

1 Grundlagen der Analytischen Chemie

1.1 Gegenstand und Bedeutung in der Gesellschaft

Historisches

Die moderne Chemie basiert auf der chemischen *Theorie*, der chemischen *Synthese*, der chemischen *Technologie* und der *analytischen Chemie*. Der analytische Aspekt läßt sich bis zu den Anfängen der Chemie zurückverfolgen. Zur Erzgewinnung, zur Heilmittelherstellung, auf der Suche nach dem Lebenselixier oder bei den Versuchen der Umwandlung unedler Metalle in Gold mußten Stoffe getrennt, zerlegt und anschließend bestimmt werden. Parallel zur Chemie entwickelte die Analytische Chemie ihre eigenen experimentellen Techniken und war bereits im 19. Jahrhundert ein etabliertes Teilgebiet der Chemie. Einer ihrer Vertreter, J. J. BERZELIUS (1779-1848), formulierte zum Beispiel: „Bei der qualitativen Untersuchung muß man in der Probe alle Stoffe untersuchen, welche man darin zu vermuten Ursache hat, und zugleich beweisen, daß sich keine anderen darin befinden“. Bereits im Jahre 1821 veröffentlichte C. H. PFAFF ein „Handbuch der analytischen Chemie für Chemiker, Staatsärzte, Apotheker, Oekonomen und Bergwerks-Kundige“.

„Die wissenschaftlichen Grundlagen der Analytischen Chemie“ wurden in einem 1894 erschienenen Buch von W. OSTWALD beschrieben. Er begann darin, viele Phänomene der Analytischen Chemie auf den Grundlagen der sich entwickelnden Physikalischen Chemie zu erklären. Physikalisch-chemische Grundlagen machen mittlerweile allerdings nur einen Bruchteil der in der Analytischen Chemie verankerten Teildisziplinen aus. Grundlagen der Anorganischen Chemie waren insbesondere im Zusammenhang mit der Elementanalytik wichtig. Die Organische Chemie spielte bei der Entwicklung des chromatographischen Prinzips zur Analyse organischer Verbindungen eine herausragende Rolle. Mit der Entwicklung von Hochleistungsmethoden in der Spektroskopie und in der Chromatographie in der Mitte des 20. Jahrhunderts wurden wesentliche Elemente der Physik, der Meßtechnik, der In-

formationswissenschaften, der Materialwissenschaften und in letzter Zeit auch der Biologie und Gentechnik in die Analytische Chemie einbezogen.

Die Analytik bestimmt heute als Querschnittsdisziplin den Fortschritt in der Wissenschaft, der Technik und in der Medizin mit. Sie ist bei der Produktion von Mega-Chips genauso wichtig wie bei der Entwicklung unzähliger technischer Produkte oder von Lebens- und Arzneimitteln. Analytische Methoden werden für klinische Tests, zur Kontrolle und Überwachung von Trinkwasser, Schwimmbädern oder Abwässern sowie zur Bestimmung von Rückständen von Pflanzenschutzmitteln oder Schwermetallen gebraucht. Selbst die Archäologie oder Museumskunde profitieren von der modernen Analytik, wenn es etwa um die Prüfung der Echtheit eines „alten Meisters“ oder von Fundstücken geht.

Der Analytiker als wissenschaftlicher Detektiv

Am Beginn der Entwicklung beschränkten sich die analytischen Untersuchungen auf die *Zusammensetzung von Stoffen* bzw. von Stoffgemischen in Bezug auf ihre Hauptbestandteile. Später kamen Methoden dazu, um *Spuren*, das heißt kleinste Beimengungen eines Elementes oder einer chemischen Verbindung, analysieren zu können. Auch die Aufklärung der *Struktur* von Molekülen und Festkörpern wurde ein wichtiges Arbeitsfeld des Analytikers. Gegenwärtig stellt sich die Analytische Chemie zusätzlich Problemen der *Kontrolle industrieller Prozesse* oder der *Überwachung unserer Umwelt* durch Entwicklung dedizierter Analysensysteme etwa unter Einsatz chemischer Sensoren.

Die Aufgaben der Analytischen Chemie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Analytische Chemie befaßt sich mit der Entwicklung von Methoden, Geräten und Strategien zur Untersuchung der qualitativen und quantitativen Zusammensetzung von Stoffen und chemischen Individuen sowie deren räumlicher Struktur und ihrem dynamischen Verhalten.

Den Untersuchungsgegenstand des Analytikers bezeichnet man ganz allgemein als *Probe*. Egal, ob es sich dabei um ein Abwasser, einen Stahl oder eine unbekannte chemische Verbindung handelt.

Bevor man mit der analytischen Untersuchung einer Probe beginnen kann, muß die *Zielstellung* klar formuliert sein. Im einzelnen ist zu fragen:

- **Wo**, das heißt in welchem *Untersuchungsobjekt*, ist etwas zu analysieren? Im einfachsten Fall wird eine unbekannte Substanz übergeben, deren Struktur aufgeklärt werden soll. Soll ein Werkstoff, ein Boden oder Luft analysiert werden, ist zu entscheiden, wie die *Probenahme* zu erfolgen hat bzw. wie man eine *repräsentative Probe* erhält.
- **Was** soll analysiert werden? Geht es um die Aufklärung der Struktur einer chemischen Substanz oder um die Oberflächenstruktur eines Festkörpers? Soll die Zusammensetzung einer Probe ermittelt werden oder ist der pH-Wert in einem Gewässer zu überwachen?
- **Wozu** dient die analytische Untersuchung? Ist die Charge in einem Stahlwerk aufgrund der Analysendaten freizugeben, soll die Einhaltung eines Grenzwertes für ein Dioxin überprüft werden oder weiß der Auftraggeber vielleicht gar nicht, wozu er die Analyse eigentlich braucht?

Der Analytiker betätigt sich also nicht allein bei der Entwicklung und Ausführung der Analyse, sondern er ist bei der Erarbeitung der konkreten *Fragestellung*, der *Probenahme* und der *Interpretation* der Analysenergebnisse gefordert. Bei der Ausführung der Analyse muß er auch Kompromisse eingehen, da in seinem Labor nicht jedes denkbare Analysengerät vorhanden sein kann. Die methodischen Möglichkeiten werden durch die verfügbaren Geräte, die im Labor vorhandenen Erfahrungen und die Qualifikation des Personals bestimmt.

Aufgabenbereiche der Analytik

Betrachten wir die zentralen Aufgabenbereiche des Analytikers laut unserer Definition näher. Wenn die Zusammensetzung einer Probe untersucht werden soll, bedeutet dies, die darin enthaltenen Elemente und chemischen Verbindungen zu analysieren. Wir sprechen daher von der *Element- und Verbindungsanalytik*. Für die Untersuchung der Struktur chemischer Verbindungen oder von Festkörpern hat sich der Begriff *Strukturanalytik* eingebürgert. Das dynamische Verhalten von Stoffen in einer Produktionsanlage wird in der *Prozeßanalytik* untersucht.

Element- und Verbindungsanalytik

Bei der Untersuchung der Zusammensetzung einer Probe unterscheiden wir Analysen, die nach der *Art* und solche, die nach der *Menge* ausgeführt werden.

Qualitative Analyse

Die Ermittlung der Zusammensetzung einer Probe nach der **Art** eines chemischen Individuums wird als *qualitative Analyse* bezeichnet. Es geht um eine Ja-Nein-Entscheidung, ob ein Element oder eine Verbindung auftritt oder nicht. Aus dem anorganischen Grundpraktikum ist uns hierzu der Trennungsgang bewußt, bei dem die Anwesenheit eines Elementes aus einer speziellen Reaktion abgeleitet wurde. Heute ergeben sich qualitative Fragestellungen zum Enthaltensein von Spurenelementen in einem Halbleiter-Chip, zu Verunreinigungen in der Luft, zur Nachweisbarkeit eines Dopingmittels oder zu den Nebenprodukten in einer chemischen Synthese.

Voraussetzung für die Entscheidung der Anwesenheit eines Stoffes in der Probe ist die Auswertung eines *analytischen Signals*. Im einfachsten Fall beobachten wir mit dem Auge eine Färbung – etwa einen schwarz gefärbten Sulfidniederschlag bei der Anwesenheit von Kupfer. Ist die Färbung intensiv genug, leiten wir daraus die Anwesenheit des vermuteten Elementes ab. Wir bedienen uns dabei stillschweigend einer Farbskala, die auch zur halbquantitativen oder bei instrumenteller Ausmessung der Färbung sogar zur quantitativen Analyse ausgenutzt werden kann.

Der Unterschied zwischen einer qualitativen und quantitativen Analyse ist daher nicht grundsätzlich. Man kann die qualitative Analyse als quantitative Analyse mit einer sehr *vergrößerten Anzeige des Signals* auffassen, ohne daß man sich die Mühe macht, die Intensität des Signals oder des visuellen Eindrucks exakt auszuwerten.

Um die Anwesenheit oder Abwesenheit eines Stoffes zweifelsfrei nachzuweisen, braucht man auch für die qualitative Analyse ein *objektives Kriterium*. Dazu werden wir die Nachweisgrenze eines Analysenverfahrens kennenlernen (Abschnitt 1.3). Die *Nachweisgrenze* gibt die geringste nachweisbare Menge oder Konzentration an, die mit einem bestimmten Analysenverfahren noch detektierbar ist. Da die nachweisbare Konzentration nur über die Kalibrierung des Verfahrens gefunden werden kann, ist letztlich eine quantitative Analyse Voraussetzung für eine objektive Entscheidung über die Anwesenheit einer chemischen Spezies in der Probe.

An dieser Stelle lernen wir bereits, daß die qualitative Analyse eines Stoffes von dem *Nachweisvermögen* des verwendeten Analysenverfahrens abhängt. Wenn ich also mit dem Schwefelwasserstoff-Trennungsgang keinen schwarzen Niederschlag erhalten habe, heißt dies noch lange nicht, daß in meiner Probe kein Kupfer enthalten ist. Die Konzentration des Kupfers liegt nur unterhalb des Nachweisvermögens des Trennungsganges für dieses Element. Zur Bestimmung geringster Kupferkonzentrationen müßte ich eines der atomspektroskopischen Verfahren einsetzen, die im Abschnitt 3.2 behandelt werden. Aber auch dann kann nicht behauptet werden, daß Kupfer nicht in meiner Probe enthalten ist, sondern es ist mit dem gewählten Verfahren nicht nachweisbar.

In der Praxis dient die qualitative Analyse immer einer konkreten Fragestellung. Die Konzentration *Null* ist daher nicht gefragt, sondern die Anwesenheit eines Elementes oder einer Verbindung ist immer in einem bestimmten Konzentrationsbereich nachzuweisen. Dafür wird dann das geeignetste Analysenverfahren ausgewählt.

Quantitative Analyse

Die **Menge** eines Elementes oder einer Verbindung wird in der quantitativen Analyse ermittelt. Anstelle der Menge können auch *Konzentrationen* in Lösung oder *Gehalte* in einem Feststoff interessieren. Man bezeichnet die quantitative Element- und Verbindungsanalytik auch als *Konzentrationsanalytik*.

Die Grundlage einer quantitativen Analyse ist die *exakte Auswertung eines analytischen Signals*. Dieses Signal kann im einfachsten Fall ein Gewicht, wie bei der gravimetrischen Analyse, oder eine Färbung sein oder das Signal entsteht in einem komplizierten Prozeß, zum Beispiel bei der Anregung eines Elementes mit einem Laserstrahl.

Man unterscheidet Methoden, bei denen die Intensität eines Signals an einer einzigen Meßstelle (Farbumschlag oder Wellenlänge) ausgewertet wird, von solchen, bei denen viele Meßstellen betrachtet werden, beispielsweise bei Auswertung eines optischen Spektrums. Erstere Methoden sind nur für Einkomponentenanalysen einsetzbar und werden als *eindimensionale* Methoden bezeichnet. Messungen bei mehreren Meßstellen sind *zweidimensionale* Verfahren und können auch zur Mehr- oder Multikomponentenanalyse verwendet werden (Abbildung 1-1).

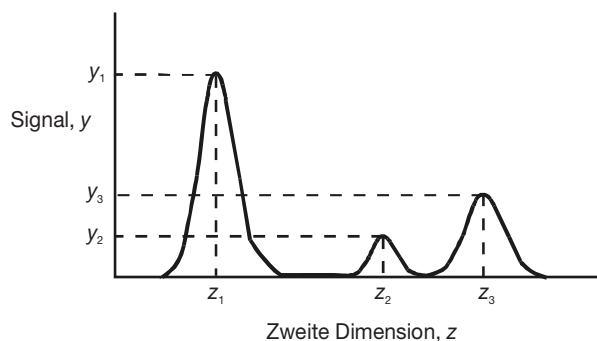
Typischerweise sind die *klassischen Methoden*, wie die Maßanalyse (Gravimetrie und Titrimetrie, Kapitel 2) eindimensional. Zu den zweidimensionalen Methoden gehören die *instrumentellen Methoden*, das heißt die Spektro-

skopie, Chromatographie und Elektroanalytik (Kapitel 3 bis 5). Die erste Dimension ist die *Intensität* des analytischen Signals. Die zweite Dimension ist in der Spektroskopie eine *Wellenlänge* oder *Energie*, in der Chromatographie eine *Zeit* und in der Elektroanalytik eine *Spannung* oder ein *Strom*.

Bei der Kombination zweidimensionaler Verfahren lassen sich *drei- und mehrdimensionale* Analysemethoden entwickeln (vgl. Abschnitt 5.5).

Abbildung 1-1.

Qualitative und quantitative Information aus einem zweidimensionalen Analysenverfahren.



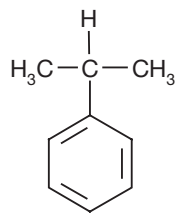
In den Diagrammen zweidimensionaler Verfahren treten *Peaks* (Chromatographie und Elektroanalytik) oder *Banden* (Spektroskopie) auf (Abbildung 1-1). Die *Lage* eines Peaks bzw. einer Bande liefert die qualitative Information zur Art des Elementes oder der Verbindung. Die Höhe oder Fläche eines Peaks bzw. einer Bande enthält die quantitative Information und kann zur Menge eines Stoffes in Beziehung gesetzt werden.

Strukturanalytik

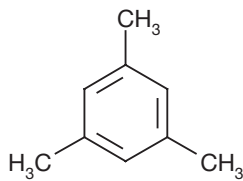
Die Ermittlung der *räumlichen Anordnung und Verknüpfung* elementarer Bausteine im atomaren Bereich ist Gegenstand der Strukturanalytik. Bei der Synthese neuer chemischer Verbindungen interessiert die Struktur von individuellen *Molekülen*. Bei der Entwicklung neuer Werkstoffe untersucht man auch die atomare Struktur von *Festkörpern*.

In einem Molekül gilt es einmal die *Konstitution* oder den „Bauplan“ aufzuklären. Man untersucht, aus welchen Elementen oder Teilstrukturen das Molekül besteht (qualitative Information der Strukturanalyse). Im zweiten Schritt möchte man Aussagen über die Konfiguration und Konformation von Molekülen machen können (quantitativer Aspekt). Bei der *Konfiguration* eines Moleküls erfahren wir Einzelheiten über die räumliche Anordnung der Strukturelemente bei gleicher Konstitution, zum Beispiel

bei Isomeren (Abbildung 1-2). Isomere lassen sich etwa mit der NMR-Spektroskopie (Abschnitt 3.4) unterscheiden.



iso-Propylbenzol

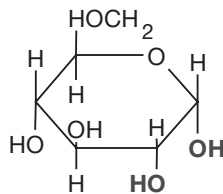


1,3,5-Trimethylbenzol

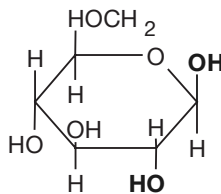
Abbildung 1-2.

Isomere Kohlenwasserstoffe der Summenformel C_9H_{12} .

Eine weitergehende Charakterisierung der Konfiguration ist möglich, wenn die räumliche Lage der Strukturelemente verschieden sein kann, ohne daß chemische Bindungen gelöst und neu geknüpft werden müssen. Das Molekül kann in unterschiedlicher *Konformation* vorliegen und wir versuchen dann, die *Konformeren* aufzuklären (vgl. Abbildung 1-3).



cis-Form



trans-Form

Abbildung 1-3.

Konformere der cyclischen Glucose in bezug auf die Anordnung von OH-Gruppen. Die cis-Form entspricht einer α -D-Glucopyranose und die trans-Form einer α -D-Glucopyranose.

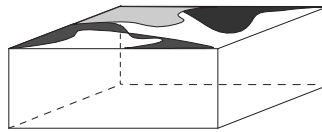
Um die genauen Raumkoordinaten von Strukturelementen in einem Molekül zu ermitteln, werden Methoden der *Röntgen- und Teilchendiffraktion* eingesetzt. Diese Methoden werden im Buch allerdings nicht besprochen.

Verteilungsanalytik

In der oben besprochenen Konzentrationsanalytik werden *Durchschnittsgehalte* eines Elementes oder einer Verbindung bestimmt. Anders ausgedrückt, die Analysen werden am *bulk* (englisch *Hauptteil*) einer Probe vorgenommen. Diese Art des Analysierens reicht nicht aus, wenn ich zum Beispiel wissen möchte, wie in einem Halbleiter die Dotierungselemente verteilt sind. Dazu müssen in den Werkstoffen oder allgemein in den Festkörpern *Verteilungsanalysen* ausgeführt werden. Sie gestatten Aussagen zur Verteilung von Elementen auf der *Oberflä-*

che (Abbildung 1-4), zu Konzentrationsprofilen in der Tiefe oder zur räumlichen Verteilung im gesamten Volumen des Festkörpers (Abschnitt 9.2).

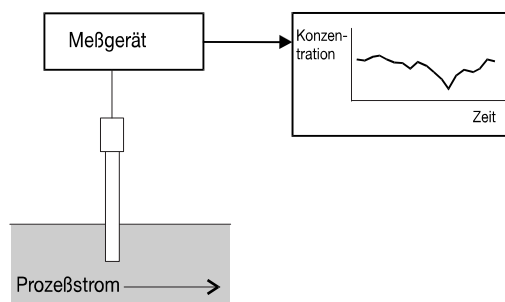
Abbildung 1-4.
Inhomogene Verteilung von Elementen auf der Oberfläche eines Werkstoffes.



Prozeßanalytik

In der Prozeßanalytik müssen makroskopische *Materialflüsse* oder technische *Verfahrensabläufe* laufend kontrolliert werden. Dabei kommt die Zeit als unabhängige Variable hinzu (*dynamischer Aspekt* der Analytik). Je nach der Art des Prozesses können Messungen innerhalb weniger Minuten bis zu Analysen im Stundenbereich notwendig sein. Bei großen Zeitabständen kann die Probe in ein Labor geschickt werden. Prozeßanalytische Lösungen sind erforderlich, wenn bei einer *Zeitauflösung* zwischen 1 und 10 min analysiert werden muß. Dazu gibt es spezielle Lösungen, wie zum Beispiel das *Rohrpostsystem* in einem Stahlwerk. Echte Messungen am Prozeß sind mit *chemischen Sensoren* möglich, die wir im Abschnitt 7.2 ausführlich besprechen werden (Abbildung 1-5).

Abbildung 1-5.
Analyse eines Prozeßstromes mit Hilfe eines chemischen Sensors.



Das Gesamtgebiet der Analytischen Chemie läßt sich am besten auf der Grundlage einer bestimmten Systematik verstehen. Wir orientieren uns im Buch an den Grundlagen des *analytischen Prozesses* und lernen davon ausgehend das *methodische Arsenal* und die darauf aufbauenden *Anwendungsmöglichkeiten* der modernen Analytischen Chemie kennen.

1.2 Der analytische Prozeß – Probenahme, Probenvor- bereitung, Messung und Auswertung

Wie sieht die Lösung eines analytischen Problems in der Praxis aus? Ein Unternehmen möchte zum Beispiel in einen Neubau investieren und benötigt ein Gutachten zur Qualität des Baugrundes. Der Analytiker soll die Qualität des Bodens untersuchen. Mit dem Auftraggeber ist zu erörtern, welche Bestandteile für die Bewertung des Baugrundes zu analysieren sind, welche rechtlich anerkannten Analysenverfahren dazu zu verwenden sind, welche methodischen Entwicklungen eventuell notwendig werden und in welcher Form das Ergebnis übergeben werden soll.

Jetzt beginnt die eigentliche analytische Arbeit. Es müssen die Proben genommen und für die Analyse vorbereitet werden. Die Proben müssen mit den ausgewählten Methoden untersucht werden. Abschließend sind die Ergebnisse auszuwerten und in einem Bericht zusammenzustellen.

Der sich immer wiederholende *analytische Prozeß* besteht im ersten Schritt in der Übertragung des Problems aus der Ebene des *Nutzers* in ein *analytisches Problem*. Anschließend kann dem *Untersuchungsobjekt*, im Beispiel dem Boden, eine *Probe entnommen* werden. Es schließt sich die *Probenvorbereitung* und die *Messung* an. Die Schritte der *Auswertung*, der Zusammenstellung der Ergebnisse in einem *Report* und die Übergabe der Information an den Nutzer bilden den Abschluß des allgemeinen analytischen Prozesses (Abbildung 1-6).

Man unterscheidet Analysenprinzipien, Analysenmethoden und Analysenverfahren.

Das **Analysenprinzip** beschreibt die naturwissenschaftliche Erscheinung, die zur Gewinnung der analytischen Information ausgenutzt wird. Ein typisches Analysenprinzip ist die Wechselwirkung *elektromagnetischer Strahlung* mit der Probe in der Spektroskopie oder die *Trennung* von Verbindungen in der Chromatographie. Vom verwendeten Analysenprinzip leiten sich die konkreten Wechselwirkungen ab, denen eine Probe ausgesetzt werden muß, um die gewünschte analytische Information zu erhalten. Im analytischen Prozeß wird das Analysenprinzip durch die *Messung* charakterisiert.

Die exakte Beschreibung des Analysenproblems ist die Voraussetzung dafür, daß die Analysergebnisse am Ende sinnvoll genutzt werden können.

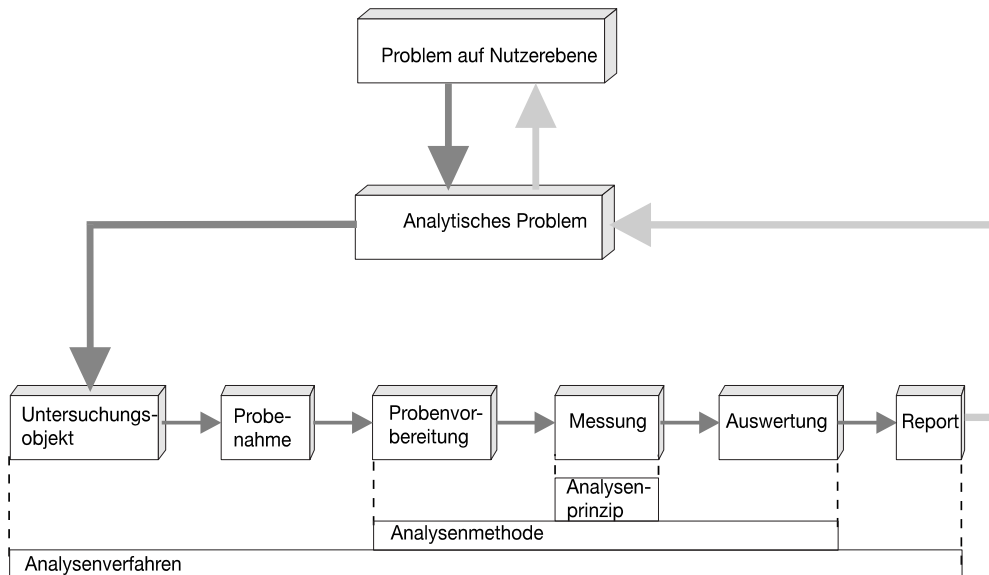


Abbildung 1-6.
Schema zum Ablauf von Analysen.

Eine **Analysemethode** beschreibt bereits den Ablauf einer Analyse in wesentlichen Zügen unter Verwendung eines bestimmten Analyseprinzips. Die Art und Weise der Probenvorbereitung und Auswertung der Meßergebnisse sind für die Analyse eines bestimmten Stoffes festgelegt.

Eine vollständige Charakterisierung eines Analysenganges wird mit dem **Analyseverfahren** erreicht. Hier werden alle Einzelheiten der Probenahme und der Berichterstattung in einer detaillierten Arbeitsvorschrift vorgeschrieben. *Genormte Analyseverfahren* entsprechen diesem Standard (Abschnitt 1.3).

Sehen wir uns die wichtigsten Phasen des analytischen Prozesses – die Probenahme, Probenvorbereitung, Messung und Auswertung – näher an.

Probenahme

Das Gelingen einer Analyse hängt in entscheidendem Maße von der Qualität der Probenahme ab. Bei unseren Betrachtungen konzentrieren wir uns auf die Probenahme für Durchschnittsanalysen, wie zum Beispiel die Bestimmung von Blei in einer Pflanze oder von Glucose im Blut. Folgende Anforderungen werden an die Entnahme einer Probe gestellt:

- Die Probe muß für das Untersuchungsobjekt **repräsentativ** sein.

Dies setzt voraus, daß eine *homogene Probe* zur Verfügung steht bzw. heterogene Proben homogenisiert werden können. Für die Analyse eines Erzes mit einer Korngröße von 1 mm werden zum Beispiel Probenmengen bis zu 8 kg benötigt, um daraus eine homogene Probe aufbereiten zu können. Zum zweiten muß die Probe zur richtigen Zeit am richtigen Ort entnommen werden. Die *Probenahmezeit* ist bei Analysen in Abhängigkeit von der Tages- oder Jahreszeit sowie vom Biorhythmus des Menschen wesentlich. Der *Ort der Probenahme* spielt etwa bei der Beprobung einer Altlastfläche oder bei der Untersuchung von Kompartimenten einer Pflanze, wie Blatt, Wurzel und Blüte, eine wichtige Rolle.

- Es dürfen **keine Kontaminationen** auftreten, das heißt, die Probe darf nicht durch das Probenahmebesteck, die Luft, durch die Aufbewahrungsbehälter oder durch Konservierungsmittel verunreinigt werden.
- Bis zur Analyse muß die Probe **stabil** sein bzw. sie muß geeignet **konserviert** werden. Es dürfen keine Stoffe entweichen oder durch die Probehgefäße hindurch diffundieren. Außerdem sind chemische Reaktionen, wie Oxidationen oder Reduktionen, sowie biochemische Reaktionen, etwa durch bakteriellen Befall, zu verhindern. Der Transport und die Lagerung der Probe muß in der Regel genau vorgegeben werden.
- Die Probe muß für die analytische Untersuchung in **ausreichender Menge** zur Verfügung stehen. Die Probenmenge ist bei der Untersuchung von Wässern oder Rohstoffen sicher kein Problem. Soll aber bei einem Baby eine Blutanalyse ausgeführt werden oder soll ein Mikrochip analysiert werden, entstehen leicht Beschränkungen bei der Menge der verfügbaren Probe.

Die *Anzahl* der zu entnehmenden Proben hängt von dem Probenahmefehler und der geforderten Genauigkeit der Analyse (vgl. Abschnitt 1.3) ab. Je größer der Probenahmefehler und je höher die Genauigkeitsanforderungen, desto mehr Probe muß entnommen werden.

Selbstverständlich muß die genaue *Kennzeichnung* der Proben und die *Protokollierung* ihrer Weiterbehandlung sein, da Verwechslungen sehr unangenehme Folgen haben können.

Probenahme von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen

Gase und Flüssigkeiten stellen homogene Proben dar. Die Probenahme ist hierbei weniger kritisch als bei der Untersuchung von Feststoffen, die in der Regel heterogene Untersuchungsobjekte darstellen.

Probenahme von Flüssigkeiten

Die Probenahme aus einer Flüssigkeit beschränkt sich auf das Schöpfen der flüssigen Probe in ein geschlossenes Gefäß aus Glas, Quarz oder Polyethylen. Um unerwünschte photochemische Reaktionen auszuschalten, werden oft braun gefärbte Gefäße verwendet.

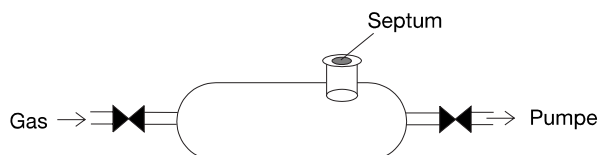
Flüssige Proben können physikalisch durch Kühlung bei 2-5 °C oder durch Tiefgefrieren bei -15 bis -20 °C konserviert werden. Zur Stabilisierung von Wasserproben muß oft der pH-Wert mit einer Säure unter pH=2 eingestellt werden oder es sind spezielle Konservierungsreagenzien zuzusetzen, zum Beispiel Quecksilberchlorid zur Vermeidung biochemischer Reaktionen.

Gasproben

Bei der Analyse der Luft oder anderer gasförmiger Proben richtet sich die Probenahme danach, ob allein die *Gase* zu untersuchen sind, oder ob auch darin enthaltene *Aerosole* und *Partikel*, wie Staubteilchen, zu analysieren sind.

Zur direkten Entnahme von Gasen dient eine „*Gasmaus*“, auch „*Gaswurst*“ genannt (Abbildung 1-7). Das zu analysierende Gas wird dazu mit einer Pumpe eine bestimmte Zeit durch das Sammelgefäß gesaugt, das anschließend verschlossen wird. Die Entnahme von Gasproben ist direkt über die Ventile oder mit einer Spritze über ein Septum (Silicongummi) möglich.

Abbildung 1-7.
Gasmaus zur Probenahme von Gasen.



In Flüssigkeiten *absorbierbare Gase* können mit Hilfe eines *Impingers* oder einer *Glasfritte* aufgefangen werden (Abbildung 1-8). Mit der Glasfritte läßt sich auf Grund der feinen Gasblasen eine vollständige Absorption erreichen.

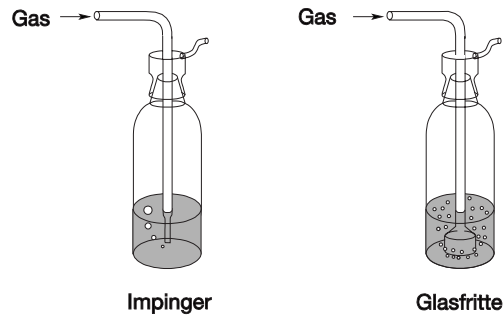


Abbildung 1-8.
Absorption von Gasen in
Lösungen.

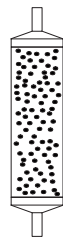


Abbildung 1-9.
Adsorptionsröhrchen.

Für die Entnahme von Luftproben vor Ort haben sich *Adsorptionsröhrchen* in den verschiedensten Ausführungen bewährt (Abbildung 1-9). Die Gase oder Dämpfe werden an einem oberflächenaktiven Träger adsorbiert und anschließend durch Erhitzen oder durch Elution mit einem geeigneten Lösungsmittel für die analytische Bestimmung abgelöst. Benzoldämpfe lassen sich auf diese Weise an Aktivkohle adsorbieren.

Partikel und Aerosole können auf *Filtern* gesammelt werden (Abbildung 1-10). Als Filtermaterialien dienen Polytetrafluorethylenfolien oder Glasfaserfilter. Dabei werden allerdings alle Teilchengrößen gleichermaßen erfaßt. Für eine *fraktionierte Probenahme* von Staubpartikeln wird der *Kaskadenimpaktor* verwendet. Die Luft strömt im Kaskadenimpaktor durch ein System von Düsen mit abnehmendem Innendurchmesser. Die Teilchen werden auf mehreren Filterblättern nach Korngrößen aufgetrennt abgeschieden. Die Weiterverarbeitung der auf den Filterproben haftenden Substanzen erfolgt durch Säureaufschluß, Elution oder Extraktion zum Beispiel mit der SOXHLET-Extraktion.

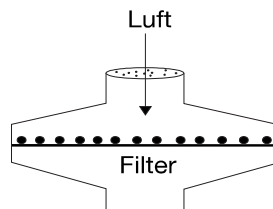


Abbildung 1-10.
Filter zur Probenahme von
Partikeln aus der Luft.

Probenahme von Feststoffen

Feststoffe stellen nur in seltenen Fällen ein homogenes Untersuchungsobjekt dar, wie beispielsweise Glas. Erze, Gesteine, Suspensionen, Böden, Tabletten oder Werkstoffe sind mehr oder weniger stark inhomogen. Allgemein gilt, je *inhomogener* die Probe ist, desto *größere Probemengen* müssen genommen werden. Zur Homogenisierung kann die Probe *gemahlen*, *gelöst* bzw. *aufgeschlossen* oder als Glas *geschmolzen* werden (siehe Probenvorbereitung).

Der Probenahmefehler übersteigt häufig den Fehler der nachfolgenden analytischen Bestimmungen. Er muß bei der Bewertung des Gesamtfehlers einer Analyse berücksichtigt werden (vgl. Fehlerfortpflanzung, Abschnitt 1.3).

Mengenbereiche für die Probe und den Analyten

Der *dynamische Bereich* entspricht dem Bereich des funktionellen Zusammenhanges zwischen dem Signal und der Konzentration bzw. Masse.

Die für die *quantitative Analyse* einzusetzende Probenmenge richtet sich nach dem Mengenbereich, in dem der Analyt bestimmt werden soll. Für einfache Titrationsen liegt dieser Mengenbereich im Milligrammbereich. Den Bereich zwischen der kleinsten und der größten bestimmbaren Menge eines Analyten bezeichnet man als *Arbeitsbereich*. Der Massenbereich des Analyten, m_A , auch als *Absolutmassenbereich* bezeichnet, und der Massenbereich der Matrix, m_M , bilden den *Probenmassenbereich*, P :

$$P = m_A + m_M \quad (1-1)$$

Die Probenmassen können im Bereich von Makromengen bis zu Nanomengen und darunter liegen (Abbildung 1-11), das heißt, die Probemengen können vom Erzklumpen bis zu Einschlüssen in einer Mikrolegierung variieren.

Der *Gehaltsbereich* G (vgl. Abbildung 1-11) definiert das Verhältnis von Analytmasse zur Probenmasse:

$$G = \frac{m_A}{m_A + m_M} \quad (1-2)$$

Probenmassenbereich P:

Gramm	Dezi-	Zenti-	Milli-	Mikrogramm	Nanogramm	Picogramm	Femtogramm	Attogramm
-------	-------	--------	--------	------------	-----------	-----------	------------	-----------

Gehaltsbereich G:

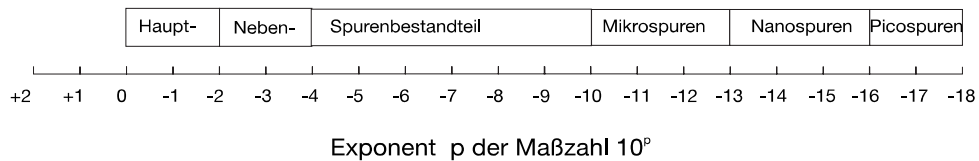


Abbildung 1-11.
Analytische Mengenbereiche.

Typischerweise wird der **Gehalt** eines *Hauptbestandteiles* in einem Feststoff in g/g (kg/kg) bzw. in Masse% angegeben. Der Gehaltsbereich für *Hauptbestandteile* erstreckt sich von 0,01 bis 1 g/g bzw. von 1% bis 100%. *Nebenbestandteile* liegen im Bereich darunter bei 0,0001 bis 0,01 g/g bzw. bei 0,01% bis 1%. Unter 0,01% spricht man von *Spurengehalten*, die im Extremfall einzelne Atome in einem Feststoff ausmachen können. Spurengehalte werden gern als Anteile von 10^6 bzw. 10^9 angegeben, und zwar:

$$1 \text{ ppm („parts per million“) } = \frac{1}{10^6}, \text{ entspricht } 10^{-4}\%$$

$$1 \text{ ppb („parts per billion“) } = \frac{1}{10^9}, \text{ entspricht } 10^{-7}\%$$

$$1 \text{ ppt („parts per trillion“) } = \frac{1}{10^{12}}, \text{ entspricht } 10^{-10}\%$$

Konzentrationen eines Analyten gibt man, wie nach dem Systeme Internationale üblich, als Massenkonzentration in g/L (kg/L) oder als Stoffmengenkonzentration in mol/L (abgekürzt durch M) an.

Probenvorbereitung

Der nächste Schritt des analytischen Prozesses ist die Vorbereitung der Probe für die Messung. Dazu dienen *physikalische Techniken* sowie das Überführen der Probe in eine Lösung durch *Auflösen, Aufschließen, Schmelzen* oder *Eluieren*. Die zu analysierenden Bestandteile der Probe, die *Analyten*, müssen oft von den Begleitkomponenten, der *Matrix*, abgetrennt werden. Zur Analyse von Spuren ist vor der Bestimmung häufig eine *Anreicherung* des Analyten notwendig. Die Abtrennung der Matrix oder einzelner Matrixbestandteile bezeichnet man als *Clean up*.

Physikalische Techniken

Sie dienen der *Wasserentfernung*, dem *Zerkleinern* und der *Oberflächenbehandlung* der Probe.

Zur **Entfernung des Wassers** aus einer Probe bietet sich einmal die schonende *Lufttrocknung* an, zum Beispiel durch Auftragen einer Bodenprobe auf einer Trockenschale in Schichten von 1 bis 2 cm. Die Lufttrocknung kann allerdings mehrere Tage dauern. Weiterhin ist die *Trocknung bei 105 °C* üblich (DIN 38414, Teil 2). Hierbei können Masseverluste durch Ausgasen, Wasserdampfdestillation oder Verdampfung auftreten. Masseverluste werden bei der *Gefriertrocknung* bei Temperaturen bis zu -85 °C vermieden. Die Probe wird gleichzeitig pulverisiert. Durch die entstehende große Oberfläche können gefriergetrocknete Proben allerdings sehr hygroskopisch sein.

Zum **Zerkleinern** von Festproben dienen *Mühlen*, in denen die Probe auf eine bestimmte Korngröße (typischerweise < 0,1 mm) aufgemahlen wird. Um Kontaminationen zu vermeiden, bestehen zum Beispiel die Mahleinsätze in einer Schwingmühle aus Achat oder Korund. Liegt bereits körniges Material vor, so wird die gewünschte Korngrößenfraktion durch *Sieben* gewonnen.

Zur direkten Untersuchung von Feststoffen sind *Trennungen* großer Probenstücke ebenso notwendig wie die Behandlung der Oberfläche bei metallischen Werkstoffen durch *Schleifen oder Läppen* (Feinstbearbeitung der Oberfläche).

Lösen, Aufschließen, Schmelzen und Eluieren

Diese Arten der Probenvorbereitung dienen der Homogenisierung fester Proben, deren Überführung in eine Lösung, wie sie bei vielen Analysenmethoden vorausgesetzt wird, sowie der Elution von Bestandteilen aus einem Feststoff.

Zum **Lösen** einer Festprobe können Wasser, Säuren, beispielsweise für das Auflösen von Metallen und Legierungen, Basen oder organische Lösungsmittel geeignet sein (vgl. Praktikumsbücher).

Die **Elution** ist typisch bei der Untersuchung von Bodenproben. Dazu wird zum Beispiel 100 g einer Festprobe in 1 Liter Wasser gelöst, 24 Stunden geschüttelt, die ungelösten Bestandteile abgetrennt und die gelösten Bestandteile anschließend für die Bestimmung verwendet.

Bei den **Aufschlüssen** kennen wir Aufschlüsse unter Normaldruck, Druckaufschlüsse und „trockene“ Aufschluß-Systeme (Abbildung 1-12). In *offenen Systemen* arbeitet man mit flüssigen Aufschlußmitteln in Form von

oxidativ oder reduktiv wirkenden Agenzien (vgl. Praktikumsbücher). Für Aufschlüsse durch Kochen am Rückfluß wird zum Beispiel Königswasser für die Metallbestimmung in Böden oder Abfällen verwendet. Der hohe Überschuß an *Aufschlußmitteln* bedingt besondere Anforderungen an die Reinheit der Reagenzien.

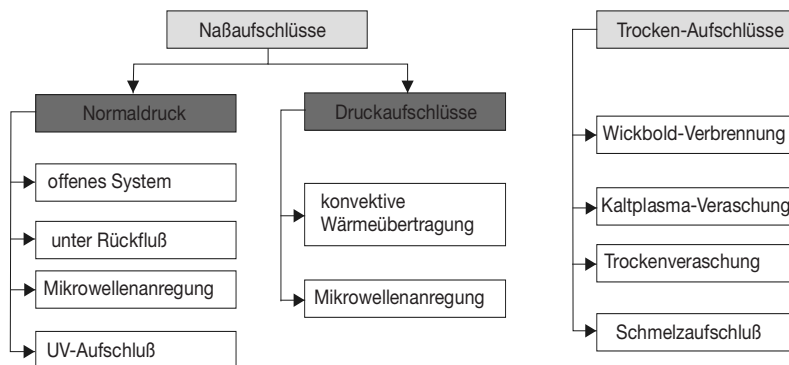


Abbildung 1-12.
Übersicht über Aufschlußsysteme.

Mikrowellen-Öfen arbeiten typischerweise bei 2,45 GHz. Bei Aufschlüssen auf der Basis der *UV-Strahlung* einer Quecksilberhochdrucklampe werden oft geringe Mengen an Wasserstoffperoxid und Säuren zugesetzt.

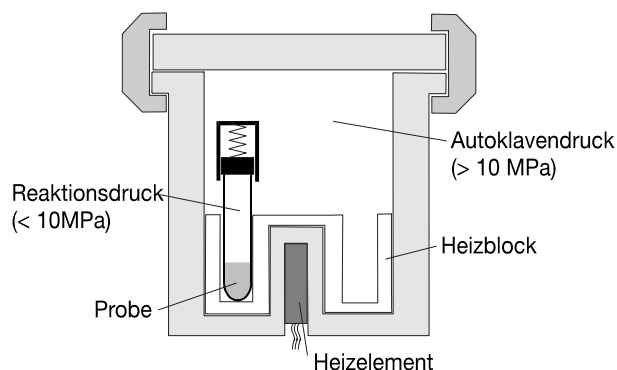
Biologische Materialien, Lebensmittel, Kunststoffe, Kohle oder Schmieröl müssen unter extremeren Bedingungen aufgeschlossen werden. Hierfür wurden die *Druckaufschlußmethoden* entwickelt. Beim Hochdruckverascher nach KNAPP (Abbildung 1-13) werden Festproben über mehrere Stunden mit konzentrierter Salpetersäure in einer Stickstoffatmosphäre unter einem Autoklavendruck von 13 MPa und einer Temperatur bis zu 320 °C aufgeschlossen. Nach Beendigung des Aufschlusses und Abkühlung verbleibt in den Quarzaufschlußgefäßen ein Druck um 2 MPa. Nach Ablassen des Stickstoffs im Autoklaven entweichen Kohlendioxid und die Stickoxide aus der Problelösung. Man erhält klare Aufschlüsse, die auf Grund gelöster Restgase dunkelgrün gefärbt sind.

Bei Anregung mit einer Mikrowelle können Druckaufschlüsse beschleunigt werden. Allerdings kann die Vollständigkeit der Umsetzung darunter leiden.

Ohne ein flüssiges Aufschlußmittel kommt man bei den „trockenen“ Aufschlüssen aus, die auf der *Verbrennung* der Probe oder auf *Schmelzaufschlüssen* basieren. In der *Elementaranalyse* wird die Probe bei ca. 950 °C in einem Sauerstoffstrom verbrannt (Abschnitt 9.1). Organisches

Material, das mit Pentan oder Hexan extrahiert worden ist, kann sehr wirkungsvoll in einer Knallgas-Flamme nach *WICKBOLD* verbrannt werden. Bei der *Kaltplasma-Veraschung* wird die Probe mit atomarem Sauerstoff, der in einem Hochfrequenzfeld erzeugt wird und sich in einem angeregten Zustand befindet, oxidativ zerstört. Es können auch leicht flüchtige Verbindungen des Arsens, Antimons, Tellurs oder Selens in organischem und biologischem Material aufgeschlossen werden.

Abbildung 1-13.
Hochdruckverascher nach KNAPP.



Abtrennung und Anreicherung des Analyten

Zur Abtrennung von **Analyten** aus einer Probenmatrix und zu deren Anreicherung können die gleichen Verfahren verwendet werden. Von *Anreicherung* spricht man, wenn im Ergebnis der Probenvorbereitung die Konzentration des Analyten in einer Lösung oder seine relative Masse gegenüber der Matrix in einer Festprobe erhöht wird.

Die Grundlagen zu den verschiedenen Methoden für die Abtrennung und/oder Anreicherung des Analyten werden wir ausführlich noch besprechen. Die wichtigsten Methoden sind dazu:

- Destillation flüchtiger Verbindungen des Analyten;
- Fällung bzw. Mitfällung des Analyten an einem Spurenfänger, wie Eisenhydroxid für Metallspuren (Abschnitt 2.3);
- Flüssig-Flüssig-Extraktion und Ionenaustausch (Abschnitt 2.6);
- Elektrolytische Abscheidung des Analyten (Abschnitt 4.5);
- Säulenchromatographische Abtrennung, typischerweise als Festphasen-Extraktion (Abschnitt 5.3);

Zur Abtrennung bzw. Anreicherung von *gasförmigen Proben* lassen sich Techniken der Probenahme, wie die *Absorption* in einer Lösung (Abbildung 1-8) oder die

Adsorption an einem Träger (Abbildung 1-9) ebenfalls einsetzen. Lösungsmitteldämpfe von Alkoholen, Estern, Ketonen oder Aromaten lassen sich so auf Tenax – einer Kohlenstoff-Faser – adsorbieren.

Eine spezielle Abtrennung leichtflüchtiger organischer Stoffe aus wässriger Lösung ist in geringen Konzentrationen mit dem *Purge- und Trapverfahren* (Spülen und Einfangen) möglich. Hierzu wird die Probelösung in einem Wasserbad erwärmt. Die leichtflüchtigen Stoffe werden mit einem Trägergas (Helium) ausgetrieben und in einer Adsorptionsfalle angereichert. Nach thermischer Desorption erfolgt üblicherweise eine Bestimmung mit der Gaschromatographie (Abschnitt 5.2).

Werden die leichtflüchtigen Stoffe direkt im Dampfraum über der Lösung entnommen, spricht man von Dampfraumanalyse bzw. *Head-Space-Analyse*. Das Probengefäß wird zu diesem Zweck verschlossen. Zwischen der Lösung und der Gasphase stellt sich in Bezug auf den Analyten ein Gleichgewicht ein. Bei geeigneter Kalibrierung kann daher allein durch die Bestimmung des Analyten im Dampfraum auf seine Konzentration in der Lösung geschlossen werden. Analyt und Matrix liegen bei dieser Methode bereits getrennt vor. Diese Art der Probenvorbereitung eignet sich zur Bestimmung leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe in Wässern oder des Alkohols im Blut.

Clean up – Abtrennung der Matrix

Die oben diskutierten Verfahren zur Abtrennung und Anreicherung können prinzipiell auch zur Abtrennung der **Matrix**, dem Clean up, verwendet werden. In der Praxis dominiert für das Clean up die *Festphasen-Extraktion*. Hier wird die flüssige Probe bzw. die in eine Flüssigkeit überführte Probe in einer Glas- oder Polypropylen-Säule, die mit einem geeigneten Sorbens-Material gefüllt ist, sorbiert. Störende Matrixbestandteile werden anschließend in verschiedenen *Waschschritten* entfernt. Die auf der Säule zurückbleibende Probe, die die Analyten enthält, wird für die Analyse mit einem geeigneten Lösungsmittel von der Säule eluiert (vgl. Abschnitt 5.3).

Messung

Zur Gewinnung der analytischen Information wird die geeignet vorbereitete Probe nach einem bestimmten naturwissenschaftlichen Prinzip vermessen. Analysenprinzipien basieren entweder auf einer chemischen Reaktion oder auf physikalischer Wechselwirkungen.

Bei den Methoden auf der Grundlage **chemischer Reaktionen** kann der Eintritt einer Reaktion, zum Beispiel einer Farbreaktion, zur *qualitativen Analyse* ausgenutzt werden. Wird die in der Reaktion umgesetzte Menge erfaßt (Maßanalyse) oder der Ablauf einer chemischen Reaktion verfolgt (kinetische Methoden), können *quantitative Informationen* gewonnen werden. Die Analysenprinzipien auf der Basis chemischer Reaktionen werden bei den klassischen Methoden (Kapitel 2) und auf der Grundlage elektro-chemischer Reaktionen in der Elektroanalytik (Abschnitte 4.4 und 4.5) besprochen. Die dort gelegten Grundlagen können auf neuere Entwicklungen, bei denen biochemische oder immunologische Reaktionen ausgenutzt werden, übertragen werden (Abschnitt 8.1).

Analysenprinzipien, die auf **physikalischen Wechselwirkungen** mit der Probe beruhen, werden in der Spektroskopie (Kapitel 3), in der Elektroanalytik (Abschnitte 4.2 und 4.3) und in der Chromatographie (Kapitel 5) ausgenutzt. Diese Art von Analysenmethoden werden häufig auch als *instrumentelle Methoden* bezeichnet. Ganz ohne Instrumentarium kommt man allerdings bei *automatisierten Methoden* auf der Grundlage chemischer Reaktionen auch nicht aus (vgl. Abschnitt 7.1).

Auswertung und Bericht

Die Auswertung der gemessenen Signale und die Übertragung in *analytische Informationen*, wie die Art und Menge eines Analyten, seine chemische Struktur oder seine räumliche Verteilung in einer Probe, ist ein wesentlicher Teil eines Analysenverfahrens. Die direkte Kopplung des Computers mit den Analysengeräten hat dazu geführt, daß ein großer Teil dieser Arbeit heutzutage computerunterstützt abläuft. Um so notwendiger ist die *Validierung* der analytischen Ergebnisse durch den Analytiker und die *Bewertung* der Ergebnisse unter Verwendung statistischer Methoden. Die hierfür wichtigen Methoden werden im Abschnitt 1.3 grundlegend besprochen und in den Abschnitten zur Chemometrie (6.1) ergänzt.

Am Ende des Analysenverfahrens werden die Analysergebnisse einschließlich deren Bewertung in einem Bericht zusammengestellt und im Zusammenhang mit der übergeordneten Aufgabenstellung diskutiert. Die zunehmende Bedeutsamkeit der Richtigkeit von Analysen – etwa als Grundlage gerichtlicher Entscheidungen – erfordert die *Sicherung der Qualität* von Analysen auf hohem Niveau. In Abschnitt 1.3 werden wir uns daher mit den Anforderungen an die Validierung und Standardisierung von Analysenverfahren beschäftigen.

1.3 Analytische Kenngrößen, statistische Bewertung und Qualitätssicherung

Für die Beurteilung der Qualität einer Analyse verwendet der Analytiker eine Reihe von Kenndaten, die insbesondere für die Bewertung *quantitativer Analysen* bedeutsam sind. Dazu gehören Kenndaten, die sich aus der Kalibrierung und der statistischen Bewertung ergeben, wie die *Empfindlichkeit*, die *Präzision* und *Richtigkeit* sowie die *Nachweis-* und *Bestimmungsgrenze*. Die Leistungsfähigkeit eines Analysenverfahrens in Bezug auf die Unterscheidbarkeit von Analyten wird durch die *Selektivität* und seine Wirtschaftlichkeit durch Kriterien, wie *Aufwand*, *Kosten* und *Zeit*, charakterisiert.

Kalibrierung eines Analysenverfahrens

Zur Bestimmung eines Analyten auf der Grundlage einer analytischen Messung muß prinzipiell jedes Analysenverfahren einmal kalibriert worden sein. Bei der *Kalibrierung* wird die Intensität des analytischen Signals in Abhängigkeit von der absoluten Masse, dem Gehalt oder der Konzentration des Analyten durch eine **Kalibrierfunktion**, in der Regel eine Gerade, modelliert (Abbildung 1-14).

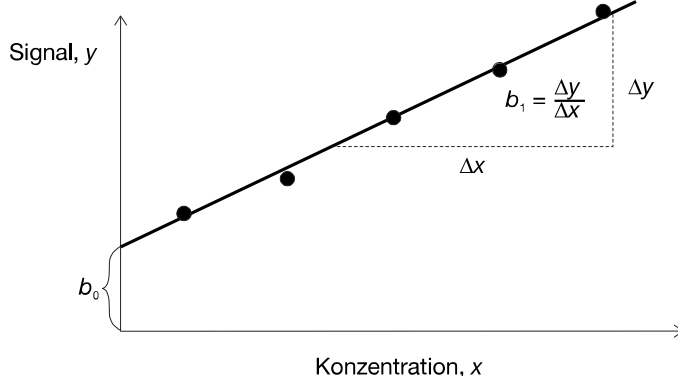


Abbildung 1-14.
Lineare Kalibrierfunktion für fünf
Signalwerte y , in Abhängigkeit
von der Konzentration x .

Die Kalibrierfunktion wird durch die folgende Geradengleichung ausgedrückt:

$$y = b_0 + b_1 x \quad (1-3)$$

Der Ordinatenabschnitt, b_0 , steht für den Blindwert bzw. den Untergrund. Der *Blindwert* repräsentiert jenes Signal, das der Konzentration Null entspricht. Man muß sich bewußt sein, daß sich bei einer Kalibrierfunktion nach Gleichung (1-3) rechnerisch immer ein Blindwert ergibt. Wird experimentell gegen einen Blindwert gemessen, muß die vereinfachte Geradengleichung $y=b_1x$ angesetzt werden. Zur Abschätzung der Signifikanz eines mathematisch ermittelten Blindwertes (Ordinatenabschnittes) können statistische Tests (Abschnitt 6.1) verwendet werden.

Den Anstieg der Kalibriergeraden, b_1 , bezeichnet man als **Empfindlichkeit**. Bei *gekrümmten* Kalibrierkurven läßt sich keine einheitliche Empfindlichkeit für das gesamte Analysenverfahren angeben. Die Empfindlichkeit kann nur lokal in Verbindung mit der aktuellen Konzentration mitgeteilt werden. Gewöhnlich wird dazu die mittlere Konzentration des Arbeitsbereiches verwendet.

Der Begriff *Nachweisempfindlichkeit* sollte *nicht* verwendet werden, da er nicht eindeutig definiert ist.

Man unterscheidet absolute und relative Analysenmethoden. Unter den **absoluten Methoden** versteht man Methoden, bei denen die Konzentration über fundamentale Größen, wie die Molmasse und Stöchiometrie in der Maßanalyse (Abschnitt 2.2 bis 2.5) oder die Faraday-Konstante in der Coulometrie (Abschnitt 4.5), ermittelt wird. Absolute Methoden sind letztlich nur ein einziges Mal zu kalibrieren. Bei **relativen Methoden** müssen die Kalibrierparameter (Empfindlichkeit und Blindwert) immer wieder neu bestimmt werden. Methoden auf der Grundlage physikalischer Analysenprinzipien sind in der Regel kalibrierbedürftig.

Für die Berechnung einer unbekanntes Konzentration aus dem gemessenen Signal, y_A , muß die Kalibrierfunktion in Gleichung (1-3) nach der Konzentration, x_A , aufgelöst werden. Es entsteht die allgemeine **Analysenfunktion**:

$$x_A = \frac{y_A - b_0}{b_1} \quad (1-4)$$

Standard-Additionsmethode zur Berücksichtigung von Matrixeffekten

Eine besondere Form der Kalibrierung wird bei der Standard-Additionsmethode eingesetzt. Die Anwendung dieser Methode soll garantieren, daß *Matrixeinflüsse* weitestgehend ausgeschaltet werden können, zum Beispiel bei

Bestimmungen im Blutserum. Die Kalibrierkurve wird daher nicht separat in einer künstlich hergestellten Verdünnungsreihe erstellt, sondern die zu untersuchende Probe wird mit definierten Konzentrationen des Analyten *aufgestockt*. Für die Zugabe unterschiedlicher Standardkonzentrationen wird die Probe vorher aliquotiert. Aus dem Meßwert für die ursprüngliche Probe und den Werten für die aufgestockten Proben kann die unbekannte Analytkonzentration, x_A , ermittelt werden, wie dies für die graphische Auswertung in Abbildung 1-15 gezeigt ist.

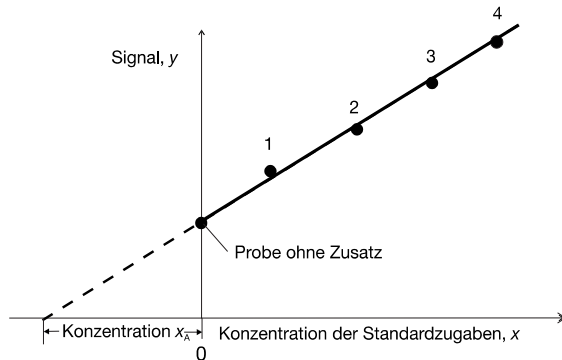


Abbildung 1-15.

Aufstocken der Probe mit vier bekannten Konzentrationen des Analyten bei der Standard-Additionsmethode.

An Hand von Abbildung 1-15 kann man sich überlegen, daß mit Hilfe der Standard-Additionsmethode Änderungen der *Empfindlichkeit* in Gegenwart der Matrix erfaßt werden können. *Blindwerte* können mit der Standard-Additionsmethode aber nicht erkannt werden. Sie müssen exakt bekannt sein, wenn diese Methode angewendet werden soll.

Innerer und äußerer Standard

Zur Berücksichtigung veränderlicher äußerer Bedingungen bei einer Analyse wird das Analysensignal im Verhältnis zum Signal einer Standardkomponente gemessen. Wird die Standardkomponente separat zur Probe vermessen, spricht man von einem *äußeren (externen) Standard*. Wird die Standardkomponente der Probe zugesetzt oder wird eine bereits in der Probe vorhandene Komponente als Standard benutzt, liegt ein *innerer (interner) Standard* vor.

Ein innerer Standard kann auch zu Kontrollzwecken verwendet werden, wenn zum Beispiel alle Schritte von der Probenvorbereitung bis zur Auswertung kontrolliert werden sollen. Dazu wird der innere Standard vor Beginn der Analyse zur Probe zugegeben.

Die speziellen Anforderungen an innere und äußere Standards werden wir bei ausgewählten Analysemethoden kennenlernen.

Statistische Bewertung

Warum ist ein Analysenergebnis ohne seine statistische Bewertung wenig wert? Betrachten wir den folgenden Fall aus der analytischen Praxis:

Mit einem standardisierten Verfahren (DIN 38 409 H 16) wurde in einem Abwasser mit Hilfe einer Dreifachbestimmung ein Phenolgehalt von $0,51 \text{ gL}^{-1}$ bestimmt. Der *EU-Grenzwert* für Phenol liegt bei $0,5 \text{ gL}^{-1}$. Wird mit dem mittleren Phenolgehalt von $0,51 \text{ gL}^{-1}$ der EU-Grenzwert eingehalten? Eine Antwort ist ohne einen statistischen Test nicht möglich, da die Konzentration von $0,51 \text{ gL}^{-1}$ einen *Mittelwert* darstellt und wir die Streuung der Daten um diesen Mittelwert berücksichtigen müssen.

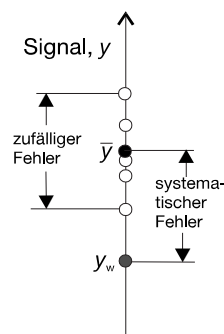
In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zu den statistischen Bewertungen gelegt. Die statistischen Tests bzw. Prüfverfahren, wie sie für die Beantwortung der Fragestellung im Beispiel nötig sind, werden im Abschnitt 6.1 besprochen.

Genauigkeit von Analysen: Präzision und Richtigkeit

Führt man eine analytische Messung aus, wie oben die Bestimmung von Phenol in einem Abwasser, können zwei Arten von Fehlern auftreten. Einmal ergeben sich Abweichungen der Meßwerte bei Wiederholungen der Analyse: Sie werden durch den *Zufallsfehler* bestimmt. Der Zufallsfehler ist ein Maß für die *Präzision* eines Analyseverfahrens (Abbildung 1-16). Zum zweiten weicht der ermittelte Gehalt des Analyten von dem wahren Wert um einen bestimmten Betrag ab. Diese Abweichung rührt von *systematischen* Fehlern her, die die *Richtigkeit* einer Analyse begrenzen.

Die **Präzision** einer Analyse wird durch Wiederholungsmessungen (Parallelbestimmungen) an unabhängigen Proben und Berechnung der Standardabweichung vom Mittelwert ermittelt.

Abbildung 1-16.
Zufälliger Fehler von Einzelmessungen eines Signals, y , und systematische Abweichung des Mittelwertes, \bar{y} , vom wahren Wert, y_w .



Der *Mittelwert* beschreibt die Lage der Werte auf der betrachteten Achse, hier die y -Werte auf der Signalachse. Er berechnet sich für n Parallelbestimmungen zu:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1-5)$$

Die *Standardabweichung*, s , ist ein Maß für die Streuung der Meßwerte um den Mittelwert, es gilt:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1-6)$$

Die Standardabweichung kann auch als relative Größe angegeben werden, indem sie auf den Mittelwert bezogen wird. Die *relative Standardabweichung*, s_r , berechnet sich zu:

$$s_r = \frac{s_y}{\bar{y}} \quad (1-7)$$

Sie wird auch als prozentuale relative Standardabweichung $s_r(\%) = s_r \cdot 100$ ausgedrückt.

Mittelwert und Standardabweichung wurden in den Gleichungen (1-5) bis (1-7) auf das *Signal*, y , bezogen. Das heißt, wir hätten in Gleichung (1-6) genauer schreiben müssen s_y .

Zur Beschreibung der Präzision in Bezug auf die *Konzentration*, x , muß die Standardabweichung, s_x , über die Kalibrierfunktion wie folgt berechnet werden:

$$s_x = \frac{s_y}{b_1} \quad (1-8)$$

s_x bezeichnet man auch als *Verfahrensstandardabweichung*.

Die Präzision eines ganzen Analysenverfahrens hängt nicht allein von der Vermessung der geeignet präparierten Proben ab, sondern die Fehler der Probenahme, der Probenvorbereitung und Auswertefehler – etwa beim Ablesen auf einer Skala oder aufgrund der Digitalisierung von Werten – gehen in die Präzision des Verfahrens mit ein. Für den Gesamtfehler gilt das *Fehlerfortpflanzungsgesetz*. Für summarisch bzw. differenziell zusammenhängende

Faktoren müssen die Quadrate der Standardabweichungen – die *Varianzen* – addiert werden. Produkte oder Quotienten von Einflußgrößen pflanzen sich über die Summe der relativen Varianzen fort.

Die Fehlervarianz, s^2 , aus Probenahme, s_p^2 , und Messung, s_M^2 , ergibt sich zum Beispiel bei der Analyse von m Proben, die jeweils n mal untersucht wurden, entsprechend zu:

$$s^2 = \frac{s_p^2}{m} + \frac{s_M^2}{n \cdot m} \quad (1-9)$$

Vielfältige Fehlerquellen sind insbesondere bei *Verbundverfahren* zu berücksichtigen. Bei einem Verbundverfahren wird die Probe nicht direkt vermessen, sondern zwischen Probenahme und Messungen liegen zusätzliche Schritte, wie Aufschlüsse, Anreicherungen oder Abtrennungen (vgl. Abschnitt 1.2).

Einen *wahren Wert* verwendet man im Sinne eines akzeptierten Referenzwertes.

Mit Hilfe der Präzision eines Analysenverfahrens läßt sich nur seine Reproduzierbarkeit charakterisieren. Die vielleicht gut reproduzierbaren Analysenwerte können allerdings trotzdem falsch sein, das heißt, die ermittelte Konzentration des Analyten kann sich von seiner wahren Konzentration in der Probe deutlich unterscheiden. Die *systematische Abweichung* zwischen dem Mittelwert und dem wahren Wert wird als **Richtigkeit** definiert. Der *Fehler* eines einzelnen Konzentrationswertes, e_i , setzt sich somit aus den zufälligen und systematischen Abweichungen zusammen:

$$e_i = \underbrace{(x_i - \bar{x})}_{\text{Zufallsfehler}} + \underbrace{(\bar{x} - x_w)}_{\text{systematischer Fehler}} \quad (1-10)$$

Als Maß für die Richtigkeit ist die *Wiederfindungsrate* (*WFR*) üblich. Sie beschreibt den prozentualen Anteil der wiedergefundenen Konzentration bzw. des Mittelwertes der Konzentration an der wahren Konzentration. Für eine einzelne Analyse gilt:

$$WFR(\%) = \frac{\bar{x}}{x_w} 100 \quad (1-11)$$

Zur Beurteilung der Richtigkeit eines ganzen Analysenverfahrens, dient die *Wiederfindungsfunktion* (Abschnitt 9.1).

Woher kommen jetzt die wahren oder richtigen Analysenwerte? *Richtige Analysenwerte* erhält man, wenn die Analysen mit unterschiedlichen Methoden unabhängig

voneinander ausgeführt werden oder wenn ein Standardreferenzmaterial mit einem zertifizierten Gehalt zur Verfügung steht. Die Untersuchung einer Probe mit unabhängigen Verfahren wird in *Ringversuchen* ausgeführt. Dazu wird eine Probe auf verschiedene Laboratorien aufgeteilt und dort analysiert. Aus den Ergebnissen der Laboratorien wird ein wahrer Wert gebildet. Als Ergebnis von Ringversuchen oder durch gezielte Präparationen lassen sich *Standardreferenzmaterialien* herstellen, die mit den wahren Werten zertifiziert sind (vgl. Abschnitt 9.1).

Vertrauensintervall eines Analysenergebnisses

Bei der Angabe des Analysenergebnisses muß eine Abschätzung für dessen Unsicherheit mitgeliefert werden. Die Unsicherheit wird durch das *Vertrauensintervall* ausgedrückt. Für *absolute Analysenmethoden*, wie eine Titration, berechnet sich das Vertrauensintervall aus der Standardabweichung, s , der Anzahl von Parallelanalysen, n , sowie dem STUDENT t -Faktor für eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, P , und die Anzahl der Freiheitsgrade, f , wie folgt:

$$\Delta x = \frac{t(P, f)s}{\sqrt{n}} \quad (1-12)$$

Für Untersuchungen an *einer* Probe wird $f = n-1$. Der Schätzwert der Standardabweichung, s , ist in der Regel aus vorangegangenen Analysen bekannt oder muß aktuell bestimmt werden. Der t -Faktor wird einer Tabelle zur STUDENT t -Verteilung entnommen (vgl. Abschnitt 6.1).

Im Falle *relativer Analysenmethoden* ist der Vertrauensbereich unter Zuhilfenahme der Kalibrierfunktion zu berechnen:

$$\Delta x = s \cdot t(P, f) \cdot \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{y} - \bar{\bar{y}})^2}{b_1^2 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}} \quad (1-13)$$

wobei \bar{y} der Mittelwert aus n Parallelbestimmungen an der Analysenprobe ist und $\bar{\bar{y}}$ den Gesamtmittelwert der Kalibrierung charakterisiert, der an m Standardproben bestimmt wurde.

Das Analysenergebnis wird als Mittelwert der Parallelbestimmungen mit dem Vertrauensintervall angegeben:

$$\bar{x} \pm \Delta x \quad (1-14)$$

Nachweisgrenze – die geringste bestimmbare Konzentration

In Abschnitt 1.1 hatten wir bereits gesehen, daß das Nachweisvermögen eines Analysenverfahrens begrenzt ist. Die Kenntnis der *Nachweisgrenze* ist insbesondere in der *Spurenanalytik* von großer Bedeutung.

Der Meßwert an der Nachweisgrenze, y_{NWG} , ergibt sich aus dem Untergrundwert des Signals (Blindwert), y_{B} , und der Standardabweichung des Blindwertes, s_{B} , zu:

$$y_{\text{NWG}} = y_{\text{B}} + 3s_{\text{B}} \quad (1-15)$$

Um die Nachweisgrenze bezüglich der Konzentration zu erhalten, wird mit Hilfe der Kalibrierfunktion in Gleichung (1-3) umgerechnet:

$$x_{\text{NWG}} = \frac{y_{\text{NWG}} - b_0}{b_1} \quad (1-16)$$

Die nachweisbare Konzentration wird umso niedriger sein, je höher die Empfindlichkeit, b_1 , und je geringer der Zufallsfehler des Analysenverfahrens ist.

Selektivität – wie gut eine Analysenmethode die Analyten unterscheiden kann

Der Begriff *Selektivität* drückt aus, inwieweit die Bestimmung eines Analyten durch Begleitstoffe gestört wird. Mit Hilfe einer *vollständig selektiven Analysenmethode* kann man auswählen, welche Bestandteile mit der Methode analysiert werden sollen. Diese Analysenmethoden sind in Bezug auf die Einzelkomponenten *spezifisch*.

Bei einer *unvollständig selektiven Analysenmethode* treten bei den auszuwertenden Signalen Überlagerungen auf. Die Analyse ist dann nur möglich, wenn die störenden Komponenten abgetrennt werden oder wenn sie mitbestimmt werden und eine rechnerische Korrektur erfolgt (vgl. Abschnitt 6.4). Vollselektive Analysenmethoden, die bezüglich der einzelnen Komponenten spezifisch ansprechen, sind in der Analytischen Chemie eher selten. In der Praxis genügt es, wenn die Konzentration störender Begleitkomponenten so niedrig ist, daß keine meßbaren Störungen des Analysensignals auftreten.

Zur Charakterisierung der Selektivität sind verschiedene methodentypische Maße, wie der *Selektivitätskoeffizient* in

der Potentiometrie (Abschnitt 4.3) oder die *Auflösung* in der Chromatographie (Abschnitt 5.1), gebräuchlich. Für die allgemeine Beschreibung der Auflösung von zwei analytischen Signalen wird das *analytische Auflösungsvermögen* verwendet. Zwei Signale lassen sich noch unterscheiden, wenn sie um den Betrag ihrer Halbwertsbreite Δz auseinanderliegen. Die unterscheidbaren Stufen eines Registrierbereiches lassen sich dann mit Hilfe des analytischen Auflösungsvermögens, N , als Verhältnis der Signallage, z , und der Signalhalbwertsbreite, Δz , charakterisieren (Abbildung 1-17):

$$N = \frac{z}{\Delta z} \quad (1-17)$$

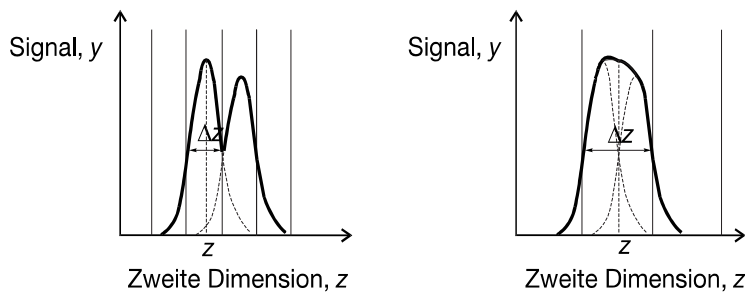


Abbildung 1-17.

Zweidimensionale Analysenverfahren mit unterschiedlichem analytischen Auflösungsvermögen N .

Aufwand, Zeit und Kosten – wirtschaftliche Kenngrößen

Eine wirtschaftliche Bewertung der Analytik ist in der analytischen Praxis unverzichtbar. *Aufwand* und *Zeit* so weit wie möglich zu minimieren, ist eine immerwährende Zielstellung bei der Entwicklung von Analysenverfahren. Ein wichtiger Aspekt ist hierzu die Mechanisierung und *Automatisierung* von Analysen (s. Abschnitt 7.1).

Als *Kosten* sind z. B. Betriebskosten zum Betreiben der Analysengeräte oder zur Beschaffung von Standardreferenzmaterialien, Gehälter des entsprechend qualifizierten Personals und Installationen oder Fachliteratur zu berücksichtigen.

Qualitätssicherung

Analysendaten müssen heutzutage zwischen unterschiedlichen Laboratorien bis in den internationalen Maßstab hinein vergleichbar sein. Dies setzt voraus, daß die Qualität der Prüfdaten gesichert ist. Darüber hinaus sollten die Planung, die Durchführung, die Aufzeichnung und die Archivierung von Prüfungen geregelt sein.

Kernpunkt der Vergleichbarkeit von Analysendaten ist ein geeignetes System der Qualitätssicherung. Nach DIN 55350 ist *Qualität* definiert als:

Die Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes oder einer Tätigkeit, festgelegte Erfordernisse zu erfüllen.

Zur Quantifizierung der Qualität sind im Rahmen der Qualitätssicherung Prüfungen notwendig. Die *Qualitätssicherung* umfaßt dabei alle Maßnahmen, die zur Erlangung der festgelegten Erfordernisse führen. Dazu gehören die Gesamtheit der Tätigkeiten des Qualitätsmanagements, der Qualitätsplanung, der Qualitätslenkung und der Qualitätsprüfungen.

Die Nichterfüllung eines Erfordernisses nach der DIN-Definition ist ein *Fehler*. Beeinträchtigt der Fehler die Verwendbarkeit, so spricht man von *Mangel*. Typisch für Analysen sind zufällige und systematische Fehler, falsch positive oder falsch negative Detektionsergebnisse sowie das vollständige Versagen einer analytischen Bestimmung.

Um Fehler bei Analysen kontrollieren zu können, müssen die einzelnen Verfahrensschritte genau festgelegt sein. Außerdem muß das Analysenverfahren auf seine Leistungsfähigkeit hin überprüft, d.h. es muß *validiert* werden. Für den Einsatz des Verfahrens in der Routineanalytik sind zusätzliche Kontrollen notwendig, auf die im einzelnen eingegangen wird.

Validierung von Analysenverfahren

Unter Validierung versteht man ganz allgemein die Sicherstellung, daß ein Analysenverfahren reproduzierbare und verlässliche Resultate liefert, die für den beabsichtigten Einsatzbereich genau genug sind.

Der erste Schritt bei der Entwicklung eines relativen Analysenverfahrens ist die *Kalibration*. Sie basiert auf der Verwendung von Standardlösungen oder festen Standards. Die Kalibrierfunktion wird mit Hilfe der linearen Regres-

sion ermittelt, wie dies in den Abschnitten 1.3 und 6.3 besprochen wird.

Die *Präzision* des Verfahrens kann in Form der Verfahrensstandardabweichung charakterisiert werden (Gleichung (1-8)). Als weitere Leistungsdaten ermittelt man die *Nachweisgrenze* nach Gleichung (1-14) bzw. (1-15) sowie den *Arbeitsbereich* (vgl. Abschnitt 1.3).

Zur Prüfung auf systematische Abweichungen, wie sie durch Einflüsse verschiedener Verfahrensschritte oder durch die Matrix hervorgerufen werden, muß man die *Wiederfindungsrate* ermitteln (vgl. Gleichung (1-11)). Um ein Analysenverfahren auf systematische Abweichungen hin zu untersuchen, verwendet man die *Wiederfindungsfunktion*.

Die Wiederfindungsfunktion beschreibt den Zusammenhang zwischen gefundener, x_{gefunden} , und wahrer Konzentration, x_w , im Sinne eines akzeptierten Referenzwertes mit Hilfe einer Geradengleichung:

$$x_{\text{gefunden}} = a_0 + a_1 x_w \quad (1-18)$$

wobei a_0 und a_1 Regressionsparameter sind. Im Idealfall sollte die Wiederfindungsfunktion durch den Ursprung des Koordinatensystems gehen und den Anstieg 1 haben, das heißt:

$$a_0 = 0 \quad \text{bzw.} \quad a_1 = 1,0 \quad (1-19)$$

In der Praxis werden diese Bedingungen nur angenähert gelten. Die Prüfung auf die Signifikanz der Abweichungen kann unter Verwendung der Vertrauensbereiche für die Parameter a_0 und a_1 ausgeführt werden. Die Vertrauensbereiche für die Parameter lauten:

$$\Delta a_0 = a_0 \pm t(P, f) s_{a_0} \quad (1-20)$$

$$\Delta a_1 = a_1 \pm t(P, f) s_{a_1} \quad (1-21)$$

mit t – Faktor der STUDENT-Verteilung (vgl. Tabelle 6-4)

P – Wahrscheinlichkeit

f – Anzahl der Freiheitsgrade

Die Standardabweichungen s_{a_0} und s_{a_1} für die Parameter werden entsprechend nach den Gleichungen (6-26) und (6-27) in Abschnitt 6.3 ermittelt. Eine konstant-systematische Abweichung liegt mit einer $P\%$ igen statistischen Sicherheit vor, wenn der Vertrauensbereich Δa_0 nicht den

Wert $a_0 = 0$ einschließt. Für den Fall, daß der Vertrauensbereich Δa_1 nicht den Wert $a_1 = 1$ enthält, gilt eine proportional-systematische Abweichung.

Abschließend muß die *Robustheit* des Analysenverfahrens untersucht werden. Damit soll sichergestellt werden, daß die Qualität der Daten von kleineren Schwankungen bei der Ausführung des Verfahrens unabhängig ist.

Die Robustheit läßt sich einmal durch Ringversuche ermitteln, deren Durchführung in der externen Qualitätskontrolle besprochen wird. Im eigenen Labor kann die Robustheit eines Verfahrens durch Variation der experimentellen Parameter in zulässigen Grenzen ausgetestet werden.

Die erarbeitete Analysenvorschrift dient als Grundlage für die Qualitätssicherung in der Routineanalytik. Sie wird in einer *Standardarbeitsanweisung* zusammengefaßt. Der Anwendungsbereich und die damit erreichbaren Qualitätsziele werden damit festgelegt.

Interne Qualitätssicherung

Die Qualitätskontrolle eines Verfahrens in der Routine basiert in erster Linie auf Präzisions- und Zuverlässigkeitsdaten, wie Mittelwerte, Standardabweichungen, Spannweiten (Grenzen des dynamischen Arbeitsbereiches), Wiederfindungsraten und Zuverlässigkeitsbereichen (Streu- bzw. Vertrauensbereiche).

Für die interne Qualitätssicherung verwendet man *Kontrollproben* in Form von:

- Standardlösungen
- Blindproben
- Reale Proben
- Synthetische Proben
- Zertifizierte Standardreferenzmaterialien

Die Kontrollproben sollen in jeder Analysenserie wenigstens ein- oder zweimal mitanalysiert werden, um die Richtigkeit der Messungen zu kontrollieren.

Zur Überwachung von Prüfverfahren oder auch zur Qualitätssicherung von Produkten oder Prozessen unter Verwendung analytischer Methoden haben sich *Qualitätsregelkarten* bewährt. Hierbei wird eine Qualitätszielgröße in bestimmten Abständen in eine Regelkarte eingetragen (Abbildung 1-18).

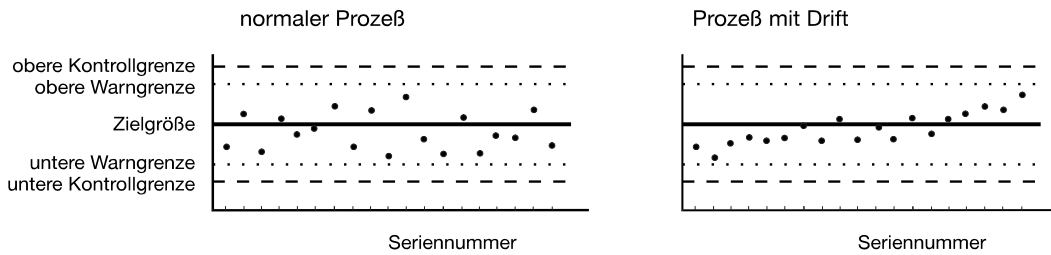


Abbildung 1-18.

Verlauf von Zielgrößen in einer Regelkarte. Die gepunktete Linie charakterisiert die untere bzw. obere Warngrenze. Die gestrichelte Linie beschreibt die untere bzw. obere Eingriffsgrenze (Kontrollgrenze).

Aus dem Verlauf der Zielgröße können typische Situationen auf einfache Weise erkannt werden. Als Zielgrößen dienen Soll- oder Referenzwerte sowie deren Kontrollgrenzen. Man unterscheidet nach der Art der Zielgröße Einzelwertkarten, Mittelwertkarten, wie die \bar{x} -Karte, Mediankarte oder Blindwertkarte, Streuungskarten, wie die Standardabweichungs- oder Spannweitenkarte, sowie die Wiederfindungsraten-Karten. Die Berechnung der Zielgröße, die als Zentrallinie eingetragen wird, und deren Schranken ist in Tabelle 1-1 für wichtige Regelkarten angegeben. Die Grenzen bei der \bar{x} -Karte werden auf der Basis der t -Verteilung ermittelt. Für die Standardabweichungskarte zieht man zur Festlegung der Schranken die χ^2 -Verteilung heran. Die χ^2 -Werte können statistischen Tabellen entnommen werden. Die Spannweitenkarte basiert auf den Spannweiten zwischen dem größten und kleinsten Meßwert innerhalb einer Untergruppe i ($x_{i,max}$ bzw. $x_{i,min}$). Die oberen und unteren Grenzen ergeben sich durch Multiplikation mit D -Faktoren, die in Tabelle 1-9 für 95% und 99% statistischer Sicherheit aufgeführt sind.

Tabelle 1-1.

Regelgrößen in Qualitätsregelkarten. N – Anzahl von Untergruppen; n – Anzahl Wiederholungsmessungen pro Untergruppe (n_i); x_i – Meßwert; s_i – Standardabweichung aus n_i Parallelbestimmungen; t – STUDENT-Faktor; P – Wahrscheinlichkeit; f – Anzahl der Freiheitsgrade.

Zielgröße	Berechnung der Zielgröße	untere Grenze	obere Grenze
Mittelwert \bar{x}	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$\bar{x} - t(P, f) \frac{s}{\sqrt{n}}$	$\bar{x} + t(P, f) \frac{s}{\sqrt{n}}$
mittlere Standardabweichung s_m	$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^N (n_i - 1)}}$	$s_m \sqrt{\frac{1}{n-1} \chi^2 \left(n-1, \frac{\alpha}{2} \right)}$	$s_m \sqrt{\frac{1}{n-1} \chi^2 \left(n-1, 1 - \frac{\alpha}{2} \right)}$
Spannweite \bar{R}	$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{i,\max} - x_{i,\min})}{N}$	$D_{\text{unten}} \bar{R}$	$D_{\text{oben}} \bar{R}$

Das Signifikanzniveau von $P=95\%$ dient als Warngrenze. Ein einmaliges Überschreiten der Warngrenze verlangt nur eine erhöhte Aufmerksamkeit bei der Kontrolle des Prozesses. Die Kontrollgrenze oder Eingriffsgrenze legt man auf dem Signifikanzniveau von 99% fest. Tritt ein Wert außerhalb der Kontrollgrenze auf, macht dies einen sofortigen Eingriff erforderlich. Man spricht von einer „Außer-Kontroll-Situation“.

Tabelle 1-2.

D -Faktoren zur Berechnung der Grenzen bei der Spannweitenregelkarte für die Wahrscheinlichkeiten P von 95% und 99% .

n	$P=95\%$ bzw. $\alpha=5\%$		$P=99\%$ bzw. $\alpha=1\%$	
	D_{unten}	D_{oben}	D_{unten}	D_{oben}
2	0,039	2,809	0,008	3,518
3	0,179	2,176	0,080	3,518
4	0,289	1,935	0,166	2,614
5	0,365	1,804	0,239	2,280
6	0,421	1,721	0,296	2,100
7	0,462	1,662	0,341	1,986
8	0,495	1,617	0,378	1,906
9	0,522	1,583	0,408	1,846
10	0,544	1,555	0,434	1,798

Die Umsetzung eines Qualitätssicherungssystems erfolgt im *Qualitätssicherungshandbuch*. Darin sind alle Strukturen, Verantwortlichkeiten, Standardarbeitsanweisungen und Hilfsmittel zur Realisierung der Qualitätssicherung zusammengefaßt.

Externe Qualitätssicherung

Ringversuche

Um die Vergleichbarkeit von Analysenergebnissen sicherzustellen, führt man Ringversuche aus. Zielstellung kann dabei sein:

- Die Standardisierung von Analysenverfahren;
- Die Überwachung der Analysen in einem Labor;
- Die Erstellung eines zertifizierten Referenzmaterials.

Nach DIN 38402 sollten sich an einem Ringversuch wenigstens 8 oder besser noch mehr als 15 Laboratorien beteiligen. Von diesen Labors sind je Probe typischerweise 4 Parallelbestimmungen auszuführen. Die Präzision der einzelnen Labors kann aus den Parallelbestimmungen mit Hilfe der Standardabweichung (Gleichung (1-6)) bestimmt werden. Zur Bewertung der Richtigkeit ermittelt man die Wiederfindungsrate nach Gleichung (1-11). Die Labormittelwerte werden dazu auf einen Sollwert oder auf den Gesamtmittelwert bezogen.

Rückführbarkeit

Chemische Analysen sollen letztlich in gleicher Weise untereinander vergleichbar sein, wie dies bei physikalischen Größen möglich ist: Die Länge eines Gegenstandes läßt sich in Meter oder seine Masse in Kilogramm exakt angeben.

Die Grundlage für die Vergleichbarkeit chemischer Analysen ist der Bezug auf Standardreferenzmaterialien, deren Gehalte bzw. Konzentrationen genau bekannt sind. Die in einer Probe enthaltenen Elemente bzw. Verbindungen werden vorzugsweise auf das Mol zurückgeführt. Probleme in der Rückführbarkeit chemischer Analysen ergeben sich oftmals aus der eingeschränkten Selektivität analytischer Verfahren. Während man bei der Bestimmung der Masse eines Stoffes keine grundsätzlichen Fehler macht, kann dies bei der Bestimmung einer Einzelsubstanz in einer komplexen Matrix wie Blut, nicht in gleichem Maße vorausgesetzt werden. Die Validierung analytischer Ergebnisse ist daher häufig schwieriger als bei der Ermittlung physikalischer Meßgrößen.

Akkreditierung von Laboratorien

Ein analytisches Labor weist eine wirksame Qualitätssicherung durch eine *Akkreditierung* nach. Damit wird die Kompetenz des Labors für die Durchführung bestimmter Analysemethoden gegenüber einem unabhängigen Dritten bescheinigt. In den einzelnen Ländern entstanden unterschiedliche Akkreditierungssysteme. In Deutschland gibt es kein zentrales Akkreditierungssystem, sondern ein System, das dezentral auf bestimmte Sektoren zugeschnitten ist.

Der Rat der Europäischen Gemeinschaft sorgte für eine Harmonisierung der nationalen Akkreditierungssysteme. Es entstanden einheitliche Kriterien für die Arbeit von Prüflaboratorien, für deren Akkreditierung und für Zertifizierungen. Das Ergebnis dieser Harmonisierungsbestrebungen ist die Normenserie der Euronorm EN 45000 (Tabelle 1-3). Alle Akkreditierungen werden gegenwärtig auf der Grundlage der EN 45000 ausgeführt.

Tabelle 1-3.

Festlegungen allgemeiner Kriterien in der Normenserie EN 45000.

Euronorm	Bedeutung
EN 45001	Das Betreiben von Prüflaboratorien
EN 45002	Die Beurteilung von Prüflaboratorien
EN 45003	Die Organisation von Akkreditierungsstellen
EN 45011	Zertifizierung von Produkten
EN 45012	Zertifizierung von Personal

1.4 Literatur

- K. Camman (Hrsg.), Instrumentelle Analytische Chemie-Verfahren, Anwendungen und Qualitätssicherung, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, 2001
- K. Doerffel, Statistische Methoden in der analytischen Chemie, 5. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1990.
- W. Funk, V. Dammann und G. Donnevert, Qualitätssicherung in der Analytischen Chemie, 2. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
- H. Günzler (Hrsg.), Akkreditierung und Qualitätssicherung in der Analytischen Chemie, Springer, Berlin, 1994.
- R. Kellner, J.-M. Mermet, M. Otto, M. Valcarcel and H.M. Widmer (Eds.), Analytical Chemistry, 2. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- D. A. Skoog, D. M. West and F. J. Holler, Fundamentals of Analytical Chemistry, 6. Auflage, Saunders College Publishing, Fort Worth, U.S.A., 1993.

Aufgaben

1. Erläutern Sie die Begriffe Analyse, Bestimmung, Nachweis und Detektion.
2. Beschreiben Sie den analytischen Prozeß konkret a. für die quantitative Analyse von Legierungselementen in einem Stahl und b. zum Nachweis des Schadstoffes Dioxin in Butter.
3. Warum ist eine repräsentative Probennahme ein ganz wesentlicher Teilschritt im Rahmen eines vollständigen Analysenverfahrens?
4. Welche Probenvorbereitungsschritte werden benötigt, um a. Nitrat in einem Abwasser, b. Molybdän in einem Stahl, c. Schwefeldioxid in der Atmosphäre und d. Glucose im Blut zu analysieren?
5. Beschreiben Sie die analytischen Kenngrößen Präzision, Richtigkeit und Genauigkeit und geben Sie an, wie diese Größen quantifizierbar sind.
6. Bei einer Analyse von Kupfer mit der Spektralphotometrie ergab sich als Blindwert eine Extinktion von 0,032 mit einer Standardabweichung von 0,016. a. Berechnen Sie den Messwert an der Nachweisgrenze. b. Wie groß ist die noch nachweisbare Kupferkonzentration in $\mu\text{g/L}$, wenn die Empfindlichkeit der Bestimmung $10^4 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ betrug?

7. Gegeben sind die in der Tabelle angeführten Meßwerte einer Bestimmung von Aluminiumkonzentrationen, c_{Al} , mit Hilfe der Atomemissionspektrometrie. Ermitteln Sie die relative Präzision und Richtigkeit der Methode.

$c_{\text{Al}}, \mu\text{g mL}^{-1}$	<i>Intensität</i>
0	700
1	2500
2	4400
3	6800
3	8500
4	11900
<i>Standard:</i>	
2	5000

8. Zur spektralphotometrischen Bestimmung von Phenol in einem Abwasser wurde die Standard-Additionsmethode eingesetzt. Für 3 Zusätze, c_{Phenol} , ergaben sich die unten aufgeführten Extinktionswerte. Berechnen Sie die Phenolkonzentration des Abwassers. Geben Sie das Vertrauensintervall mit an.

$c_{\text{Phenol}}, \mu\text{g L}^{-1}$	<i>Extinktion</i>
Ohne	0,18
Ohne	0,20
Ohne	0,21
0,5	0,30
1,0	0,39
1,5	0,52