

Luftreinhaltung in der chemischen Industrie – ein Teilproblem des Umweltschutzes*

Von PD Dr. B. BÖHLEN

Vizedirektor, Eidgenössisches Amt für Umweltschutz, Bern

1. Einleitung

Die «Reinhaltung der Luft» stellt zweifellos eine der dringendsten und wichtigsten Aufgaben des Umweltschutzes dar. Gegen schädliche Stoffe in der Atmosphäre ist der Mensch weitgehend hilflos.

Eine Überbelastung der Atmosphäre durch luftfremde Stoffe muß deshalb durch eine Emissionsverminderung mittels gezielter Maßnahmen verhindert werden. Es ist bekannt, daß diese Maßnahmen teilweise recht kostspielig sind und daß sie nicht zuletzt deshalb bisher nur zögernd und wenig dynamisch zur Anwendung gelangt sind.

In den einzelnen Ländern bestehen zudem erhebliche Unterschiede in der Strategie der Luftreinhaltung, was die Durchsetzung von Maßnahmen, auf freiwilliger und auf erzwungener Basis, keineswegs erleichtert.

Mit den nachfolgenden Ausführungen sollen in einem ersten Teil vorerst ein Überblick über die Problematik der Erfassung und Bewertung der Luftverschmutzung gegeben und dann einige wichtige Konzepte für die Durchführung von Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft besprochen werden. Diese allgemeinen Gesichtspunkte befassen sich nicht speziell mit den Emissionen der chemischen Industrie, sind aber grundsätzlich für alle Emittenten von Bedeutung.

In einem zweiten Teil soll schließlich auf die eigentlichen technologischen Maßnahmen eingetreten und aufgezeigt werden, wo die wesentlichen Schwierigkeiten der Luftreinhaltungstechnik im Bereich der chemischen Industrie liegen.

2. Quellen der Luftverunreinigung und deren Bewertung

Als Luftverunreinigungen gelten üblicherweise feste, flüssige und gasförmige Stoffe, die die natürliche Zusammensetzung der Atmosphäre ändern. Im Zusammenhang mit den Aufgaben des Immissionsschutzes werden normalerweise Quellen von Luftverunreinigungen in Betracht gezogen, die künstlicher Art sind, also Industrie- und Gewerbeanlagen, Fahrzeuge und Heizungsaggregate. Zur Vereinfachung der Diskussion um die Quellen der Luftverunreinigung sind bestimmte Kategorien von Quellengruppen eingeführt worden, die in sich nach der Art der Emissionen und des emittierenden Prozesses abgegrenzt sind.

Diese Quellengruppen sind Industrie und Gewerbe, Verkehr und die thermische Energieerzeugung.

2.1. Globaldarstellung

In den vergangenen Jahren sind verschiedentlich Schätzungen und Berechnungen über den Beitrag dieser Quellengruppen zur gesamten Luftverschmutzung angestellt worden. Eine entsprechende Untersuchung für Westeuropa hat beispielsweise ergeben, daß der mengenmäßige Anteil der durch den Verkehr erzeugten Emissionen 55%, derjenige der thermischen Energieerzeugung 28% und derjenige der Industrie 17% der Gesamtemissionen beträgt.

Der Aussagewert einer derartigen Globaldarstellung ist allerdings begrenzt, weil diese keine Angaben über die Schädlichkeit emittierter Luftfremdstoffe enthält und nur unklare Beziehungen zum Immissionsrisiko bestehen. Jedenfalls sind solche Werte mit aller Vorsicht als Grundlage für die Erstellung von Prioritätenordnungen oder gar für die Bewertung von Einzelemittenten zu verwenden.

Es wird dies sofort ersichtlich, wenn in Betracht gezogen wird, daß Luftfremdstoffe sehr unterschiedliche Schädwirkungen aufweisen. Beispielsweise bestehen in den USA u. a. Immissionsgrenzwerte für Staub und Beryllium. Demzufolge darf über ein Meßintervall von 24 Stunden der mittlere Staubgehalt einen Wert von $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der mittlere Berylliumgehalt der Luft einen solchen von $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht übersteigen. Es kommt in diesen Grenzwerten zum Ausdruck, daß trotz dem verschwindend geringen Emissionsanteil des Berylliums in jeder Globaldarstellung lokal und regional trotzdem erhebliche Immissionsrisiken bestehen können.

Diese Tatsache ist speziell bei der Bewertung der Quellengruppe Industrie, insbesondere der chemischen Industrie, zu berücksichtigen. Wegen der Vielzahl der Emissionskomponenten und deren Menge sowie wegen des durch rasche technologische Entwicklungen bedingten Wandels der Emissionen werden sich von dieser Seite her auch in Zukunft ständig neue und schwierig zu beurteilende Immissionsituationen ergeben.

2.2. Emissionskataster

Wesentlich aussagekräftiger sind flächenbezogene Emissionskataster, die eine lokale und regionale Differenzierung nach Emittenten und emittierten Stoffen gestatten. In den USA gehört das Emissionskataster zu den anerkannten Mitteln der Luftreinhaltungsprogramme. Emissionskataster geben einen Überblick über die geographische Verteilung der Emissionsquellen und der Häufigkeit von emittierten Stoffen. Ihr Hauptwert ist vor allem

* Vorgetragen an der Wintertagung des Schweizerischen Chemiker-Verbandes am 5. Februar 1972 in Attisholz.

darin zu sehen, daß sie längerfristig für die Erfolgsbewertung von Maßnahmen außerordentlich nützlich sind und eine wertvolle Grundlage für Planungsentscheidungen bilden.

Die Erstellung von Emissionskatastern erfolgt in den USA bisher vorwiegend mit sogenannten Emissionsfaktoren. Diese erlauben die Berechnung von mittleren spezifischen Emissionswerten für einzelne Emittentengruppen ohne Berücksichtigung von Einzelsituationen. In der Bundesrepublik Deutschland neigt man eher zur Quellenanalyse. Diese Methode erfordert Erhebungen an jeder Einzelanlage, zumindest bei Emissionen im industriellen Bereich.

Der Aussagewert derartiger Erhebungen läßt sich an folgenden Beispielen aufzeigen:

Bei der Erstellung eines Emissionskatasters in der BRD wurden in einem Industriegebiet von 5 km² Ausdehnung etwa 80 verschiedene industrielle Luftfremdstoffe ermittelt. Die Erhebung lieferte eine jährliche Emissionsmenge von 20 000 t, wovon 19 000 t gasförmige und 1 000 t staubförmige Komponenten. Die gasförmigen Emissionen setzten sich zu 40% aus Schwefeldioxid und zu 48% aus organischen Gasen und Dämpfen zusammen.

Bei der Untersuchung eines Industriegebietes mit vorwiegend chemischen und petrochemischen Betrieben wurde nach DREYHAUPT¹ weiter festgestellt, daß 80% der gasförmigen industriellen Emissionen aus definierten Quellen, 20% dagegen aus diffusen, d. h. unkontrollierten Quellen, wie Fenstern, Flanschen, Ventilen usw., abgegeben werden. DANIELSON² weist darauf hin, daß in Erdölraffinerien Pumpen und Ventile einen erheblichen Beitrag zur Luftverschmutzung zufolge von Leckverlusten liefern.

Aufgrund einer repräsentativen Untersuchung an 473 von 2786 Pumpen einer Erdölraffinerie konnte gezeigt werden, daß die Leckverluste im Mittel etwa 2 kg Kohlenwasserstoffe pro Tag und Pumpe betragen oder täglich 5,5 t in der gesamten Raffinerieanlage.

Diese Beispiele dürften mit aller Deutlichkeit den Wert von Erhebungen zur Erstellung von Emissionskatastern aufzeigen.

2.3. Immissionsbelastung

Von unmittelbarer Aussagekraft hinsichtlich der in einem bestimmten Gebiet vorhandenen Immissionsrisiken wäre indessen eine kartographische Darstellung der Immissionen selbst. Da hierzu ein umfangreiches Meßnetz benötigt wird, dürfte diese Methode zur Bewertung der Luftverschmutzung vorderhand allerdings nur in Ballungsgebieten oder im Bereich von Großemittenten in Betracht fallen. Es sei darauf hingewiesen, daß verschiedene ausländische Städte derartige Meßnetze besitzen, wobei aber zumeist nur Schwefeldioxid oder allenfalls Kohlenmonoxid und Staub als Leitkomponenten der Luftverschmutzung gemessen werden.

Ein derartiges Meßnetz erfüllt seinen Zweck aber zweifellos nur dann, wenn es die gefährlichen Luftfremdstoffe

erfaßt. Es ist durchaus nicht erwiesen, daß den drei erwähnten Komponenten diese Eigenschaft überall und zu jeder Zeit zukommt.

In diesem Zusammenhang darf festgestellt werden, daß Meßnetze von großer Wichtigkeit sind. Von ähnlicher Wichtigkeit ist aber die Zuverlässigkeit hinsichtlich meßtechnischer Belange. Diese letzte Forderung ist leider nicht immer erfüllt. Es muß in vermehrtem Maße eingesehen werden, daß die meßtechnische Erfassung von Stoffen im Spurenbereich ein sehr anspruchsvolles Metier darstellt.

3. Auswirkungen von Luftverunreinigungen und Immissionsgrenzwerte

Die Messung und Überwachung der Luftqualität beinhaltet als eine Teilaufgabe die Feststellung von Immissionsrisiken. Immissionsgrenzwerte dienen dabei als Vergleichsbasis. Die Frage der Immissionsgrenzwerte ist eine der schwierigsten der Luftreinhaltung überhaupt. Dies äußert sich nicht zuletzt darin, daß derartige Grenzwerte international erheblich voneinander abweichen, und zwar nicht nur wertmäßig, sondern auch hinsichtlich der Definition.

Nach den Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) stellen maximale Immissions-Konzentrationen (MIK-Werte) diejenigen Konzentrationen an luftverunreinigenden Stoffen in bodennahen Schichten der Atmosphäre dar, die nach den derzeitigen Erfahrungen im allgemeinen für Mensch, Tier und Pflanze bei Einwirkung von bestimmter Dauer oder Häufigkeit als unbedenklich gelten können.

Aus meßtechnischen Gründen und um die naturgemäßen Konzentrationsschwankungen in der freien Atmosphäre auszugleichen, werden die Durchschnittswerte für bestimmte Zeitintervalle festgelegt. Kurzzeitwerte dienen meist der Beurteilung hinsichtlich akuter Einwirkungen, Langzeitwerte aber hinsichtlich chronischer Wirkungen.

Trotzdem in den letzten Jahren sehr intensive Forschungsarbeiten über den Zusammenhang zwischen der Immissionsbelastung und der Wirkung auf Mensch, Tier und Pflanze durchgeführt worden sind, ist das Wissen in diesem entscheidenden Punkt mehr als nur dürftig. Die Sachlage wird vor allem dadurch erschwert, daß

- Auswirkungen oft erst lange Zeit nach der schädlichen Einwirkung auftreten und damit eine Korrelation zwischen Ursache und Wirkung nur schwierig herzustellen ist;
- nicht nur die in die Atmosphäre emittierten primären Luftfremdstoffe Auswirkungen zeitigen, sondern auch die in der Atmosphäre durch chemische Reaktion entstandenen sekundären Luftfremdstoffe;
- die gleichzeitige Einwirkung verschiedener Luftfremdstoffe in qualitativer und quantitativer Hinsicht andere Auswirkungen zeitigen, als dies aufgrund der reinen Komponenten zu erwarten wäre.

Die Aufnahme von Schadstoffen in den Organismus in Mengen, die im Bereich der Wirkungsgrenze liegen, führt in der Mehrzahl der Fälle zu nur sehr unbestimmten Symptomen, die im Einzelfall sehr schwierig zu objektivieren sind. Verschiedene Wissenschaftler sind der Ansicht, daß biologisch begründete Immissionsgrenzwerte sich mit den Mitteln der Epidemiologie kaum festlegen lassen.

Es mag dies zeigen, daß die Wissenschaftler, die sich mit diesen Fragen beschäftigen, eine außerordentlich große Verantwortung bei der Festlegung derartiger Grenzwerte tragen, müssen letztere doch u. U. als Basis für schwerwiegende Entscheidungen im Rahmen von Luftreinhalteprogrammen dienen.

Allgemein zeigt sich, daß für die Zukunft zufolge neuer Erkenntnisse eine Korrektur bestehender Grenzwerte nötig sein könnte, und zwar vorwiegend nach niedrigeren Werten hin. Mit dazu beitragen dürften z. B. die für die allgemeine Ökologie wichtigen Feststellungen, daß Luftfremdstoffe über Landesgrenzen hinaus transportiert werden und sogar in weiter Entfernung vom Emissionsort Auswirkungen zeitigen. So wurde in den letzten fünf Jahren in fünfzehn Flüssen Schwedens eine stetige Absenkung des pH-Wertes des Wassers beobachtet, mehrheitlich um 0,1 bis 0,4 Einheiten. Dieser Effekt wird auf die Verfrachtung von Schwefeldioxid aus England und Deutschland zurückgeführt.

4. Konzepte für die Durchführung von Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft

Die gemeinsame Zielsetzung aller Maßnahmen zur Luftreinhaltung besteht darin, den Menschen und seine natürliche Umwelt vor Einwirkungen durch Luftfremdstoffe zu schützen.

Zahlreiche technische Einrichtungen und Verfahren gestatten es heute, eine Vielzahl von Teilproblemen zu lösen. Bei fortgesetztem Wirtschaftswachstum werden diese Einzelmaßnahmen wohl kaum genügen. Vielmehr wird es nötig sein, im Rahmen eines Gesamtkonzeptes die wissenschaftlichen, technischen und planerischen Maßnahmen koordiniert zusammenzufassen.

4.1. Allgemeine Konzepte

In den einzelnen Ländern bestehen heute unterschiedliche Auffassungen darüber, mit welchen Mitteln die Reinhaltung der Luft am wirkungsvollsten betrieben werden kann. Verhandlungsgegenstand einiger internationaler Organisationen ist immer wieder die Angleichung dieser Auffassungen.

Grob können zwei Grundkonzepte unterschieden werden, nämlich

- das Konzept der Anwendung optimaler Technologien (*the best practical mean*);
- das Konzept der Einhaltung einer bestimmten Luftqualität bzw. von Immissionsgrenzwerten.

Das erstere Konzept wird vor allem in England praktiziert. Es verfolgt das Ziel, eine Luftverunreinigung soweit zu verhindern, wie nach dem Stand der Technik und der wirtschaftlichen Tragbarkeit möglich ist; Immissionsgrenzwerte werden überhaupt nicht in Betracht gezogen. Die Befürworter sind der Ansicht, daß der Grundsatz, die Luft so rein als möglich zu halten, mit diesem Konzept am ehesten erfüllt werden kann.

Die Gegner befürchten, daß die Anwendung optimaler Technologien keine Garantie dafür gibt, daß die Luftverschmutzung nicht trotzdem Ausmaße erreicht, die für den Menschen und seine natürliche Umwelt Schadenfolgen nach sich ziehen.

Das zweite Konzept setzt voraus, daß Grenzwerte für die Immissionskonzentration festgesetzt werden. Zweifellos ist dieses Konzept das logischere, ermöglicht es doch, die Luftverunreinigung auf einem Maß zu halten, das entsprechend dem jeweiligen Stand der Erkenntnisse als risikolos oder zumindest risikoarm angesehen wird.

Die Bedeutung dieser beiden Konzepte läßt sich mit einem einfachen Schema (Abb. 1) darstellen.

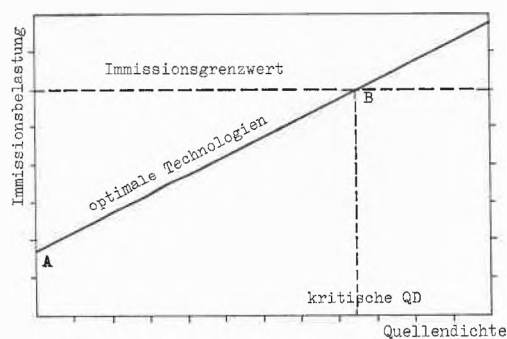


Abb. 1. Maßnahmen zur Luftreinhaltung und Immissionsbelastung

Im Schema sind die Immissionsbelastung, d. h. der Grad der Luftverschmutzung, als Ordinate und die Quelledichte, als Abszisse einander gegenübergestellt. Die Linie A-B liefert den Zusammenhang zwischen Quelledichte und Immissionsbelastung bei Anwendung der optimalen Technologien; es zeigt sich sofort eine wesentliche Eigenschaft dieses Konzeptes. Bei geringer Quelledichte garantiert es eine unterhalb des Immissionsgrenzwertes liegende Belastung. Oberhalb einer kritischen Quelledichte QD_{krit} ist die Einhaltung der Toleranzgrenze dagegen nicht mehr gewährleistet.

Das zweite Konzept basiert auf einem Immissionsgrenzwert. Solange dieser nicht überschritten ist, sind keine speziellen Maßnahmen erforderlich. Das bedeutet, daß unabhängig von der Quelledichte eine konstante Verunreinigung der Atmosphäre toleriert werden muß.

¹ J. DREYHAUPT, *Luftreinhaltung als Faktor der Stadt- und Regionalplanung*, Verlag TUV, Rheinland GmbH, 1971.

² J. A. DANIELSON, *Air Pollution Engineering Manual*, U.S. Department of Health, Education and Welfare, 1967.

Der Vorteil des Konzeptes der Anwendung optimaler Technologien besteht offensichtlich darin, daß es eine Verminderung der Luftverschmutzung gestattet, obwohl deren Auswirkungen nur vage bekannt sind. Andererseits zeigen sich zusätzlich zu der bereits erwähnten Nichtgewährleistung einer ausreichenden Luftqualität Nachteile. Das Anwachsen der Quellendichte setzt voraus, daß sich die optimalen Technologien entsprechend verbessern, andernfalls eine Verschlechterung der Luftqualität die Folge wäre. Ein weiterer Nachteil ist zweifellos auch die im Begriff «optimale Technologie» enthaltene unbestimmte Zielsetzung. Eine Analyse der Verfahrensentwicklungen auf dem Gebiet der Abgasreinigung im allgemeinen, der Abgasentstaubung im speziellen führt zum Befund, daß in den letzten zwanzig bis dreißig Jahren kaum nennenswerte Fortschritte erzielt worden sind bzw. die diesbezüglichen optimalen Technologien über Jahrzehnte dieselben geblieben sind.

Aber auch das Konzept der Einhaltung einer bestimmten Luftqualität ist nicht ohne Mängel; einerseits sind die Toleranzwerte an sich unsicher, und es ist, wie bereits erwähnt, zu erwarten, daß sie sich künftig aufgrund neuer Erkenntnisse eher in Richtung niedrigerer Werte bewegen werden. Weiter läßt sich das Konzept nur dann handhaben, wenn mittels eines umfangreichen Meßnetzes die Luftqualität ständig überwacht werden kann, was einen nicht zu unterschätzenden Aufwand nach sich ziehen würde.

Es läßt sich aber auch eine Alternativlösung in Betracht ziehen, die die Vorteile der beiden Konzepte in sich vereinigt. Diese würde darin bestehen,

- bei Neuanlagen konsequent optimale Technologien zu verlangen;
- für alte Anlagen ein Sanierungsprogramm einzuleiten;
- in Ballungsgebieten mit hoher Quellendichte eine Verbesserung der Luftqualität nach dem Konzept der Luftüberwachung anzustreben.

4.2. Grundsätze der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene

Interessant sind in diesem Zusammenhang die von der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene 1970 aufgestellten Grundsätze zur Beurteilung lufthygienischer Probleme.

Ein erster Grundsatz besagt, daß die Luft so rein als möglich zu halten ist und daß sich der bestehende Zustand nicht weiter verschlechtern darf.

Dieser Grundsatz entspricht dem Konzept der Luftüberwachung mit variablen Immissionsgrenzwerten. Letztere leiten sich ab von der derzeitigen lokalen und regionalen Luftqualität.

Eine Erfüllung dieses Grundsatzes ist nur dann möglich, wenn verbesserte Technologien jede Zunahme der Quellendichte und der Belastung ausgleichen.

Ein zweiter Grundsatz besagt, daß der Ausstoß von luftfremden Stoffen in die Atmosphäre wenn immer möglich vermindert wird.

Es bedeutet dies nichts anderes als die konsequente Anwendung optimaler Technologien. Ob eine Maßnahme technisch möglich und wirtschaftlich tragbar ist, kann anhand von Vergleichen mit Fällen ähnlicher Art beurteilt werden. Eine Maßnahme, die sich unter ähnlichen Verhältnissen in andern Betrieben als durchführbar erwiesen hat, wird im allgemeinen als technisch möglich und wirtschaftlich tragbar betrachtet werden können.

Diese Grundsätze sind mittel- und langfristig zu sehen. Es ist klar, daß jede neue Quelle in einem bestimmten Gebiet eine zusätzliche Immissionsbelastung bringt, daß andererseits verbesserte Technologien nicht sofort für bereits bestehende Emittenten zur Verfügung stehen und daß deshalb kurzfristig eine lokale Zunahme der Luftverschmutzung nicht zu verhindern ist. Auf das Problem der Schwefeldioxid-Emission angewendet, ermöglichen die Grundsätze gewisse Aussagen bezüglich der künftigen Anforderungen. Schwefeldioxid entstammt vorwiegend der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Eine Verminderung der Schwefeldioxidemission kann vorläufig nur auf dem Weg der Verwendung schwefelarmer Brennstoffe angestrebt werden. Die Verfahren zur Rauchgas-Entschwefelung kommen entsprechend dem Stand der derzeitigen Erkenntnisse vorderhand nur für Großanlagen mit Leistungen von einigen 100 Megawatt in Frage.

Hinsichtlich des künftigen Verbrauchs an Brennstoffen sind für die Schweiz Prognosen aufgestellt worden (Tabelle 1).

Tabelle 1. Verbrauch von Brennstoffen in der Schweiz

	Millionen t pro Jahr		1980
	1960	1970	
Heizöl «Extraleicht»	0,997	5,843	10,000
Heizöl «Mittel»	0,284	0,381	0,250
Heizöl «Schwer»	0,398	1,872	3,000
Kohle	2,710	1,027	0,200

Demzufolge ist für das Jahr 1980 ein Verbrauch von Heizöl «Extraleicht» von 10 Millionen t, für Heizöl «Schwer» von 3 Millionen t zu rechnen.

Aufgrund des mittleren Schwefelgehaltes von Heizölen und Kohle ist es möglich, für die Jahre 1960 und 1970 die Gesamtemission an Schwefeldioxid aus Feuerungsanlagen abzuschätzen.

Es zeigt sich, daß die Schwefeldioxidemission zwischen 1960 und 1970 gesamtschweizerisch erheblich angewachsen ist.

Wird der Grundsatz angewendet, wonach die Luftverschmutzung in der Schweiz nicht mehr zunehmen darf, so ergibt sich aufgrund der Prognosen für den Brennstoffverbrauch im Jahre 1980 der Befund, daß bis dahin der Schwefelgehalt der Heizöle um etwa 25% gesenkt

werden sollte. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß in Ballungsgebieten die Immissionsbelastung mit zunehmender Quelledichte ansteigt, ist aber eine zusätzliche weitergehende Senkung des Schwefelgehaltes zu verlangen.

In den vom Departement des Innern kürzlich erlassenen Richtlinien über die «Auswurfbegrenzung bei Haus- und Industriefeuerungen» werden maximal zulässige Schwefelgehalte von 0,5 Gew.-% für Heizöl «Extra-leicht» und 2,0 Gew.-% für Heizöl «Mittel» und «Schwer» verlangt.

Bis 1974 sollen diese Werte auf 0,3 bzw. 1,5 Gew.-% gesenkt werden. Es bedeutet dies nichts anderes, als daß eine Verbesserung der derzeitigen optimalen Technologie zur Entschwefelung von flüssigen Brennstoffen stattfinden muß.

5. Maßnahmen zur Luftreinhaltung in der chemischen Industrie

5.1. Allgemeine Gesichtspunkte

Die chemische Industrie in der Schweiz umfaßt im wesentlichen die Herstellung von Farbstoffen, pharmazeutischen Produkten, landwirtschaftlichen Hilfsstoffen (Dünger, Schädlingsbekämpfungsmitteln), Kunststoffen, Lacken und Leimen, Sprengstoffen, Waschmitteln, Kosmetika und Riechstoffen sowie einer Anzahl von Produkten, die auf elektrochemischen Wegen hergestellt werden. Das breite Spektrum an Rohstoffen, Zwischen- und Fertigprodukten sowie die Vielzahl der Produktions- und Verarbeitungsverfahren bedingt eine sehr große Mannigfaltigkeit von Emissionsproblemen.

Die emittierten Stoffe sind Gase, Dämpfe, üble Gerüche, Stäube, Rauch und Aerosole und ergeben entsprechend einen zahlenmäßig umfangreichen Katalog an luftfremden Stoffen.

Die Maßnahmen zur Emissionsbekämpfung in der chemischen Industrie müssen aus dieser Sicht naturgemäß denjenigen anderer Industriezweige entsprechen. Die Anstrengungen zur Luftreinhaltung können in dreierlei Richtung gehen, nämlich

- das Auftreten und das Entweichen störender Abgas-komponenten bereits im Lauf der Fabrikation, d. h. am Ort der Entstehung, weitmöglichst zu verhindern;
- die Abgase mittels geeigneter Verfahren zu reinigen;
- die Abgase durch den Ausstoß über hohe Kamine so weit zu verdünnen, daß keine wesentliche Verunreinigung der bodennahen Luftschichten zu befürchten ist.

Die letztere Methode stellt in jedem Fall nur eine Notlösung dar. Die Verfrachtung von Schwefeldioxid aus West- und Mitteleuropa nach Skandinavien zeigt dies eindrücklich.

Maßnahmen am Ort der Entstehung von Luftfremdstoffen können sein:

- Wahl des optimalsten Verfahrens;
- Änderung oder Verbesserung eines gegebenen Verfahrens;
- Auswahl besser geeigneter Rohstoffe, um Art und Menge der Abgaskomponenten günstig zu beeinflussen.

So ist bekannt, daß bei der Zellstoffherstellung das Sulfitverfahren in abgastechnischer Hinsicht dem Kraftverfahren überlegen ist; bei letzterem bereiten Geruchsemissionen erhebliche Schwierigkeiten. Die Auswahl des geeignetsten Verfahrens zur Herstellung eines bestimmten neuen Produktes bedingt natürlich, daß mehrere gangbare Wege zur Verfügung stehen. Es bedingt aber auch, daß die gesamten Maßnahmen zur Beseitigung von gasförmigen, flüssigen und festen Abfallstoffen als integrierender Teil der Verfahren behandelt werden. Diese Betrachtung ist im Begriff, sich mehr und mehr durchzusetzen; leider fehlen derzeit weitreichende Erfahrungen.

Ein Beispiel für die Verbesserung einer abgastechnischen Situation ist das Schwefelsäure-Doppelkontaktverfahren. Das ursprüngliche Kontaktverfahren arbeitete ohne Zwischenabsorption des Schwefeltrioxids mit Umsätzen von z. B. 97,5%. Das Doppelkontaktverfahren arbeitet mit einer Zwischenabsorption des Schwefeltrioxids nach etwa 90prozentigem Umsatz und liefert einen Gesamtumsatz von etwa 99,5%.

Durch eine sinnvolle Anwendung verfahrenstechnischer und physikalisch-chemischer Grundlagen ist es dabei gelungen, bei gegebener Produktionsmenge die Schwefeldioxidemission auf $\frac{1}{5}$ zu vermindern.

Dieses spezielle Beispiel hat aber auch gezeigt, daß Entwicklungen zur Verbesserung des Standes der Technik auf dem Sektor des Umweltschutzes oft vorerst eines äußeren Zwanges bedürfen.

Eine weitere Alternativlösung von Problemen der Luftreinhaltung stellt die eigentliche Abgasreinigung dar.

Für die Abscheidung von Stäuben und Aerosolen bieten sich mechanische Abscheider, Elektrofilter, Gewebefilter und Naßwäscher an. Gasförmige Stoffe können mittels Absorption, Adsorption, thermischer oder katalytischer Verbrennung aus Abgasen abgetrennt werden.

Die meisten Abgase enthalten bekannte Verunreinigungen, die entweder absorbiert, adsorbiert, oxydiert, reduziert oder mechanisch abgetrennt werden können.

Grundsätzlich kann jede Gasreinigung beliebig vollständig durchgeführt werden, sofern wirtschaftliche Aspekte außer acht gelassen werden. In der Praxis sind demgegenüber diese wirtschaftlichen Aspekte dafür bestimmend, in welchem Ausmaß eine Gasreinigung durchführbar ist.

Eine Analyse der Entwicklungen auf dem Gebiet der Abgastechnik zeigt leider, daß der Stand der Technik sich in den letzten zwanzig bis dreißig Jahren nicht sehr wesentlich verändert hat, und zwar ganz im Gegensatz zu demjenigen in der Produktionstechnik. Mitverantwort-

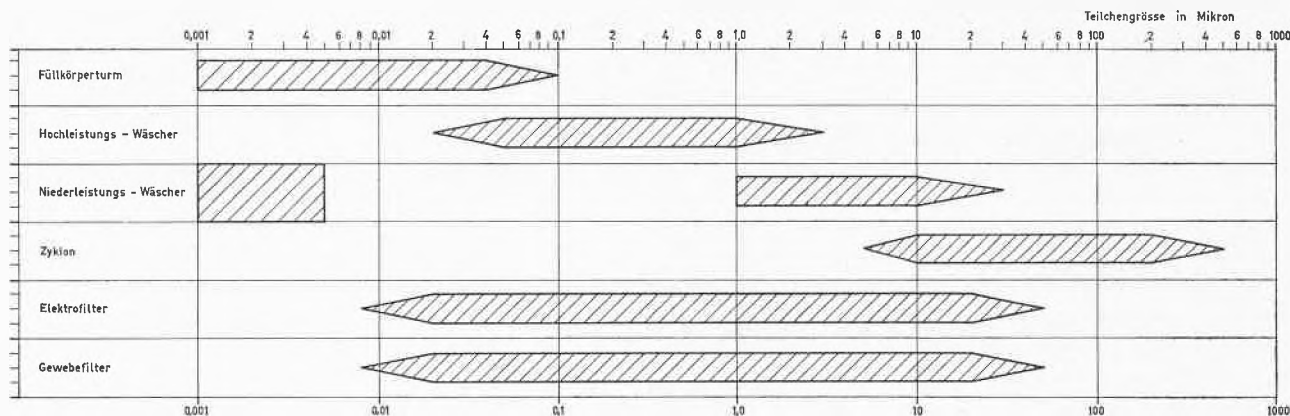


Abb. 2. Anwendungsbereich einiger typischer Gasreinigungsverfahren

lich dafür waren zweifellos unklare Zielsetzungen auf einem ohnehin kostspieligen technischen Gebiet. Es ist zu hoffen, daß sich in den nächsten Jahren diesbezügliche Fortschritte erzielen lassen.

5.2. Einige verfahrenstechnische Gesichtspunkte der Naßabscheidung

Bei der Abgasreinigung sind eine Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen, so die speziellen Charakteristika des Abscheideverfahrens, die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften der abzuscheidenden Stoffe sowie des Transport- und Abscheidemediums.

Für Probleme der Staub- und Gasabscheidung werden vielfach mechanische und absorptive Trennverfahren zur Anwendung gebracht.

Eine Klassierung kann in diesen Fällen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Wirkungsbereich der Abscheider und Teilchengröße gemäß Abb. 2 vorgenommen werden.

- In Wäschertypen mit geringem Energiebedarf, wie Füllkörperkolonnen und Niederleistungswäscher, wird entsprechend den verfahrenstechnischen Gegebenheiten die Abscheidung durch Diffusionsvorgänge beherrscht. Diese Abscheider eignen sich für die Abtrennung von Teilchen hoher Diffusionsgeschwindigkeit, d. h. für gasförmige Stoffe.
- Hochleistungswäscher mit hohem Energiebedarf, mechanische Abscheider, Elektrofilter und Gewebefilter sind aufgrund mechanischer Prinzipien (Trägheitskräfte, elektrostatische Kräfte) wirksam. Sie eignen sich insbesondere für die Staubabscheidung, wobei der Wirkungsgrad je nach Teilchengröße sehr unterschiedlich ausfällt. Es gilt zu beachten, daß bei Teilchengrößen über $1\ \mu\text{m}$ vorwiegend Trägheitskräfte, bei Teilchengrößen unter $0,1\ \mu\text{m}$ dagegen Diffusionsvorgänge die Abscheidung bestimmen. Es ist dies ein Grund dafür, daß in diesem Teilchengrößenbereich die Abscheidung am schwierigsten ist.

Simultane Abscheidung von Gasen und Aerosolen

Ausgehend von der vorangehenden Klassierung und der Tatsache, daß in der chemischen Industrie sehr häufig Naßabscheider eingesetzt werden, seien einige wesentliche Feststellungen zum Problem der simultanen Abscheidung von Gasen und Aerosolen gemacht.

- Abscheider weisen in den seltensten Fällen zugleich einen hohen Wirkungsgrad für die Gas- und Aerosolabscheidung auf. Für die gleichzeitige Abscheidung der beiden Luftfremdstoffarten ist deshalb zwei- oder mehrstufigen Abscheideverfahren der Vorzug zu geben.
- Die Abkühlung warmer oder heißer Gase in Absorptionssystemen kann zu Kondensationserscheinungen und damit zur Nebelbildung Anlaß geben. Da für die Gasabsorption ausgelegte Abscheider für Aerosole einen beschränkten Wirkungsgrad aufweisen, sind derartige Nebelbildungen weitmöglichst zu verhindern.
- Zuzug der Vielzahl von Abgaskomponenten in chemischen Betrieben besteht immer wieder die Möglichkeit der Bildung von Reaktionsaerosolen, wie z. B. von Ammoniumchlorid aus Ammoniak und Chlorwasserstoff. Da Aerosole jedenfalls schwieriger abscheidbar sind als die gasförmigen Komponenten, ist diesem Problem besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Abscheidung von Aerosolen

Für die Abscheidung von Aerosolen werden in chemischen Betrieben zumeist Hochleistungswäscher eingesetzt.

Nebst andern Fragen müssen dabei vor allem den Eigenschaften des Aerosols sowie der Energiebedarf in Betracht gezogen werden.

- Der Wirkungsgrad wird entscheidend durch die Teilchengrößenverteilung beeinflusst. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Energieaufwand und Teilchengröße, gleicher Abscheidegrad vorausgesetzt. Gemäß Tabelle 2 ist für feinere Aerosole eine größere Abscheideenergie aufzuwenden.

Analog kann der Abscheidegrad für ein gegebenes Aerosol im allgemeinen durch Erhöhung der Abscheideenergie verbessert werden.

- In Tabelle 3 sind charakteristische Teilchengrößenzusammensetzungen für drei Kondensationsaerosole zusammengestellt.

Es geht daraus hervor, daß die Anteile im schwer abscheidbaren Größenbereich unter $2 \mu\text{m}$ ganz erhebliche Unterschiede aufweisen, was bei der Wahl eines Abscheiders von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Tabelle 2. Energieaufwand für die Staubabscheidung

Teilchengröße μm	Energieaufwand kWh/1000 m^3
15-40	0,08 bis 0,15
5-15	0,15 bis 0,22
2-5	0,22 bis 0,32
2	0,32 bis 0,65

Tabelle 3. Beispiele von Teilchengrößenverteilungen in Aerosolen

Teilchengröße μm	Fraktionenanteile in Gewichtsprozent		
	Schwefelsäure	Oleum	Phosphorsäure
< 1	-	9	10
1 bis 2	1	42	35
2 bis 3	5	10	8
> 3	94	39	47

Abscheidung von Gas

Gasförmige Luftfremdstoffe lassen sich aus Abgasen mittels Füllkörperkolonnen, Blasentürmen, Wirblern, Strahlwäschern, Venturi-Wäschern, Sprühtürmen usw. abscheiden. Für den Wirkungsgrad maßgebende Kriterien leiten sich aus den verfahrenstechnischen Grundlagen des Stofftransportes ab. Es sei in diesem Zusammenhang auf zwei besondere Punkte hingewiesen:

- Auch bei der Gasabscheidung ist die Abscheideenergie von Bedeutung für den Wirkungsgrad. Entsprechend Abb. 3 besteht nach LUNDE³ ein Zusammenhang zwischen dem Abscheidegrad – als Anzahl Stoffübergangseinheiten N_{OG} angegeben – und der in Wäschertypen umgesetzten Energie.

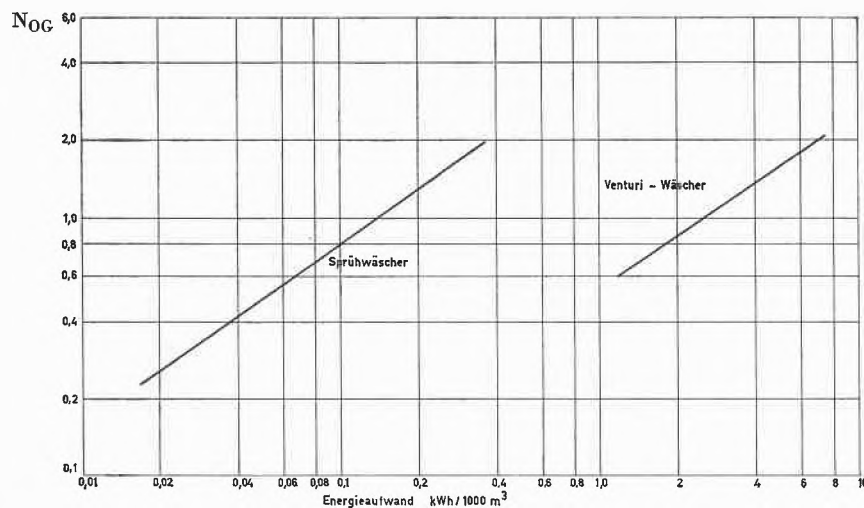
Die einem Wäscher zugeführte Energie erzeugt primär Turbulenz und wird für die Zerteilung des Waschmediums aufgewendet, was eine größere Austauschoberfläche und bessere Durchmischung zur Folge hat. Nach den Gesetzmäßigkeiten der Absorption wird der Absorptionsvorgang durch eine vergrößerte Austauschoberfläche begünstigt.

- Jede Gasabsorption ist zusätzlich zur Austauschoberfläche auch vom treibenden Konzentrationsgefälle abhängig und folgt gewissen Zeitgesetzen. Zwecks Erzielung hoher Wirkungsgrade unter möglichst geringem Energieaufwand sollten Abgase in möglichst konzentrierter Form und unverdünnt dem Abscheider zugeleitet werden, wobei zusätzlich die Einhaltung einer ausreichenden Verweilzeit des Gases im Wäscher gewährleistet sein muß.

Leider ist der Wirkungsgrad vieler Abscheidertypen von Änderungen der Betriebsbedingungen stark abhängig, was beim stoßweisen Anfall von Abgasen sehr nachteilig ist.

- Ein wichtiges Problem stellt bei allen Naßabscheidesystemen die Behandlung der Abfallstoffe in fester oder gelöster Form dar.

Früher wurden die Abwasserbehandlung, die Abgasreinigung sowie die Beseitigung fester Abfälle sehr oft als voneinander unabhängige Probleme angesehen und wurden entsprechend auch individuell behandelt. Nach den heutigen Erkenntnissen ist eine gesamtheitliche Lösung der Probleme unerlässlich. Es muß verhindert werden, daß ein Abfallproblem auf der Luftseite gelöst ist, dafür aber ein wenn möglich noch schlimmeres Abwasserproblem verursacht wird.



³ K. E. LUNDE, *Ind. Engng. Chem.* 50 (1958) 293.

Abb. 3. Zusammenhang zwischen Wirkungsgrad und Energieaufwand bei der Abscheidung von Fluorwasserstoff (LUNDE)

5.3. Einige Gesichtspunkte zum Problem der Geruchsbelästigung

Bei zahlreichen chemischen Prozessen treten neben andern Abgaskomponenten auch Geruchsstoffe auf, die zum Teil in sehr niedrigen Konzentrationen wahrnehmbar sind. Bei diesen Stoffen handelt es sich vielfach nicht um schädliche, sondern um lästige Stoffe. Entsprechend den Erläuterungen zum Verfassungsartikel 24 septies beeinträchtigen lästige Einwirkungen die betroffenen Menschen in ihrem Dasein. Entsprechend haben üble Gerüche deshalb als Luftverunreinigung zu gelten.

Leider sind Probleme von Geruchsimmissionen nicht einfach zu lösen, und zwar aus folgenden Gründen:

- In technischer Hinsicht handelt es sich darum, kleinste Mengen von Geruchsstoffen aus großen Abgasmengen zu entfernen. Gleichgültig darum, ob die Abscheidung mittels Adsorption, thermischer oder katalytischer Verbrennung vorgenommen wird, ist ein erheblicher Aufwand von Energie und Apparaten notwendig. Zusätzlich kann das Entweichen von unangenehmem Geruch aus diffusen Quellen den Erfolg von Maßnahmen an den definierten Quellen vermindern.
- Die Geruchsempfindung des einzelnen Menschen ist sehr unterschiedlich, und zwar hinsichtlich der Wahrnehmungsgrenze wie auch in der Bewertung. Eine allgemeine Definition einer lästigen Einwirkung ist deshalb sehr schwierig. Psychiater weisen darauf hin, daß die positive oder negative Einstellung zu einem Geruch öfters von einer Assoziation zu einem angenehmen oder unangenehmen Erlebnis begleitet ist.
- Eine Bewertung von unangenehmen Gerüchen ist praktisch nur über Gruppenversuche mit Testpersonen möglich und erfordert einigen Aufwand.

Ein Beispiel für eine solche Bewertung geht aus Abb. 4 für die Abgase einer Fischmehlfabrik hervor. Die Abgase wurden hiezu in verschiedenem Ausmaß mit reiner Luft verdünnt und der prozentuale Anteil der Testpersonen festgestellt, die bei einem bestimmten Verdünnungsverhältnis den Geruch als unangenehm riechend empfanden. Aufgrund derartiger Untersuchungen können Geruchsschwellenwerte festgelegt werden.

Es gibt zweifellos heute noch keine Universalverfahren zur Geruchsbeseitigung, und sehr oft fehlen spezifische Erfahrungen noch weitgehend.

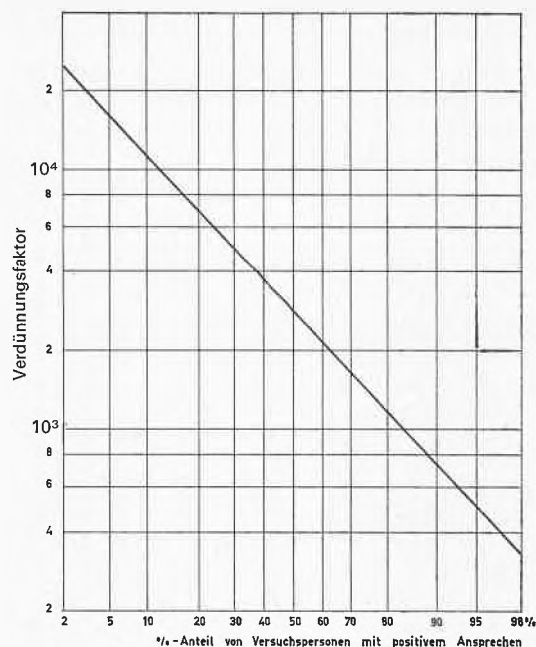


Abb. 4. Geruchsbewertung von Abgasen einer Fischmehltrocknungsanlage

6. Schlussfolgerungen

Die Notwendigkeit der Reinhaltung der Luft dürfte heute unbestritten sein. Hinsichtlich der Beurteilung der Auswirkungen von Luftfremdstoffen, der Methodik zu deren Erfassung und Beseitigung bestehen noch große Wissenslücken, die es durch eine gezielte und koordinierte Zusammenarbeit aller interessierten Kreise zu schließen gilt. Diese Zusammenarbeit ist um so notwendiger, als die Probleme zu komplex sind, um isoliert mit langfristigem Erfolg gelöst werden zu können.

Es mag oft scheinen, daß in Anbetracht der zur Verfügung stehenden technischen Mittel die Verhinderung einer weiteren Verschmutzung oder gar eine schrittweise Verbesserung der Luft ein bescheidenes Ziel darstelle, doch gilt es zu bedenken, daß es sich gesamthaft um dynamische Probleme handelt. Durch das Bevölkerungswachstum und die gesteigerte Produktion verschiedener Güter wächst auch der Anfall an luftfremden Stoffen, wenn er nicht durch technologische Fortschritte, wirkungsvolle Maßnahmen und den Willen jedes einzelnen stetig bekämpft wird.