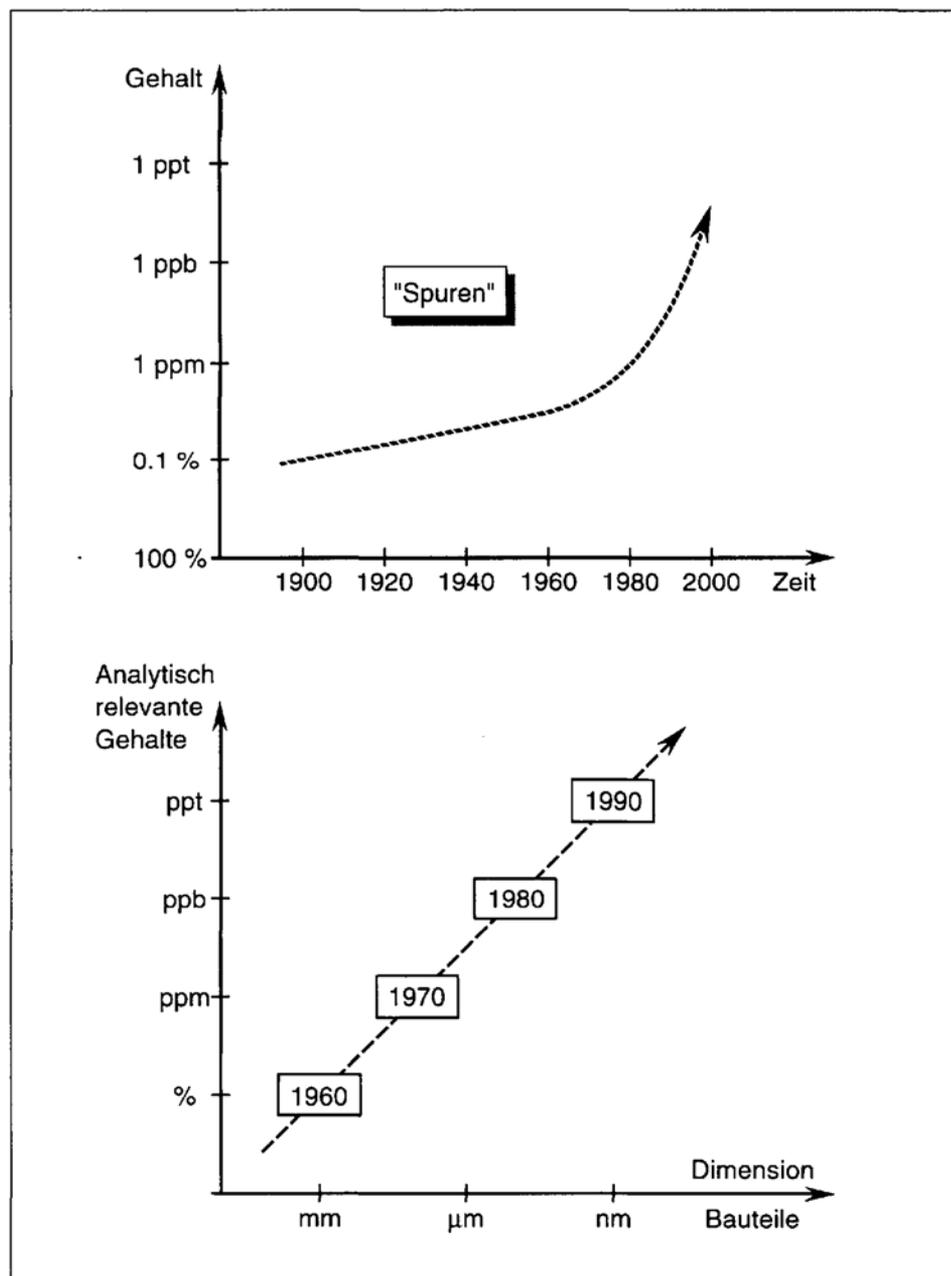


Fig. 2. a) Historische Entwicklung des Begriffes 'Spuren' in einer festen Materialprobe (y-Achse in logarithmischer Skalierung). b) Miniaturisierung elektronischer Bauteile und damit gekoppelte Entwicklung analytisch relevanter Gehalte für die verwendeten Materialien (Achsen in logarithmischer Darstellung)

man sich heutzutage modernster Techniken. Der Stand der Technik offeriert dem Analytiker eine ganze Reihe von Möglichkeiten der Provokation und Detektion. Naturgemäß werden durch eine bestimmte Art der Provokation verschiedenartigste Reaktionen an Proben ausgelöst und können detektiert werden. Für die Provokation und die Detektion stehen hochentwickelte, leistungsfähige und sehr nachweisstarke Analysensysteme zur Verfügung, die im Prinzip modular aufgebaut sind. Damit lassen sich sehr detaillierte Informationen, d.h. Erkenntnisse über die Probe gewinnen.

Am Beispiel der Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) sei das grundlegende, modulare Konzept illustriert (Fig. 3, unten).

2.1. Die Provokation

Die in der Praxis gebräuchlichen Provokationen lassen sich grob in vier Kategorien einteilen:

- Thermische Provokation
- Provokation mit elektromagnetischer Strahlung
- Provokation durch Teilchenbeschuss
- Chemisch-physikalische Provokation

Thermische Provokation erfolgt meist in Flammen, Plasmen oder elektrischen Entladungen. Die dabei erreichten Temperaturen sind so hoch, dass die meisten chemischen Bindungen aufgebrochen werden und die Probe praktisch vollständig atomisiert wird. In Abhängigkeit der erreichten Temperatur wird ein Teil der Atome zusätzlich ionisiert. Bei dieser Art

der Provokation wird Probenmaterial verbraucht. Die vorgelagerten, variablen Systeme der Probeneinführung sind zwar notwendig, zählen aber nicht zur Provokation. Die Probeneinführung dient dazu, das Probenmaterial in eine für die Provokation geeignete Form überzuführen, also beispielsweise durch pneumatische Zerstäubung und Transport des gebildeten Aerosols ins Plasma bei der ICP-OES. Aus einer ganzen Reihe bekannter Probeneinführungsmethoden seien einige typische genannt: Zerstäubung bzw. Vernebelung, Fliessinjektion, Laser-Ablation, chromatographische Verfahren.

Für eine Provokation mit elektromagnetischer Strahlung wird der ganze Wellenlängenbereich von harter Röntgenstrahlung bis in den Infrarotbereich ausgenutzt, wobei abhängig von der eingestrahelten Energie unterschiedliche Reaktionen ausgelöst werden. In der Mehrzahl der Fälle wird die Probe dabei nicht zerstört: es handelt sich um zerstörungsfreie Analysetechniken. Die Probe bleibt vollständig erhalten.

Statt mit elektromagnetischer Strahlung kann eine Probe auch durch Teilchenbeschuss provoziert werden. Bei den Teilchen handelt es sich durchwegs um geladene Spezies, Elektronen oder Kationen, deren Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit mit Hilfe elektrostatischer Felder exakt kontrolliert werden können. Es lassen sich damit diskrete Bereiche einer Festprobe selektiv provozieren. Diese Möglichkeit wird genutzt, um Analysen mit hoher lateraler Auflösung zu erreichen, beispielsweise beim Elektronenmikroskop und der Elektronenstrahlmikrosonde.

Chemisch-physikalische Provokationsmethoden haben ihre Wurzeln in der klassischen Nasschemie. Sie basieren einerseits auf chemischen und elektrochemischen, andererseits auf chromatographischen Prinzipien. Die chemische Provokation besteht vielfach in der gezielten Zugabe eines chemischen Reagens, mit dem der Analyt reagiert.

In gewissen Fällen erfolgt die Provokation zweistufig kombiniert, wie bei der weitverbreiteten Atomabsorption sowie bei der Atomfluoreszenz. Erst die Kombination von thermischer und elektromagnetischer Provokation führt zu analytisch nutzbaren Reaktionen, nämlich der elementspezifischen Strahlungsabsorption bzw. -fluoreszenz.

In gewissen Fällen erfolgt die Provokation zweistufig kombiniert, wie bei der weitverbreiteten Atomabsorption sowie bei der Atomfluoreszenz. Erst die Kombination von thermischer und elektromagnetischer Provokation führt zu analytisch nutzbaren Reaktionen, nämlich der elementspezifischen Strahlungsabsorption bzw. -fluoreszenz.

2.2. Die Reaktion

Provokationen der beschriebenen Art können eine oder mehrere Reaktionen im Sinn von Wechselwirkungen auslösen. Detektiert wird diejenige, welche die gewünschte analytische Information liefert. Im Zentrum stehen Reaktionen, die Emission, Absorption oder Reflexion elektromagnetischer Strahlung bzw. Emission oder Reflexion von Teilchen, meist Ionen oder Elektronen, zur Folge haben. Im Falle chromatographischer Verfahren besteht die Reaktion in der Wechselwirkung mit einer stationären Phase. Bei elektrochemischen Verfahren bestehen die Reaktionen aus Ladungsaustausch, d.h. Redox-

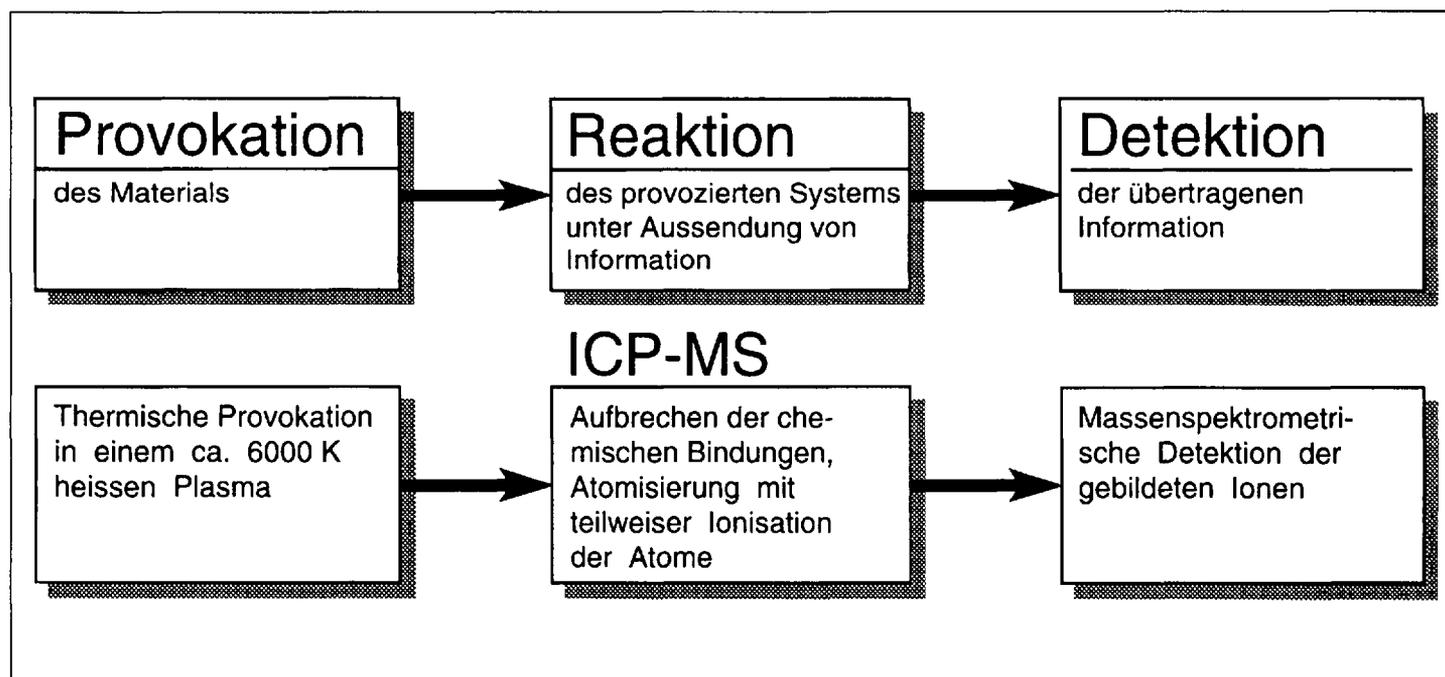


Fig. 3. Oben: Grundlegendes modulares Konzept analytisch-chemischer Instrumentalmethoden mit dem Informationsfluss vom Probenmaterial zum Detektor. Unten: Das modulare Konzept am Beispiel der Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS)

Tab. 2. Die Module Provokation, Reaktion und Detektion etablierter instrumenteller Methoden (EMS = elektromagnetische Strahlung)

Methode	Provokation	Reaktion	Detektion
Atomemission (ICP-OES, Flammen-OES, Funken-OES, GD-OES)	Thermisch durch Plasmen, Flammen, Funken oder Glimmentladungen	Verdampfung der Probe, Aufbrechen der chemischen Bindungen mit teilweiser Ionisation der Atome, Übergang der Atome und Ionen in angeregte Zustände, Relaxation der angeregten Zustände unter Emission von EMS	Intensität der emittierten Strahlung auf element-spezifischen Wellenlängen
Anorganische Massenspektrometrie (ICP-MS, GD-MS)	Thermisch durch Plasmen und Glimmentladungen	Verdampfung der Probe, Aufbrechen der chemischen Bindungen mit teilweiser Ionisation der Atome	Anzahl Ionen als Funktion des Verhältnisses von Masse zu Ladung
Atomabsorptions-spektrometrie (Flammen-AAS und ETA-AAS)	1. Thermisch durch chemische Flammen oder elektrisch beheizte Öfen 2. Bestrahlung mit element-spezifischer EMS	1. Verdampfung der Probe, Aufbrechen der chemischen Bindungen 2. Übergang der Atome oder Ionen in angeregte Zustände unter Absorption der eingestrahlten EMS	Absorption der eingestrahlten EMS auf elementspezifischen Wellenlängen
Röntgen-Fluoreszenzspektrometrie (wellenlängen- und energiedispersive XRF)	Bestrahlung mit EMS im Röntgen-Bereich	Ionisierung kernnaher Elektronenschalen, Emission von elementspezifischer EMS bei nachfolgenden Elektronenübergängen	Intensität der EMS in Abhängigkeit ihrer Wellenlänge oder Energie
Röntgen-Diffraktion (XRD)	Bestrahlung mit monochromatischer EMS im Röntgen-Bereich	Beugung der Röntgen-Strahlen an Atomen von Kristallgittern, Interferenz der gestreuten Strahlung in definierte Richtungen (Reflexion der Röntgen-Strahlen an Netzebenen von Kristallen)	Intensität der EMS als Funktion des Beugungswinkels
Elektronenstrahl-Mikroanalyse (ESMA)	Beschuss mit lokal fokussierbarem Elektronenstrahl	Ionisierung kernnaher Elektronenschalen, Emission von elementspezifischer EMS bei nachfolgenden Elektronenübergängen	Ortsaufgelöste Intensität der EMS in Abhängigkeit ihrer Wellenlänge
Chromatographie (LC, GC)	Anbieten der Möglichkeit zur affinitätsbezogenen Verteilung zwischen zwei Phasen	Physikalisch-chemische Wechselwirkung der Spezies in der mobilen Phase mit der stationären Phase	Menge der eluierten Spezies als Funktion der Zeit

prozessen, die einen Stromfluss zur Folge haben und lokalen Konzentrationsänderungen an Phasengrenzflächen, die eine Potentialänderung hervorrufen.

2.3. Die Detektion

Die durch die Reaktion erzeugte analytische Information weist zwei Dimensionen auf, eine qualitative und eine quantitative. Die qualitative Information, d.h. die Spezifität für ein Element, ein Isotop oder eine Verbindung ist in einer bestimmten Wellenlänge, einem Verhältnis Masse/Ladung, einem elektrischen Potential oder einer Retentionszeit enthalten. Dies bedingt eine Selektion. Provokationssysteme sind in der Regel nicht selektiv. Deshalb beinhalten viele Detektionssysteme ein vorgeschaltetes dispersives System, z.B. im Spektrometer ein optisches Gitter oder Filter. Das dispersive System gestattet die Auftrennung der qualitativen Information, d.h. der elektromagnetischen Strahlung aufgrund der Wellenlänge oder

der geladenen Teilchen in einer Gasphase nach ihrem Verhältnis Masse/Ladung.

Die quantitative Information ist in Form einer Intensität, eines Photonen- oder Massenflusses pro Zeiteinheit oder einem elektrischen Strom enthalten und wird nach der Selektion registriert.

Sowohl elektromagnetische Strahlung als auch geladene Teilchen lassen sich messtechnisch sehr gut erfassen. Strahlungs- und Teilchendetektoren sind daher auch weit verbreitet. Die Detektion elektromagnetischer Strahlung umfasst, ähnlich wie bei der Provokation, den ganzen Wellenlängenbereich von harter Röntgen-Strahlung bis zum Infrarot- bzw. zum Radiowellenbereich. Verschiedenste Detektionssysteme wie Fotomultiplier, Fotodioden, Charge Coupled Devices (CCD), Proportional-Gaszähler, Szintillationszähler, aber auch Fotoplatten oder Filme kommen zum Einsatz. Geladene Teilchen andererseits werden im Vakuum in Gasform massenspektrometrisch detektiert. Teil-

chen in Lösung, d.h. Ionen werden durch Strom- oder Potentialmessung elektrochemisch nachgewiesen.

Die Detektion chemischer Reaktionen erfolgte früher subjektiv vor allem optisch von bloßem Auge durch Beobachtung von Farbänderungen oder Auftreten einer Trübung. Im modernen Laboratorium wird der Endpunkt mittels Elektroden, Sensoren und weiteren Detektoren objektiv registriert.

Das Detektionssystem übernimmt in einem weiteren Schritt die Aufgabe, die registrierte analytische Information in eine mit den menschlichen Sinnen erfassbare und interpretierbare Form überzuführen.

3. Umsetzung in die Praxis

Aufgrund der dargestellten Betrachtungen lässt sich jedes analytische Verfahren aus Provokation, Reaktion und Detektion modular aufbauen. In Tab. 2

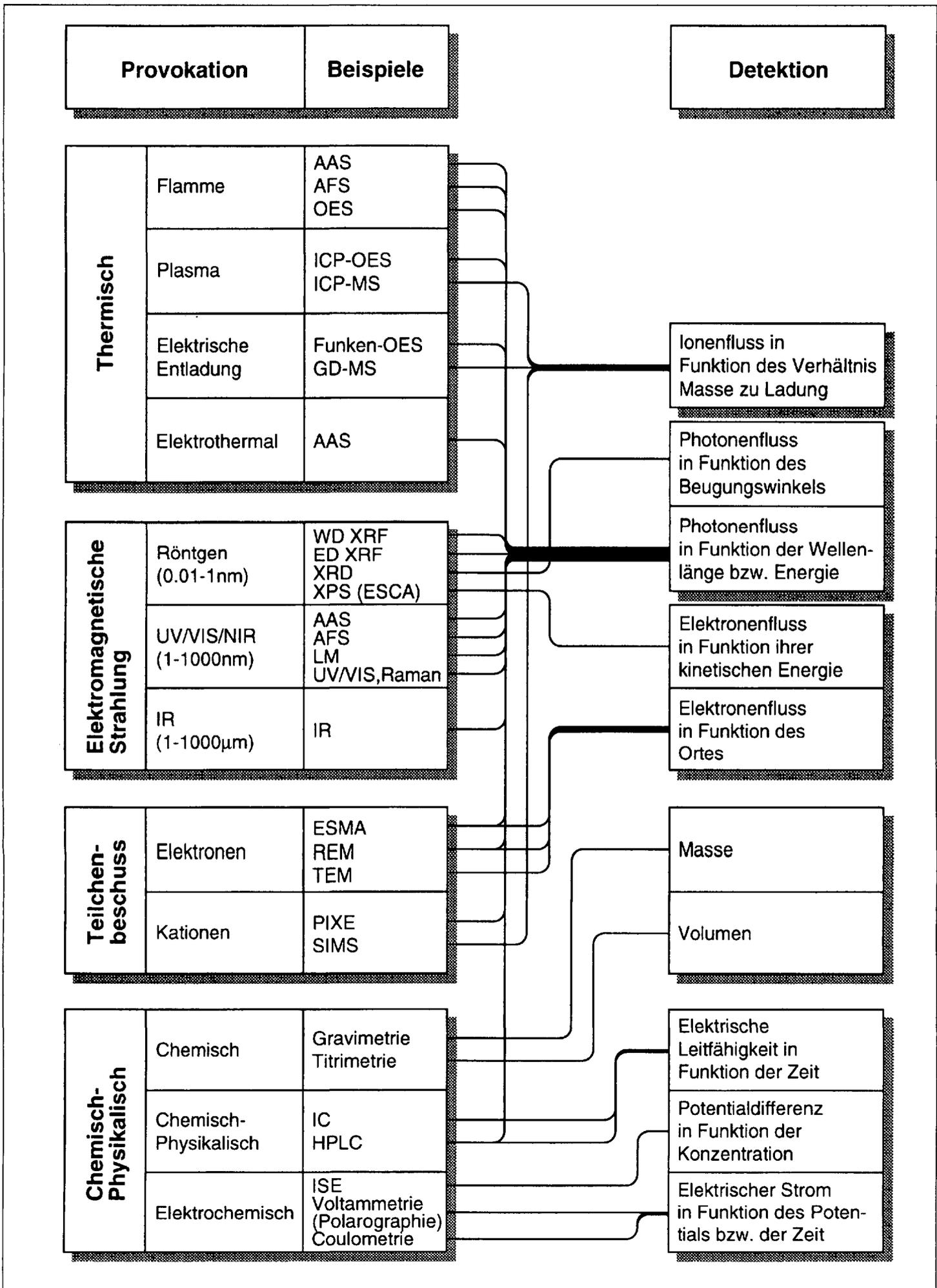


Fig. 4. Kombinationen wichtiger Provokations- und Detektionssysteme am Beispiel etablierter Instrumentalmethoden

sind die gängigsten Methoden in ihre Einzelmodule aufgeschlüsselt. Bestimmte Module sind vielseitig anwendbar, d.h. mehrfach kombinierbar mit anderen Modulen. Ein typisches Beispiel ist das induktiv gekoppelte Plasma ICP mit seinen fast universellen Eigenschaften. Es lässt sich mit verschiedenen Detektionsmodulen koppeln, beispielsweise mit dem

- sequentiellen oder simultanen optischen Emissionsspektrometer,
- dem Quadrupolmassenspektrometer mit Einheitsmassenauflösung oder dem hochauflösenden Massenspektrometer.

Generell kann eine thermische Provokation, sei es mit Flammen, Plasmen oder Lasern, verschiedenste detektierbare Reaktionen auslösen wie

- Atom-Emission, in Kombination mit elektromagnetischer Strahlung aber ebenso
- Atom-Absorption oder
- Atom-Fluoreszenz.

Andererseits können verschiedene Arten der Provokation ein und dieselbe Reaktion auslösen. So lässt sich beispielsweise Röntgen-Fluoreszenz erzeugen mit

- Röntgen-Strahlung
- einem Elektronenstrahl oder
- einem Kationenstrahl.

Einzelmodule können zu verschiedenartigsten instrumentellen Methoden kombiniert werden. Dadurch resultiert die irritierende Vielfalt analytischer Verfahren. Fig. 4 repräsentiert einen wichtigen Teil in der Praxis realisierter Lösungen von Provokations- und Detektionssystemen, illustriert an etablierten Methoden. Die charakteristischen Gesamteigenschaften jeder Methode ergeben sich aus der komplexen Kombination der individuellen Eigenschaften der Einzelmodule Provokation, Reaktion, Detektion und deren gerätetechnischen Umsetzung.

Ob der unbestreitbaren Faszination, die von all diesen Methoden ausgeht, darf nicht vergessen werden, dass sie lediglich Mittel zum Zweck sind. Dieser besteht darin, eine bestimmte Probe zu analysieren, um damit eine Fragestellung zu beantworten. Die Analyse selbst steht im Spannungsfeld von zeitlichen, infrastrukturellen und materiellen Randbedingungen (Analyse an Ort und Stelle oder im Labor, Kosten und Termine, verfügbare Methoden), ist abhängig von der Probenbeschaffenheit (Aggregatzustand, Proben dimension, Probenmenge, Eigenschaften der Matrix) sowie der eigentlichen analytischen Fragestellung (Elemente oder Spezies, welche, wieviele, Konzentrationsbereich, analytische Bestimmungsgrenzen, erforderliche Präzision und Genauigkeit). Aus dieser komplexen Situation heraus

wird klar, dass es keine sogenannte Traummethode geben kann, die alle möglichen Fragen an allen in der Praxis vorkommenden Untersuchungsobjekten unter allen denkbaren Bedingungen beantworten könnte. Dies ist die Hauptursache für das Vorhandensein einer derart grossen Zahl etablierter Methoden. Sie werden jeweils spezifisch auf bestimmte Problemstellungen angewandt. Oftmals liefern sie jedoch erst im Verbund mit weiteren Methoden die gewünschte Antwort.

4. Ausblick

Die stetig steigenden Anforderungen an die Analytik werden auch weiterhin dafür sorgen, dass zusätzlich neue Methoden entwickelt werden. Die Erfahrung zeigt, dass sich jeweils nur wenige wirklich in der Praxis durchsetzen können. Aber auch zukünftige Methoden, mögen sie noch so exotisch und komplex erscheinen, werden auf demselben universellen Konzept von Provokation, Reaktion und Detektion beruhen.

Für kritische Manuskriptdurchsicht und wertvolle Anregungen wird *Samuel Wunderli* (EMPA), für die künstlerische Gestaltung von *Fig. 1 Carlos Azagra* (Barcelona) an dieser Stelle herzlich gedankt.

Eingegangen am 5. April 1994

Abkürzungen (alphabetisch)

AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
AFS	Atomfluoreszenzspektrometrie
ED XRF	Energiedispersive Röntgen-Fluoreszenzspektrometrie (X-ray fluorescence spectrometry)
EMS	Elektromagnetische Strahlung
ESMA	Elektronenstrahlmikroanalyse
ETA-AAS	Atomabsorptionsspektrometrie mit elektrothermaler Atomisierung
Flammen-OES	Optische Emissionsspektrometrie mit Flammen
Funken-OES	Optische Emissionsspektrometrie mit Funken
GC	Gaschromatographie
GD-MS	Glimmentladungsmassenspektrometrie (glow discharge mass spectrometry)
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (high performance liquid chromatography)
IC	Ionenchromatographie
ICP	Induktiv gekoppeltes Plasma (inductively coupled plasma)
ICP-MS	Plasmamassenspektrometrie (inductively coupled plasma mass spectrometry)
ICP-OES	Plasmaemissionsspektrometrie (inductively coupled plasma optical emission spectrometry)

IR	Infrarotspektroskopie
ISE	Ionenselektive Elektroden
LC	Flüssigchromatographie (liquid chromatography)
LM	Lichtmikroskopie
NIR	Nahes Infrarot
OES	Optische Emissionsspektrometrie (optical emission spectrometry)
PIXE	Partikel-induzierte Röntgen-Emission (particle induced X-ray emission)
Raman	Raman-Spektroskopie
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SIMS	Sekundärionenmassenspektrometrie (secondary ion mass spectrometry)
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
TXRF	Totalreflexions-Röntgen-Fluoreszenzspektrometrie
UV/VIS	UV/VIS-Spektroskopie
WD XRF	Wellenlängendispersive Röntgen-Fluoreszenzspektrometrie (X-ray fluorescence spectrometry)
XPS (ESCA)	X-Ray photoelectron spectroscopy (Elektronenspektroskopie für chemische Analyse)
XRD	Röntgen-Diffraktion (X-ray diffraction)
XRF	Röntgen-Fluoreszenzspektrometrie (X-ray fluorescence spectrometry)